

ESPECIAL

Hubble

SCIENTIFIC
AMERICAN™

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

ESPECIAL Hubble

CONTENIDO



Una selección de nuestros mejores artículos para ahondar en la ciencia del telescopio espacial **Hubble**.

Veinticinco años del Hubble

Axel M. Quetz y Uwe Reichert
Investigación y Ciencia, mayo de 2015

Primeros resultados del telescopio espacial Hubble

Eric J. Chaisson
Investigación y Ciencia, agosto de 1992

Los 10 descubrimientos principales del Hubble

Mario Livio
Investigación y Ciencia, septiembre de 2006

El encuentro del cometa Shoemaker-Levy 9 con Júpiter

David H. Levy, Eugene M. Shoemaker y Carolyn S. Shoemaker
Investigación y Ciencia, octubre de 1995

Los primeros días de la vida de una estrella

Thomas P. Ray
Investigación y Ciencia, octubre de 2000

La muerte de las estrellas comunes

Bruce Balick y Adam Frank
Investigación y Ciencia, octubre de 2004

Asociaciones galácticas

Kimberly Weaver
Investigación y Ciencia, septiembre de 2003

Las galaxias del universo joven

F. Duccio Macchetto y Mark Dickinson
Investigación y Ciencia, julio de 1997

Cuando la aceleración cambió de signo

Adam G. Riess y Michael S. Turner
Investigación y Ciencia, abril de 2004

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1ª, 08021 Barcelona (España)
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

Copyright © Prensa Científica, S.A. y Scientific American, una división de Nature America, Inc.

ESPECIAL n.º 6 ISSN: 2385-5657

Axel M. Quetz es físico y redactor de *Sterne und Weltraum*.



Uwe Reichert es doctor en física aplicada y redactor jefe de *Sterne und Weltraum*.



ASTRONOMÍA

Veinticinco años del Hubble

Un cuarto de siglo después de su puesta en órbita, el telescopio espacial Hubble sigue siendo uno de los mejores instrumentos astronómicos de todos los tiempos. Sus resultados han acuñado, en un sentido literal, la imagen que el público tiene del cosmos

Axel M. Quetz y Uwe Reichert

DESDE HACE 25 AÑOS, EL TELESCOPIO ESPACIAL HUBBLE nos deleita con excepcionales fotografías relativas a todas las áreas de la investigación astronómica. Sus observaciones han retratado desde los cuerpos del sistema solar hasta galaxias remotas que nunca antes habíamos visto. Sin miedo a exagerar, podemos decir que su archivo de imágenes constituye una valiosa aportación al patrimonio cultural de la humanidad.

A pesar de la gran variedad de objetos celestes fotografiados por el Hubble, todas las imágenes guardan algo en común: su extraordinaria nitidez, posible gracias a un espejo de 2,4 metros de diámetro al que se le permite operar desde el espacio. El telescopio orbita alrededor de la Tierra a una altitud de 560 kilómetros, muy por encima de la atmósfera y sus efectos distorsionadores.

Hoy ya casi hemos olvidado que el observatorio, con un coste inicial de 2500 millones de dólares, no funcionó a la perfección

desde el primer momento. Aunque su espejo primario fue pulido con gran precisión, su geometría se desviaba ligeramente de la buscada; sin duda, uno de los problemas técnicos más embarazosos de la historia de la ciencia. Durante tres años y medio, los astrónomos tuvieron que arreglárselas con fotografías borrosas que, tras grandes esfuerzos, lograban mejorar mediante técnicas de procesamiento de imagen. Por fortuna, el problema se solventó: en diciembre de 1993, la NASA envió el sistema de corrección óptica COSTAR a bordo de la lanzadera espacial *Endeavour*. Tras apresarse el telescopio con el largo brazo mecánico del transbordador, los astronautas reemplazaron uno de sus instrumentos científicos con el dispositivo corrector. Desde entonces, el Hubble ve perfectamente.

Los progresos técnicos se han sucedido desde el lanzamiento del telescopio. Otras cuatro misiones de mantenimiento, en los años 1997, 1999, 2002 y 2009, han servido para dotar al Hubble de instrumentos ópticos cada vez más avanzados. Estos se





Ficha técnica

Con un espejo primario de 2,4 metros, el telescopio espacial Hubble sobrevuela la Tierra en una órbita casi circular y sin ningún tipo de propulsión. Estas son sus principales características.

Operadores:	NASA/ESA
Dimensiones:	13,1 metros de largo; 4,3 metros de diámetro máximo
Lanzamiento:	24 de abril de 1990
Altitud de la órbita:	560 kilómetros
Período orbital:	95,8 minutos
Fuentes de energía:	Paneles solares, 6 baterías
Mantenimiento:	5 misiones con transbordadores espaciales en 1993, 1997, 1999, 2002 y 2009
Instrumentos:	Cámara de Campo Amplio (WFC3, desde 2009); Espectrógrafo de Imágenes del Telescopio Espacial (STIS, desde 1997); Espectrógrafo de Orígenes Cósmicos (COS, desde 2009); Cámara Avanzada para Exploraciones (ACS, desde 2002)
Fin de la misión:	2024 (desintegración en la atmósfera)

Mantenimiento en el espacio

El telescopio espacial Hubble fue construido de manera que su mantenimiento pudiera realizarse en órbita. Cinco misiones con transbordadores espaciales han servido para repararlo e incorporar mejoras técnicas. Durante la última de ellas, efectuada por la lanzadera *Atlantis* en mayo de 2009, los astronautas instalaron nuevos instrumentos y reemplazaron los giróscopos y baterías previos con nuevos modelos. Gracias a ello, lograron prolongar la vida útil del telescopio.

diseñaron para compensar el error del espejo primario, con lo que al final el sistema COSTAR se tornó superfluo. En la última de estas misiones se instaló la tercera versión de una cámara de alta resolución, la Cámara de Campo Amplio 3 (Wide Field Camera 3). Con un campo de visión de 164×164 segundos de arco, cada uno de sus píxeles cubre una porción de cielo de 0,04 segundos de arco.

Pero la importancia científica del Hubble va mucho más allá de sus fotografías, indudablemente hermosas. Sus espectrógrafos han obtenido también excelentes resultados. Por esta razón, a pesar de su avanzada edad y de las alternativas que hoy ofrecen los telescopios terrestres modernos, el Hubble sigue siendo muy codiciado. Para el ciclo 22 (el período de observación entre octubre de 2014 y septiembre de 2015) se recibieron más de mil solicitudes que, en conjunto, suponían un tiempo de observación seis veces mayor que el disponible. Su producción científica no resulta menos impresionante. Hasta la fecha, se han publicado más de 12.000 artículos basados en los datos del telescopio.

En ausencia de problemas técnicos, el instrumento seguirá operando hasta 2024. Dado que carece de motores propios y que ya no hay lanzaderas espaciales que puedan transportarlo a una órbita más alta, sus días están contados. Debido al rozamiento con las moléculas atmosféricas que aún persisten a 560 kilómetros de la superficie terrestre, su altitud irá disminuyendo progresivamente. En 2024, el telescopio habrá descendido tanto que se desintegrará en la atmósfera.

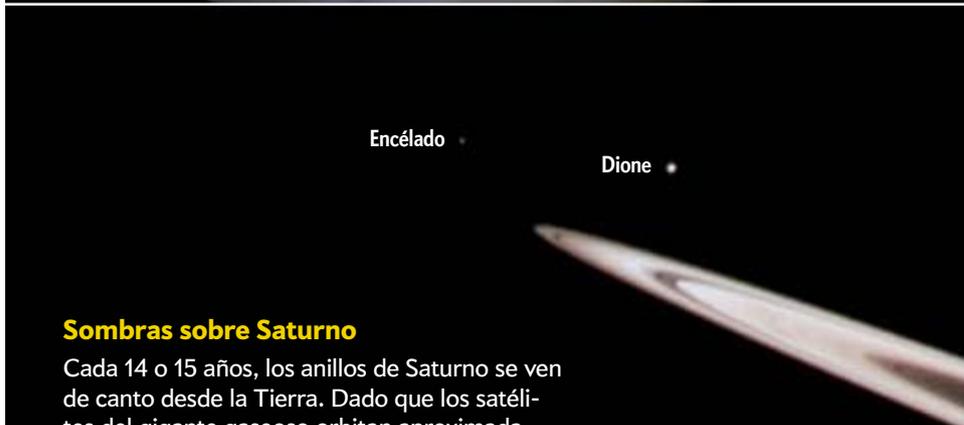
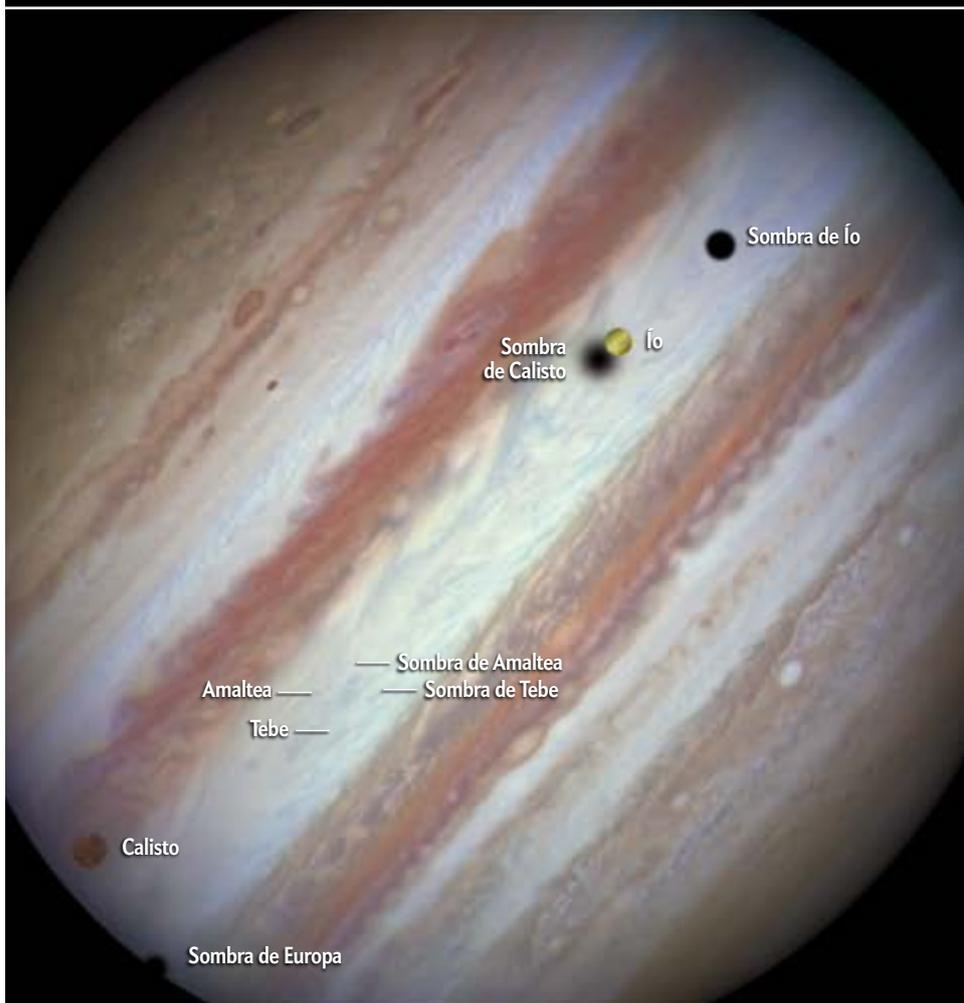
Su sucesor, el telescopio espacial James Webb, tiene previsto su lanzamiento para 2018. A diferencia del Hubble, que observa principalmente en el visible, el James Webb ha sido diseñado para trabajar en el infrarrojo. Ello le permitirá cumplir con su misión científica de manera óptima, pero, sin duda, echaremos de menos las impactantes fotos del Hubble. A modo de homenaje en el mes de su vigésimo quinto aniversario, a continuación rescatamos algunas.

PARA SABER MÁS

15 Jahre Weltraumteleskop Hubble: Chronik der Mission. T. Althaus en *Sterne und Weltraum*, julio de 2005.

EN NUESTRO ARCHIVO

Primeros resultados del telescopio espacial Hubble. Eric J. Chaisson en *lyC*, agosto de 1992.
Los 10 descubrimientos principales del Hubble. Mario Livio en *lyC*, septiembre de 2006.



Sombras sobre Saturno

Cada 14 o 15 años, los anillos de Saturno se ven de canto desde la Tierra. Dado que los satélites del gigante gaseoso orbitan aproximadamente en el mismo plano que el que ocupa su sistema de anillos, la alineación permite admirar los tránsitos de sus lunas y ver sus sombras proyectadas sobre el planeta. El 24 de febrero de 2009, el Hubble captó imágenes de cuatro satélites cuando pasaban por delante del planeta anillado. El mayor de ellos, Titán, proyecta su silueta sobre el polo norte. Cerca de él se encuentra Mimas, una luna mucho menor cuya diminuta sombra cae sobre las nubes cercanas al ecuador. Fuera del disco planetario pueden verse Dione y Encélado. Aunque en el momento de la fotografía Saturno se encontraba a 1250 millones de kilómetros de la Tierra, el Hubble logró distinguir detalles de hasta 300 kilómetros de ancho sobre la superficie del gigante gaseoso.

El tránsito de las lunas de Saturno y sus sombras puede verse en hubblesite.org/news-center/archive/releases/solar%20system/2009/12/video/b/



Júpiter y sus lunas

De tanto en tanto, desde la Tierra puede verse cómo uno de los cuatro satélites galileanos cruza el disco de Júpiter. En raras ocasiones, varias de sus sombras se cierran al mismo tiempo sobre la superficie del planeta. Un tránsito múltiple se produjo hace cuatro meses, el 24 de enero. Calisto e Ío pasan por delante del disco, mientras sus sombras y la de Europa —a la izquierda y fuera de la imagen— se ven como manchas oscuras sobre las nubes jovianas. Un ojo bien entrenado distinguiría también las pequeñas lunas Amaltea y Tebe, así como sus sombras sobre el planeta.

El tránsito de los satélites galileanos y sus sombras puede verse en

spacetelescope.org/videos/heic1504a/



Nuestro modesto vecino

Debido a su pequeño tamaño aparente, Marte resulta ingrato a la observación astronómica: la imagen inferior lo muestra a la misma escala que Júpiter y Saturno en esta misma página. A pesar de todo, el Hubble puede distinguir detalles de hasta 16 kilómetros sobre la superficie del planeta rojo. Esta imagen, tomada el 26 de junio de 2001, revela nubes de hielo de color blanquecino y tormentas de polvo en tonos anaranjados.

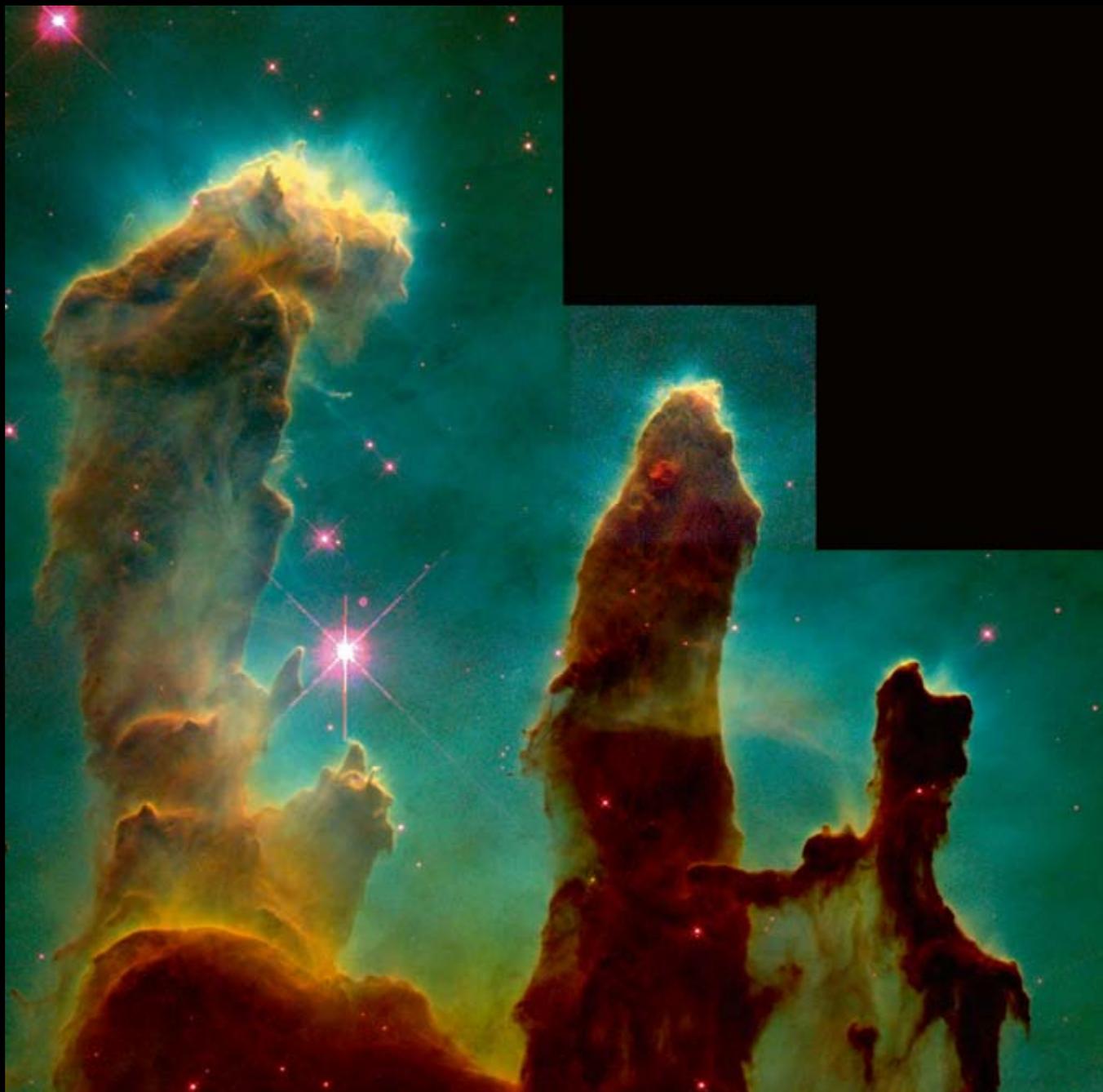


Sombra de Titán

Titán

Mimas

Sombra de Mimas



Los Pilares de la Creación: 1995 y 2015

Una de las imágenes más reproducidas del Hubble fue tomada en 1995 (*arriba*). Bautizadas como los Pilares de la Creación, estas columnas de polvo e hidrógeno gaseoso se alzan en el centro de la nebulosa del Águila, o M16, situada a 6500 años luz de la Tierra, en la constelación de Serpens. Con una longitud de unos cuatro años luz, constituyen una región de formación estelar remanente de una nube molecular mayor, en la que el gas se contrajo por efecto de la gravedad y dio lugar a varias protoestrellas. Tras la ignición de las estrellas jóvenes, los vientos estelares y la radiación ultravioleta comenzaron a disolver la nube inicial. Los pilares son las zonas que aún sobreviven a la erosión, como si de formaciones rocosas expuestas a las inclemencias del tiempo se tratase.

El Hubble fotografió la misma región veinte años después (*derecha*). Gracias a sus mejores cámaras, la nueva imagen goza de una resolución y un contraste mucho mayores: una riqueza de detalles que ha permitido estudiar en más detalle el proceso de formación estelar. Los diferentes colores se deben a la composición de varias exposiciones, correspondientes a distintos intervalos de longitudes de onda.

NASA/ESA/STScI/J. HESTER/P. SCOWEN/UNIVERSIDAD ESTATAL DE ARIZONA
(Pilares de la Creación, 1995); NASA/ESA/HUBBLE/EQUIPO DEL LEGADO DEL
HUBBLE (Pilares de la Creación, 2015)





El eco de la supergigante roja V838 Monocerotis

La primera impresión que transmite esta serie de imágenes de la supergigante roja V838 Monocerotis, en la constelación de Monoceros, resulta engañosa: no es que la capa de polvo que rodea a la estrella se esté expandiendo, sino que un halo de luz ilumina zonas cada vez más distantes de una nube de polvo. Expulsada por la estrella en erupciones previas, dicha nube se mantuvo prácticamente inalterada desde que el astro emitió un intenso destello de luz. Su apariencia cambiante se debe a que primero

llegó a nuestro planeta la luz que viajó en línea recta. En los instantes posteriores, se observa la radiación reflejada en la nube de polvo a lo largo de una superficie con forma de paraboloide de revolución. Cuanto más tarda la luz en llegar a la Tierra, mayor es el tamaño del paraboloide correspondiente. De esta manera, el fenómeno ha ido revelando poco a poco regiones cada vez más externas de la capa de polvo. Todas las imágenes de esta serie se encuentran a la misma escala.



Danza cósmica

Las galaxias espirales NGC 2207 (izquierda) e IC 2163 (derecha), en la constelación del Can Mayor, parecen una pareja de baile sobre un escenario cósmico... solo que su número ha durado miles de millones de años. La atracción gravitatoria ha deformado de manera considerable la menor de ellas, a la que ha arrancado corrientes de gas y estrellas, las cuales se extienden unos 100.000 años luz hacia la derecha de la imagen. En un futuro lejano, ambas galaxias se fundirán en una sola.

Diciembre de 2002



Octubre de 2004



NASA/ESA/STSCI/AURA/EQUIPO DEL LEGADO DEL HUBBLE (nebulosa del Espirógrafo); NASA/ESA/STSCI/AURA/EQUIPO DEL LEGADO DEL HUBBLE. ESA/CO-LABORACIÓN HUBBLE/NASA/ESA/IL. E. BOND/STSCI. A. EVANS/UNIVERSIDAD DE VIRGINIA EN CHARLOTTESVILLE/NRAO/UNIVERSIDAD STONY BROOK/K. NOLL/STScI/J. WESTPHAL/CALTECH (Arp 148)



El Espirógrafo

La nebulosa planetaria IC 418, en la constelación de Lepus, brilla como si de una gema se tratase. A pesar de su nombre, estas nebulosas poco tienen que ver con los planetas: surgen cuando una estrella similar al Sol llega al final de sus días y expulsa sus capas externas. Aunque IC 418 puede observarse con un telescopio de aficionado, esta imagen en colores falsos del Hubble revela las sutiles estructuras geométricas que le valieron el apodo de «nebulosa del Espirógrafo».



Galaxias en colisión

Arp 148, el objeto número 148 en el catálogo de galaxias peculiares compilado por Halton Arp, es una de las fusiones galácticas estudiadas por el telescopio Hubble. Se encuentra a casi 500 millones de años luz de la Tierra, en la zona del cielo que ocupa la Osa Mayor. Su peculiar forma obedece al resultado de la colisión: al parecer, el impacto entre las nubes de gas creó una onda de choque que hizo que la materia se propagase hacia fuera y formase un anillo. Dado que las estrellas son diminutas en comparación con la distancia que las separa, salen indemnes de este cataclismo cósmico; simplemente, se ven desplazadas hacia otras órbitas.



Nubes y colosos estelares

La imagen superior conforma una de las mayores panorámicas tomadas por el Hubble. Muestra una región de 50 años luz de ancho en el centro de la nebulosa de Carina, situada a unos 7500 años luz de la Tierra. La pintoresca mezcla de nubes de gas y polvo es el resultado de la radiación ultravioleta y los vientos estelares emitidos por estrellas gigantes: más de una docena de ellas, cada una con una masa de entre 50 y 100 veces la del Sol, se ocultan bajo la nebulosa. Sus vientos y su radiación de alta energía van destruyendo poco a poco los restos de la nube molecular a partir de la cual se originaron, al tiempo que desencadenan la formación de otras estrellas. Una de estas estrellas gigantes es Eta Carinae, que explotará

en forma de supernova en un futuro no muy lejano. Hace 4600 millones de años, la formación del Sol y otras estrellas cercanas pudo haber tenido lugar a partir de procesos tan turbulentos como los que se observan en la nebulosa de Carina.

Con un poco de imaginación, en el colorido paisaje de la nebulosa podremos reconocer calaveras, dragones y otros objetos legendarios. La propia constelación de Carina, en la que se observa esta nebulosa, hace referencia a la quilla (*carina*, en latín) de la antigua constelación de Argo Navis, la nave de los argonautas que, capitaneada por Jasón, navegó desde Grecia hasta la costa este del Mar Negro en busca del vellocino de oro.



La imagen de la derecha, tomada en 2010, reproduce un detalle de la nebulosa. Al igual que los Pilares de la Creación, estas torres de polvo y gas de unos tres años luz de largo constituyen una región de formación de estrellas. En la cima de los pilares pueden distinguirse chorros de materia que fluyen en direcciones opuestas. Conocidos como objetos de Herbig-Haro, estos revelan la existencia de estrellas recién nacidas.

SUSCRÍBETE a Investigación y Ciencia...



Ventajas para los suscriptores:

- **Envío** puntual a domicilio
- **Ahorro** sobre el precio de portada
75 € por un año (12 ejemplares)
140 € por dos años (24 ejemplares)
- **Acceso gratuito** a la edición digital (artículos en pdf)

... y recibe gratis 2 números de la colección TEMAS



www.investigacionyciencia.es/suscripciones

Primeros resultados del telescopio espacial Hubble

Pese a sus imperfecciones ópticas y mecánicas, el Hubble ha retransmitido gran abundancia de imágenes sorprendentes y reveladores retratos espectrales de distintos objetos cósmicos

Eric J. Chaisson

El 25 de abril de 1990, el telescopio espacial *Hubble* era desplegado desde el transbordador espacial *Discovery*, marcando así el comienzo de una nueva era en la astronomía óptica. Los telescopios ópticos terrestres, desde los primitivos catalejos de Galileo hasta el recién estrenado telescopio Keck, se han visto obstaculizados por la atmósfera inquieta y distorsionante de la Tierra. En cambio, el *Hubble* fue concebido para observar el cosmos desde su atalaya, a 610 kilómetros de la superficie terrestre, con una claridad sin precedentes.

Sin embargo, no es ningún secreto que el telescopio no ha funcionado como se esperaba. Cierta número de fallos mecánicos y de diseño —especialmente la deformación de su espejo principal— han degradado la capacidad del telescopio, consternando a la comunidad astronómica y provocando una oleada de críticas desde los medios de comunicación. Pese a todo, gracias a improvisados cambios de método y a innovadoras técnicas de corrección de imagen por ordenador, el *Hubble* ha conseguido igualar la sensibilidad y superar el poder resolutivo de los mejores telescopios asentados en tierra. Es capaz incluso de detectar rayos ultravioleta —radiación de longitud de

onda algo más corta que la de la luz visible— que no atraviesan la atmósfera terrestre.

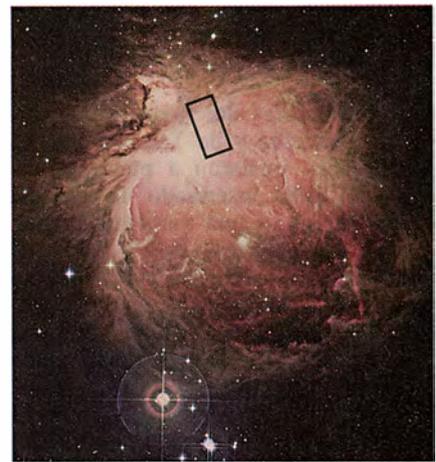
Durante sus dos primeros años de operación, el telescopio espacial ha proporcionado espectaculares imágenes de tormentas en Saturno, del nacimiento y muerte de estrellas, y de enigmáticos objetos que laten casi inadvertidos en los corazones de las galaxias, tal vez gigantes agujeros negros. Por separado, ninguno de los descubrimientos realizados por el *Hubble* puede todavía calificarse de revolucionario, pero tomados en conjunto están logrando que los astrónomos se apresuren a reescribir sus libros de texto.

Con sus 11.500 kilos (seis veces el peso de un automóvil familiar), el telescopio *Hubble* es, sin duda, el observatorio civil más complejo y sensible que haya sido lanzado al espacio. Su espejo primario, de 2,4 metros de diámetro, es el mejor pulimentado y más limpio de los que hoy existen, y su avanzado sistema de guiado le mantiene enclavado sobre sus objetivos, aun orbitando velozmente la Tierra cada 96 minutos. Cuenta además con cinco instrumentos para analizar la luz que recoge.

La cámara de objetos débiles, o tenues (“Faint Object Camera”), ofrece una resolución y una sensibilidad excepcionales, mientras que la cámara planetaria y de campo ancho (“Wide Field and Planetary Camera”) permite la visión de un campo más extenso. Del mismo modo, dos espectrógrafos (el espectrógrafo de objetos débiles y el espectrógrafo Goddard de alta resolución) comparten la tarea de fraccionar la luz en sus distintas longitudes de onda componentes para así revelar la constitución dinámica y física del objeto observado. Un fotómetro se encarga de determinar el brillo exacto de las fuen-

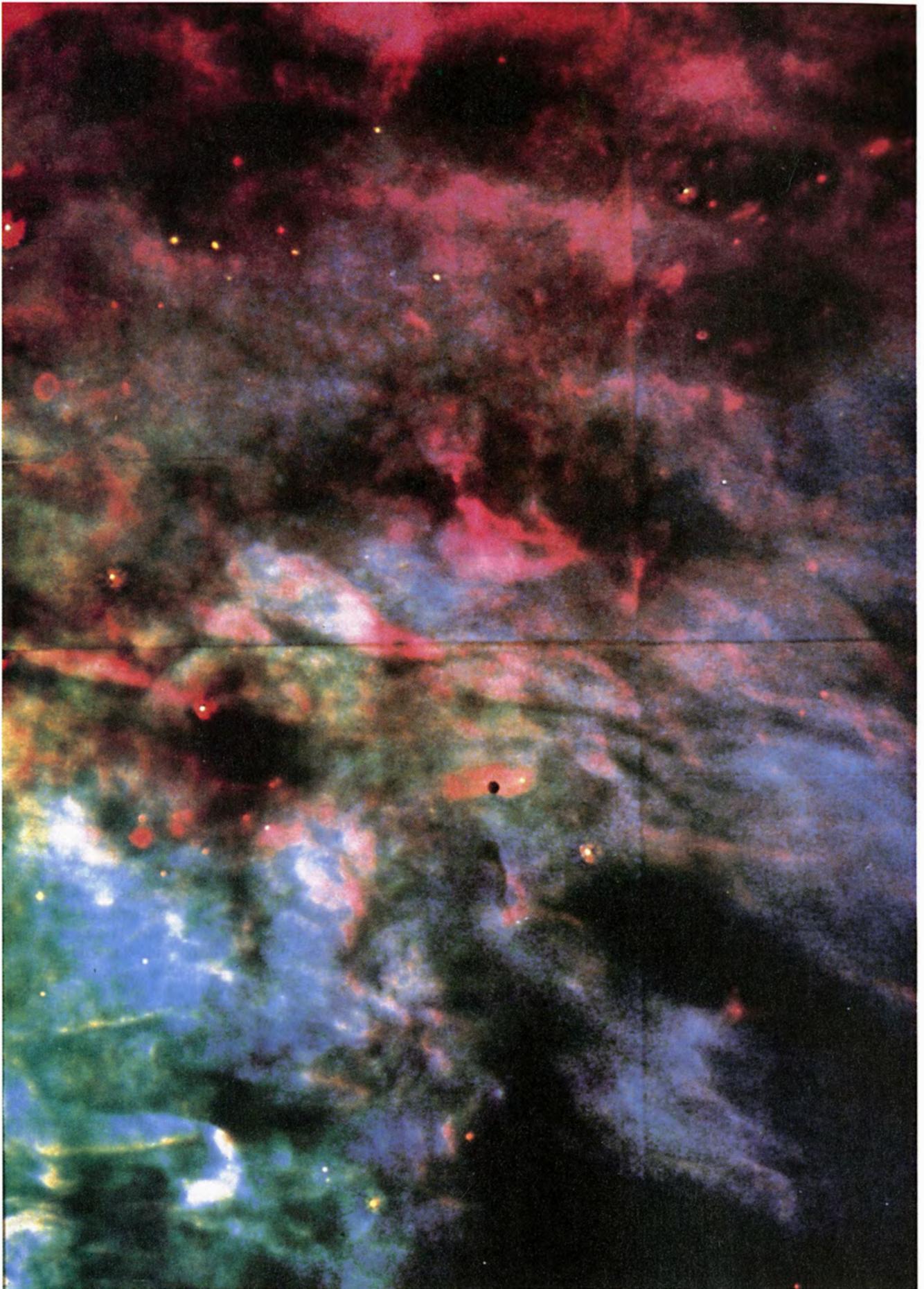
tes. Además, el *Hubble* está equipado con sensores de guiado para realizar astrometría, que consiste en la medición exacta de la posición angular de las estrellas.

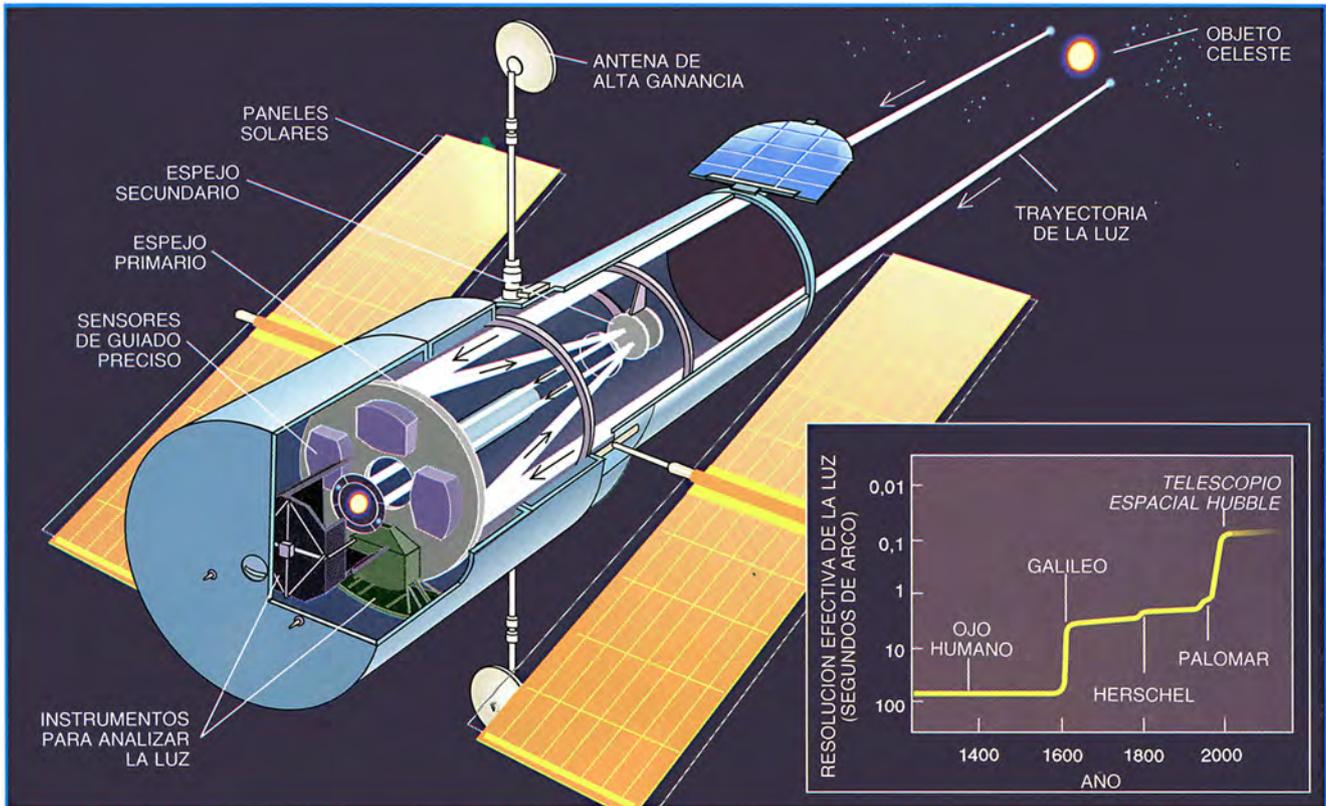
Inmediatamente después del lanzamiento del *Hubble*, los técnicos del Centro Goddard de Vuelos Espaciales (dependiente de la NASA) y del Instituto de Ciencia del Telescopio Espacial emprendieron una extensa serie de calibraciones y comprobaciones del sistema. Las primeras imágenes de prueba revelaron un problema inherente de enfoque, lla-



1. LA NEBULOSA DE ORION, nube de gas hidrógeno de 10 años-luz de diámetro, ilustra la capacidad del telescopio espacial *Hubble*. Se han obtenido numerosas fotografías de ella desde telescopios terrestres (arriba), mientras que la imagen de la región recuadrada conseguida por el *Hubble* (derecha) muestra un accidente en forma de tubo doblado (abajo) y numerosos vestigios y filamentos hasta ahora jamás detectados. La formación en chorro (izquierda) parece consistir en materia que fluye desde una estrella recién nacida. La imagen es un compuesto de luz azul emitida por oxígeno ionizado, luz roja procedente de azufre ionizado y luz verde de hidrógeno neutro.

ERIC J. CHAISSON, adscrito al proyecto Hubble, dirige programas educativos en el Instituto de Investigación Científica del Telescopio Espacial, ubicado en la Universidad Johns Hopkins, donde es, además, profesor de física. En 1972 Chaisson se doctoró en astrofísica por la Universidad de Harvard. Ha publicado numerosos trabajos sobre relatividad y cosmología y extiende su interés a la evolución termodinámica de sistemas materiales.





2. TELESCOPIO ESPACIAL HUBBLE y su afinidad de diseño con los modernos telescopios reflectantes terrestres. Su espejo principal, de 2,4 metros de diámetro, recoge la luz que después se distribuye entre cinco instrumentos analizadores. El defecto

de enfoque del telescopio es una consecuencia de la curvatura incorrecta del espejo primario. El Hubble supera la resolución de los telescopios terrestres casi en igual grado que el telescopio de Galileo mejoró la resolución del ojo humano (recuadro).

mado técnicamente aberración esférica. El examen más detenido de las imágenes llevó a un grave descubrimiento: por un error en el pulimentado la forma del espejo principal del telescopio era dos micrometros más plana en los bordes que lo estipulado en el diseño. Por insignificante que pueda parecer esta imperfección, se trata de un craso error según los cánones de la óptica de precisión moderna.

La forma del espejo hace que sea imposible enfocar sobre un mismo punto toda la luz que recoge el Hubble. Los diseñadores del telescopio se habían propuesto que el telescopio fuese capaz de concentrar un 70 por ciento de la luz de una fuente puntual —una estrella lejana, por ejemplo— en un punto de 0,1 segundos de arco de diámetro (un segundo de arco es un ángulo diminuto, equivalente a 1/1800 del diámetro aparente de la Luna). Sin embargo, en la realidad, sólo un 15 por ciento de la luz captada cae sobre esta imagen central, dispersándose el 85 por ciento restante sobre un halo no deseado de varios segundos de arco de diámetro.

También han aparecido otras dificultades: en dos posiciones de cada

órbita, cuando el Hubble entra y sale de la sombra de la Tierra, el brusco cambio de temperatura producido hace que los grandes paneles de células solares del telescopio se agiten 30 centímetros hacia arriba y hacia abajo cada 10 segundos, de lo que resulta una fluctuación capaz de desajustar el sistema de puntería del telescopio e introducir borrosidad adicional en las imágenes astronómicas. Dos de los seis giróscopos que posee el Hubble han dejado de funcionar y un tercero lo hace intermitentemente, siendo así que el telescopio necesita al menos tres giróscopos para realizar sus operaciones científicas normales. Por último, se han observado contactos eléctricos defectuosos que amenazan con inhabilitar el espectrógrafo de alta resolución.

La NASA espera poder resolver algunos de estos problemas en 1994, fecha en la que se prevé la visita de un grupo de astronautas al Hubble para reemplazar los paneles solares del telescopio y dos de los giróscopos. También se espera que puedan instalar módulos de óptica correctiva y una versión mejorada de la cámara planetaria y de campo ancho, si para entonces se han terminado los nuevos dispositivos.

Mientras tanto, los científicos han aprendido con rapidez a estrujar hasta el límite las posibilidades del telescopio espacial. Puesto que el espejo del Hubble se pulimentó con una precisión extrema y se conoce muy bien la naturaleza de su defecto, se han empleado técnicas de perfeccionamiento informatizadas para devolver a un gran número de imágenes la nitidez deseada. Las imágenes astronómicas obtenidas han rebatido elocuentemente cierto pesimismo que en un principio reinaba sobre las capacidades científicas del telescopio. Por desgracia, sin embargo, el logro de tal resolución a menudo implica rechazar los halos manchados observados, desechando así, literalmente, la mayor parte de la luz captada por el Hubble.

El contratiempo más grave de la misión científica del Hubble no ha sido, pues, la pérdida de resolución sino la merma de sensibilidad. Se le proyectó para detectar objetos miles de millones de veces más tenues que los que pueden apreciarse a simple vista, y en la actualidad se encuentra limitado a la observación de objetos aproximadamente 20 veces más brillantes de lo que se había previsto. No puede detectar ciertas fuentes,

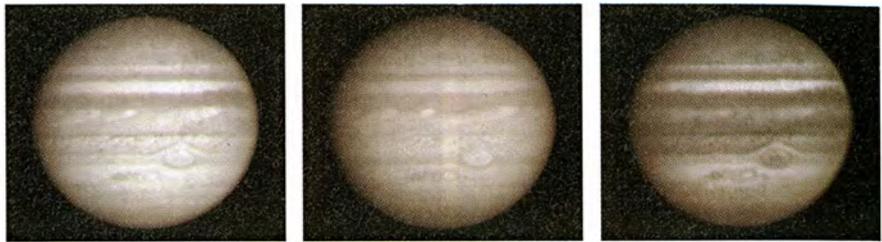
particularmente esquivas, como galaxias y cuásares remotos, ni posibles planetas en la vecindad de estrellas cercanas. Los astrónomos se han visto obligados a posponer muchas de sus observaciones de mayor valor potencial hasta que el telescopio sea reparado.

Aun cuando fuera diseñado para apuntar con precisión a algunos de los objetos cósmicos más remotos, el *Hubble* ha demostrado ser muy adecuado para el estudio de objetos situados dentro del sistema solar, y como ejemplo ha captado asombrosas imágenes de los planetas gigantes, Júpiter y Saturno. Las dos sondas espaciales *Voyager* de la NASA examinaron de cerca a Júpiter en 1979, y a Saturno en 1980 y 1981. Las imágenes que de estos planetas obtiene el telescopio espacial de modo rutinario son comparables en detalle a las que consiguieron los *Voyager* tan sólo unos días antes de su máxima aproximación a dichos planetas.

Cuando el *Hubble* examinó a Júpiter, se encontró con un mundo notablemente diferente del que visitaron los *Voyager* 1 y 2. Nuevas bandas de nubes han aparecido y desaparecido, han surgido numerosas manchas (tormentas similares a los ciclones, que cubren, algunas, miles de kilómetros) y ha emergido una estructura turbulenta en el borde del "gran cinturón ecuatorial sur" del planeta. La famosa "gran mancha roja", huracán aparentemente perpetuo cuyo diámetro duplica el de la Tierra, ha cambiado su color a un opaco tono entre naranja y marrón.

Las primeras imágenes de Saturno captadas por el *Hubble* ilustran espectacularmente el poder resolutivo del telescopio. William A. Baum, del Observatorio Lowell, y Shawn P. Ewald, del Instituto de Ciencia del Telescopio Espacial, ensamblaron una imagen en color de Saturno tras haber programado al *Hubble* para que tomase tres exposiciones del planeta, de un segundo de duración cada una, en luz roja, verde y azul. Los expertos en imagen del laboratorio de visualización astronómica del citado instituto consiguieron de este modo una imagen en color, mejorada por medio de ordenador, en la que se recoge la estructura detallada de las bandas de nubes y los anillos de Saturno, y se contemplan las primeras vistas de alta resolución de la región polar situada al norte del planeta.

En el otoño de 1990, el telescopio tomó más de 100 imágenes suplementarias de Saturno con el fin de



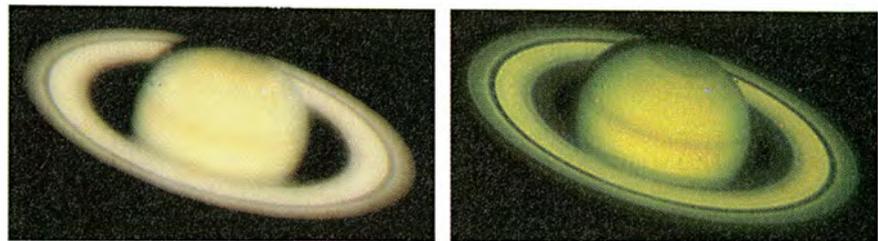
3. INSTANTANEA EN COLOR DE JUPITER que parte de tres imágenes en blanco y negro, cada una tomada a través de un filtro que realza ciertos detalles. Las tres imágenes se codifican en color y se combinan.

seguir el trayecto de una tormenta de cristales de hielo de amoníaco, llamada "gran mancha blanca", de unos 50.000 kilómetros de anchura. Estas observaciones tienen un especial valor ya que la mancha sólo aparece cada 60 años, aproximadamente.

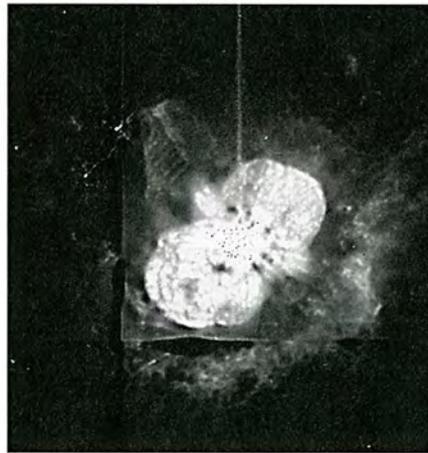
La ventaja más clara del *Hubble* para los astrónomos planetarios reside en su capacidad para proporcionar, cuando el observador lo desee, una claridad de imagen comparable con la obtenida por una sonda espacial. Philip B. James, de la Universidad de Toledo, y sus colegas observarán la atmósfera de Marte por espacio de varios años para estudiar

los patrones meteorológicos del planeta con el fin de comprender los acontecimientos que desencadenan las tormentas periódicas de polvo que barren el planeta a lo largo y a lo ancho. Esta investigación constituye un requisito previo importante para cualquier expedición humana al planeta rojo. James A. Westphal, del Instituto de Tecnología de California, proyecta un estudio sistemático muy similar, cuyo objetivo es examinar los potentes sistemas meteorológicos de Júpiter.

El telescopio también ha dirigido su mirada al pequeño planeta Plutón, que orbita en los tenués límites ex-



4. CORRECCION DE IMAGEN POR ORDENADOR, mediante la cual el *Hubble* alcanza casi toda la resolución pretendida en su diseño. Esta imagen no procesada de Saturno (izquierda) se asemeja a la imagen que capta un telescopio de aficionado. La versión corregida (derecha) muestra un excelente nivel de detalle.



5. ETA CARINAE consiste en una nube polvorienta proyectada por una estrella inestable, extremadamente masiva. Las fotografías desde tierra (izquierda) sólo muestran un perfil general de la nube, mientras que la imagen del *Hubble* procesada por ordenador (derecha) desvela complejos chorros y ondas de materia. El pico de brillo vertical y las divisiones segmentadas son artificios de la imagen.

teriores del sistema solar, a casi cinco mil millones de kilómetros de distancia del Sol. Las órbitas descritas por Plutón y su satélite Caronte, este último de un tamaño considerable, distan solamente 19.000 kilómetros entre sí, por lo cual desde la Tierra aparecen confundidos en una mancha protuberante. La cámara de objetos tenues del *Hubble* ha proporcionado, por primera vez, imágenes separadas, muy claras, de Plutón y Caronte.

El análisis detallado de las variaciones del brillo de estos dos cuerpos aportará información sobre las cambiantes estructuras de sus finas atmósferas de metano. Rudolf Albrecht, del organismo coordinador europeo del telescopio espacial ("Space Telescope European Coordinating Facility"), que dirigió las observaciones de Plutón realizadas por el *Hubble*, confía en que la técnica de intensificación por ordenador consiga incluso revelar algunas marcas visibles en la superficie de ese planeta. La medición exacta de las órbitas que Plutón y Caronte describen uno alrededor de otro permitirá a los investigadores conocer con precisión sus respectivas masas y densidades, información que, a su vez, proporcionará pistas para esclarecer la composición y el origen de estos enigmáticos objetos celestes.

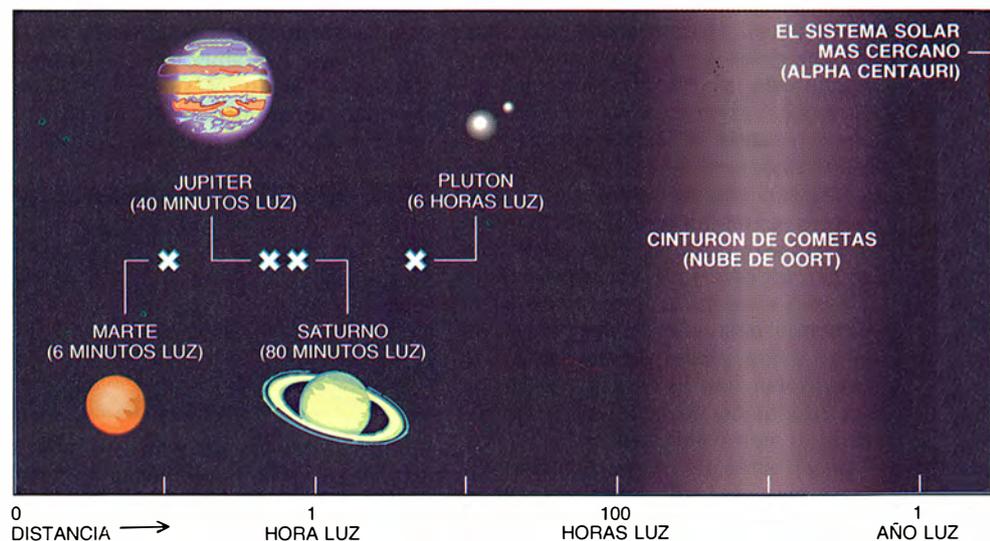
6. VISTAS ASTRONOMICAS captadas por el *Hubble*; cubren un impresionante margen de distancias. Plutón dista de la Tierra un promedio de seis horas-luz (una hora luz equivale aproximadamente a mil millones de kilómetros). En comparación, el cuásar UM 675 se sitúa a 12.000 millones de años-luz. Las distancias se representan a escala logarítmica.

Mirando mas allá del sistema solar, el *Hubble* se volvió hacia la bellísima nebulosa de Orión, masa de gas ionizado incandescente (átomos que han sido despojados de algunos de sus electrones) que a simple vista se aprecia como la "estrella" central de la espada de Orión —en enormes nubes como ésta es donde nacen las estrellas—. La nebulosa de Orión, que dista 1500 años-luz de la Tierra, es la región de formación estelar más cercana y brillante. Durante años los astrónomos la han estudiado con detenimiento y estaban convencidos de que conocían bastante bien su estructura, al menos hasta que llegaron las imágenes del *Hubble*.

La cámara planetaria y de campo ancho tomó tres exposiciones de la nebulosa, de diez minutos cada una, de cuya reunión se obtuvo una imagen en color del objeto. En ella se aprecian estructuras diminutas de 0,1 segundos de arco (que a la distancia

de Orión equivalen a seis mil millones de kilómetros, el radio del sistema solar), así como delgados arcos, filamentos y capas de gas ionizado que desfilan de un lado a otro y antes pasaban inadvertidos. C. Robert O'Dell, de la Universidad de Rice, que dirigía la investigación sobre la nebulosa de Orión, también se percató de la existencia de numerosos nudos brillantes, formados por gas ionizado por la acción de rayos ultravioletas procedentes de calientes estrellas jóvenes, incrustadas en la nebulosa. Sin embargo, algunos investigadores moderaron este entusiasmo por la imagen, ante el temor de que los procedimientos de intensificación por ordenador pudieran haber introducido características falsas en la misma. Las imágenes de la nebulosa de Orión son un claro exponente de la mezcla de ansiedad y frustración que sienten los astrónomos al trabajar con el *Hubble*.

Uno de los descubrimientos más intrigantes del telescopio se refiere a una etapa posterior en el nacimiento de las estrellas: el momento en que pueden empezar a formarse planetas en su entorno. En 1983, el *Satélite Astronómico de Infrarrojos* (IRAS) desveló que la estrella cercana Beta Pictoris (a 54 años-luz de la Tierra) está rodeada por un disco delgado de gas y polvo de al menos 80.000 millones de kilómetros de ancho, casi diez veces el tamaño de la órbita de Plutón; se cree que tales discos constituyen la materia prima de la cual se forman por fusión los sistemas planetarios. Con el fin de conocer más datos sobre este disco, Albert Boggess y su equipo, del Centro Goddard, utilizaron el espectrógrafo de alta resolución en el examen de la radiación ultravioleta procedente de Beta Pictoris.



Bogges halló que parte del gas que circunda la estrella cae hacia adentro, en dirección a la misma. Por otro lado, el espectro de la estrella cambia de apariencia, por la razón probable de que, a medida que el disco gira, pasan entre Beta Pictoris y la Tierra diferentes porciones de materia que absorben radiación. La rapidez de la variación —ciertos cambios espectrales ocurren en menos de un mes— delata el carácter grumoso del disco. Todos estos descubrimientos dan indicios de que se está lanzando materia nueva hacia el disco, posiblemente gas evaporado de objetos de tipo cometa que giran alrededor de la estrella.

Los datos del *Hubble* no confirman ni desmienten la existencia de planetas totalmente formados alrededor de Beta Pictoris. La mayoría de los astrónomos no se convencerá del descubrimiento de planetas extrasolares hasta que una cámara fotografíe uno de ellos. En este campo, el defecto óptico del *Hubble* ha asestado un golpe mortal: el halo brumoso de luz estelar dispersa por el espejo malformado destruiría toda huella de la tenue luz reflejada por planetas que orbiten incluso las estrellas más cercanas. La búsqueda minuciosa de planetas extrasolares, uno de los proyectos clave del *Hubble*, tendrá que esperar hasta que se logre corregir el sistema óptico del telescopio.

Beta Pictoris es una estrella de tipo solar, bastante sedentaria. Con ella contrasta la inestable estrella Eta Carinae, que gira muy rápidamente a 9000 años-luz de la Tierra, sobre el hemisferio sur, y fue el blanco de más alta prioridad durante la primera ronda de observaciones desde el *Hubble*. Eta Carinae quizás sea la

estrella de mayor masa y energía de la Vía Láctea, con cien veces la masa solar y cuatro millones de veces el brillo del astro. Su primer fulgor data de 1843, convirtiéndose en breve tiempo en la segunda estrella más brillante del firmamento. Posteriormente se observó que una pequeña nebulosa, denominada Homunculus, había empezado a formarse en torno a la estrella.

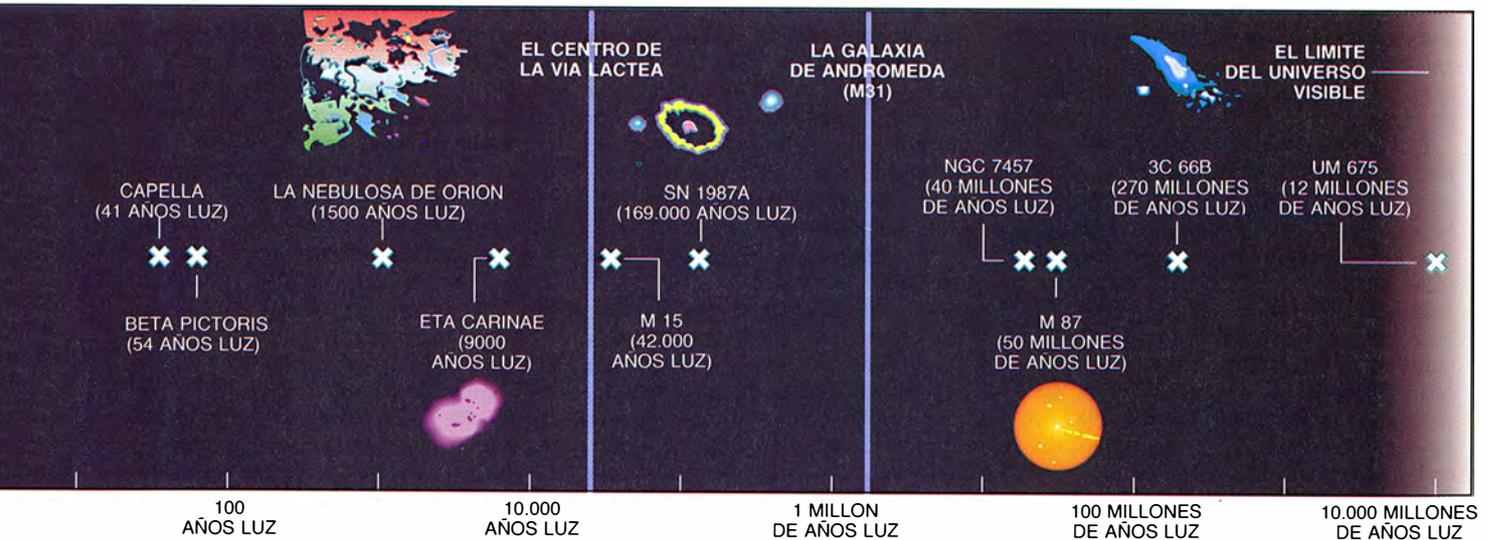
Las mejores observaciones tomadas desde tierra muestran a la Homunculus como una nebulosa pequeña, de apariencia borrosa y de forma oblonga. El *Hubble*, sin embargo, descubrió un cuadro mucho más complejo: el Homunculus tiene una forma peculiar, parecida a un cacahuete, y de su centro emergen dos chorros opuestos y rígidamente enfocados. La nube tiene un aspecto grumoso, con un borde exterior muy nítido; ello parece indicar que en realidad consiste en una delgada y polvorienta concha de materia en vez de un volumen compacto, muy probablemente material expulsado o barrido por Eta Carinae a consecuencia de su explosión.

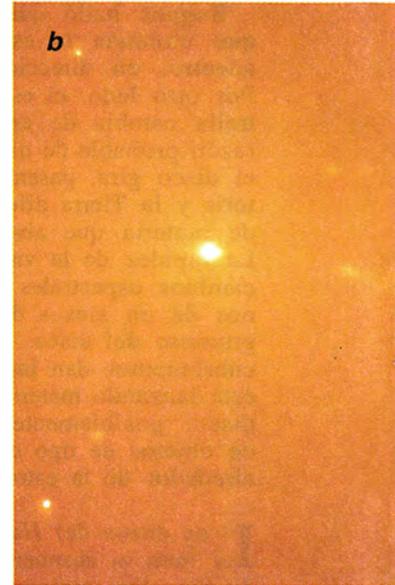
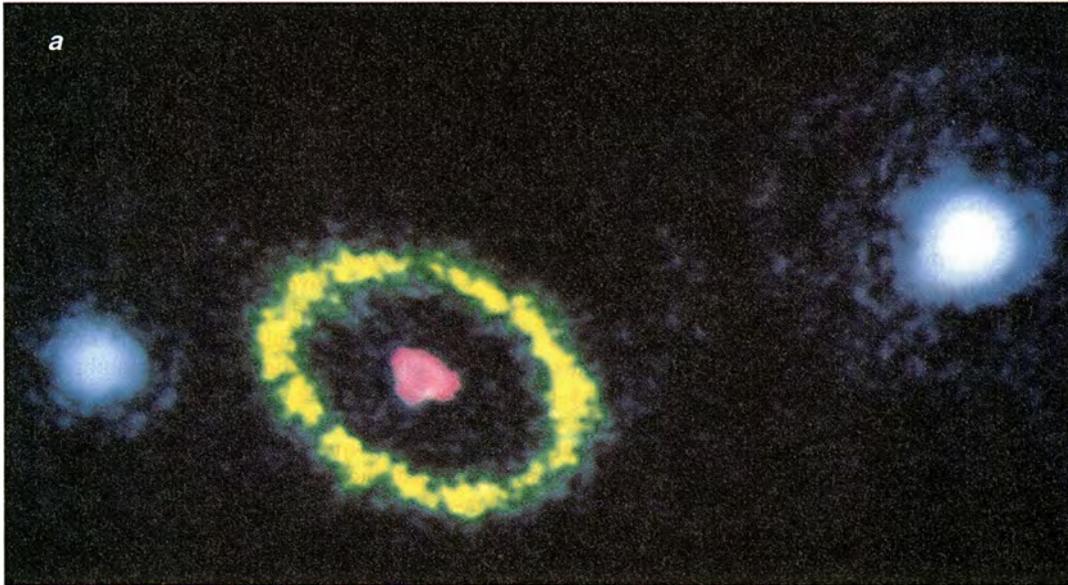
Uno de los mencionados chorros termina en una formación en U. Es probable que esta estructura sea una onda de choque análoga a la que produce al avanzar la proa de una nave, y que se formara cuando el chorro penetró en la materia interestelar, de movimiento muy lento, que rodea la estrella. Una desconcertante serie de líneas paralelas de gas luminoso, parecidas a los peldaños de una escalera, sobresalen de uno de los lados de Eta Carinae. Es posible que los peldaños sean ondas estacionarias de años-luz de longitud, como las ondas sonoras que se producen en el interior de un tubo de órgano; o bien ondulaciones creadas al fluir

la materia con rapidez a lo largo de la referida onda de choque del chorro. Una vez más, la posible existencia de artificios introducidos durante el proceso de mejora por ordenador dificulta la interpretación de esta imagen.

Si bien ha ahondado aún más el misterio que envuelve a Eta Carinae, el *Hubble* ha dado respuesta al ya viejo interrogante sobre un morador de la galaxia mucho más distante: el cúmulo globular M 15. Los cúmulos globulares son densos enjambres esféricos que contienen hasta un millón de estrellas, enorme concentración que en opinión de muchos astrónomos debería conducir a la formación de un agujero negro, es decir, un objeto colapsado de gravedad tan intensa que ni siquiera la luz logra escapar de él. Otros investigadores discrepan, sugiriendo que los rápidos movimientos de las estrellas —especialmente las estrellas binarias— cerca del centro podrían ayudar a mantener el núcleo y evitar un colapso catastrófico.

Uno de los más firmes candidatos a agujero negro era el brillante cúmulo M 15, situado en la constelación de Pegaso a 42.000 años-luz de la Tierra. Aunque el agujero en sí sería invisible, deberían resplandecer cantidades enormes de radiación en sus alrededores más inmediatos, donde la materia asciende a temperaturas extremadamente altas por efecto de la extraordinaria presión y fricción de marea, hasta desaparecer para siempre. Por tanto, un agujero debería producir un característico punto brillante de luz en el centro del cúmulo, que hasta ahora no ha podido ser apreciado por telescopio alguno, falto de la resolución suficiente para distinguir ese detalle en





el núcleo. El *Hubble*, sin embargo, puede discernir pequeños detalles de M 15, hasta de 0,02 años-luz, aproximadamente el diámetro teórico de un agujero negro que tenga 1000 veces la masa del Sol.

Tod R. Lauer, del Observatorio Nacional de Kitt Peak, realizó una búsqueda de ese pico brillante en M 15, pero al fracasar en su intento recurrió a otra técnica. Consistió ésta en la resolución por el *Hubble* de las brillantes estrellas gigantes rojas situadas en el próximo exterior de M 15, lo que permitió a los investigadores sustraerlas de la imagen, dejando en dicha imagen la región del núcleo, que contiene millares de estrellas débiles esparcidas por un radio sorprendentemente extenso, de unos 0,4 años-luz, diez veces el valor que predicen los modelos de agujeros negros. Los resultados del *Hubble* sugieren poderosamente que M 15 no alberga un agujero negro en su región central. Tal descubrimiento aporta un alivio a quienes no participan de la tendencia a invocar la existencia de un agujero negro para explicar cualquier objeto potente del universo.

Los astrónomos han tenido un especial interés por obtener con este telescopio imágenes de los restos de SN 1987A, la brillante supernova que hizo su aparición en 1987 en el seno de la Gran Nube de Magallanes, galaxia satélite de la Vía Láctea. El 23 de agosto de 1990, la cámara de objetos débiles del *Hubble* transmitió una exposición de 28 minutos de duración de SN 1987A, apareciendo en nuestras pantallas de ordenador del Instituto la imagen de un anillo de materia, increíblemente luminoso, extendido a través

de 1,4 años-luz, que envolvía los restos de la supernova. Casi todos nosotros nos quedamos estupefactos ante la existencia del anillo, excepto nuestro colega Nino Panagia, quien había pronosticado la formación de una estructura exterior peculiar.

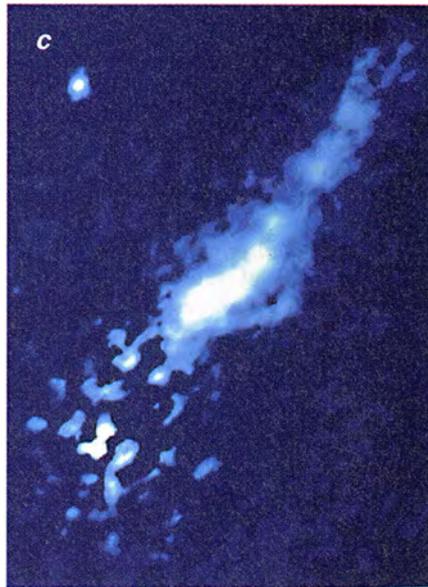
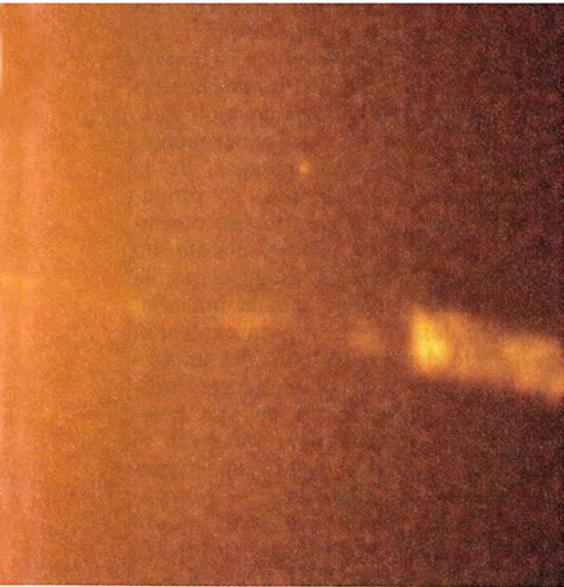
Lo que más intriga en el anillo de la supernova es que parece elíptico, en vez de circular. Su forma implica que no se trata de una concha tridimensional, como las observadas en los alrededores de multitud de nebulosas planetarias, que por efecto de la perspectiva a menudo se asemejan a anillos circulares; resulta ser, en cambio, un auténtico toro circular de materia cuya inclinación de 43 grados respecto a nuestra línea de visión le imprime una apariencia elíptica. Tal formación no pudo producirla la propia supernova, sino que más bien debe de ser una reliquia fantasmagórica de las capas externas, expulsadas por la estrella gigante roja progenitora.

Panagia sostiene que, miles de años antes de la explosión, un suave viento estelar arrastró la envoltura externa de la estrella, casi toda ella en dirección ecuatorial. Un viento posterior, más veloz, debió de comprimir el material hasta transformarlo en un anillo gaseoso, que luego sería calentado y ionizado por la radiación ultravioleta originada en la explosión de la supernova, haciéndolo brillar. El anillo debería desintegrarse dentro de algunos decenios, en cuanto sea alcanzado por los desechos de la supernova que avanza, hacia el exterior, a velocidad media de 10.000 kilómetros por segundo. Mientras tanto, el *Hubble* continuará su seguimiento de la estructura proleica de los restos de SN 1987A.

Las observaciones de la supernova tomadas por el telescopio han permitido conocer con mayor precisión la distancia que nos separa de la Gran Nube de Magallanes. Las imágenes que ha obtenido muestran el tamaño angular del anillo con gran exactitud. Por otra parte, el satélite *Explorador Internacional en el Ultravioleta* estuvo controlando los instantes en que los extremos próximo y lejano del anillo comenzaron a resplandecer por primera vez; esta información, combinada con la bien conocida medida de la velocidad de la luz, aportará el diámetro real del anillo. A partir de ahí, por una simple operación de trigonometría se obtiene que la distancia a la supernova, y por tanto a la galaxia circundante, es de 169.000 años-luz. Esta estimación presenta un margen de error del 5 por ciento, que mejora en más de tres veces las mediciones anteriores, y de paso ofrece información valiosa para calibrar la escala de distancias de otros objetos cósmicos más remotos.

Por desgracia, la capacidad general del *Hubble* para medir distancias galácticas está severamente comprometida. Su defecto óptico le impide distinguir Cefeidas individuales en galaxias remotas; estas estrellas variables revisten interés especial porque su brillo fluctúa de forma irregular, con un período de variación relacionado con su luminosidad absoluta. Por esta razón, las observaciones de Cefeidas pueden proporcionar una medida inequívoca de la distancia a una galaxia. Cuando el satélite se repare en 1994, asumirá como tarea esencial el estudio de las Cefeidas.

Muchas personas equivocadamente creen que, por tener deteriorada su capacidad para captar luz, el *Hubble*



7. SUPERNOVA 1987A (a), tal como la ha captado el *Hubble*. (La imagen está en falso color.) Un anillo de materia de 1,4 años-luz de diámetro (amarillo) rodea los desechos de la supernova (rojo). La M 87, una galaxia elíptica gigante, exhibe un núcleo denso, de brillo insólito, y un enorme chorro de gas ionizado (b). Ambos rasgos denuncian la existencia de un agujero negro masivo en el centro de la galaxia, en el cual cae materia que resplandecería con intensidad antes de desaparecer. Un chorro retorcido (c) emana del núcleo de la galaxia 3C 66B, extendiéndose a 10.000 años-luz. La imagen ha sido procesada para sustraer de ella la galaxia. La radiación ultravioleta que se aprecia en esta imagen es emitida por electrones que atraviesan los campos magnéticos girando en espiral casi a la velocidad de la luz.

es incapaz de estudiar objetos celestes lejanos. Nada podría alejarse más de la verdad. El telescopio espacial ha realizado ya sustanciosas observaciones de objetos situados prácticamente en los límites del universo visible, y también ha permitido a los astrónomos ópticos el estudio, a un nivel de resolución nunca alcanzado, de los núcleos de galaxias situadas allende nuestro cúmulo galáctico local, consiguiendo descubrimientos numerosos, notables y muchas veces inesperados.

Uno de los primeros blancos del *Hubble* más allá de la Vía Láctea fue NGC 7457, galaxia elíptica situada a unos 40 millones de años-luz que había sido elegida como objeto de prueba aparentemente normal. Sin embargo, cuando Lauer y sus colaboradores utilizaron la cámara planetaria y de campo ancho para explorar las regiones centrales de NGC 7457, descubrieron, sorprendidos, que una fracción apreciable de la luz de la galaxia proviene de una fuente puntual, cuya extensión no supera los 10 años-luz, situada en el mismo corazón del núcleo. Las estrellas que dicha fuente alberga deben de estar apiñadas con densidad al menos 30.000 veces la de las estrellas de la vecindad galáctica del Sol, cientos de veces la densidad estelar apuntada por las predicciones teóricas. El pico de brillo central puede indicar el punto exacto en el que una vasta cantidad de materia —tal vez estrellas enteras— cae en espiral hacia un agujero negro cuya masa es millones de veces la solar. Otra posibilidad alternativa es que la región brillante sea de naturaleza no tan exótica, pero igualmente inesperada, como por ejemplo un cúmulo estelar de

excepcional riqueza. Los investigadores que trabajan con los espectrógrafos del *Hubble* pronto intentarán medir la velocidad orbital del gas y las estrellas situadas en el núcleo, para así indicar la cantidad total de materia que contiene y ayudar a determinar la verdadera naturaleza del objeto central.

El telescopio también ha aportado pruebas para corroborar la posible existencia de un enorme agujero negro en el lugar donde los astrónomos esperaban encontrarlo: en la galaxia elíptica gigante M 87, situada en el cúmulo galáctico de Virgo, aproximadamente a 50 millones de años-luz. M 87 emite potentes ondas de radio y rayos X, y desde su centro emerge hacia el exterior un gigantesco chorro de gas ionizado (cuya longitud es miles de veces la de los chorros que emanan de Eta Carinae). Los astrofísicos le han dado vueltas a la posibilidad de que un agujero negro inmenso sea el motor central que impulsa semejante actividad.

Lauer, en colaboración con Sandra M. Faber, de la Universidad de California en Santa Cruz, C. Roger Lynds, adscrito a los Observatorios Nacionales de Astronomía Óptica, y otros varios colegas recurrieron a la cámara planetaria y de campo ancho para zanjar la cuestión. Vieron que, lo mismo que en NGC 7457, las estrellas se apiñaban en la región central de M 87 con una densidad que centuplicaba, varias veces, la habitual de una galaxia normal. Si la densidad y el brillo excesivo del núcleo de M 87 se debiera realmente a un agujero negro, éste tendría una masa cuyo valor sería varios miles de millones de veces la del Sol.

F. Duccio Macchetto, de la Agencia Europea del Espacio, interesado en el estudio de los violentos procesos que ocurren en galaxias activas aún más distantes, recurrió a la cámara de objetos débiles para captar la radiación ultravioleta procedente de la galaxia 3C 66B, ubicada a 270 millones de años-luz de la Tierra. El *Hubble* reveló los detalles del extraordinario chorro de plasma incandescente que emana de 3C 66B; este chorro se extiende hasta 10.000 años-luz desde el centro de la galaxia, longitud doble de la que presenta la protuberancia gaseosa de M 87.

Macchetto utilizó el tratamiento de imagen por ordenador para realzar el chorro y hacerlo más visible, sustrayendo la imagen correspondiente a la galaxia anfitriona; ello es factible porque el chorro brilla más en las longitudes de onda del ultravioleta, en las cuales la galaxia se muestra más tenue. Seguidamente procedió, junto con sus colaboradores, a corregir la aberración esférica del *Hubble*, pudiendo así ver por un instante filamentos gaseosos, nudos brillantes y raros dobleces en el material del chorro, detalles jamás vistos a través de un telescopio óptico. El chorro presenta una extraña estructura trenzada, consistente en dos hebras de plasma separadas a una distancia de 50 años-luz.

Las características observadas se corresponden estrechamente con las identificadas por medio de su emisión radioeléctrica. Sin embargo, la radiación emitida por el chorro en el espectro visible es provocada por electrones de alta velocidad, que pierden energía con mucha más rapidez que los electrones, relativamente perezosos, que producen la emisión

ECOLOGIA TERRESTRE

INVESTIGACION CIENCIA

Edición española de **SCIENTIFIC
AMERICAN**

ha publicado sobre el tema, entre otros, los siguientes artículos:

■ **Estrés vegetal inducido por metales pesados,**

Juan Barceló y Charlotte Poschenrieder.

Julio 1989

■ **Una atmósfera cambiante,**

Thomas E. Graedel y Paul J. Crutzen.

Noviembre 1989

■ **La biodiversidad, amenazada,**

Edward O. Wilson.

Noviembre 1989

■ **Gestión del planeta Tierra,**

William C. Clark.

Noviembre 1989

■ **El monóxido de carbono y la Tierra en llamas,**

Reginald E. Newell, Henry G. Reichle, Jr. y Wolfgang Seiler.

Diciembre 1989

■ **El metanol, un combustible alternativo,**

Charles L. Gray, Jr. y Jeffrey A. Alson.

Enero 1990

■ **Los incendios de Yellowstone,**

William H. Romme y Don G. Despain.

Enero 1990

■ **Las aves del paraíso,**

Bruce M. Beehler.

Febrero 1990

en radio. Los electrones más energéticos y emisores de luz habitan en regiones de perturbación reciente. En comparación con los estudios de radioastronomía, los datos del *Hubble* muestran con mayor detalle el comportamiento reciente de las potentes fuerzas que produjeron ese inmenso chorro.

Mediante ulteriores observaciones que realizará el telescopio en galaxias activas y en sus parientes más energéticos, los cuásares y las galaxias Seyfert, se conocerá la manera de desplazarse la energía hacia el exterior, siguiendo los chorros. Los estudios del *Hubble* también ayudarán a definir el papel desempeñado por los campos magnéticos en la canalización de materia —sobre todo electrones, que se mueven prácticamente a la velocidad de la luz— desde los núcleos de las galaxias hasta el espacio intergaláctico. Un conocimiento más profundo de las galaxias activas permitirá determinar si los agujeros negros pueden realmente explicar la prodigiosa producción energética de estas galaxias, o si los astrónomos necesitan acudir a nuevas y tal vez más exóticas teorías para interpretar esas centrales eléctricas del firmamento.

El examen de los datos del telescopio contribuye a verificar y refinar la teoría de la gran explosión ("big bang"), que constituye el cimiento de la cosmología moderna. La teoría sostiene que el universo actual, incluyendo toda la materia y todo el espacio, surgió de la explosión de un punto único, hace aproximadamente 15.000 millones de años. Si esta hipótesis es correcta, la mayoría del helio que hoy existe fue generada en los momentos siguientes al nacimiento del universo. Desde entonces, no obstante, se han sintetizado cantidades adicionales de helio, por fusión nuclear, en el interior de las estrellas.

Margaret E. Burbidge, de la Universidad de California en San Diego, se ha esforzado por medir la cantidad de helio existente en los alrededores del cuásar UM 675, situado a unos 12.000 millones de años-luz de la Tierra. Debido a tan inmensa distancia, los humanos ven ahora este cuásar tal y como era hace 12.000 millones de años, cuando el universo tenía sólo una quinta parte de su edad actual. La teoría de la gran explosión predice que UM 675 debería contener prácticamente la misma cantidad de helio que los objetos modernos y cercanos. Si la teoría fuera errónea, el contenido de

helio de UM 675 sería casi nulo. El espectrógrafo de objetos débiles del *Hubble* mostró una clara signatura de helio, otorgando así credibilidad a la mencionada hipótesis cosmológica.

En el marco de otro experimento, Jeffrey Linsky y sus colegas, de la Universidad de Colorado, se propusieron medir la concentración cósmica de deuterio, un isótopo pesado del hidrógeno. La teoría asegura que la cantidad de deuterio creada inmediatamente después de la gran explosión refleja la densidad global del universo. Linsky y sus colaboradores utilizaron el espectrógrafo de alta resolución del *Hubble* para observar el espectro de la estrella brillante Capella, distante 41 años-luz, en la constelación de Auriga. La forma exacta de dicho espectro indica la cantidad de radiación absorbida por los átomos de hidrógeno y deuterio, entre Capella y la Tierra.

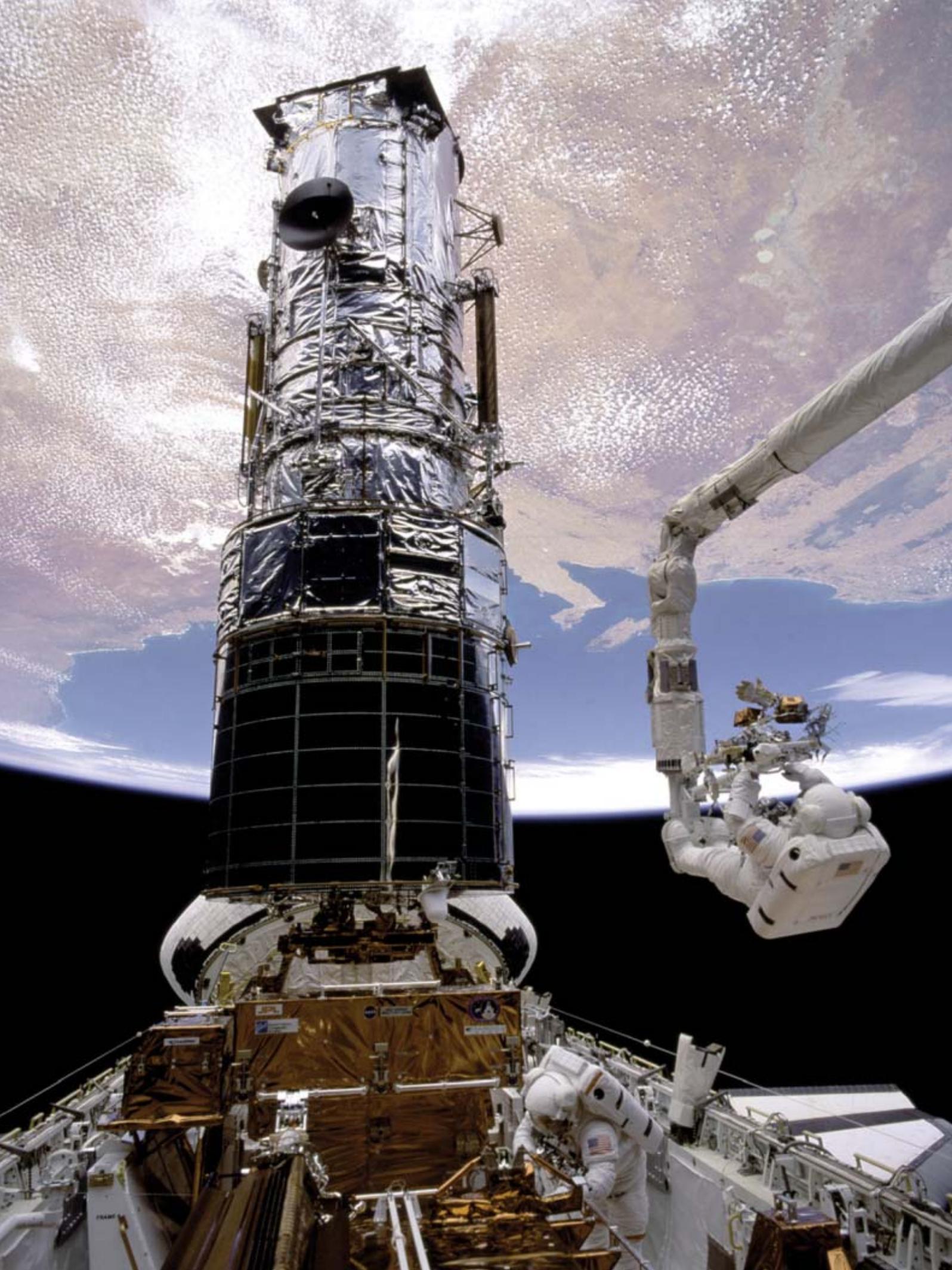
El análisis del espectro, llevado a cabo por Linsky, sugiere que el universo contiene tan sólo una décima parte de la cantidad de materia normal necesaria para frenar la presente expansión. Para bastantes cosmólogos, ciertas partículas exóticas, todavía por descubrir, podrían dar cuenta de buena parte de la masa total del universo. De no ser así, los resultados del *Hubble* implicarían que el universo es infinito y que su expansión continuaría eternamente.

Pese a una plétora de deficiencias ópticas y mecánicas, ese telescopio está demostrando su poderío en la investigación científica. Los resultados obtenidos en los dos primeros años de vida nos ofrecen sólo un mero anticipo de lo que será capaz si pone a punto su óptica en 1994. Tras siglos de estar condenados a contemplar cómo centellean y bailan las estrellas en la turbulenta atmósfera de la Tierra, los astrónomos ópticos han entrado, finalmente, en una nueva era de investigación espacial. Personalmente confío en que el telescopio espacial *Hubble* sea sólo el primer paso en este prometedor camino.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE FIRST YEAR OF HUBBLE SPACE TELESCOPE OBSERVATIONS. Actas de una sesión científica celebrada en el Instituto de Investigación del Telescopio Espacial, 14-16 de mayo, 1991. Dirigido por A. L. Kinney y J. C. Blades. Space Telescope Science Institute; 1991.

THE HUBBLE SPACE TELESCOPE. Dos números especiales de *Astrophysical Journal Letters*, vol. 369, 10 de marzo 1991, y vol. 377, 10 de agosto de 1991.



1. EN LA PRIMERA REVISIÓN del Telescopio Espacial Hubble en diciembre de 1993, los astronautas Story Musgrave (*en el brazo articulado*), Jeffrey Hoffman (*en la cubierta*) y sus compañeros arreglaron el problema que tenía el espejo desde su fabricación. A partir de entonces llovieron los descubrimientos.

Los 10 descubrimientos principales del Hubble

Mientras esperan la última restauración del Telescopio Espacial Hubble, los astrónomos reflexionan sobre los descubrimientos más destacados cosechados en los dieciséis años que lleva en órbita

Mario Livio

Muy pocos telescopios habrán contado tanto en la investigación astrofísica como el Telescopio Espacial Hubble, a lo largo de la historia. Sin embargo, no ha destacado por lo que muchos piensan. No ha realizado ningún descubrimiento que sea única y exclusivamente suyo. Pero ha convertido indicios y sospechas sugeridas por las observaciones terrestres en certezas casi absolutas. Ha trabajado en colaboración con otros observatorios para proporcionar una visión multicolor del cosmos. Ha obligado a los teóricos a ampliar sus teorías y a construir algunas nuevas. En definitiva, la inmensa influencia del Hubble no se debe a que se encuentre distante de los demás instrumentos, sino a su integración perfecta con ellos.

En abril de 2006 cumplió su decimosexto aniversario en el espacio.

Ha proporcionado a los astrónomos imágenes con un grado de detalle sin precedentes y ha traído las maravillas del universo a los hogares de todo el mundo. Tales logros se han visto eclipsados, sin embargo, por el debate sobre su futuro. Mientras la NASA se esfuerza en reanudar los vuelos de los transbordadores espaciales, el Hubble continúa deteriorándose. A menos que los astronautas puedan llegar a él para mantenerlo en funcionamiento, alcanzará el final de sus días útiles a mediados de 2008. Esta encrucijada me ha movido a resumir los dieciséis años del Hubble y de la astronomía, que en ese período ha conocido una verdadera edad de oro.

Presento a continuación mi selección —reconozco que sesgada— de los diez hitos científicos más notables del Hubble. Abarcan la escala entera de tamaños, de los planetas a las galaxias, de las galaxias al

universo en su totalidad. Resultó hartamente difícil hacer justicia en un artículo a todas las contribuciones del Hubble. En el momento de escribir este texto, el contenido del archivo del telescopio superaba los 27 terabytes de datos y continúa creciendo unos 390 gigabytes por mes. Con esos datos se han escrito 6300 artículos científicos. Y sigue produciendo resultados científicos asombrosos. En colaboración con otros observatorios, el Hubble descubrió el año pasado dos satélites más de Plutón, una galaxia de los primeros tiempos del universo (de enorme tamaño, difícil de explicar) y un compañero de masa planetaria alrededor de una enana marrón, que tampoco pesa más que un planeta. Debemos considerarnos muy afortunados por vivir en una era en la que hemos visto aspectos del universo que antes sólo podrían haberse explorado con la imaginación.

1

El choque del cometa gigante

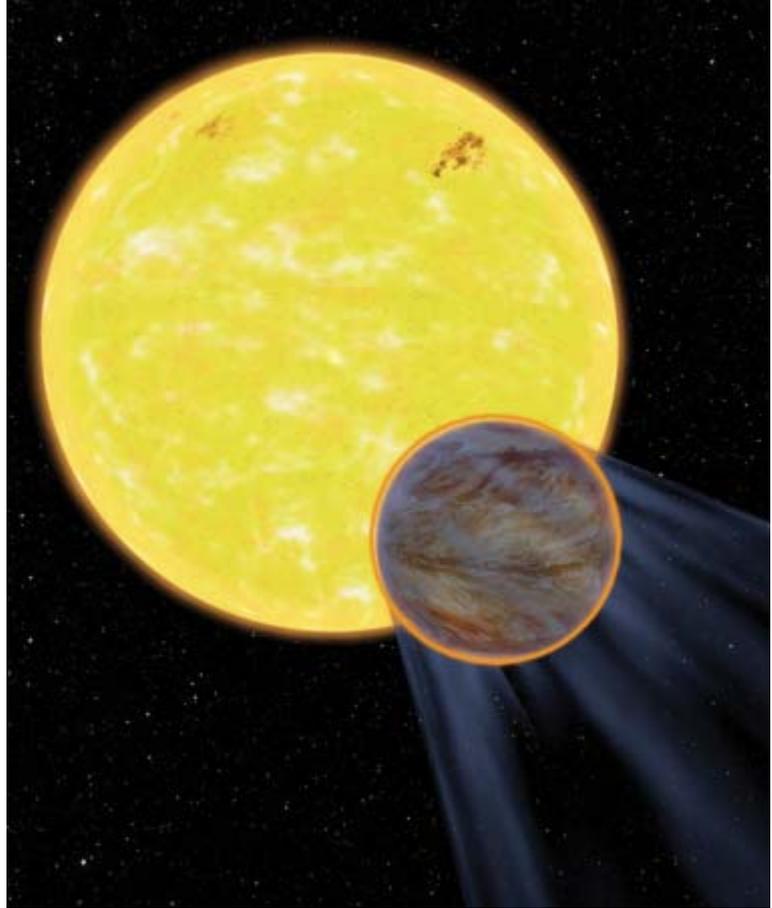
Desde una perspectiva cósmica, el impacto del cometa Shoemaker-Levy 9 contra Júpiter no habría sido digno de mención: las superficies repletas de cráteres de los cuerpos planetarios rocosos y de los satélites nos recuerdan que el sistema solar sigue siendo un campo de tiro. Desde una perspectiva humana, sin embargo, la colisión fue un acontecimiento único. En promedio, un cometa choca contra un planeta sólo una vez cada mil años.

Un año antes del impacto, las imágenes del Hubble revelaron que el cometa se había disgregado en un rosario de dos docenas de fragmentos. Los primeros cayeron sobre la atmósfera de Júpiter el 16 de julio de 1994; a lo largo de la semana siguiente llegaron los demás. Las imágenes mostraban sobre el horizonte joviano penachos parecidos a los hongos nucleares, que descendían y se dispersaban antes de que hubiesen transcurrido diez minutos desde el impacto. En la superficie del planeta se percibieron las huellas durante meses.

La rareza de las imágenes las hace valiosas en sí mismas, pero los datos suscitaban además preguntas de difícil respuesta sobre la composición del planeta gigante gaseoso. En uno de los puntos de impacto, se propagaron hacia fuera ondas a 450 metros por segundo. La explicación más razonable es que se trata de ondas de gravedad; la fuerza restauradora sería entonces la de Arquímedes; la misma que opera cuando queremos hundir un trozo de madera en el agua y la pieza oscila arriba y abajo. Si realmente es así, las propiedades de las ondas sugieren que la razón entre el oxígeno y el hidrógeno en la nube de agua por la que se propagan las ondas decuplica la registrada en el Sol. Sin embargo, si el origen de Júpiter es la ruptura gravitatoria de un disco primordial de gas y polvo, tal y como suponen los teóricos, su composición debería ser la misma que la del disco y, por lo tanto, similar a la del Sol. Sigue sin conocerse la respuesta.



2. OCHO IMPACTOS en el hemisferio sur de Júpiter; la imagen corresponde al 22 de julio de 1994 (algunos impactos se superponen o apenas son visibles). Debajo, un penacho de humo semejante a un hongo atómico sobre el borde del planeta, a los seis minutos del impacto del 16 de julio.



3. DEL BRILLO DE UNA ESTRELLA puede el Hubble deducir el perfil de un planeta que gire a su alrededor en el momento en que pasa ante ella (representación artística).

2

Planetas extrasolares

En 2001 la Sociedad Astronómica Norteamericana pidió a los planetólogos que votaran por el mayor descubrimiento de la década anterior. Eligieron la detección de planetas fuera de nuestro sistema solar. Hoy día se conoce la existencia de más de 190 de estos objetos. La mayoría se ha hallado con telescopios de superficie, mediante el análisis del ligero movimiento que un planeta en órbita alrededor de una estrella induce en ésta. Tales observaciones sólo proporcionan una pequeña cantidad de información: el tamaño y la elipticidad de la órbita del planeta y un límite inferior de su masa.

El Hubble prosigue la indagación centrándose de aquellos planetas cuyos planos orbitales están alineados con nuestra línea de visión, por lo que periódicamente los vemos pasar ante sus estrellas y eclipsar parte de su luz. “Tránsito” se llama a este fenómeno. El seguimiento por el Hubble del primer planeta extrasolar al que se le haya observado en tránsito, el satélite de la estrella HD 209458, ha proporcionado la información más detallada sobre un planeta allende los límites del sistema solar. Es un 30 por ciento más ligero que Júpiter, aunque su diámetro es un 30 por ciento mayor, quizá porque la ingente radiación que recibe de su estrella lo expande. Los datos del Hubble logran una precisión tal, que habrían revelado anillos gigantes o satélites grandes alrededor del planeta, de haber existido; no los hay. Más aún: el Hubble ha realizado las primeras mediciones de la composición de un planeta que gira alrededor de otra estrella. Su atmósfera contiene sodio, carbono y oxígeno; el hidrógeno se está evaporando al espacio, lo que está creando una cola parecida a la de un cometa. Estas observaciones son precursoras de las investigaciones que buscarán señales químicas de vida en la galaxia.

3 La agonía de las estrellas

La teoría predice que una estrella cuya masa se encuentre entre 8 y 25 veces la solar terminará su vida en una explosión de supernova. Cuando la estrella consume el combustible útil, pierde de repente el combate que sin cesar había mantenido contra su propio peso. El núcleo se desploma y crea una estrella de neutrones —un remanente inerte e hiperdenso—; las capas exteriores de gas se expelen a una velocidad del 5 por ciento de la velocidad de la luz.

Es difícil probar esta teoría porque no ha habido ninguna supernova en nuestra galaxia desde 1680. Pero a falta de una supernova aquí, lo mejor es una lo más cerca posible, como la que el 23 de febrero de 1987 estalló en la Gran Nube de Magallanes, una de las galaxias satélite de la Vía Láctea. El Hubble no se había lanzado todavía, pero tres años más tarde estaba ya siguiendo el curso del fenómeno. Pronto descubrió un sistema de tres anillos alrededor de la estrella que había explotado. El anillo central parece representar la cintura estrechada de una bocanada de gas con forma de reloj de arena; los anillos mayores serían los bordes de dos lóbulos con forma de lágrima, creados por la estrella decenas de miles de años antes de estallar. En 1994, el telescopio comenzó a ver una secuencia brillante de puntos lo largo del anillo cen-

4. CUANDO UNA ONDA DE CHOQUE procedente de la supernova 1987A rompe en un anillo de gas preexistente, en éste comienzan a brillar zonas calientes.

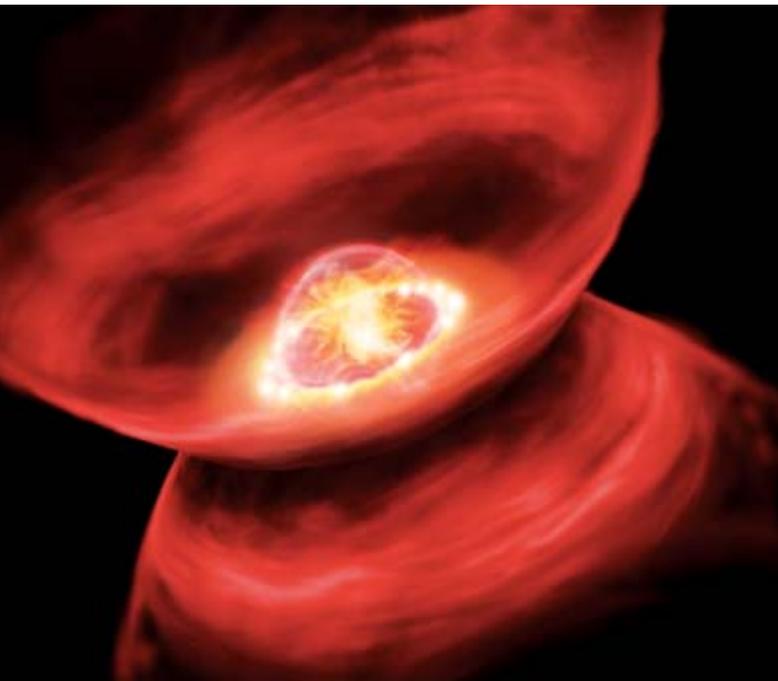
tral: correspondían al choque con el anillo del material expulsado por la supernova. La observación del anillo sigue esclareciendo las fases finales de la estrella.

Se admite que las estrellas de tipo solar mueren con menos violencia que las que tienen una masa mayor; sólo se desprenden de sus capas gaseosas externas en un proceso sin estallido explosivo, que tarda unos 10.000 años. Cuando el núcleo central caliente de la estrella queda expuesto, su radiación ioniza el gas eyectado, que brilla entonces con un verde (oxígeno ionizado) y rojo (hidrógeno ionizado) vibrantes; se tiene así una “nebulosa planetaria”, denominación que puede inducir a confusión. Se conocen unas 2000. El Hubble ha captado estas estructuras complejísimas con un detalle sin precedentes.

Algunas de estas nebulosas exhiben un conjunto de anillos concéntricos, a la manera de una diana, lo que parece remitir a un proceso de expulsión episódico, no continuo. El tiempo transcurrido entre los episodios de expulsión, unos 500 años, parece demasiado largo para que se deba a unas pulsaciones dinámicas en las que la estrella se contraiga y expanda como consecuencia de un suave tira y afloja entre la gravedad y la presión del gas, y demasiado corto para responder a pulsaciones térmicas, en las que la estrella abandonase su estado de equilibrio. La naturaleza precisa de los anillos observados no se ha aclarado aún.

5. NEBULOSA DEL OJO DE GATO, una de las nebulosas planetarias más complejas. Las estrellas de tipo solar crean al morir formaciones gaseosas de esa clase.

NASA, ESA, STScI Y CHRISTOPHER BURROWS (imagen del Hubble); DON DIXON (izquierda); NASA, ESA, HEIC Y EQUIPO DEL LEGADO DEL HUBBLE STScI/AURA (derecha)



Reconstrucción artística



Imagen del Hubble



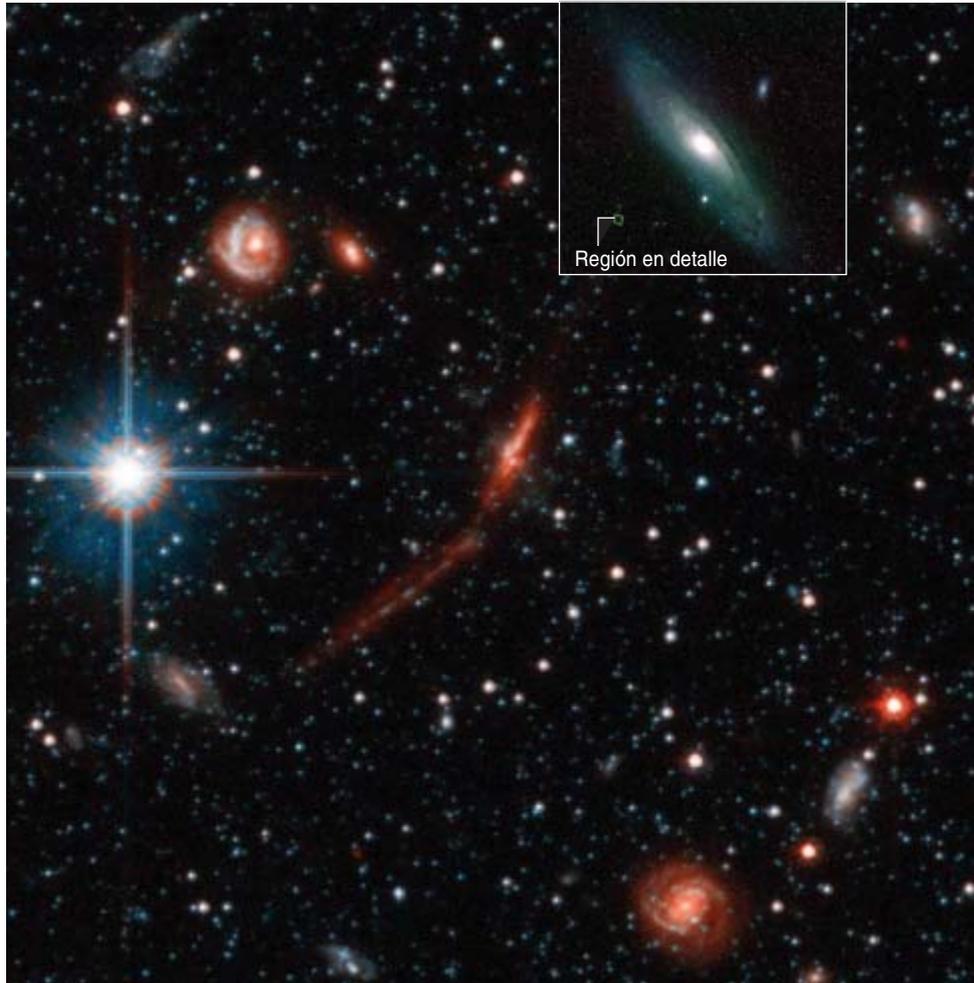
4 El nacimiento cósmico

Desde hace tiempo, se sabe que los chorros finos de gas indican el nacimiento de estrellas. Una estrella naciente puede emitir una pareja de chorros colimados (es decir, que no se abren) de varios años-luz de longitud. No se conoce el mecanismo de generación. Según la hipótesis mejor asentada, un campo magnético de gran escala atraviesa el disco de gas y polvo que rodea al objeto en gestación. La materia ionizada, forzada a moverse a lo largo de las líneas del campo magnético, sale disparada, cual si se tratara de cuentas ensartadas en un alambre giratorio. El Hubble ha respaldado esta teoría con pruebas directas de que los chorros se originan en el centro del disco.

El Hubble ha refutado, en cambio, otra hipótesis: que los discos circumstelares estaban tan sumergidos en sus nubes progenitoras, que resultaba imposible verlos. Ha tomado imágenes de docenas de discos protoplanetarios, con su silueta a menudo recortada contra la nebulosa. Al menos la mitad de las estrellas jóvenes observadas tienen discos, prueba de la ubicuidad en la galaxia de la materia prima con que se forman los planetas.



6. DISCOS DE POLVO informes, ameboides, rodean a los embriones de estrellas en la nebulosa de Orión. Cada imagen mide unas 2040 unidades astronómicas al cuadrado.



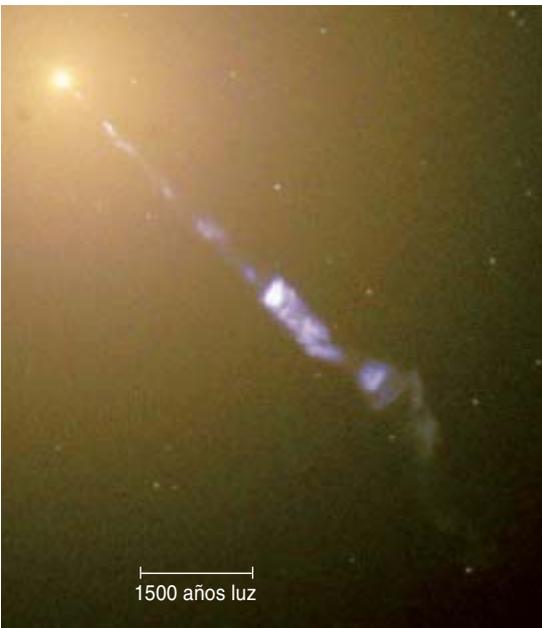
7. UNAS ESTRELLAS EXTRAÑAMENTE JOVENES de los alrededores de la galaxia de Andrómeda (recuadro) podrían ser restos de una colisión de galaxias. (En la imagen también se aprecian algunas galaxias de fondo.)

5 Arqueología galáctica

Se cree que las galaxias grandes, como la Vía Láctea y su vecina Andrómeda, se desarrollaron mediante la asimilación de galaxias menores. Este pasado azaroso queda escrito en las velocidades, composiciones, edades y disposiciones de las estrellas. El Hubble ha descifrado ese registro. Una de sus contribuciones fue la observación del “halo” estelar de Andrómeda, la tenue nube esférica de estrellas y cúmulos estelares que rodea al disco galáctico principal. Los astrónomos percibieron que las estrellas del halo presentaban un amplio abanico de edades: las más viejas tienen entre 11.000 y 13.500 millones de años; las más jóvenes, entre 6000 y 8000 millones. Estas últimas deben proceder de alguna galaxia más joven (una galaxia satélite absorbida) o de alguna región más joven de la propia Andrómeda (es decir, del disco, si se ha fraccionado como consecuencia del paso de otra galaxia o de una colisión con ella). El halo de la Vía Láctea no contiene un número significativo de estrellas tan jóvenes. En consecuencia, aun cuando Andrómeda y la Vía Láctea presentan una estructura similar, los datos del Hubble señalan que han recorrido una historia diferente.

NASA, ESA Y T. M. BROWN STScI (arriba); BILL SCHOENING, VANESSA HARVEY/REU PROGRAM/NOAO/AURA/NSF (inserto); NASA, J. BALLY Universidad de Colorado, H. THROOP Instituto de Investigación del Suroeste Y C. R. O'DELL Universidad de Vanderbilt (abajo)

8. UN CHORRO DE PLASMA emerge de la galaxia M87. Lo origina un agujero negro de tres mil millones de masas solares que absorbe la materia de sus alrededores.



6 Agujeros negros supermasivos

Desde los años sesenta se viene sosteniendo que los cuásares y otros núcleos galácticos activos —núcleos brillantes y violentos de galaxias— reciben su energía de la absorción de materia por parte de sus agujeros negros gigantes. Las observaciones del Hubble apoyan esta idea. Casi todas las galaxias analizadas por el Hubble han resultado tener un agujero negro en su centro. Cabe destacar dos hallazgos. Primero, las imágenes de alta resolución de los cuásares muestran que esos objetos residen en galaxias elípticas brillantes o en galaxias que interactúan entre sí; parece, pues, que se necesita cierta secuencia de sucesos para alimentar el agujero negro central. Segundo, la masa del agujero negro gigante guarda una buena correlación con la masa del bulbo esférico de estrellas que rodea el centro galáctico. Sugiere que la formación y evolución de la galaxia y de su agujero negro están íntimamente conectadas.

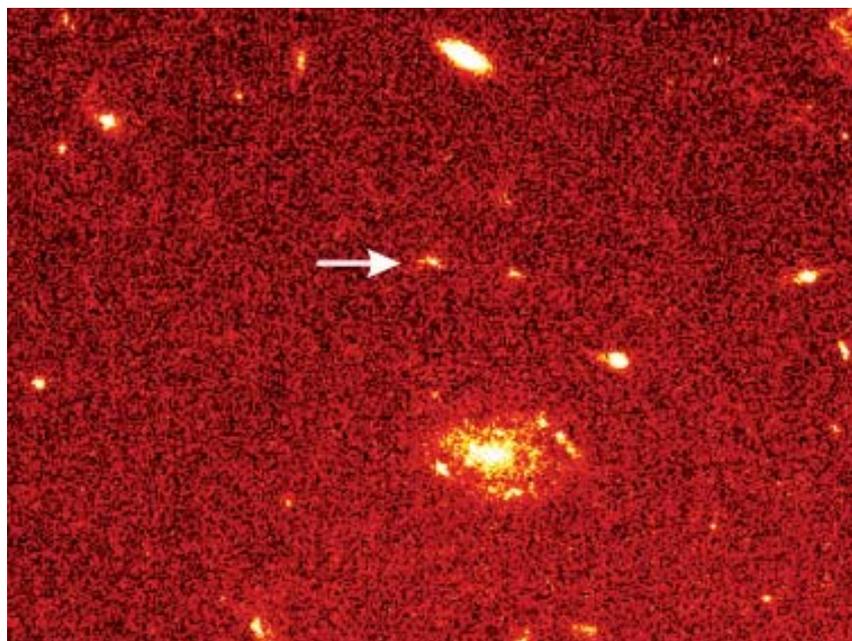
MASA Y EQUIPO DEL LEGADO DEL HUBBLE STScI/AURA (arriba); NASA, S. R. KULKARNI Y S. G. DJORGOSKI Instituto de Tecnología de California Y EQUIPO DEL GRB DEL CALTECH (abajo)

7 Las mayores explosiones

Las erupciones de rayos gamma son breves destellos de rayos gamma: duran entre unos milisegundos y algunas decenas de minutos. Se distinguen dos tipos, en razón de la duración superior o inferior a los dos segundos; los más largos producen fotones de menor energía que los más cortos. Las detecciones del Observatorio Compton de Rayos Gamma, del satélite de rayos X BeppoSAX y de los observatorios terrestres han atribuido los brotes de larga duración al colapso de los núcleos de estrellas de gran masa y vida corta; en otras palabras, a un tipo de supernova. ¿Por qué sólo una pequeña fracción de las supernovas producen erupciones de rayos gamma? El Hubble ha encontrado que, si bien las supernovas suceden a lo largo y ancho de las regiones de formación estelar de las galaxias, las erupciones de larga duración se concentran en las regiones más brillantes, donde residen las estrellas de mayor masa. Y comparadas con las galaxias cuyas supernovas se han estudiado, las anfitrionas de las erupciones son bastante más débiles, más irregulares y menos dotadas de elementos pesados. Esto es importante porque las estrellas de gran masa deficientes en elementos pesados generan vientos estelares más débiles que los que emanan de las que sí son ricas en metales. En el transcurso de sus vidas retienen más masa y cuando mueren son más pesadas. El colapso de sus núcleos tiende a producir no una estrella de neutrones, sino un agujero negro. De hecho, los astrónomos atribuyen las erupciones largas a chorros colimados creados por agujeros negros de rotación rápida. Los factores decisivos que determinan si el colapso de un núcleo origina una erupción de rayos gamma parecen ser la masa y el ritmo de rotación de la estrella progenitora en el momento de su destrucción.

La identificación de los brotes de corta duración es más compleja. Hubo que esperar hasta 2005 para que los satélites HETE 2 y Swift localizaran algunas fuentes. El telescopio Hubble y el Observatorio Chandra de Rayos X descubrieron que los brotes de ese tipo liberan menos energía que los de larga duración y acontecen en una mayor variedad de galaxias, incluidas galaxias elípticas donde ya no se forman estrellas. Parece que las erupciones cortas no guardan relación con las estrellas masivas de vida corta, sino con sus carcasas. La hipótesis más verosímil sostiene que proceden de la fusión de dos estrellas de neutrones.

9. LA GALAXIA DONDE OCURRIÓ EL BROTE de rayos gamma 971214 aparece aquí como una modesta mancha (próxima a la flecha).





10. LAS GALAXIAS LEJANAS se distribuyen por el Campo Ultraprofundo del Hubble, miles de millones de veces demasiado débiles para que se las perciba a simple vista.

8 Los límites del espacio visible

Uno de los objetivos prioritarios de la astronomía es el conocimiento del desarrollo y evolución de las galaxias y de sus precursoras en tiempos tan cercanos a la gran explosión (*big bang*) como sea posible. Para hacerse una idea del pasado de la Vía Láctea, se fotografían galaxias de distintas edades, desde su infancia hasta la madurez. Con este fin, el Hubble, en coordinación con otros observatorios, toma exposiciones largas de regiones pequeñas del cielo —que reciben los nombres de Campos Profundos del Hubble, Campo Ultraprofundo del Hubble y Estudio Profundo de los Grandes Observatorios del Origen—. Ve así las galaxias más lejanas (y, por tanto, más antiguas).

Estas imágenes, de una sensibilidad extrema, nos han mostrado galaxias tal y como eran cuando el universo apenas contaba con unos pocos cientos de millones de años, un 5 por ciento de su edad actual. Las galaxias eran entonces más pequeñas y su forma más irregular, comparadas con las estructuras modernas. Es lo que cabe esperar si las galaxias de hoy resultan de la aglomeración de galaxias menores y no de la ruptura de estructuras mayores. Retroceder aún más en el tiempo es el objetivo principal del sucesor del Hubble, el Telescopio Espacial James Webb, en fase de construcción.

Estas observaciones han servido también para estudiar aumentos y descensos de la formación estelar en el universo a lo largo del tiempo cósmico. Parece que el ritmo de formación alcanzó su máximo hace unos 7000 millones de años y desde entonces se ha quedado en la décima parte. Cuando el universo era aún bastante joven —mil millones de años—, la tasa de formación estelar ya era alta, aproximadamente una tercera parte del pico.

9 La edad del universo

Las observaciones realizadas por Edwin Hubble y otros investigadores en los años veinte del pasado siglo mostraron que vivimos en un universo en expansión. Las galaxias se están distanciando entre sí sistemáticamente, lo que apunta a una dilatación del espacio. La constante de Hubble (H_0) es una medida del ritmo actual de la expansión, parámetro clave para determinar la edad del universo. El razonamiento es sencillo: H_0 es el ritmo de distanciamiento entre galaxias; por tanto, sin tener en cuenta

ta aceleraciones o frenados que haya podido haber, el inverso de H_0 fija el tiempo en el que todas las galaxias habrían estado agrupadas. El valor de H_0 desempeña también una función en el crecimiento de las galaxias, la producción de elementos ligeros y el calendario de las distintas fases de la evolución cósmica. No sorprende, por tanto, que desde un principio la medición precisa de la constante de Hubble fuera el primer objetivo del telescopio espacial que lleva su nombre.

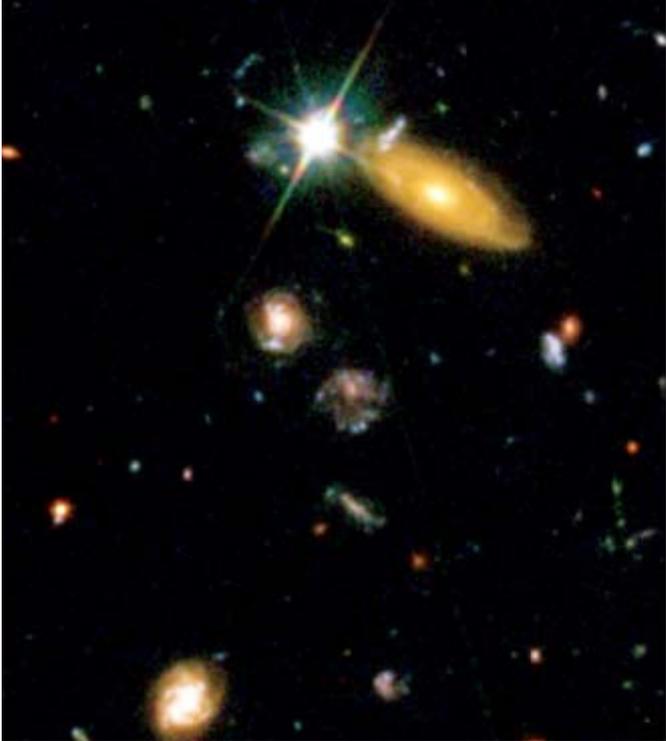
En la práctica, la determinación del valor de la constante requiere la me-

dición de la distancia a las galaxias cercanas, tarea complicada y fuente de controversias a lo largo del siglo XX. El telescopio espacial estudió las variables cefeidas de 31 galaxias; las oscilaciones de su luz que caracterizan a estas estrellas revelan su brillo intrínseco y, por tanto, su distancia. El valor resultante de H_0 tiene una precisión del 10 por ciento. Junto con las mediciones del fondo cósmico de microondas, el valor de la constante de Hubble indica que la edad del universo es de 13.700 millones de años.

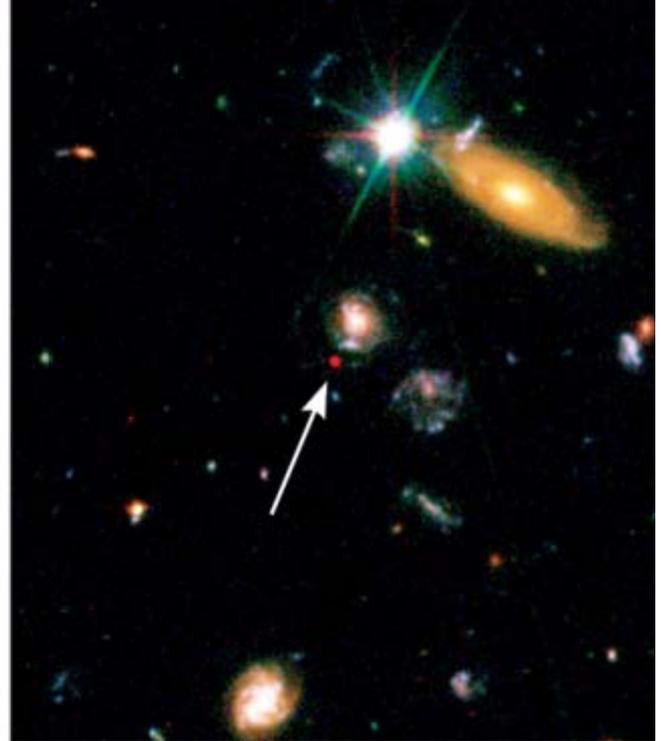


11. LAS PULSANTES ESTRELLAS CEFIDAS, como las que aquí se dibujan, se toman por vara de medir las distancias intergalácticas.

Antes (1995)



Después (2002)



10 El universo en expansión acelerada

En 1998, dos equipos de astrónomos anunciaron, sin previo acuerdo entre ellos, un descubrimiento asombroso: la expansión del universo se está acelerando. Siempre se había pensado que el universo debía decelerarse: las galaxias se atraen mutuamente, por su fuerza de gravedad, y eso debería frenar la expansión incesante. Qué impulsa la aceleración es uno de los grandes misterios de la física moderna. La hipótesis de trabajo mantiene que el universo tiene una componente hasta ahora desconocida, la “energía oscura”. Una combinación de observaciones del fondo de microondas y de datos tomados por el Hubble y por telescopios terrestres establece que casi las tres cuartas partes de la densidad total de energía del universo corresponden a energía oscura.

La aceleración comenzó hace cinco mil millones de años. Hasta ese momento la expansión se había estado frenando. En el año 2004, el telescopio Hubble descubrió 16 supernovas lejanas que abarcan esa transición crucial. Las observaciones en cuestión proporcionaron información muy útil para teorizar sobre la naturaleza de la energía oscura. La hipótesis más simple (aunque también la más misteriosa)

12. LAS SUPERNOVAS LEJANAS, descubiertas al comparar imágenes obtenidas en momentos diferentes, revelan la transición entre la deceleración y la aceleración cósmicas.

argumenta que la energía oscura es una forma de energía del espacio mismo, presente incluso allí donde no hay nada. Hasta la fecha, no hay instrumento tan imprescindible como el Hubble para el descubrimiento de

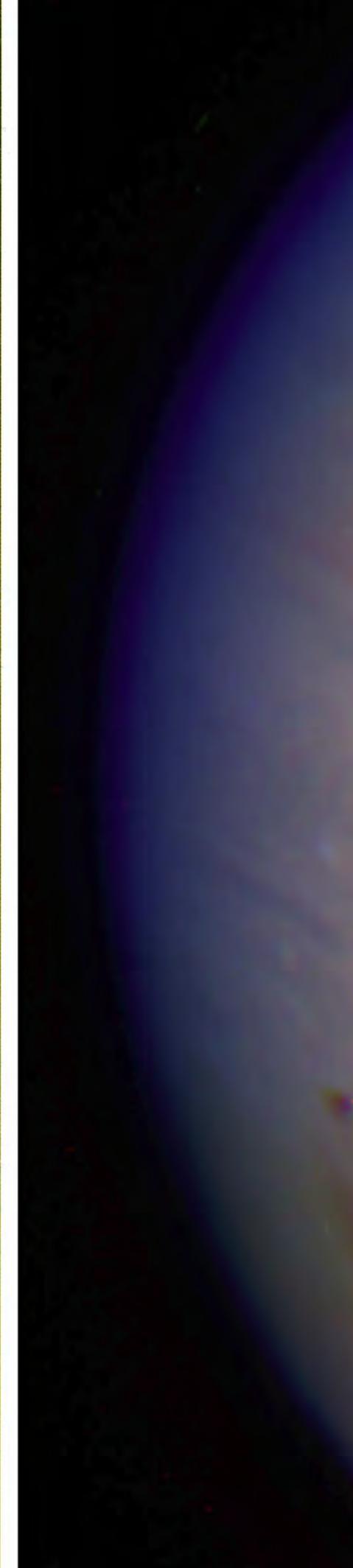
supernovas lejanas y el estudio de la energía oscura. Su papel en el análisis de la energía oscura es quizá la más poderosa de las razones que esgrimen los astrónomos para que la NASA lo mantenga activo algún tiempo más.

El autor

Mario Livio trabaja en el Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial en Baltimore.

Bibliografía complementaria

- VELOCIDAD DE EXPANSIÓN Y TAMAÑO DEL UNIVERSO. Wendy L. Freedman en *Investigación y Ciencia*, n.º 196, enero 1993.
- EL ENCUENTRO DEL COMETA SHOEMAKER-LEVY 9 CON JÚPITER. David H. Levy, Eugene M. Shoemaker y Carolyn S. Shoemaker en *Investigación y Ciencia*, n.º 229, octubre 1995.
- LAS GALAXIAS DEL UNIVERSO JOVEN. F. Duccio Macchetto y Mark Dickinson en *Investigación y Ciencia*, n.º 250, julio 1997.
- LOS PRIMEROS DÍAS DE LA VIDA DE UNA ESTRELLA. Thomas P. Ray en *Investigación y Ciencia*, n.º 289, octubre 2000.
- SOMBRA DE OTRAS TIERRAS. Laurance R. Doyle, Hans-Jörg Deeg y Timothy M. Brown en *Investigación y Ciencia*, n.º 290, noviembre 2000.
- LAS EXPLOSIONES MÁS BRILLANTES DEL UNIVERSO. Neil Gehrels Luigi Piro y Peter J. T. Leonard en *Investigación y Ciencia*, n.º 317, febrero 2003.
- ASOCIACIONES GALÁCTICAS. Kimberly Weaver en *Investigación y Ciencia*, n.º 324, septiembre 2003.
- CUANDO LA ACELERACIÓN CAMBIÓ DE SIGNO. Adam G. Riess y Michael S. Turner en *Investigación y Ciencia*, n.º 331, abril 2004.
- LA MUERTE DE LAS ESTRELLAS COMUNES. Bruce Balick y Adam Frank en *Investigación y Ciencia*, n.º 337, octubre 2004.





El encuentro del cometa Shoemaker-Levy 9 con Júpiter

*Las imágenes del cometa que se rompió
en pedazos y se precipitó sobre Júpiter
siguen asombrando a los astrónomos
un año después*

David H. Levy, Eugene M. Shoemaker y Carolyn S. Shoemaker

Trabajábamos bajo la cúpula del pequeño telescopio Schmidt del observatorio de Palomar, en una habitación abarrotada de papeles y libros. Era el 22 de mayo de 1993. Carolyn se hallaba inclinada sobre su estereomicroscopio, un instrumento que le ha servido para examinar las fotografías de asteroides y cometas durante más de diez años.

Gene ha dedicado una parte importante de su carrera a observarlos. En los años cincuenta demostró ya que el choque de un pequeño asteroide formó la enorme hoya que hay en el desierto de Arizona al este de Flagstaff. Más tarde se dedicó a investigar los cráteres visibles de la Luna y de los satélites de los planetas exteriores, así como los restos de viejas colisiones que todavía se dejan ver en las soledades de Australia. Gene y Carolyn están ahora empeñados en la búsqueda sistemática de asteroides susceptibles de colisionar con la Tierra.

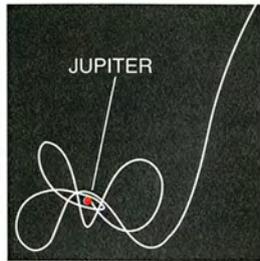
Aquel día de mayo, David leía su correo electrónico para comprobar si debía añadir al programa de observación algún cometa o asteroide recién detectado. Cuenta en su haber con 21 trofeos obtenidos en la caza de cometas, ocho de ellos por descubrimientos realizados con un telescopio de 40 centímetros en el patio trasero de su casa. Desde 1989, en que venimos trabajando en equipo, hemos divisado 13 cometas. Pese al nivel de experiencia adquirido, el descubrimiento de mayo de 1993 nos sobrevino por sorpresa, lo mismo que al resto de la comunidad astronómica.

El correo electrónico de David traía una información sorprendente, procedente de la oficina central de telegramas astronómicos de la Unión Astronómica Internacional (una especie de servicio telegráfico especializado). El cometa que habíamos descubierto hacía dos meses colisionaría con Júpiter en julio de 1994. Tras toda una vida profesional examinando los cráteres formados por los impactos cometarios y los cuerpos que los

1. EL SHOEMAKER-LEVY 9 apareció inicialmente en forma de cometa aplanado, con alas a cada lado. Imágenes más precisas revelaron que estaba constituido por una sucesión de núcleos separados. Estos fragmentos chocaron contra Júpiter sólo 16 meses después de su descubrimiento, y cada uno dejó tras de sí una enorme mancha oscura, de aspecto peculiar, sobre el planeta.

Crónicas cometarias

La colisión de un cometa de gran tamaño con un planeta es un evento excepcional. Los astrónomos reconocen la suerte que supuso que el impacto de Shoemaker-Levy 9 con Júpiter tuviera lugar en 1994 y no antes. La conjunción de fenómenos astronómicos y elaboración teórica llevó a determinar que S-L 9 chocaría contra Júpiter, lo que permitió prepararse para presenciar los fuegos artificiales del fin del cometa con un detalle sin precedentes, gracias al *Telescopio Espacial Hubble*. A continuación se destacan los hechos principales.

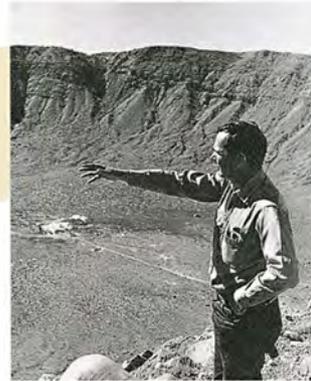


1929: Por esta época, un cometa de corto período entra en una órbita polar inestable alrededor de Júpiter.

1956: Eugene Shoemaker termina su investigación doctoral acerca de cómo, hace 50.000 años, un asteroide diminuto abrió un enorme cráter en el desierto de Arizona.



1960: David Levy adquiere su primer telescopio, un reflector de 9 centímetros. Como un curioso presagio de su futuro logro, el primer objeto astronómico que observó fue Júpiter.



ocasionan, Gene podría contemplar una colisión en directo.

Como sabe todo aficionado que se haya asomado a la Luna desde su telescopio, la superficie del satélite está sembrada de cráteres de impacto. La propia Luna se originó verosímilmente a partir de los restos de una colisión. Durante la juventud de nuestro planeta, un cuerpo del tamaño de Marte pudo chocar con él, derretirlo y poner en órbita un torrente de “escombros”, que al congelarse crearía la Luna. Tectónicamente estática, sin aire ni agua, la Luna conservará indefinidamente su faz marcada por cráteres. La erosión y la deposición sedimentaria nivelan sin cesar la superficie de la Tierra, razón que explica la relativa ausencia de cráteres, pese a haber recibido nuestro planeta muchos más impactos que la Luna. Una auténtica ducha cometaria llovió sobre la Tierra en formación, hace unos 3900 o 4500 millones de años, aportando carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno, elementos críticos que permitieron el desarrollo de la vida.

Pero colisiones de ese tipo han arrasado también el mundo de la vida. Hace 65 millones de años, un objeto algo mayor que el cometa Halley se precipitó contra lo que ahora es la costa de la península de Yucatán. El impacto generó un cráter de 170 kilómetros de ancho cuyos restos salieron despedidos por todo el planeta. Cuando el número ingente de misiles balísticos cayó de nuevo a tierra, el cielo se cubrió de meteoros y la atmósfera alcanzó temperaturas altísimas. Casi por doquier, la superficie ardió en llamas, pero el infierno duraría poco. Una oscuridad per-

sistente envolvió la Tierra a medida que el polvo ascendía a la atmósfera e impedía el paso a los rayos solares. Tras meses de frío, vinieron siglos de calor debido al efecto invernadero que causó el dióxido de carbono liberado durante el impacto por las rocas que lo sufrieron. Se extinguieron numerosas especies.

Este cataclismo ocurrido en un ayer remoto nos indica que los proyectiles procedentes del espacio pueden transformar nuestro planeta. El programa de investigación que llevamos a cabo en Palomar se inscribe entre los varios concebidos para determinar con qué frecuencia chocan los intrusos interplanetarios de este tipo contra los planetas y los satélites. Pero lo que nunca hubiéramos imaginado era asistir a un impacto tan colosal.

Nuestro descubrimiento del cometa empezó con la normalidad acostumbrada. La del 23 de marzo de 1993 fue una noche oscura, que amenazaba tormenta. Realizamos nuestras tareas habituales en el menor de los cuatro telescopios del observatorio de Palomar: un instrumento provisto de un espejo de 66 centímetros y una lente correctora de 48 diseñado para rastrear zonas muy amplias del cielo. Durante las observaciones nos acompañaba esa vez Phillipe Bendjoya, un astrónomo de la Universidad de Niza que estaba de paso.

Las nubes iban poco a poco cubriendo el cielo, y aunque la bruma no ocultaba por completo el firmamento, sabíamos que oscurecería las estrellas más débiles, los asteroides y los cometas si hubiera. Decidimos interrumpir el procedimiento rutinario

de observación y optamos por utilizar un carrito que había estado expuesto parcialmente a la luz (las pésimas condiciones meteorológicas parecían merecer que se usara esa película dudosa). Uno de nuestros campos de visión habituales abarcaba el planeta Júpiter, que estaba en uno de los claros. Hicimos tres exposiciones —una de Júpiter y dos de zonas vecinas— antes de que las nubes cerraran el hueco que quedaba libre. Algunas horas después se aclaró la noche y pudimos realizar una segunda exposición del campo de Júpiter.

Dos días más tarde, Carolyn examinaba las imágenes tomadas aquella noche encapotada. Por medio de su estereomicroscopio, se dedicó a buscar el efecto tridimensional que produce el pequeño cambio de posición de un asteroide o cometa con respecto a las estrellas de fondo. De pronto se irguió y dijo: “No sé lo que estoy viendo, pero parece un cometa espachurrado.” Era cierto. El objeto se asemejaba a un cometa al que hubiesen pisado. Los cometas presentan un núcleo de varios kilómetros de diámetro, formado de hielo, rocas y compuestos orgánicos. Cuando se acerca al Sol, el hielo pasa directamente del estado sólido al gaseoso y libera polvo, que genera un halo luminoso, la coma. La presión de la radiación solar ahorma ese material en una cola alargada. Pero aquel cometa, en vez de una sola coma y una única cola, presentaba una aglomeración de comas en forma de barra, con una cola compuesta que se estiraba hacia el norte. Y aún más extraño: a cada extremo de la barra se detectaba una línea muy delgada de luz.

Necesitábamos confirmar ese ex-

1982: Carolyn Shoemaker se une a su marido en la búsqueda de cometas y asteroides. Se sirven de un estereomicroscopio construido para comparar dos imágenes de una misma parte del cielo tomadas en momentos distintos.



1986: El *Challenger* explota durante su despegue, lo que deja en tierra la flota de transbordadores espaciales y retrasa el lanzamiento del *Telescopio Espacial Hubble* y de la sonda *Galileo*.

1989: David Levy se une a Eugene y a Carolyn Shoemaker en la caza de cometas y asteroides con un telescopio del observatorio de Palomar, en California.



1990: El transbordador espacial *Discovery* pone en órbita el *Hubble*, pero una larga serie de problemas técnicos y los defectos del espejo principal afectan gravemente al telescopio.



traño hallazgo con un telescopio mejor. Nos pusimos en contacto con James V. Scotti, quien esa noche realizaba observaciones con el telescopio *Spacewatch* de Kitt Peak. Jim se prestó a tomar imágenes de televisión de alta resolución del cometa. Quedó estupefacto: “Hay al menos cinco núcleos cometarios en fila”, nos explicaba por teléfono al describirnos lo que se veía, “pero existe material del cometa en los huecos que los separan. Sospecho que veré más núcleos cuando aclare la noche.”

Inmediatamente dimos cuenta de este estrafalario cometa a Brian G. Marsden, director de la oficina central de telegramas astronómicos del Centro de Astrofísica Smithsonian de Harvard, y Scotti siguió con las observaciones. Al día siguiente, la oficina de Marsden anunció el descubrimiento. La descripción del objeto era tan insólita que los astrónomos de todo el mundo se pusieron enseguida a examinarlo. Jane Luu y David Jewitt obtuvieron una imagen magnífica con el reflector de 2,20 metros de la Universidad de Hawai. Más tarde identificaron 21 núcleos separados que, según sus propias palabras, se alineaban “como perlas en un collar”.

Siguiendo la tradición inaugurada por Charles Messier, hace más de dos siglos, el cometa fue bautizado con el nombre de sus descubridores. Debido a que era el noveno de una serie de cometas que habíamos encontrado y que describían alrededor del Sol órbitas de corto período, se le otorgó el título formal de “Cometa Periódico Shoemaker-Levy 9”. Para abreviar, S-L 9.

A mediados de abril de 1993, Marsden, Syuichi Nakano y Donald

K. Yeomans determinaron que el cometa orbitaba alrededor de Júpiter. También hallaron que había pasado muy cerca del planeta unos ocho meses antes de que lo localizáramos. Esa proximidad explicaría la existencia de múltiples fragmentos.

El 7 de julio de 1992, S-L 9 se había acercado a unos 20.000 kilómetros de las capas nubosas de Júpiter. Al realizar una curva en horquilla alrededor del planeta gigante, se hizo añicos debido a que los fragmentos más cercanos a Júpiter sufrieron una desviación más pronunciada que los más alejados. La diferencia en las trayectorias orbitales se justificaba por la disminución de la fuerza de la atracción gravitatoria de Júpiter del extremo más cercano del cometa al más alejado. La tensión que experimentó S-L 9 era sumamente débil, pero aun así logró despedazarlo con facilidad. Este comportamiento sugiere que el cuerpo original era simplemente una pila de fragmentos adheridos entre sí por su débil atracción gravitatoria.

Aunque los astrónomos ya habían establecido que, en el pasado, había habido por breves períodos cometas en órbita alrededor de Júpiter, S-L 9 es el primero observado dando vueltas alrededor de un planeta. Júpiter no tenía una, sino 21 pequeñas lunas nuevas, pero esos satélites recién adquiridos no habrían de durar mucho. Tras los cálculos pertinentes, Marsden anunció que el resquebrajado cometa chocaría contra Júpiter en julio de 1994.

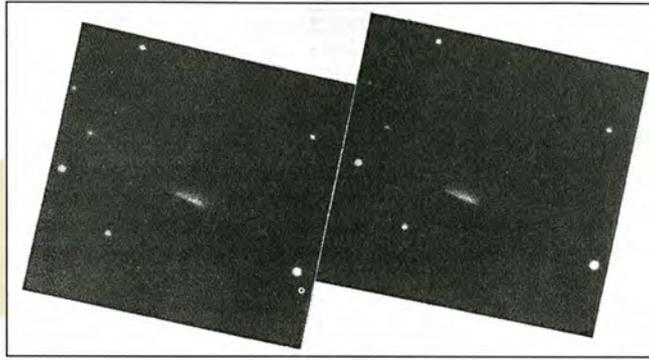
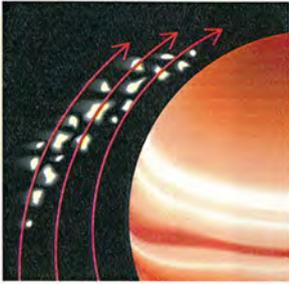
Astrónomos y astrofísicos se preguntaron inmediatamente por las consecuencias de los impactos. ¿Verían

una inmensa exhibición pirotécnica o sería un fiasco cósmico? H. Jay Melosh sugirió que los cometas se adentrarían tanto en la atmósfera de Júpiter antes de estallar, que el planeta se los tragaría sin que dejaran apenas rastro. Por contra, Thomas J. Ahrens, Toshiko Takata, Kevin Zahnle y Mordecai-Mark Mac Low opinaron que cada núcleo excavaría un “túnel de fuego” en la atmósfera de Júpiter, explotaría y liberaría al espacio una espectacular bola encendida a través de esa cavidad. David A. Crawford y Mark B. Boslough sostenían que se produciría una tremenda erupción de gas caliente, sobre todo en la parte superior del túnel.

Aun cuando fueran ciertos la mayoría de los pronósticos, ¿nos sería dado presenciar parte al menos del espectáculo? Para responder al interrogante hacía falta determinar en qué punto exacto del planeta se produciría el impacto. Los primeros cálculos no resultaban alentadores: predecían que los cometas chocarían en la cara nocturna de Júpiter, donde el cuerpo del planeta impediría la visión desde la Tierra. Júpiter tendría que rotar en

DAVID H. LEVY, EUGENE M. SHOEMAKER y CAROLYN S. SHOEMAKER se aunaron en 1989 para realizar, desde entonces, observaciones astronómicas conjuntas. Levy ha escrito 15 libros, una cifra algo menor que el número de cometas que ha descubierto. Eugene y Carolyn Shoemaker, marido y mujer, trabajan en equipo desde 1982. Eugene ha organizado la rama de astrogeología del Servicio Geológico de los EE.UU. Carolyn enseña astronomía en la Universidad del Norte de Arizona.

1992: Mientras describe una órbita elíptica, el cometa Shoemaker-Levy 9 pasa a menos de 20.000 km de Júpiter, se desintegra por los efectos de la gravedad del planeta y se forma un torrente de fragmentos.



1993: En un par de fotografías telescópicas que cubren una zona del cielo cercana a Júpiter, Carolyn Shoemaker descubre lo que parece un "cometa espachurrado". El efecto tridimensional se aprecia sosteniendo la página muy cerca y mezclando las dos imágenes.

1993: Los astronautas del transbordador espacial *Endeavor* reparan en órbita, a unos 600 kilómetros de la Tierra, un *Hubble* con problemas.



dirección este al menos una hora para que las colisiones pudieran observarse desde la Tierra. La naturaleza estaba a punto de poner en escena el choque más grandioso de la historia y nuestra butaca quedaba detrás de la columna.

Durante el verano y el otoño de 1993 aceptamos este pronóstico; Júpiter y el Sol estaban demasiado próximos en el cielo como para que pudieran realizarse más observaciones del S-L 9. Pero a principios de diciembre Scotti obtuvo, al salir Júpiter justo antes del amanecer, nuevas posiciones de los fragmentos del cometa. A partir de estas medidas se llegó a una conclusión diferente: el impacto de los cometas se produciría mucho más cerca de la cara visible desde la Tierra.

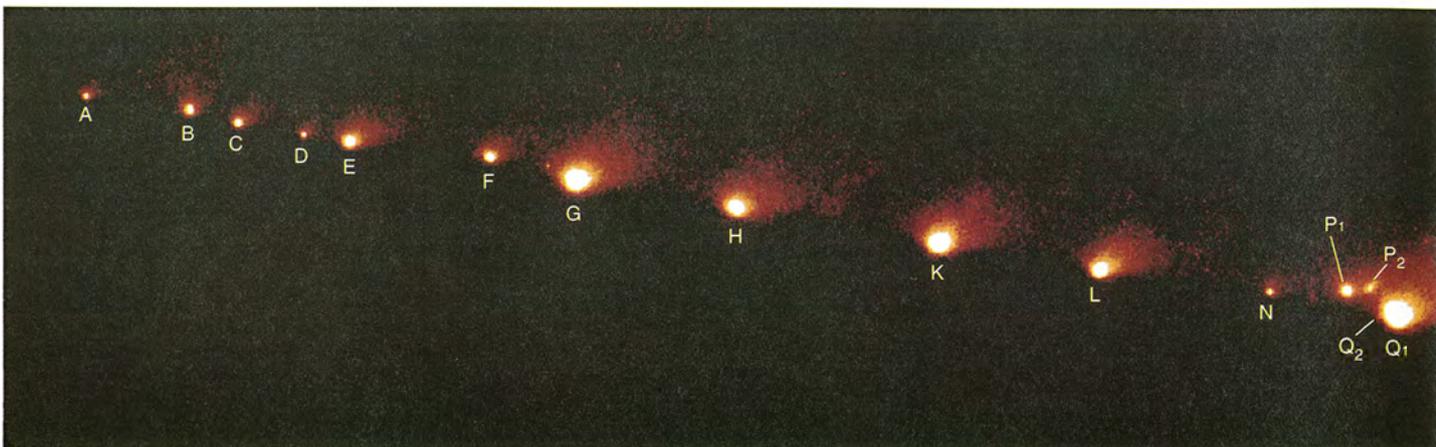
Conforme se acercaba la "semana del impacto", en el verano de 1994, se hizo evidente que el carácter único del fenómeno justificaba la dedicación de tiempo de observación por parte del mayor número de telesco-

pios posible. Resultaba asimismo ocasión excepcional el que los astrónomos contaran con 14 meses de antelación para coordinar los programas. El *Telescopio Espacial Hubble* encabezaba la lista de potentes telescopios que habrían de dirigir su mirada a Júpiter. Con su óptica corregida, el telescopio ya había registrado imágenes de los núcleos del cometa con una claridad impresionante. El equipo dirigido por Harold A. Weaver, del Instituto de Ciencia del *Telescopio Espacial* en Baltimore, utilizaría la cámara planetaria de campo ancho del *Hubble* para hacer un seguimiento de los núcleos del cometa en su aproximación a Júpiter. Un grupo encabezado por Heidi B. Hammel, del Instituto de Tecnología de California, dedicaría el telescopio a la obtención de imágenes detalladas de todo el planeta el día antes del primer impacto, a fin de compararlas con las que se irían tomando durante la semana. El telescopio también recogería las líneas espectrográficas

características de los elementos y gases liberados durante las explosiones, siempre y cuando, claro está, se pudiera ver algo en el momento en que las zonas de los impactos entrasen en el campo de visión de la Tierra.

Pero aunque las colisiones que tendrían lugar en la parte oscura de Júpiter fuesen invisibles desde la Tierra, existiría otro medio para examinarlas. En su trayectoria hacia su encuentro con Júpiter, la sonda espacial *Galileo* estaba en una posición idónea para que las cámaras y otros instrumentos instalados a bordo dispusieran de una visibilidad excelente de los lugares de los impactos. Los controladores del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena dieron instrucciones a la *Galileo* para que recogiera datos de varios de los impactos y los enviara a la Tierra.

Importantes telescopios dispersos por el mundo intervendrían en la detección de los impactos y se ocuparían de los fenómenos con ellos asociados. Las colisiones tendrían lugar





1994: En seis días, los 21 fragmentos del cometa se estrellan contra Júpiter y explotan. En determinadas longitudes de onda de la luz, algunos de los penachos sugidos alcanzan un brillo tan deslumbrante, que impiden la visión del planeta (*izquierda*). Al rotar éste, las cicatrices de las colisiones producidas en la parte oscura de Júpiter se hacen visibles desde la Tierra (*arriba*).

1994: Los astrónomos del Instituto de Ciencia del *Telescopio Espacial* reciben imágenes enviadas por el *Hubble* de los gigantescos penachos explosivos y de las manchas producidas en Júpiter. Comienza el proceso de descifrar los datos.



a lo largo de un período de seis días, por lo que se necesitaban telescopios emplazados por todo el globo. Participaron el telescopio de 5 metros de Palomar, otros telescopios de gran diámetro emplazados en España, Chile, Hawai y Australia, y un conjunto de telescopios menores. El *Observatorio Aerotransportado Kuiper* de la NASA, en vuelo desde Melbourne, tomó unas medidas espectroscópicas fundamentales. Además, varios equipos de radioastrónomos realizaron un seguimiento de Júpiter para determinar los efectos de los choques sobre la magnetosfera joviana.

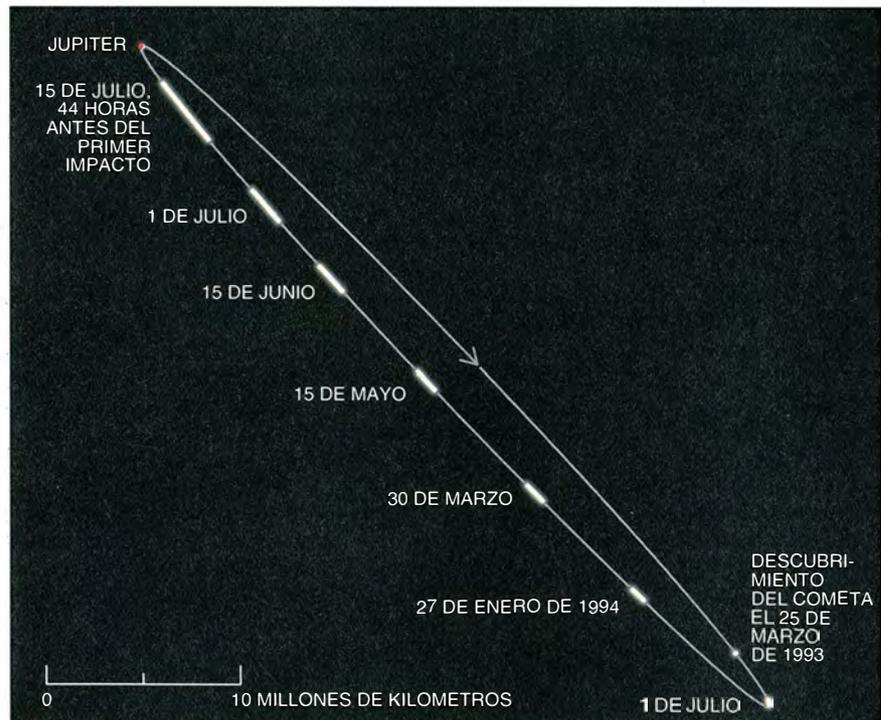
Imke de Pater y sus colegas planearon la toma de imágenes infrarrojas en las longitudes de onda de la luz absorbida por el gas metano frío, con el telescopio de 10 metros del observatorio Keck. Debido a que la atmósfera de Júpiter, rica en metano, absorbe esas longitudes de onda, los filtros que sólo dejaran pasar la luz en la "banda del metano" tendrían el

efecto de oscurecer la cara del planeta y resaltar cualquier fenómeno que se desarrollara a gran altura dentro de la atmósfera del planeta o allende la misma. Para el grupo de Imke, la sensibilidad de tales mediciones permitiría registrar cualquier mancha o resto que produjesen los impactos y quizás incluso los pena-

chos que emitiesen. Se preparó el Telescopio Explorador Infrarrojo del Polo Sur (SPIREX) para que realizara observaciones similares.

Tras la espera de 14 meses, el primer mensaje fue electrizante: el observatorio español de Calar Alto había recogido la señal infrarroja característica de un penacho que se

2. LOS FRAGMENTOS DEL COMETA que subsistieron tras el acercamiento a Júpiter de 1992 muestran sus delicadas comas en una imagen tomada por el *Telescopio Espacial Hubble* (*izquierda*). Los 21 núcleos se identifican con las letras del alfabeto (se han omitido la I y la O para evitar confusiones con los números 1 y 0). Los subíndices numéricos de los fragmentos P y Q denotan núcleos que se desprendieron después de la desintegración principal. La longitud del chorro de fragmentos fue aumentando desde el momento del descubrimiento hasta el de la colisión definitiva (*abajo*).



Diario de una perla lanzada al aire

Quedé fascinado ante la semejanza mostrada por las colisiones más intensas y las secuencias de sucesos que las rodearon. Antes del impacto, penetraba en la atmósfera de Júpiter una tormenta de pequeñas partículas. Este torrente de residuos originaba la incandescencia infrarroja sobre el borde visible del planeta, encima del lugar del impacto, que se observaba desde la Tierra. A continuación, la parte principal de la masa chocaba contra Júpiter con toda su fuerza y generaba un brillante meteoro, oculto para el *Hubble* y los telescopios terrestres, pero no para la sonda *Galileo* (abajo), que captó la imagen del choque del núcleo W (izquierda).



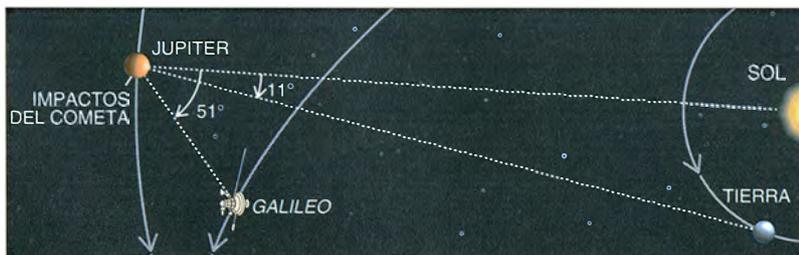
A medida que el núcleo se adentraba en la atmósfera de Júpiter,

emergía una bola incandescente. Del "túnel de fuego" salían disparados gases calientes a velocidades superiores a los 10 kilómetros por segundo. Este chorro producía un penacho que alcanzaba los 3000 kilómetros de altura por encima de las nubes de amoníaco del planeta. A medida que crecía el penacho, descendía su temperatura hasta quedar reducida a unas decenas de grados sobre el cero absoluto. Se condensaban entonces las partículas submicroscópicas, lo que hacía que, gracias a la luz solar reflejada, el penacho fuese perceptible según entraba en el campo de visión de la Tierra, alzándose sobre la sombra de Júpiter.

Unos seis minutos después de la colisión, el penacho que había brotado en dirección ascendente comenzaba a desplomarse. Su caída se prolongaba durante unos 10 minutos. El penacho en desplome y la atmósfera que había debajo se iban recalentando al par que se producía la compresión de los gases y la consiguiente emisión de destellos persistentes de energía infrarroja. Este estallido era el principal suceso brillante.

En colaboración con Paul J. Hassig y David J. Roddy he estudiado la física que gobierna los penachos mediante un modelo numérico por ordenador. Nuestro trabajo ayuda a explicar las oscuras nubes que se observan durante las dos horas siguientes al impacto. La simulación por ordenador (derecha) reproduce muchos de los rasgos de un penacho en su evolución, como los del núcleo G, captado por el *Hubble* (derecha).

En las imágenes del *Hubble* y en el modelo



GRACIAS A LA GEOMETRIA de la visión desde la sonda espacial *Galileo* en su camino hacia Júpiter, ésta pudo ofrecer una imagen directa de las colisiones.

desvanecía, procedente del primer impacto (núcleo A). El Observatorio Europeo del Sur, en Chile, confirmó la detección. El impacto detectado era, además, espectacular. Como habríamos de descubrir muy pronto, el penacho se disparó a una altura de 3000 kilómetros por encima de las nubes de Júpiter. Pese a esta noticia, los astrónomos pendientes de los primeros datos del *Hubble* seguían presos de una gran tensión. El telescopio utilizó filtros y detectores diferentes de los empleados en Calar Alto, y todos se preguntaban qué es lo que vería el gran ojo del espacio.

En el Instituto de Ciencia del *Telescopio Espacial*, los especialistas en cometas se apiñaron, en cuanto empezaron a llegar las primeras imágenes, en torno a un solo monitor de vídeo. Las primeras no mostraban perturbación alguna, lo que contribuyó a aumentar la ansiedad, pero enseguida apareció una mancha sobre el borde del planeta y los presentes en la habitación respiraron. La siguiente imagen mostraba el penacho elevándose sobre Júpiter y ganando brillo. Los fuegos artificiales se veían nítidamente. Un grito de júbilo estalló en la sala.

Era evidente que la meticulosa planificación llevada a cabo obtenía

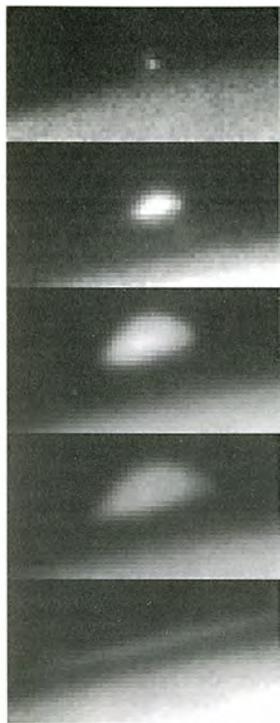
generosa recompensa. El grupo internacional de observatorios, instalados en el suelo y en el espacio, respondía como una orquesta sinfónica cuyos directores eran los frecuentes mensajes electrónicos de Marsden; gracias a ellos, cada grupo de observadores supo en todo momento lo que hacían los demás, y así pudieron ir adaptando sus programas a las circunstancias cambiantes.

Desde el principio, los cometas mostraban un comportamiento desconcertante. Al ir rotando Júpiter apareció una gran mancha producida por el núcleo A; constaba de tres partes claramente diferenciadas: una franja central, un anillo en expansión y una nube externa en media luna. En la parte visible del espectro las manchas parecían oscurísimas, pero en la luz infrarroja de la banda de absorción del metano la mancha destacaba luminosa sobre el fondo del oscuro planeta. La mancha entera era tan grande como la Tierra. Horas más tarde, el núcleo B chocó contra Júpiter causando efectos muy distintos. Aunque B brillaba más que A, el penacho que surgió del impacto era diminuto y sólo pudo detectarlo con facilidad el telescopio de 10 metros de Keck. Puede que el núcleo B consistiera en un enjambre de pequeños subnúcleos, cada uno del tamaño de

una casa, desprendidos del núcleo C algún tiempo después de la fragmentación inicial. Un observador situado en Júpiter habría presenciado una fabulosa tormenta de meteoros, pero desde la Tierra no se vio gran cosa.

Los núcleos C y E chocaron causando más o menos los mismos efectos que el núcleo A. Dos días más tarde la expectación crecía a medida que el núcleo G —con la coma brillante y presumiblemente mayor masa— realizaba su descenso final. El *Hubble* contaba con una vista despejada de Júpiter, pero los telescopios de gran diámetro de los observatorios de Mauna Kea estaban cerrados a causa de la neblina y la llovizna. Sin embargo, milagrosamente, un minuto antes del impacto, las nubes que envolvían el Mauna Kea se disiparon. Se abrieron las cúpulas de los telescopios, justo a tiempo para que pudieran captar imágenes del impacto antes de que la lluvia y la niebla obligasen a cerrarlos, diez minutos más tarde. Tuvieron suerte: el impacto del núcleo G liberó tal energía, que el brillo del penacho en su caída superó al de todo el planeta en la banda infrarroja del metano. El núcleo G dejó la misma huella que los impactos anteriores de los núcleos A, C y E, pero la cicatriz fue mucho mayor. El enorme fogonazo

TIEMPO



EL PENACHO en expansión del núcleo G, en una secuencia de imágenes del Hubble.

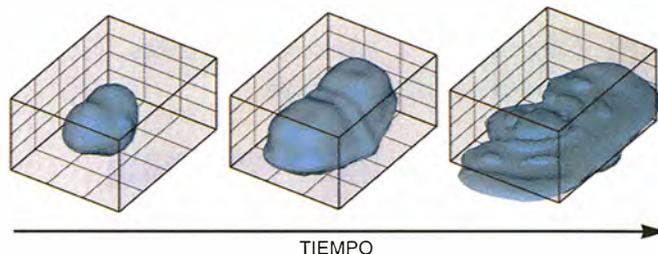
de ordenador se observa que, conforme se desplomaban los penachos principales sobre el planeta, en su base aparecía una especie de "falda" en media luna que se expandía lateralmente. Este rasgo era perceptiblemente asimétrico porque el material salía del inclinado "túnel de fuego" disparado en la dirección de "contra-fuego". El flujo lateral continuaba unos 45 minutos por la parte superior de la atmósfera mientras el borde delantero del lóbulo recorría una distancia superior al radio de la Tierra.

Gran parte de la masa con que entraba el cometa terminaba repartida por la nube exterior con forma de media luna, junto con los gases impelidos por el choque procedentes de la parte superior del túnel excavado en la atmósfera de Júpiter. Las imágenes de la mancha producida por el núcleo G muestran 16 líneas radiales bien definidas que cortan la media luna y que podrían ser producto de los 16 fragmentos del núcleo.

Las secuelas de las colisiones mayores mostraban que las nubes oscuras formaban, además, una zona interna diferenciada. Esa mancha central marcaba la existencia de una columna muy alta que se extendía de la troposfera a la estratosfera de Júpiter. La

zona oscura seguramente contenía componentes surgidos de las profundidades de la atmósfera del planeta, quizá de la capa de nubes de hidrosulfuro amónico que yace oculta bajo la capa superior de nubes de amoniaco. ¿Por qué se formaba una zona transparente entre la zona interior y la media luna? Lo ignoramos, igual que desconocemos la composición de las partículas oscuras a las cuales las nubes del impacto fueron tan visibles.

Clifford N. Mathews propuso que la materia oscura era un polímero marrón denominado poli-HCN. En mi opinión, la materia oscura de las nubes interiores quizá contuviese com-



MODELO de ordenador que simula la evolución de un penacho.

puestos de azufre, y las zonas transparentes podrían estar formadas por gases procedentes de las regiones de la atmósfera de Júpiter situadas por encima de la capa de nubes de hidrosulfuro amónico. Esta composición explicaría el patrón que dibujaban las manchas, parecido a un ojo de buey: las zonas laterales representan vestigios de la estructura en capas de la atmósfera de Júpiter una vez la excavara el cometa y estallara hacia el exterior. - E.M.S.

de energía se captó bien en Australia y en el Polo Sur.

Llegados a este punto, el *Hubble* había detectado los anillos en expansión de los impactos A, E y G en las regiones despejadas entre las nubes interiores de la zona central oscura y las oscuras medias lunas exteriores. Se pudo determinar que se expandían hacia fuera a unos 450 metros por segundo. La interpretación de estos rasgos del fenómeno correspondió a Andrew P. Ingersoll. Poco después de la semana del impacto, se percató de que los anillos no se desplazaban hacia fuera con la rapidez propia de las ondas de sonido; no se trataba del "estampido del penacho", como creyó inicialmente. Ahora bien, la velocidad de las ondas era la misma en todos los impactos. Por fin, Ingersoll e Hiroo Kanamori descubrieron que se había producido una onda de "gravidad interna", a la manera de las ondas que genera una piedra lanzada a un estanque.

Al avanzar la semana del impacto, el núcleo Y dejó como resto la mayor mancha producida hasta entonces, de nuevo con la zona central y la nube externa en media luna. Los astrónomos aficionados habían comprobado ya que esas marcas oscuras de Júpiter eran tan grandes y densas,

que podían observarlas con sus telescopios domésticos. Los núcleos H, K y L vinieron precedidos por una larga cadena de partículas que, al entrar en la atmósfera, produjeron, antes de la llegada de la parte principal del núcleo, un resplandor infrarrojo creciente. La sonda *Galileo* realizó una serie de atractivas "instantáneas" del brillante meteoro y del penacho incandescente en ascenso creados por el impacto de W, el núcleo final, al estrellarse contra Júpiter. La secuencia de imágenes tomadas por el *Hubble* concluía con una vista del desplome del penacho sobre la mancha que había generado antes el núcleo K.

Pese a las numerosas observaciones de ese espectacular episodio, no se han despejado todavía todos los interrogantes. ¿De qué tamaño eran los núcleos? ¿Consistían en enjambres de cuerpos pequeños o eran fragmentos sueltos y enormes? ¿Cuánta energía radiaron al colisionar? La diversidad de los efectos y la enorme cantidad de datos —más de los que se hayan recogido de cualquier otro fenómeno en la historia de la astronomía— impiden un resumen lineal y sencillo. Del mismo modo que los debates que precedieron al impacto insistían en la necesidad de coordinar las observaciones, las sesiones

celebradas con posterioridad se concentran en la comparación de los datos a la búsqueda de una explicación coherente.

El cometa S-L 9 empezaría a vagar por el sistema solar exterior más allá de la órbita de Neptuno. Una serie de grandes acercamientos a Júpiter alteraron poco a poco su período orbital, que pasó a ser de una rotación alrededor del Sol cada varios miles de años a una cada década. Los cálculos orbitales más recientes, realizados por Paul W. Chodas, indican que en torno a 1929 (el año en que se produjo otro cataclismo, pero en aquella ocasión en el mercado de valores), el cometa se acercó lentamente a Júpiter, lo que permitió a éste capturarlo y convertirlo en una luna. Pero la órbita resultante, con un período de dos años, era inestable. Algunas rotaciones seguían elipses estrechas, otras eran más o menos circulares. En 1992, fecha en que la órbita era muy elíptica, el cometa pasó tan cerca de Júpiter que se rompió en pedazos.

La desintegración inicial dispersó el material del cometa y lo convirtió en un torrente de restos. Erik Y. Asphaug y Willy Benz han demostrado que la laxa ristra de desechos pudo congregarse en núcleos diferenciados por efecto de la atracción gravitatio-

INDICE 1976-1994

Ofrecemos a nuestros lectores la versión electrónica de los índices de

INVESTIGACION
CIENCIA

completos desde su primer número, junto con un versátil programa de consulta, llamado **lyCEX**, que permite:

- Acceso inmediato a los datos por:
 - fecha
 - autor
 - disciplina
 - número
- Potente mecanismo de búsqueda temática
- Ayuda contextual disponible en todo momento
- Actualización anual
- Posibilidad de utilizar diversos repertorios y de modificar datos
- Gran facilidad de uso

Dos discos flexibles de 3,5" de alta densidad (1,44 Mb) para ordenadores IBM-PC o compatibles (CPU 80286 o superior) con sistema operativo MS-DOS (versión 3.3 o posterior)



Para efectuar su pedido utilice la tarjeta del encarte que se inserta en la revista



Prensa Científica, S.A.

ría mutua de los fragmentos. Nosotros sospechamos que en algunos núcleos había trozos grandes, de una sola pieza, del cometa fracturado, pero no en todos.

Tras el momento de la desintegración principal, continuó la división de algunos de los núcleos formados con anterioridad. Ignoramos cómo sucedió este segundo proceso de fractura. Es posible que la presión interna del gas rompiera los trozos grandes; quizá los desmenuzó la fuerza de las colisiones entre los fragmentos que viajaban juntos en el enjambre. Los núcleos mayores no medirían más de un kilómetro o dos. Estos núcleos no llegaron a completar ni siquiera una órbita completa más antes de chocar contra el flanco de Júpiter. Cuando lo hicieron, es probable que la energía liberada en cada uno de los mayores impactos fuese igual a la que desprendería la explosión simultánea de cientos de miles de las bombas de hidrógeno más potentes.

Las ingentes cicatrices oscuras que rasgaron Júpiter fueron extendiéndose hasta enlazarse; poco a poco se van difuminando. En el momento de redactar este artículo, casi un año después de las colisiones, se podía todavía apreciar una débil banda oscura a lo largo de la línea que dibujan los lugares de los impactos. Nunca se habían visto nubes oscuras así en Júpiter hasta ahora. Verdaderamente se trató de un fenómeno insólito e impresionante.

La frecuencia de los impactos depende de la escala del cuerpo implicado. Aunque no sabemos todavía el tamaño que tenía este cometa antes de fragmentarse, unos supuestos razonables nos llevan a estimar que el choque de una serie de núcleos del estilo del S-L 9 ocurre menos de una vez cada varios miles de años. Confesamos, pues, nuestro gozo por haber vivido hoy, haber descubierto el cometa en su camino hacia Júpiter y haber asistido a la llamarada gloriosa de su muerte.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE QUEST FOR COMETS. David H. Levy. Plenum Press, 1993.

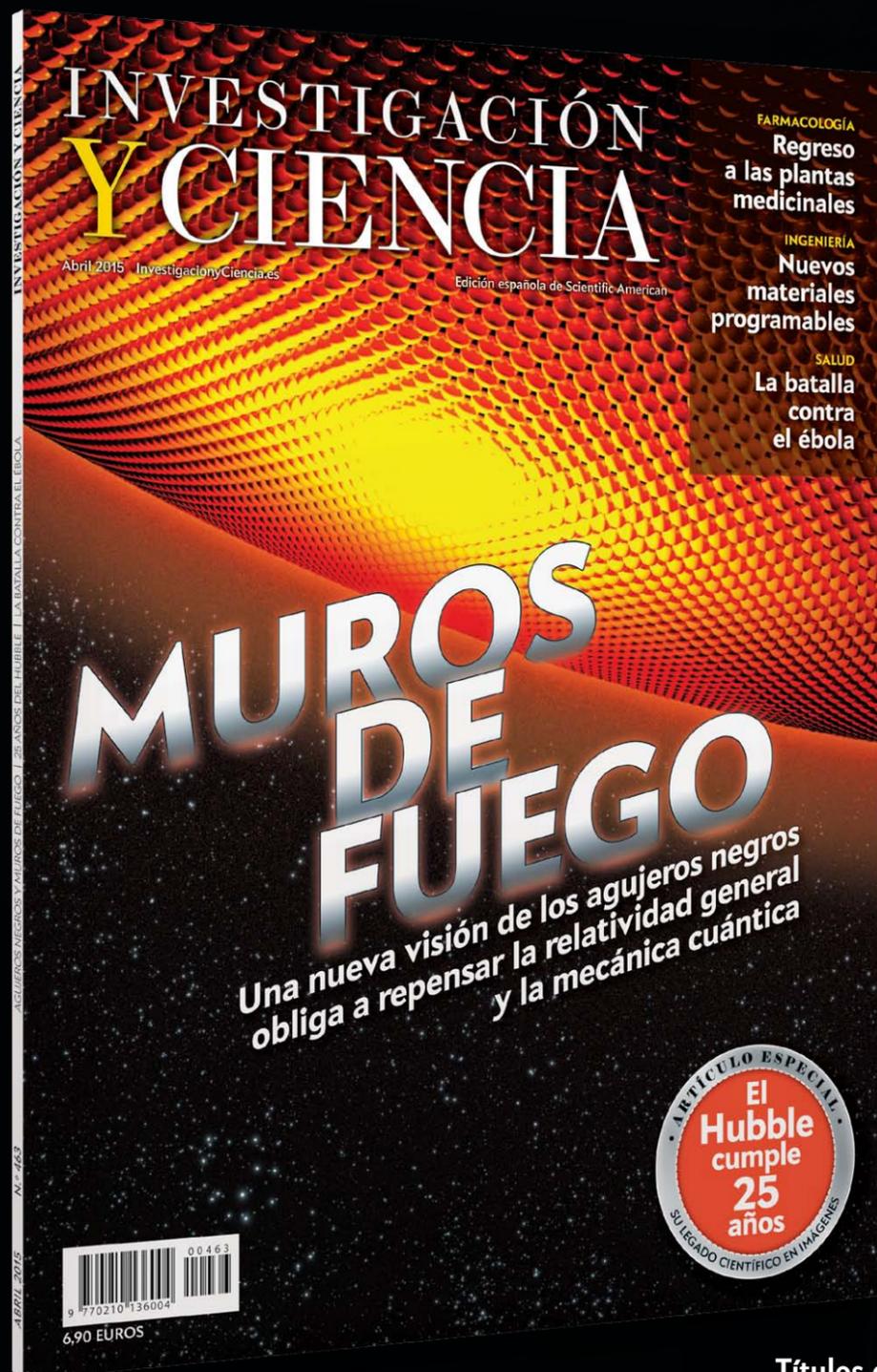
IMPACT!: COMET SHOEMAKER-LEVY 9 COLLIDES WITH JUPITER. Número especial de *Sky and Telescope*, vol. 88, n.º 4; octubre 1994.

COMET SHOEMAKER-LEVY 9. Sección especial en *Science*, vol. 267, págs. 1277-1323; 3 de marzo de 1995.

IMPACT JUPITER: THE CRASH OF COMET SHOEMAKER-LEVY 9. David H. Levy. Plenum Press (en prensa).

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

MENTE Y CEREBRO



Suscríbete a la versión **DIGITAL** de nuestras publicaciones y accede a la hemeroteca completa (en pdf)*

www.investigacionyciencia.es

Títulos disponibles en tu quiosco

* Ejemplares de IyC disponibles desde 1990 y el archivo completo de MyC, TEMAS y CUADERNOS



Los primeros días de la vida de una estrella

No hay formación de estrellas sin la contracción de gas y polvo.

¿Por qué se observan, pues, corrientes de materia que fluyen hacia el exterior?

Thomas P. Ray

Cualquier noche de invierno en el hemisferio norte, a eso de las 24 horas, observando el firmamento. ¿Qué vemos al sur? La constelación de Orión el Cazador, probablemente el grupo de estrellas mejor conocido después de la Osa Mayor (El Carro). Debajo del cinturón de Orión, dibujado con nitidez por tres estrellas prominentes en línea, se distingue la Espada del Cazador, en cuyo centro apreciamos una mancha débil y borrosa. Se trata de la nebulosa de Orión, una incubadora estelar gigantesca donde se arranciman miles de nuevas estrellas.

Orión es ideal para el estudio del nacimiento de estrellas. Se halla cerca —a 1500 años-luz de distancia— y aloja una excelente mezcla de estrellas de gran masa y otras de masa pequeña. Contiene también una gran cantidad de gas y polvo en forma de nube molecular. Ese tipo de nubes facilita la materia originaria de nuevas estrellas. Lo que acontece ahora en Orión debió de ocurrir en nuestra parte de la galaxia hace 5000 millones de años, cuando aparecieron el Sol y sus planetas.

El afán por desentrañar el mecanismo de formación de estrellas y planetas, asunto central en astronomía, viene de lejos. Pese a ello persistió largo tiempo desconocido. Hace veinte años los astrónomos sabían más de los tres primeros minutos del universo que de los primeros 3000 millones de días de la vida de nuestro sistema solar. Pero el velo se ha ido corriendo a lo largo del postrer decenio. Resulta ser que las estrellas muy jóvenes se parecen, en miniatura, al corazón de un cuásar; expulsan poderosos chorros de material hacia el exterior con el barrido co-

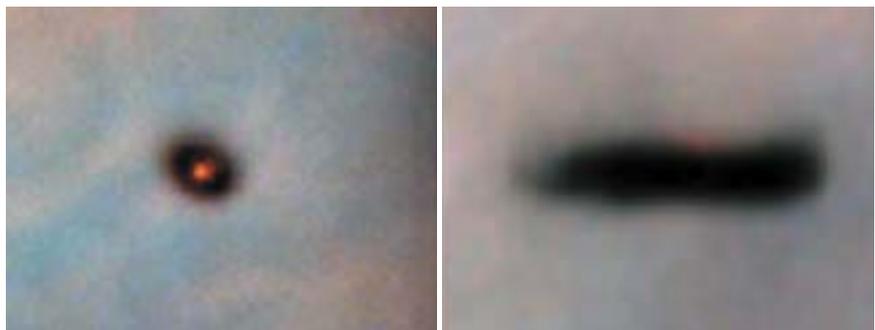
adyuvante de los campos magnéticos. Estas fuentes estelares de juventud, cuya espectacularidad recogen las fotografías, permiten resolver las paradojas que durante mucho tiempo atenazaron a los astrónomos.

El viaje de las estrellas

La búsqueda de una explicación del mecanismo de formación estelar y planetaria tiene una historia venerable. Hace unos 200 años, Pierre Simon Laplace propuso que el sistema solar se creó a partir de una nube de gas en rotación. La gravedad, aducía, empujó la mayor parte del gas hacia el centro y se originó el Sol. Al mismo tiempo, y debido al movimiento giratorio, parte del material no pudo ser absorbido por el joven Sol y se asentó en un disco. Tales sedimentos terminaron por convertirse en los planetas. De acuerdo con las actuales simulaciones numéricas del proceso, en cuanto la nube en rotación comienza a desplomarse,

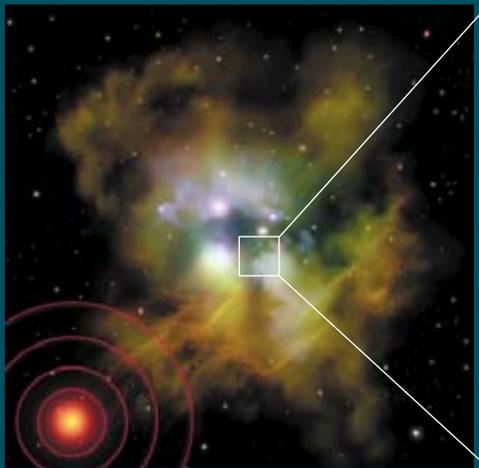
se procede de inmediato a la formación de una o varias estrellas, de un disco protoplanetario y de una envoltura residual de gas (átomos y moléculas solitarios) y polvo (grumos de átomos y moléculas).

No todos aceptaron el modelo de Laplace. La teoría según la cual los planetas se crearon con material arrancado al Sol tras el paso de una estrella, una tesis rival, coexistió con la idea laplaciana hasta hace apenas unas décadas. La dificultad yacía en el campo de la observación: someter a contrastación el modelo trascendía las posibilidades de la astronomía hasta hace 30 años. Por una doble razón. En primer lugar, la nube residual de gas y polvo entorpece nuestra visión de la región a estudiar. En segundo lugar, los discos protoplanetarios subtienden en el firmamento ángulos muy pequeños: si tomamos la distancia entre el Sol y Plutón (seis mil millones de kilómetros) por referencia de la escala de los discos, los telescopios terrestres tradiciona-



1. ZONA DE FORMACION ESTELAR de la nebulosa de Orión (*página contigua*). La rodea una nube molecular inmensa, aunque invisible, que aloja un millón de soles en forma de gas y polvo en un volumen de 300 años-luz de diámetro. Las estrellas jóvenes de Orión están sumergidas en discos de material de un tamaño similar al de nuestro propio sistema solar (*arriba*); en torno a algunas de ellas podrían estar incluso formándose planetas.

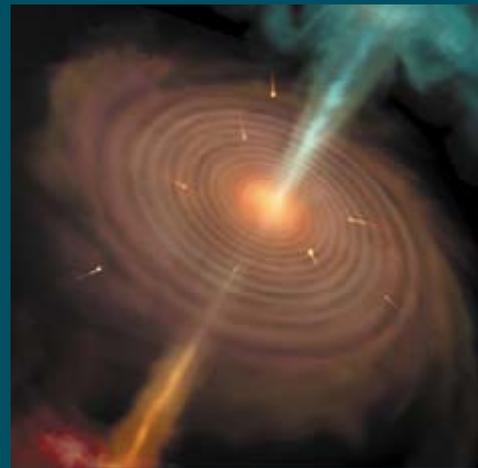
Del polvo a la estrella



Comienza la gestación de una estrella cuando interviene una perturbación externa, así una explosión de supernova en las cercanías, que produce la contracción de una nube de gas y polvo.



Se forman grumos de gas y polvo en el centro, rodeado por una envoltura de material y discos en rotación. Las fuerzas magnéticas dirigen chorros de materia a lo largo del eje.



La materia continúa cayendo al disco. Apenas una décima de ella torna de nuevo al exterior mediante corrientes, que desplazan el gas del entorno.

les podrían resolverlos hasta distancias de sólo 200 años-luz. De nada serviría, pues, construir telescopios mayores si la atmósfera cela los rasgos de interés.

Pero los astrónomos tenían, además, sus propios problemas en el campo de la teoría. Las estrellas de tipo solar, cuando jóvenes (100.000 años de edad), rotan una vez cada pocos días y cuadruplican o quintuplican el tamaño del Sol maduro. Conforme esas estrellas se van contrayendo, deberían girar más rápido, a imagen de los patinadores que cierran sus brazos. Resulta evidente, sin embargo, que el Sol se ha frenado; tarda ahora un mes en una rotación. Algo le ha restado momento angular. Pero, ¿qué?

Había que dilucidar, asimismo, en virtud de qué mecanismo las nubes moleculares sobreviven durante tanto tiempo. La gravedad las induce a la contracción o desplome; si no contarán con apoyo alguno, deberían implosionar en aproximadamente 1 millón de años. Pero se observan nubes que han perdurado decenas de millones de años. ¿De dónde reciben esa ayuda? No puede ser la presión térmica, pues las nubes están demasiado frías, justo a 10 o 20 kelvin. Las turbulencias podrían dar razón de su persistencia, mas ¿qué las originaría? En las nubes moleculares gigantes, pensamos en la de Orión, los vientos y

las ondas de choque producidas por las estrellas masivas incitan al movimiento, pero muchas nubes pequeñas no contienen estrellas tan grandes.

El primer obstáculo observacional surgió a finales de los años setenta. Los astrónomos habían comenzado a investigar las regiones de formación estelar a longitudes de onda que penetran en la envoltura de polvo. Aunque sus granos componentes absorben la luz en el visible, apenas intervienen a longitudes de onda mayores que su tamaño, de una micra de diámetro por lo común. Al estudiar la nube molecular de Orión y regiones similares en las longitudes de onda milimétricas —parte sin explorar hasta entonces del espectro electromagnético entre el infrarrojo y las ondas radio— los astrónomos identificaron grumos densos y fríos de 1 año-luz de diámetro aproximadamente. Tales núcleos moleculares, nombre técnico de los grumos, contenían unos pocos soles aún en forma de gas, por lo que se les asoció en seguida con las nubes en rotación de Laplace.

No tardaron en plantearse nuevos problemas. Aunque algunos núcleos parecían hallarse en proceso de contracción, la mayoría se muestran estabilizados mediante mecanismos que no se conocen todavía. Se ignora, asimismo, el agente desencadenante del desplome final, si bien podría tener relación con algún empuje exterior, una explosión de supernova cercana quizá. Pero el misterio más intrigante atañe a la dirección en la que el material se desplaza. En el marco de la hipótesis de Laplace, las estrellas surgen de la acreción gravitatoria; sería de esperar, por ende, la observación de signos de gas que fluyera hacia el interior de los núcleos.

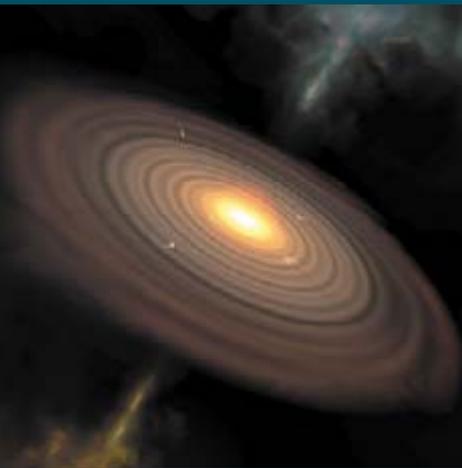
Para su sorpresa, los astrónomos descubrieron que el gas en forma de moléculas (en oposición a los átomos y iones) procedía hacia fuera. Acostumbra haber dos lóbulos gigantes de gas molecular a ambos lados de una estrella joven. Estos lóbulos, de unos pocos años-luz de longitud, que tienen masas similares o incluso mayores que la de la propia estrella, se desplazan a velocidades de decenas de kilómetros por segundo.

Expulsando desde la cuna

Los lóbulos moleculares presentan una extraña similitud con los lóbulos, inmensamente mayores, de plasma caliente observados cerca de galaxias activas como los cuásares. Sabíase desde mucho antes que los chorros de materia producían tales lóbulos. Expulsadas hacia el exterior a velocidades próximas a la de la luz, las corrientes de materia pueden extenderse a lo largo de millones de años-luz desde las galaxias activas. ¿Cabría la posibilidad de que una versión en miniatura de estas corrientes se diera en los lóbulos moleculares de las regiones de formación de estrellas?

Esta idea remitía a un descubrimiento realizado por George H. Herbig y Guillermo Haro a principios de los años cincuenta. Herbig trabajaba por entonces en el observatorio Lick, en el norte de California, y Haro, en el observatorio mexicano de Tonantzintla. Cada uno por su cuenta observó ciertas manchas curiosas en Orión. Los hoy llamados objetos Herbig-Haro eran unas nubes pequeñas donde, se pensó, se gestarían las estrellas. (Algunos libros de divulgación astronómica siguen todavía re-

THOMAS P. RAY enseña en el Instituto de Estudios Avanzados de Dublín, tras haber trabajado en la Universidad de Sussex y en el Instituto Max Planck de Astronomía de Heidelberg.



En el disco, el material se aglomera en planetesimales. La envoltura y los chorros de materia se disipan. En este momento ha transcurrido ya un millón de años.



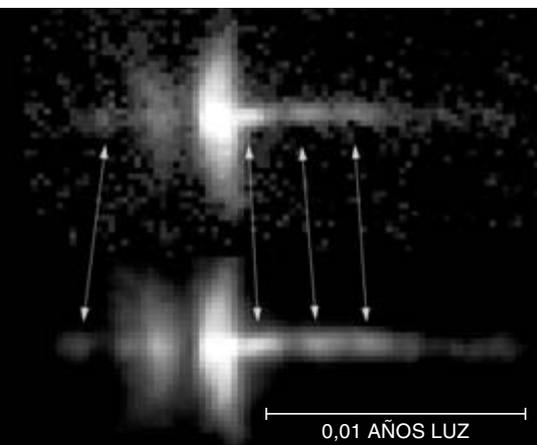
Las altas presiones y temperaturas que se registran en el centro de la estrella desencadenan la fusión nuclear. Y los planetesimales se han conjuntado en planetas.

pitando ese error.) Pero en 1975 Richard D. Schwartz se percató de que el espectro de un objeto Herbig-Haro manifestaba un estrecho parecido con el espectro del material residual de una explosión de supernova. Del corrimiento Doppler de las líneas espectrales infirió que los objetos Herbig-Haro se movían a velocidades de cientos de kilómetros por segundo.

Pese a que esa celeridad es menor que el movimiento de los restos de supernova, Schwartz supuso que los principios coincidían: los objetos Herbig-Haro consisten en gas calentado que se está expulsando desde la estrella. El calentamiento, al igual que en los restos de supernova, tiene su origen en el movimiento del propio gas; las ondas de choque convierten parte de la energía cinética en energía térmica y, posteriormente, en radiación. La hipótesis de Schwartz se vio respaldada cuando los astrónomos observaron fotografías de objetos Herbig-Haro obtenidas con diferencias de años. Era obvio que los objetos se movían. Extrapolando hacia atrás en

el tiempo, los astrónomos dedujeron que la fuente del objeto Herbig-Haro era una estrella joven de escasos cientos de miles de años.

Se comprobó dicha conexión merced al advenimiento de una nueva revolución técnica: los detectores de carga acoplada (CCD) sensibles a la luz. Comparados con las placas fotográficas tradicionales, los CCD ofrecen mayor sensibilidad y contraste. En 1983 Reinhard Mundt y Josef Fried realizaron las primeras observaciones con CCD de esas corrientes estelares. El trabajo posterior de Mundt, Bo Reipurth, del Observatorio Europeo del Sur en Santiago de Chile, y otros (incluido el autor) mostró que los chorros de materia de las estrellas jóvenes se extendían a lo largo de varios años-luz. Guardaban una estrecha relación con los objetos Herbig-Haro. La verdad es que algunos objetos constituyen las partes más brillantes de los chorros. Se han descubierto otros con una forma curva causada por las propias corrientes de materia en su recorrido por el espacio gaseoso circundante a velocidades supersónicas; igual que una onda de choque que rodea a una bala en su trayectoria por el aire. Estos chorros presentan temperaturas típicas de 10.000 kelvin y contienen 100 átomos por centímetro cúbico: aunque de densidad mayor que el medio que las rodea, son más tenues en un factor 10.000 que el mejor va-



2. ESTAS FOTOGRAFIAS de una estrella recién nacida, Herbig-Haro 30, espaciadas un año en el tiempo, muestran bolsas de gas que fluyen desde el centro. Los chorros corren perpendiculares al disco oscuro que esconde a la estrella.

ción que se puede conseguir en la Tierra. Cerca de la estrella los chorros son angostos, abriéndose con un ángulo de unos pocos grados, pero lejos de la estrella se expanden hasta alcanzar diámetros mayores que la órbita de Plutón.

Fuera del camino

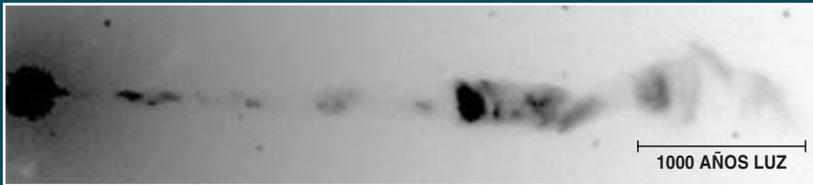
¿Qué relación guardan los chorros de materia y los objetos Herbig-Haro —constituidos ambos sobre todo de átomos e iones— con las corrientes moleculares? Cuando se descubrieron las corrientes moleculares se las suponía compuestas de gas acelerado por su vecindad a la estrella joven. Pero semejante deducción no está exenta de dificultades. Las corrientes moleculares, incluidas las asociadas a estrellas de masa pequeña, contienen a menudo varias veces la masa solar en gas. Si esta cantidad de materia tuviera que succionarse gravitatoriamente antes de acelerarse de nuevo, el proceso de formación de estrellas pecaría de suma ineficacia. Más convincente resultaba la explicación según la cual los lóbulos moleculares constarían de gas que se encuentra en el camino de la eyección de materia y es acelerado.

Ninguna de estas observaciones había llegado al corazón del tema que nos ocupa: el disco que ciñe a la estrella recién nacida. Desde hacía tiempo se venían recogiendo pruebas circunstanciales de la presencia de los discos. A principio de los años ochenta el satélite astronómico infrarrojo (*IRAS*) descubrió que muchas estrellas nuevas presentaban un exceso de radiación infrarroja, por encima de la que en teoría deberían emitir por sí mismas. Y se consideró que el polvo caliente del disco sería la fuente más probable de tal demasía. Por la misma época, los telescopios de ondas milimétricas comenzaron a tomar datos de la masa de gas y polvo en torno a las estrellas en cuestión. Hallaron masas de entre 0,01 y 0,1 veces la solar, vale decir, justo la cantidad de materia necesaria para formar sistemas planetarios. A mediados de los años ochenta, el grupo de Edward B. Churchwell acometió el estudio de la nebulosa de Orión en radio. Encontraron fuentes emisoras del tamaño de nuestro sistema solar y sugirieron que se trataba de nubes de gas caliente evaporadas de los discos.

Para vislumbrar los discos en sí mismos había que superar, sin embargo, el segundo obstáculo observa-

La acción de los chorros

Por misteriosos que resulten los mecanismos últimos que engendran los chorros de materia, esas corrientes se atienen siempre al mismo proceso básico: el equilibrio entre el poder de la gravitación y el momento angular. Aunque la gravedad insta a la materia hacia el centro de masas, sólo consigue, debido a las fuerzas centrífugas, reunir el material en un disco en rotación. Las estrechas corrientes de gas salen eyectadas a lo largo del eje de rotación, la dirección en la que la materia se mueve con mayor facilidad. La materia que se escapa lleva consigo parte del momento angular, dejando así que caiga menos material hacia el interior.



En el núcleo de la galaxia activa Messier 87, la fuerza que ocasiona este inmenso chorro es, eso se cree, un agujero negro cuya masa multiplica 1000 millones de veces la solar.



A una escala bastante menor, una estrella recién nacida expulsa materia y eyecta al exterior una corriente de gas, Herbig-Haro 34. El chorro de materia podría estar empujando el gas molecular de la zona hacia el exterior.



Al observar la región de formación estelar NGC 2264 en longitudes de onda milimétricas, los astrónomos han detectado dos lóbulos de gas molecular que se mueven a decenas de kilómetros por segundo. El color rojo indica las velocidades más rápidas, y el violeta las más lentas.



Las formaciones complejas de chorros de materia, evidentes en el objeto Herbig-Haro 47, se deben a variaciones en la continuidad de las eyecciones de materia y a los campos gravitatorios de estrellas compañeras.

cional: su tamaño, muy pequeño. Hubo que esperar a la alta definición facilitada por el telescopio espacial *Hubble* y por los instrumentos operantes en la superficie con técnicas de óptica adaptativa. En 1993 el grupo de C. Robert O'Dell apuntó hacia Orión el *Hubble* y observó, por fin, los discos que Laplace había predicho. Su material, golpeado sin cesar por la radiación intensa y los vientos de las estrellas masivas cercanas, parecía es-

tar evaporándose. O'Dell bautizó a estos discos con el nombre de próplicos (en inglés "proplyds", contracción de la expresión "protoplanetary disks"). Denominación que podría inducir a error, puesto que los discos se evaporarán en unos millones de años, probablemente antes de que se formen planetas. Pero discos similares en medios más moderados deberían sobrevivir el tiempo suficiente para dar lugar al nacimiento planetario.

Obtenidos todos los componentes básicos de la versión moderna de la teoría de Laplace —nubes en rotación, chorros de materia y discos—, comenzó el estudio de las relaciones entre ellos. Mis colegas y yo mismo, junto con otro grupo liderado por Christopher J. Burrows, apuntamos el *Hubble* hacia el objeto Herbig-Haro 30, formado por dos chorros de materia en direcciones opuestas. Para nuestra sorpresa, las imágenes revelaron dos nebulosas en arco allí donde debería encontrarse la fuente de los chorros. Cortando por la mitad las nebulosas había una banda oscura. Se hizo pronto evidente que estábamos ante un disco perpendicular a los chorros. Desde nuestro ángulo de visión lateral, el disco oscurecía la estrella central. Las nebulosas son nubes de polvo iluminadas por luz estelar. La corriente de los chorros hacia el exterior constituye el toque final que compone los objetos Herbig-Haro. Las piezas del rompecabezas de la formación estelar comenzaban a encajar.

En las galaxias activas, los discos resultan determinantes en la formación de los chorros de materia. Pero, ¿cómo funciona el proceso en el embrión de una estrella? Una coincidencia curiosa ha proporcionado una pista clave. Todos los chorros de materia próximos a Herbig-Haro 30, con una excepción singular, tienen aproximadamente la misma orientación. Se alinean con el campo magnético de la nube madre. De ese modo parecían confirmarse ciertas ideas perspicaces, avanzadas por Ralph E. Pudritz, Colin A. Norman y Frank H. Shu, sobre mecanismos posibles en virtud de los cuales los campos magnéticos conducen una corriente de materia que procede de una estrella joven.

La astronomía cuenta con numerosos ejemplos de campos magnéticos que guían el gas ionizado. Las mismas auroras se deben a partículas cargadas que recorren las líneas del campo magnético terrestre y golpean la parte más exterior de la atmósfera. De manera similar, las partículas ionizadas de un disco circumestelar pueden sumarse a las líneas de campo o bien de la estrella o bien del disco. Puesto que el disco se halla girando, las partículas experimentarían una fuerza centrífuga y podrían ser arrojadas a lo largo de las líneas de campo. Al disco iría cayendo más materia para reemplazar la perdida, y así proseguiría el proceso. Aunque la mayor parte de la materia terminaría siendo captada por la estrella, la ex-

pulsada se cifraría en torno al 10%. En las simulaciones por ordenador este proceso se muestra discontinuo, lo que explicaría las estructuras de nudos observadas en muchos chorros.

Se acabó la nebulosidad

Haber comprendido que los chorros de materia son parte constituyente de la formación estelar podría resolver varias cuestiones pendientes. En su viaje hacia el exterior las partículas transportan momento angular fuera de la fuente, lo que en parte explicaría por qué las estrellas maduras como el Sol rotan con parsimonia. Los chorros de materia podrían también agitar la nube circundante, proporcionando la turbulencia necesaria para frenar el desplome.

Muchos interrogantes, sin embargo, persisten abiertos. De entrada, sólo un 50% de las estrellas jóvenes observables en el visible parecen presentar discos; el resto quizá los tuvo también y, verosímilmente, se conjuntaron en planetas. Pero no disponemos de pruebas observacionales que nos lo garanticen. Otro problema de la formación estelar atañe a la distribución de la masa de las estrellas. ¿Por qué es tan similar la razón entre estrellas de gran masa y estrellas de pequeña masa con independencia de su ubicación en la galaxia? Esta razón parece ser una propiedad fundamental de la peculiar fragmentación de las nubes moleculares, aunque los motivos de ello se ignoran. Sabemos muy poco de las primeras etapas de la vida de las estrellas de gran masa, en parte porque se trata de estrellas muy escasas y en parte porque evolucionan muy deprisa y no permiten una fácil observación durante su tiempo de gestación.

Con estas restricciones, los astrónomos pueden ahora esbozar el guión del alumbramiento estelar. Se forman en nubes interestelares que contienen los restos de generaciones anteriores de estrellas. El polvo se fabricó en los vientos fríos y en las atmósferas más exteriores de las estrellas a medida que éstas iban acercándose al final de su vida. En la composición química de las nubes también existen elementos pesados como el hierro y el oxígeno, forjados en los hornos nucleares de estrellas ya desaparecidas. Los campos magnéticos o las turbulencias agitan las nubes, aunque con el tiempo se desploman por su propio peso, quizá debido a que los campos magnéticos se debilitan, las turbulencias se disipan o se produce una

explosión de supernova en las cercanías. Conforme cae el material, las nubes se fragmentan en trozos, cada uno de los cuales dará lugar a un sistema de estrellas. En los núcleos moleculares de mayor masa, como los que originaron el cúmulo de la nebulosa de Orión, estos sistemas distan espaciados semanas-luz (no años-luz). La mayoría de las estrellas de la galaxia, incluido el Sol, nacieron probablemente en cúmulos de éstos.

Los chorros se llevan consigo parte del momento angular, lo que permite que continúe la captación de materia. Nuestro Sol alguna vez debió presentar esos chorros que se extendían a lo largo de varios años-luz. Qué provocó su desaparición, lo ignoramos. Es posible que el almacenamiento de la materia incorporada terminara en un momento determinado. Parte de la misma pudo haberse expulsado al exterior; si tal aconteció, los chorros desempeñaron un papel fundamental en la masa final del Sol. Simultáneamente, comenzaron a agruparse grandes granos de polvo para formar los planetesimales, los bloques de construcción de los planetas. Los planetesimales barrieron todo resto de gas, con la obstrucción consiguiente de los chorros. Las corrientes de materia procedentes del Sol y de sus contemporáneos estelares expelieron el gas y el polvo residuales que rellenaban el espacio entre ellos. Así se relajaron los lazos gravitatorios que ligaban a las estrellas; transcurridos unos pocos millones de años, las estrellas se dispersaron.

Dos siglos después de la hipótesis de la nebulosa de Laplace, las piezas del rompecabezas comienzan a ocupar su sitio. Del estudio de las estrellas jóvenes se desprende que no sólo continúa la formación planetaria, sino que, además, los planetas son objetos comunes en las galaxias.

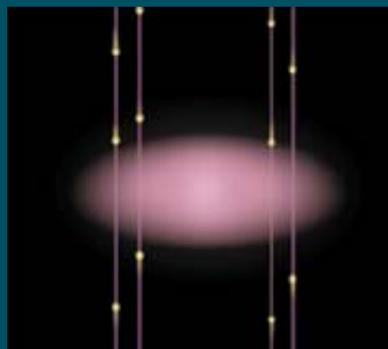
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ORIGIN OF STARS AND PLANETARY SYSTEMS. Dirigido por Charles J. Lada y Nikolaos D. Kylafis. Kluwer Academic Publishers, 1999.

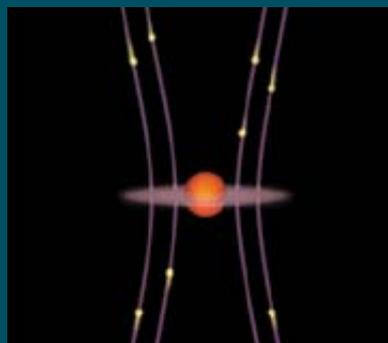
PROTOSTARS AND PLANETS IV. Dirigido por Vince Mannings, Alan P. Boss y Sara S. Russell. University of Arizona Press, 2000.

STAR FACTORIES: THE BIRTH OF STARS AND PLANETS. Ray Jayawardhana. Raintree/Steck Vaughn, 2000. (Recomendado para edades de 11 a 14 años.)

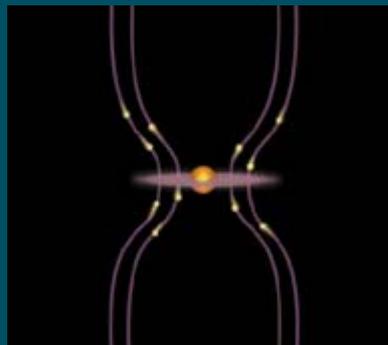
Magnético, itinerante



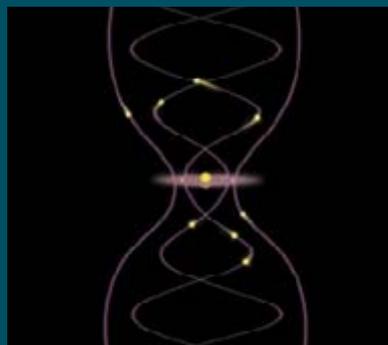
La creación de chorros de materia podría comenzar cuando el material —una mezcla de iones, átomos, moléculas y polvo— se precipita hacia el disco circunestelar a lo largo de las líneas del campo magnético.



A medida que el disco se va contrayendo bajo la acción de la gravedad, las líneas (congeladas en la materia) se atraen y adoptan la figura de un reloj de arena.



Cuando las líneas de campo se doblan hasta un ángulo de 30 grados con respecto a la perpendicular, las fuerzas centrífugas superan a la gravedad; la materia puede escapar hacia el exterior con facilidad.



La inercia del material en rotación dobla las líneas de campo y éstas forman una hélice, que permite encauzar el material centrifugado en una dirección vertical.



LA NEBULOSA DEL OJO DE GATO (NGC 6543) es una de las nebulosas planetarias más singulares de la galaxia. Se trata de un conglomerado policromo de múltiples capas de gas que se halla a 3000 años-luz del Sol. Las nebulosas planetarias no tienen nada que ver con los planetas; el nombre es un vestigio histórico. Representan la muerte lenta de las estrellas de tamaño modesto. Nuestro propio Sol terminará su vida de una forma parecida. La complejidad del Ojo de Gato, tal y como la captó el Telescopio Espacial Hubble en 1994, obligó a los astrónomos a buscar nuevas explicaciones.

La muerte de las estrellas comunes

La muerte del Sol, dentro de cinco mil millones de años, será un espectáculo maravilloso.

Al igual que otras estrellas de su misma naturaleza, engendrará una de las más bellas estructuras de la naturaleza: una nebulosa planetaria

Bruce Balick y Adam Frank

Desde la facultad de astronomía de la Universidad de Washington se ve el taller del escultor en vidrio Dale Chihuly. Las figuras fluidas y brillantes que crea recuerdan a criaturas submarinas. Cuando se la ilumina en una habitación a oscuras, el baile de la luz a través de sus vítreas formas les da vida. Medusas amarillas y rojizos pulpos vuelan por aguas de color cobalto. Algas de las profundidades se balancean con las mareas. Moluscos iridiscentes se abrazan.

Otras evocaciones suscitan en los astrónomos las obras de Chihuly. Pocas creaciones humanas se asemejarán tanto a las hermosas estructuras celestes que conocen por nebulosas planetarias. Contra el fondo negro del universo, encendidas desde su interior por estrellas esquilgadas, coloreadas por la fluorescencia que generan átomos e iones radiantes, las nebulosas planetarias parecen vivas. A algunas se les han dado nombres sugerentes: Hormiga, Estrellas Gemelas de Mar u Ojo de Gato. No hay imágenes espaciales más cautivadoras que las que de ellas ha tomado el Telescopio Espacial Hubble.

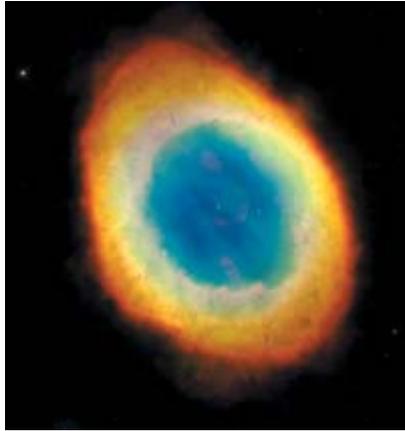
Las nebulosas planetarias recibieron esta denominación, nada afortunada, hace dos siglos. Las bautizó así William Herschel, prolífico descubridor de nebulosas, objetos difusos con forma de nube, visibles sólo a través de un telescopio. Muchas presentan un aspecto vagamente circular, que a Herschel le re-

cordaba al verdoso planeta Urano (que él mismo había descubierto). De ahí que conjeturase que quizá fuesen sistemas planetarios que iban configurándose alrededor de estrellas jóvenes. El nombre ha perdurado a pesar de que da a entender lo contrario de lo que en realidad sucede: esta clase de nebulosa está formada por gas que se desprende de estrellas moribundas. No representan nuestro pasado, sino nuestro destino. En unos cinco mil millones de años, el Sol acabará sus días con la elegante violencia de una nebulosa planetaria.

Al igual que el arte de verdad grande, las nebulosas planetarias no sólo nos cautivan. Nos obligan a poner en entredicho nuestra percepción del mundo. En concreto, desafían a la teoría de la evolución estelar, rama madura, y se supone que bien desarrollada, de la ciencia, uno de los pilares en que se apoya nuestro conocimiento del cosmos. Y, sin embargo, le cuesta explicar las estructuras complejas que se observan en las imágenes del Hubble. Si las estrellas nacen, viven y mueren redondas, ¿cómo crean formas tan elaboradas que recuerden a hormigas, estrellas de mar u ojos de gato?

La muerte les sienta bien

A lo largo del siglo pasado, quedó claro que las estrellas se dividen a su muerte en dos clases muy diferentes. Las de masa muy grande, en concreto las que al nacer tienen una masa al menos ocho veces la solar, estallan repentinamente como supernovas. Las que no llegan a tanto, como el Sol, tienen una muerte



Nebulosa del Anillo (M57)

prolongada. En lugar de explotar, pasan los últimos años de su vida quemando combustible de manera irregular, como a espasmos, igual que el motor de un coche al que se le está acabando la gasolina.

Las reacciones nucleares en el interior de una estrella de éstas —la fuente de su energía durante casi toda su vida— consumen primero el hidrógeno disponible y después el helio. A medida que la quema nuclear se desplaza hacia afuera en busca del material fresco que envuelve al núcleo, la estrella se dilata y pasa a la fase de gigante roja. Cuando también se ha consumido el hidrógeno de la envoltura, se empieza a fusionar el helio. Este proceso es muy inestable. Las fuertes convulsiones, combinadas con la intensa presión de radiación y otras fuerzas, empujan las dilatadas capas superficiales, débilmente ligadas al astro, hacia el espacio. Nace así la nebulosa planetaria.

Desde el siglo XVIII se han representado y catalogado unas 1500 nebulosas planetarias; puede que haya diez mil más escondidas tras las espesas nubes de polvo de nues-

tra galaxia. Mientras que en la Vía Láctea estalla una supernova cada pocos siglos, cada año nace una nebulosa planetaria y se apagan cientos de nebulosas viejas. Las supernovas brillan más, pero sus escombros, turbios y caóticos, carecen de la simetría y complejidad de las nebulosas planetarias.

Las nebulosas planetarias no son tan etéreas y pacíficas como sugieren las imágenes. Muy al contrario, son pesadas y tempestuosas. Contiene cada una alrededor de un tercio de masa solar, con casi todo el combustible nuclear que la estrella no haya llegado a quemar. Al principio, las capas más exteriores y menos firmes de la estrella se desprenden a velocidades de unos 10 a 20 kilómetros por segundo. Este viento no muy rápido acarrea con el tiempo la mayor parte de la masa de la nebulosa. A medida que la estrella se desnuda y descubre su núcleo todavía caliente, pasa del color naranja al amarillo, después al blanco y finalmente al azul. Cuando la temperatura superficial supera los 25.000 kelvin, baña con una intensa luz ultravioleta el gas que la rodea, hasta romper sus moléculas y separar los electrones de los átomos.

El viento estelar transporta una masa cada vez menor a una velocidad cada vez mayor. Pasados entre cien mil y un millón de años, dependiendo de la masa estelar original, cesa el viento por completo; lo que queda de la estrella se ha convertido en una enana blanca muy densa y caliente, un rescoldo estelar esférico, casi cristalino, al que la gravedad ha reducido a un tamaño parecido al de la Tierra.

Puesto que las fuerzas que se supone arrancan materia de las estrellas moribundas tienen simetría esférica, hasta el decenio de 1980 se pensó que las nebulosas planetarias eran burbujas que se expandían de manera esférica. Desde entonces, nuestras ideas al respecto se han ido complicando más y más y, a la par, se han vuelto más interesantes.

Los vientos interactivos

El primer indicio de que las nebulosas planetarias son más que un simple eructo estelar se descubrió en 1978, cuando las observaciones

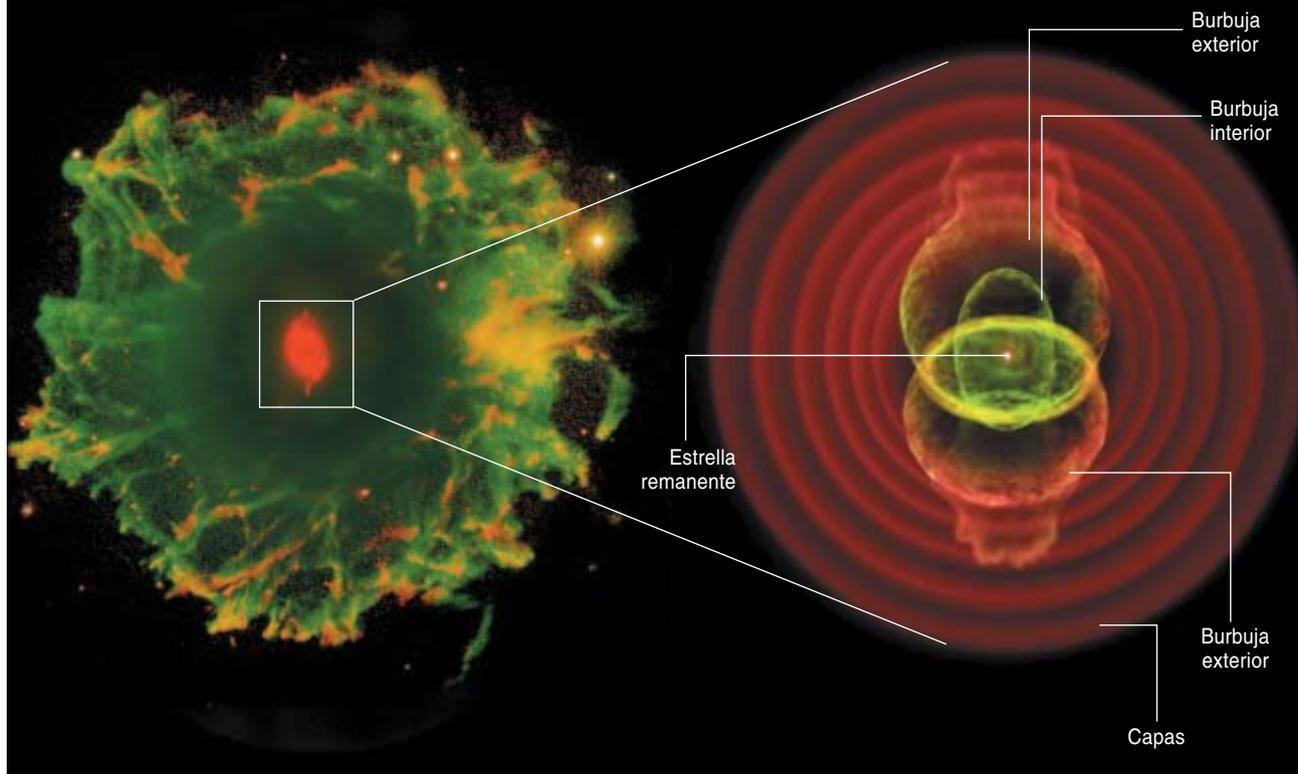
Resumen/Nebulosas planetarias

- Las nebulosas planetarias son los polícromos residuos de estrellas que tenían menos de ocho masas solares. En su agonía, estas estrellas fueron perdiendo sus capas exteriores, expulsadas por vientos con velocidades de hasta mil kilómetros por segundo. Con el tiempo, de estas estrellas no quedan más que las capas más profundas y calientes. Su luz ultravioleta ioniza el viento y lo vuelve fluorescente.
- El Telescopio Espacial Hubble ha observado nebulosas de estructura muy compleja. Sólo se tiene una idea vaga de cómo se construyen. Los campos magnéticos atrapados en el núcleo estelar, pero arrastrados al exterior por el viento, podrían desempeñar una función decisiva, al igual que las estrellas compañeras o los planetas gigantes, cuyas fuerzas de marea transfieren el gas a grandes anillos que, a su vez, configuran el viento como un reloj de arena.

DISECCION DEL OJO DE GATO

La imagen de las páginas precedentes muestra sólo parte del esplendor de Ojo de Gato. Vista por un telescopio terrestre (*izquierda*), se perciben unas “pesañas”, una banda exterior, desgarrada, de gas. La región más interna, o “pupila”, reconstruida artísticamente a la derecha, presenta la estrella remanente

encerrada en una capa de gas oblonga, rodeada a su vez por dos burbujas descentradas y todo ello envuelto por capas gaseosas concéntricas. Es evidente que la estrella ha expulsado material en distintos momentos de milenios pasados. La parte superior de la nebulosa está inclinada hacia el observador.



en el ultravioleta mostraron que las estrellas moribundas siguen expeliendo vientos mucho después de haber perdido las capas gaseosas más exteriores. Aunque muy tenues, esos vientos tardíos llegan a alcanzar los mil kilómetros por segundo, velocidad unas cien veces mayor que la de los vientos densos que los precedieron.

Con el fin de explicar el efecto de esos vientos, Sun Kwok, de la Universidad de Calgary, Christopher R. Purton, del Radiobservatorio Astrofísico del Dominio canadiense, y M. Pim Fitzgerald, de la Universidad de Waterloo, tomaron prestados unos modelos de vientos estelares que se habían concebido para otros fenómenos astrofísicos. La idea es la siguiente: cuando los vientos rápidos chocan contra los vientos más lentos de corriente abajo, se forma en la superficie de contacto un borde

denso de gas comprimido, como la nieve que se agolpa frente a la pala de una quitanieves. El borde de gas rodea una cavidad casi vacía (pero muy caliente) que, con el tiempo, el viento rápido limpia y hace crecer en volumen.

Este modelo, la “hipótesis de los vientos estelares interactivos”, funciona bien para las nebulosas planetarias redondas o casi redondas. Pero durante los años ochenta se vio que las nebulosas redondas son más bien la excepción; no constituyen ni el 10 % de la población total de nebulosas planetarias. La inmensa mayoría son oblongas, como un huevo. Las más espectaculares, aunque también de las más raras, constan de dos burbujas en lados opuestos de la estrella moribunda. Los astrónomos las llamas “bipolares”. “Mariposa” o “reloj de arena” serían apelativos más expresivos.

Para explicar estas estructuras, extendimos, junto con Vincent Icke y Garrelt Mellema, entonces en la Universidad de Leiden, la hipótesis de los vientos interactivos. Supongamos que los vientos lentos forman primero un toro denso en órbita alrededor del ecuador de la estrella. Más tarde, este toro desviará los vientos en una dirección polar. Así se engendrará una nebulosa elíptica. Las que recuerdan a un reloj de arena serían aquellas con toros muy densos y ajustados. El toro actuaría como una tobera, al igual que cuando silbamos nuestros labios coliman la exhalación en una corriente fina de aire; el toro desviaría los vientos rápidos y produciría imágenes dobles de chorros o corrientes de gas en forma de reloj de arena.

El modelo era muy sencillo, y reproducía bien todas las imágenes

El arte de las nebulosas planetarias

El Telescopio Espacial Hubble ha demostrado que las nebulosas planetarias son más complejas y variadas de lo que los teóricos esperaban.

La estrella central de la nebulosa de la Chinche (NGC 6302) es una de las más calientes que se conocen. Está encerrada en un toro denso, polvoriento y rico en carbono (*arriba a la derecha*).

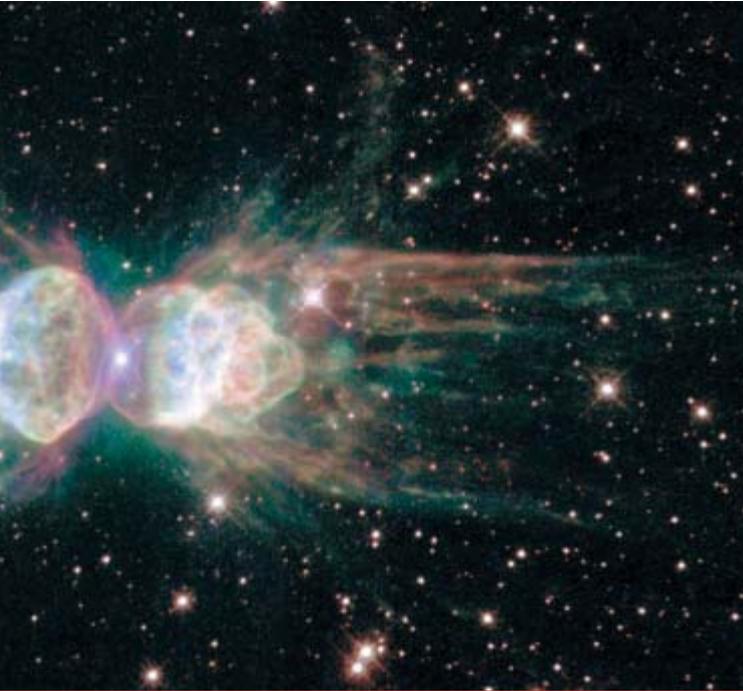
La nebulosa de la Raya (Hen 3-1357), la más joven de todas las nebulosas planetarias conocidas, brilla sólo desde hace 20 años. Una estrella compañera y un toro de gas podrían explicar su aspecto.



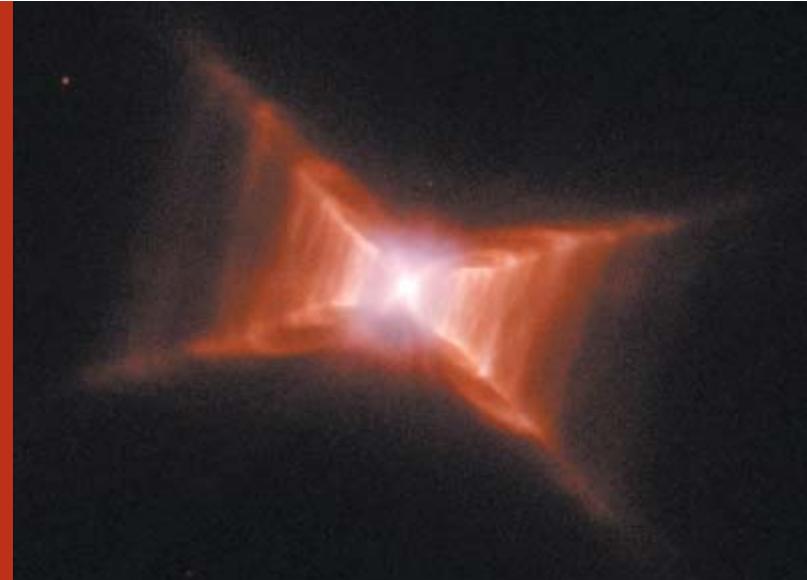
La nebulosa Bola de Nieve Azul (NGC 7662) contiene "FLIERS" (*manchas rojas*), grumos de gas de alta velocidad y baja ionización de origen incierto.



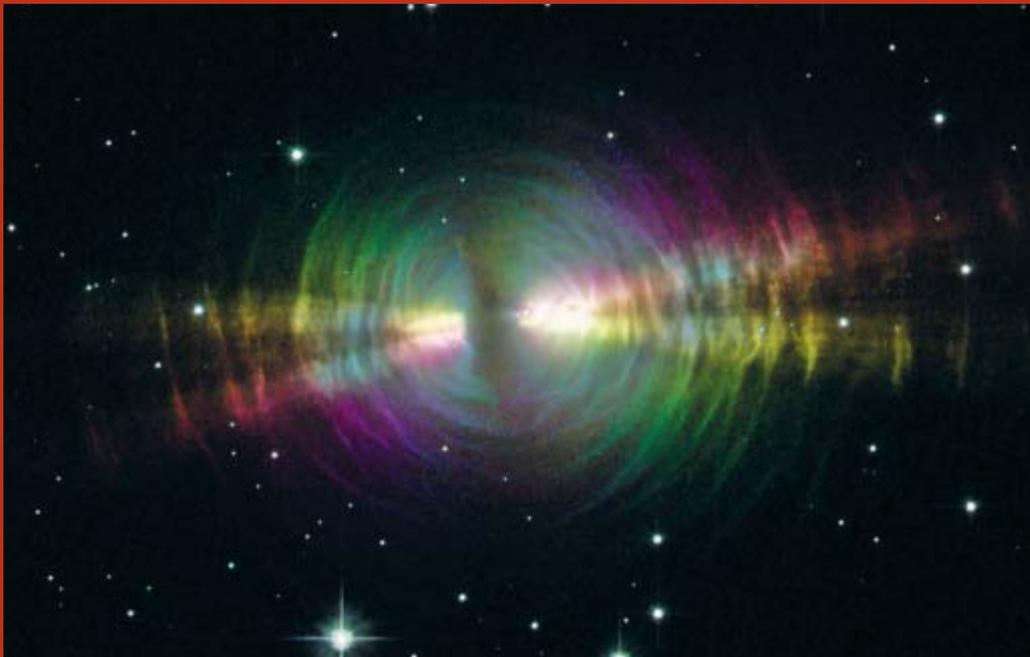
En el centro de la nebulosa de los Chorros Gemelos (M 2-9) se encuentran un sistema binario de estrellas y un disco gaseoso de diámetro 10 veces mayor que la órbita de Plutón. El azul corresponde a los iones de hidrógeno; el rojo, a los átomos de oxígeno; el verde, a los iones de nitrógeno.



El gas sale de la estrella central de la nebulosa de la Hormiga (Menzel 3) a una velocidad de 1000 kilómetros por segundo.

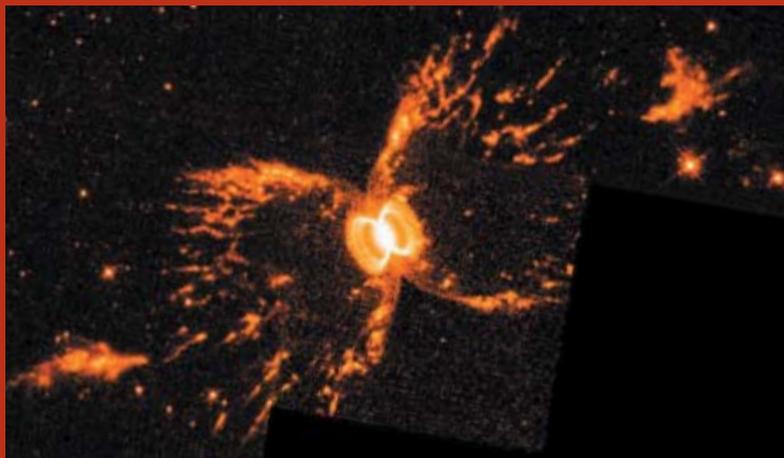


La nebulosa del Rectángulo Rojo (HD 44179) parece cajas dentro de cajas porque estamos viendo de lado conos anidados de gas.



Al igual que un faro, la estrella central de la nebulosa del Huevo (CRL 2688) ilumina las capas de polvo concéntricas, que se extienden hasta un décimo de año-luz de la estrella. Los colores representan luz polarizada en diferentes direcciones.

La nebulosa Diente de León (NGC 6751) es un ejemplo de nebulosa planetaria elíptica. El rojo, el verde y el azul corresponden al gas ionizado débil, moderada e intensamente.



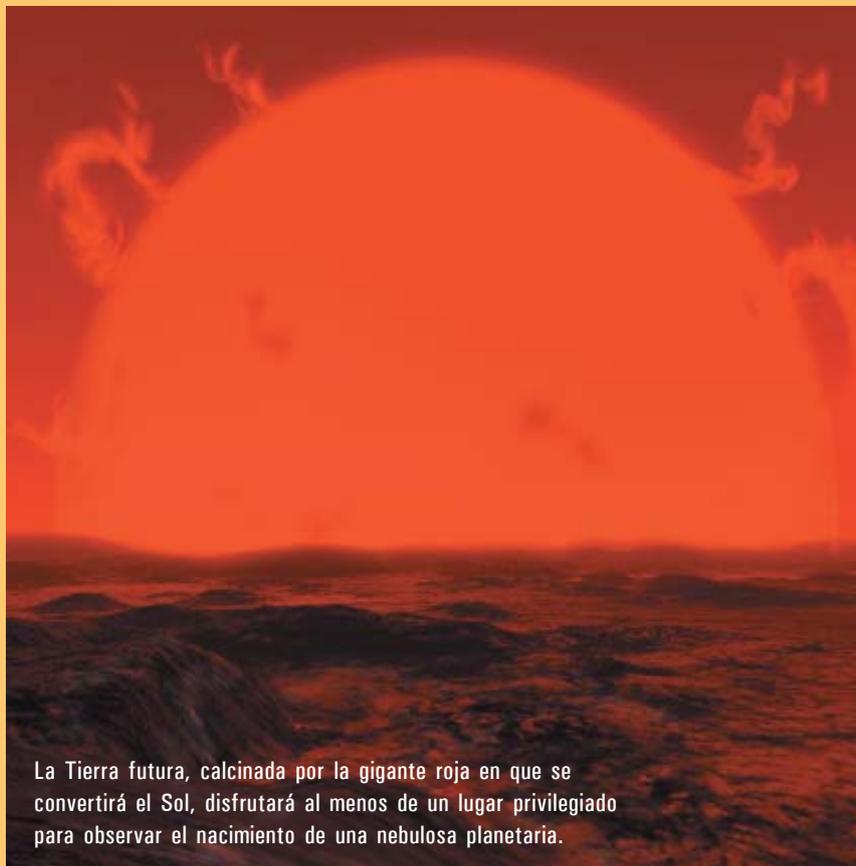
Esta imagen de la nebulosa del Cangrejo del Sur (He2-104), que capta el resplandor del nitrógeno gaseoso, revela la presencia de una nebulosa brillante y pequeña dentro de otra mayor. La gigante roja que generó la nebulosa tiene por compañera a una estrella enana blanca.



Terracota

Las nebulosas planetarias ilustran el futuro de nuestro propio sistema solar. Cuando el Sol alcance el penúltimo momento de su vida, crecerá hasta la órbita actual de la Tierra. Incinerará Mercurio y Venus. La Tierra escapará a este infortunio porque, al haber expelido el Sol parte de su masa, su fuerza de gravedad se habrá debilitado y nuestro planeta se habrá trasladado a una nueva órbita, mayor que la actual. El Sol, de color ocre-rojizo, llenará el cielo del mediodía. Mientras uno de los bordes se pone por el oeste, el otro empezará a salir por el este. Aunque bastante más frío que hoy día (unos 2000 kelvin frente a 5800 kelvin), el Sol cocerá la superficie del planeta.

La Tierra será entonces testigo desde dentro de la formación de una nebulosa planetaria. El Sol expulsará sus capas más exteriores —una versión extrema del viento solar actual—. Con el tiempo, la gigante roja irá perdiendo capas hasta que no quede de ellas más que el núcleo: se habrá convertido en una enana blanca. Alumbrados por esa incandescente mota azul en el cielo, los objetos de la Tierra proyectarán sombras muy perfiladas, negras como el azabache; la salida y la puesta del Sol no llevarán más de un abrir y cerrar de ojos. La piedra expuesta a la iluminación se convertirá en un plasma por-



La Tierra futura, calcinada por la gigante roja en que se convertirá el Sol, disfrutará al menos de un lugar privilegiado para observar el nacimiento de una nebulosa planetaria.

que la radiación ultravioleta de la enana blanca destruirá cualquier enlace molecular. La superficie se cubrirá con una niebla iridiscente que no dejará de ascender y arremolinarse. A medida que la enana vaya radiando su energía, se irá enfriando y debilitando hasta convertirse en ceniza fría y oscura. Nuestro mundo terminará primero como fuego y después como hielo.

de que se dispuso hasta 1993. Las simulaciones por ordenador probaron la viabilidad de la idea básica y nuevas observaciones comprobaron que los vientos lentos parecían, en efecto, más densos cerca del ecuador. No intentamos explicar por qué el viento lento se expulsaba en forma de toro, con la esperanza de que los detalles se pudieran completar más adelante.

Nuestra fe en este modelo sufrió pronto un duro revés. En 1994 el telescopio Hubble tomó la primera imagen clara de una nebulosa planetaria, el Ojo de Gato (NGC 6543), descubierta por Herschel. Esa fatídica imagen tiró por tierra nuestra confianza. Una de sus dos elipses cruzadas, un borde fino que rodea a una cavidad elipsoidal, concor-

daba con el modelo. Pero, ¿qué eran las demás estructuras? Nadie había predicho que la nebulosa estuviese salpicada de coágulos rojizos; más extraños aún eran las bandas o chorros que tenía justo afuera. El modelo de los vientos interactivos sería correcto, en el mejor de los casos, sólo en parte.

Los teóricos se las ven y desean

Es difícil derribar una idea científica muy enraizada, incluso cuando ha de enfrentarse a imágenes como las obtenidas por el Hubble. Hicimos caso omiso, con la esperanza de que el Ojo de Gato fuese una anomalía. Pero no lo era. Otras imágenes del Hubble establecieron, sin lugar a dudas, que habíamos olvidado algún aspecto fundamental de la muerte

de las estrellas. Vanidades heridas aparte, nada mejor pudo pasarles a los científicos. Cuando a tus pies se extienden las ruinas de las ideas más queridas, la naturaleza te desafía a que mires de nuevo: ¿qué has pasado por alto? ¿En qué no has pensado antes?

Cuando se sufre una situación así, ayuda centrarse en los casos más extremos, porque ahí es quizá donde las fuerzas desconocidas actúan con mayor claridad. Entre las nebulosas planetarias, extremos son los objetos bipolares. Las imágenes que de ellos tomó el Hubble recuerdan a las flores que pintaba Georgia O'Keefe. Estructuras redondeadas apreciables a pequeña escala aparecen a cada lado de las nebulosas, como si fueran reflejos especula-

res. Esta simetría de reflexión implica que toda la estructura se formó coherentemente mediante procesos organizados que actuaron cerca de la superficie estelar. Guarda semejanza con la generación de los copos de nieve o de los girasoles.

Para estos casos, el modelo de los vientos interactivos nos da una predicción que cabe comprobar: que una vez que el gas deja el toro, fluye hacia el exterior a una velocidad constante, lo que a su vez produce un desplazamiento Doppler de la luz emitida por el gas. Por desgracia, el modelo no pasó la prueba. En 1999, uno de nosotros (Balick) y Romano Corradi (ahora en el Instituto de Astrofísica de las Islas Canarias) y sus colaboradores estudiaron la nebulosa del Cangrejo del Sur (He2-104) con el Hubble. Encontraron que la velocidad de expansión del gas aumenta proporcionalmente con la distancia a la estrella. El gas más alejado ha llegado así de lejos simplemente porque se mueve más deprisa. Extrapolando hacia atrás en el tiempo, esta nebulosa con forma de reloj de arena debió de formarse en una única erupción estelar, hará unos 5700 años. El modelo de los vientos interactivos, que supone que vientos constantes moldean las nebulosas, estaba, pues, fuera de lugar.

Aún más extraño fue que Corradi y sus colaboradores hallasen que la nebulosa del Cangrejo del Sur es en realidad un par de nebulosas, una dentro de la otra, como las muñecas *matryoshka* rusas. Imaginamos que la nebulosa interior es la más joven de las dos, pero las observaciones demuestran que ambas presentan exactamente la misma pauta de velocidad creciente con la distancia. Por tanto, toda esa compleja estructura tuvo que nacer hará unos seis milenios de un único suceso magníficamente orquestado. Hasta hoy, seguimos perplejos ante este tipo de descubrimientos.

La teoría de los vientos interactivos fue enterrada por fin hace media docena de años. Kwok, Raghvendra Sahai y John Trauger, del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena, California, Margaret Meixner, de la Universidad de Illinois, y sus colaboradores publicaron una nueva clase de imágenes

del Hubble. Mostraban nebulosas planetarias muy jóvenes, cazadas justo antes o poco tiempo después de que la estrella las ionizara y calentara. Confiábamos los astrónomos en que fueran como las variedades maduras, pero en pequeño. Una vez más, nos equivocamos. Las nebulosas planetarias juveniles y embrionarias presentan estructuras mucho más caprichosas. Sus múltiples ejes de simetría no se podían explicar a partir de la sencilla tobera que habíamos supuesto. Tal y como Sahai y Trauger insinuaron en su artículo de 1998 sobre esos objetos, había sonado la hora de encontrar otro paradigma.

Las estrellas compañeras

Hoy día se siguen esbozando teorías que expliquen el aspecto de las nebulosas planetarias. Hay que concebir modelos que abarquen en toda su complejidad desconcertante las observaciones acumuladas. Todos admitimos hoy que uno de los factores principales es la influencia gravitatoria de las estrellas compañeras. Al menos la mitad de las “estrellas” del cielo nocturno son en realidad parejas de estrellas que orbitan una alrededor de la otra. La mayoría de estos sistemas están tan separados, que sus estrellas evolucionan independientemente. Pero en una pequeña fracción de tales binarias, la gravedad de una de las estrellas puede desviar o incluso controlar el flujo de material que expulsa la otra. Esta fracción coincide con el porcentaje de nebulosas planetarias bipolares.

Mario Livio, del Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial, y Noam Soker, del Instituto de Tecnología Technion de Israel, que fue alumno suyo, abogaron por esta idea muchos años antes de que se pusiera de moda [véase “Nebulosas planetarias”, por Noam Soker; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1992]. Según su hipótesis, la compañera de la estrella moribunda captura el material que fluye desde ésta. En un sistema donde las órbitas sean menores que la de Mercurio y donde un “año” orbital se mida en días, no será grácil la transferencia. Cuando el material de la estrella moribunda alcance a la compañera, ésta ya se habrá adelantado mucho en su ór-



Nebulosa de la Retina (IC 4406)

bita. El material que la fuerza de marea gravitatoria habrá arrancado de la expandida estrella moribunda formará una cola que perseguirá a su compañera estelar, más densa. Esa cola se convertirá con el tiempo en un disco denso y grueso, arremolinado alrededor de la compañera. Posteriores simulaciones demuestran que pueden formar un disco de acreción incluso compañeras con órbitas tan vastas como la de Neptuno.

Esta evolución puede conocer un avatar interesante. A medida que la estrella moribunda aumenta su tamaño, quizá llegue a tragarse a su compañera y al disco. Una indigestión cósmica: la estrella compañera y el disco, que entran en el cuerpo de la estrella moribunda describiendo una órbita espiral, la deforman y aplanan desde el interior; las eyecciones de material se proyectan con violencia y generan chorros curvos; poco a poco, la compañera se hunde más y más en el interior de la estrella moribunda hasta que finalmente los dos núcleos se funden, momento en que las eyecciones terminan. Este proceso quizás explique por qué algunas nebulosas parecen el resultado de un flujo de material que acabó abruptamente.

Guiado magnético

Las estrellas compañeras de los sistemas binarios no son las únicas escultoras de las nebulosas planetarias. Intervienen también los intensos campos magnéticos que persisten dentro de la estrella o del disco alrededor de la compañera. Puesto que parte del gas espacial está ionizado, los campos magnéticos guían su movimiento. Los campos fuertes actúan como bandas de

CUANDO UNA ESTRELLA MUERE, NACE UNA NEBULOSA PLANETARIA

Las curiosas estructuras observadas con el Hubble han echado por tierra todas las teorías antiguas que explicaban la formación de las nebulosas planetarias. La teoría más aceptada ahora hace referencia a múltiples eyecciones de gas. Al gas le dan forma campos magnéticos, bien de la propia estrella, bien del disco alrededor de una estrella compañera. Este modelo explica sólo en líneas generales las distintas nebulosas, en diferentes etapas de formación (*recuadros*).

1 Sacudida por pulsaciones, la estrella moribunda expulsa sus capas más externas en forma de burbujas concéntricas. Luego expele un toro que rodea el ecuador. A lo largo de todo este proceso, también pierde material acarreado por un lento viento gaseoso.



IRC+10216

Viento lento

Estrella moribunda

2a Los intensos campos magnéticos del interior estelar rompen en la superficie. La rotación de la estrella dobla las líneas de campo en una hélice.

VISTA AMPLIADA DEL CENTRO DE UNA NEBULOSA

Campo magnético retorcido

Estrella compañera

Disco

2b O bien, una estrella compañera captura parte del viento y forma con él un disco de acreción con su propio campo magnético helicoidal.

goma rígida que moldean la corriente gaseosa, de igual manera que el campo magnético terrestre atrapa las partículas del viento solar, las conduce hacia las regiones polares y genera así las auroras boreales. A su vez, los intensos vientos estiran, doblan y enredan los campos magnéticos.

A mediados de los años noventa, Roger A. Chevalier y Ding Luo, de la Universidad de Virginia, propusieron que los vientos estelares transportan aros de campos magnéticos. El tira y afloja entre el gas y el campo puede colimar el material expulsado y darle formas singulares.

Por desgracia para el modelo, predice que el campo debe comenzar en un estado débil y no desempeña ningún papel en la generación del viento. Esto es un problema, ya que parece que los campos magnéticos activos de las superficies de las estrellas intervienen en que se desencadenen los vientos.

Otra vía es el estudio de los procesos por los que los intensos campos magnéticos arrojan materia al espacio. La convección revuelve el contenido de una estrella moribunda; los campos anclados en el núcleo ascienden con el gas hacia la superficie y, si el interior estelar rota

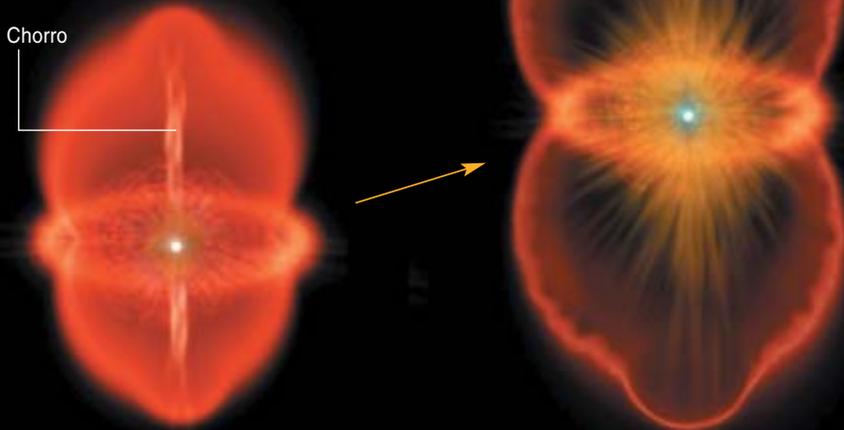
muy deprisa, se enrollan como un muelle. Cuando las líneas de campo rompen en la superficie, se abren y expulsan el material. Procesos similares ocurren en los discos de acreción: tanto la estrella como el disco pueden generar un grupo de vientos distintos. Que sus ejes no se alineen bien podría ser el origen de algunas de las extrañas formas multipolares que se observan en las nebulosas planetarias jóvenes. Junto con Eric G. Blackman, de la Universidad de Rochester, Sean Matt, de la Universidad McMaster, y sus colaboradores, uno de nosotros (Frank) está estudiando estos

DON DIXON (ilustraciones); CORTESÍA DE N. MAURON Y P. J. HUGGINS EN *Astronomy and Astrophysics*, VOL. 359; 2000 (IRC+10216)

Chorro

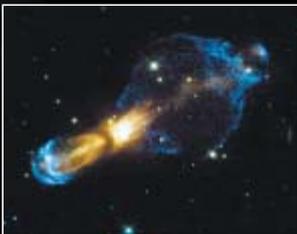
Borde

Viento rápido



3 Cualquiera que sea su origen y localización, el campo magnético canaliza el gas en un chorro de breve vida que se abre paso a través del viento lento. Mientras tanto, el toro hace que el viento adopte la forma de un reloj de arena.

4 La estrella emite un viento de alta velocidad que choca por detrás con el viento lento; se acumula así un borde gaseoso.



CALABAZA (OH 231.8+4.2)



LA DOBLE BURBUJA DEL HUBBLE

fenómenos. El quid de la cuestión se encuentra en que los campos magnéticos, al igual que las estrellas binarias, proporcionan fuerzas adicionales generadoras de una variedad mucho mayor de estructuras y formas de nebulosas que la ofrecida por el modelo de los vientos interactivos.

Nuestro conocimiento de cómo modelan las estrellas aisladas sus propias nebulosas planetarias ha progresado, pero sigue siendo inmaduro. Hay acuerdo sobre las líneas generales de la muerte estelar. Cuando las estrellas van apagándose, sus reactores nucleares fun-

cionan sin un ritmo constante, a golpes, y expelen las capas exteriores. La teoría de la estructura y evolución estelar es una de las teorías científicas de mayor éxito del siglo XX. Explica con detalle lo que se observa en la mayoría de las estrellas: su brillo, su color, incluso la mayor parte de sus singularidades. No obstante, quedan muchas lagunas, sobre todo muy al principio y al final de la vida de las estrellas.

No lejos de la Universidad de Rochester se encuentra la Escuela de Música Eastman. Allí, compositores e intérpretes buscan vías para

expresar su creatividad. Quienes estudiamos la muerte de las estrellas de tipo solar nos encontramos en una situación parecida. Creemos conocer los instrumentos que modulan las imágenes que vemos. Lo que no entendemos es cómo se conciertan para crear esas armonías de las nebulosas planetarias. ¿Qué origina los vientos? ¿Cuándo son importantes las estrellas compañeras? ¿Qué papel desempeñan los campos magnéticos? ¿Qué crea las nebulosas de doble lóbulo?

No somos los únicos astrofísicos intimidados, desconcertados y desafiados por las enigmáticas imágenes obtenidas con el telescopio Hubble y otros instrumentos a lo largo de los últimos quince años. Apenas si habrá campo de la astronomía donde no haya pasado lo mismo. Los datos nuevos acaban por quebrar la mejor de las teorías en cada campo de investigación. Es la naturaleza del progreso. Los descubrimientos son con frecuencia destructivos. Nos obligan a abandonar nuestras viejas cuevas y desbrozan el camino, a veces desorientador, que nos llevará mucho más lejos. Las teorías científicas se construyen para utilizarlas, pero no se debe confiar en ellas: hay que contrastarlas y mejorarlas.

Los autores

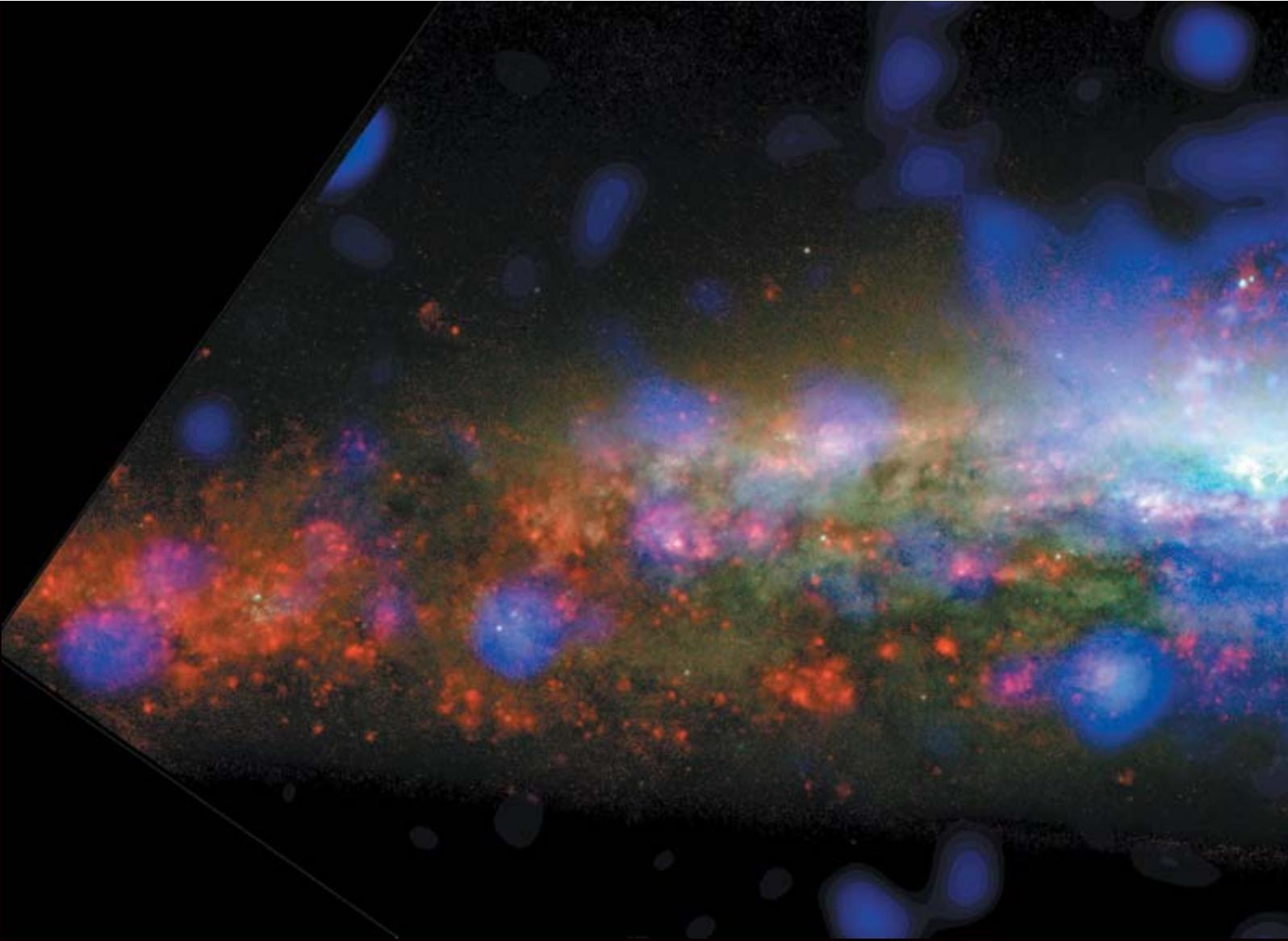
Bruce Balick y **Adam Frank** han publicado docenas de artículos, tanto teóricos como observacionales, sobre las nebulosas planetarias y sus estrellas precursoras. Balick es jefe del departamento de astronomía de la Universidad de Washington. Frank es profesor de la Universidad de Rochester.

Bibliografía complementaria

THE SHAPES OF PLANETARY NEBULAE. Bruce Balick en *American Scientist*, vol. 84, n.º 4, págs. 342-351; julio de 1996.

COSMIC BUTTERFLIES: THE COLORFUL MYSTERIES OF PLANETARY NEBULAE. Sun Kwok. Cambridge University Press, 2001.

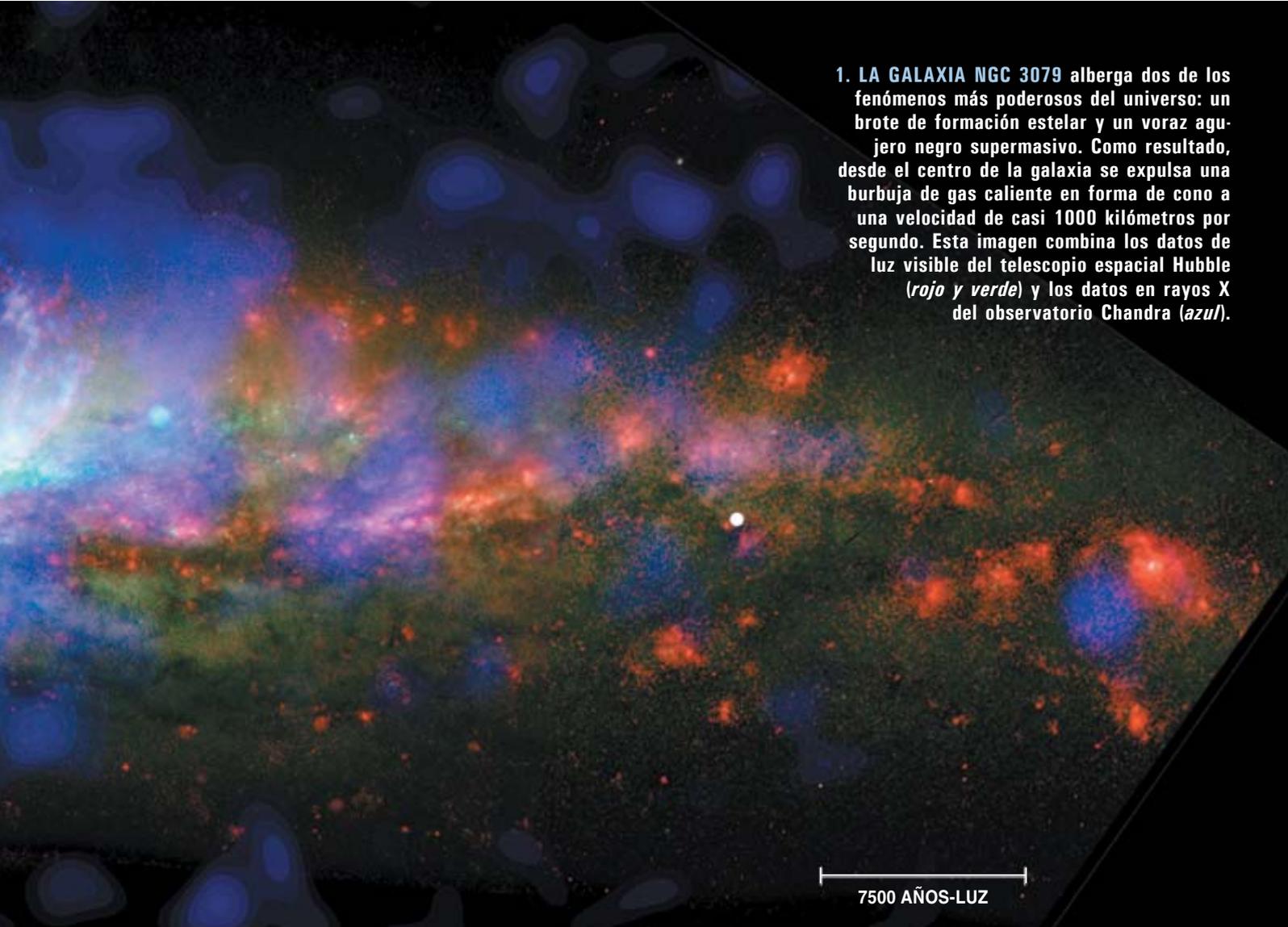
SHAPES AND SHAPING OF PLANETARY NEBULAE. Bruce Balick y Adam Frank en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 40, págs. 439-486; 2002.



Asociaciones

¿Por qué los agujeros negros gigantes
y los brotes de estrellas,
dos fenómenos que parecen tener muy poco en común,
van con frecuencia juntos?

Kimberly Weaver



1. LA GALAXIA NGC 3079 alberga dos de los fenómenos más poderosos del universo: un brote de formación estelar y un voraz agujero negro supermasivo. Como resultado, desde el centro de la galaxia se expulsa una burbuja de gas caliente en forma de cono a una velocidad de casi 1000 kilómetros por segundo. Esta imagen combina los datos de luz visible del telescopio espacial Hubble (rojo y verde) y los datos en rayos X del observatorio Chandra (azul).

7500 AÑOS-LUZ

galácticas

Los agujeros negros son las máquinas de destrucción más eficientes que se conocen. Su gravedad tan intensa es un billete de ida al olvido; dentro guardan lo desconocido, de donde nada regresa. Los vemos sólo porque la materia que se acumula a su alrededor se calienta, en su caída en espiral hacia el agujero, hasta alcanzar una tem-

peratura de millones de grados, con el intenso brillo consiguiente. Parte de la energía cinética y del momento se transfieren a un chorro de partículas, que fluye hacia el exterior a velocidades próximas a la de la luz. Se atribuyen a agujeros negros de tamaños variados unas u otras de las erupciones de radiación y plasma que se observan por el cosmos.

Sin embargo, los agujeros negros no son todopoderosos. Incluso los del centro de muchas galaxias, los agujeros negros supermasivos, son insignificantes conforme a una vara de medir cósmica. Sólo contienen un pequeño porcentaje de la masa total de la galaxia y su gravedad está muy concentrada. Por ello, se pensaba que los agujeros supermasivos, no digamos ya los que no fuesen tan grandes, apenas ejercerían efecto alguno más allá de sus alrededores. La formación de estrellas en otros confines de la galaxia marcharía al son de una trompeta diferente.

Así, el descubrimiento, en los últimos diez años, de que la actividad de los agujeros negros y la formación estelar se hallan ligadas supuso una verdadera sorpresa. Muchas galaxias donde los agujeros negros absorben materia con avidez y generan un “núcleo de galaxia activa” (o AGN), conocen a la vez un “brote de formación estelar”, es decir, un episodio de nacimiento de estrellas a ritmo muy vivo. ¿Cómo puede haber una ligazón entre dos procesos que parecen tan desligados?

Hoy día, la conexión entre los AGN y los brotes de formación estelar constituye un área revolucionaria de investigación. Las imágenes tomadas con el telescopio espacial Hubble identifican estos complejos fenómenos en los corazones de las galaxias, el observatorio Chandra de rayos X investiga regiones ocultas para el Hubble y los físicos teóricos intentan dar sentido a las observaciones. La investigación se centra en algunas de las preguntas básicas en astronomía: ¿cómo se encendieron en el oscuro universo primitivo miles de millones de estrellas? ¿Necesitaron los agujeros negros supermasivos alguna ayuda para crecer tanto? ¿Podrían ser agentes creadores, no sólo destructores?

Galaxias potenciadas

Las galaxias activas y los brotes de formación estelar se cuentan entre los fenómenos más espectaculares del universo. Un AGN es una fuente compacta y luminosa en el centro de una galaxia; los cuásares representan la variedad más extrema. Los AGN

expiden tanta potencia como miles de millones, billones incluso, de soles: sobrepasan en brillo a sus propias galaxias. Los agujeros supermasivos, que se supone generan esa energía, almacenan de un millón a miles de millones de veces la masa solar dentro de una región que no llega ni a la milésima parte del diámetro del Sol. La materia que cae en espiral hacia el agujero se acelera y libera energía a medida que choca con otra materia en todas las longitudes de onda: de radio, infrarrojas, ópticas, ultravioletas, de rayos X y de rayos gamma.

El brillo de las galaxias con brotes de formación estelar puede compararse con el de los AGN. En ellas, el gas se condensa y produce estrellas a un ritmo de mil soles al año, mil veces más rápido que el de nacimiento de estrellas en nuestra galaxia. Algunos brotes abarcan sólo regiones pequeñas, de apenas unos cientos de años-luz, cercanas al centro de la galaxia; otros se extienden a mayor escala, a veces hasta cubrir decenas de miles de años-luz. Suceden con frecuencia en galaxias que sufren, o han sufrido hace poco, encuentros o fusiones con una galaxia vecina. Las fuerzas de marea entre las dos galaxias rompen el gas y lo precipitan hacia el interior; se acelera la contracción de las nubes que crea las estrellas. Un brote corriente dura unos diez millones de años; termina cuando ha agotado el gas.

Como los AGN, las galaxias con brotes brillan en un amplio intervalo de longitudes de onda. Gran parte de la energía que radian proviene de la luz de las estrellas recién formadas. Despiden también con intensidad radiación infrarroja, que se genera cuando el polvo interestelar absorbe y reemite la luz estelar, y rayos X, engendrados por las estrellas de masa grande, sobre todo a su muerte. Una estrella pesada acaba con una explosión de supernova, que genera rayos X directamente, dispersa restos calientes emisores, a su vez, de rayos X y deja tras de sí una estrella de neutrones o un agujero negro pequeño, que podrá absorber una estrella compañera y generar, también, rayos X. El gas interestelar circundante, calentado por la actividad estelar, también produce rayos X.

La idea de que los AGN tienen algún nexo con los brotes de formación estelar no surgió de un solo descubrimiento revolucionario, sino que se ha ido gestando poco a poco. Aunque ahora no hay nadie que no los asocie a un agujero negro supermasivo, no estaba tan claro hace apenas 15 años. Roberto Terlevich, de la Universidad de Cambridge, y Jorge Melnick, del Observatorio Europeo del Sur, sostenían que los AGN eran un tipo de brote de formación estelar. Con los telescopios de entonces, no cabía distinguir de un agujero negro supermasivo un nodo compacto de estrellas jóvenes y restos de supernovas.

Argumentos a favor del nexo

Esa hipótesis quedó arrumbada a finales del decenio de 1980, cuando las observaciones en distintas longitudes de ondas de telescopios de mayor resolución descubrieron la pequeñez de los AGN: apenas

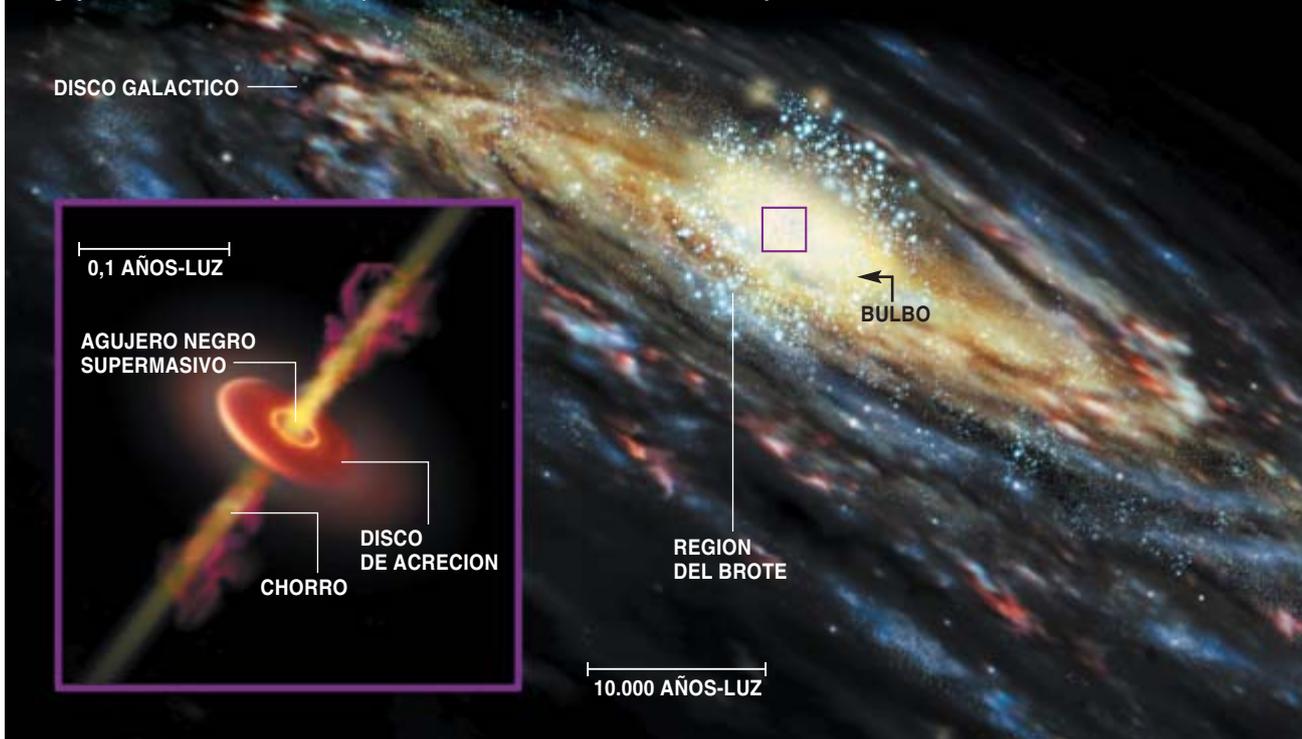
Resumen/AGN y brotes

- Los dos fenómenos más energéticos en las galaxias son los núcleos galácticos activos (AGN) y los brotes de formación estelar. Los primeros son fuentes concentradas e intensas de luz; posiblemente, materia que está cayendo hacia un agujero negro supermasivo. Los cuásares constituyen el mejor ejemplo conocido de AGN. Los brotes son episodios de formación de estrellas a un ritmo rapidísimo.
- Se suponía que los AGN y los brotes, normalmente separados por vastas distancias, no tenían nada que ver entre sí. Pero ahora se sabe que se trata de dos fenómenos vinculados entre sí.
- ¿Es el AGN la causa del brote? ¿O viceversa? ¿Resultan de un tercer proceso ambos fenómenos? De la respuesta dependerá que se comprenda la evolución de las galaxias.

ANATOMIA DE UNA GALAXIA

UNA GALAXIA ESPIRAL TIPICA contiene cien mil millones de estrellas, la mayoría dispuestas en un disco plano. Hacia el centro hay un bulbo de estrellas; en el centro mismo se encuentra un agujero negro supermasivo. Cuando el agujero se alimenta, la materia que cae en su interior,

forma un disco de acreción, o sale expulsada en chorro. Si la galaxia experimenta un brote de formación estelar, el gas se convierte en estrellas a un ritmo rápido. Los astrónomos pensaban que no había relación entre el agujero y los brotes. Se equivocaban.



si miden unos años-luz, y probablemente no pasen de unos minutos-luz; demasiado poco para albergar un brote de formación estelar. Aun cuando un cúmulo entero de estrellas cupiera dentro de un espacio tan reducido, las estrellas se fusionarían entre sí y acabarían por crear un agujero negro. Es más, los AGN suelen ir acompañados por chorros de material expelido a alta velocidad; como un agujero negro, pero no como un brote estelar [véase “Agujeros negros en los centros galácticos”, por Martin J. Rees; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1991].

Aunque los AGN y los brotes de formación estelar eran, pues, fenómenos diferentes, el debate condujo a que se aceptara que alguna relación tenía que haber entre ellos [véase “Explosiones galácticas”, por Sylvain Veilleux, Gerald Cecil y Jonathan Bland-Hawthorn; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1996]. Son muchas las pruebas observacionales que ahora apuntan a un nexo que los una. La variedad de los descubrimientos era extraordinaria: las consecuencias de la conexión se veían por todo el universo.

La primera prueba es la más directa. En galaxias cercanas, los telescopios han descubierto AGN simultáneos a brotes de formación estelar. No ha sido una tarea fácil: los núcleos galácticos, repletos de gas y polvo, obstruyen nuestra visión. Aquí desempeña una función importante la astronomía de rayos X. Penetran éstos en el gas denso. Incluso aunque los te-

lescopios que los captan carecen de la resolución del Hubble, con frecuencia ofrecen imágenes más nítidas del centro de las galaxias.

Una segunda prueba viene dada por la reciente catalogación de unas 23.000 AGN por el equipo de Timothy Heckman, de la Universidad Johns Hopkins. Deducen la existencia de los AGN o de los brotes, no de la criba minuciosa de las imágenes de todas las galaxias, sino de la intensidad de ciertas líneas espectrales: la presencia de oxígeno muy ionizado indica la existencia de un AGN; una fuerte absorción de la luz por el hidrógeno, la de un brote. La conclusión principal de este trabajo fue que las galaxias con AGN muy poderosos tienen más estrellas jóvenes que las galaxias similares sin AGN. Cuanto más potente sea el AGN, más probable será que la galaxia haya pasado poco antes por un intenso brote de formación. En resumen, esta investigación probó que la conexión entre los brotes y los AGN no era accidental.

Tercero, las galaxias con AGN no son las únicas con agujeros negros supermasivos. Los astrónomos también han detectado este tipo de agujeros en los centros de galaxias inactivas. Por lo que parece, hay agujeros gigantes por todas partes. La mayor parte del tiempo permanecen dormidos e invisibles; sólo producen AGN cuando cae hacia ellos materia a un ritmo vivo y constante. John Kormendy, de la Universidad de Texas en Austin, Douglas O. Richstone, de la

CUATRO MANERAS DE RELACIONAR AGUJEROS NEGROS Y BROTES ESTELARES

1 EL BROTE ESTELAR EMULA A UN AGUJERO

Con un telescopio de pobre resolución, un brote compacto se asemeja a un agujero negro activo.



2 EL BROTE ESTELAR Y EL AGUJERO COMPARTEN UNA MISMA FUENTE DE COMBUSTIBLE



Universidad de Michigan en Ann Arbor, y otros han demostrado que existe una correlación entre la masa de estos agujeros y la masa total de las estrellas de los centros galácticos: aquélla es alrededor de un 0,1 por ciento de ésta. La misma correlación vale para la mayoría de las galaxias con un AGN (pero no para todas). Algún tipo de proceso, pues, liga los agujeros negros centrales y la formación estelar. Tenaces discrepancias entre los autores dan fe de que no acaba de entenderse tal relación.

La conexión entre los AGN y los brotes tiene efectos incluso a sólo 24.000 años-luz de nosotros, en el corazón de la Vía Láctea. Los movimientos rápidos de las estrellas y del gas alrededor del centro galáctico son la prueba de la presencia de una masa concentrada igual a 2,6 millones de soles. Las emisiones en radio y en rayos X procedentes del centro señalan que se trata de un agujero negro supermasivo; no un agujero activo, sino uno que se alimenta ocasionalmente. Algunos defienden que actúa como un AGN en miniatura, que devora material a un ritmo diez millones de veces inferior al de un AGN normal. Aunque no le acompaña un brote de formación estelar, existen varios cúmulos brillantes de estrellas en sus proximidades. Podrían ser los restos de brotes de hace varios millones de años.

Al mirar hacia atrás en el tiempo se encuentran dos pruebas más. Se ha visto que el lazo entre los AGN y la formación estelar era aún más fuerte cuando el universo tenía una décima parte de su edad actual. En aquel entonces eran más comunes dos tipos de galaxias: las galaxias infrarrojas ultraluminosas y las radiogalaxias, que pueden ser galaxias en un estado temprano de formación o galaxias en proceso de fusión. Los núcleos contenían cantidades ingentes —miles de millones de masas solares— de gas denso y frío; cobijaban AGN y brotes. La otra línea de investigación del pasado involucra a los AGN más distantes y luminosos: los cuásares. Con frecuencia, residían en galaxias informes, cuyas estructuras distorsionadas y colores inusuales sugieren que estaban en trance de fusionarse entre sí y creaban estrellas a un ritmo alto.

Una línea final de prueba deriva del estudio de la radiación del fondo cósmico en rayos X, menos conocida que el fondo cósmico de microondas. Ha revelado que existe una población de AGN oculta a los telescopios ópticos; contamos con una explicación natural: los AGN estuvieron acompañados de brotes de formación estelar que inundaron sus galaxias de polvo [véase "Inventario cósmico", por Günther Hasinger y Roberto Gilli; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo 2002].

DON DIXON

3 EL AGUJERO CAUSA EL BROTE ESTELAR



4 EL BROTE ESTELAR PRODUCE EL AGUJERO NEGRO



¿La gallina o el huevo?

La conexión entre los AGN y los brotes de formación estelar puede explicarse de cuatro maneras: que no sean sino un mismo fenómeno; que un tercer proceso dé lugar al AGN y al brote; que el AGN produzca el brote; o que el brote cree el AGN.

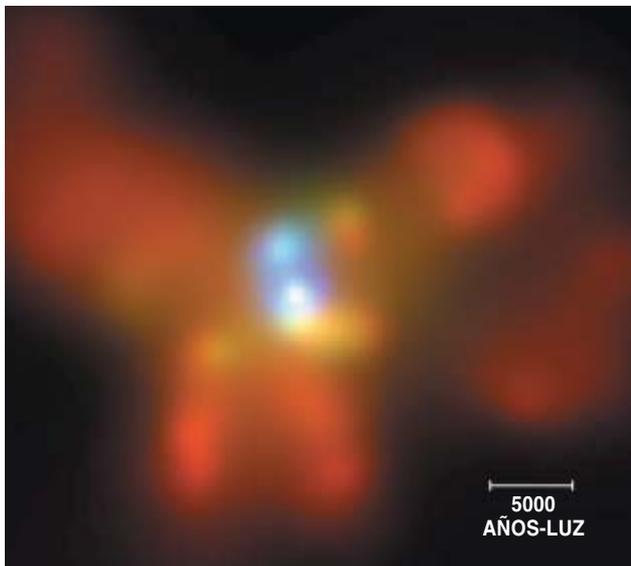
La primera posibilidad no es más que una versión restringida de la vieja idea que identifica los AGN con un tipo de brote estelar, errónea para la mayoría de los AGN, pero quizá correcta en algunos casos. Los AGN débiles podrían deberse, más que a un agujero negro supermasivo, a una actividad estelar extrema encerrada en una región tan pequeña, que los telescopios la confundiesen con un agujero. Esta posibilidad sigue abierta.

La autora

KIMBERLY WEAVER investiga en el Laboratorio de Astrofísica de Altas Energías del Centro Goddard de la NASA. Docente en la Universidad de Johns Hopkins, estudia las emisiones de rayos X de agujeros negros, núcleos de galaxias activas y galaxias con brotes de formación estelar.

Según la segunda hipótesis, la “conexión” es una simple coincidencia. Por ejemplo, una fusión de una galaxia con otra podría impulsar el gas hacia el centro de la estructura recién constituida, lo que induciría el brote estelar y desencadenaría el AGN al facilitarle combustible. Esta teoría predice que el tiempo necesario para que un agujero negro crezca hasta proporciones supermasivas (unos 10 millones de años) es similar a la vida media típica de un brote de formación de estrellas, y también al tiempo que les lleva a dos galaxias fusionarse.

La mayoría de los investigadores, no obstante, se han decantado por las otras dos posibilidades, en las que los AGN y los brotes mantienen una relación causal. La tercera hipótesis sostiene que un agujero negro supermasivo ya existente ejerce, en contra de lo esperado, una fuerte influencia en la galaxia anfitriona. Quizás atraiga materia hacia el centro galáctico y desencadene así la formación de estrellas. Françoise Combes, del Observatorio Astronómico de París, es la adalid de este modelo. En su opinión, una vez se ha constituido el agujero, el gas fluye de modo natural hacia el núcleo de la galaxia y alimenta el AGN. La acumulación del gas va proporcionando el material bruto del brote estelar. Se trata de una tesis verosímil: muchas de las galaxias cercanas que cobijan AGN



2. PROBLEMA DOBLE: tal y como sugiere su curiosa forma de mariposa (*arriba*), NGC 6240 no es una, sino un par de galaxias que se fusionaron entre sí en fecha reciente. El sistema parece tener no sólo un agujero negro, sino dos agujeros negros supermasivos, que se manifiestan como un par de nítidas fuentes de rayos X (*círculos azules en la imagen de abajo*). El gas difuso emisor de rayos X (*rojo*) constituye un signo de formación estelar rápida. NGC 6240 presenta un ejemplo clásico de la simultaneidad de los agujeros, los brotes estelares y la fusión de galaxias.

contienen también estructuras ricas en polvo dentro de sus núcleos; podría ser material traído desde fuera. Por otra parte, no todas estas estructuras tienen la forma predicha por la teoría.

Pero los brotes podrían ser una consecuencia, no de la caída de materia hacia el agujero, sino de flujos de energía que partiesen del agujero. Cuando el agujero negro supermasivo empezase a tragar materia y se produjera el AGN, las ondas de choque y los chorros que generaría sacudirían la galaxia. Al apilarse el gas

a lo largo de los frentes de choque se formarían estrellas. Las observaciones de la galaxia Centaurus A, donde el ritmo de formación estelar es muy alto, parecen señalar que allí ocurrió una explosión masiva de tipo AGN hará unos 10 millones de años. En los bordes de la galaxia se aprecia, desde el Chandra, un anillo de emisión en rayos X con un diámetro de unos 25.000 años-luz; quizá sea el resultado de los frentes de onda de la explosión. Esta habría coincidido con un episodio de formación estelar; el anillo de rayos X se solapa con arcos de estrellas muy jóvenes.

De esa hipótesis sobre la precedencia del agujero negro se extraen unas conjeturas interesantes. Quizá fuesen los agujeros negros, y no las estrellas, los primeros faros en la completa oscuridad del universo primitivo. Es más, algunos han conjeturado que el Sol nació durante un brote estelar. Si el origen de éste partió de un AGN de la Vía Láctea, le debemos nuestra existencia a un agujero negro.

El nacimiento de un agujero

La hipótesis de la precedencia del brote estelar, sin embargo, cuenta con mayor apoyo teórico y empírico. La conexión resulta natural desde el punto de vista de la evolución estelar ordinaria. Un brote crea cúmulos densos de estrellas, dentro de los cuales abundan las colisiones estelares [véase “Colisiones estelares”, por Michael Shara; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero 2003]. Las estrellas grandes del cúmulo mueren enseguida y se convierten en estrellas de neutrones o en agujeros negros de masa estelar. Con el tiempo, estos objetos se agrupan y van construyendo, en el curso de decenas o cientos de millones de años, un agujero negro de masa creciente.

O bien, un gran agujero negro podría nacer de estrellas poco pesadas, similares a nuestro Sol. Por lo normal, los astros de ese tamaño no se convierten en agujeros, pero en un cúmulo muy denso se irán fusionando entre sí hasta crear megaestrellas con masas de cientos a miles de veces la de nuestro Sol. Estas megaestrellas se derrumbarán sobre sí mismas y producirán agujeros negros de masas similares. El proceso requiere unos 100 millones de años, lapso mucho menor que la vida media de una galaxia y lo suficientemente rápido como para explicar los primeros cuásares.

Sin importar cuál sea su origen, los agujeros negros tenderán a desplazarse hacia el centro de la galaxia. Varios de ellos podrían fusionarse allí y formar un agujero negro supermasivo. Refuerzan esta idea las observaciones de la galaxia NGC 6240, donde dos agujeros negros supermasivos giran uno alrededor del otro; su destino es fusionarse (*véase la figura 2*). Los agujeros supermasivos continúan creciendo al alimentarse del material de los alrededores. Incluso los cúmulos de estrellas que se forman en otros confines de la galaxia pueden proporcionar materia al agujero central. Poco a poco pierden energía cinética y momento angular, debido a la fricción a escala galáctica, es decir, a las interacciones gravitatorias y dinámicas con

NASA/ROELAND P. VAN DER MAPEL Y JORIS GERSSEN Instituto Científico del Telescopio Espacial (imagen óptica). NASA/CXC/STEFANIE KOMASSA Instituto Max Planck de Física Extraterrestre (imagen de rayos X)



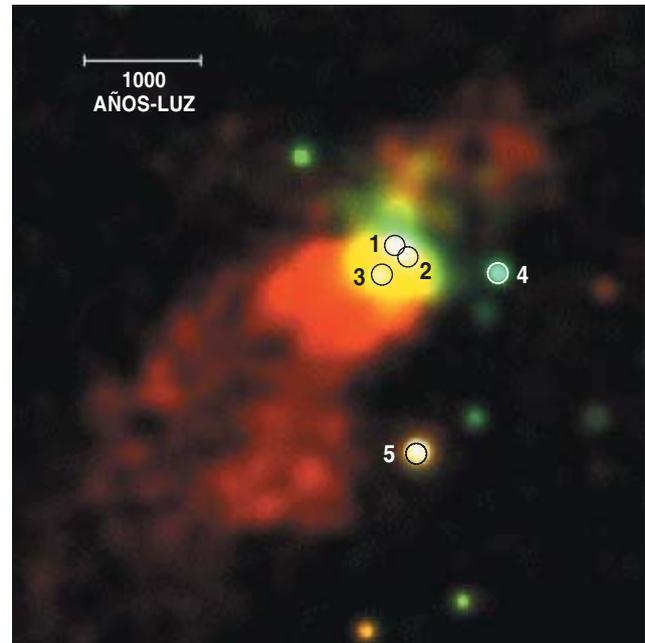
3. ¿UNA PRUEBA IRREBATIBLE? La región central de la galaxia NGC 253 (*izquierda*) da a entender que los brotes de formación estelar pueden crear agujeros negros supermasivos. Hay tres fuentes de rayos X (*círculos de la imagen de la derecha*) más brillantes que los agujeros negros de masa

el resto de la galaxia. Los cúmulos caen en espiral hacia el interior; con el tiempo, las fuerzas de marea los descompondrán. En el transcurso de miles de millones de años, este proceso inyecta hacia el agujero negro central una masa equivalente a decenas de millones de soles. Otras perturbaciones del disco galáctico —interacciones, fusiones— también proporcionan combustible al agujero negro.

Pesos medios

Según el modelo de la precedencia del brote, ha de existir una nueva población de agujeros negros, de un tipo intermedio entre los agujeros negros de masa estelar y los supermasivos. Durante los últimos 10 años, se han ido reuniendo pruebas circunstanciales, en forma de fuentes ultraluminosas en rayos X, que parecen ratificar esa predicción. Estas fuentes, encontradas en varias galaxias cercanas, emiten entre diez y varios cientos de veces más energía en rayos X que las estrellas de neutrones o los agujeros negros de masa estelar. Podría tratarse de estrellas de neutrones cuya luz se dirige directamente hacia nosotros, lo que les prestaría un brillo aparente anómalo. Pero cada vez hay más indicios de que nos hallamos ante agujeros negros con masas que multiplican cientos de veces la del Sol.

El año pasado, los equipos de Roeland P. van der Marel, del Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial, en Baltimore, y Michael Rich, de la Universidad de California en Los Angeles, encontraron indicios de agujeros de masa intermedia en los centros de dos cúmu-



estelar, pero más débiles que los agujeros supermasivos. Quizá se trate de agujeros negros de tamaño mediano, un paso intermedio en la generación de grandes agujeros a partir de estrellas muertas. La borrosidad de la imagen de rayos X se debe al gas asociado a la formación estelar.

los densos de estrellas, M15 y M31-G1. Las estrellas de estos cúmulos se mueven tan rápido, que entre ellas ha de haber un cuerpo de 2000 y de 20.000 masas solares, respectivamente, para que no se dispersen. No tiene por qué ser un agujero negro grande: produciría el mismo efecto un grupo de estrellas de neutrones o de agujeros negros pequeños. Pero incluso aunque se tratase de esto segundo, con el tiempo los objetos acabarán chocando y producirán un enorme agujero negro.

Tod Strohmayer y Richard Mushotzky, del Centro Goddard de la NASA, han observado que una de las fuentes ultraluminosas cercanas al centro de la galaxia M82, una galaxia con brotes, parpadea con un período de unos 18 segundos. Es un parpadeo demasiado lento e irregular para provenir de la superficie de una estrella de neutrones, y demasiado intenso para que lo genere la materia en órbita alrededor de una estrella de este tipo. Si parpadea la materia que rodea a un agujero negro, éste habría de tener una masa de varios miles de soles. En la galaxia espiral NGC 1313 ha encontrado Jon Miller, del Centro Smithsonian de Astrofísica de Harvard, dos fuentes ultraluminosas en rayos X más frías que los agujeros negros de masas estelares. La teoría predice que, cerca de los agujeros negros, las temperaturas decrecen cuanto mayores sean sus masas, por lo que los agujeros de NGC 1313 deben ser más pesados que los de masa estelar.

Estos posibles agujeros de masa intermedia no se encuentran en el centro de sus respectivas galaxias anfitrionas; se ignora qué importancia puedan tener para la relación entre los AGN y los brotes de formación estelar. Pero mi investigación de una galaxia cercana

con brotes, NGC 253, ha aportado algunos elementos de juicio directos. Antes de 1995, los astrónomos pensaban que los intensos rayos X procedentes de esta galaxia se originaban en el gas caliente asociado a los brotes. Ese año, descubrí en el espectro de rayos X indicios de la presencia de agujeros negros. Hasta 2001 no conseguiríamos, mis colaboradores y yo, una imagen en rayos X de esta galaxia, tomada con el observatorio Chandra (véase la figura 3).

Encontramos cinco fuentes superluminosas en rayos X en una región interior de NGC 253 de unos 3000 años-luz de tamaño. Una de ellas, situada en el propio centro de la galaxia, es unas cien veces más brillante que cualquier estrella de neutrones o agujero de masa estelar: su masa ha de equivaler a un centenar de soles. Podría ser un agujero negro captado en el momento de convertirse en un AGN maduro. Habría sucedido como sigue: se produce un brote cerca del centro de la galaxia; las estrellas de mayor masa colapsan gravitatoriamente y se fusionan entre sí creando agujeros negros de peso medio, que caen en espiral hacia el centro galáctico, donde, a su vez, se fusionan entre sí y crean la semilla de un agujero supermasivo; cuando el brote va apagándose, el agujero supermasivo empieza su actividad como AGN.

El estudio de la intervención de los brotes estelares en el aprovisionamiento y crecimiento de los agujeros negros supermasivos es fundamental para entender el nacimiento de los más poderosos AGN, los cuásares. Los astrónomos han estado preguntándose por qué los cuásares del universo temprano eran más energéticos que los de hoy día. La razón podría ser que por entonces abundaban más los episodios de formación estelar, que encenderían AGN más intensos.

Quizá no haya una precedencia inequívoca. Puede que las galaxias experimenten ciclos, con fases dominadas por AGN y fases dominadas por brotes. Cuando los ciclos se solapan, se observan los dos fenómenos a la vez. Cabe dentro de lo posible que los AGN y los brotes evolucionen al unísono. Las obser-

vaciones actuales no alcanzan a distinguir si los AGN son primero, o si los brotes vienen antes, o si ocurren unos y otros a la vez. Tendrá que resolver este fascinante problema la próxima generación de telescopios.

Las observaciones de SIRTIF, telescopio infrarrojo espacial de la NASA, proporcionarán una información valiosa para el estudio de la conexión entre los AGN y los brotes de formación estelar en las galaxias primitivas. Se compararán los datos en el visible, el infrarrojo y los rayos X para analizar si durante las etapas de formación galáctica dominan los AGN o los brotes; contribuirán a determinar qué fue primero. Es también muy importante encontrar más galaxias cercanas parecidas a NGC 253.

Puede que la relación entre AGN y brotes sea el último nexo intergeneracional del universo. Los agujeros negros representan los restos aglutinados de estrellas extintas; los brotes de formación estelar, el nacimiento de estrellas enérgicas. Quizá la colaboración de lo viejo y lo nuevo conformó las galaxias, y entre ellas, la nuestra.

Bibliografía complementaria

RELATIONSHIPS BETWEEN ACTIVE GALACTIC NUCLEI AND STARBURST GALAXIES. Dirigido por Alexei V. Filippenko. ASP Conference Series, vol. 31; 1992.

STARBURST GALAXIES: NEAR AND FAR. Dirigido por Linda Tacconi y Dieter Lutz. Springer Verlag, 2001.

X-RAY PROPERTIES OF THE CENTRAL KPC OF AGN AND STARBURSTS: THE LATEST NEWS FROM CHANDRA. Kimberly A. Weaver, en *The Central Kiloparsec of Starbursts and AGN: The La Palma Connection*. Dirigido por J. H. Knapen, J. E. Beckman, I. Shlosman y T. J. Mahoney. ASP Conference Series, vol. 249; 2001.

STARBURST-AGN CONNECTION FROM HIGH REDSHIFT TO THE PRESENT DAY. Yoshiaki Taniguchi, en *Proceedings of the IAU 8th Asian-Pacific Regional Meeting*, vol. 1. Dirigido por Satory Ikeuchi, John Hearnshaw y Tomoyuki Hanawa. ASP Conference Series, vol. 289; 2003.

Las galaxias del universo joven

Mediante la comparación de las remotas galaxias primigenias con las más viejas y cercanas se espera determinar cómo se forman y evolucionan las galaxias

F. Duccio Macchetto y Mark Dickinson



Nuestra concepción del universo ha cambiado de forma radical en este siglo, de la mano de los avances experimentados por la observación astronómica. El trabajo pionero de Edwin Hubble en los años veinte condujo a la idea según la cual el universo nació de una “gran explosión” y desde entonces se expande. Los estudios realizados más tarde revelaron que, con el paso del tiempo, el universo cambia también de otras maneras. Al principio estaba repleto de una materia extremadamente caliente, densa y casi uniforme; ahora abunda el vacío. Cuando los astrónomos dirigen su mirada a través de millones de años luz, la materia que ven se concentra en una gavilla dispersa de galaxias aparentemente aisladas. Cómo ocurrió esta transformación y por qué las galaxias se formaron así, sigue siendo hoy una incógnita fundamental en cosmología.

Las galaxias cercanas, fruto de unos 10.000 millones de años de evolución, han sido objeto de un estudio intenso. Pero en los últimos tiempos se han dado pasos de gigante en la investigación de las galaxias que se hallan a distancias cosmológicas, es decir, las que existieron en las etapas iniciales del universo. Gracias a la velocidad finita de la luz, cuando se observa lo más lejano se mira directamente el pasado. En estos momentos los cosmólogos ópticos pueden ver galaxias remotas, de cuando el universo contaba con menos de una quinta parte de su edad actual. Con nuevos instrumentos y técnicas se espera detectar las galaxias “primigenias” en su proceso de gestación y seguir su evolución hasta nuestros tiempos.

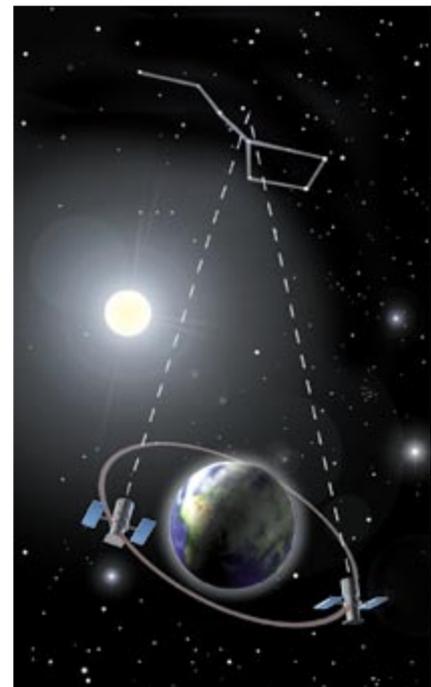
Naturalmente, las cosas no resultan fáciles en la práctica. Las galaxias jóvenes están tan lejos, que parecen pequeñas y débiles incluso para los telescopios más potentes.

1. LAS OBSERVACIONES de campo profundo del HUBBLE proporcionan la imagen más clara, hasta la fecha, del universo lejano (imagen compuesta a la izquierda). Para construir estas imágenes, se apuntó el telescopio hacia una franja del cielo cuyo tamaño es 1/140 del tamaño aparente de la luna llena, cerca de la Osa Mayor, durante diez días de diciembre de 1995 (diagrama). Los astrónomos confían en que, gracias al estudio de las débiles galaxias primigenias y de las más viejas y cercanas, les será dado conocer la evolución de las galaxias.

F. DUCCIO MACCHETTO y MARK DICKINSON se hallan adscritos al Instituto Científico del Telescopio Espacial, de Baltimore. Macchetto ocupa el cargo de director adjunto de programas científicos del Telescopio Espacial Hubble. Dickinson investiga en la Universidad Johns Hopkins.

Una galaxia del tamaño de nuestra Vía Láctea, observada tal como era cuando el universo tenía la mitad de su edad actual, cubriría en el cielo un ángulo de sólo unos segundos de arco. Vista por medio de los telescopios terrestres, perdería la mayoría de sus características estructurales; incluso con excelentes condiciones atmosféricas, a menudo no puede hacerse mucho más que distinguir las galaxias remotas de las estrellas débiles. Sin embargo, en los últimos años el Telescopio Espacial Hubble —que al estar por encima de la atmósfera terrestre cuenta con una vista agudísima— ha proporcionado imágenes detalladas de los confines del universo.

Muchos programas de investigación del Hubble se dedican al estudio de las galaxias jóvenes, aunque hay uno en particular que ha centrado la atención. En diciembre de 1995 el Hubble apuntó a una zona del cielo, muy corriente, situada cerca de la Osa Mayor, cuyo tamaño era 1/140 veces el tamaño aparente de la luna llena. Se eligió esa zona porque proporcionaba una vista clara hacia



el exterior de nuestra galaxia y un emplazamiento donde dejar apuntado eficazmente el telescopio. Durante diez días completos el Hubble tomó cientos de exposiciones a través de cuatro filtros, cubriendo el espectro desde el ultravioleta hasta el infrarrojo cercano. Estas imágenes, conocidas como observaciones de campo profundo del Hubble (HDF, de *Hubble Deep Field*), nos han suministrado las mejores vistas del universo lejano (en la jerga astronómica el término “profundo” significa tenue y remoto).

Las imágenes del HDF muestran unas 3000 galaxias débiles, con una variedad asombrosa de tamaños y colores. Muchas son más de mil millones de veces más débiles de lo que puede apreciarse a simple vista. El problema estriba en la interpretación de estas imágenes bidimensionales

de un universo tetradimensional. Al fin y al cabo, todo lo que cae en la línea de visión —cercano o lejano, joven o viejo— se proyecta sobre el mismo plano del cielo. No se trata sólo de identificar las galaxias primigenias que haya en esa mezcla, sino también de comparar sus características con las de otras galaxias más viejas y cercanas o situadas a distancias intermedias. Con ello esperamos determinar el origen y evolución de las galaxias.

No es fácil calcular cuán vieja es una galaxia a partir tan sólo de su tamaño o de su brillo. Los objetos débiles cercanos a nosotros y los situados más lejos, aunque intrínsecamente brillantes, pueden ofrecer un aspecto muy similar. Pero disponemos de otros mecanismos para determinar su edad. Por ejemplo, debido a que el universo se encuentra en perpe-

tuo estado de expansión, la lejanía de una galaxia es proporcional a la velocidad con que se aparta de nosotros. Esta recesión le origina un corrimiento Doppler en la luz que emite una galaxia. En consecuencia, sus rasgos espectrales característicos están desplazados hacia el rojo, es decir, hacia longitudes de onda mayores. Al medir este “corrimiento hacia el rojo”, z , podemos determinar la distancia relativa de una galaxia y su edad.

La cronología de la historia cósmica viene dada por el corrimiento hacia el rojo: los valores de z mayores representan épocas más tempranas, cuando el universo era más chico, más joven y más denso. El universo, desde el tiempo que corresponda a un valor cualquiera de corrimiento hacia el rojo z , se ha expandido en un factor de $(1 + z)$. La relación entre



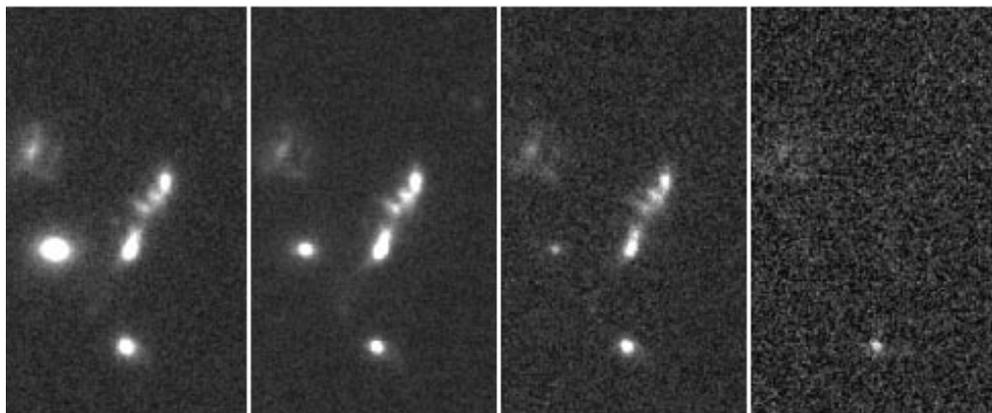
2. IMAGENES de extraordinario detalle procedentes de las observaciones del HDF. Nos muestran un número incontable de galaxias. Al fin y al cabo, todo lo que está situado a lo largo de la línea de visión —cerca o lejos, joven o viejo— se proyecta sobre el mismo plano del firmamento. En total, las imágenes del HDF exhiben unas 3000 galaxias débiles, con una amplia gama de figuras y colores insólitos. Muchas son más de mil millones de veces más débiles de lo que puede observarse a simple vista.

z y la edad reviste mayor complejidad. Pero, en términos generales, un corrimiento hacia el rojo z significa que la imagen es de cuando el universo contaba como máximo con $1/(1+z)$ veces su edad actual. Por tanto, con un corrimiento hacia el rojo de 1, la imagen pertenece a cuando el universo tenía a lo sumo la mitad de la edad que tiene hoy día; con un corrimiento al rojo de 3, menos de un 25% y quizá tan sólo un 12,5%.

Una multitud de mediciones del corrimiento hacia el rojo han determinado ya las distancias de miles de galaxias débiles hasta $z=1$, el límite práctico de los rastreos actuales. Las imágenes del Hubble nos permiten clasificar las galaxias, compararlas con otras más cercanas y evaluar su estado evolutivo. Muchas de estas galaxias parecen haber gozado en el pasado de relativa calma: las imágenes del Hubble descubren objetos elípticos y espirales muy brillantes, similares a los más cercanos, al menos hasta corrimientos hacia el rojo de 1. Incluso en épocas bastante precoces parece que el número de estas galaxias de aspecto normal era similar a la cifra total que hay en el universo actual. Por tanto, imaginamos que muchas galaxias han permanecido en muy buena medida inalteradas durante miles de millones de años.

Muchas otras, sin embargo, han experimentado grandes cambios, a juzgar por los rastreos de los desplazamientos al rojo y las imágenes del Hubble. Realicemos el simple ejercicio de contar galaxias del firmamento; veremos que hay demasiadas galaxias débiles. En el límite de las observaciones actuales aparecen al menos diez veces más galaxias que en el universo local. Sus colores azules y los fuertes elementos de emisión que exhiben en sus espectros sugieren que, en comparación con las galaxias actuales, producían estrellas con bastante rapidez, actividad que las hizo más brillantes y que, por tanto, sea más fácil detectarlas en los rastreos.

Además, muchas de estas galaxias presentan morfologías irregulares, lo que induce a pensar que, hace mucho tiempo, las interacciones, las fusiones incluso, entre las galaxias constituyeron un fenómeno común. Aunque se pueden encontrar galaxias irregulares y en interacción más cerca de nosotros, parecen haber abundado mucho más en un universo joven. En los límites extremos del HDF, el elenco de galaxias está dominado



3. LAS GALAXIAS CON APAGON ULTRAVIOLETA abundan en las imágenes astronómicas más profundas. Vistas a través de varios filtros, estas galaxias remotas son observables a longitudes de ondas azules, rojas y verdes, pero desaparecen en las imágenes del ultravioleta cercano (*arriba*). El hidrógeno, un gas omnipresente en las galaxias y en el espacio que media entre ellas, absorbe toda la luz ultravioleta que sea más azul que determinada longitud de onda.

por un número ingente de objetos muy compactos, casi imperceptibles incluso para la agudísima vista del Hubble. Basándose en estos datos, los astrónomos concluyen que el ritmo global de la formación de estrellas ha descendido drásticamente durante la segunda mitad de la historia del universo y que la mayor parte de la actividad ha acontecido en las galaxias irregulares.

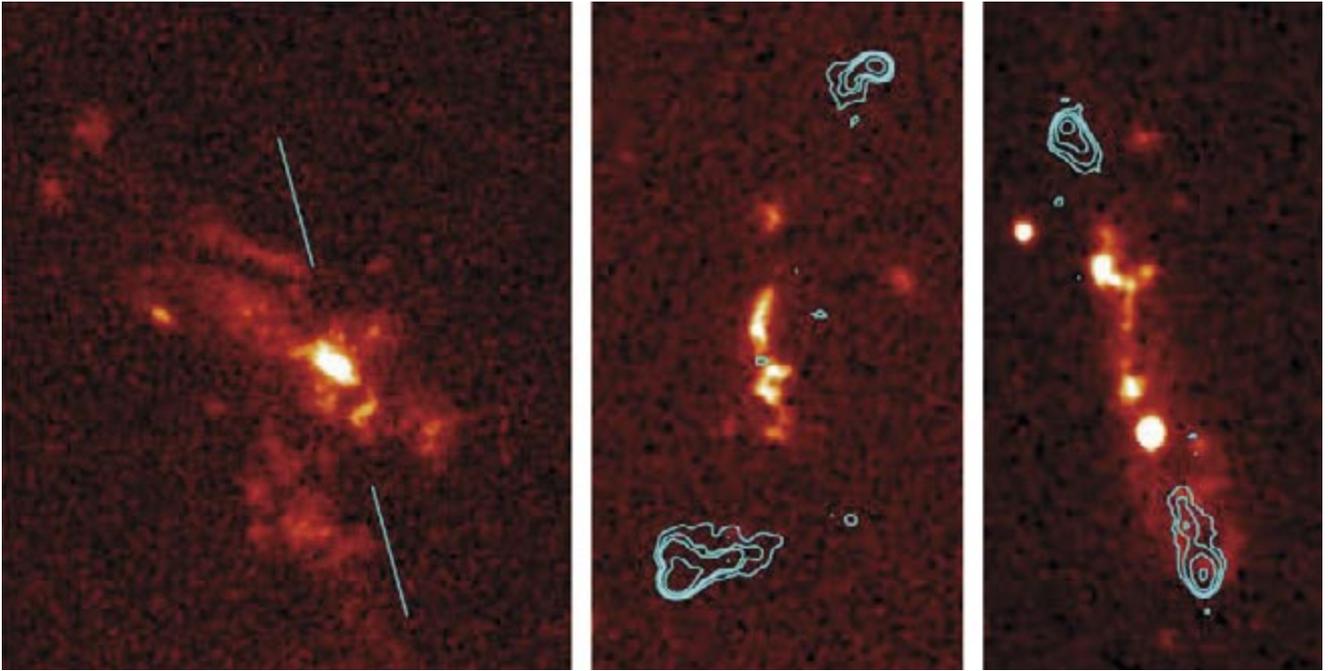
No se sabe todavía cuáles son los mecanismos físicos que impulsaron tal evolución, ni qué suerte han corrido esas galaxias. Quizás el ritmo de las interacciones galácticas era mayor sólo porque el universo era más pequeño y mediaba una distancia menor entre las galaxias. Es posible que la frecuencia de las interacciones disparase la formación estelar que ahora detectamos. O puede que las galaxias tempranas agotaran su reservorio de gas, dejaran de formar estrellas y se fueran apagando hasta tornarse casi invisibles. En cualquier caso, los hallazgos apuntan también a que la formación de las galaxias espirales y elípticas “normales” está fuera del alcance de la mayoría de los rastreos de los desplazamientos al rojo (se las encuentra en abundancia hasta $z=1$). Por tanto, para ponerle el broche final a la historia, los astrónomos habrán de llevar la investigación un paso adelante y escudriñar el universo cercano en busca de restos de la población de “galaxias débiles azules”, aparentemente extinguida.

Carecemos de un método directo de determinar la distancia de casi ninguna galaxia que se encuentre en el límite de las observaciones del

HDF. La luz que desprenden no basta para medir sus corrimientos hacia el rojo, ni siquiera con los mayores telescopios. Se emplean, pues, otras técnicas para buscar galaxias que superen el $z=1$. Uno de los métodos se sirve de objetos remotos, fuentes de radio por ejemplo, que hagan de faros. Algunas galaxias generan fuertes emisiones con longitudes de onda de radio, se supone que en un núcleo activo ubicado en el interior de la galaxia, como un cuásar oculto. Las radiogalaxias no son muy comunes hoy día, pero su emisión característica es capaz de llamar la atención en puntos remotos del universo. Así, algunas de las fuentes de radio más luminosas del cielo están situadas a enormes distancias y presentan desplazamientos al rojo muy parecidos a los de los cuásares más lejanos.

Gracias a las radiogalaxias

Las fuentes de radio potentes suelen originarse en galaxias elípticas, galaxias viejas según se acepta hoy. Se esperaba, por tanto, que las galaxias distantes que generan fuentes de radio fuesen el germen de las actuales elípticas. Sin embargo, tras un estudio más detenido, se observa que las radiogalaxias remotas presentan rasgos espectrales y morfológicos insólitos. Las nuevas imágenes del Hubble muestran estas particularidades, entre ellas unas configuraciones complejas y extrañas; parece como si esas potentes fuentes de radio pudieran alterar el aspecto y evolución de una galaxia. Algunas radiogalaxias bien podrían ser verdaderas galaxias



4. LAS RADIOGALAXIAS 3C265 (izquierda), 3C324 (centro) y 3C368 (derecha) manifiestan rasgos morfológicos y espectrales exclusivos. En estas imágenes compuestas, el Hubble captó las galaxias (emisiones rojizas) y el Radiointerferómetro de

Base muy Extensa levantó mapas de radio (líneas azules). Las poderosas fuentes de radio podrían alterar el aspecto de una galaxia y quizá su evolución. Algunas radiogalaxias podrían ser genuinas galaxias primigenias.

primigenias, pero debido a que nos parecen tan anormales, resulta difícil interpretar sus propiedades en la actualidad. Resulta dudoso, por tanto, que sean las progenitoras de las galaxias normales modernas.

Afortunadamente las galaxias son gregarias; donde se detecta una, acostumbra florecer más. Con frecuencia, las radiogalaxias viven en cúmulos, rodeadas por otras galaxias débiles, más corrientes. Por medio de los nuevos y poderosos instrumentos y técnicas de observación disponibles hemos podido detectar y estudiar esas prosaicas compañeras. Se ha podido localizar un conjunto muy rico de galaxias alrededor de radiofuentes situadas a una distancia remota, de $z = 2,3$, lo que nos lleva a un universo que contaba, como máximo, con un 30 % de su edad actual. Unos cuantos de esos cúmulos lejanos han sido objeto de escrutador examen por el Hubble, el Keck, un poderoso telescopio terrestre de 10 metros instalado en Hawai, y el ROSAT, un telescopio orbital de rayos X.

Hay alrededor de la fuente de radio 3C324, a $z = 1,2$, un cúmulo que comparte muchas características con otros cúmulos ricos que tenemos más a mano. Aloja gas caliente que emite un brillo intenso a las longitudes de onda de los rayos X. Este agrupamiento nos descubre que algunos cúmulos galácticos jóvenes poseían

una cantidad enorme de masa, lo que supone un grave apuro para determinadas teorías sobre la formación de las estructuras cósmicas. Además, el cúmulo que circunda a 3C324 contiene galaxias notablemente semejantes a las elípticas gigantes que pueblan los cúmulos más cercanos: presentan tonalidades rojas muy intensas y una morfología simple y esferoidal. Estas características indican que las estrellas de tales cúmulos galácticos lejanos habían ya alcanzado la madurez cuando emitieron la luz que estamos analizando ahora. Está claro que tuvieron que formarse mucho antes, a unos desplazamientos al rojo superiores. A ellos debe ahora extenderse la búsqueda del nacimiento de las estrellas.

Las propiedades de estas galaxias han centrado el debate sobre la edad del universo mismo. Las recientes investigaciones encaminadas a conocer la velocidad de la expansión cósmica, la constante de Hubble, sugieren que el universo podría ser más joven de lo que se pensaba. Algunas de las observaciones apuntan a que no habría cumplido los 10.000 millones de años de edad, aunque en nuestra Vía Láctea se han visto estrellas que, según se cree, superan de lejos esa edad. ¡Si son correctos tanto los datos de la constante de Hubble como las edades de las estrellas se produce, pues, una contradicción, un imposible! Si hay

que admitir que las galaxias elípticas cercanas a 3C234, con un corrimiento hacia el rojo de 1,2, ya contaban con edades avanzadas, los problemas se agudizan aún más.

La búsqueda de cuásares

En su inquisición de galaxias primigenias, algunos astrónomos han buscado orientación en los cuásares, los objetos más brillantes del universo. Cuando la luz procedente de un cuásar remoto viaja hacia la Tierra, atraviesa nubes de gas que imprimen marcas características en el espectro en la forma de líneas de absorción. La mayoría de estas líneas espectrales son débiles; las produjeron seguramente gases tenues sin vinculación con las galaxias normales. Sin embargo, en ocasiones, las líneas son anchas y profundas y absorben totalmente la radiación del cuásar a esa longitud de onda. La masa y tamaño que se les deducen a esos absorbentes indican que forman parte de los discos o halos que rodean a las galaxias. Estas intensas marcas de absorción se pueden encontrar fácilmente con corrimientos hacia el rojo de 3 y superiores; tuvieron, pues, que existir ya galaxias en el universo joven para producirlas.

Según la teoría, las galaxias jóvenes se gestaron a partir de nubes de hidrógeno, donde nacían sin cesar

multitud de estrellas calientes azules. A medida que generaciones de estas estrellas completan los ciclos de su vida breve, el proceso de fusión nuclear transforma el hidrógeno en elementos más pesados, que los astrónomos engloban bajo el nombre genérico de “metales”. Estas estrellas tempranas explotan más tarde constituidas en supernovas, expulsando los metales hacia las nubes de gas que las rodean. Este proceso ejerce un efecto de choque y compresión sobre las nubes de gas, y se desencadena el nacimiento de una nueva generación de estrellas. Según este modelo, el espectro característico de una protogalaxia estaría dominado por una luz estelar azul, con algunos indicios de metales. Además, podría exhibir una fuerte línea de emisión Lyman-alfa, producida por ese hidrógeno tan abundante, calentado por las estrellas azules.

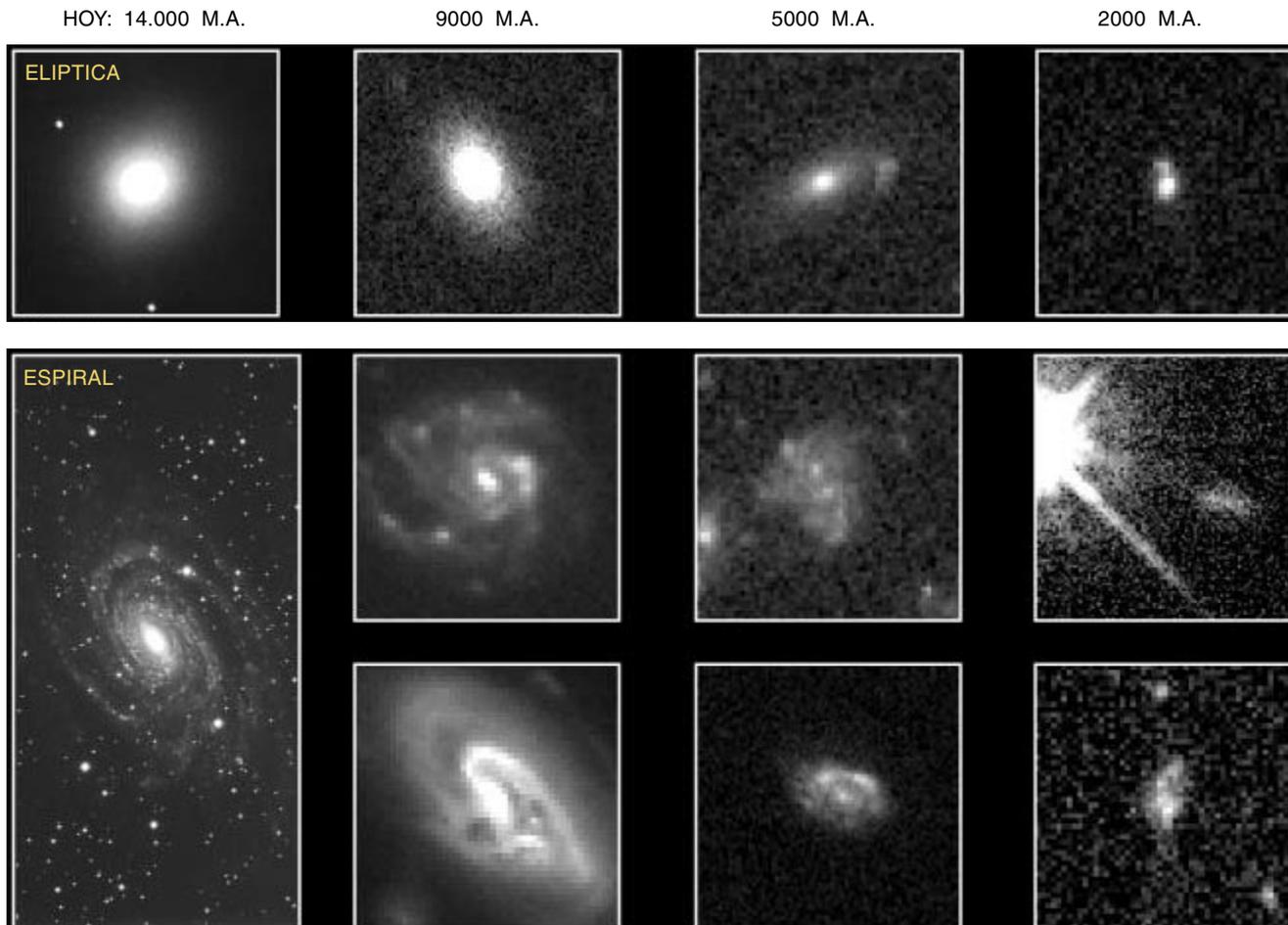
La búsqueda de la emisión Lyman-alfa procedente de las galaxias jóvenes con grandes corrimientos hacia el rojo se ha convertido en una industria de andar por casa, pero escasean los buenos ejemplos, quizá porque la radiación Lyman-alfa se

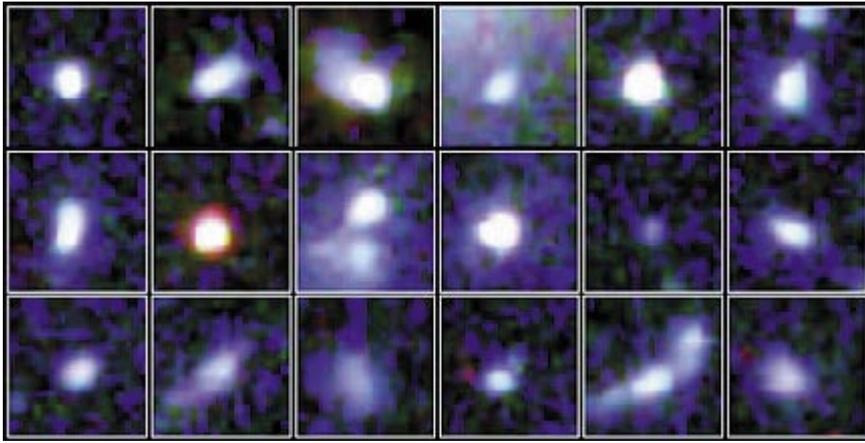
reabsorbe con facilidad, sobre todo en presencia de polvo. Los mecanismos que producen los metales en las estrellas calientes también generan polvo y, por tanto, las protogalaxias jóvenes podrían sofocar su propia emisión Lyman-alfa. Sin esta línea de emisión característica cuesta reconocer las galaxias jóvenes o medir sus corrimientos hacia el rojo. No obstante, se ha cosechado algún éxito utilizando filtros especiales diseñados para detectar la emisión Lyman-alfa del hidrógeno.

En el campo que circunda al cuásar 0000-263, llamado así por sus coordenadas, esta técnica condujo a un descubrimiento apasionante, apodado, no muy expresivamente, “G2”. Fue una de las primeras galaxias de apariencia normal que se

descubriera con un corrimiento hacia el rojo mayor de tres. Las mediciones espectroscópicas confirmaron su distancia, y observaciones posteriores llevaron a la identificación de varias otras galaxias en el mismo campo, con corrimientos hacia el rojo igualmente altos; una de ellas podría ser responsable de la absorción Lyman-alfa que se ve en el espectro del cuásar. Las imágenes profundas del Hubble proporcionaron la primera panorámica nítida de las galaxias cuando el universo contaba entre un 10 y un 25 por ciento de su edad actual. G2 también parece tener una forma esferoidal, como una versión azul y más joven de las elípticas encontradas en el cúmulo 3C324, mencionadas antes. Las progenitoras de las galaxias elípticas que obser-

5. LAS GALAXIAS HAN VENIDO MADURANDO con el curso evolutivo del universo. Actualmente (*columna inferior izquierda*) la mayoría de las galaxias son elípticas (*arriba*) o espirales (*abajo*). Las imágenes del Hubble, que muestran etapas cósmicas anteriores, cuando el universo contaba con una tercera parte de su edad actual, descubren objetos semejantes a las galaxias elípticas maduras. Su presencia sugiere que las galaxias de este tipo se formaron con rapidez tras la gran explosión. Por el contrario, las galaxias espirales (*fila central e inferior*) tienden a parecer cada vez menos regulares a medida que nos remontamos atrás en el tiempo; su formación y evolución fueron quizá más graduales.





6. LAS ACUMULACIONES SUBGALACTICAS AZULES DEBILES, situadas a unos 11.000 millones de años luz de la Tierra, podrían ser la materia prima a partir de la que se formaron las galaxias actuales. El Hubble encontró estos 18 objetos en la zona norte de la constelación de Hércules, cerca del Dragón. Se cree que estos pequeños cúmulos colisionaron y se fundieron unos con otros hasta generar las galaxias gigantes que observamos hoy.

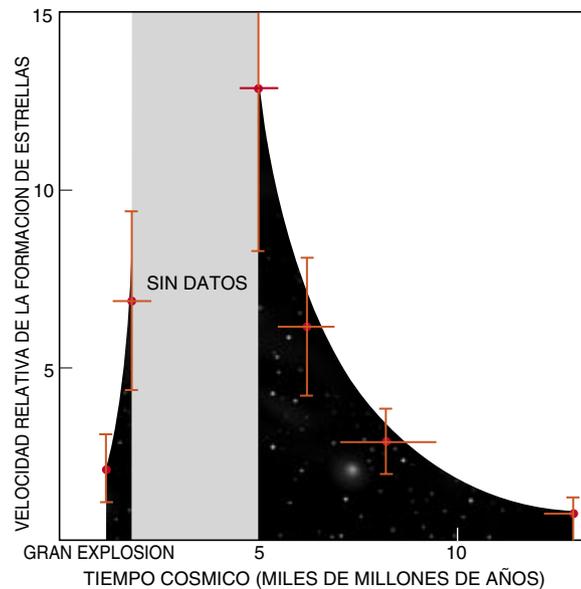
vamos en la actualidad bien podrían ser del tipo de la G2.

Explosión demográfica

Hace muy poco se ha descubierto, gracias a nuevas estrategias de búsqueda, un tesoro oculto de galaxias en los primeros tiempos del universo. El método más rentable no aprovecha la emisión Lyman-alfa, sino que se basa en un rasgo de color que comparten todas las galaxias lejanas. Aunque la causa vuelve a ser el gas de hidrógeno, el mecanismo difiere. El hidrógeno, omnipresente lo mismo en las galaxias que en el espacio intergaláctico, absorbe intensamente toda la luz ultravioleta más azul que cierta longitud de onda. El efecto que ello ejerce sobre la luz emitida por una galaxia joven es muy llamativo: su espectro se corta bruscamente; es una característica espectral cromática inconfundible. Vista a través de varios filtros, una galaxia distante se observará en las longitudes de onda de color rojo o verde, pero desaparecerá en las imágenes más azules.

Los nuevos trabajos ponen de manifiesto que estas galaxias “con apagones ultravioletas” son muy comunes en las imágenes astronómicas más profundas: aparecen por todo el firmamento y, en sólo dos años, los rastreos sistemáticos llevados a cabo han

identificado centenares de ellas. Sus colores azules sugieren, de nuevo, que en su interior se están formando estrellas a gran velocidad. Sin embargo, sólo algunas de estas galaxias muestran líneas de emisión Lyman-alfa intensas, lo que refuerza la idea de que el polvo podría extinguir esas emisiones con facilidad. La confirmación de los desplazamientos al rojo sin la aportación de la emisión Lyman-alfa es harto difícil. Pese a ello, los espectros tomados con el



7. LA FORMACION ESTELAR procedía con rapidez hace 12.000 millones de años, cuando el universo era joven, tal y como muestra este gráfico basado en las observaciones de las galaxias lejanas mediante el Hubble y telescopios terrestres. Hace unos 9000 millones de años el ritmo de la formación estelar comenzó a disminuir drásticamente.

telescopio Keck lo han conseguido para más de un centenar de galaxias con desplazamientos al rojo entre 2 y 3,8, de las cuales unas veinte (hasta la fecha) caen en el HDF.

Está claro que ya había en el universo una población importante de galaxias cuando éste sólo tenía unos miles de millones de años. Se ignora la relación entre tales objetos y las galaxias del estilo de la Vía Láctea. ¿Podrían estas esquivas galaxias primigenias acaso ser los antepasados directos de las espirales y elípticas que observamos en la actualidad? ¿Está su colapso generando su primera generación de estrellas?

Las imágenes del HDF muestran que muchos de estos objetos eran menores que nuestra Vía Láctea. En un buen número de ellos hay nudos y condensaciones brillantes que se extienden a lo largo de miles de años luz; estas estructuras se asemejan a las grandes regiones de formación estelar que encontramos en otras galaxias cercanas. Muchas tienen compañeras muy cercanas, lo que sugiere que se forman a partir de la fusión de galaxias pequeñas o incluso a partir de fragmentos subgalácticos.

De acuerdo con una de las teorías que se barajan, tales fragmentos, de una décima parte del tamaño de la Vía Láctea, se formaron en las etapas iniciales; además, la mayoría de las galaxias actuales resultarían de la fusión de estas acumulaciones menores. La densidad media del universo a un corrimiento hacia el rojo de $z = 3,5$ era 90 veces superior que la actual; la probabilidad de que se produjeran encuentros y fusiones resultaba, por tanto, mucho mayor. Las galaxias podrían haberse construido de forma gradual mediante estos procesos frecuentes de fusión, con la ayuda de la acumulación de materia debida a la atracción gravitatoria, hasta alcanzar los tamaños y masas que presentan ahora.

Combinando los datos tomados de las galaxias cercanas con los que salen de los rastreos de los grandes corrimientos hacia el rojo y del método de las galaxias con apagón ultravioleta se ha podido esbozar la historia global de la generación estelar a partir de los primeros miles de millones de años de la historia del universo. La imagen que se va perfilando



8. LAS LENTES GRAVITATORIAS han permitido ver el interior de las galaxias débiles. Los numerosos objetos azules, como anillos, que se aprecian en esta foto son imágenes múltiples de la misma galaxia distante. Las galaxias elípticas

y espirales amarillas apelonadas en el centro, llamadas 0024+1654 por su posición en el cielo, poseen un campo gravitatorio enorme, que, por doblar la luz, distorsiona, amplía o duplica las imágenes de los objetos situados detrás.

sugiere que el ritmo de la generación estelar aumentó mucho a medida que el universo se expandía durante el primer 20 o 30 por ciento de su edad actual. Llegó a su máximo, quizá cuando el corrimiento hacia el rojo estaba entre 2 y 1, época escasamente explorada por las observaciones. Desde entonces se ha producido un descenso gradual.

En la actualidad, si se toma el promedio de todas las galaxias, se forman estrellas a una velocidad menor de una décima parte de la máxima a la que llegaron a generarse. El universo, por tanto, parece haber entrado en una sosegada madurez. Este cuadro es incompleto y susceptible de revisión a medida que se efectúen nuevas observaciones, pero su mera existencia prueba los sorprendentes avances realizados en el campo de la cosmología observacional durante los últimos diez años.

Nuevas direcciones

¿Cómo estudiarán en el futuro los astrónomos el universo a valores de z muy elevados? Una de las posibilidades más apasionantes

consiste en sacar partido del fenómeno de las "lentes gravitatorias". Las grandes masas, la de un denso cúmulo galáctico, por ejemplo, pueden curvar, ampliar y distorsionar la imagen de los objetos que estén más allá; la de una galaxia débil situada tras un cúmulo así puede ampliarse y estirarse hasta crear un arco gigante. De esa forma se revelan detalles morfológicos que trascienden los límites de capacidad de los mejores telescopios.

Las lentes gravitatorias también hacen que las galaxias distantes aparezcan mucho más brillantes, lo que facilita su análisis espectroscópico. Al emplear estas lentes naturales para aumentar la resolución del Hubble, se han obtenido imágenes asombrosas de arcos gravitatorios, y se ha confirmado que algunos son galaxias intrínsecamente débiles con desplazamientos al rojo equiparables a los de la población con apagón ultravioleta de la que se ha hablado antes.

Asimismo, los telescopios e instrumentos actualmente en fase de construcción ampliarán los trabajos aquí descritos y se abordarán muestras mayores y corrimientos hacia el

rojo superiores. Se está preparando una batería de telescopios gigantes en montañas repartidas por el globo. En el mes de febrero del año en curso, los astronautas estadounidenses volvieron al Hubble para instalarle dos instrumentos que aumentarán su poder y abrirán nuevas ventanas al universo remoto. Ha rastreado hace poco el HDF el Observatorio Infrarrojo Espacial (ISO) europeo, un satélite que escudriña las grandes longitudes de onda en las que puede que las galaxias lejanas, ricas en polvo, emitan la mayor parte de su energía.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A SHORT HISTORY OF THE UNIVERSE. Joseph Silk. *Scientific American Library*, W. H. Freeman & Co., 1994.

FAINT BLUE GALAXIES. Richard S. Ellis en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 35, 1997. (En prensa).

Para visitar el Hubble Deep Field (STScI) en el WWW, consultar <http://www.stsci.edu/ftp/science/hdf/hdf.html>.

Cuando la aceleración cambió de signo

Las supernovas revelan el momento crucial
en que la expansión del universo pasó de decelerada a acelerada

Adam G. Riess y Michael S. Turner

Desde los tiempos de Isaac Newton hasta las postrimerías del siglo XX, la propiedad definitoria de la gravitación fue su naturaleza atractiva. La gravedad nos mantiene pegados al suelo. Frena y detiene el ascenso de una bala y mantiene a la Luna en órbita en torno a la Tierra. Impide que nuestro sistema solar se desmantele y aglutina enormes cúmulos de galaxias. Aunque la teoría einsteiniana de la relatividad general admite que la gravedad sea no sólo atractiva sino también repulsiva, casi todos los físicos han considerado que se trataba de una mera posibilidad teórica, irrelevante en el universo actual. Hasta hace poco, se tenía plena confianza en que la gravedad frenaría la expansión del cosmos.

Pero en 1998 se descubrió la faceta repulsiva de la gravedad. La observación detallada de supernovas remotas (las supernovas son explosiones estelares que durante un efímero período fulguran con un brillo de diez mil millones de soles) halló que lucían más débilmente de lo esperado. La luz de esas supernovas, que hicieron explosión hace miles de millones de años, hubo de viajar una distancia mayor de la pronosticada por la teoría. Es la explicación más verosímil. Y esta explicación, a su vez, llevó a la conclusión de que la expansión del universo se acelera, en vez de frenarse. Tan radical fue este descubrimiento, que no faltaron cosmólogos que propusieran que la pérdida de brillo de las supernovas debíase a otros efectos, como la interposición de polvo intergaláctico, que atenuaría la luz. Pero el estudio de supernovas todavía más remotas ha consolidado la tesis de la aceleración cósmica.

Ahora bien, ¿ha estado la expansión cósmica acelerándose durante toda la vida del universo, o se trata, por el contrario, de un acontecimiento reciente, de los

últimos cinco mil millones de años? La respuesta tiene profundas implicaciones, pues si se descubriera que la expansión del universo siempre se ha estado acelerando, habría que revisar por entero la evolución cósmica. Por el contrario, si como predicen los cosmólogos, la aceleración fuera un fenómeno reciente, tal vez cupiese determinar su causa (y quizás averiguar el destino del universo) estableciendo cuándo y cómo empezó la expansión del universo a ganar velocidad.

Batalla de titanes

Hace unos 75 años, Edwin Hubble descubrió la expansión del universo al advertir que otras galaxias se alejaban de la nuestra. Observó que las más distantes se separaban más deprisa que las cercanas, de acuerdo con la ahora llamada “ley de Hubble” (la velocidad relativa es igual a la distancia multiplicada por la constante de Hubble). Tomada en el contexto de la teoría de la relatividad general, la ley resulta de la expansión uniforme del espacio, mera dilatación o cambio de escala del tamaño del universo (*véase el recuadro* “Espacio en expansión”).

En la teoría de Einstein, la gravitación con carácter de fuerza atractiva sigue siendo válida, incluso a escala cósmica, para todas las formas conocidas de materia y energía. En consecuencia, la relatividad general pronostica que la expansión del universo debería ir haciéndose más lenta, a un ritmo determinado por la densidad de materia y energía que alberga. Pero la relatividad general también admite que pueda haber formas de energía con propiedades extrañas, que producirían gravitación repulsiva (*véase el recuadro* “¿Cómo es posible que haya repulsión gravitatoria?”). El descubrimiento de una expansión que en lugar de irse frenando se acelera parece haber revelado la presencia de “energía oscura”.

das de lo previsto, y por ende su luz sería más tenue.

A la busca de supernovas

Para sacar provecho de este fenómeno simple, hay que hallar objetos astronómicos que posean una luminosidad intrínseca conocida (la cantidad de radiación que producen por segundo) y puedan ser vistos en una parte del universo muy alejada. Una clase particular de supernovas, las del tipo Ia, resultan adecuadas a tal fin. Estas explosiones estelares son tan brillantes, que los telescopios terrestres pueden observarlas aun cuando se hallen a mitad del universo visible; el telescopio espacial Hubble, a mayor distancia todavía. La luminosidad intrínseca de las supernovas de tipo Ia se ha calibrado con precisión a lo largo de los últimos años; la distancia que hay hasta una de ellas puede, pues, determinarse por su brillo aparente.

El corrimiento hacia el rojo de la luz que nos llega de su galaxia da la velocidad de recesión de una supernova. La radiación procedente de objetos en recesión exhibe un desplazamiento hacia longitudes de onda más largas; por ejemplo, la longitud de onda de la luz emitida cuando el universo tenía la mitad del tamaño actual se duplicará y tornará más roja. Calibrando el corrimiento al rojo y el brillo aparente de un gran número de supernovas situadas a diferentes distancias resulta posible la creación de un registro de la expansión del universo.

Por desdicha, las supernovas de tipo Ia son raras; en una galaxia como la Vía Láctea sólo aparecen una vez cada dos o tres siglos, por término medio. La técnica utilizada por los cazadores de supernovas con-

siste en observar repetidamente una parcela del firmamento que contenga millares de galaxias para cotejar, luego, las imágenes obtenidas. Un punto de luz transitorio, que fuese visible en una imagen pero no en la anterior, podría ser una supernova. Los resultados que en 1998 dieron indicios de la aceleración cósmica se basaron en las observaciones de dos equipos; examinaban supernovas que detonaron cuando el tamaño del universo era unos dos tercios del actual, hará unos cinco mil millones de años.

No faltaron quienes se preguntasen si los equipos habían interpretado correctamente los datos de las supernovas. ¿No cabría la posibilidad de que otros efectos, sin relación con la aceleración cósmica, pudieran ser la causa de que el brillo de las supernovas fuese menor del esperado? También el polvo que llena el espacio intergaláctico podría haber debilitado la luz de supernovas. Cabía incluso la posibilidad de que las supernovas antiguas fueran más débiles desde su nacimiento: la composición química del universo habría sido entonces, por lo tanto, diferente de la actual y menor la abundancia de los elementos pesados producidos por las reacciones nucleares en las estrellas.

Felizmente, se dispone de cotejos que discriminan bien entre estas hipótesis. Si las supernovas ofreciesen un brillo menor del esperado por una causa astrofísica —una ubi- cua pantalla de polvo o una menor intensidad de las supernovas en el pasado—, el efecto atenuador debería acentuarse con el corrimiento al rojo. En cambio, si la atenuación fuese resultado de una aceleración cósmica reciente, subsiguiente a una era de deceleración, las supernovas

ocurridas en ésta parecerían más brillantes de lo que les correspondería según las otras hipótesis. Por consiguiente, la observación de supernovas que hicieran explosión cuando el tamaño del universo era de menos de dos tercios de su tamaño actual proporcionaría datos para saber por cuál de las hipótesis hay que inclinarse. (Es posible, claro está, que un efecto astrofísico desconocido imitara a la perfección los respectivos efectos de la aceleración y la deceleración, pero las explicaciones artificialmente ajustadas no suelen tener buena acogida.)

Una tarea ardua

Mas el hallazgo de estas supernovas antiguas y distantes es dificultoso. Una supernova de tipo Ia que detonó cuando el universo tenía un tamaño mitad del actual presenta un brillo aparente unas 10.000 millones de veces más débil que Sirio, la estrella más brillante del firmamento. Los telescopios instalados en tierra no pueden detectar fiablemente tales objetos, pero el telescopio Hubble, desde el espacio, sí.

Uno de los autores (Riess) anunció en 2001 que el telescopio espacial había obtenido por un feliz azar varias imágenes de una supernova de tipo Ia sumamente distante (SN 1997ff). En vista del corrimiento al rojo de la luz de esta explosión estelar, que ocurrió hace unos 10 mil millones de años, cuando el universo tenía la tercera parte de su tamaño actual, el objeto mostraba un brillo mucho mayor del que hubiera ofrecido de ser cierta la hipótesis del universo polvoriento. Este resultado constituyó la primera prueba directa de la época en que hubo deceleración. Sostuvimos los autores de este artículo que la observación de supernovas que exhibieran corrimientos al rojo muy elevados podría zanjar la cuestión y dataría con precisión la transición de la ralentización a la aceleración.

La Cámara Avanzada de Sondeo, un nuevo instrumento de obtención de imágenes instalado en el telescopio espacial en 2002, ha convertido al Hubble en un buscador de supernovas. Riess dirigió la obtención de una muestra, tan necesaria, de supernovas remotas de tipo Ia. Se basó para ello en el Sondeo

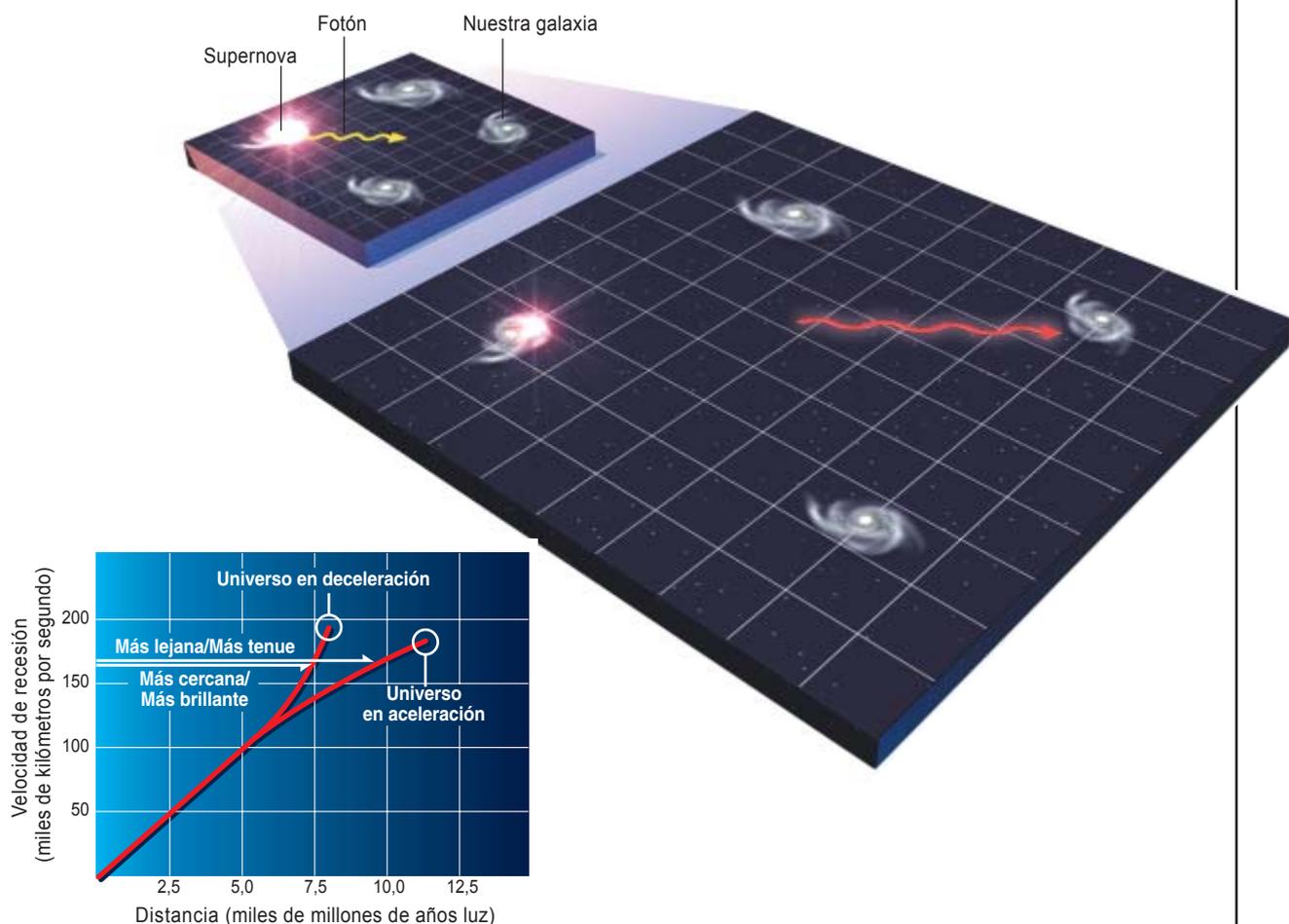
Resumen/Expansión cósmica

- En 1998, las observaciones de unas supernovas distantes indicaron que la expansión del universo se está acelerando. Desde aquella fecha, se han acumulado las pruebas que lo ratifican.
- El estudio de supernovas cada vez más remotas ha proporcionado pruebas de que la expansión se deceleró antes de acelerarse, tal y como pronosticaba la cosmología.
- La determinación del momento en que la expansión pasó de la deceleración a la aceleración podría revelar la naturaleza de la energía oscura y hacernos saber la suerte que finalmente correrá nuestro universo.

ESPACIO EN EXPANSION

SUPONGAMOS QUE UNA SUPERNOVA hiciera explosión en una galaxia muy alejada, cuando el universo tenía un tamaño mitad del actual (*izquierda*). Al llegar la radiación emitida por la explosión a nuestra galaxia, su longitud de onda se habría duplicado, desplazando la luz hacia el extremo rojo del espectro (*derecha*). (Las galaxias no se han dibujado a escala;

la distancia que las separa sería en realidad mucho mayor que la ilustrada.) Si la expansión del universo se estuviera decelerando, las supernovas se encontrarían más cercanas a nosotros y su brillo aparente sería mayor de lo esperado; si la expansión se acelerase, se hallarían a mayor distancia y las veríamos más tenues (*gráfico al pie*).



Profundo de los Orígenes por los Grandes Observatorios. El equipo halló seis que hicieron explosión cuando el universo tenía menos de la mitad de su tamaño actual (hace más de 7000 millones de años): junto con la SN 1977ff, se trata de las más antiguas supernovas de tipo Ia descubiertas. Confirman la existencia de un período primitivo de deceleración y sitúan el punto muerto de transición entre deceleración y aceleración hace unos 5000 millones de años. Este hallazgo concuerda con las expectativas teóricas y reafirma a los cosmólogos. La aceleración cósmica llegó por sorpresa

y supuso un nuevo problema que debía resolverse. Pero no nos ha obligado a remozar una parte demasiado grande de lo que ya creíamos saber sobre el universo.

Nuestro destino cósmico

Las supernovas arcaicas proporcionaron también nuevos indicios de la energía oscura, causa implícita de la aceleración cósmica. La candidata principal para explicar los efectos de la energía oscura es la energía del vacío, matemáticamente equivalente a la constante cosmológica que Einstein concibió en 1917. Dado que Einstein consideró que su mo-

delo de universo debía ser estático, "apañó las cuentas" con ese factor cosmológico que compensaba la gravitación atractiva de la materia. Para lograr ese estatismo, la densidad asociada a la constante tenía que valer la mitad de la densidad de materia. Mas para producir la aceleración observada del universo, ha de duplicarla.

¿De dónde podría venir esta densidad energética? El principio de incertidumbre de la mecánica cuántica exige que el vacío esté lleno de partículas que viven merced a un "préstamo" de tiempo y de energía, cobran existencia sin cesar y

¿Cómo es posible que haya repulsión gravitatoria?

EN LA TEORÍA DE NEWTON, la gravedad es siempre atractiva y su intensidad, proporcional a la masa del objeto atrayente. Según la teoría de Einstein, la intensidad de la fuerza de atracción ejercida por un objeto depende también de su composición. En física, la composición de una sustancia se caracteriza por su presión interna. La gravedad de un objeto es proporcional a la suma de su densidad de energía y el triple de su presión interna. El Sol, por ejemplo, es una esfera de gas caliente con presión positiva (dirigida hacia el exterior); dado que la presión del gas se eleva con la temperatura, la atracción gravitatoria del Sol resulta un poco mayor que la de una bola de materia fría de masa equivalente. Por otra parte, un gas de fotones tiene una presión igual a la tercera parte de su densidad energética, por lo que su atracción gravitatoria doblaría la de una masa equivalente de materia fría.

La energía oscura se caracteriza por su presión negativa. (Los objetos elásticos —una lámina de goma estirada, por ejemplo— tienen también presión negativa, es decir, hacia su interior). Si su presión alcanza un valor inferior a $-1/3$ de la densidad de energía, la suma de la energía y tres veces la presión será negativa: se tendrá una fuerza gravitatoria repulsiva. La presión del vacío cuántico vale -1 veces su densidad de energía: la gravedad de un vacío es muy repulsiva. Otras formas hipotéticas de energía oscura tienen una presión que se encuentra entre $-1/3$ y -1 veces su densidad de energía. Se ha recurrido a algunos de estos tipos de energía con el fin de explicar la época inflacionaria, un período de aceleración cósmica muy temprano. Otros tipos podrían corresponder a la energía oscura que alimenta la aceleración observada hoy.

desaparecen casi en el acto. Pero cuando se calcula la densidad de energía asociada al vacío cuántico, se obtienen valores demasiado abultados: sobran 55 órdenes de magnitud. Si el valor de la energía del vacío fuera tal, toda la materia del universo habría salido disparada instantáneamente y las galaxias no hubieran llegado a formarse jamás.

Se ha dicho que no hay discrepancia más embarazosa en toda la física teórica. Pero tal vez suponga una gran oportunidad. Aunque es posible que nuevas tentativas de estimación de la densidad de energía del vacío produzcan la cantidad exacta que explica la aceleración cósmica, muchos están convencidos de que un cálculo correcto, que incorpore un nuevo principio de simetría, llevará a la conclusión de que la energía asociada con el vacío cuántico es cero (la nada cósmica no pesaría). En tal caso, tendría que intervenir otra causa para que la expansión del universo se esté acelerando.

Se han propuesto múltiples ideas, que van de la influencia de dimensiones extra, ocultas, hasta la energía asociada con un nuevo campo de la naturaleza, a veces llamado “quin-

taesencia” [véase “Salir de la oscuridad”, por George Dvali, *en este mismo número*]. En general, estas hipótesis postulan una densidad de energía oscura que no es constante: por lo común, decrece conforme se expande el universo (pero también se ha propuesto que aumenta). Tal vez la idea más radical consista en que la energía oscura no existe en absoluto y que, por lo tanto, es preciso modificar la teoría de la gravitación de Einstein.

Dado que la forma en que varía la energía oscura depende del modelo teórico, cada teoría pronostica un momento diferente para el punto de transición en que el universo pasó de la ralentización a la aceleración. Si la densidad de energía oscura disminuyera al expandirse el universo, el punto de inversión se anticiparía en el tiempo al correspondiente a un modelo que supusiera una densidad constante de la energía oscura. Incluso los modelos teóricos que modifican la gravedad dejan su impronta en el tiempo en que se produce el cambio. Los últimos resultados sobre supernovas concuerdan con las teorías que postulan una densidad constante de

energía oscura, pero también son compatibles con la mayoría de los modelos que suponen su variabilidad. Tan sólo quedan descartadas aquellas teorías que estipulan grandes variaciones en la densidad de la energía oscura.

Investigación abierta

Con el fin de cerrar el abanico de posibilidades teóricas, el telescopio espacial Hubble continúa recogiendo datos de supernovas que pudieran precisar los detalles de la fase de transición. A pesar de que el telescopio espacial sigue siendo el único medio para calar en la historia antigua de la expansión cósmica, hay más de media docena de programas que persiguen medir, gracias a instrumentos instalados en tierra, la aceleración cósmica reciente con precisión suficiente para descubrir la física de la energía oscura.

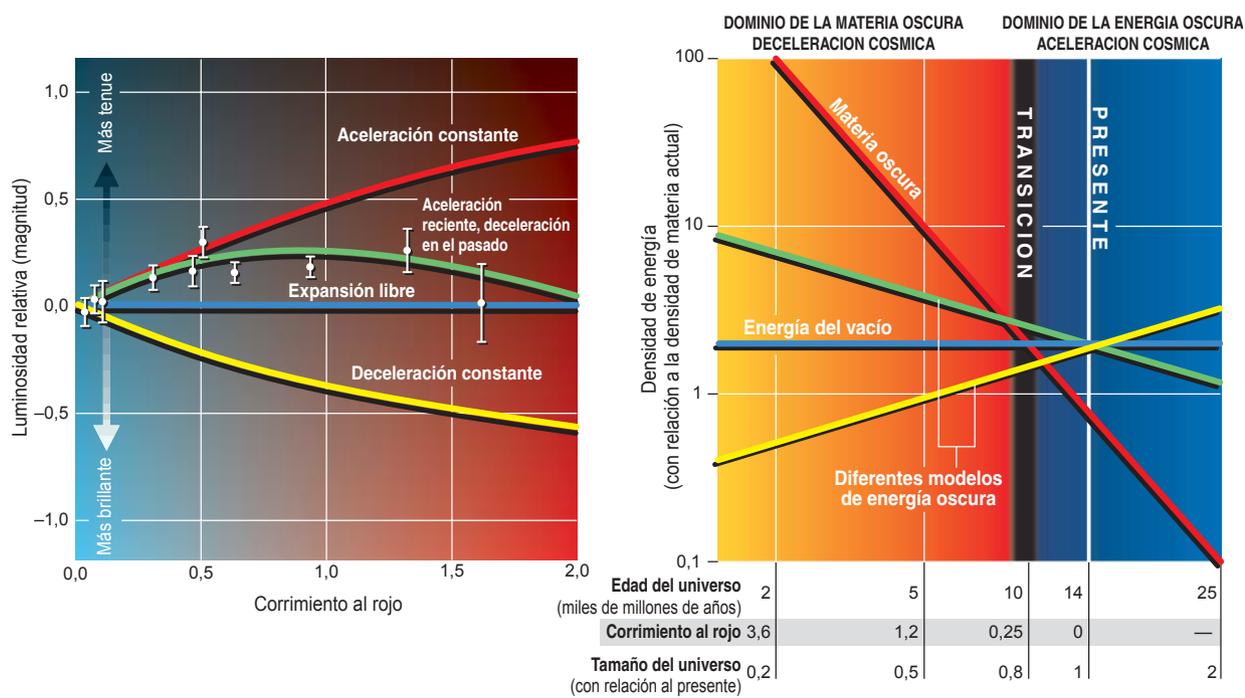
El proyecto más ambicioso es la Misión Conjunta de la Energía Oscura, del Departamento de Energía de los EE.UU. y la NASA. Utilizaría un telescopio espacial de gran angular, con un espejo de dos metros, dedicado al descubrimiento y medición precisa de millares de supernovas de tipo Ia. Los cazadores de supernovas confían en tener en marcha el instrumento en los primeros años del próximo decenio; hasta entonces, para detectar las explosiones estelares más distantes dependerán del telescopio Hubble. [Los planes anunciados por el presidente Bush de reanudar la exploración de la Luna con misiones tripuladas han modificado la programación de la NASA. Se ha retirado la misión conjunta de sus últimas previsiones presupuestarias quinquenales. Según fuentes oficiales, no debe entenderse como una suspensión definitiva. Parece, eso sí, que el departamento de energía sigue interesado. Por otra parte, la NASA ha anunciado también la suspensión de la Misión de Servicio IV, que debería haber efectuado trabajos de mantenimiento en el Hubble en 2006. Se esperaba que el telescopio espacial siguiese funcionando hasta 2010; sin esas reparaciones, no es probable que dure tanto.]

La solución del misterio de la aceleración cósmica nos revelará también el destino de nuestro universo.

EL PUNTO DE TRANSICION

OBSERVACIONES RECIENTES de supernovas muy distantes indican que la expansión del universo se estuvo decelerando antes de que empezara a acelerarse (*gráfico de la izquierda*). Se ha descubierto que las supernovas con corrimientos al rojo mayores de 0,6 eran más brillantes de lo que sería de esperar si el universo se hubiera estado acelerando siempre o si el polvo intergaláctico hubiese atenuando su luz. (Cada punto corresponde a un pro-

medio de supernovas con un corrimiento al rojo parecido.) Los resultados revelan que el punto de transición entre la deceleración y la aceleración debió acontecer hace unos 5000 millones de años. Si se lograra establecer con mayor precisión este punto de transición quizá se podría entender de qué forma ha evolucionado la energía oscura a lo largo del tiempo y quién sabe si descubrir su naturaleza (*a la derecha*).



Si la energía oscura es constante, o si aumenta con el tiempo, dentro de unos cien mil millones de años todas las galaxias, salvo unas pocas, tendrán un corrimiento al rojo demasiado grande para poder ser vistas. Pero si la densidad de energía oscura disminuye y la materia vuelve a dominar, nuestro horizonte cósmico crecerá y revelará una parte mayor del universo. También son posibles futuros más extremos (y letales). Si la energía oscura se eleva, en lugar de decaer, el universo acabará experimentando una “hiperaceleración” que haría trizas sucesivamente galaxias, sistemas solares, planetas y núcleos atómicos, en ese orden. También podría suceder que el universo se volviese a colapsar si la energía oscura llegara a ser negativa. La única forma de pronosticar el futuro cósmico es averiguar la naturaleza de la energía oscura.

Los autores

Adam G. Riess y **Michael S. Turner** son figuras destacadas en la investigación de la historia de la expansión del universo. Riess es astrónomo asociado del Instituto Científico del Telescopio Espacial y profesor adjunto asociado de física y de astronomía de la Universidad Johns Hopkins. Fue el autor principal del estudio publicado por el Equipo de Supernovas de z elevado en 1998 que anunció el descubrimiento de un universo en aceleración. Turner, que ostenta la cátedra Rauner de la Universidad de Chicago, desempeña el cargo de director ayudante de ciencias físico-matemáticas de la Fundación Nacional de Ciencias de los EE.UU. Un artículo suyo de 1995, en coautoría con Lawrence M. Krauss, pronosticó la aceleración cósmica. Se le debe la expresión “energía oscura”.

Bibliografía complementaria

- DO TYPE IA SUPERNOVAE PROVIDE DIRECT EVIDENCE FOR PAST DECELERATION IN THE UNIVERSE? Michael S. Turner y Adam G. Riess en *Astrophysical Journal*, vol. 569, parte 1, páginas 18-22; 10 de abril de 2002.
- THE EXTRAVAGANT UNIVERSE: EXPLODING STARS, DARK ENERGY AND THE ACCELERATING COSMOS. Robert P. Kirshner. Princeton University Press, 2002.
- TYPE IA SUPERNOVA DISCOVERIES AT $z > 1$ FROM THE HUBBLE SPACE TELESCOPE. Adam G. Riess *et al.* Disponible en es.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0402/0402512.pdf.
- IS COSMIC SPEED-UP DUE TO NEW GRAVITATIONAL PHYSICS? Sean M. Carroll, Vikram Duvvuri, Mark Trodden y Michael S. Turner en *Physical Review Letters* (en prensa).

Accede a la HEMEROTECA DIGITAL

TODAS LAS REVISTAS DESDE 1990



Suscríbete y accede a todos los artículos

PAPEL

Elige la modalidad mixta y recibirás también las revistas impresas correspondientes al período de suscripción

ARCHIVO

Encuentra toda la información sobre el desarrollo de la ciencia y la tecnología durante los últimos 25 años

DIGITAL

Accede desde cualquier ordenador o tableta al PDF de más de 8000 artículos elaborados por expertos

www.investigacionyciencia.es

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA