



COLECCIÓN **DIVULGACIÓN**

# Un viaje al Cosmos

en 52 semanas

ANTXÓN ALBERDI  
SILBIA LÓPEZ DE LACALLE  
COORDINADORES

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

# Un viaje al Cosmos

en 52 semanas



COLECCIÓN DIVULGACIÓN

# Un viaje al Cosmos en 52 semanas

Coordinado por:

Antxón Alberdi  
Silbia López de Lacalle



CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

Madrid, 2007

Con la COLECCIÓN DIVULGACIÓN, el CSIC cumple uno de sus principales objetivos: proveer de materiales rigurosos y divulgativos a un amplio sector de la sociedad. Los temas que forman la colección responden a la demanda de información de los ciudadanos sobre los temas que más les afectan: salud, medio ambiente, transformaciones tecnológicas y sociales... La colección está elaborada en un lenguaje asequible, y cada volumen está coordinado por destacados especialistas de las materias abordadas.

#### COMITÉ EDITORIAL

Pilar Tígeras Sánchez, directora  
Susana Asensio Llamas, secretaria  
Miguel Ángel Puig-Samper Mulero  
Alfonso Navas Sánchez  
Gonzalo Nieto Feliner  
Javier Martínez de Salazar  
Jaime Pérez del Val  
Rafael Martínez Cáceres  
Carmen Guerrero Martínez

Catálogo general de publicaciones oficiales  
<http://www.060.es>



MINISTERIO  
DE EDUCACIÓN  
Y CIENCIA



© CSIC, 2007

© Antxón Alberdi (coord.), Olga Muñoz (coord.), Silbia López de Lacalle, Rafael Rodrigo, José Carlos del Toro, José Luis Ortiz, Pablo Santos, Fernando Moreno, José Manuel Abad, José Juan López, Luisa Lara, Pedro Gutiérrez, Pedro Amado, Guillem Anglada, Antonio Delgado, Martín Guerrero, Miguel Ángel Pérez-Torres, Rafael Garrido, Javier Gorosábel, Isabel Márquez, Emilio J. Alfaro, Lourdes Verdes-Montenegro, Lucas Lara, Emilio J. García, José Luis Jaramillo, Carlos Barceló, José Antonio Jiménez, Narciso Benítez, Luis Costillo y José María Castro, 2007

Reservados todos los derechos por la legislación en materia de Propiedad Intelectual. Ni la totalidad ni parte de este libro, incluido el diseño de la cubierta puede reproducirse, almacenarse o transmitirse en manera alguna por medio ya sea electrónico, químico, mecánico, óptico, informático, de grabación o de fotocopia, sin permiso previo por escrito de la editorial.

Las noticias, asertos y opiniones contenidos en esta obra son de la exclusiva responsabilidad del autor o autores. La editorial, por su parte, sólo se hace responsable del interés científico de sus publicaciones.

ISBN: 978-84-00-085-35-3

NIPO: 653-07-037-6

Depósito legal: M-24.154-2007

Edición a cargo de Cyan, Proyectos y Producciones Editoriales, S.A.

# Índice

Agradecimientos .....	13
Autores .....	15
<b>Presentación .....</b>	<b>17</b>
<b>1. Introducción. Un viaje por el Cosmos a la velocidad de la luz . .</b>	<b>19</b>
Antxón Alberdi, Olga Muñoz y Silbia López de Lacalle	
<b>2. El Sistema Solar: nuestro hogar en el Universo .....</b>	<b>22</b>
Silbia López de Lacalle y Rafael Rodrigo	
<b>3. El Sol: la estrella más cercana .....</b>	<b>26</b>
Silbia López de Lacalle y José Carlos del Toro	
<b>4. La cara turbulenta del Sol .....</b>	<b>29</b>
Silbia López de Lacalle	

5. Mercurio: un planeta por descubrir .....	33
Silbia López de Lacalle y Rafael Rodrigo	
6. Venus: a través de las nubes .....	37
Silbia López de Lacalle y José Luis Ortiz	
7. El equilibrio afortunado .....	41
Silbia López de Lacalle y José Luis Ortiz	
8. La Luna, ¿nuestra próxima casa? .....	46
Pablo Santos	
9. Marte. El planeta rojo .....	51
Silbia López de Lacalle	
10. Marte: la senda del agua .....	55
Silbia López de Lacalle	
11. Júpiter. El gigante magnético .....	60
Fernando Moreno y José Manuel Abad	
12. Júpiter. Un sistema solar en miniatura .....	65
Olga Muñoz	
13. El coloso más ligero .....	69
José Luis Ortiz y José Manuel Abad	
14. El sistema extravagante .....	73
José Juan López y Silbia López de Lacalle	
15. Un mundo alrededor de Saturno .....	77
José Juan López y Silbia López de Lacalle	
16. El planeta tumbado .....	81
Fernando Moreno y José Manuel Abad	

17. Las lunas sombrías . . . . .	85
Fernando Moreno y José Manuel Abad	
18. El gigante helado . . . . .	89
Luisa Lara y Silbia López de Lacalle	
19. El “planeta” del astrónomo . . . . .	93
Luisa Lara y Silbia López de Lacalle	
20. Más allá de Neptuno . . . . .	98
Pablo Santos	
21. Radiantes bolas de nieve . . . . .	102
Pedro Gutiérrez y Silbia López de Lacalle	
22. El planeta que no fue . . . . .	106
Pedro Gutiérrez y Silbia López de Lacalle	
23. Las estrellas, por grupos y colores . . . . .	110
Silbia López de Lacalle y Pedro Amado	
24. Mundos remotos . . . . .	114
Silbia López de Lacalle	
25. El nacimiento de las estrellas . . . . .	117
Guillem Anglada y Silbia López de Lacalle	
26. La evolución de las estrellas . . . . .	121
Silbia López de Lacalle y Antonio Delgado	
27. Soles moribundos . . . . .	125
Martín Guerrero y Silbia López de Lacalle	
28. La muerte explosiva . . . . .	128
Silbia López de Lacalle y Miguel Ángel Pérez-Torres	

29. Los restos de las supernovas .....	132
Antxón Alberdi y Silbia López de Lacalle	
30. El latido de las estrellas .....	136
Rafael Garrido y Silbia López de Lacalle	
31. Entre las estrellas .....	140
Silbia López de Lacalle	
32. Estadillos cósmicos de rayos gamma .....	144
Javier Gorosábel y Silbia López de Lacalle	
33. Llovizna cósmica .....	148
Silbia López de Lacalle	
34. El zoo de las galaxias .....	152
Isabel Márquez y Silbia López de Lacalle	
35. La historia de nuestra Galaxia .....	156
Emilio J. Alfaro	
36. Galaxias en colisión .....	160
Lourdes Verdes-Montenegro y Silbia López de Lacalle	
37. La intensa actividad galáctica .....	165
Silbia López de Lacalle	
38. La unificación de las galaxias .....	169
Lucas Lara y Silbia López de Lacalle	
39. Filamentos y vacíos .....	173
Silbia López de Lacalle	
40. Las leyes del Universo .....	176
Emilio J. García	



41. El Universo en expansión . . . . .	180
José Luis Jaramillo	
42. Los fósiles del Big Bang . . . . .	184
Silbia López de Lacalle	
43. El Big Bang: problemas y soluciones . . . . .	189
Carlos Barceló	
44. El futuro del Universo . . . . .	193
José Antonio Jiménez y Emilio J. García	
45. Más allá de la Relatividad . . . . .	197
Carlos Barceló	
46. La edad del Universo . . . . .	201
Emilio J. Alfaro y Silbia López de Lacalle	
47. El germen de las galaxias . . . . .	205
Narciso Benítez	
48. A tientas por el Universo . . . . .	209
Silbia López de Lacalle	
49. El gran ojo del astrónomo . . . . .	213
Luis Costillo	
50. Un desafío tecnológico . . . . .	219
José María Castro	
51. El atractivo multimedia de la astrofísica . . . . .	224
Lourdes Verdes-Montenegro, Rafael Garrido y Emilio J. García	
52. ¿Han pasado 13.700 millones de años o 52 semanas? . . . . .	228
Antxón Alberdi y Silbia López de Lacalle	

# Agradecimientos

Este volumen no hubiera nacido sin la iniciativa de Rafael Rodrigo, actual vicepresidente del CSIC y entonces director del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA, CSIC), y de Ramón Ramos, director del diario *Granada Hoy*, perteneciente al Grupo Editorial Joly. Ellos concibieron la posibilidad de iniciar una colaboración semanal en las páginas de cultura del periódico, y qué mejor comienzo que realizar un viaje por el Universo, desde lo más cercano hasta sus confines. Agradecemos la colaboración de los científicos y técnicos del IAA, que estuvieron dispuestos a aportar datos e ideas y a discutir sobre los contenidos de cada capítulo. Agradecemos la colaboración de Magdalena Trillo e Isidoro García, periodistas de la sección de Cultura de *Granada Hoy*, que actuaron como contacto dentro del periódico y que estuvieron siempre atentos a posibles mejoras en la redacción y diagramación de los artículos. Agradecemos la colaboración del Grupo Editorial Joly, que extendió la publicación de esta serie de artículos a su cabecera en Málaga (*Málaga Hoy*). Nuestro agradecimiento final es para Pilar Tígeras y el Área de Cultura Científica del CSIC, que han posibilitado la difusión de este volumen a través de su colección Divulgación.

# Autores

**E**n este volumen han participado los siguientes miembros del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA, CSIC):

- Antxón Alberdi (coord.)
- Silbia López de Lacalle (coord.)
- Olga Muñoz
- Rafael Rodrigo
- José Carlos del Toro
- José Luis Ortiz
- Pablo Santos
- Fernando Moreno
- José Manuel Abad
- José Juan López
- Luisa Lara
- Pedro Gutiérrez
- Pedro Amado
- Guillem Anglada
- Antonio Delgado
- Martín Guerrero
- Miguel Ángel Pérez-Torres
- Rafael Garrido
- Javier Gorosábel
- Isabel Márquez
- Emilio J. Alfaro
- Lourdes Verdes-Montenegro
- Lucas Lara
- Emilio J. García
- José Luis Jaramillo
- Carlos Barceló
- José Antonio Jiménez
- Narciso Benítez
- Luis Postillo
- José María Castro

# Presentación

**E**n marzo de 2004 surgió la posibilidad de establecer una colaboración única entre el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA, CSIC) y el diario *Granada Hoy*. Se planteó como una serie de artículos que dibujaran un recorrido por el Universo, desde lo más cercano a lo más distante, que se extendiera a lo largo de todo un año y apareciera puntualmente todos los miércoles. Así surgió “Un viaje por el Cosmos en 52 semanas”, serie en la que participó un nutrido grupo de científicos del IAA y que ahora el CSIC recoge y edita en forma de libro.

La serie nació con la vocación de constituir una herramienta útil y actualizada para los interesados en la astronomía, y buscó combinar el conocimiento básico con los resultados científicos más novedosos. Por ello, del mismo modo que la astrofísica constituye una ciencia viva y en permanente avance, esta serie requeriría una actualización constante: así, en apenas tres años nos encontramos con un Plutón que ya no es considerado planeta; con nuevos datos sobre la posible presencia de agua en Marte; con géiseres en Encelado, un pequeño satélite de Saturno que se creía geológicamente inactivo; con una miríada de nuevos planetas girando alrededor de otras estrellas; con, quizá, un nuevo tipo de agujero negro y fascinantes resultados sobre las explosiones cortas de rayos gamma, uno de los eventos más energéticos del Universo y, hasta hace poco, también uno de los más desconocidos. Por no hablar de las misiones: muchas de las anticipadas en esta

serie ya están en el espacio enviando datos, como COROT, que “abrió sus ojos” el pasado enero; otras, como BepiColombo, ya se encuentran en su fase de desarrollo instrumental.

Una larga lista de novedades que exigirían un nuevo tomo de este viaje por el Cosmos. Queda pendiente.

ANTXÓN ALBERDI  
SILBIA LÓPEZ DE LACALLE

## 1. Introducción

# Un viaje por el Cosmos a la velocidad de la luz

Juan Sebastián Elcano completó la primera vuelta al mundo el 6 de septiembre de 1522, tras recorrer 78.000 kilómetros (aproximadamente dos veces el diámetro ecuatorial de la Tierra) en un devastador viaje de casi tres años: de los 240 hombres que partieron distribuidos en cinco naves, regresaron tan sólo dieciocho a bordo de la nave Victoria, la única superviviente. Entre los fallecidos se encontraba el capitán de la expedición, Fernando de Magallanes, a quien Elcano tomó el relevo. Durante el viaje se sucedieron intentos de sublevación, combates con indígenas, travesías sin agua ni provisiones frescas y con la tripulación afectada por el escorbuto. Cuando Elcano arribó al Puerto de Santa María, su último destino, pudo presumir de haber cumplido el objetivo inicial de su viaje al regresar con la nave

cargada de especias y, además, se convirtió en el estandarte del aventurero y el descubridor.

Siguiendo su legado, el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA) y el diario *Granada Hoy* proponen un viaje apasionante por el Cosmos. Será una travesía más cómoda y, por supuesto, nada cruenta. Es un viaje más parecido al que emprendió Phileas Fogg en su *Vuelta al Mundo en 80 días* (Julio Verne), con la audacia y la inteligencia como armas para superar las fronteras. El riesgo se limitará a adentrarse en el conocimiento científico: seguiremos un recorrido por el Universo, desde lo más cercano (la Tierra y el Sistema Solar) hasta sus confines.

A lo largo de este viaje por el Cosmos lidiaremos con dos conceptos fundamentales: la distancia y la luz.



Figura 1.1. Nuestro pequeño Sistema Solar, que se encuentra en uno de los brazos espirales de la Vía Láctea, es uno de los 100.000 millones posibles de la galaxia. La Vía Láctea, por su parte, forma parte de un pequeño cúmulo de unas treinta galaxias, denominado Grupo Local, que se extiende a lo largo de unos diez millones de años luz y que, además, se incluye en el Supercúmulo de Virgo, cuya visión se pierde en la estructura a gran escala del Universo.

Nos olvidaremos del kilómetro, tan útil en tierra, y lo cambiaremos por el año luz y la Unidad Astronómica; del mismo modo, nos familiarizaremos con tipos de luz que el ojo humano es incapaz de captar pero que resultan de gran interés en astrofísica, como el infrarrojo o los rayos X.

## Midiendo el infinito

Existe un símil muy utilizado para facilitar la comprensión de las distancias astronómicas: “si el Sol fuera una naranja, la Tierra sería una cabeza de alfiler que gira a su alrededor a una distancia de unos 15 metros; Júpiter sería una cereza situada a 77 metros de la naranja; Plutón un granito de arena a 580 metros y la estrella más cercana, Próxima Centauri, sería otra naranja situada a unos 4.000 kilómetros”. Aunque este tipo de comparación resulta útil para este caso, si nos alejamos de la vecindad solar resulta imprescindible contar con otras unidades de medida. La primera, muy sencilla aunque algo limitada, es la Unidad Astronómica (UA): se trata de la distancia que separa la Tierra del Sol, calculada en 150 millones de kilómetros y fácilmente aplicable a otros planetas; así, Mercurio se encuentra a un tercio de UA y Plutón a 40 UAs. Sin embargo, más allá de los

confines del Sistema Solar tendremos que emplear el año luz, o distancia que recorre la luz (a 300.000 km/seg) en un año, ya que, si bien la luz que parte del Sol tarda sólo ocho minutos en alcanzar la Tierra, la distancia a la estrella más cercana es tan grande que la luz tarda 4,4 años en llegar hasta nosotros. Con estas pistas, los profanos ya podemos comprender mejor el cuadro general, que vemos una de las imágenes.

## La luz que no vemos

Por otra parte, dada la imposibilidad de estudiar *in situ* los cuerpos celestes, la luz (rigurosamente hablando radiación electromagnética) que recibimos de ellos constituye, en la inmensa mayoría de los casos, nuestra única herramienta para obtener información y conocer su estructura, composición o evolución temporal. Para extraer la máxima información de la luz realizamos observaciones en distintas regiones del espectro electromagnético, que agrupa los distintos tipos de radiación y permite obtener información diferente y totalmente complementaria del mismo objeto. Es decir, los objetos que pueblan el Universo pueden aparecer totalmente diferentes dependiendo de las “gafas” que estemos utilizando para mirarlos. En la figura 1.2 tenemos un ejemplo.



Figura 1.2. La galaxia activa Centaurus A o NGC 5128: la imagen del óptico muestra la nube de polvo que cubre la galaxia, mientras que en el infrarrojo podemos distinguir las estrellas que hay tras dicha nube. Las imágenes de radio y rayos X muestran un chorro de partículas de alta energía que se originan en el núcleo de la galaxia, posiblemente en un agujero negro supermasivo. Dependiendo del rango espectral que estemos utilizando en nuestras observaciones podremos estudiar fenómenos muy diferentes.

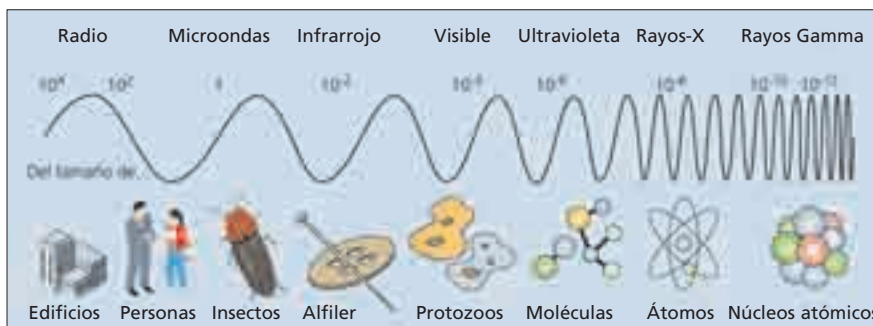


Figura 1.3. La radiación electromagnética se puede representar mediante una onda que transporta energía entre dos puntos del espacio moviéndose a 300.000 km/s. Cuanto mayor sea la longitud de onda, o la distancia entre dos de sus máximos consecutivos, menor será la energía que transporta, y viceversa.



## 2. El Sistema Solar: nuestro hogar en el Universo

**C**ómo y cuándo se formó el Sistema Solar, por qué los planetas son tan distintos unos de otros y qué características comparten como integrantes de un mismo sistema

El Sistema Solar constituye una peculiar mezcla de cuerpos: una estrella mediana, el Sol, nueve planetas (algunos terrestres y otros gaseosos), más de cien satélites conocidos, millones de asteroides, trillones de cometas y viento solar (un flujo de partículas eléctricamente cargadas procedentes del Sol que invade el espacio interplanetario). A lo largo de este viaje por el Universo veremos las características individuales de los cuerpos que forman el Sistema Solar, por lo que hoy quizá resulte más adecuado revisar sus características como sistema; para

ello resulta imprescindible acudir a un concepto básico, la gravedad, que constituye el ingrediente principal en todos los sistemas que hallamos en el Universo, desde un sistema planetario múltiple a un sistema estelar binario o incluso una galaxia. La gravedad es la fuerza de atracción de todos los cuerpos materiales, proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas. Se trata de la fuerza que nos mantiene pegados al suelo y la que provoca que las cosas se caigan y, en el Sistema Solar, provoca que el Sol (el cuerpo más prominente, que abarca el 98% de la masa total de éste), se presente como el elemento dominante alrededor del que giran todos los demás cuerpos. Éstos, cuyas órbitas se sitúan en un plano denominado eclíptica, siguen el

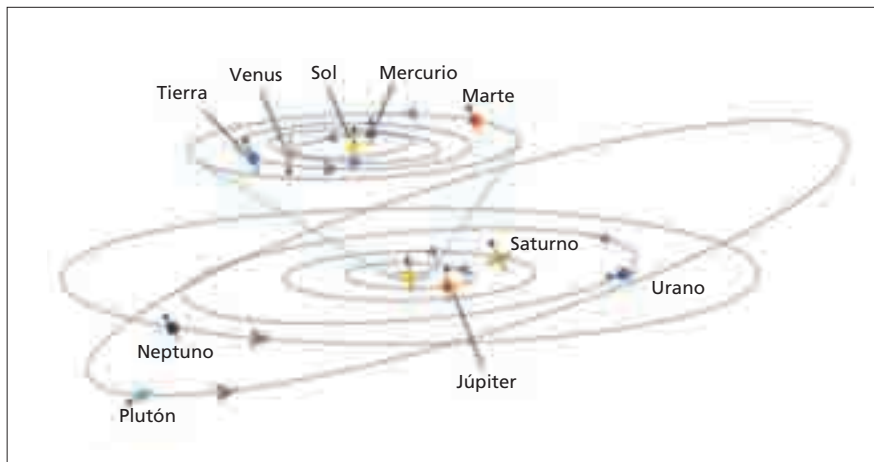


Figura 2.1. Órbitas planetarias. Fuente: Addyson Wesley.

sentido de rotación del Sol sobre su eje (contrario a las agujas del reloj), tanto en su movimiento de rotación (sobre su propio eje) como en el de traslación (alrededor del Sol); existen, sin embargo, curiosas excepciones, como Venus o Plutón, que giran sobre su eje en sentido contrario, o Urano, que se halla literalmente “tumbado” (su eje de rotación casi coincide con la eclíptica).

Si bien la explicación física del movimiento de los planetas, la ley de Gravitación Universal, no fue formulada por Newton hasta 1666, ya en 1609 el astrónomo Johannes Kepler describió el movimiento de los planetas por medio de tres leyes fundamentales, cuya validez se probó cierta al convertirse en un método eficaz para predecir la posición de éstos. Kepler,

tras estudiar las numerosas observaciones realizadas por Tycho Brahe, propuso como primera ley un movimiento planetario que dibujaba órbitas elípticas, y no circulares como se creía, con el Sol en uno de los focos de la elipse. Así, cuando el planeta se halla a la máxima distancia al Sol se encuentra en su afelio, en tanto que la posición de mayor proximidad con respecto a éste se denomina perihelio. Sin embargo, a excepción de Plutón, que traza una órbita marcadamente elíptica, el resto de planetas giran en órbitas casi circulares (la Tierra, por ejemplo, dista 152 millones de kilómetros del Sol en su afelio y 147 millones de kilómetros en su perihelio). La segunda ley de Kepler, por su parte, indica que la velocidad de un planeta varía a lo largo de su trayectoria (siendo



Figura 2.2. El Sistema Solar. De izquierda a derecha: el Sol, Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, el cinturón de asteroides, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno y Plutón (más un cometa acercándose al Sol). Fuente: [www.kidsastronomy.com](http://www.kidsastronomy.com).

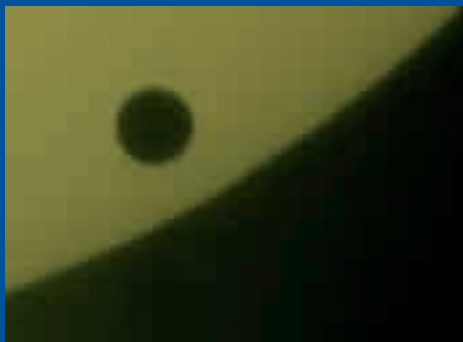
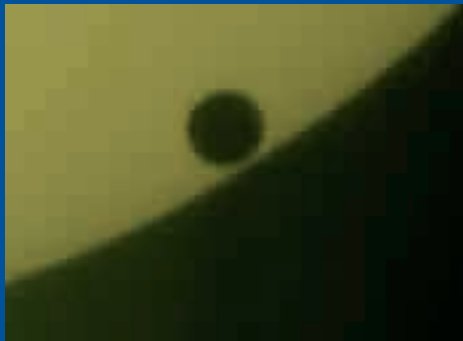


Figura 2.3. Imagen del tránsito de Venus, tomada por el telescopio PETI del IAA.

más lenta en el afelio que en el perihelio), en tanto que la tercera permite establecer una relación entre los periodos de traslación de dos planetas y sus distancias respectivas al Sol; esta ley nos permite, conocida la distancia de un cuerpo cualquiera al Sol, determinar la distancia al Sol de cualquier otro cuerpo del Sistema Solar.

### Fenómenos: tránsitos y eclipses

Como consecuencia del movimiento orbital de los planetas en el plano de la eclíptica, ocurren fenómenos que podemos observar desde la Tierra, como los eclipses y los tránsitos. Observamos un tránsito cuando Mercurio o Venus, los planetas más internos, se alinean entre la Tierra y el Sol y dibujan su trayectoria sobre el disco solar. Se trata de eventos que tuvieron gran importancia para la medición de la distancia de la Tierra al Sol, o Unidad Astronómica, aunque son muy poco frecuentes: los tránsitos de Mercurio se dan unas doce veces por siglo y, en el caso de Venus, sólo se producen dos en cada intervalo de 120 años (recientemente hemos tenido el privilegio de observar uno, que vemos en la figura 2.3). También ocasionalmente el Sol nos ofrece otro espectáculo fascinante: un

eclipse solar. Se trata de un fenómeno muy simple que sucede cuando el Sol, la Luna y la Tierra se hallan alineados: la sombra de la Luna se proyecta sobre la Tierra y, en determinadas zonas del globo terráqueo, se observa cómo la Luna “tapa” el Sol. Finalmente, observamos un eclipse de Luna cuando la Tierra se interpone entre el Sol y la Luna y proyecta su sombra sobre ésta, fenómeno que resulta una excelente ocasión para la detección y el estudio de impactos de meteoritos sobre la superficie lunar.

### Formación del sistema solar

El estudio de los meteoritos indica que el Sol, los planetas y el resto de los componentes del Sistema Solar se formaron aproximadamente hace unos 4.600 millones de años. La teoría de formación del Sistema Solar más aceptada es la llamada teoría de la condensación, según la cual el Sol y los planetas se formaron a partir de una misma nube de gas y polvo (también llamada nebulosa) que, desestabilizada quizá debido a una explosión de supernova cercana, empezó a contraerse. Por efecto de la gravedad, esta nube comenzó a colapsar y a rotar hasta aplanarse en forma de disco, en cuyo centro, la zona más densa y caliente, nacería el

Sol; mientras, en las regiones más externas, se crearon pequeños grumos de gas y polvo, llamados planetesimales, que poco a poco acumularon materia suficiente para convertirse en planetas. La evidente diferencia que encontramos entre los cuerpos del Sistema Solar, que pueden clasificarse en terrestres (Mercurio, Venus, Tierra y Marte), gaseosos (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno) y helados (Plutón, objetos similares a éste como Quaoar y Sedna y algunas lunas de los planetas gaseosos, como Tritón), responde a las condiciones que, en su infancia, impuso el Sol: a su alrededor, la temperatura era tan elevada que sólo los elementos más pesados, como hierro, carbono y silicatos, podían permanecer en estado sólido y contribuir a la formación de los planetesimales, hecho que explica el carácter rocoso de los planetas internos. En cambio, en la región externa del Sistema Solar, la temperatura era lo suficientemente baja como para que el agua, el

amoníaco o el metano formaran hielos que, en combinación con algunos restos rocosos, formaron los núcleos de los planetas gaseosos. La fuerza de gravedad de estos núcleos helados atrapó gran cantidad de hidrógeno y helio, elementos predominantes en este tipo de planetas, sobre todo los de mayor tamaño: Júpiter y Saturno. Finalmente, en los confines del Sistema Solar se formaron los que hoy se conocen como Objetos Transneptunianos y cuyo más conocido representante es Plutón.

A este periodo de formación de planetesimales le siguió una etapa en la que el recién nacido Sol, mediante un fuerte viento estelar, terminó de limpiar de gas y polvo el espacio interplanetario. Este momento determinó el fin de la acumulación de materia por parte de los planetas que, cientos de millones de años después y tras muchas perturbaciones e impactos, se estabilizaron en las órbitas que conocemos hoy día.



Figura 2.4. Concepción artística de la formación del Sistema Solar. Fuente: Niel Brandt (Universidad Pensilvania).

## 3. El Sol: la estrella más cercana

**A demás de su evidente importancia e influencia sobre nuestras vidas, el Sol es la única estrella que podemos estudiar directamente en detalle**

Aunque en estas fechas el Sol es el culpable de muchos de nuestros sofocos y no parece el momento ideal para aproximarnos a los 6.000 grados de temperatura de su superficie, vamos a hacer un esfuerzo que el astro rey bien merece: a fin de cuentas, estamos aquí gracias su luz y calor y, además, los cambios o fenómenos que el Sol experimenta pueden afectar a la climatología o las comunicaciones en Tierra, de modo que nos interesa conocerlo bien. Por otro lado, se trata de la única estrella que podemos estudiar directamente en detalle, por lo que resulta fundamental para la comprensión de la física de otras estrellas.

Al igual que el resto de las estrellas, el Sol es una gran esfera de gas incandescente, que debe su energía a las reacciones termonucleares que se producen en su núcleo: la fusión de átomos de hidrógeno da lugar al helio, proceso en el que se libera la energía que viaja hacia la superficie y que se manifiesta en forma de luz y calor. Pero en ese viaje hasta la superficie la energía se transporta de distintos modos y a través de las diversas capas del interior solar, en un recorrido que puede durar unos diez millones de años y en el que vamos a acompañarla.

### El interior del Sol

El núcleo solar, que comprende un 25% del radio del Sol y alberga unas condiciones de temperatura y densidad

que permiten la fusión del hidrógeno (hasta 15 millones de grados y 150 kg/l, diez veces la densidad del plomo), limita con la zona radiativa, que abarca el siguiente 45% del radio solar y se caracteriza por el modo en que se transporta la energía: los fotones, o partículas de luz, tras chocarse insistentemente con los apretadísimos átomos que constituyen el material estelar, consiguen acarrear su contenido energético hasta la zona convectiva, que se extiende casi hasta la superficie. Aquí el movimiento de los gases toma el relevo en el transporte de energía: el gas, al igual que en una cazuela con agua hirviendo, se mezcla y burbujea, efecto que se manifiesta en la superficie en forma de lo que se conoce como granulación. Entre las zonas radiativa y convectiva existe una fina capa intermedia con más importancia que la de una simple línea de transición: parece ser que en ella se genera el intenso campo magnético solar, responsable de la continua y, en ocasiones, intensa actividad, que trataremos la próxima semana.

## Las regiones externas

La imagen del Sol que estamos acostumbrados a ver, la de un disco amarillo con algunas manchas oscuras, corresponde a la fotosfera o “esfera de luz”, una capa muy fina que presenta

estructuras muy características, como gránulos y manchas. En tanto que los primeros se deben a la “ebullición” del gas ya mencionada, las manchas son zonas más frías, de unos 4.000°C, que vemos oscuras en comparación con sus alrededores.

Casi totalmente transparente, la cromosfera se encuentra justo por encima de la fotosfera. Las imágenes que se han obtenido de esta región han sido tomadas durante el principio y el final los eclipses del Sol totales, en los que aparece como un anillo rojizo, o con filtros muy específicos. Dichas imágenes revelan una serie de fenómenos, como los filamentos, protuberancias y espículas (figura 3.1).

Finalmente, la corona es la capa más externa de la atmósfera solar, formada por gas de muy baja densidad y con una extensión que supera los millones de kilómetros. Podemos observarla durante los eclipses totales de Sol como un halo blanquecino y, por su fuerte emisión en rayos X debido a su elevada temperatura —cercana al millón de grados—, también con telescopios diseñados para esta longitud de onda. Con ellos se han obtenido imágenes que muestran “agujeros” en los polos de la corona, de donde se cree que procede el viento solar, un chorro de partículas eléctricamente cargadas que, con velocidades de unos 400 km/s, invade el espacio interplanetario.

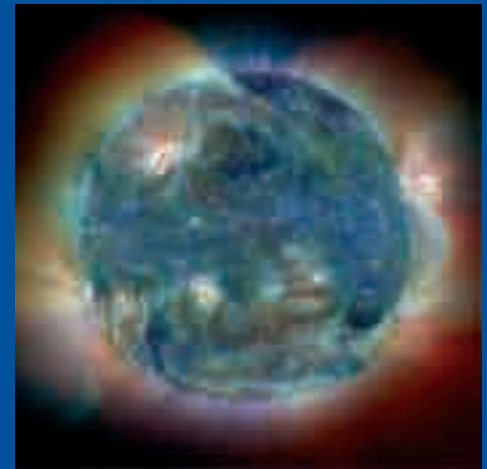


Figura 3.1. Filamentos y protuberancias en la cromosfera. Se trata de densas nubes de material más frío que quedan suspendidas sobre la superficie siguiendo los bucles del campo magnético. Como consecuencia de su menor temperatura, se muestran oscuras en el disco (filamentos) y brillantes en el limbo (protuberancias). En la cromosfera también se distinguen las espículas, pequeñas erupciones que ascienden y descienden a una velocidad del orden de 20 km/s, y cuyo aspecto puede compararse con el de una pradera en llamas.

## El Sol, datos básicos



**Diámetro:** 1.391.980 km (en el interior de la esfera solar cabrían un millón de Tierras).

**Masa:**  $2 \times 10^{30}$  kg (2.000 billones de billones de toneladas).

**Temperatura en la superficie:** 6.000°C.

**Temperatura en el centro:** 15.000.000°C.

**Composición:** hidrógeno (70%); helio (28% de su masa); elementos pesados (2% de trazas de carbono, nitrógeno, oxígeno, neón, magnesio, silicio y hierro).

### Curiosidades

**Estado:** ni sólido ni gaseoso, la masa solar se denomina plasma. Este plasma es tenue y gaseoso en las zonas cercanas a la superficie y va haciéndose más denso hacia el núcleo.

**Rotación:** el Sol no rota de forma rígida como los planetas sólidos, sino que las regiones ecuatoriales rotan más rápido, con un periodo de unos 24 días, que los polos, que completan una vuelta en unos 30 días.

**Temperatura coronal:** si bien en el interior del Sol la temperatura desciende con la distancia al núcleo, encontramos una enorme diferencia entre los 6.000 grados de la superficie y casi el millón de la corona. Aunque se han articulado diversas posibles explicaciones, aún no se ha determinado el mecanismo responsable del calentamiento coronal.

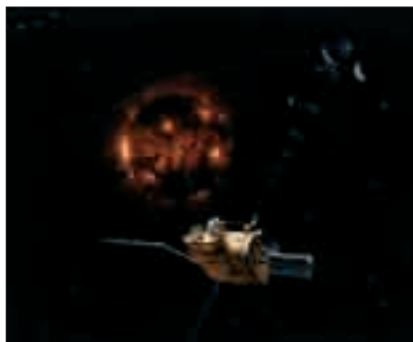


Figura 3.2. Concepción artística de la misión Ulysses (NASA/ESA), dedicada al estudio del Sol en todas sus latitudes.

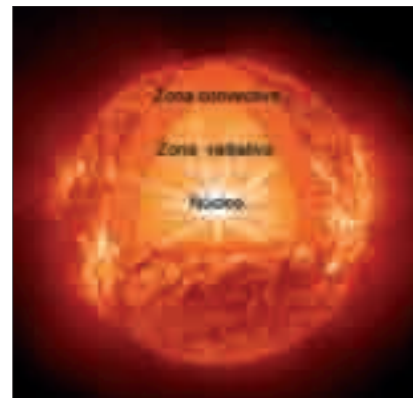


Figura 3.3. Este esquema muestra un corte del Sol, donde se distinguen las diferentes regiones que atraviesa la luz. Fuente: SOHO.

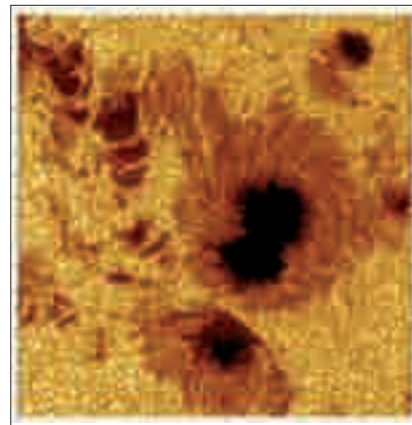


Figura 3.4. Manchas y gránulos en la fotosfera. Las marcas de los bordes señalan una distancia de 1.000 kilómetros, con lo que los gránulos pueden tener el tamaño de la Península Ibérica.

## 4. La cara turbulenta del Sol

**Aunque de lejos pueda parecerlo, el Sol no es, ni mucho menos, una estrella tranquila: rota, pulsa y experimenta fenómenos violentos**

Si bien la semana pasada señalamos, sólo a modo de curiosidad, que el Sol no rota de forma rígida sino que su región ecuatorial gira más rápido que los polos, hoy revisaremos las espectaculares consecuencias de este fenómeno, que tienen relación con el campo magnético solar, hoy considerado la clave para entender el Sol. Debido a esta rotación desigual (técnicamente, “rotación diferencial”), las líneas del campo magnético que, en condiciones normales, deberían dirigirse directamente de norte a sur, se van torciendo y formando densos haces en dirección este-oeste (figura 4.1). Dichos haces se manifiestan en la superficie en

forma de manchas, que no son sino regiones algo más frías debido a que el campo magnético bloquea el transporte de energía hacia la superficie y ocasiona un descenso de la temperatura. Estas manchas, conocidas desde hace más de dos mil años, se forman por grupos y constituyen las regiones donde se localiza la actividad solar y la mayoría de los fenómenos asociados a ella. Las manchas solares, cuyo tamaño medio se ha establecido en unos 10.000 km, pueden desarrollarse en unos pocos días y durar entre unos días y unos meses.

Entre 1645 y 1715, el Sol atravesó una etapa de inactividad, hoy denominada Mínimo de Maunder, en la que la ausencia de manchas en la superficie solar vino acompañada de una “pequeña edad de hielo” en la Tierra. Cuando la actividad solar se reanudó, los astrónomos, convencidos





Figura 4.2. Bucle postfulguración. Tras una fulguración, muchas veces se observan bucles formados por el material eyectado durante la explosión. Fuente: NASA.

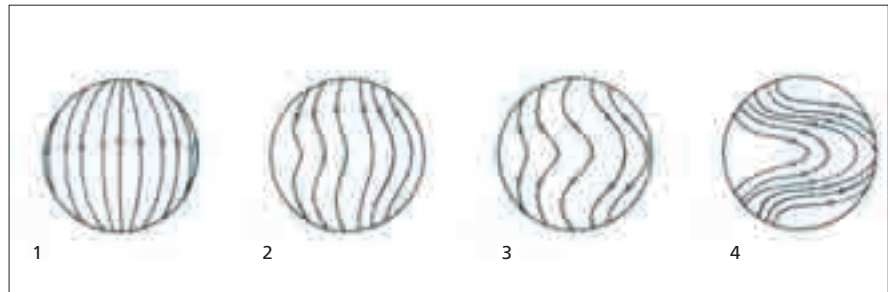


Figura 4.1. Torsión de líneas. Representación esquemática de la torsión que experimentan las líneas del campo magnético solar debido a la mayor velocidad de rotación de la región ecuatorial. Fuente: Roma Smoluchowski, *El Sistema Solar*.

de la relación entre las manchas solares y el clima terrestre, comenzaron a guardar registros de las primeras. En 1843, el astrónomo aficionado Heinrich Schwabe estudió estos registros y descubrió que el número de manchas experimentaba un máximo cada once años, con lo que se estableció el ciclo de actividad solar. Los ciclos solares se empezaron a enumerar a partir del mínimo acaecido alrededor del 1755, y en la actualidad el Sol se halla en el número 23.

## El Sol en acción

Las manchas solares son una prueba de que el Sol no emite energía de forma uniforme en toda su superficie, pero existen otros fenómenos que lo corroboran. Entre ellos destacan las fulguraciones solares, fenómenos explosivos que pueden liberar, en sus escasos minutos de duración, cantidades

de energía equivalentes a millones de bombas de hidrógeno. Las fulguraciones se producen en una región activa, probablemente con manchas, de la superficie solar; tras una intensa agitación del campo magnético, se manifiestan como enormes descargas de energía, generalmente acompañadas de la expulsión de materia al espacio. Hoy día se cree que las fulguraciones se deben a la liberación de energía acumulada en líneas de campo magnético que han experimentado una fuerte torsión; si comparamos las líneas de campo magnético con las gomas de un tirachinas, entenderemos mejor esta acumulación de energía: en un momento dado las líneas alcanzan el límite de torsión y liberan toda la energía repentinamente, una energía que, en el caso del tirachinas, se transmite a la piedra que lanzamos. Las fulguraciones causan tormentas magnéticas en la Tierra y generan no pocos efectos adversos en

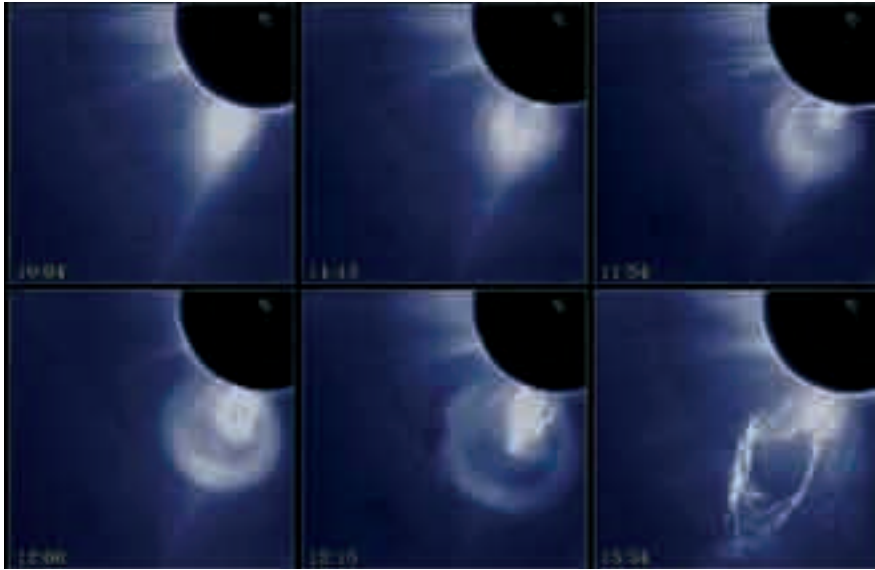


Figura 4.3. Fenómenos explosivos. La imagen muestra, por fases, una eyección de masa coronal, en la que se expulsó material a más de 1.000 km/s. Fuente: High Altitude Observatory.

los sistemas técnicos terrestres, por lo que se han buscado métodos para predecirlos. Dada su correlación con las manchas solares, se ha establecido una clasificación de manchas dependiendo de sus probabilidades para producir fulguraciones, lo que ha permitido mejorar la capacidad para predecir, sobre todo, dónde tendrán lugar estos eventos.

Otro interesante fenómeno asociado a la actividad solar son las eyecciones de masa coronal, enormes burbujas de gas que, también motivadas por el campo magnético, son expulsadas del Sol en el curso de varias horas. Aunque en muchas ocasiones aparecen asociadas a fulguraciones o

protuberancias, también se dan de forma independiente, con una frecuencia dependiente del ciclo solar: durante el mínimo se observa una por semana, en tanto que cerca del máximo se dan dos o tres por día.

Las eyecciones de masa coronal pueden alterar el flujo del viento solar y, al igual que las fulguraciones, pueden generar desde cambios climáticos a interferencias en las comunicaciones, así como las hermosas auroras boreales, producidas cuando las partículas cargadas expulsadas por el Sol son conducidas por el campo magnético terrestre e interactúan con los gases de la atmósfera.



Figura 4.4. Aurora boreal. Una impresionante consecuencia de la actividad solar en la Tierra. Fuente: Juha Kinnunen.

## El proyecto Sunrise

### Las claves para entender el Sol

El campo magnético solar se ha desvelado como la clave para profundizar en el conocimiento del astro rey y, ya que dicho conocimiento constituye una imprescindible herramienta para predecir posibles efectos en el medio ambiente espacial, un equipo internacional (Alemania, EE.UU. y España) está desarrollando la misión SUNRISE, destinada al estudio de la estructura y dinámica del magnetismo solar. SUNRISE, un telescopio solar que viajará en un globo estratosférico, se lanzará en la Antártida en el verano austral de 2006-2007, aprovechando las diversas ventajas de esta región: se evitan los ciclos día y noche y se puede observar el Sol de forma ininterrumpida durante toda la duración del vuelo, lo

que también permite una generación de energía constante gracias a los paneles solares; SUNRISE se situará a unos 40 km sobre el nivel del mar, lo que evita la degradación de las imágenes por efecto de la atmósfera como ocurre con los telescopios terrestres.

España contribuye en la misión con el magnetógrafo IMaX, en cuya elaboración participa el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA). IMaX estudiará el campo magnético solar con una resolución sin precedentes y por periodos de varios días con una calidad de imagen constante, lo que permitirá avanzar de forma notable en el conocimiento del magnetismo solar, su evolución y sus efectos sobre el medio interplanetario.



Arriba: SUNRISE  
Izquierda: IMaX.

## 5. Mercurio: un planeta por descubrir

**M**ercurio, uno de los grandes desconocidos del Sistema Solar, presenta una serie de incógnitas que le van otorgando protagonismo en la exploración espacial

Mercurio, el planeta más cercano al Sol, se ha revelado como un mundo peculiar por diversas razones: aun siendo el más pequeño después de Plutón, su densidad supera a la de todos los demás; muestra una superficie muy antigua y en parte similar a la de la Luna, aunque su interior se asemeja al de la Tierra; sufre la mayor variación de temperatura entre el día (450°C) y la noche (-180°C) de todo el Sistema Solar; carece de satélites y de atmósfera (posee, no obstante, una tenue exosfera compuesta, entre otros, por hidrógeno, helio y oxígeno) y presenta un misterioso campo magnético. El estudio

de los datos aportados por la misión Mariner 10 en los años 70 ha ido generando incógnitas en relación a su estructura, historia geológica y composición, que dos misiones, Messenger de la NASA y BepiColombo de la ESA, están dispuestas a resolver.

Debido a su proximidad al Sol, Mercurio ha constituido, históricamente, un objetivo difícil de observar desde Tierra (de hecho, una leyenda afirma que Copérnico murió sin haberlo observado). La sonda espacial Mariner 10, durante los tres sobrevuelos que realizó entre 1974 y 1975, obtuvo imágenes del 45% de la superficie con una resolución cinco mil veces superior a la obtenida hasta entonces y aportó casi toda la información que se posee sobre el planeta. Dicha información confirmó la relación entre los periodos de rotación

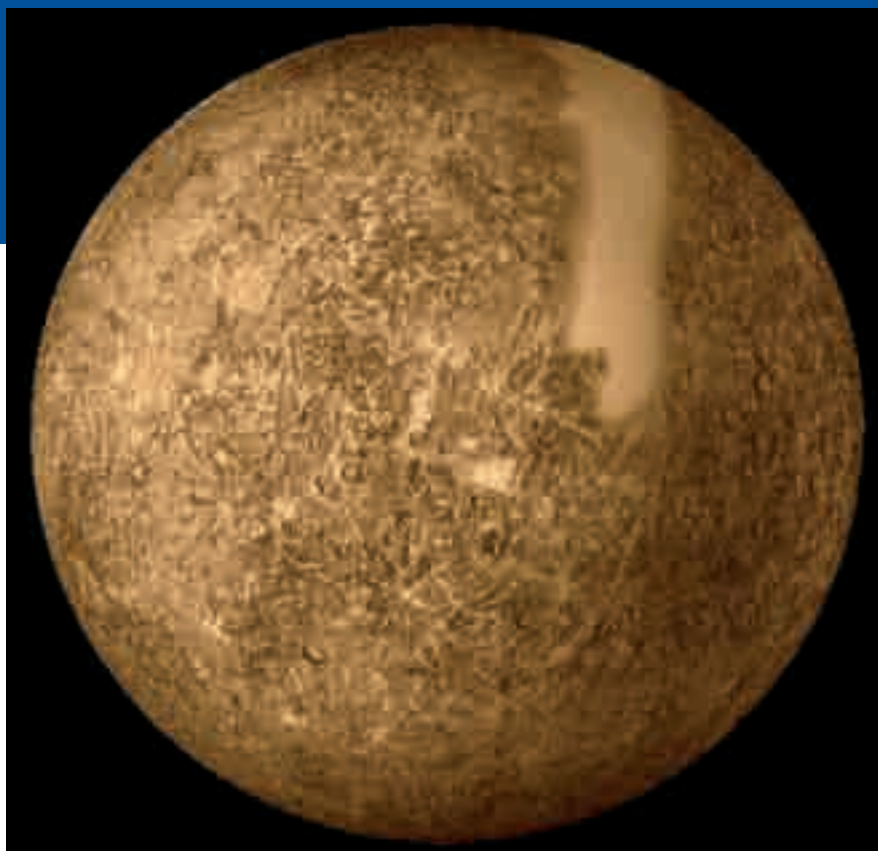


Figura 5.1. El 45% de Mercurio. El procesamiento de los datos de Mariner 10 dio lugar a esta imagen del inhóspito Mercurio, de cuya cara opuesta aún no se han obtenido imágenes.

Fuente: Mariner 10, Astrogeology Team, U.S. Geological Survey.

(58,65 días) y de traslación (88 días) de Mercurio: debido a un fenómeno que se conoce como acoplamiento, éste rota tres veces mientras da dos vueltas alrededor del Sol. Así, cuando el planeta se halla en su perihelio, o posición de su órbita más cercana al Sol, un habitante de Mercurio vería cómo el Sol, tres veces más grande que como lo vemos desde la Tierra, va deteniéndose en el cielo hasta pararse por completo, moviéndose después en sentido contrario durante ocho días. Otro dato curioso es que, debido a la falta de atmósfera, cuya densidad y composición determinan que el cielo en la Tierra se vea azul y en Marte rosáceo, el cielo de Mercurio aparece oscuro incluso durante el día.

### Más que cráteres

Aunque la superficie de Mercurio, plagada de cráteres y llanuras, presente un gran parecido con la de la Luna, la observación detallada de las imágenes de Mariner 10, que abarcan sólo un



Figura 5.2. Un tremendo impacto. La imagen muestra una parte de la cuenca Caloris, de unos 1.300 km de diámetro, fruto de un enorme impacto. Fuente: NASA.

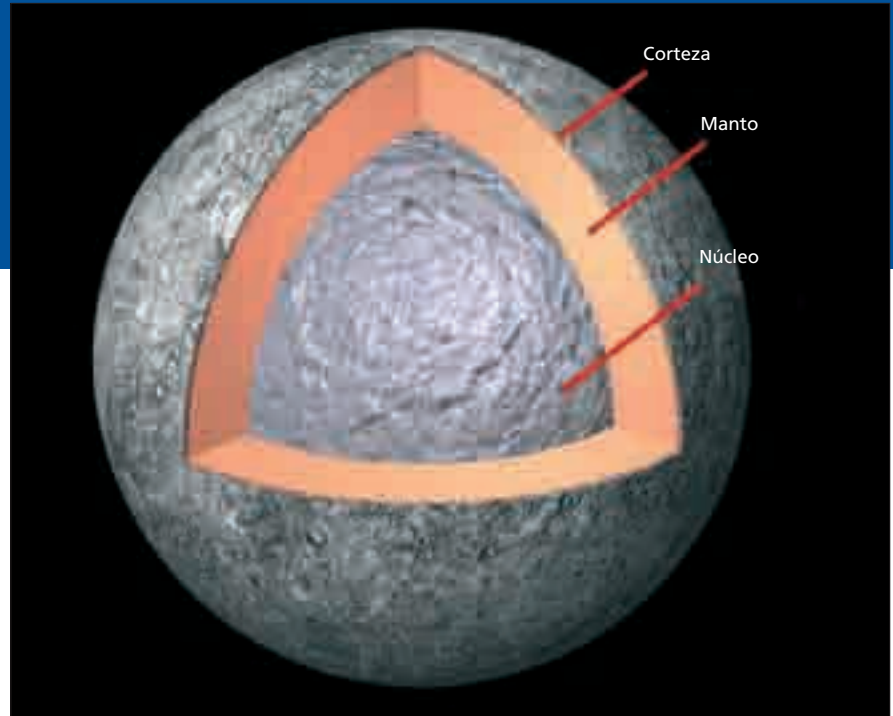


Figura 5.3. Un corte de Mercurio. La elevada densidad del planeta tiene su origen en las dimensiones de su núcleo de hierro, que abarca 1.800 de los 2.440 km de radio del mismo. Se estima que el núcleo contiene el 80% de la masa del planeta. Fuente: ESO.

hemisferio del planeta, ponen de manifiesto diferencias importantes. Mientras en nuestro satélite se distinguen con nitidez regiones escarpadas, brillantes y cuajadas de cráteres (“tierras”) y otras hundidas y oscuras (“mares”), Mercurio no muestra una dicotomía tan clara: sí presenta tierras altas y tierras bajas, pero de muy similar apariencia; además, en las tierras altas los cráteres comparten el espacio

con los llanos, formando una estructura más compleja que la de la Luna. Asimismo, la escasez de grandes cráteres (de diámetros entre 20 y 50 km) en la superficie de Mercurio establece otra notable diferencia: sugiere que algún fenómeno de naturaleza incierta (bien volcánica o bien relacionada con impactos de meteoritos) produjo cambios en el terreno y borró gran parte de los cráteres. En las regiones altas

y craterizadas de Mercurio se han observado también estructuras curiosas, denominados declives lobulados, que marcan una nueva diferencia; se trata de acantilados recortados y poco profundos de cientos de kilómetros de longitud que probablemente se produjeron a causa de una contracción global de la corteza provocada, a su vez, por un lento enfriamiento y una posterior contracción del núcleo de hierro.





Figura 5.4. Mariner 10. La misión que, hace ya unos treinta años, nos aportó casi toda la información que poseemos sobre Mercurio. Fuente: Smithsonian Institution.

## Incógnitas

La gran sorpresa que aportó Mariner 10 fue el descubrimiento del campo magnético de Mercurio que, aunque mucho más débil, presenta la misma interacción con el viento solar que el terrestre. En la Tierra, el campo magnético es consecuencia del movimiento del material líquido de las regiones externas del núcleo, pero el caso

de Mercurio desconcierta porque, dado su tamaño, su núcleo debió de haberse solidificado hace mucho tiempo (de hecho, los acantilados mencionados parecen consecuencia de ello). Al igual que con otras incógnitas sobre Mercurio, se han articulado varias hipótesis, pero carecemos de datos para comprobarlas; quedamos a la espera de la información que las misiones Messenger y BepiColombo ofrezcan al respecto.

## Messenger y BepiColombo

### Rumbo a Mercurio

Del grupo de los planetas terrestres (Mercurio, Venus, Tierra y Marte), Mercurio es el menos explorado. Sin embargo, su compendio de condiciones extremas (cercanía al Sol, variaciones de temperatura, reducido tamaño, altísima densidad...), su desconcertante campo magnético y la posibilidad de que albergue hielo en depósitos polares, le han erigido como un digno objetivo en la exploración espacial. Además, existe un consenso generalizado que afirma que su estudio aportará información única sobre la formación y evolución interna y geológica de los planetas terrestres, de modo que sendas misiones, Messenger (NASA) y BepiColombo (ESA), se preparan para descubrir sus secretos. La primera ya se encuentra de camino a Mercurio (entrará en su órbita en marzo de 2011) en busca de respuestas relacionadas con la densidad del planeta, su historia geológica o la naturaleza de su campo magnético. Por su parte, la misión BepiColombo, que se lanzará en el 2012 y se situará en la órbita de Mercurio en el 2015, completará los

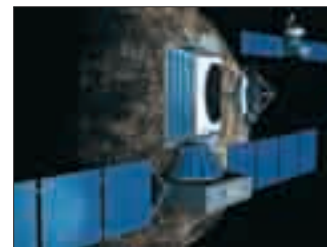


Figura 5.5. Concepción artística de la misión BepiColombo, con sus dos módulos orbitando Mercurio. Fuente: ESA.

datos de la sonda Messenger y contará con una gran ventaja con respecto a ésta ya que dispondrá de dos módulos orbitales. Uno, fruto de una colaboración con Japón, se especializará en el estudio del campo magnético, en tanto que el otro, íntegramente europeo, se dedicará al estudio de la superficie. Aún en fase de evaluación, incorporará dos instrumentos en cuya elaboración participa el Instituto de Astrofísica de Andalucía: Bepi-Cam, una cámara de alta resolución, y BELA, un altímetro láser que analizará la topografía del planeta.

## 6. Venus: a través de la nubes

**H**asta los años 60, y debido a su parecido en tamaño, densidad y composición, Venus fue considerada una “hermana gemela” de la Tierra. Nada más lejos de la realidad

En su obra *Conversaciones sobre la pluralidad de los mundos*, el humanista francés Bernard de Fontenelle describió, a finales del siglo XVII, cómo serían los habitantes de Venus: “Se parecen a los moros de Granada: gente pequeña y morena, quemada por el Sol, llenos de ingenio y fuego, siempre enamorados, escribiendo versos, organizando festivales, bailes y torneos todos los días”. Esta idea romántica de un planeta Venus habitable, originada por su parecido superficial con la Tierra, cayó en desgracia cuando se descubrió que su atmósfera estaba compuesta principalmente por dióxido de carbono

y que la temperatura de su superficie alcanzaba los 480°C, calor suficiente como para fundir el plomo.

### Una peculiar atmósfera

La atmósfera de Venus, y concretamente su espesa capa de nubes, se presenta como una barrera que impide ver la superficie del planeta, accesible, no obstante, con técnicas de radar. Dicha envoltura opaca, situada a una altura de 65 a 80 km sobre la superficie, se compone mayormente de gotitas de ácido sulfúrico que, al igual que en la Tierra, producen lluvia, pero ácida. Además, las nubes se mueven con una velocidad sesenta veces superior a la del planeta, lo que indica que en la alta atmósfera de Venus soplan vientos que pueden superar los 300 km/h y cuya



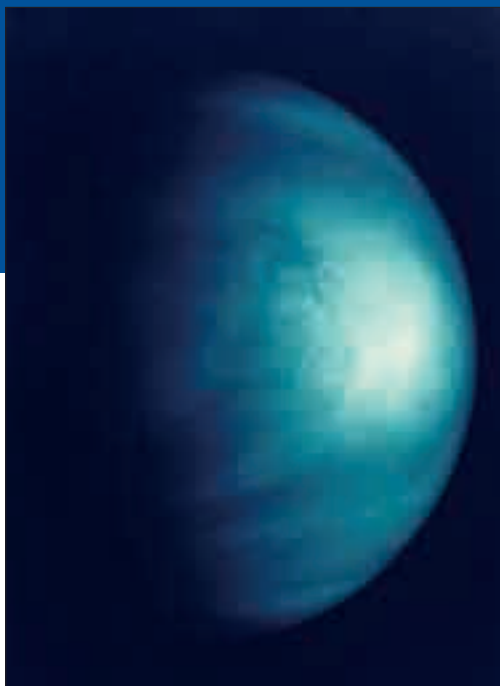


Figura 6.1. Eternamente nublado. Imagen coloreada de Venus tomada a unos 2,7 millones de kilómetros de distancia por la nave espacial Galileo. Fuente: NASA.

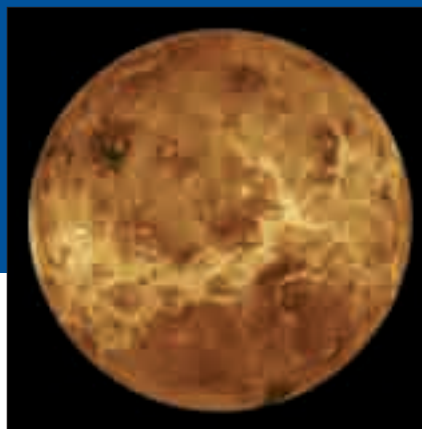


Figura 6.2. Venus al descubierto. Imagen generada por ordenador de la superficie de Venus, resultado de la observación mediante radar de la nave Magallanes. Fuente: NASA.

existencia aún no ha sido explicada de forma eficaz. Lo que sí se ha explicado es el motivo de las altas temperaturas del planeta, que no se deben a que Venus se halle algo más cerca del Sol que la Tierra, sino al efecto invernadero producido por su densa atmósfera: ésta sólo deja pasar el 20% de la luz solar, que alcanza la superficie del planeta en forma de radiación visible y es reflejada en forma de calor, o radiación infrarroja. Sin embargo, el dióxido de carbono y el vapor de agua (éste en una proporción mínima) de la atmósfera actúan como el techo de un invernadero y no permiten que el calor escape, de modo que contribuyen al aumento de las temperaturas.

Bajo estas condiciones, no sorprende que Venus no albergue más agua que la pequeña proporción de vapor que contiene la atmósfera y, aunque se piensa que en un remoto pasado pudo incluso contener océanos, que se descompusieron debido al calor y la radiación, este planeta, con sus temperaturas, vientos y presión devastadores y su lluvia ácida, ha resultado más el opuesto que el gemelo de la Tierra.

## Una superficie escurridiza

Nuestro conocimiento de la superficie del planeta proviene de observaciones mediante radar realizadas desde Tierra y de la información aportada por las misiones Mariner (1962), que sobrevoló el planeta, Venera (1967, 1970 y 1975), cuyas sondas aterrizaron sobre su superficie, Pioneer (1978), que permaneció en la órbita de Venus durante catorce años, y la sonda Magallanes, que cartografió mediante radar el 98% de la superficie de Venus.

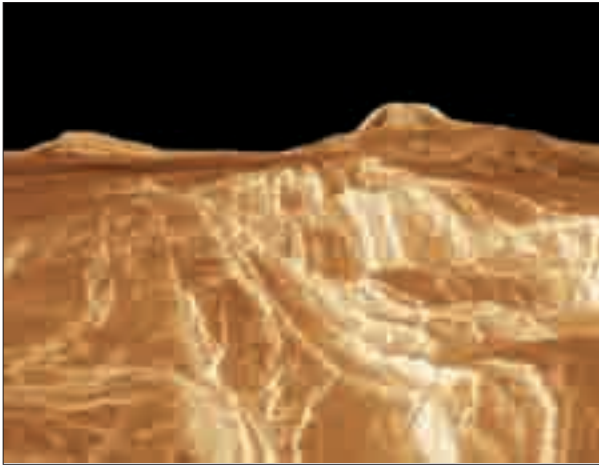


Figura 6.4. Montes y valles. Imagen generada por ordenador donde se distinguen los montes Sif (izda.) y Gula (dcha.) y un profundo valle en primer plano. Fuente: NASA.

Aunque el planeta es notablemente llano, muestra una topografía con estructuras geológicas similares a las de la Tierra como montañas, cañones, valles y llanuras, e incluso dos continentes, Ishtar y Afrodita, que se alzan varios kilómetros por encima de la elevación media del terreno. La intensa actividad volcánica del planeta, reflejada en cráteres de 100 km de diámetro y ríos de lava de 80 km de longitud, ha

rejuvenecido el rostro de Venus, cuya edad se estima en unos 600 millones de años. Aunque este rejuvenecimiento, en interacción con la corrosiva atmósfera, ha borrado muchas huellas de impacto, también menores por el inmejorable escudo que constituye su atmósfera, el planeta presenta inmensos cráteres producidos por asteroides, entre los que destaca el cráter Mead, de 280 km de diámetro.

Figura 6.3. Aterrizaje en Venus. La cámara a bordo del módulo de aterrizaje soviético Venera 13, antes de perecer producto del calor y la presión, transmitió imágenes de la superficie de Venus y un análisis de la composición del suelo. Fuente: Programa de Exploración Planetaria Soviético.



Figura 6.5. El cráter Mead. El mayor cráter de Venus, de 280 km de diámetro. Fuente: NASA.



## Venus, en breve

**Parecido con la Tierra:** su diámetro y su masa son, respectivamente, un 5% y un 8% inferiores que los de la Tierra; su densidad media también es algo menor, pero sugiere una estructura interna similar a la de nuestro planeta, con un denso núcleo de hierro.

**Rotación:** la rotación de Venus es retrógrada, es decir, gira sobre su eje en sentido contrario al del resto de planetas (a excepción de Plutón), por lo que se mueve muy despacio: un día en Venus equivale a 243 días terrestres, en tanto que un año dura sólo 225 días. Se desconoce la razón de este fenómeno, pero una teoría afirma que Venus se formó a partir de una fuerte colisión entre dos grandes masas, que anulaban sus movimientos de rotación respectivos.

**Carencias:** Venus carece de campo magnético y de satélites.

**Presión atmosférica:** la envoltura gaseosa de Venus ejerce una presión sobre la superficie unas noventa veces mayor que la de la Tierra, equivalente a una profundidad en el mar de aproximadamente 1.000 metros.

**Un único hombre en Venus:** la Unión Astronómica Internacional (IAU) decidió que los rasgos geológicos de Venus fueran caracterizados con nombre de mujer: así, encontramos los continentes Ishtar y Afrodita, la llanura Lavinia o el cráter Billie Holliday. Sólo una excepción: el Monte Maxwell, nombrado en honor del físico James Clerc Maxwell.

## 7. El equilibrio afortunado

**L**a Tierra presenta características poco comunes entre los planetas internos del Sistema Solar, entre las que destacan los océanos y la vida

La Tierra, el mayor de los planetas rocosos del Sistema Solar, supo escoger el lugar idóneo para establecer su órbita alrededor del Sol y se situó dentro de la denominada “franja de habitabilidad”, o región alrededor de una estrella en la que las condiciones de presión y temperatura le permiten albergar agua líquida. Pero el planeta que habitamos, tal y como lo conocemos, ha sido fruto de una compleja evolución y una serie de cambios en los que los mismos seres vivos han tomado parte desde sus orígenes.

### Una feliz historia

Teniendo en cuenta que todos los planetas se formaron a partir de la misma nebulosa, y que la distancia al Sol parece la única diferencia esencial, un extraterrestre llegaría a la conclusión de que la Tierra es un término medio entre Venus y Marte, con una atmósfera compuesta básicamente por dióxido de carbono, una presión de unas 20 a 40 atmósferas y una temperatura media de unos 227°C. La realidad, no obstante, es bien distinta: la atmósfera terrestre se compone en un 80% de nitrógeno y un 20% de oxígeno (además de pequeñas cantidades de otros gases) y genera una presión de una atmósfera en la superficie, cuya temperatura media se encuentra alrededor de los 18°C.

Figura 7.1. El planeta azul.  
Más del 70% de la superficie terrestre se halla cubierta de agua, como muestra esta imagen construida a partir de una serie de imágenes obtenidas por satélites.  
Fuente: NASA.





¿A qué se deben, entonces, las clementes condiciones del planeta azul? La respuesta requiere un poco de historia remota: los planetas rocosos, durante su formación, desarrollaron atmósferas de hidrógeno y helio que el Sol, en una etapa violenta, contribuyó a eliminar. Pero los planetas conservaron su baza en forma de calor

interno, que fundió sus interiores y provocó que los elementos más pesados, como el hierro, descendieran hasta el núcleo y allí se enfriaran. Este enfriamiento, junto con la acción de los gases, desató una fase de enérgico vulcanismo que arrojó al exterior los gases que constituirían las nuevas atmósferas, compuestas, sobre todo,



Figura 7.2. El tifón Odessa. Visto desde el aire, presenta un ojo circular casi perfecto, indicador de los fuertes vientos que produjo. Fuente: LPI/NASA.





Figura 7.3. Santa Helena en erupción. Procesos similares a éste, ocurrido en EE.UU. en 1980, expulsaron los gases que formarían la atmósfera terrestre. Imagen tomada desde un helicóptero por J. W. Vallance.

por dióxido de carbono y vapor de agua, junto con amoníaco y metano.

La evolución posterior dependió de la masa del planeta y, sobre todo, de su distancia al Sol: Mercurio, tan pequeño, carecía de suficiente calor interno y de una fuerza de gravedad que retuviera la atmósfera; Venus, que recibe del Sol el doble de energía que la Tierra, sufrió las consecuencias de un desmesurado efecto invernadero provocadas por su densa atmósfera y padece temperaturas abrasadoras; Marte, más frío, lejano y pequeño, experimentó un vulcanismo débil y su baja fuerza de gravedad dejó escapar gran parte de los gases; por su parte, la Tierra presentó unas afortunadas complicaciones, debidas a su situación dentro de la franja de habitabilidad: el vapor de agua de la atmósfera se condensó y formó océanos, que absorbieron parte del dióxido de carbono mientras que la radiación solar descomponía parte del amoníaco y el vapor de agua atmosféricos en nitrógeno y oxígeno. La vida surgió en los océanos, único lugar habitable debido a la fuerte radiación ultravioleta

del Sol. Las algas y plantas marinas utilizaron el dióxido de carbono y expulsaron oxígeno que, tras cientos de millones de años, fue tan abundante que una parte se convirtió en ozono y se formó la capa que nos protege de la radiación solar dañina. Así, gracias a diversos mecanismos que funcionaron en un delicado equilibrio, la vida comenzó a poblar el terreno seco y, literalmente, a transformar la superficie del planeta.

## La superficie cambiante

Aunque en el colegio, quizá por evitar complicaciones, sólo nos hablaran de núcleo, manto y corteza como elementos principales de la estructura de la Tierra, existen dos regiones, la astenosfera y la litosfera, en las que tienen lugar fenómenos de gran interés geológico. La astenosfera, de carácter maleable, se encuentra en la zona superior del manto, justo por debajo de la rígida litosfera, que abarca la capa final del manto y toda la corteza. Dicha



Figura 7.4. Cráter en Arizona. La superficie terrestre presenta pocos cráteres por varias razones: muchos caen al mar o se destruyen al atravesar la atmósfera, y las huellas en tierra se borran debido a la erosión o a la actividad volcánica y tectónica. Quedan, no obstante, algunas huellas de impacto como ésta. Fuente: NASA.

litosfera, debido a la tensión térmica previa a la etapa de vulcanismo que originó la atmósfera, se rompió en varios pedazos, hoy conocidos como placas tectónicas, con serias implicaciones para el futuro geológico del planeta: las placas, al flotar sobre la flexible astenosfera, se van deslizando horizontalmente en lo que se denomina deriva continental, y cambian progresivamente el mapa de la Tierra. De hecho, hace 200 millones de años sólo existía un enorme continente, Pangea, que se fragmentó y evolucionó hasta el mapamundi actual. Pero las consecuencias de la deriva continental, o tectónica de placas, no se limitan a un

aumento o disminución de los continentes, sino que también son responsables de algunos accidentes geológicos: las grandes cordilleras, como la del Himalaya, son producto de la colisión de dos placas, proceso en el que una se desliza por debajo de la otra y levanta su extremo. Si, al contrario, dos placas se alejan, surgirá una abertura que, en Israel, dio como fruto el Mar Muerto. El simple rozamiento de las placas puede tener también consecuencias catastróficas y, de hecho, los límites entre placas corresponden con las regiones de mayor actividad volcánica y tectónica.



Figura 7.5. Deriva continental. Visión esquemática de la evolución de los continentes debido al movimiento de las placas tectónicas.

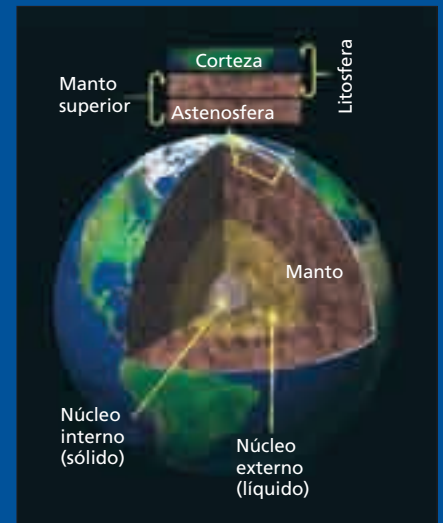


Figura 7.6. Por dentro. Estructura interna de la Tierra, con sus distintas regiones diferenciadas.



## 8. La Luna, ¿nuestra próxima casa?

**A** partir de la década de los 90 han vuelto a enviarse sondas a la Luna, tras veinte años desde la última visita. Nuestro satélite aún guarda muchos misterios

“¿Deseas conocer por qué medios misteriosos llegué a la Luna?... ¡Yo mismo descubrí no un medio, sino seis, seis formas de violar el cielo virginal!”. Estas palabras, puestas en boca de Cyrano de Bergerac por el escritor francés Edmond Rostand hace más de un siglo, resumen el sueño que la contemplación de nuestro satélite siempre ha inspirado en el ser humano. Hubo que esperar hasta el año 1959 para que el primer ingenio espacial tripulado, el Luna 1 ruso, pasara a menos de 60.000 km de la superficie lunar. Desde ese momento, la carrera hacia la

conquista de la Luna se sucedió en forma de 51 misiones espaciales no tripuladas y siete tripuladas. Diez años después del comienzo de esta carrera, la nave estadounidense Apollo 11 consiguió poner al primer hombre sobre la superficie lunar, como soñara Cyrano, y muchos otros, muchos siglos atrás. Esta carrera en pos de nuestro satélite logró que doce humanos caminaran sobre la superficie de nuestro vecino espacial, pero en 1976, tras el lanzamiento de la sonda rusa Luna 24, se abandonó por casi veinte años el envío de misiones a la Luna. Todas estas misiones, así como las sondas enviadas en los últimos años, nos han permitido elaborar una visión más clara sobre el origen y la evolución de nuestro satélite.

## ¿Hermana, hija o adoptada por la Tierra?

Cuatro son las teorías que intentan explicar el origen de la Luna. Todas deben dilucidar por qué la composición lunar es, en parte, muy similar a la de la corteza terrestre, por qué su densidad es menor que la terrestre, por qué la Luna presenta siempre la misma cara hacia la Tierra (esto se conoce como rotación síncrona: se debe a que la rotación de la Luna y su revolución alrededor de la Tierra duran lo mismo: 27 días, 7 horas y 43 minutos), y por qué la órbita lunar está alejándose paulatinamente de la Tierra.

La conocida como Teoría de la Fisión defiende que la Luna se desgajó de la Tierra aún en formación debido a la rápida rotación de ésta; en este sentido, la Luna sería hija de la Tierra. La Teoría del Disco Orbital sostiene que Tierra y Luna se formaron a la vez a partir de la misma nube protoplanetaria, mediante procesos de unión de partículas (acrecimiento) similares; en este caso, la Luna sería hermana de la Tierra. La Teoría de la Captura apunta que la Luna se formó en una región más lejana que la Tierra y, posteriormente, fue capturada por la gravedad terrestre, que la habría adoptado como satélite. La teoría más aceptada es la del Megaimpacto, que sugiere que un cuerpo de tamaño similar a Marte chocó con la Tierra en

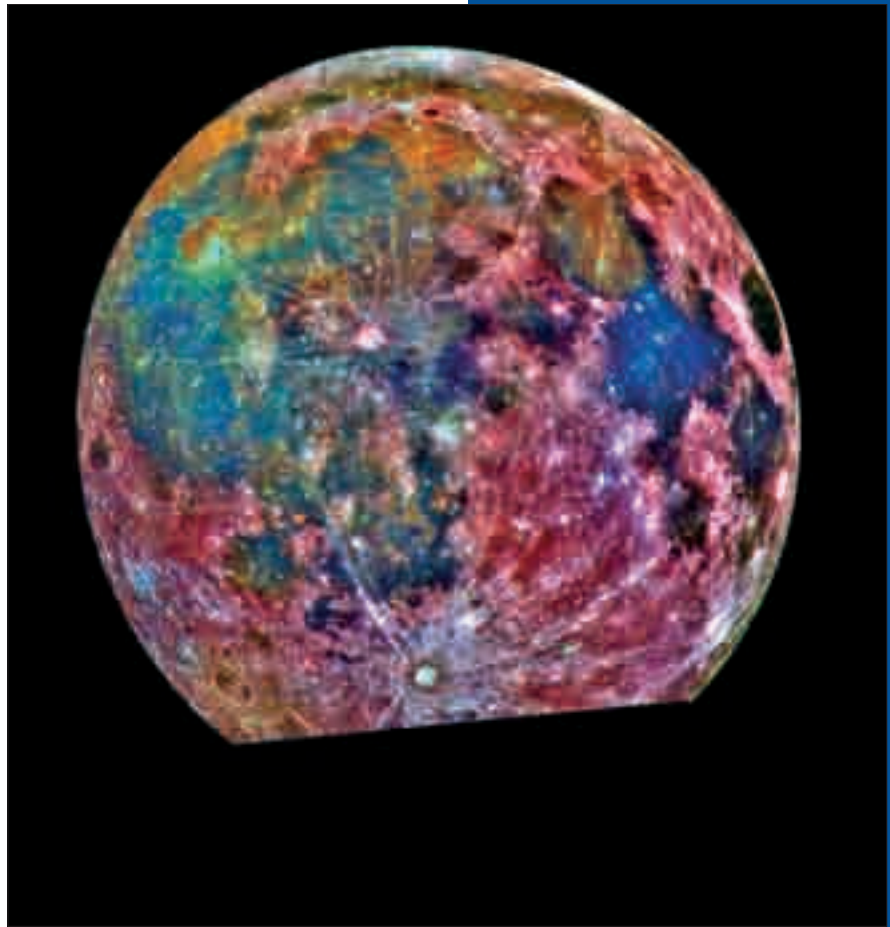


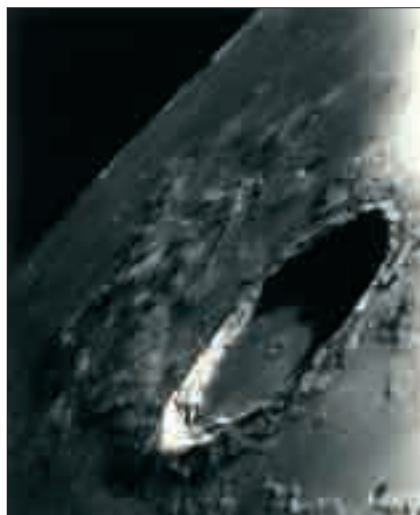
Figura 8.1. A todo color. Imagen en falso color de la Luna, para enfatizar las diferencias de composición: los azules revelan áreas ricas en titanio y los naranjas y morados corresponden a regiones pobres en titanio y hierro. Fuente: NASA.



Figura 8.2. (Combinación cráteres/mares). Un mundo bombardeado. Las estructuras principales que se observan en la superficie lunar son dos, los cráteres y los mares (zonas más oscuras, ocupan un 15% de la superficie):

**Mares:** la actividad volcánica lunar cesó hace 3.000 millones de años y originó los llamados mares: enormes cuencas de impacto que se inundaron con grandes cantidades de lava.

**Cráteres:** debidos a impactos de meteoritos sobre la superficie. Cualquier cuerpo que colisione con la Luna producirá una cicatriz duradera, ya que la Luna no posee una atmósfera protectora y erosiva como la de la Tierra.



formación y arrancó de ella parte del material, que quedó girando a su alrededor. Este material arrancado se enfrió al cabo de unos mil años formando nuestro satélite; otra vez, la Luna sería hija de la Tierra.

## La Luna del siglo XXI

El resurgimiento de las misiones espaciales a la Luna, representado por Clementine (1994) y Lunar Prospector (1998), ambas norteamericanas, ha aportado nuevos datos sobre incógnitas que aún permanecían sin resolver: la Luna parece presentar un pequeño núcleo de hierro sólido de unos 600 km de diámetro y se han detectado dos zonas de campo magnético especialmente intensas, una de las cuales es capaz incluso de formar un escudo magnético (magnetosfera) que desvía el viento solar. Lunar Prospector ha detectado, con un instrumento llamado espectrómetro



Figura 8.3. De camino. La nave SMART-1, que entró en la órbita de la Luna en diciembre de 2004. Fuente: ESA.

de neutrones, la existencia de hidrógeno en los polos lunares. Este hidrógeno podría hallarse en minerales hidratados o, más improbablemente, en forma de hielo de agua. El descubrimiento de hidrógeno en la Luna implica que sería más sencillo mantener una base humana permanente, ya que dicho elemento se emplea como carburante para los cohetes.

Actualmente, la Agencia Espacial Europea está analizando los primeros resultados de la sonda SMART-1, que fue lanzada en septiembre de

2003 y entró en órbita lunar en noviembre de 2004. Esta sonda es pionera en su clase, con un cohete eléctrico y siete instrumentos científicos miniaturizados. Japoneses, chinos y estadounidenses tienen proyectos a corto plazo para mandar nuevas sondas a la Luna y se proyecta que el ser humano regrese a nuestro vecino astro hacia 2015 o 2020, quizá para quedarse, ya que la Luna puede ser un trampolín estupendo para la conquista humana del Sistema Solar o un posible hogar en un futuro.



Figura 8.4. En la Luna. Un astronauta de la misión Apollo 11, Buzz Aldrin, prepara un instrumento para medir los movimientos de la corteza lunar.

## Impactos en la Luna

### La Luna sigue siendo castigada

Se sabía que gran cantidad de meteoroides continuaban castigando la superficie lunar, pero nadie había sido capaz de detectar ópticamente sus colisiones. Un equipo del IAA consiguió detectar, por primera vez con total certeza, varios de estos impactos sobre la Luna en noviembre de 1999, durante la lluvia de meteoros de las Leónidas. Actualmente el instituto mantiene una red de pequeños telescopios que escudriñan mensualmente la superficie lunar en busca de destellos de estos impactos. El IAA es pionero en este tipo de estudios lunares.

Figura 8. 5. Bombardeo. Imágenes de los impactos y su posición en la superficie lunar.



## 9. Marte. El planeta rojo

**M**arte, el planeta rojo, ha constituido históricamente una fértil fuente de mitos que la ciencia, poco a poco, ha ido desmintiendo

A lo largo de los tres últimos siglos, Marte ha sido un protagonista indiscutible: variadísimas teorías sobre el planeta rojo han postulado la existencia de grandes canales contruidos para el transporte de agua, de zonas de vegetación y, por supuesto, de marcianos. Todas estas creencias fueron revelándose incongruentes, sobre todo a medida que las primeras misiones, las Mariner y Viking, recondujeron, a partir de los años sesenta del siglo pasado, este polémico planeta hacia una firme senda científica. No obstante, y a pesar de la abundante información de que se dispone, Marte sigue presentando

enigmas, sobre todo en relación con la existencia de agua.

### A grandes rasgos

Si bien la apariencia actual de Marte se adecua con bastante precisión a la descripción de “desierto helado”, existen muchos indicios que apuntan a un pasado algo más benévolo. Con una temperatura media de  $-63^{\circ}$  y una presión atmosférica cien veces inferior a la de la Tierra, la existencia de agua líquida sobre la superficie queda descartada ya que si, por ejemplo, consiguiésemos hacer llegar un vaso de agua hasta allí, se congelaría o se evaporaría inmediatamente. No obstante, existen estructuras geológicas similares a las que el agua modela en nuestro planeta: las imágenes de



Figura 9.1. Marte y Fobos. La forma irregular y la baja densidad de Fobos y Deimos, los satélites de Marte, sugieren que se trata de asteroides capturados por la fuerza de gravedad marciana.

antiguos ríos, deltas, afluentes o lagos marcianos, cuya edad se estima en unos 4.000 millones de años, indican que el planeta debió de ser relativamente cálido a lo largo de sus primeros 500 millones de años. En ese intervalo de tiempo, Marte debió de ser bastante activo, con periodos cálidos y húmedos y abundante actividad volcánica, así como con una atmósfera más espesa que generara el efecto invernadero necesario para establecer una temperatura superior a  $0^{\circ}$  y permitir el flujo de agua líquida por la superficie. A lo largo de los siguientes 1.000 millones de años, la actividad geológica comenzó a disminuir y el agua de la superficie a congelarse y a formar masas de hielo superficiales y subterráneas; se cree que, quizá por causa de grandes impactos, ese agua fue expulsada catastróficamente hacia la superficie, formando las huellas fluviales que conocemos. Sin embargo, en la era actual, que comenzó hace unos 2.000 o 3.000 millones de años, no queda ni rastro del agua que supuestamente inundó el planeta, así como de la densa atmósfera que lo cubría, ausencias ante las que se han articulado varias posibilidades: puede que, debido a su baja fuerza de gravedad, Marte fuera incapaz de retener su atmósfera y ésta se perdiera en el espacio o, quizá, aún se conserva en forma de hielo en el regolito marciano (una capa superficial creada por impactos de meteoritos).

Esta última hipótesis cuadra bastante bien con uno de los posibles destinos del agua perdida: los estudios del oxígeno de la atmósfera de Marte resultaron incompatibles con el escape de grandes cantidades de agua, de modo que se impuso la idea de que debía de estar congelada y almacenada en el subsuelo marciano en forma de suelo helado o permafrost (una especie de barro congelado que cubre los primeros metros de profundidad del planeta). No obstante, se han formulado un buen número de teorías que intentan explicar los valles y canales marcianos y que proponen desde un “pasado azul” de Marte, cuyo hemisferio norte se hallaba cubierto por un océano, hasta otras que apuntan al dióxido de carbono sólido o a una conjunción de viento, polvo y sedimentos como agentes causantes de las estructuras geológicas que se han atribuido a torrentes de agua en el pasado. Algunas teorías se establecen en una posición intermedia y afirman que procesos de hundimiento, producidos por el reblandecimiento y derrumbe del suelo debido al agua subterránea, originaron los misteriosos valles.

## Una atmósfera huidiza

Las condiciones físicas en la superficie de Marte, que conjugan una presión atmosférica cien veces menor que la





Figura 9.2. El monte Olimpo. El mayor volcán del Sistema Solar, con unos 24 km de altura y una caldera (imagen izda.) de unos 3 km de profundidad. Fuente: ESA/DLR/FU Berlín (G. Neukum) y MOLA.

terrestre y una temperatura media de  $-63^{\circ}$ , crean unas condiciones en las que el agua líquida es inestable y se encuentra bien en estado sólido o bien gaseoso. Los antiguos valles y afluentes, presumiblemente creados por torrentes de agua, indican que la atmósfera marciana, en su infancia, debió de ser más densa para permitir la existencia de agua líquida en abundancia. Pero, independientemente del proceso que provocó su disminución hasta el mínimo actual (seis milibares), esta cifra resulta interesante porque se halla justo por debajo del valor del punto triple del agua, que delimita las condiciones en las que el agua puede existir en sus tres

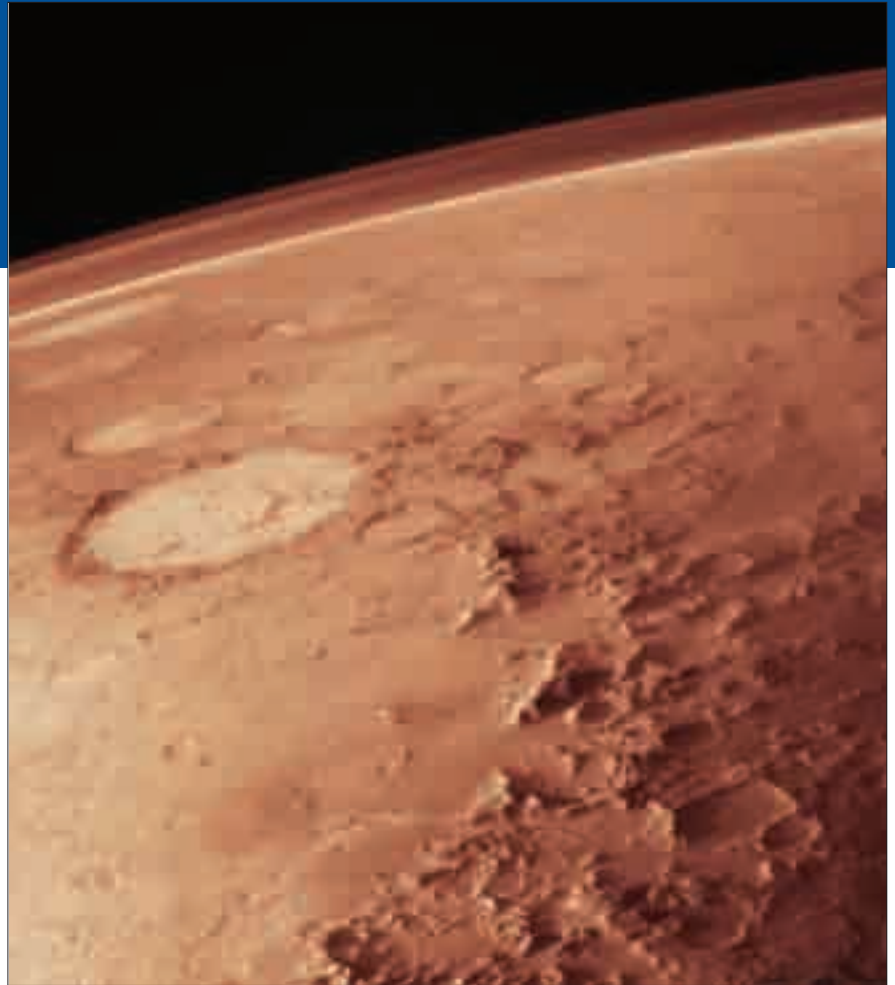


Figura 9.3. Atmósfera marciana. Detalle de la atmósfera donde también puede observarse la abundancia de cráteres de la superficie del planeta. Fuente: NASA.





Figura 9.4. Huellas del agua. Esta imagen muestra las hondonadas, aparentemente evidencia de una reciente erosión producida por el agua. Fuente: NASA.

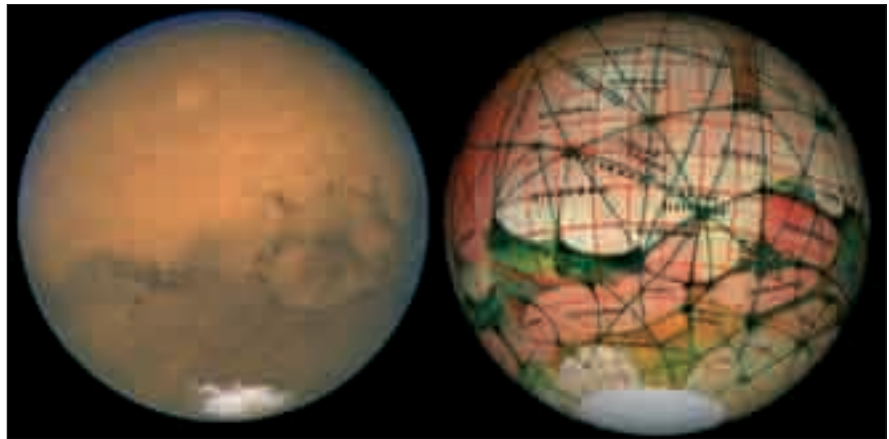


Figura 9.5. Ilusorios canales. Una imagen de Marte captada por el Telescopio Espacial Hubble, comparada con el concepto que se tenía del planeta en el siglo XVIII: una superficie cubierta de canales que indicaban la existencia de vida inteligente. Fuente: NASA.

estados y que combina la temperatura ( $0,01^{\circ}\text{C}$ ) con la presión (6,1 milibares). Si bien el agua líquida puede existir en Marte de forma transitoria (existen regiones muy hundidas, como el cráter denominado Hellas Basin, donde la presión puede superar la media, y momentos en que la temperatura aumenta hasta  $27^{\circ}\text{C}$ , condiciones en las que el agua líquida es posible), siempre se congelará o se evaporará. Algunos científicos opinan

que la propia atmósfera de Marte se autolimita a este respecto: si la presión fuera mayor y permitiera que el agua corriera por la superficie del planeta, el dióxido de carbono de la atmósfera se disolvería en el agua y terminaría en forma de carbonatos tras reaccionar con las rocas de silicato; como consecuencia, la atmósfera iría perdiendo densidad hasta caer, de nuevo, a un valor inferior al punto triple del agua.

## 10. Marte: la senda del agua

**L**a historia de la exploración espacial de Marte se halla ligada a la búsqueda de agua, elemento primordial para la existencia de vida

Hace cuatro décadas, antes de la primera misión con éxito a Marte, algunos científicos aún creían en la existencia de vegetación en Marte. Sin embargo, la veintena de imágenes obtenidas por la Mariner 4 supusieron un verdadero jarro de agua fría: la superficie del planeta, plagada de cráteres de impacto, presentaba un desafortunado parecido con la de la Luna. Los cráteres apuntaban a una superficie muy antigua e inerte, que parecía no haber experimentado cambios en miles de millones de años. Los datos de la Mariner 4 confirmaron también la bajísima presión atmosférica, y su

combinación con las observaciones en tierra demostró que no sólo la atmósfera se componía de dióxido de carbono sino que también los polos, presuntamente cubiertos de agua helada, se hallaban recubiertos en realidad de hielo seco o dióxido de carbono sólido.

En 1969, las naves Mariner 6 y Mariner 7 tomaron fotografías —de las regiones ecuatorial y austral respectivamente— que cubrían aproximadamente un 10% de la superficie del planeta. De nuevo, los cráteres acapararon los planos, aunque hubo un par de sorpresas: las imágenes del polo sur mostraban un casquete polar de aspecto joven y cambiante y se descubrieron los “terrenos caóticos”, zonas de hundimiento que se atribuyeron a la fusión del permafrost marciano.

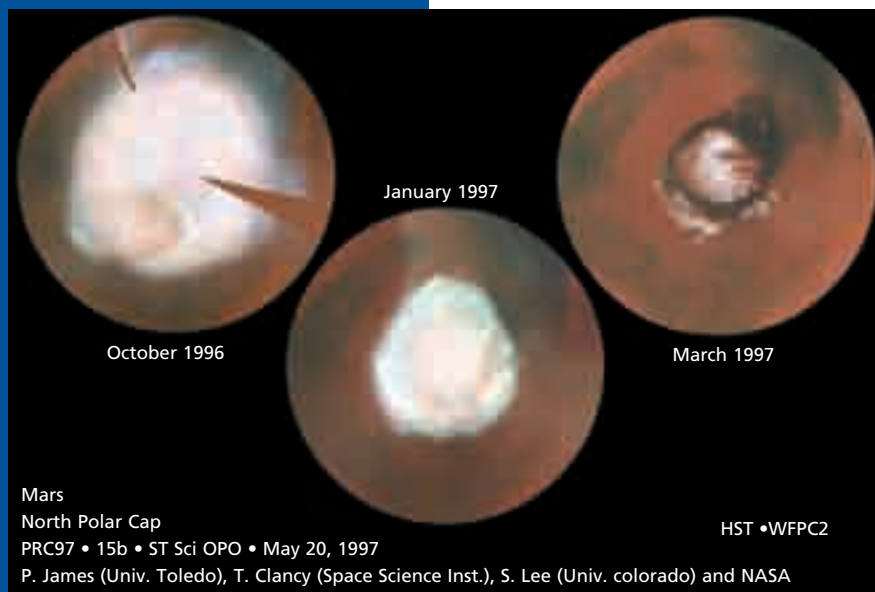


Figura 10.1. Deshielo. Esta imagen muestra el retroceso del hielo del polo norte marciano con el aumento de temperatura del planeta en octubre de 1996, enero y marzo del 97. Fuente: NASA.

En 1971, la nave Mariner 9 representó un avance en la exploración espacial ya que consiguió situarse en la órbita de Marte, a diferencia de las misiones anteriores, diseñadas para realizar observaciones del planeta en un vuelo “de paso”. Mariner 9 realizó un cartografiado sistemático del planeta, en el que emergieron estructuras totalmente inesperadas: se hallaron redes de canales y afluentes que parecían ríos secos, lo que sugirió que las condiciones en Marte debieron de ser en el pasado bien diferentes a las actuales: el agua líquida debió de fluir en su superficie. Mariner 9 prosiguió su reconocimiento hacia el norte,

topándose con un descomunal sistema de cañones, el Valle Marineris, que se extiende unos 4.000 km a lo largo del ecuador del planeta.

Los datos aportados por Mariner 9 impulsaron la siguiente misión norteamericana, la Viking, entre cuyos principales objetivos se encontraba la búsqueda de pruebas de vida en Marte y que contaba con módulos de descenso. Gracias a los datos de esta misión se hizo evidente la denominada “dicotomía marciana”, que establece una división entre sus dos hemisferios: el norte, que sólo presenta dunas y se halla situado en una cota entre dos y tres kilómetros inferior al resto del

Figura 10.2. Valle Marineris. Imagen tomada por la cámara de alta resolución (HRSC) a bordo de Mars Express, en color y 3D, que muestra una región del Valle Marineris, con estructuras quizá atribuibles a la acción del agua. Fuente: ESA/DLR/FU Berlín (G. Neukum).

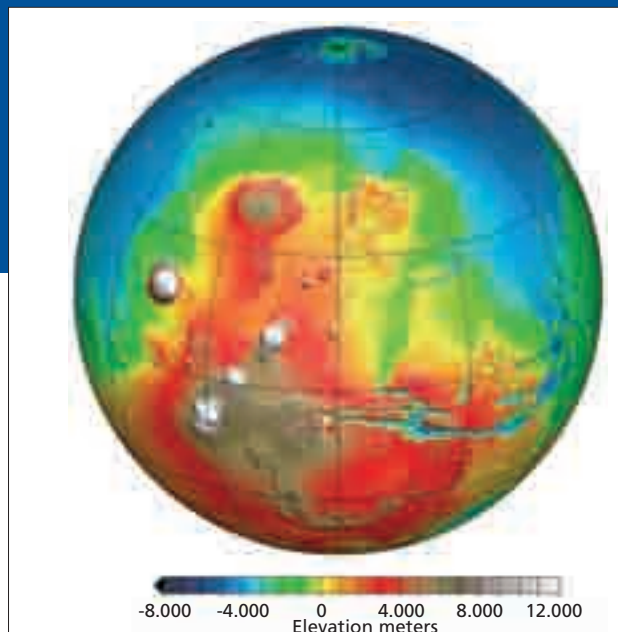


planeta, y el hemisferio sur, plagado de impactos de meteoritos, estructuras geológicas y rasgos de deformación tectónica. Sin embargo, los experimentos biológicos, que acapararon gran parte de la atención, no encontraron muestras de vida en ninguno de los lugares que visitaron los módulos de descenso.

En 1996 comenzó el viaje de la nave Mars Pathfinder, que contaba con un módulo de descenso que alojaba el rover Sojourner y cuyos análisis apoyaron la hipótesis de un pasado más

benévolo en Marte, con agua líquida en su superficie y una atmósfera más densa. El mismo año, aunque con mayor duración, partió hacia Marte la misión Mars Global Surveyor, que descubrió rastros del paso reciente de fluidos sobre la superficie marciana, así como rocas estratificadas que sugerían la existencia de lagos en el pasado y de hematita gris, un mineral que, en la Tierra, se forma en ambientes húmedos. En el año 2002, la misión Mars Odyssey aportó medidas espectrales que desvelaban la existencia

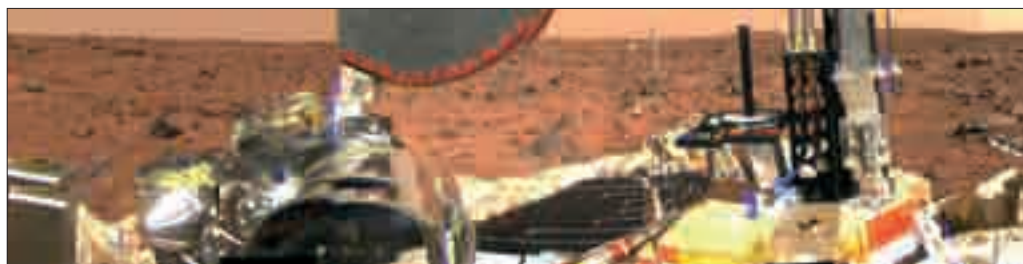
Figura 10.3. Dicotomía marciana. Este gráfico, realizado por el grupo investigador a cargo del Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA), muestra la diferencia de cota entre ambos hemisferios, con el norte situado en una cota bastante inferior. Fuente: MOLA.



de hidrógeno en abundancia, compatibles con la existencia de grandes cantidades de agua helada mezcladas con las capas superiores de suelo en extensas áreas del planeta próximas a los polos.

La avidez de noticias sobre el planeta rojo llegó a su clímax el pasado año, cuando la Agencia Espacial Europea vio, por fin, en la órbita marciana la nave Mars Express, fruto de una colaboración internacional de varios años, al tiempo que aterrizaban los rover gemelos de la NASA, Spirit y Opportunity, protagonistas de la misión Mars Exploration Rovers. El pasado enero, las señales emitidas por dos de los instrumentos a bordo de la Mars Express detectaron la existencia

Figura 10.4. Mars Pathfinder. Esta imagen muestra varios de los instrumentos de Mars Pathfinder, entre ellos antenas de comunicación y paneles solares, además de dos rampas de descenso para el rover Sojourner, que observamos a la derecha en el suelo marciano. Fuente: NASA.





de moléculas de hielo de agua en el polo sur marciano, lo que constituyó la confirmación observacional de los indicios que la Mars Odyssey había aportado de forma indirecta. Por su parte, los rover de la NASA también producen un continuo flujo de noticias prácticamente desde su amartizaje. Ambos vehículos han analizado el suelo marciano y han aportado diferentes pruebas de que las zonas donde se hallan estuvieron, hace mucho tiempo, recubiertas de agua. Entre las pruebas de Opportunity se encuentran la detección de jarosita —un sulfato de hierro hidratado que pudo haberse formado en un lago ácido—, o la toma de imágenes de diversas texturas, como pequeñas esferas o cavidades rocosas, cuya formación parece relacionada con un prolongado contacto con agua líquida. Por su parte, Spirit, tras taladrar una roca volcánica apodada “Humphrey”, advirtió la presencia de un material brillante en las grietas internas que se asemeja a los minerales que, en la Tierra, cristalizan en agua.

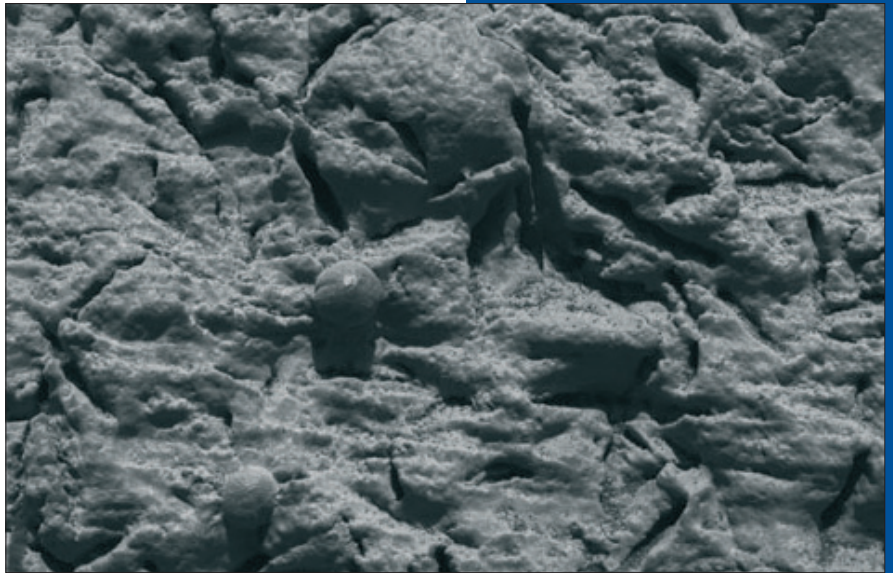


Figura 10.5. Hallazgos. Imagen microscópica tomada por el rover Opportunity que muestra texturas que quizá se originaron por el contacto de la roca con el agua líquida. Fuente: NASA.



## 11. Júpiter. El gigante magnético

**Júpiter, el planeta más masivo del Sistema Solar, se encuentra en la frontera entre los planetas y las estrellas: emite más energía que la que recibe del Sol**

Situado a una distancia cinco veces mayor a la que separa la Tierra del Sol, Júpiter es el más grande de todos los planetas del Sistema Solar, con sus 70.000 kilómetros de diámetro y una masa superior a la suma de la del resto de planetas, 318 veces la terrestre. Está rodeado de un importante sistema de anillos descubiertos por la misión Voyager 1 en 1979 y de numerosos satélites, que superan la cincuentena, aunque de ellos sólo los cuatro descubiertos por Galileo en 1610, Ío, Europa, Calisto y Ganímedes, tengan un tamaño considerable. El resto apenas

alcanza unos pocos kilómetros de diámetro.

La gran masa del planeta hace que emita al espacio, como consecuencia de la contracción gravitatoria en su interior —y del calor que ésta genera—, una cantidad de energía superior a la que recibe del Sol, si bien no alcanza la masa suficiente para inducir procesos de fusión nuclear en su interior, como ocurre en el astro rey y otras estrellas. Pero si Júpiter hubiera sido 80 veces más masivo, hoy tendríamos dos soles en nuestro cielo.

Al igual que Saturno, Urano y Neptuno, es un planeta gaseoso. Aunque probablemente posea un núcleo rocoso en su interior, no presenta una superficie sólida como la Tierra, Mercurio, Venus o Marte, y su atmósfera ocupa una gran parte del volumen total del planeta.

## Una atmósfera muy dinámica

Cuando se observa Júpiter llama especialmente la atención su sistema de bandas paralelas al ecuador. En realidad, estas bandas —a las que se llama “cinturones” cuando son oscuras y “zonas” cuando son brillantes— están formadas por unos sistemas de nubes de cristales de amoníaco muy densos, que se mueven a más de 400 kilómetros por hora. Sobre ellas se extiende una neblina de espesor muy variable compuesta de pequeñas partículas, que proceden, cerca del ecuador, de la fotosíntesis de ciertos hidrocarburos y, en los polos, del impacto de partículas energéticas sobre estas moléculas. Esto da lugar a unas largas cadenas de hidrocarburos que se condensan en altas regiones de la atmósfera. Si las condiciones de transparencia y estabilidad de la atmósfera son buenas, puede apreciarse la Gran Mancha Roja, un enorme remolino en el que bien podría caber dos veces la Tierra.

La Gran Mancha Roja permanece muy estable; su tamaño apenas ha evolucionado desde la primera vez que se observó, hace unos 300 años. Las observaciones combinadas en el rango visible y el infrarrojo del espectro indican que esta región sufre una alta presión atmosférica, en la que las nubes más altas se encuentran a una altura superior a las regiones circundantes.

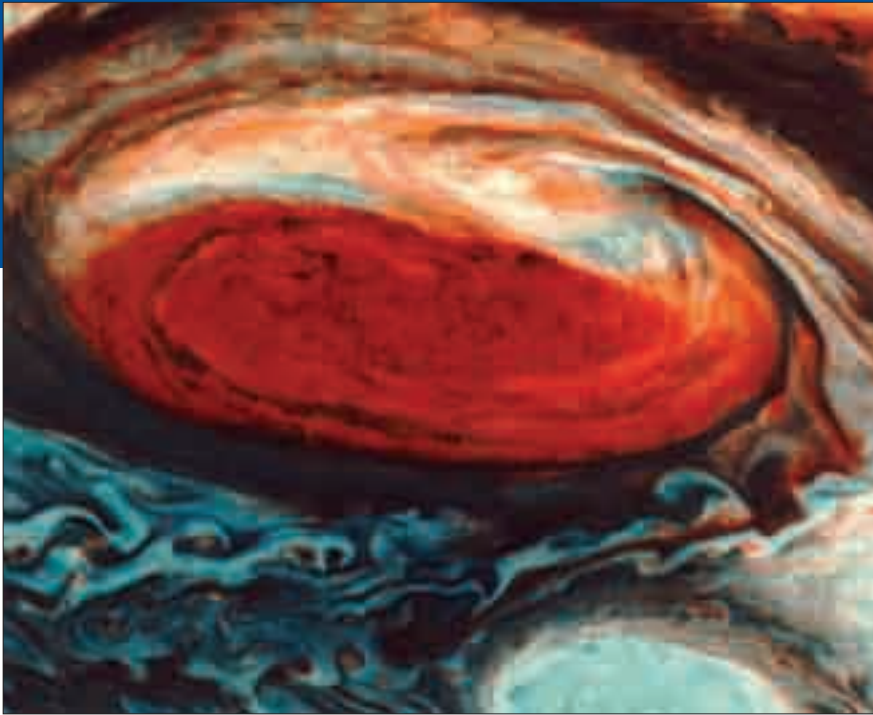


La observación de la atmósfera desde vehículos espaciales y telescopios de gran resolución ha permitido obtener imágenes en las que se aprecia una infinidad de estructuras, que a menudo cambian rápidamente. Esto indica que su dinámica es muy activa, lo que contrasta con la estabilidad de los llamados vientos zonales y de los grandes remolinos, como la Gran Mancha Roja y otras “manchas” menores, llamadas óvalos subtropicales.

Figura 11.1. Misterios. Detalle de la Gran Mancha Roja, considerada por los científicos como un enorme remolino. Fuente: NASA.







Las regiones polares muestran una espesa capa de aerosoles —la suspensión en gas de partículas ultramicroscópicas de sólidos o líquidos—, que también parece resultar bastante estable en el tiempo,

aunque se aprecian diferencias longitudinales en su estructura. Estas regiones resultan fácilmente observables usando filtros que detectan el gas metano, aunque no sea el más abundante en la atmósfera.

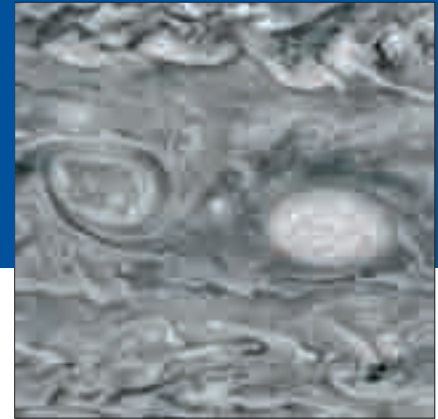


Figura 11.2. Detalle de una pareja de remolinos obtenida por las cámaras a bordo de Galileo. Mientras que el óvalo de la derecha rota en sentido contrario a las agujas del reloj, como todos los óvalos anticiclónicos en Júpiter, el de la izquierda lo hace en sentido contrario, es un ciclón. Ambos tienen un diámetro de unos 3.500 km. La diferencia entre ellos (brillo, morfología y movimiento) constituyen pistas muy importantes para comprender los procesos dinámicos en Júpiter.

## La magnetosfera y las auroras

Destaca otra característica del planeta: el intenso campo magnético que se extiende a su alrededor, originado en la capa de hidrógeno líquido, llamado "metálico", que rodea el núcleo del planeta. A partir de esta capa y del rápido movimiento de rotación de Júpiter, se generan unas corrientes eléctricas que inducen a su vez el campo magnético. Y es que el hidrógeno, sometido a las altas presiones del interior del planeta, pasa a un estado líquido en el que los electrones se comportan como si fueran libres, lo que convierte al medio en un gran conductor de la electricidad, de ahí la denominación de metálico.

La magnetosfera, región de alcance de este campo magnético, con una extensión superior a los 650 millones de kilómetros, está llena de partículas energéticas procedentes del Sol y que forman parte del llamado viento solar. El campo magnético atrapa estas partículas, que producen una radiación de características similares a los llamados cinturones de Van Allen en el entorno terrestre, pero de mucha mayor intensidad.

Al igual que en las zonas polares de la Tierra, en Júpiter también se producen auroras cuando su campo magnético atrae las partículas del viento solar y éstas interactúan con los gases de la atmósfera. El satélite *Ío* que por su proximidad a Júpiter presenta una gran interacción con las partículas de su magnetosfera, también contribuye a un aumento de las emisiones, que superan en mil veces las terrestres.



Figura 11.3. Belleza. Aurora en el polo norte de Júpiter obtenida en el ultravioleta lejano. Fuente: HST/NASA.

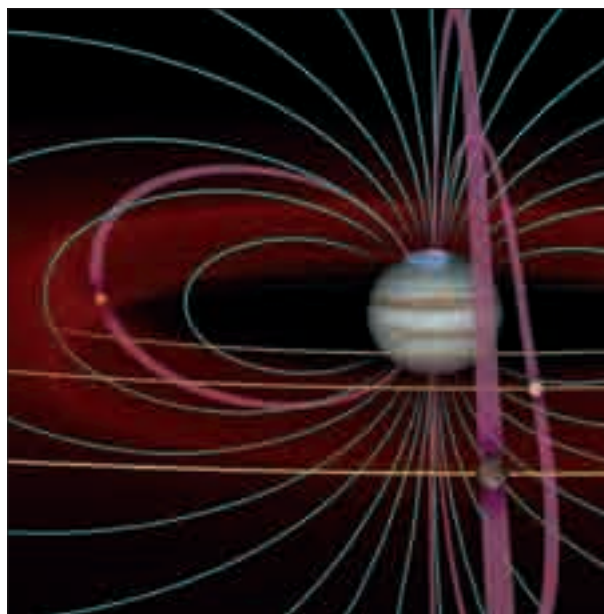


Figura 11.4. Recreación gráfica. Concepción artística del campo magnético de Júpiter, en la que se aprecia la interacción de los satélites y una aurora boreal. Fuente: NASA.

## 12. Júpiter. Un sistema solar en miniatura

**H**asta la fecha se han descubierto 63 satélites orbitando alrededor del planeta, de naturalezas muy dispares. Galileo descubrió cuatro de ellos: Ío, Europa, Ganímedes y Calisto

Júpiter y las lunas que orbitan en torno a él se comparan a menudo a un pequeño sistema solar. Por la gran masa que contiene, la atracción que ejerce la gravedad de Júpiter es tan potente que cualquier cometa o asteroide que pase por su campo de acción quedará atrapado.

Éste es el curioso origen de algunos de los satélites de Júpiter. Rocosos unos y otros helados, se cree que alguno de los satélites jovianos podría ofrecer las condiciones necesarias para la aparición de la vida. Hoy se conoce la nada despreciable cantidad de 63 satélites en torno a

Júpiter, algunos de ellos descubiertos hace poco tiempo.

### El descubrimiento de Galileo

En 1610, cuando Galileo descubrió unos puntos brillantes alineados junto a Júpiter, pensó que eran estrellas. Luego confirmaría que se trataba en realidad de cuatro satélites, para gran sorpresa de una sociedad que hasta entonces sólo conocía la existencia de uno, la Luna.

Ío, Europa, Ganímedes y Calisto, los satélites galileanos, giran en torno a Júpiter en pequeñas órbitas circulares con baja inclinación; se conocen también como satélites interiores o regulares, pues orbitan relativamente cerca del planeta. Probablemente estos objetos se originaron a partir del disco de polvo y gas que rodeaba Júpiter



Figura 12.1. Imágenes de satélite. De izquierda a derecha: Tebe, Amaltea y Metis desde la nave Galileo. El gran cráter de impacto en Tebe mide 40 kilómetros. Fuente: NASA.

durante su formación, al igual que los planetas respecto al Sol.

La sonda Voyager se aproximó a Ío en 1979. No vio ningún cráter en su superficie, a pesar de que los meteoritos la bombardean. El motivo: el satélite se renueva continuamente por una intensa actividad volcánica que lo baña con torrentes de lava. Altas montañas, alguna de las cuales dobla en altura al Everest, inmensas calderas y géiseres que lanzan azufre a más de 500 kilómetros de altura completan el inhóspito paisaje.

### La otra Europa

Europa, en cambio, está cubierta de una capa de hielo. Según las imágenes obtenidas por la sonda Galileo, esto podría revelar la presencia de un océano

líquido bajo la superficie, donde quizá se dé algún tipo de vida primitiva.

Calisto está surcado por una cantidad de cráteres similar a la que presentan los cuerpos más antiguos del Sistema Solar, como la Luna, lo que indica que apenas ha variado en los últimos 3.000 millones de años. Y en Ganímedes, el mayor, se alternan unas regiones oscuras cubiertas por cráteres con otras, más claras, donde se aprecian grandes fallas.

Ío, Europa y Ganímedes están condicionados por sus compañeros de viaje. El tiempo que emplea Ganímedes en dar una vuelta en torno a Júpiter es el doble que el de Europa, y el de Europa, el doble que el que tarda Ío. Esta precisión en sus movimientos provoca que los tres se alineen con respecto a Júpiter cada cierto tiempo y sumen así sus fuerzas gravitatorias. Como resultado de estas fuerzas —llamadas también “de marea” por su parecido a las que la Luna ejerce sobre la Tierra—, sus órbitas se alteran y los volcanes de Ío se activan. Y si Europa albergase un océano oculto bajo su capa de hielo, serían precisamente estas



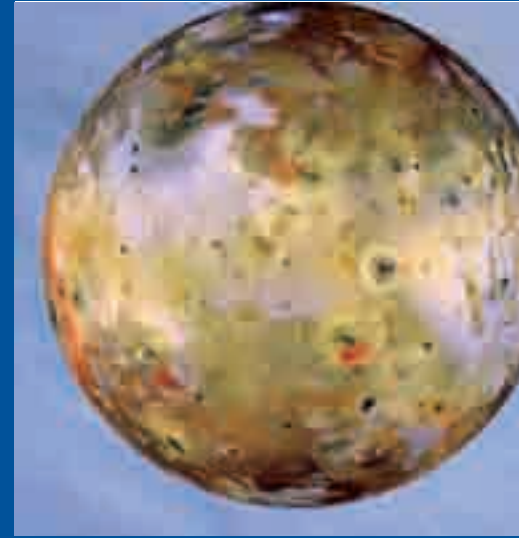
mareas las que mantendrían en movimiento sus aguas.

Deslizándose entre las órbitas de los hermanos mayores, otros cuatro satélites pueblan las cercanías de Júpiter: Metis, Adrastea, Amaltea y Thebe. Su tamaño oscila de los escasos ocho kilómetros de diámetro de Adrastea a los 84 de Amaltea. A pesar de su tamaño, estos satélites desempeñan una función llamativa: pequeños fragmentos de materia interplanetaria chocan contra ellos y, como consecuencia, se lanzan al espacio nubes de partículas de polvo que dan forma a los dos anillos que rodean

Júpiter, muy tenues para ser vistos desde la Tierra.

Junto a ellos también gira un enjambre de lunas irregulares, con órbitas grandes y elípticas. Se trata de satélites muy pequeños —once de los veinte con diámetros conocidos ni siquiera alcanzan los diez kilómetros—, entre los que destaca Himalia, de 180 kilómetros.

Se piensa que estos objetos fueron capturados por el potente campo gravitatorio de Júpiter cuando aún no había finalizado su formación, pues en su mayoría giran en sentido contrario a la rotación del planeta.



## La familia crece

Gracias a los avances en la observación astronómica, se han atisbado cientos de pequeños cuerpos rocosos con diámetros mayores al kilómetro girando alrededor de Júpiter. En los últimos dos años se han descubierto 23 nuevos satélites irregulares. Unidos a los 22 descubiertos en 2001 y 2002, suman la nada despreciable cantidad de 63 satélites. ¿Se hacen una idea del maravilloso espectáculo que debe de contemplarse en el firmamento nocturno de Júpiter? Lástima que en el planeta no exista una superficie donde tumbarse y que su atmósfera de hidrógeno y helio resulte totalmente irrespirable, por no hablar de las temperaturas que habría que soportar, inferiores a los cien grados bajo cero.



Figura 12.2. Mini Sistema Solar. Júpiter y sus cuatro lunas mayores: Ío, Europa, Ganímedes y Calisto. Fuente: NASA.



Figura 12.3. De cerca. Detalles de Ío, Europa, Ganímedes y Calisto. Fuente: NASA.



## 13. El coloso más ligero

**S**aturno, caracterizado por los vistosos anillos que lo rodean, es el segundo planeta en volumen del Sistema Solar. Es tan poco denso que podría flotar en el agua

Contemplar Saturno depara una de las mayores satisfacciones tanto al iniciado en la astronomía como al principiante. Y es que los vistosos anillos que caracterizan a este planeta, el segundo en volumen y masa del Sistema Solar, se pueden apreciar fácilmente con la ayuda de un telescopio de potencia media.

Los anillos que rodean Saturno no son más que unas acumulaciones de bloques de hielo de tamaño muy diverso, si bien parecen predominar entre ellos los de diez centímetros. Estos discos son extraordinariamente planos: mientras que su extensión

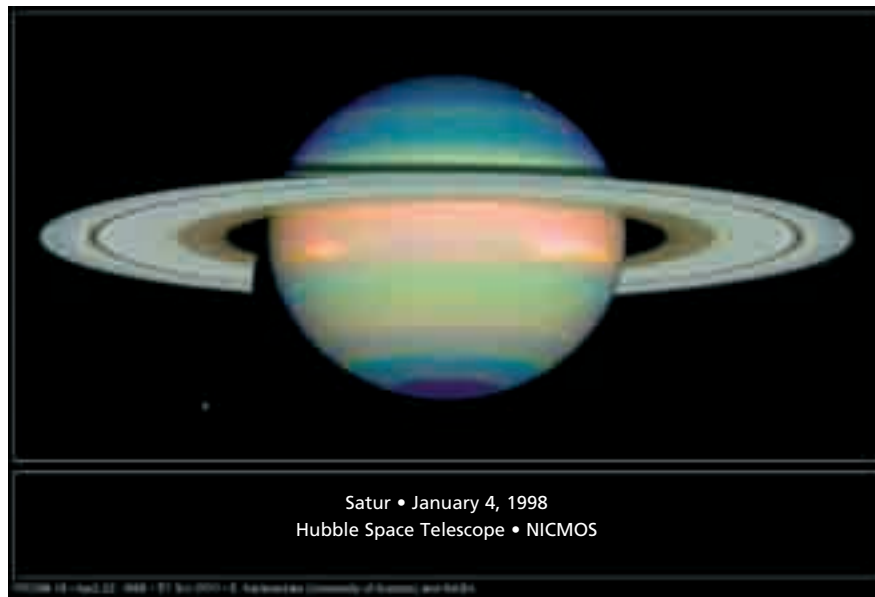
alcanza los 270.000 kilómetros, su espesor no supera los cien metros. Toda la masa que contienen sería suficiente para formar un satélite típico. Precisamente, una hipótesis postula que se originaron a partir de los restos de un antiguo satélite que se desintegró.

La densidad total del planeta es también extremadamente baja: sólo alcanza los 0.69 gramos por centímetro cúbico. Como la del agua del mar es de 1.03, resulta que Saturno podría flotar en la superficie del océano... si fuera lo suficientemente grande para albergarlo.

Pero el planeta también resulta peculiar por sus inmensas neblinas y la profundidad de sus nubes, posiblemente de amoníaco. Su atmósfera se compone también de hidrógeno y helio, en una proporción similar a la del Sol.



Figura 13.1. Característico. Detalle de los anillos. Fuente: NASA.



Satur • January 4, 1998  
Hubble Space Telescope • NICMOS

Figura 13.2. Singular. Saturno, en falso color. Fuente: HST.

### Lluvia de amoníaco

Las neblinas de amoníaco se condensan sobre el planeta de una manera parecida a la del agua que en la Tierra da lugar a las nubes y la lluvia. Por eso en Saturno, como en Júpiter, puede caer un chaparrón de amoníaco. Un sitio tan pestilente no resulta muy atractivo para vivir, aún menos después de medir la temperatura de las zonas de su atmósfera que pueden observarse desde la Tierra: 145 grados bajo cero.

Por si éstas no fueran trabas suficientes, los vientos tampoco invitan

a pasear por un planeta que, de todos modos, carece de superficie sólida. Para estar en Saturno hay que hacer frente a corrientes de más de 1.600 kilómetros por hora.

Como su eje de rotación está bastante inclinado —algo más que el de la Tierra— el planeta tiene estaciones bien definidas. En invierno, el hemisferio norte recibe la luz menos perpendicularmente que en verano, lo que entraña cambios climáticos, como en nuestro planeta. Este movimiento permite además que desde la Tierra se puedan admirar



Figura 13.3. Reproducción. Las “estaciones” de Saturno. Fuente: NASA.

perspectivas muy diferentes del planeta anillado.

Al igual que Júpiter, Saturno tiene una fuente interna de calor: emite más energía de la poca que le llega desde el Sol, sólo una centésima parte de la que recibe la Tierra. No obstante, este gigante gaseoso se encuentra a nueve veces y media más lejos del Sol que nuestro planeta. La energía que emite procede de una pequeña contracción causada por la gravedad y de la caída hacia su interior del helio al condensarse.

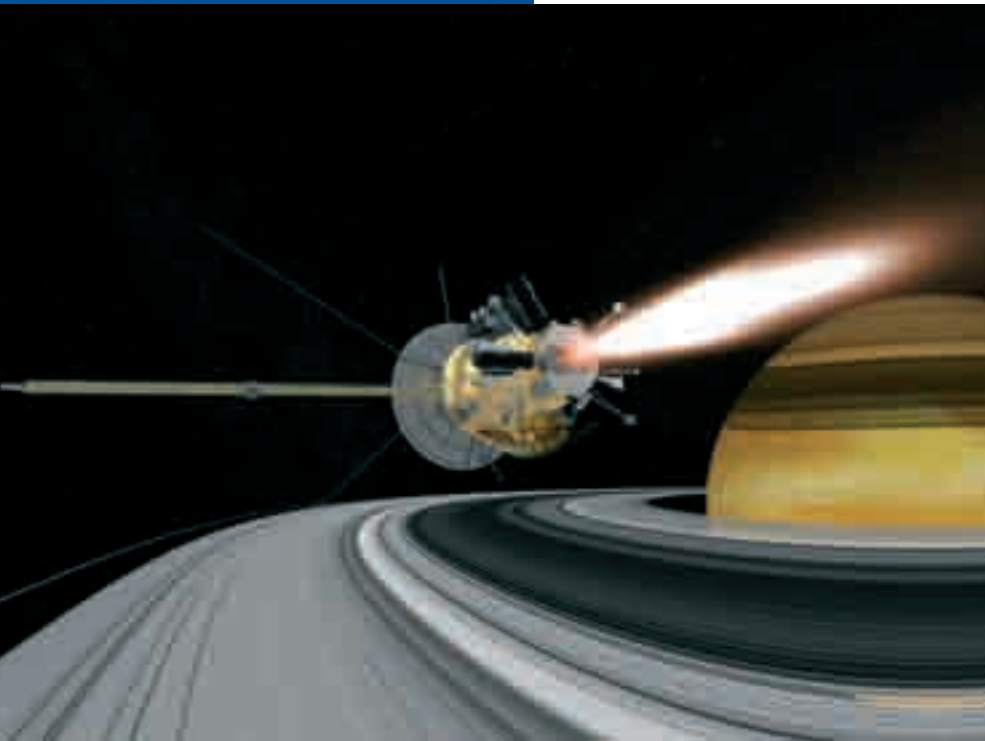
Yendo precisamente hacia el interior del planeta, se observa un aumento de la presión, como ocurre al sumergirse más y más en el mar, aunque, en cambio, la temperatura en Saturno aumenta conforme nos sumergimos. Las presiones y las temperaturas llegan a ser tan altas, que el hidrógeno se vuelve líquido y adquiere algunas propiedades de los metales, como la transmisión de

la electricidad, lo que provoca que Saturno despliegue un intenso campo magnético. Si aún nos internamos más hacia el corazón del planeta, terminaremos topándonos, muy posiblemente, con un núcleo “rocoso” formado de silicio, carbono, magnesio, aluminio y otros materiales. Este núcleo contendría tanta materia como todo el conjunto de la Tierra.

### Una aceleración equívoca

Muy recientemente, la nave Cassini, que orbita en estos momentos en torno a Saturno, ha mostrado que el método usado tradicionalmente para medir la rotación del planeta ofrece ahora resultados bien distintos. El periodo de rotación medido por Cassini es seis minutos mayor que el que midieron las naves Voyager en los años ochenta.





Resulta imposible que el planeta se haya acelerado tanto en tan pocos años, así que el error se encuentra en el método de medición, basado en el campo magnético del planeta. Hasta que la duda se disipe, los científicos desconocen un dato tan básico como su periodo de rotación. Y quizá cuando al fin se sepa se esclarezca también el misterio de los vientos de Saturno, que soplan con mucha más fuerza hacia el Este que hacia el Oeste, a diferencia de lo que ocurre en su “gemelo” Júpiter.

Figura 13.4. Exploración. La nave Cassini se aproxima a los anillos de Saturno. Fuente: NASA.

## 14. El sistema extravagante

**L**os satélites de Saturno se revelan sorprendentes tanto individualmente como en grupo, con rasgos únicos en el Sistema Solar

Aunque las lunas de Saturno parecen estar a la sombra de los espectaculares anillos del planeta, Saturno posee 33 satélites descubiertos hasta la fecha que constituyen una sorprendente y diversificada colección. De ellos, 30 tienen nombre propio y los restantes están a la espera de recibirlo debido a su reciente descubrimiento, dos este mismo año y uno el pasado.

Las lunas de Saturno representan una enorme variedad de objetos: desde un satélite como Titán, mayor que algunos planetas y con una espesa atmósfera constituida principalmente por nitrógeno, hasta objetos irregulares de

pocos kilómetros de tamaño y constituidos por mezclas de rocas y hielo. Todos los satélites, a excepción de Febe e Hiperión, rotan de forma síncrona o, al igual que la Luna, presentan siempre la misma cara hacia el planeta. Sus periodos orbitales, o lo que tardan en dar una vuelta alrededor del planeta, varían desde las casi 15 horas que tarda el satélite Pan hasta los más de tres años y medio que tarda el más alejado de los conocidos hasta ahora, Ymir.

### Peculiaridades del grupo

La vida en común de este numeroso conjunto de satélites da lugar a una gran variedad de curiosas circunstancias: por ejemplo, Epimeteo y Jano tienen un acuerdo único en todo

## Curiosidades

### Los satélites troyanos

En un sistema de dos cuerpos que giran uno alrededor del otro, como el de la Tierra y el Sol, se da un fenómeno producto de la combinación de sus fuerzas gravitatorias: dos puntos de la órbita del cuerpo menor, en este caso la Tierra, localizados sesenta grados por delante y por detrás de ésta, constituyen la guarida ideal para un tercer cuerpo de poca masa que busque una órbita estable. Estos objetos reciben su nombre, troyanos, de Aquiles, Patroclo y Héctor, primeros

satélites de este tipo hallados alrededor de Júpiter. Pero Júpiter no tiene la exclusiva —aunque sí el récord, con unos 1.700 objetos colocados en sus puntos estables, la mayoría tan pequeños que no se consideran satélites—, sino que en el sistema de Saturno también abunda este fenómeno: el satélite Tetis viaja escoltado por sus troyanos Telesto y Calipso, uno delante y otro detrás, y Dione se halla protegido por su troyano Helena, que camina delante.

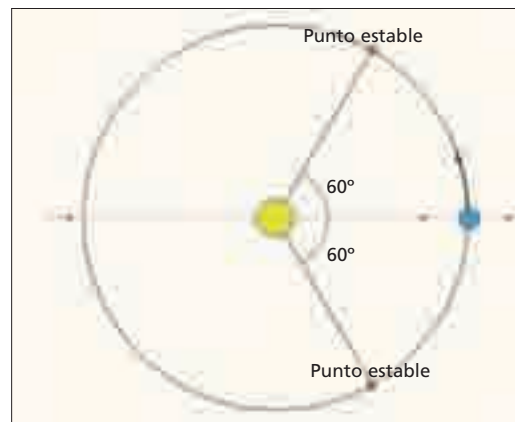
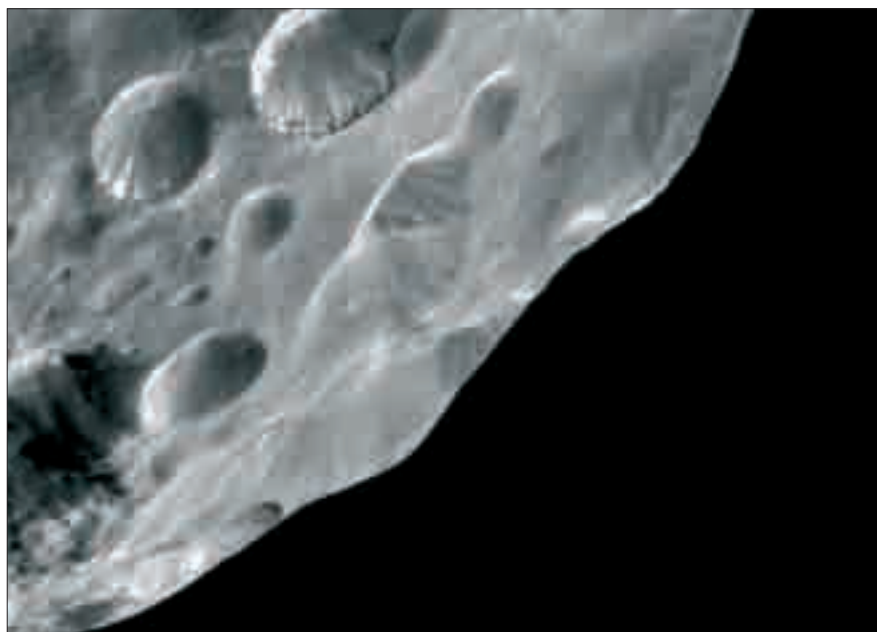


Figura 14.1. Puntos estables: esquema con las posibles localizaciones de los satélites troyanos.

Figura 14.2. La Luna castigada. Imagen de Febe, tomada por la nave Cassini-Huygens. Fuente: ESA.





el Sistema Solar: con unos diámetros respectivos de 115 y 178 kilómetros, la distancia que los separa apenas alcanza los 50 kilómetros, lo que parece anticipar una futura colisión. Pero su destino es bien distinto: una vez cada cuatro años los satélites se aproximan tanto que se intercambian las órbitas; es decir, en una especie de ballet cósmico, el más exterior pasa a la órbita interior y viceversa, y a continuación retoman su nuevo rumbo sin sobresaltos.

Otro fenómeno curioso aunque frecuente en las lunas de Saturno es la resonancia orbital, que se traduce, de nuevo, en un acompasado baile: así, el periodo orbital de Mimas es exactamente la mitad que el de Tetis, por lo que se cruzan siempre en la misma posición relativa. Encélado y Dione también comparten esta resonancia, en tanto

que Titán e Hiperión se encuentran en una resonancia 3:4, es decir, mientras Titán da cuatro vueltas alrededor de Saturno, Hiperión da tres.

### Curiosidades individuales

Muchos de los satélites de Saturno presentan peculiaridades que convierten el sistema en una caja de sorpresas. Japeto, por ejemplo, constituyó un misterio desde su descubrimiento por la diferencia de albedo, o luz reflejada, entre sus dos hemisferios; en tanto que la cara que queda detrás en su giro alrededor de Saturno parece cubierta de hielo, poco se conoce de la otra mitad, diez veces más oscura y recubierta por una capa de material oscuro de procedencia externa. Este hecho despistó a

Figura 14.3. La familia al completo. Este esquema muestra las diferencias de tamaño y aspecto de algunas de las lunas de Saturno. Fuente: NASA.

Giovanni Domenico Cassini, un ávido observador de Saturno y sus lunas, que sólo podía ver a Japeto cuando éste se movía en la parte derecha de Saturno, o cuando ofrecía a la Tierra la cara brillante. Sin embargo, al alcanzar el extremo opuesto de la órbita y ofrecer la cara oscura, el satélite parecía desaparecer por completo.

Febe, hasta el año 2003 el más lejano de los satélites conocidos de Saturno, a una distancia de casi trece millones kilómetros del planeta, constituye un caso especial. Febe orbita a Saturno en dirección contraria (opuesta a la dirección de las otras órbitas de satélites), en un plano más cercano a la eclíptica que al plano ecuatorial de



Figura 14.4. Japeto. En esta imagen observamos la gran diferencia entre sus dos hemisferios. Fuente: NASA.



Figura 14.5. Encelado. Esta luna, compuesta mayormente por agua helada, muestra la superficie helada más limpia del Sistema Solar y se muestra casi blanca. Fuente: NASA.



Figura 14.6. Mimas. El cráter de Mimas, de 130 km de ancho, fue producto de una colisión con un cuerpo que, de haber sido algo mayor, hubiera desgajado al satélite. Fuente: Bjorn Johnsson.

Saturno (casi tumbado). Tarda 550 días en dar un giro alrededor de Saturno y sólo nueve horas sobre sí mismo. Estas características orbitales hacen pensar que Febe es un asteroide capturado y que tiene una composición poco modificada desde el momento en que se formó en el exterior del Sistema Solar. Se trata del primer objeto fotografiado a una distancia suficientemente pequeña para mostrar su forma y el brillo de su superficie, y ha sido el primer satélite estudiado con detalle por la misión Cassini-Huygens, que lo ha fotografiado a 2.365 km de distancia.

## 15. Un mundo alrededor de Saturno

**T**itán es, aparte de la Tierra, el único cuerpo del Sistema Solar que puede albergar océanos líquidos, aunque no de agua, sino de metano

Este misterioso mundo anaranjado, mayor que Mercurio y algo menor que Marte, es, después de Ganimedes, el segundo satélite más grande de todo el Sistema Solar. Sin embargo, el interés de Titán no radica en su tamaño: se trata de la única luna que presenta nubes y una espesa atmósfera similar a la de los planetas, y puede ser el único cuerpo del Sistema Solar, aparte de la Tierra, que alberga océanos y sobre cuya superficie llueve —no agua, sino metano—. Los científicos creen que las condiciones actuales de Titán se asemejan a las que existían en la Tierra hace miles de millones de años, antes de que la vida

comenzara a “bombear” oxígeno a la atmósfera.

### El salto a la fama

Aunque Titán fue descubierto en 1655 por Christiaan Huygens, pasaron varios siglos hasta que comenzó a acaparar la atención de los científicos. En 1908, el astrónomo español Comas Solá observó que el brillo de Titán disminuía del centro hacia los bordes, e intuyó la existencia de una atmósfera, hipótesis que Gerald P. Kuiper confirmó en 1944 al descubrir indicios de gas metano en el satélite. El descubrimiento de la atmósfera originó especulaciones sobre la temperatura de Titán y sobre la posibilidad de que albergara vida, pero los resultados de la misión Voyager anulaban estas esperanzas. Gracias



Figura 15.1. Concepción artística de Saturno y Titán.



Figura 15.2. Hacia Titán. La nave Cassini, en el momento de liberar la sonda Huygens.  
Fuente: Jet Propulsion Laboratory.

a Voyager se comprobó que la densidad de la atmósfera de Titán supera la de la Tierra, y que genera una presión sobre la superficie algo mayor que en nuestro planeta, similar a la del fondo de una piscina. Al igual que en la atmósfera terrestre, en la de Titán predomina el nitrógeno, pero el resto de los componentes, como el metano y otros compuestos orgánicos, establecen grandes diferencias. Se piensa que la presión atmosférica, en conjunto con la temperatura ( $-179^{\circ}\text{C}$ ), puede permitir la existencia de lagos de metano en la superficie de Titán, dato que la misión Voyager no pudo comprobar porque se encontró con una sólida capa de nubes, ópticamente impenetrable.

### Presente y futuro

El fracaso de Voyager en su intento de observar la superficie de Titán generó aún mayor curiosidad entre los científicos, que comenzaron a organizar una misión capaz de

desentrañar los misterios de la atmósfera y la superficie del satélite. Se gestó así Cassini-Huygens, la misión científica más ambiciosa realizada hasta la fecha, que despegó desde Cabo Cañaveral (EE.UU.) el 15 de octubre de 1997. Se compone de una nave de casi seis toneladas, Cassini, que alberga varios instrumentos científicos para el estudio de Saturno, sus anillos y sus satélites, y una sonda, Huygens, destinada a atravesar la atmósfera de Titán y aterrizar en su superficie. Actualmente, la nave se encuentra en órbita alrededor de Saturno y ya ha comenzado a realizar las exploraciones del planeta y de los satélites. El 26 de octubre de 2005 Cassini sobrevoló Titán a una altura de 1.200 kilómetros de su superficie a una velocidad de seis kilómetros por segundo. Todos los instrumentos estuvieron dispuestos para extraer la máxima información: la reducida distancia permitió obtener muestras de la alta atmósfera de Titán, analizarlas y estudiar su

composición. En esta labor participaron dos instrumentos de Cassini, INMS y CAPS, capaces de medir *in situ* la composición y la densidad de la estratosfera de Titán y las partículas de su ionosfera, respectivamente. Además de estas medidas pioneras, la gran proximidad de Cassini a Titán permitió tomar imágenes del satélite que llegan a mostrar detalles menores de 100 metros en algunas regiones del disco, y también fotografió con gran resolución la zona elegida para el aterrizaje de la sonda Huygens, que tuvo lugar el 14 de enero de 2005.

Ni siquiera la opacidad de las nieblas de la atmósfera de Titán constituye un obstáculo para Cassini, ya que los instrumentos VIMS y CIRS son capaces de “ver” a través de las nubes y nos mostrarán detalles de la superficie de Titán hasta ahora escondidos. El radar a bordo de la nave nos revelará, finalmente, la naturaleza sólida o líquida de la superficie de Titán.

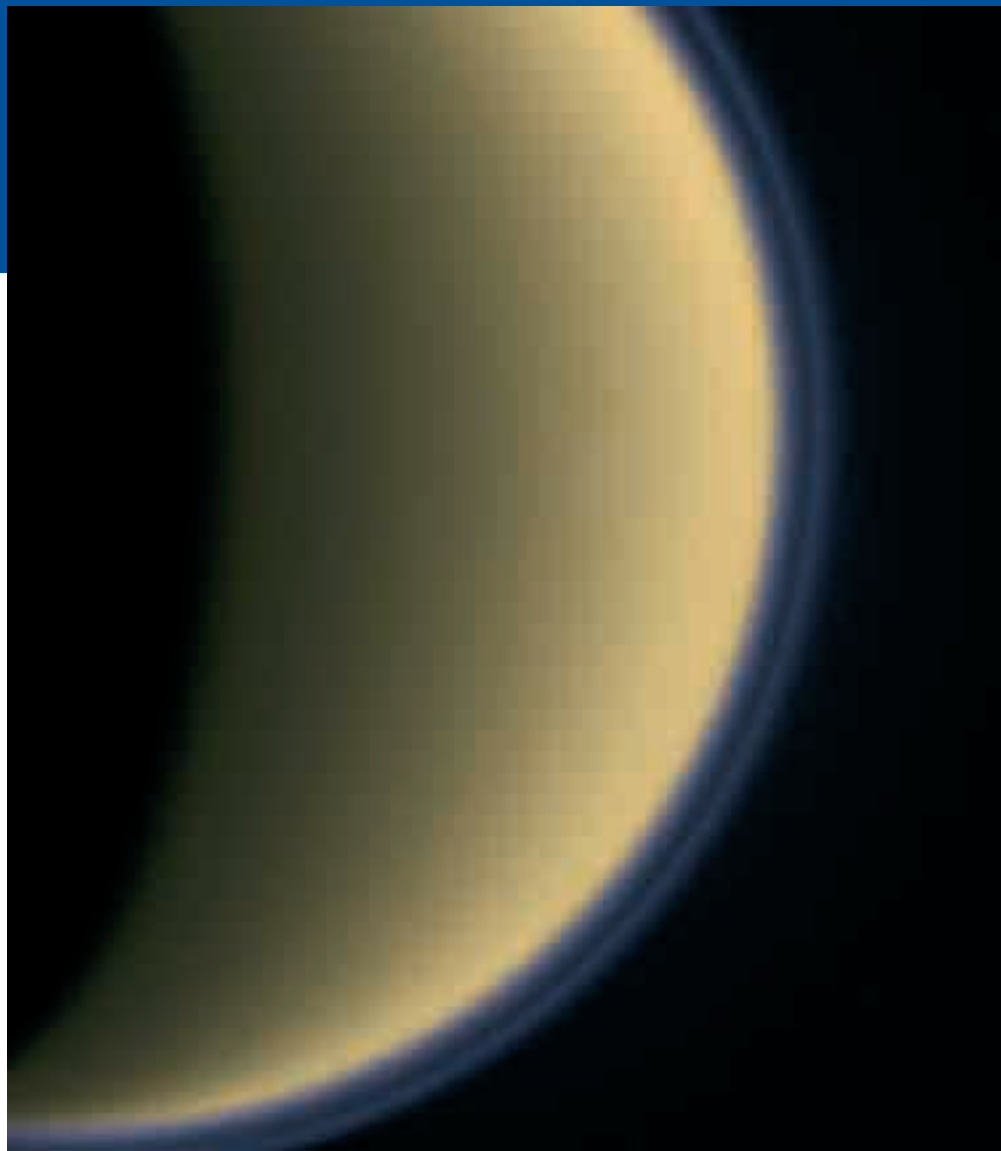


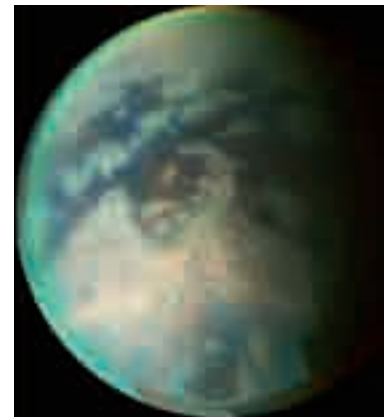
Figura 15.3. Neblina. Sobre la atmósfera de Titán se forma una espesa neblina debido a la ruptura de las moléculas de metano por la radiación solar.



Figura 15.4. Concepción artística. La sonda Huygens aterrizando sobre la superficie de Titán. Fuente: ESA.

## Titán, al descubierto

El espectrómetro VIMS, alojado en la nave Cassini-Huygens, ha obtenido imágenes en diferentes longitudes de onda que permiten ver a través de la densa capa de nubes del misterioso satélite de Saturno. Las imágenes revelan una superficie heterogénea, con marcadas diferencias de brillo y con estructuras circulares, lineales y sinuosas que apuntan a que Titán ha sufrido impactos de meteoroides que han dibujado cráteres en su superficie, y que probablemente presente actividad geológica y tectónica. Estos descubrimientos abren un apasionante panorama para el estudio de cómo la erosión, la química, la geología, la dinámica atmosférica o la climatología han dado forma a un satélite que bien podría haber sido la Tierra hace miles de millones de años.



Fuente: NASA/ESA/ASI.

## 16. El planeta tumbado

**U**rano, descubierto por casualidad, rota sobre sí casi completamente inclinado

Todo en la historia de Urano parece deberse a la casualidad. William Hershell lo descubrió mientras llevaba a cabo una rutinaria campaña de observación estelar; hasta entonces se pensaba que este planeta no era más que otra estrella en el firmamento. Tiempo después, otros astrónomos se dieron cuenta de que Urano se desviaba de la órbita que en teoría debía seguir. Hubo quien pensó que la ley de la gravedad fallaba en entornos tan lejanos: este planeta se encuentra a una distancia veinte veces mayor a la que separa el Sol de la Tierra. Otros se aventuraron a decir que Urano se deslizaba en un medio “resistente”, que lo iba frenando. Pero hasta 1846

no hubo certeza de que el motivo de estas rarezas residía en la influencia gravitatoria de un nuevo planeta, aún más remoto: Neptuno.

A diferencia del resto de planetas, Urano rota casi completamente “tumbado”. Esto se debe a que su eje de rotación es prácticamente paralelo al plano de su órbita, lo que hace que este planeta, apenas observable desde la Tierra, muestre su polo norte y su polo sur, alternativamente y casi de frente, al Sol.

Por este motivo, desde la Tierra Urano presenta una geometría muy diferente según el momento en que se le observe. Mientras que en la época de Voyager 2 (1986) sólo podía verse el Hemisferio Sur, cuyo polo apuntaba al Sol, a partir de 1997 ya se comenzó a apreciar parte del Hemisferio Norte. Como ocurre en la Tierra, la

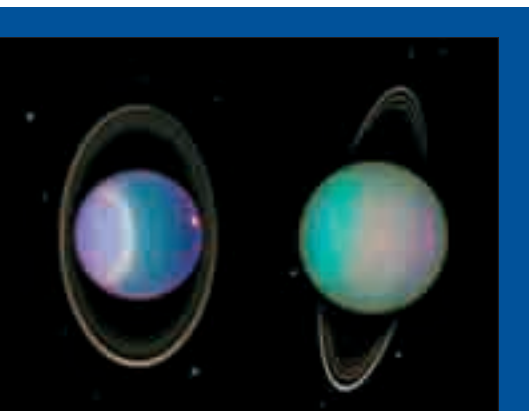


Figura 16.1. Tumbado. El planeta Urano y algunos de sus satélites.  
Fuente: NASA.

inclinación del eje es la causante de las “estaciones” del año de Urano.

Eso sí, la primavera, por ejemplo, no es precisamente envidiable. Lo normal es que la temperatura no suba de los 180 grados bajo cero y que estallen terribles tormentas. Para esperar la llegada de un tiempo más benigno hay que armarse de paciencia: allí no será verano hasta 2007. Y es que el tiempo en Urano se cuenta de otro modo. La esperanza media de vida de un hombre, suponiendo que pudiera vivir allí, sería de sólo un año. Claro que un año de Urano equivale a 84 terrestres. Los mismos 84 que dura la noche —o el día— en sus polos.

La causa de la inclinación de su eje se encuentra, muy probablemente, en un gran objeto, de entre una y tres veces la masa de la Tierra, que impactó violentamente cuando el planeta estaba aún en formación. Los científicos son de esta opinión porque tanto su sistema de anillos como sus satélites mayores presentan esta misma particularidad. Otra posibilidad contempla que fuera aquel impacto el que “desgajase” de la masa del planeta sus satélites.

## La gran bola azul

Urano tiene la apariencia de una gran bola azulada. Su atmósfera, muy profunda, está compuesta fundamentalmente por hidrógeno

—83%— y helio —15%—, pero es el 2% de metano, un gas que absorbe el color rojo y por tanto refleja más el azul, el que le da su homogénea apariencia.

Al contrario que sus compañeros gigantes, Júpiter, Saturno y Neptuno, las primeras observaciones desde Tierra dejaban ver un planeta sin apenas contrastes en su atmósfera. En 1976, tras la incorporación a los telescopios de detectores con tecnología CCD —que luego se aplicaría a las cámaras de vídeo domésticas—, se pudieron obtener imágenes del planeta en una región muy estrecha del espectro, precisamente donde el gas metano de la atmósfera es más absorbente. Gracias a estas imágenes se constataron algunos matices en el color homogéneo del planeta, lo que sugirió la presencia de unas capas altas de neblina en su atmósfera, como ocurre en Júpiter. La teoría termodinámica también prevé la existencia de nubes de cristales de metano. Y es que el frío que azota Urano es tan intenso que ni este gas escapa a congelarse.

Por fin, en 1997, el telescopio espacial Hubble consiguió distinguir una estructura de bandas en el Hemisferio Norte, similares a las de los otros planetas gaseosos. Y ya en julio de este mismo año se han logrado detectar algunas nubes en el Hemisferio Sur gracias al telescopio Keck II, de 10 metros de apertura, situado en Hawái.



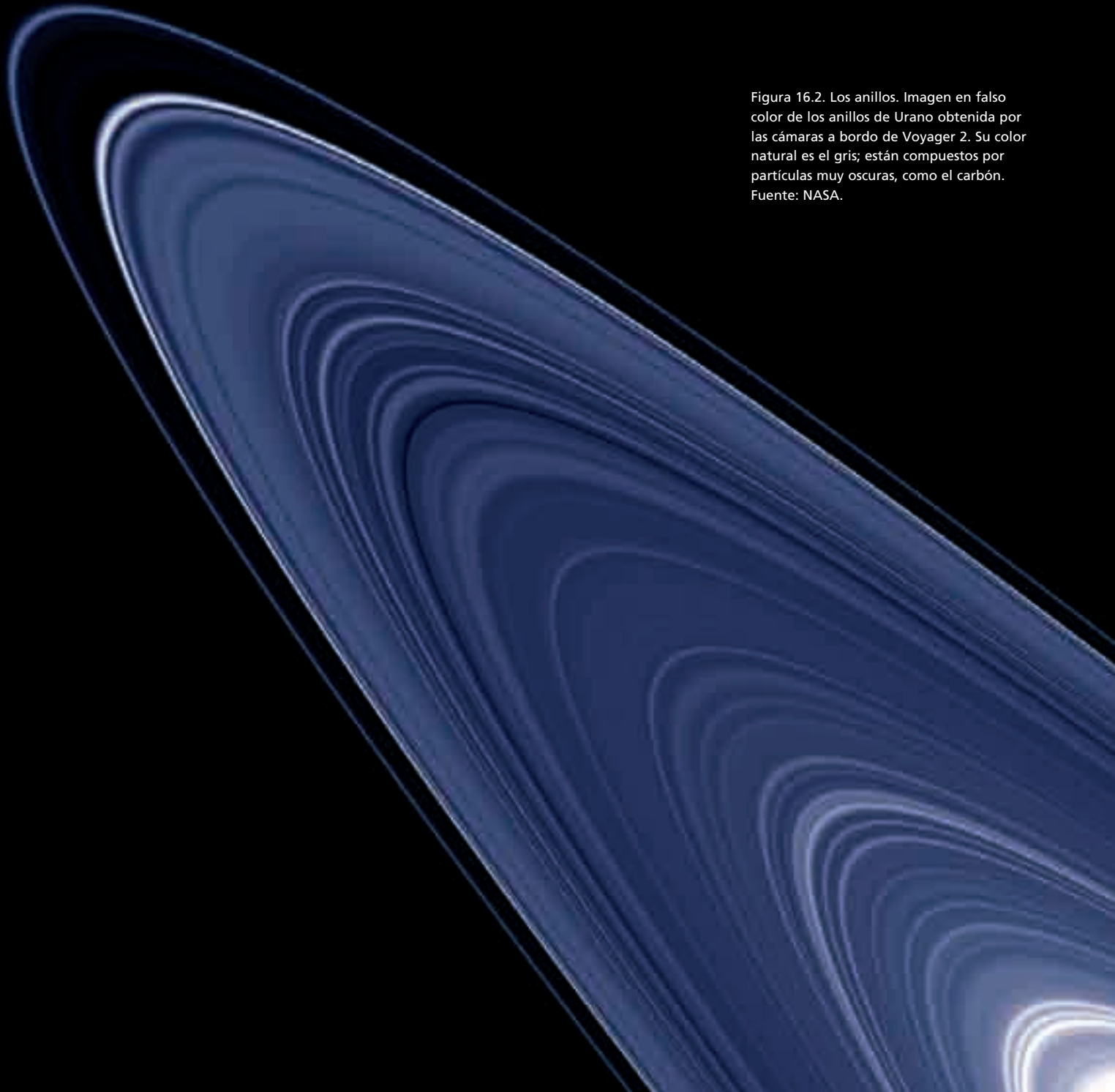


Figura 16.2. Los anillos. Imagen en falso color de los anillos de Urano obtenida por las cámaras a bordo de Voyager 2. Su color natural es el gris; están compuestos por partículas muy oscuras, como el carbón. Fuente: NASA.

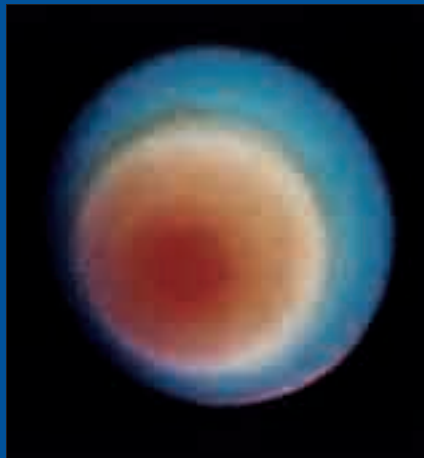


Figura 16.3. Imagen parcial. Bandas concéntricas en torno al polo sur de Urano, vistas por la Voyager 2 en 1986.

Fuente: NASA.

Al contrario que Júpiter y Saturno, que irradian más de un 70% de la energía que absorben del Sol, Urano sólo emite un 14% de exceso energético, en contraste además con Neptuno, que con similares

características de composición, tamaño y velocidad de rotación, irradia casi un 100% más. Esta nueva rareza de Urano continúa siendo uno de las grandes cuestiones sin resolver de la ciencia planetaria.

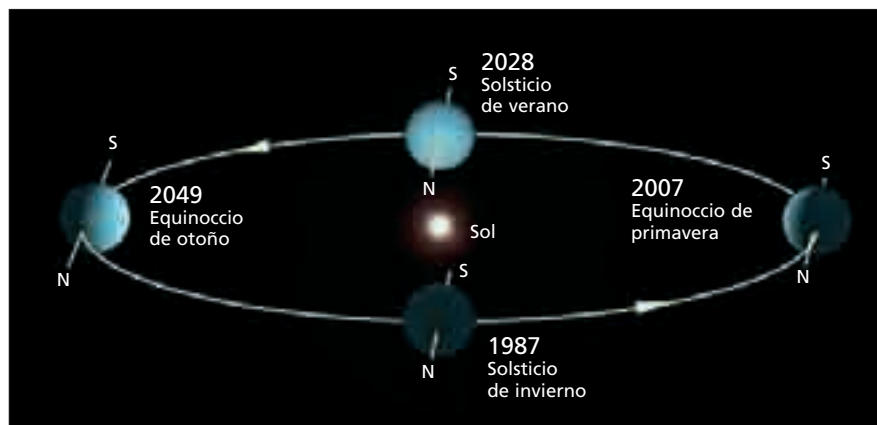


Figura 16.4. Estaciones. Órbita de Urano alrededor del Sol, mostrando los solsticios y equinoccios para el hemisferio norte en una órbita planetaria, a partir del solsticio de invierno del año 1987. Fuente: Fundació Observatori Esteve Duran / IAA.

## El sospechoso guiño de una estrella

Urano también tiene anillos, al igual que Saturno, Júpiter y Neptuno. En 1977, durante la observación de la ocultación de una estrella por el planeta, los astrónomos advirtieron que el astro titilaba ligeramente cinco veces antes de que el planeta lo ocultase. Creyeron que se trataba de cinco satélites, que por su menor tamaño no llegaban a "robarle" toda la luz a la estrella. Pero cuál no fue su sorpresa al comprobar que una vez que el planeta hubo pasado por delante de la estrella, ésta volvía a titilar, de la misma manera, otras cinco veces. Lo que tapaba la luz era en efecto el otro extremo de los anillos, desconocidos hasta entonces.

De los nueve anillos principales, el más externo, llamado Épsilon, está compuesto de bloques de hielo de casi un metro. Urano presenta también un gran número de anillos finos o incluso incompletos, de tan sólo 50 metros de ancho. Los espacios intermedios entre estos anillos están rellenos de polvo fino.

## 17. Las lunas sombrías

**U**rano, el ‘gigante azul’, posee más de veinte satélites, algunos de los más fríos y oscuros del Sistema Solar. Y todavía hoy siguen descubriéndose nuevos

Como sabemos, Júpiter y Saturno, los dos “gigantes” gaseosos del Sistema Solar, poseen un sistema de anillos y un gran número de satélites orbitando a su alrededor. Esto los diferencia claramente de los planetas de tipo terrestre, como Mercurio, Venus, Marte o la Tierra, que en total sólo suman tres satélites conocidos y ningún anillo.

Urano no es una excepción dentro del grupo de planetas gaseosos. Al gigante azul lo rodean más de veinte satélites. Pero su número exacto se ignora; los últimos descubiertos son tan pequeños que su detección resulta

difícil y a menudo es necesario esperar a que los organismos internacionales confirmen oficialmente su existencia para incluirlos en el “libro de familia” del planeta. De hecho, antes del encuentro de la sonda Voyager 2 con Urano, en 1986, tan sólo se conocían los cinco satélites mayores, todos ellos satélites regulares.

Y es que dentro de los satélites también hay clases. La órbita de los llamados regulares es casi circular.

Estos satélites están situados casi en el mismo plano que el ecuador del planeta, esto es, coincidiendo con el plano de los anillos. Todos giran en el mismo sentido de Urano y, según se cree, se originaron a partir de la nebulosa que dio origen al planeta. Probablemente, los satélites surgieron de la región más externa del planeta en formación, que iba contrayéndose

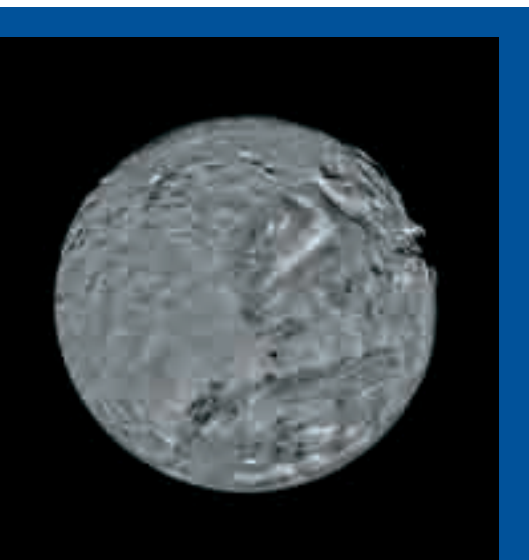


Figura 17.1. Imagen del satélite Miranda obtenida desde las cámaras del Voyager 2 en 1986, mostrando una superficie caótica, en la que, aparte de los cráteres producidos por impactos, se aprecian cañones que tienen hasta 20 km de profundidad. Su nombre proviene de la hija del mago Próspero, en la obra de Shakespeare *La Tempestad*. Fuente: NASA.



Figura 17.2. Urano y familia. El planeta Urano y sus satélites. Fuente: NASA.

por efecto de la gravedad hasta alcanzar su volumen actual. Se da la circunstancia, además, de que en los casos de Júpiter, Saturno y Urano, la suma de las masas de todos los satélites guarda la misma proporción con la de su planeta respectivo.

Gracias a ese desprendimiento de materia, hoy podemos observar lunas como Miranda, toda una rareza del Sistema Solar. Este satélite, de 472 kilómetros de diámetro, no se parece a ningún otro conocido: su superficie parece fruto del caos, con cañones de hasta diez kilómetros de profundidad hendididos en un amasijo de materiales jóvenes y viejos.

¿Cómo es posible un paisaje tan “movido” en un lugar que no se sube de los 187 grados bajo cero y cuyo diámetro apenas es mayor que la distancia entre Badajoz y Granada? Los científicos creen que la gran proximidad de Miranda al planeta hace que sufra los llamados “efectos de marea”, similares, pero mucho más intensos, a los que la Luna causa en los océanos de la Tierra. Estos efectos provocan unos grandes calentamientos internos en la superficie del satélite, del que apenas se sabría nada si no fuera porque la Voyager pasó muy cerca de él para coger un último impulso en su viaje hasta Neptuno.

Figura 17.3. Puck. Composición artística del pequeño satélite irregular Puck, con Urano al fondo. Fuente: Walter Myers.



Ariel presenta una apariencia menos torturada. Sus cañones parecen haber sido suavizados por algún fluido arrastrado por la superficie. Quizá, por el calentamiento interno del satélite, se fundiera una parte de la mezcla de hielo de agua y de amoníaco de su interior, que emergió luego a la superficie. Lo mismo parece ocurrir en Titania, la mayor luna de Urano, de 1.588 kilómetros de diámetro. Otros satélites regulares, como el oscuro Umbriel y el lejano Oberón, presentan sin embargo una apariencia general más homogénea, con sus superficies plagadas de cráteres por doquier.

### Satélites capturados

Los satélites irregulares parecen llevarle la contraria a los regulares. Según se cree, se trata de fragmentos de material interplanetario que la gravedad del planeta apresó cuando ya estaba formado. Estos pequeños objetos describen trayectorias muy excéntricas,

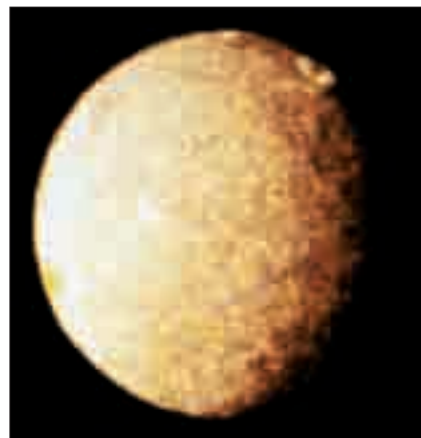


Figura 17.4. El oscuro Umbriel. Imagen del satélite más oscuro de Urano. El anillo más claro de la zona superior es el cráter Wunda. Fuente: NASA.

## Las lunas pastoras

Los satélites regulares y los anillos de los planetas coinciden prácticamente en el mismo plano respecto del planeta, pero guardando bien las distancias entre sí. Sus límites respectivos están bien delimitados por el llamado Radio de Roche, de unas dos veces y media el del planeta. Hacia el exterior del Radio, se encuentran los satélites. En cambio, todos los objetos que se adentren en él quedarán disgregados por las tremendas fuerzas de marea del planeta. De ese material están

compuestos, entre otros elementos, los anillos.

En el caso de Urano, el Radio de Roche está marcado por dos lunas, Cordelia y Ofelia, de apenas 15 kilómetros de diámetro, que casi rozan el anillo Épsilon, el más externo del planeta. Estas lunas reciben el nombre de "pastoras", como si tuvieran por cometido procurar que los demás satélites no se adentren más allá de los estrictos límites de Roche.

giran tanto en el mismo sentido del planeta como en sentido contrario y orbitan mucho más lejos del planeta que los regulares. Por este motivo es difícil distinguirlos de las estrellas que se encuentran en el mismo campo de

observación. Su estudio resulta sin embargo interesante, pues incluyen algunas de las claves de la formación del Sistema Solar, al igual que otros objetos antiguos, como los cometas o los asteroides del cinturón de Kuiper —más allá de la órbita de Neptuno— con los que muy probablemente están emparentados.

Tan esquivos resultan que de hecho no se tuvo constancia de los dos primeros, Sycorax y Calibán, hasta 1997. El equipo que los descubrió desde el Observatorio de Monte Palomar, en California, descubrió otros dos en 1999 y detectó cuatro nuevos en 2004. Algunos de estos satélites se encuentran a distancias enormes del planeta, como Próspero y Setebos, que orbitan a 17 millones de kilómetros.

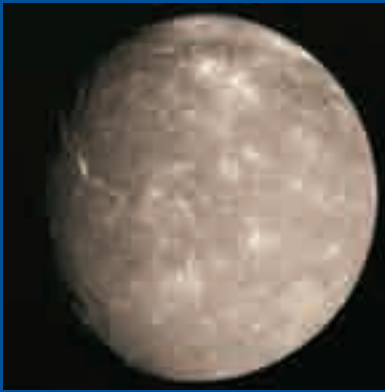


Figura 17.5. Titania. La mayor Luna de Urano muestra una superficie menos accidentada que otros satélites.

Fuente: NASA.

## 18. El gigante helado

**N**eptuno, un gigante helado muy distinto a Júpiter y Saturno, cuenta con un satélite, Tritón, que alberga géiseres de metano y nitrógeno

La historia cuenta que Neptuno se descubrió gracias a los estudios de Urano, descubierto por William Herschel en 1781, en un alarde de precisión científica sin precedentes: la órbita de Urano presentaba perturbaciones provocadas por “algo” que se encontraba más lejos, y se creyó que era un planeta. Los astrónomos Adams y Le Verrier, a partir de observaciones sistemáticas de Júpiter, Saturno y Urano, predijeron la posición de Neptuno, finalmente observado por Galle y d’Arrest el 23 de septiembre de 1846. Sin embargo, las observaciones posteriores de Neptuno han revelado que las órbitas calculadas por Adams

y Le Verrier divergen considerablemente de la órbita real del planeta. Si la búsqueda de Neptuno hubiese tenido lugar unos años antes o después, siguiendo las predicciones de estos científicos, jamás habrían encontrado planeta alguno en el lugar predicho. Además, la observación de Neptuno en 1846 no fue la primera: más de dos siglos antes Galileo ya había observado este nuevo planeta muy cerca de Júpiter, aunque no consiguió realizar las observaciones suficientes como para determinar que esa “estrella errante” era un planeta.

### Una fructífera visita

Sólo una misión espacial ha visitado Neptuno: Voyager 2, el 25 de agosto de 1989. No obstante, la información que





Figura 18.1. Nubes gigantes. Imagen de Neptuno captada por la nave espacial Voyager 2 en agosto 1989, donde se pueden ver dos de las cuatro nubes ovaladas que fueron detectadas. La más grande da una vuelta al disco de Neptuno en 18 horas, mientras que las más pequeñas cambian de forma y tamaño en menos de cuatro. Fuente: NASA/JPL.



Figura 18.2. Detalle. Imagen más detallada de la Gran Mancha Oscura, acompañada por nubes blancas que cambian rápidamente con el tiempo. Fuente: NASA/JPL.

aportó sobre el planeta y sus satélites ha ido enriqueciéndose con las observaciones del Telescopio Espacial Hubble (HST), desde su lanzamiento en 1990 hasta nuestros días.

La composición de Neptuno es probablemente similar a la de Urano —su color azul es prueba de ello—, con un interior de hielos y roca y un 15% de su masa total en forma de hidrógeno y helio atmosféricos. Neptuno es, de hecho, un gigante helado más que un gigante gaseoso. Su relajante color es producto de la acción del metano de su atmósfera —que absorbe la luz roja— y de la de otros elementos, probablemente sólidos, que “tiñen” sus nubes de un azul muy intenso. Al igual que Júpiter y Saturno, Neptuno irradia más energía (más del doble) que la que recibe del Sol.

Cuando Voyager 2 sobrevoló el planeta, tomó imágenes de una mancha oscura con un tamaño equivalente al diámetro de la Tierra. Esta nube, situada en el hemisferio sur, se movía a una velocidad de 300 metros por segundo debido a los fuertes vientos existentes en ese nivel de la atmósfera. Cuatro años después, las observaciones del Telescopio Espacial Hubble mostraron que la Gran Mancha Oscura había desaparecido o estaba camuflada por otros fenómenos atmosféricos, mientras que otra mancha aparecía en el hemisferio norte. Estos datos confirman que Neptuno es mucho más

dinámico que Júpiter en ese sentido.

Al igual que sus vecinos gigantes, Neptuno también está rodeado de anillos, algunos con una estructura retorcida no observada en ningún sistema de anillos del Sistema Solar.

### Tritón: una captura interesante

Tritón, el mayor de los trece satélites de Neptuno, se caracteriza por su órbita inversa —gira en dirección opuesta a la de Neptuno—, rasgo que indica que se formó separadamente, probablemente en el cinturón de Kuiper, y luego fue capturado por la fuerza de gravedad de Neptuno. También presenta un eje de rotación tan inclinado que, de forma alterna, su ecuador y sus polos quedan expuestos a la luz solar, lo que genera cambios de estación muy dramáticos. Por ejemplo, en el encuentro de Voyager 2 con Tritón el polo sur apuntaba directamente al Sol. Desgraciadamente, no se le augura un futuro muy halagüeño, ya que sus peculiaridades orbitales permiten predecir que se romperá formando un nuevo anillo o caerá sobre Neptuno.

Tritón se compone de hielo de agua en un 25% y de material rocoso en un 75% y presenta una tenue atmósfera que genera una presión en la superficie equivalente a la que existe en la Tierra a 50 kilómetros de altura. Los elementos



Figura 18.3. Curioso anillo. Esta porción del anillo Adams aparece retorcido porque el material que lo formó se encontraba en forma de “grumos”, que dieron lugar a “venas” a medida que este material giraba alrededor de Neptuno. Fuente: NASA/JPL.



Figura 18.4. Tritón. Se cree que el color rosado de esta imagen de Tritón es el resultado de la lenta evaporación de una capa de nitrógeno en la superficie del satélite, mientras que el tono azulado apunta más a la presencia de hielo fresco aún sin evaporar. Fuente: A. Tayfun Oner.

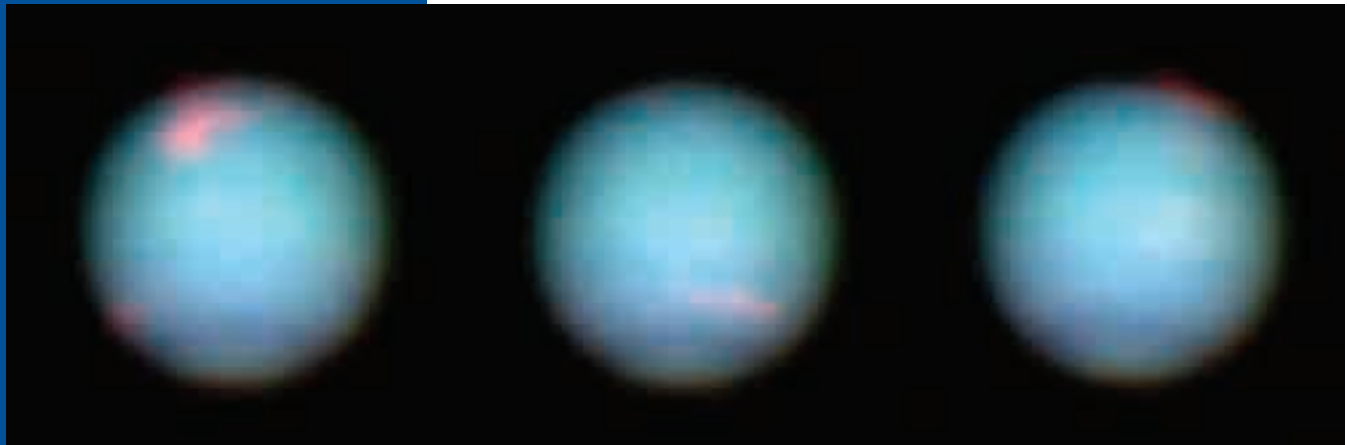


Figura 18.5. Clima inestable. Estas tres imágenes de Neptuno muestran cambios climáticos que tienen lugar en un breve período de tiempo (del 10 de octubre al 2 de noviembre de 1994). Fuente: H. Hammel y NASA/ESA.

que forman la atmósfera, nitrógeno y algo de metano, sufren reacciones químicas debido a la luz solar y originan una capa de neblina entre los 5 y 10 kilómetros.

La temperatura de Tritón, de  $-238,5^{\circ}\text{C}$ , mantiene su superficie permanentemente helada, en la que destacan unos pocos cráteres. En este inhóspito mundo, lo más interesante es la existencia de volcanes de hielo que expulsan nitrógeno líquido,

polvo y metano del interior del satélite. Podemos imaginarlos como géiseres en un mundo helado que, a diferencia de los terrestres, que despiden vapor de agua, expulsan a su exterior nitrógeno líquido. Tritón es, junto con Ío, Venus y la Tierra, el único objeto del Sistema Solar volcánicamente activo en nuestros días, aunque con orígenes y explosiones de naturaleza completamente diferentes.

## 19. El “planeta” del astrónomo

**Plutón y su satélite Caronte representaron, en el pasado, la lucha por encontrar el noveno planeta del Sistema Solar y, hoy día, por enviar una misión espacial que los estudie**

En la mitología romana Plutón es el dios del mundo subterráneo, y quizá recibió este nombre por la poca luz que recibe del Sol. Aún no ha sido visitado por ninguna misión espacial, y representa la lucha de Clyde Tombaugh por encontrar el “planeta X”, iniciada por Percival Lowell en 1905. Lowell estaba convencido de que existía un planeta más allá de Neptuno, más tarde conocido como “planeta X”, e incluso fundó un observatorio para buscarlo. En 1930, la comparación de dos imágenes del cielo tomadas por Tombaugh el 23 y el 29 de enero de

1930 revelaron la existencia de Plutón, y se le clasificó como planeta. Casi cincuenta años más tarde, en 1978, los estudios de las placas fotográficas de Plutón desvelaron un pequeño “bulto” pegado al planeta, que además giraba a su alrededor cada 6,4 días. Así se descubrió Caronte, su único satélite.

### Curiosidades dinámicas

Plutón constituye la excepción a la regla en varias de sus características dinámicas. Por ejemplo, gira en torno al Sol en sentido contrario al del resto de los planetas, lo que indica que no se formó a partir de la misma nebulosa, sino que fue capturado posteriormente. Tampoco sigue una trayectoria casi circular alrededor del Sol como todos los demás, sino que su órbita es tan

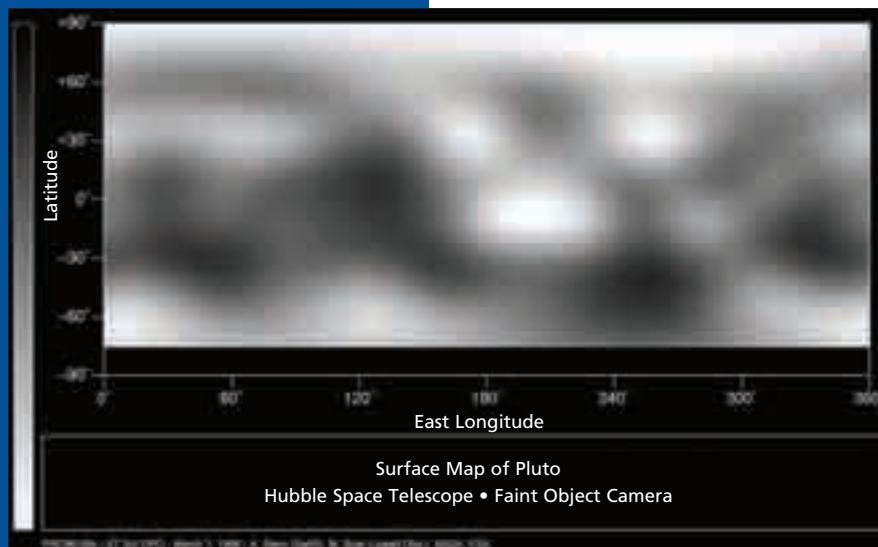


Figura 19.1. Superficie. Primeras imágenes de Plutón tomadas por el telescopio espacial Hubble donde se pueden ver doce regiones claras y oscuras. Si estos contrastes se deben a topografía o diferente composición superficial (hielo de nitrógeno, monóxido de carbono y metano) no se podrá saber hasta que alguna misión espacial lo visite.

elíptica que a veces se encuentra más cerca del Sol que Neptuno. Aunque los caminos de ambos se crucen, o incluso parezca que pueden chocar, esto no ocurre debido a dos motivos: por un lado, la órbita de Plutón está en un plano mucho más inclinado que la del resto de planetas y, por otro, las órbitas de ambos están “sincronizadas”, ya que cuando Neptuno da tres vueltas al Sol, Plutón ha dado dos (resonancia 3:2).

Finalmente, y al igual que Urano, Plutón está “tumbado”. Caronte, su satélite, completa su giro alrededor en 6 días y 9 horas, justo lo que tarda Plutón en rotar sobre sí mismo o en completar un día. Por este motivo muestran siempre la misma cara.

En determinadas épocas, como de 1985 a 1990, Plutón y Caronte se alinean con la Tierra y el satélite eclipsa al planeta cada 12 días y 18 horas.

### Atmósfera huidiza

La composición de Plutón es incierta aunque, dada su densidad, parece estar compuesto en un 70% por rocas y un 30% por hielo de agua. Su superficie, claramente heterogénea, genera una tenue atmósfera de nitrógeno, metano y monóxido de carbono cuando las áreas brillantes, compuestas de hielo, subliman,

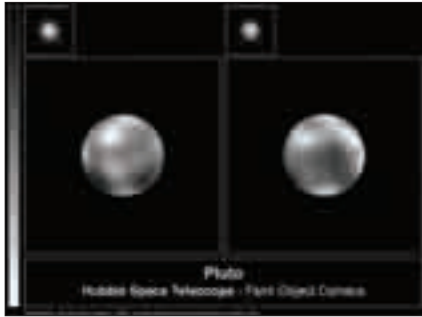


Figura 19.2. De lejos. Dado su tamaño y su lejanía, sólo el telescopio espacial Hubble y los telescopios terrestres equipados con instrumentos de óptica adaptativa pueden resolver el disco de Plutón e incluso algunas características de su superficie.

o pasan directamente de sólido a gas. La atmósfera sólo existe cuando Plutón se encuentra en su perihelio, o posición de su órbita más cercana al Sol, ya que a distancias mayores la temperatura baja considerablemente (de  $-210^{\circ}$  a  $-235^{\circ}$ ) y la atmósfera se hiela sobre la superficie del planeta. En este sentido, Plutón es muy parecido a los cometas, cuerpos donde la atmósfera de polvo y gas es también transitoria.

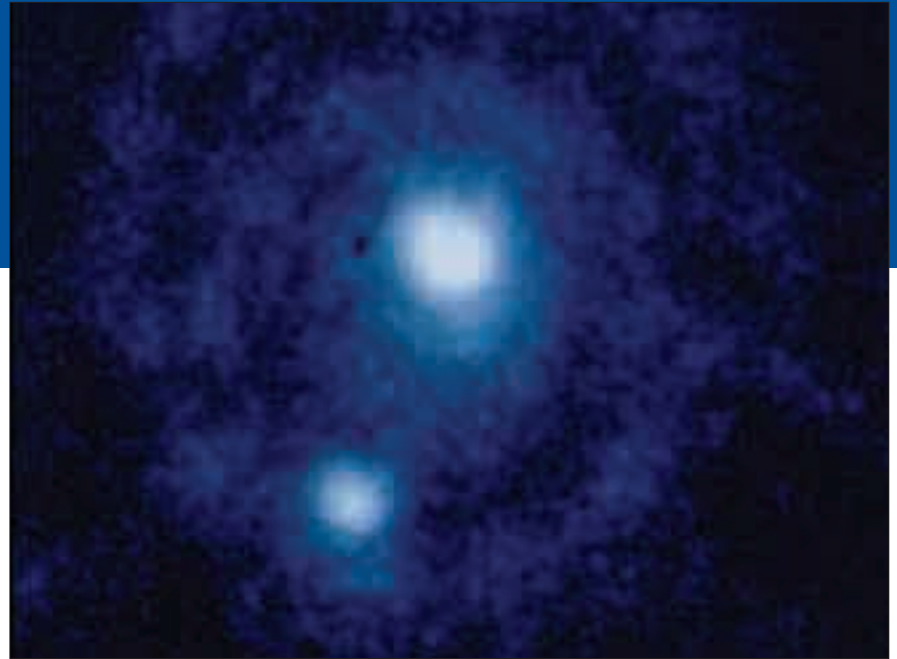


Figura 19.3. Plutón y satélite. El telescopio espacial Hubble tomó esta imagen de Plutón y Caronte, en los confines del Sistema Solar. Desde allí, el Sol se vería como una estrella muy brillante. Fuente: NASA.



Figura 19.4. Homenaje. Este símbolo, asignado a Plutón, representa las iniciales de Percival Lowell, el principal promotor de la búsqueda del noveno planeta.

Buie, Tholen and Home (1992)



Young and Binzel (1993)



Figura 19.5. Diferencias de brillo. Plutón es el segundo cuerpo del Sistema Solar, después de Japeto, con más contraste de brillo en su superficie.

## ¿Hasta cuándo el planeta del astrónomo?

La lucha que libró Clyde Tombaugh por encontrar el “planeta X” se asemeja a la que existe hoy día por enviar una misión espacial al sistema Plutón-Caronte. La NASA ha recibido propuestas de misiones durante al menos doce años, siempre calificadas positivamente, financiadas y posteriormente canceladas. La más reciente, Nuevos Horizontes 2006 —una sonda que estudiará Plutón y el cinturón de Kuiper— fue lanzada el 19 de enero de 2006. En 2015 llegará a Plutón.

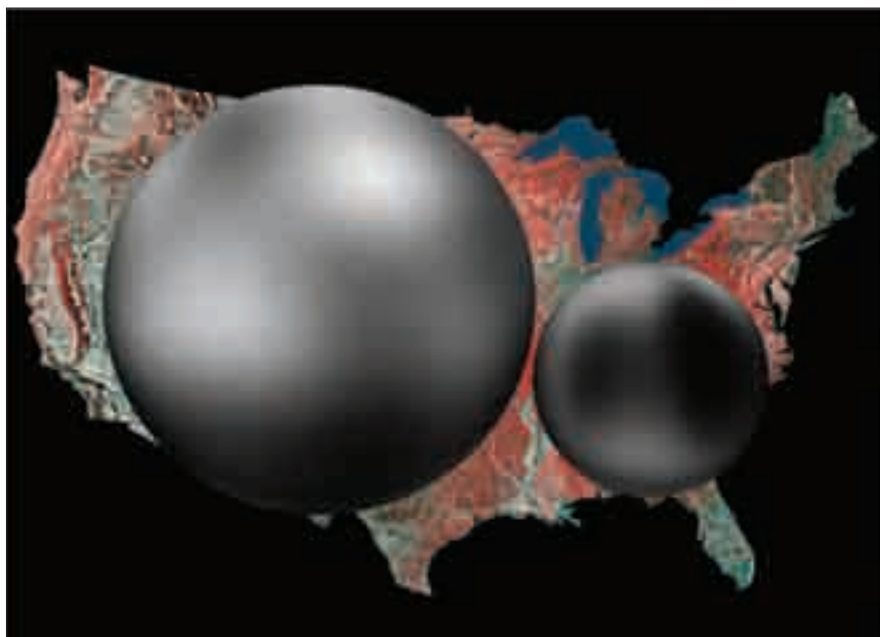


Figura 19.6. Pequeños. Plutón y Caronte, comparados con el tamaño de Estados Unidos. El diámetro de Plutón mide, aproximadamente, 2.274 kilómetros en el ecuador y su masa equivale a un quinto de la masa de la Luna. Caronte mide unos 1.172 km de diámetro y su masa es un séptimo de la de Plutón.



## El hijo de un impacto

El único satélite de Plutón, Caronte, recibe su nombre del barquero que llevaba las almas de los muertos por el río Aquerón hasta el Hades, o el reino de Plutón en la mitología romana. A diferencia de Plutón, Caronte no presenta zonas superficiales con diferente brillo, sino que el disco es más homogéneo y probablemente cubierto por hielo de

agua. Esta homogeneidad en la composición superficial parece indicar que Caronte se formó cuando un gran cuerpo chocó contra Plutón y arrancó parte de la corteza helada del planeta, en un proceso similar al de la formación de la Luna a partir de la Tierra. Hasta el momento, no se ha detectado atmósfera en Caronte.

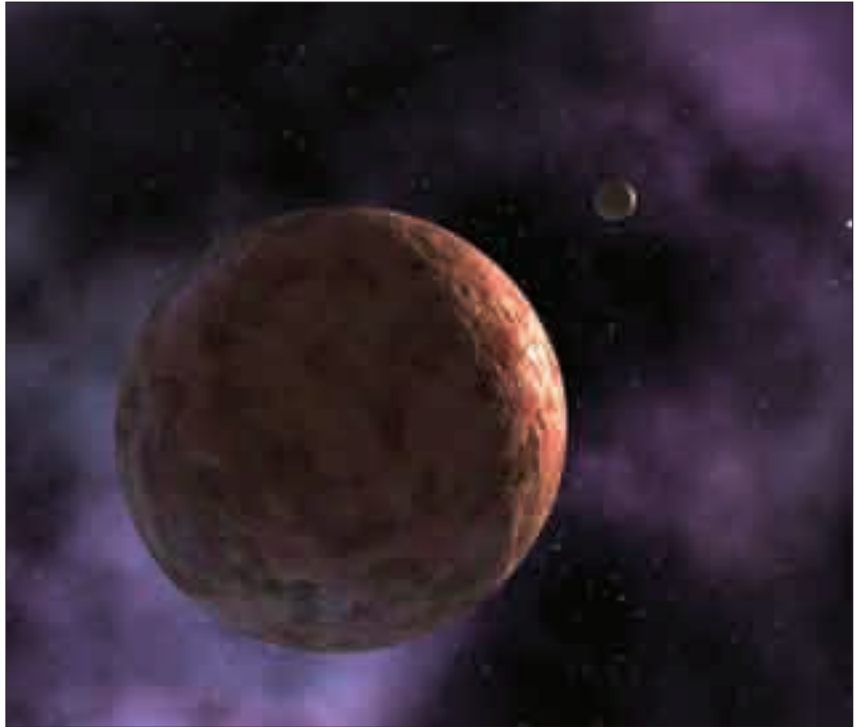
## Plutón ya no es considerado un planeta

La Unión Astronómica Internacional (IAU), en su reunión plenaria de agosto de 2006, estableció en su resolución 5A la siguiente definición para un planeta:

“Un planeta es un cuerpo celeste que orbita alrededor del Sol, tiene suficiente masa para que su propia fuerza de gravedad venza a la rigidez del cuerpo y éste adopte una forma de equilibrio hidrostático, y ha limpiado el vecindario alrededor de su órbita”.

De la definición anterior se concluye que una característica fundamental de los planetas es que en sus alrededores no existan otros cuerpos con características similares y, por tanto, no formen parte de un grupo de otros muchos objetos (como sucede en el caso del cinturón de asteroides o con los objetos transneptunianos). Como consecuencia de esta nueva definición, Plutón dejó de pertenecer a la categoría de planeta.

Figura 19.7. Concepción artística de Sedna, el último de los últimos hallazgos en los límites del Sistema Solar.



## 20. Más allá de Neptuno

**L**legamos al final del Sistema Solar conocido... ¿Qué hay más allá?, ¿qué tipo de cuerpos habitan a más de treinta veces la distancia de la Tierra al Sol?

¿Qué hay más allá de Neptuno? La respuesta obvia que daría cualquiera es que más allá de Neptuno está... ¡Plutón!, y hasta hace relativamente poco era la respuesta correcta. En los últimos doce años se han descubierto casi mil cuerpos más allá de Neptuno, con unos diámetros estimados de entre diez y mil kilómetros. Estos enigmáticos cuerpos reciben el nombre de objetos transneptunianos (TNOs, de sus siglas en inglés), siendo Plutón el mayor descubierto hasta la fecha. Dichos objetos son en realidad restos o escombros sobrantes de la formación del Sistema Solar. Son cuerpos helados, conservados en el mejor congelador

conocido: el espacio. Al hallarse muy lejos del Sol —más de treinta veces la distancia de la Tierra al Sol— y a temperaturas cercanas a los  $-220^{\circ}\text{C}$ , estos objetos apenas han sufrido alteraciones y conservan propiedades físico-químicas muy similares a las que tenían cuando se formó el Sistema Solar, hace unos 4.600 millones de años. El estudio de estos cuerpos nos ayuda a conocer el pasado de nuestro Sistema Solar, y nos proporciona valiosas claves para entender la estructura de la nebulosa de gas y polvo que dio lugar a los planetas.

### Las sospechas y la certeza

Los primeros en mencionar la posible existencia de un cinturón de objetos más allá de Neptuno fueron Frederick

C. Leonard y Keneth Edgeworth, en los años 1930 y 1943 respectivamente, aunque más a modo de conjetura que como algo real. En 1951, Gerard Kuiper sugirió la existencia de un cinturón de pequeños cuerpos más allá de Plutón, basándose en la creencia de que la nebulosa solar no podía terminar abruptamente en Plutón. Hubo que esperar hasta 1980 para que el científico uruguayo Julio Fernández publicara un artículo que aportaba las razones físicas que demostraban la existencia de un cinturón de cuerpos más allá de Neptuno. Fernández propuso que los cometas de corto periodo —aquellos que giran alrededor del Sol en menos de 200 años— debían proceder de una zona situada más allá de Neptuno, y no de una nube esférica de cuerpos ubicada a gran distancia del Sol y conocida como nube de Oort. Razonamientos posteriores de gran peso físico apoyaban con fuerza la hipótesis planteada por Fernández.

La confirmación de lo calculado por Fernández tuvo lugar en 1992, con la detección del primer objeto más allá de Neptuno —aparte de Plutón— realizada por los astrofísicos David Jewitt y Jane Luu. Este objeto fue bautizado 1992QB1, y constituyó el primero de una larga lista de objetos transneptunianos que aumenta casi a diario. El conjunto de estos cuerpos recibe el nombre de Cinturón de Kuiper o,



Figura 20.1. Confines. Esta recreación artística muestra el cinturón de Kuiper, desde donde el Sol aparece como un pequeño y lejano punto brillante. Fuente: Calvin J. Hamilton.



Figura 20.2. Roca y hielo. Concepción artística de Quaoar, un objeto del cinturón de Kuiper. Fuente: NASA y G. Bacon.



Figura 20.3. Comparación. Plutón sigue siendo el mayor de los objetos transneptunianos encontrados. Es, sin embargo, menor que la Luna.  
Fuente: NASA JPL/Caltech.

simplemente, cinturón de objetos transneptunianos.

¿Por qué los astrónomos no descubrieron antes estos objetos? La respuesta está en que se trata de objetos muy lejanos y muy oscuros que reflejan sólo entre un 4 y un 8% de la “luz” solar que reciben. La detección sólo fue posible cuando se contó con detectores electrónicos más sensibles que las placas fotográficas.

### Radiografía de un TNO

El agua helada parece ser el principal componente de los objetos transneptunianos, aunque debido a su oscuridad sólo ha podido detectarse en los de mayor tamaño, y con los telescopios más avanzados. Muchos de los objetos descubiertos son sistemas dobles, similares al que forman Plutón y Caronte. Este carácter binario ha permitido estimar su masa y su densidad, esta última compatible con una composición de roca y hielo de agua. Son objetos, por tanto, muy frágiles, cuya estructura puede deformarse fácilmente debido a la propia rotación.

## La extraña familia helada



Los TNOs actualmente conocidos pueden clasificarse en varias familias:

- *Objetos clásicos o del cinturón principal*: a ellos pertenece el primero de los descubiertos, por lo que a veces se llaman también “cubewanos” (de la pronunciación inglesa de QB1). Muestran

órbitas poco excéntricas situadas a distancias entre las 40 y 50 UA (una UA equivale a la distancia media entre la Tierra y el Sol).

- *Plutinos*: presentan órbitas similares a la de Plutón, reguladas por el planeta Neptuno. Todos ellos efectúan dos giros completos alrededor del Sol en el tiempo en que Neptuno efectúa tres (esto se conoce como resonancia 2:3).

- *Objetos dispersados*: tan numerosos como la suma de las dos familias anteriores, fueron expulsados del cinturón principal al tener un encuentro cercano con Neptuno; por ello, sus órbitas son muy excéntricas e inclinadas. Debido a perturbaciones en su órbita estos cuerpos pueden, eventualmente, situarse entre Júpiter y Neptuno y sumarse al grupo de los objetos llamados Centauros. Estos objetos no son estrictamente transneptunianos, ya que no están más allá de Neptuno, pero sí se relacionan con ellos. Los Centauros pueden evolucionar para dar lugar a los cometas de corto periodo.

- *Otros objetos*: se han descubierto dos objetos que no pertenecen a ninguna de las clasificaciones anteriores: 2000CR105 y 2003VB12, este último bautizado Sedna por sus descubridores. Se encuentran a enormes distancias del Sol (Sedna fue descubierto cuando se hallaba a ¡90 UA del sol!) y algunos científicos han sugerido que dichos cuerpos podrían pertenecer a la llamada nube interna de Oort.

## Los límites del Sistema Solar, desde Granada

Desde el observatorio de Sierra Nevada, perteneciente al Instituto de Astrofísica de Andalucía, se estudian las propiedades de los objetos más lejanos del Sistema Solar: los TNOs. También se dedica mucho tiempo de observación al rastreo el cielo con cuatro telescopios robóticos —conocidos como Tetrascopio—, especialmente diseñados para la búsqueda de nuevos objetos transneptunianos.

## Nuevos horizontes

El futuro del estudio de estos cuerpos avanzará muchísimo con el lanzamiento de la misión “New Horizons”, que tiene previsto llegar a Plutón en el año 2015 y que visitará después algún otro objeto transneptuniano. Aportará información muy valiosa y algunas de las claves para entender estos cuerpos, los más primitivos y lejanos de nuestro Sistema Solar.

## 21. Radiantes bolas de nieve

**L**os cometas, cuyo nombre en griego significa “estrellas con cabellera”, pueden desvelar información sobre el origen del Sistema Solar

En el siglo XVI, el astrónomo danés Tycho Brahe demostró que los cometas eran objetos celestes, y no fenómenos atmosféricos de carácter funesto como se creía hasta entonces. Un siglo después, los estudios de Isaac Newton y Edmond Halley nos aportaron dos datos fundamentales: que el brillo del cometa procede en gran medida de la luz del Sol reflejada en pequeñas partículas de polvo, y que la mayoría de los cometas, como los planetas, giran alrededor del Sol y, por tanto, nos visitan periódicamente.

### **Bolas de nieve sucia**

A finales del siglo XIX se empezó a estudiar la composición de los cometas y se descubrió que, además de polvo, los cometas contenían algunos gases. Pero la confirmación inequívoca sobre su composición y su naturaleza se hizo esperar hasta la década de los setenta del siglo pasado y, sobre todo, hasta la reciente visita del cometa Halley en 1985. Dicho cometa, nombrado así en reconocimiento al trabajo de Edmond Halley, ha sido uno de los objetos astronómicos más observados de la historia. Numerosos observatorios de todo el mundo apuntaron sus telescopios hacia él, y se utilizaron prácticamente todos los tipos de instrumentación disponibles. Además, seis sondas espaciales salieron al encuentro del Halley: dos japonesas,

dos soviéticas, una europea —llamada Giotto— y otra de la NASA.

Este estudio sin precedentes permitió confirmar que, en los cometas, el elemento volátil que predomina es el agua. Otros componentes gaseosos, como el monóxido y el dióxido de carbono, están presentes en mucha menor cantidad y, actualmente, se estima que estos objetos pueden contener algo más de cien compuestos químicos diferentes.

Las imágenes tomadas por la sonda Giotto mostraron que tras la coma —la mancha difusa central— se ocultaba un pequeño cuerpo sólido, de unos 16 por 8 kilómetros, con montañas y cráteres y del que procedía todo el material presente en la coma y las colas. Esto confirmaba los principales argumentos del modelo “bola de nieve sucia”, propuesto en los años 50 por el profesor de Harvard F. Whipple. Según este modelo, un cometa es en realidad un pequeño cuerpo sólido constituido por hielos y polvo. Cuando se acerca al Sol, los hielos se calientan, se evaporan y arrastran consigo los granos de polvo, que al quedar libres reflejan la luz solar. Parte del gas liberado se ioniza y es arrastrado por el viento solar —un chorro de partículas procedentes del Sol—, proceso que genera la cola azulada, como la que se puede ver en la imagen del Hale-Bopp (figura 21.2).

## Información oculta

Aunque los primeros estudios de los cometas respondían a la necesidad de explicar ese misterioso e impredecible fenómeno, a partir de los años 50 se empezó a sospechar que los cometas, oriundos de las regiones más externas del Sistema Solar, habían tenido una evolución física y química muy lenta y podían preservar información muy valiosa sobre el origen y formación de nuestro sistema planetario. Este planteamiento es especialmente válido para los llamados cometas “nuevos”, como el Hale-Bopp. Estos cometas proceden de la nube de Oort —nombrada así en honor al astrofísico holandés Jan Oort, que dedujo su existencia—, una burbuja que rodea todo el Sistema Solar y que puede contener millones de núcleos cometarios. Dichos núcleos permanecen en “hibernación” hasta que algún fenómeno altera su órbita y los lanza hacia dentro o fuera del Sistema Solar.

Existe, sin embargo, otra “reserva” de cometas algo más cerca: un disco plano situado más allá de la órbita de Neptuno, denominado cinturón de Edgeworth-Kuiper. De esta región proceden los cometas de la familia de Júpiter, denominados así porque sus órbitas pasan relativamente cerca de este planeta. Estos cometas presentan un periodo orbital muy corto, inferior a quince años, y se piensa que los



Figura 21.1. Desvelando misterios. La nave Rosetta (ESA) y su módulo Philae. Este último tiene previsto posarse sobre el núcleo del cometa Churyumov-Gerasimenko, como muestra la imagen superior.





Figura 21.2. El Hale-Bopp. Un cometa se nos muestra como una especie de mancha brillante y difusa que parece moverse con respecto a las estrellas. En ocasiones, de esa mancha difusa, que recibe el nombre de coma, nacen dos espectaculares colas cuya longitud puede alcanzar varios millones de kilómetros. Una de esas colas tiene un color amarillento mientras que la otra presenta un tono azulado. Fuente: Alex y Glen Wurdén.

reiterados acercamientos al Sol han envejecido su superficie; como consecuencia, pueden haber perdido las preciadas “condiciones primigenias” que presentan los cometas de la nube de Oort.

### ¿Y ahora?

Tras la visita al cometa Halley, las sondas Deep Space 1 (NASA) y Stardust (NASA) exploraron los

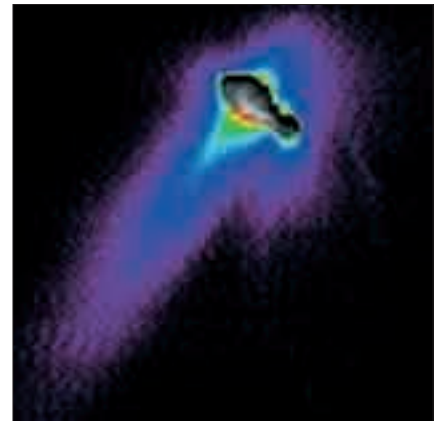


Figura 21.3. Núcleo. Composición de imágenes tomadas por la misión Deep Space 1, que muestra el núcleo del cometa Borrelly. Pueden apreciarse chorros de materia escapando del núcleo y la “coma” de gas y polvo que lo rodea. Fuente: NASA.

cometas Borrelly y Wild2 respectivamente, y aportaron datos que se están analizando hoy día. También se estudian los obtenidos por la misión Deep Impact (NASA), que en julio de 2005 lanzó un artefacto que impactó contra el núcleo del cometa Temple 1 para estudiar su estructura interna. Otra sonda, la europea Rosetta (ESA), viaja al encuentro del cometa Churyumov-Gerasimenko. Se trata de la sonda más compleja y con mayor número de instrumentos de todas las que se han

desarrollado, e incluye un módulo de descenso que se posará sobre el núcleo en verano de 2014. El Instituto de

Astrofísica de Andalucía ha contribuido al desarrollo tecnológico de dos de los instrumentos: Osiris y Giada.

## Cometas y vida

La relación entre el hombre y los cometas llega hasta buscar una respuesta al propio origen de la vida en la Tierra. Los estudios sobre la formación de los planetas terrestres sugieren que es prácticamente imposible que la vida se desarrollara a partir de sus atmósferas primitivas. El bioquímico español Juan Oró sugirió que

los cometas podrían haber transportado material biogénico desde el Sistema Solar externo a la Tierra: en las primeras etapas del Sistema Solar estos objetos colisionaban con frecuencia con los planetas terrestres, y en ellos se han detectado moléculas críticas para el desarrollo de la vida.



Figura 21.4. Halley. La misión europea Giotto, aproximándose al cometa Halley. Ilustración elaborada por la ESA.

## 22. El planeta que no fue

**L**a fuerza de gravedad de Júpiter impidió que entre él y Marte se formara otro planeta, cuyos restos, más de noventa mil fragmentos, observamos en forma de cinturón

En 1766, el astrónomo alemán Titius descubrió que la distancia al Sol de los seis planetas entonces conocidos —desde Mercurio hasta Saturno— seguía una secuencia matemática sencilla. Sin embargo, la secuencia no estaba completa y sugería la existencia de un planeta, no descubierto todavía, entre Marte y Júpiter. Esta secuencia, divulgada a partir de 1772 por Johann Bode, fue inicialmente acogida como una mera curiosidad matemática. Sin embargo, cuando en 1781 William Herschel descubrió el planeta Urano a la distancia que predecía la ley de

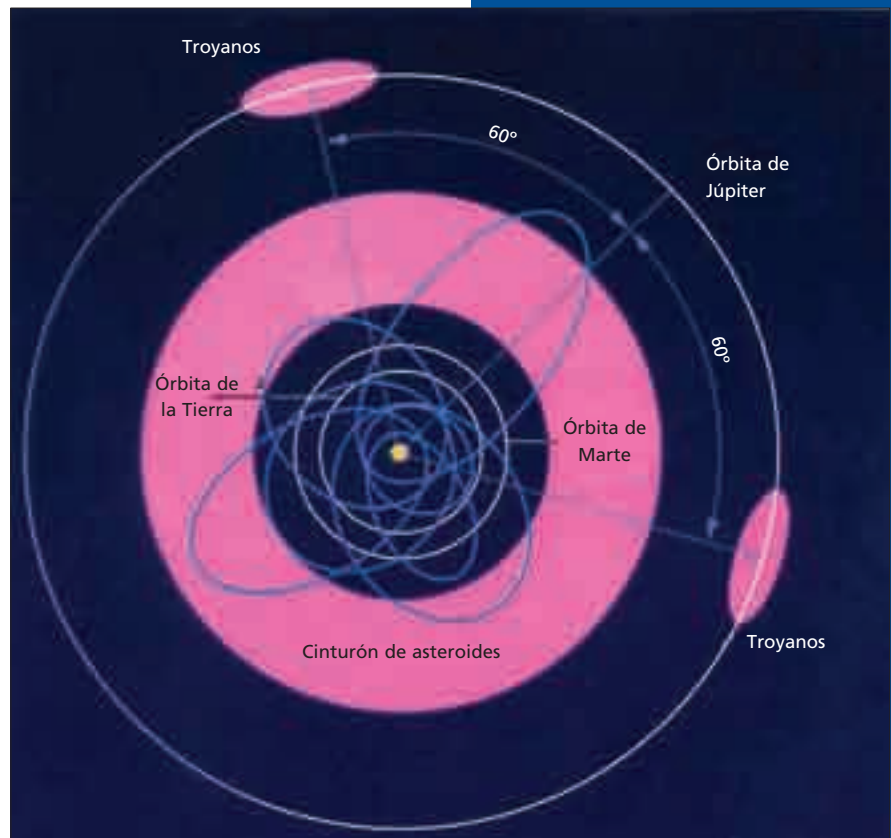
Titius-Bode, la comunidad científica, con una confianza renovada en la ley, comenzó la búsqueda del planeta perdido. En 1801, el monje siciliano Giuseppe Piazzi descubrió por casualidad un objeto de apariencia estelar que se movía con respecto a las estrellas de fondo. Los cálculos de su órbita mostraron que se hallaba justo donde la ley de Titius-Bode predecía la existencia del planeta perdido. Ese “pequeño planeta”, con un diámetro de unos 950 kilómetros, fue bautizado Ceres. En los siguientes años se descubrieron otros tres “pequeños planetas”, llamados Palas, Juno y Vesta, orbitando en una franja entre Marte y Júpiter. Al tratarse de varios objetos de menor tamaño que los planetas no se podían considerar como tales y William Herschell los

denominó, de manera genérica, asteroides, palabra que refleja su apariencia estelar. Curiosamente, las órbitas de los cuatro objetos descubiertos se cruzaban en un punto, lo que llevó a Olbers a establecer un posible origen para los asteroides: se trataba de fragmentos de un planeta que, por una causa desconocida, se había fracturado.

A partir de ese momento, el número de asteroides descubiertos ha crecido vertiginosamente. Actualmente se conoce con precisión la órbita de más de 91.000 asteroides —aunque sólo unos 11.000 poseen nombre propio— y se estima que la población total de objetos con diámetro superior a un kilómetro asciende al millón. El gran número de asteroides hace insostenible la hipótesis de Olbers y, por tanto, otras teorías han sido necesarias.

### ¿Qué son los asteroides?

Los asteroides son cuerpos pequeños y rocosos que giran alrededor del Sol y que carecen de atmósfera. Su tamaño oscila entre los casi mil kilómetros de Ceres hasta los pocos centímetros, aunque los de reducido tamaño se conocen también como meteoroides. La mayoría de estos objetos residen entre Marte y Júpiter, en una región



denominada cinturón de asteroides. En 1944, el astrofísico ruso Otto Schmidt postuló una teoría que sustituía la hipótesis de Olbers y que afirmaba que la fuerza gravitatoria de Júpiter evitó la formación de un planeta entre su órbita y la de Marte, proceso que originó el cinturón de asteroides. Así, actualmente se piensa

Figura 22.1. Mapa. Señalados en claro, el cinturón principal y los troyanos, asteroides que “escorlan” a Júpiter.



Figura 22.2. Ida y Dactilo. La misión Galileo (NASA), lanzada en 1989 para explorar Júpiter y su entorno, descubrió que el asteroide Ida poseía un pequeño satélite, denominado Dactilo.



Figura 22.3. Deep Space 1 (NASA). Misión lanzada en 1998 para explorar el cometa Borrelly. En su viaje, sobrevoló el asteroide Braille, etapa a partir de la que se ha creado esta concepción artística.



Figura 22.4. De cerca. Imagen detalle del asteroide Eros, sobre el que aterrizó la sonda de la nave Near-Shoemaker (NASA, 1997). Esta misión fue la primera con un asteroide como principal objetivo.

que los asteroides son los restos de los bloques o “ladrillos” a partir de los que se formaron los planetas; de este modo, pueden encerrar información sobre las condiciones de la nebulosa a partir de la que se formó nuestro Sistema Solar.

### Los más cercanos

Una clase “especial” de asteroides la constituyen los NEOs, acrónimo en inglés que agrupa a los objetos o asteroides que pueden pasar cerca de la Tierra. Se piensa que la mayoría de estos objetos son fragmentos expulsados del cinturón principal debido a choques entre asteroides y a la influencia gravitatoria de Júpiter. No obstante, otra hipótesis indica que se trata de núcleos de cometas que han perdido el hielo. La importancia de estos objetos radica en que se trata de asteroides dinámicamente jóvenes, cuya órbita puede evolucionar en escalas de tiempo relativamente cortas y pasar cerca de la Tierra, quizá con riesgo de colisión. Pero sólo los asteroides con un tamaño superior a 50 metros alcanzarían la superficie terrestre, porque los de menor tamaño se desintegran debido al calor que genera la fricción con la atmósfera.

El peligro de una posible colisión ha impulsado a varios grupos de astrónomos a vigilar el cielo con dispositivos automáticos para la búsqueda de NEOs. Estos proyectos, entre los que destacan LINEAR (MIT), NEAT (Universidad de Hawaii y NASA) y Spacewatch (Universidad de Arizona), han permitido aumentar de forma increíble el censo de asteroides y asegurar que ninguno de los NEOs conocidos impactará con la Tierra. Estos sistemas permanecen, sin embargo, alerta, pues sólo se conoce la órbita de un pequeño porcentaje de todos los NEOs que se cree que existen.

### En familia

En 1918, el astrónomo japonés Hirayama planteó la existencia de familias de asteroides, formadas a partir de la ruptura catastrófica de un asteroide padre debido a una colisión. En la actualidad hay más de 27 familias identificadas, entre las que destacan la de Eos, con 480 miembros, Temis (535), Koronis (310), Flora (590) y Vesta (235).

Los asteroides que giran alrededor del Sol trazando órbitas similares constituyen grupos, como los Hungaria, los Hilda o los Troyanos. Actualmente existen unos 21 grupos diferentes, la mayoría de ellos con órbitas entre Marte y Júpiter.

En 2003 se descubrió un nuevo grupo de asteroides, Apoheles, formado por objetos situados más cerca del Sol que la Tierra. Una subclase de este grupo, predicho teóricamente pero todavía no observado, son los llamados Vulcanoides, asteroides que pueden situarse incluso más cerca del Sol que Mercurio.

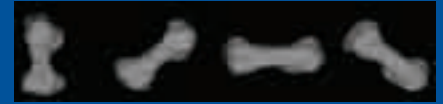


Figura 22.5. ¿Un hueso? Los asteroides pequeños pueden presentar formas muy irregulares, como la de Cleopatra, que vemos en la imagen.

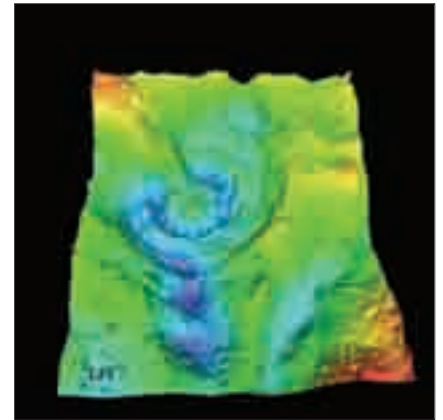


Figura 22.6. Huella escondida. Mapa tridimensional que muestra una estructura anular en la península de Yucatán, México. Se cree que se produjo por la colisión de un asteroide —de entre cinco y diez kilómetros de radio—, fenómeno que originó un drástico cambio climático y la desaparición de los dinosaurios. La huella del impacto se esconde bajo varios cientos de metros de sedimentos. Fuente: NASA.

## 23. Las estrellas, por grupos y colores

**A** pesar de la enorme distancia que nos separa de las estrellas, los astrónomos son capaces de determinar su temperatura, su tamaño e incluso su composición

Las estrellas se encuentran realmente lejos unas de otras: para hacernos una idea, la luz de la estrella más cercana, Próxima Centauri, tarda cuatro años en llegar hasta nosotros, en tanto que la del Sol nos alcanza en apenas ocho minutos. Ante este panorama, podríamos pensar en las estrellas como cuerpos aislados sin más relación que su movimiento alrededor del centro de la galaxia, impresión no del todo cierta: dos tercios de las estrellas forman sistemas dobles, por lo que nuestro solitario Sol es más bien parte de una minoría.

### Pequeñas agrupaciones

Como veremos en el siguiente capítulo, las estrellas tienden a formarse en cúmulos (grupos de entre diez y varios miles), de modo que, aunque presentan diferencias evolutivas, comparten la misma edad y composición. Dentro de un cúmulo, muy pocas estrellas se hallan aisladas del resto: igual que nosotros permanecemos pegados a la superficie de la Tierra debido a su fuerza de gravedad, las estrellas se agrupan de distintos modos por su atracción gravitatoria y forman parejas —o sistemas binarios— y sistemas múltiples.

Un sistema binario, por ejemplo, se compone de dos estrellas que giran en torno a un punto común, llamado centro de masas. En este tipo de sistemas las estrellas se hallan tan



próximas que aparentan ser sólo una, e incluso puede darse una transferencia de materia desde una estrella a la otra, como vemos en una de las imágenes.

Pero también se han hallado sistemas con más de dos estrellas, o múltiples: puede existir una tercera girando alrededor de dos binarias muy cercanas, o grupos más complejos como el de Cástor, en la constelación de Géminis, formado por seis elementos, o el de Mizar, cuyos cuatro elementos se muestran en una de las imágenes.

## Cúmulos estelares

Existen dos formas de “asociación” a gran escala por parte de las estrellas: los cúmulos abiertos y los cúmulos globulares. Los primeros agrupan desde decenas hasta miles de estrellas, ligadas por la atracción gravitatoria existente entre ellas. Se trata de estrellas tan jóvenes y calientes que, en muchos casos, como el de las Pléyades, aún se divisa el gas interestelar a partir del que nacieron las estrellas que componen el cúmulo. Por su parte, los cúmulos globulares pueden agrupar hasta millones de estrellas, pertenecientes a la primera generación de estrellas y, por tanto, muy viejas y frías. Su importancia radica, entre otras cosas, en su edad: su antigüedad indica que se formaron en las primeras etapas del Universo, y ofrecen información sobre este primer periodo.



Figura 23.1. Binarias. Esta ilustración muestra la transferencia de masa que puede tener lugar en un sistema estelar doble. Fuente: Don Dixon.



Figura 23.2. Estrellas jóvenes. En el cúmulo abierto de las Pléyades aún se distingue el gas a partir del que se formaron sus estrellas. Fuente: Robert Gendler.

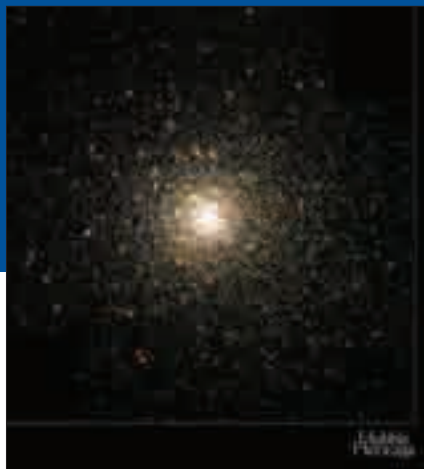


Figura 23.3. Estrellas ancianas. M80, uno de los 250 cúmulos globulares que existen en nuestra Galaxia, la Vía Láctea. Fuente: Hubble Heritage Team.

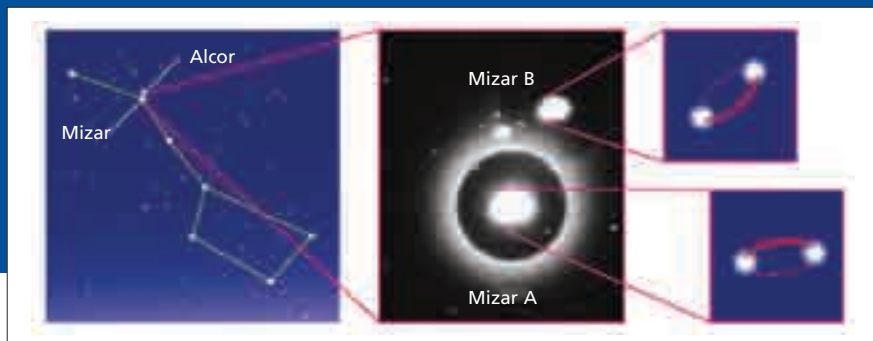


Figura 23.4. Falsas apariencias. La estrella Mizar, tras sucesivas observaciones, resulta ser un sistema múltiple de cuatro componentes.

## El color de las estrellas

Del mismo modo que las gotitas de agua suspendidas en la atmósfera terrestre desvelan, en forma de arco iris, el espectro de luz del Sol, los astrónomos emplean prismas para descomponer la luz de las estrellas en sus diferentes colores. Fue el físico alemán Joseph von Fraunhofer quien, a principios del siglo XIX, dio el paso definitivo en el análisis espectral al inventar el espectrógrafo, un instrumento que descompone la luz en colores de forma tan fina que se observa entrelazado con centenares de líneas negras —las líneas de Fraunhofer—, correspondientes a los elementos químicos que forman el objeto. Si bien al principio se pensó que el grosor de las líneas correspondientes a un determinado elemento indicaba una mayor presencia de éste en la estrella,

más tarde se descubrió que las diferencias en las líneas se debían casi exclusivamente a variaciones de temperatura. Así se llegó a una importante conclusión: las estrellas, en general, presentan una composición muy similar —75% de hidrógeno, 25% de helio y algunas trazas de otros elementos— y podían clasificarse en función de la temperatura de su superficie. La astrónoma Cecilia Payne se encargó de reorganizar la anterior clasificación, realizada en virtud de la errónea relación entre el grosor de las líneas y la abundancia de los elementos, y estableció una secuencia que los astrónomos saben de memoria: OBAFGKM. Esta lista se asocia también con el color de las estrellas, que no es sino el reflejo de su temperatura, aunque exagerando un poco el tono para identificarlas con los colores del espectro, o los colores del

Clasificación estelar	
Tipo	Color y temperatura
<b>O</b>	Estrellas azules violáceas De 25.000 a 50.000 grados Imagen: Alnitak
<b>B</b>	Estrellas azules De 11.000 a 25.000 grados Imagen: Rigel (B8)
<b>A</b>	Estrellas azul pálido (cian) De 7.500 a 11.000 grados Imagen: Sirio
<b>F</b>	Estrellas amarillo pálido De 6.000 a 7.500 grados Imagen: Canopo
<b>G</b>	Estrellas amarillas De 5.000 a 6.000 grados Imagen: el Sol
<b>K</b>	Estrellas anaranjadas De 3.500 a 5.000 grados Imagen: Epsilon Eridani
<b>M</b>	Estrellas rojas Menos de 3.500 grados Próxima Centauri

arco iris. De este modo, la O corresponde a las estrellas más calientes y al color violeta, la G a las de



temperatura media y al color amarillo y la M a los astros más fríos y al color rojo. Por muy extraña que nos parezca esta secuencia, los astrónomos relacionan automáticamente la O con temperaturas de hasta 30.000 grados y la M con estrellas frías, cuya superficie no supera los 3.000 grados. El Sol, una estrella de tipo G, mantiene una temperatura de unos 6.000 grados.

Figura 23.5. Líneas de Fraunhofer. El espectro de la luz solar aparece atravesado por líneas negras, correspondientes a los elementos que forman el Sol.

## 24. Mundos remotos

**T**ras el primer descubrimiento en 1995, los astrónomos han encontrado más de ciento treinta planetas fuera del Sistema Solar, algunos en sistemas planetarios múltiples

Aunque ya en el siglo IV a.C. el filósofo griego Epicuro anunciaba la existencia de mundos infinitos, más allá de nuestro universo visible, la verificación ha llegado muchos siglos después. El descubrimiento, en 1995, de un planeta que giraba en torno a la estrella 51 de la constelación Pegaso constituyó la prueba a lo que ya se suponía: el Sol, y en concreto el Sistema Solar, es uno de los miles de millones posibles —y sólo dentro de nuestra Galaxia—.

### Planetas peculiares

La cifra de planetas descubiertos en torno a otras estrellas supera los cien, aunque sus características desafían la teoría que explica cómo se forman los sistemas planetarios, elaborada a partir del estudio de nuestro Sistema Solar. Según ésta, los planetas nacen a partir de un disco plano de gas, polvo y pequeñas rocas en rotación, en cuyo centro se halla la estrella en formación. Este planteamiento impide la formación de planetas en las zonas más externas e internas del disco, en parte porque se encontrarían a temperaturas extremas —demasiado bajas o altas respectivamente— y en parte por la falta de materiales para ello. Sin embargo, muchos de los planetas detectados se caracterizan por la proximidad a su estrella

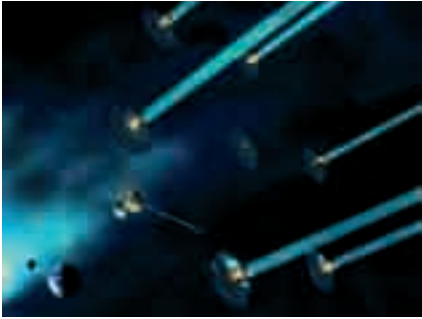


Figura 24.1. Misión Darwin (ESA). Se compone de una flotilla de seis telescopios espaciales que buscarán planetas extrasolares similares a la Tierra.

—con distancias menores que la de Mercurio al Sol— y por su velocidad —uno de ellos concluye una vuelta alrededor de su estrella en sólo 3,1 días terrestres—. También la gran masa de muchos de ellos, que oscila entre la mitad y diez veces la de Júpiter, el gigante de nuestro sistema, preocupa a los científicos. La teoría tradicional suponía que la mayoría de los sistemas solares contendría un planeta semejante a Júpiter nada más pasar la “línea de la nieve”, o distancia a partir de la que las temperaturas bajan tanto que el vapor de agua se condensa en forma de hielo; nunca más cerca, ya que los gigantes gaseosos sólo pueden formarse en las zonas más frías, a una distancia mínima de cinco veces la que hay de la Tierra al Sol. La detección de esos “júpiteres” tan

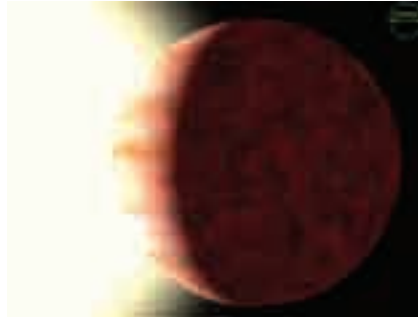


Figura 24.2. Pegasi 51b. Concepción artística del primer exoplaneta descubierto, situado extremadamente próximo a su estrella. Fuente: Tomislav Stimac.

veloces y próximos a su estrella ha llevado a los científicos a elaborar alternativas a la teoría tradicional, como las basadas en la formación de los planetas en partes del disco más benignas y en su posterior migración hacia el interior. Otras teorías apuestan por un desequilibrio gravitatorio producido por la existencia de varios planetas gigantes, lo que también explicaría la órbita elíptica de algunos de ellos: si los cuatro gigantes gaseosos del Sistema Solar —Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno— hubieran crecido hasta el tamaño de Júpiter, habrían ejercido fuerzas gravitatorias sobre los otros y causado la excentricidad de las órbitas, la expulsión de alguno de ellos fuera del sistema o incluso un choque.



Figura 24.3. 55 Cancri. Concepción artística del primer sistema cuádruple de planetas encontrado. Fuente: Lynette Cook.

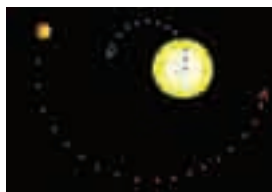


Figura 24.4. Planeta volátil. El planeta HD 209458b es un gigante gaseoso que gira tan cerca de su estrella que parte de su atmósfera escapa, formando una cola similar a la de los cometas. Fuente: ESA.

## Métodos de detección

Las tres técnicas principales de detección son indirectas, es decir, estudian los efectos del planeta sobre su estrella progenitora; como consecuencia, se sabe que el planeta está ahí y puede calcularse su tamaño, pero nunca se han obtenido imágenes de ellos. Un planeta puede afectar a su estrella de varios modos: su fuerza de gravedad, sobre todo en el caso de planetas gigantes, puede forzar a la estrella a dibujar una pequeña órbita, como muestra la figura 1; la técnica de la astrometría consiste en medir con gran precisión la posición de una estrella de modo que cualquier "tambaleo" pueda detectarse. La estrella, en su

recorrido orbital, se acercará o se alejará de nosotros, movimiento que provoca que la longitud de onda de su luz se comprima o se extienda respectivamente (esto se conoce como desplazamiento al azul o rojo del espectro electromagnético, ver figura 2). La medición de estas variaciones, conocida como técnica de la espectroscopía Doppler, ha permitido detectar hasta el momento la mayoría de los exoplanetas. Finalmente, otra técnica consiste en medir la disminución periódica del brillo de la estrella causado por el paso de un planeta entre ella y el observador, conocida como método de los tránsitos.



## Exploración futura

Una vez comprobada la existencia de planetas alrededor de otras estrellas, nos interesa conocer si pueden albergar vida. El desarrollo de la vida se relaciona con muchos factores, pero sobre todo con la presencia de agua líquida, lo que impone a su vez condiciones sobre el tamaño y la densidad del planeta. Estas dos medidas determinan la gravedad de éste, que debe ser la justa: no demasiado pequeña porque, como ocurre en la Luna, el agua se perdería en el espacio en lugar de

condensarse y regresar a la superficie, pero tampoco puede ser demasiado elevada porque, como sucede en Júpiter, retendría fuertes cantidades de metano y amoníaco, ambos letales. Las técnicas empleadas en la actualidad no permiten la detección de planetas pequeños de tipo terrestre que coincidan con esta descripción, pero ya se preparan misiones (Darwin de la ESA y Kepler o TPF de la NASA) que planean, además de localizar estos objetos, determinar su tamaño y su temperatura o incluso obtener imágenes de ellos.

## 25. El nacimiento de las estrellas

**L**as estrellas nacen a partir de nubes de gas y polvo y afrontan un complicado y extenso proceso antes de alcanzar la condición de estrella

Aunque las primeras estrellas comenzaron a brillar, posiblemente, hace más de diez mil millones de años, y el Sol hace casi cinco mil millones, en muchas regiones del Universo se han detectado brotes de formación estelar que, en la actualidad, están dando lugar a nuevas estrellas. Los astrónomos observan este proceso en otros lugares de nuestra Galaxia para, por un lado, aprender de qué modo se formaron el Sol y los planetas que giran a su alrededor y, por otro, para elaborar una teoría que explique eficazmente cómo nacen las estrellas. Gracias a estas investigaciones conocemos un dato curioso: a lo largo de su proceso de

formación, las estrellas se encuentran rodeadas de una envoltura que, a modo de cascarón, impide que las observemos. Cuando las estrellas de poca masa —similares al Sol— salen del cascarón, es decir, cuando se disipa la envoltura y se hacen visibles, aún tienen que atravesar un proceso relativamente largo hasta convertirse en estrellas “adultas”. Por el contrario, las estrellas masivas salen del cascarón teniendo ya todas las características de las estrellas adultas de su especie; eso sí, su vida será efímera.

### ¿Dónde nacen las estrellas?

Las estrellas se forman en las llamadas nubes moleculares, nubes muy tenues compuestas principalmente por hidrógeno (99%) y polvo (1%), cuya extensión es tan vasta que, en total,





Figura 25.1. La nebulosa de Orión.  
Una región de formación estelar muy activa. Fuente: Stefan Seip.

acumulan mucha materia. Estas nubes constituyen la materia prima a partir de la que se forman las estrellas, y una sola de ellas puede contener masa suficiente para generar miles, e incluso millones, de estrellas como el Sol. Los embriones de las futuras estrellas se encuentran ocultos en el interior de estas nubes, frías y oscuras, por lo que la observación del proceso de formación estelar, especialmente en sus primeras etapas, resulta complicado. Afortunadamente, las ondas de radio e infrarrojas logran atravesar estas regiones oscuras y

permiten atisbar su interior, lo que ha propiciado el desarrollo de una teoría de la formación estelar; además, y sobre todo en las últimas décadas, gracias a estas observaciones se han desvelado algunos de los principales secretos de este proceso.

### ¿Cómo se forman?

Como hemos visto, una nube molecular puede contener material para producir hasta millones de estrellas, de modo que

el proceso de formación estelar requiere, necesariamente, que se produzca una fragmentación. Una vez rota la nube, los diversos fragmentos sufrirán un lento proceso de contracción hasta alcanzar la densidad típica de las estrellas, veinte órdenes de magnitud mayor que la de las nubes a partir de las que se formaron (así, si la nube tenía una densidad de 1, la de la estrella será de 1 seguido de veinte ceros). La propia fuerza de gravedad de los fragmentos desencadena un proceso de derrumbamiento (las pequeñas nubes se hunden bajo su propio peso), que tiene como consecuencia la formación de un núcleo central —el embrión estelar o protoestrella—, sobre el que continúa cayendo el resto del

fragmento de la nube molecular progenitora. Esta acumulación de material en la protoestrella va acompañada de la expulsión de parte de este material en forma de chorros que alcanzan altas velocidades (500.000 km/h) y distancias de hasta varios años luz. La presencia de estos chorros es fundamental porque estabiliza la rotación de la protoestrella y evita que gire demasiado deprisa y se desintegre. La existencia de una rotación inicial en la nube provoca que el material se deposite preferentemente en el ecuador y se forme un disco de material en órbita alrededor de la protoestrella. Se cree que este disco constituye la semilla de un posible sistema planetario en torno a la estrella.



Figura 25.2. Ocultas. La nebulosa Trífida, una región de formación estelar que aparece oscurecida por densas nubes de polvo.  
Fuente: NASA, ESA y AURA/STScI.

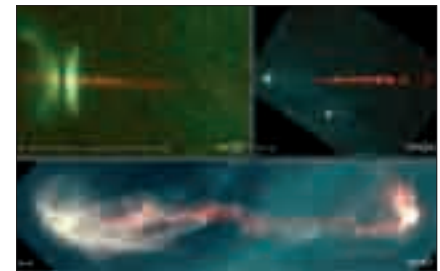


Figura 25.3. Jovencísimas. Arriba a la izquierda vemos la protoestrella HH-30, cuya débil luz ilumina el disco que la rodea, situado de canto. A su derecha observamos la más lejana HH-34, que expulsa gas en forma de chorro a alta velocidad. La imagen inferior muestra a HH-47 (situada en el extremo izquierdo), que presenta un extenso chorro de material eyectado.  
Fuente: STScI, ESA, Univ. Arizona y NASA.

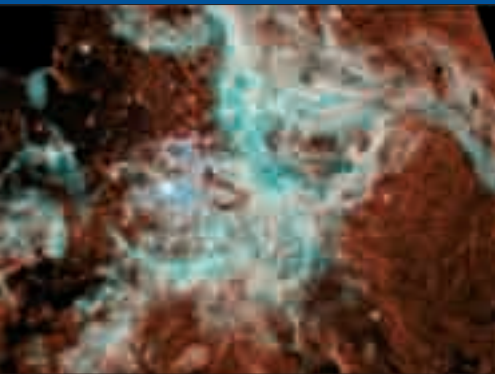


Figura 25.4. Grandes estrellas. La región de formación estelar 30 Doradus se encuentra en la Gran Nube de Magallanes, una galaxia satélite de la nuestra. En su centro vemos el cúmulo estelar R136, cuyas estrellas, entre las más grandes y calientes conocidas, están saliendo de la envoltura que las cubría (en el centro).

Fuente: N. Walborn *et al.*, WFPC2, HST, NASA.

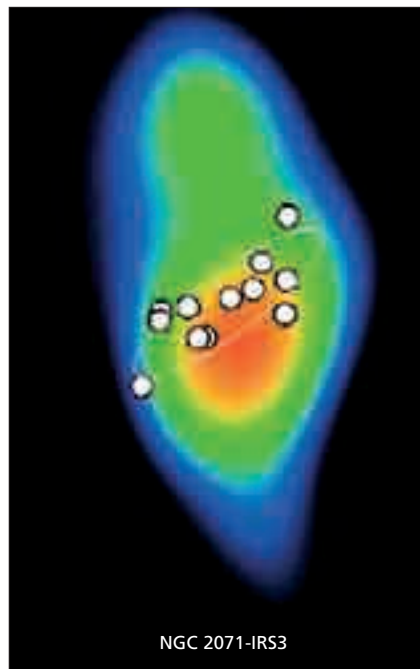


Figura 25.5. Embrión estelar. Imagen de una estrella en formación que muestra un incipiente chorro de material. A su alrededor se ha detectado vapor de agua (puntos blancos) en lo que parece ser un disco protoplanetario.

## Y se hizo la luz

En las primeras etapas (100.000 años) de la vida de la estrella, ésta se encuentra profundamente oscurecida por el polvo y sólo puede observarse con radiotelescopios o telescopios de infrarrojos. Después, a medida que el material cae sobre la protoestrella y la

envoltura se disipa, el embrión empieza a hacerse visible. En una estrella similar al Sol, este momento coincide con la llamada etapa de T Tauri, que tiene lugar, aproximadamente, un millón de años después del inicio del proceso de derrumbamiento; sólo al final de esta etapa, después de diez millones de años, el proceso de contracción gravitatoria finaliza y se alcanza la temperatura suficiente para el comienzo de las reacciones termonucleares que definen a una estrella propiamente dicha (etapa de secuencia principal). Para completar la formación de un sistema planetario se requiere aún más tiempo, entre 10 y 100 millones de años en estrellas como el Sol.

## Investigación futura

En los últimos años, el interés de los científicos ha ido desplazándose de cómo nacen las estrellas a cómo se forman los sistemas planetarios a su alrededor. Además, quedan pendientes aspectos muy importantes que apenas se empiezan a abordar en la actualidad: cómo se forman los sistemas binarios y múltiples, mucho más abundantes en el Universo que las estrellas solitarias como nuestro Sol, cómo se forman las estrellas más masivas y cuál es la mayor y la menor masa posible para una estrella.

## 26. La evolución de las estrellas

**L**as estrellas, tras una etapa sin cambios que abarca gran parte de su vida, sufren procesos espectaculares que las llevan a la muerte

Una estrella no permanece igual durante toda su existencia, sino más bien lo contrario: a lo largo de su vida cambia de tamaño, color, temperatura, luminosidad y composición química. Pero no lo hace de forma aleatoria. Sabemos que estos cambios siguen un proceso determinado, que depende básicamente de la masa de la estrella. Este proceso se denomina evolución estelar y puede abarcar de millones a billones de años, por lo que, comparadas con la vida media de un ser humano, las estrellas parecen eternas.

### ¿Por qué cambian?

En las estrellas existen dos fuerzas que actúan en equilibrio: la gravedad, que tiende a hundirlas bajo su propio peso y la presión, que tiende a expandirlas. Mientras que la gravedad, que depende de la cantidad de masa que posea la estrella, permanecerá casi constante a lo largo de la vida de ésta, la presión sí sufrirá modificaciones al depender de la forma en que la estrella genera energía. La evolución estelar constituye una continua lucha por mantener el equilibrio entre gravedad y presión, también llamado equilibrio hidrostático.

Las estrellas pasan gran parte de su existencia en la secuencia principal, que constituye su etapa adulta y se caracteriza por la obtención de energía mediante la combustión de hidrógeno.



Figura 26.1. Evolución. Representación esquemática de la vida de una estrella similar al Sol, desde su nacimiento hasta la fase de gigante roja.



Figura 26.2. Comienzo. HH32, una estrella recién nacida. Fuente: HST.

Así, a modo de central nuclear, los núcleos de hidrógeno interaccionan para dar lugar al helio, proceso en el que se produce una enorme cantidad de energía y que genera la presión necesaria para establecer un equilibrio con la gravedad. La duración de esta etapa difiere de una estrella a otra, en función del tiempo que el hidrógeno de su núcleo tarda en agotarse. Esto, a su vez, guarda una relación directa con la masa: una estrella mediana como el Sol pasará 10.000 millones de años en esta fase, mientras que una estrella más masiva, que necesita mucha más energía para evitar el hundimiento, fusionará el hidrógeno en helio a mayor velocidad. Como consecuencia, estas estrellas serán más luminosas y su paso por la

secuencia principal durará menos: una estrella diez veces más masiva que el Sol se mantiene en la secuencia principal tan sólo 100 millones de años.

### Las gigantes rojas

Si bien durante la secuencia principal la estrella apenas cambia, llega un momento en que el hidrógeno disminuye tanto que no mantiene el ritmo de las reacciones nucleares. El núcleo —prácticamente de helio— genera menos energía, se enfría, disminuye la presión y comienza a hundirse debido a su propio peso y al de las capas externas de la estrella. Todo este proceso calienta estas capas que,

Figura 26.3. Hacia el final. Betelgeuse, una gigante roja. Fuente: HST.



como todo gas al calentarse, comienzan a dilatarse y a expandirse como un globo que se hincha con aire caliente. La estrella aumenta su radio hasta casi cien veces su tamaño original, de tal forma que las últimas capas se alejan tanto del núcleo que apenas notan su influencia, y por tanto se enfrían. Al enfriarse adquieren un color rojizo, dando nombre a esta etapa de la evolución estelar, la de gigante roja, que nuestro Sol atravesará en unos 5.000 millones de años.

de tipo solar, logrará fusionar el helio en carbono, pero no tendrá suficiente combustible como para continuar la fusión del carbono en elementos más pesados. Veremos su final en el capítulo siguiente.

## Últimas etapas

Lo que le ocurre a la estrella a partir de la fase de gigante roja depende exclusivamente de su masa: si la estrella es suficientemente masiva dispondrá del combustible necesario para fusionar el helio en carbono y, cuando el helio se agote, la de carbono en oxígeno, luego en magnesio, silicio y toda una serie de elementos pesados. Cada una de estas fases se reflejará en cambios en el tamaño, color y luminosidad de la estrella. Por el contrario, si la estrella es



Figura 26.4. Ancianas. Un cúmulo globular, habitado por estrella muy viejas. Fuente: HST.





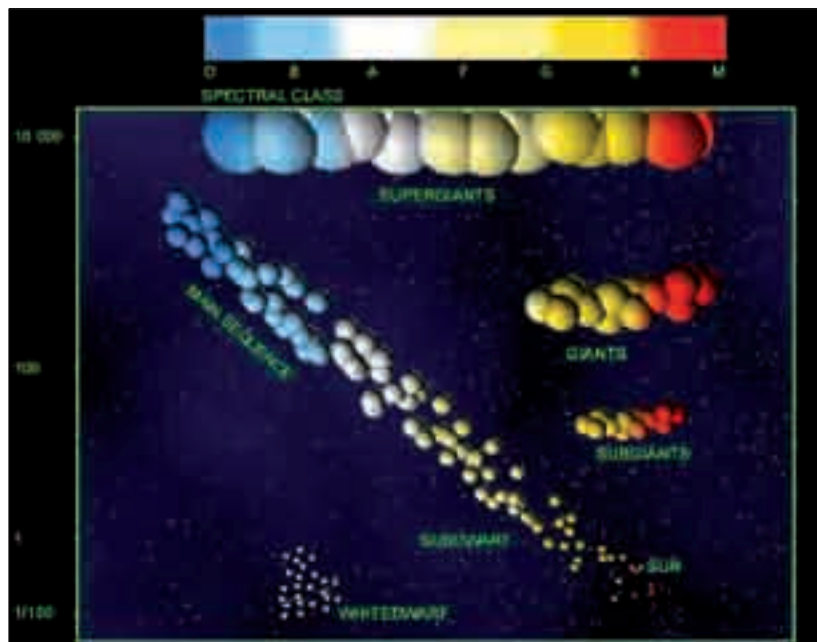
Figura 26.5. Comparación de tamaños. Una estrella como el Sol comparada con una gigante roja. El puntito que vemos en el disco solar correspondería al tamaño de una estrella enana blanca.

## El diagrama H-R

En 1911, Ejnar Hertzsprung y Henry Russell establecieron, de forma independiente, la relación empírica entre el color (temperatura) y la luminosidad de las estrellas, expresada en el diagrama H-R. Este diagrama sitúa a la izquierda las estrellas calientes y a la derecha las frías, arriba las más luminosas y abajo las más tenues.

Llama la atención la diagonal de puntos que recorre el cuadro y que corresponde a las estrellas de la secuencia principal, entre las que se encuentra el Sol. En la esquina superior derecha se hallan las gigantes rojas que, a pesar de ser frías, son más luminosas que nuestra estrella porque, al ser su superficie mucho mayor, la energía total radiada resulta

también muy elevada. Finalmente, observamos un pequeño grupo de estrellas en la región inferior izquierda del diagrama, las enanas blancas, que presentan características curiosas: son mucho más calientes que el Sol pero menos luminosas. Si empleamos el mismo criterio que con las gigantes rojas, este contraste tiene que deberse a que su superficie es muy pequeña y, de hecho, el tamaño de algunas no supera el de la Tierra. Sin embargo, diferentes observaciones han revelado que las enanas blancas pueden contener, en su reducido tamaño, una cantidad de masa similar a la del Sol: su densidad es tan alta que una cucharada de enana blanca pesaría cinco toneladas.





## 27. Soles moribundos

**U**na nebulosa planetaria es el efímero espectáculo cósmico de luces y color que despide la larga vida de las estrellas similares a nuestro Sol

¿Cuál es el fin que aguarda a una estrella? Tal y como decía un conocido mensaje publicitario, el secreto está en la masa. Así, las estrellas con masa diez veces superior a la del Sol consumen frenéticamente todo el hidrógeno de su núcleo y lo transforman en helio, luego el helio en carbono y oxígeno, y así sucesivamente hasta encontrarse con un núcleo de hierro del que no puede extraerse más energía. En este momento, la estrella explota en una supernova, una violenta explosión en la que la estrella es destruida.

Sin embargo, el destino de las estrellas cuya masa no supera las diez masas solares —el 99% de las estrellas

en una galaxia— será muy diferente. Estas estrellas, conocidas como estrellas de masa baja e intermedia, no conseguirán alcanzar en su núcleo las condiciones necesarias para fusionar los átomos de carbono y oxígeno en elementos más pesados. Frustrada su evolución hacia supernova, la fusión de hidrógeno en helio y de helio en carbono y oxígeno se extiende a capas cada vez más superficiales. La estructura de la estrella pierde estabilidad, la estrella se expande y se torna más fría y luminosa, proceso que la convierte en una gigante roja. La dilatación de la envoltura continúa hasta que el núcleo de carbono y oxígeno pierde el control sobre ella y se expande libre en el espacio. La envoltura estelar, ahora muy tenue, es transparente a la energía que emite el núcleo, que la ioniza y la hace emitir luz. La estrella se ha

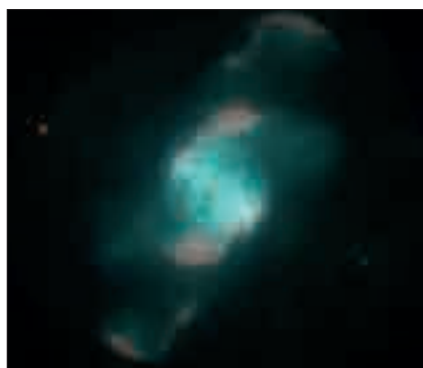
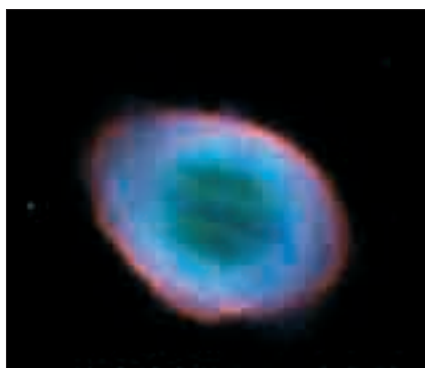


Figura 27.1. Formas nebulares. Usando telescopios rudimentarios, William Herschell relacionó, erróneamente, estas nebulosas con el origen de los planetas —de ahí su “apellido” planetarias—. Hoy día sabemos que nada tienen que ver con ellos. Sus formas varían desde la esférica de A 39 o la elíptica de NGC 6720 (también conocida como nebulosa de la Lira), hasta la bipolaridad de la nebulosa de la Hormiga o la simetría con respecto a la estrella central de IC 4634.

transformado en uno de los objetos celestes más bellos y enigmáticos, una nebulosa planetaria, compuesta por un núcleo estelar muy caliente rodeado de una envoltura fluorescente.

En un periodo de unos veinte a treinta mil años, la gloriosa planetaria se habrá disipado en el espacio. Su estrella central se habrá convertido en una enana blanca, condenada a enfriarse y apagarse lentamente. Dentro de 5.000 millones de años, éste será el destino de nuestro Sol.

## Intrigantes formas

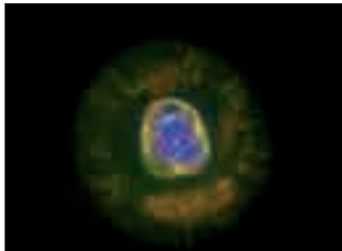
Aunque, a grandes rasgos, los astrónomos comprenden el proceso de formación de una nebulosa planetaria, aún quedan muchos aspectos pendientes de aclaración. Tal vez uno de los más importantes es el de la morfología nebulosa, es decir, la búsqueda de una explicación para las intrigantes formas que muestran las nebulosas. Si la envoltura estelar, originariamente esférica, se expande en el espacio, la lógica invita a pensar que las nebulosas planetarias deberían tener forma esférica. Pero esto no se cumple más que en una minoría de casos, mientras que predominan las nebulosas elípticas, bipolares o incluso con peculiares formas simétricas con respecto a la estrella central.

Todas las investigaciones concluyen que existe algún proceso que modifica dramáticamente la simetría esférica de la envoltura estelar y que se produce muy al

comienzo de la formación de la nebulosa planetaria. Si bien la causa de esta asimetría levanta aún intensos debates, existen tres modelos teóricos que acaparan la aceptación de los científicos. En el primero de ellos, una estrella compañera de la estrella central orienta la envoltura en expansión y la hace asimétrica. En el segundo modelo, el campo magnético de la estrella enfoca la envoltura en expansión del mismo modo que un imán orienta partículas de hierro. En el tercero, los chorros de material a muy altas velocidades observados en muchas planetarias modifican la morfología nebular.

### Un corazón caliente

Una de las predicciones básicas de los modelos de formación de nebulosas planetarias es la existencia de gas muy caliente en su interior, causado por la interacción de un viento estelar o de chorros de material, ambos de alta



### La pista

Aún no disponemos de suficientes datos que permitan dirimir entre uno de estos modelos, aunque la nebulosa planetaria K 3-35 puede constituir un valioso indicio: un equipo internacional de astrónomos, liderado por un científico del Instituto de Astrofísica de Andalucía, ha descubierto un campo magnético en esta joven nebulosa. Dicho campo genera un chorro muy focalizado de material a gran velocidad que, a su vez, interactúa con la envoltura nebulosa y condiciona su morfología y su evolución. ¿Hemos, finalmente, capturado el momento crítico en el que se decide la forma de una nebulosa planetaria?

velocidad, con la envoltura nebulosa. Este gas alcanzaría temperaturas tan elevadas que su emisión podría ser observada en rayos X. Las observaciones de la última generación de satélites de rayos X, Chandra (NASA) y XMM-Newton (ESA), han confirmado esta predicción: las nebulosas planetarias, en efecto, contienen en su interior gas muy caliente y extremadamente presurizado que empuja la envoltura nebulosa y es, en gran manera, responsable de la expansión y morfología nebulosa. La imagen muestra la nebulosa del Esquimal (Fuente: HST y XMM-Newton), que no es tan fría como su nombre parece indicar: su interior —en azul— alberga gas con temperaturas de dos millones de grados.

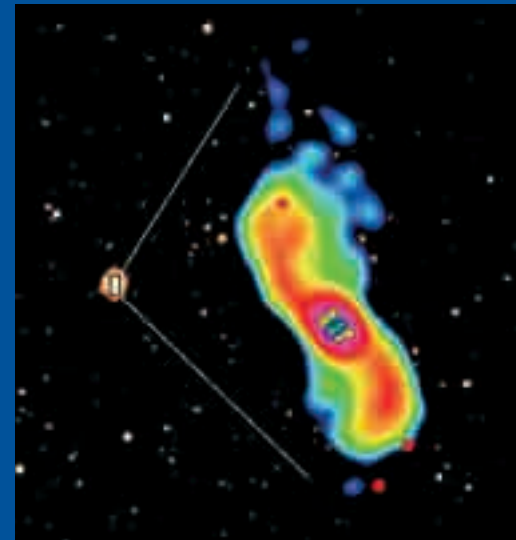


Figura 27.2. El indicio. K 3-35, la única planetaria en la que un campo magnético influye en un chorro de partículas de alta velocidad que, a su vez, modela la nebulosa. Fuente: Luis Miranda, IAA.

## 28. La muerte explosiva

**L**as supernovas, además de un fascinante espectáculo, constituyen el origen de los agujeros negros y de las estrellas de neutrones

Supernova es el nombre que recibe una estrella que muere de forma explosiva, lanzando al medio circundante la mayor parte de su masa a una velocidad que puede alcanzar los cuarenta millones de kilómetros por hora. Existen dos clases de supernovas: las de tipo II, Ib y Ic, que se originan en la explosión de estrellas muy masivas (al menos ocho veces la del Sol), y las de tipo Ia, que se crean a partir de la explosión de una enana blanca (su masa es aproximadamente 1,4 veces la del Sol) en un sistema estelar doble.

### La lucha de las gigantes

Las estrellas progenitoras de las supernovas de tipo Ib, Ic y II mantienen a lo largo de su vida una dura pugna entre la fuerza de gravedad, que tiende a hacer que la estrella se hunda, y la fuerza de radiación, que lo impide. La energía que evita el derrumbamiento proviene de las reacciones termonucleares que tienen lugar en el interior de la estrella, que a medida que envejece va formando una estructura similar a la de una cebolla: las capas más externas albergan hidrógeno y helio y, a medida que llegamos al núcleo de la estrella, encontramos carbono, nitrógeno, oxígeno y otros elementos pesados hasta llegar al hierro. Cuando la estrella ha quemado todo el combustible —esencialmente, cuando empieza

a producir hierro—, no tiene con qué contrarrestar la fuerza de la gravedad. Las capas externas se hunden y rebotan contra el duro núcleo de hierro, produciendo una explosión cuya luminosidad compite con la galaxia que la alberga. La teoría predice la formación de un cascarón esférico como resultado de la interacción del material eyectado con el que se encontraba en torno a la estrella progenitora, dejando en el centro de la explosión un remanente que daría lugar a una estrella de neutrones (púlsar) o a un agujero negro.

## Reactivación de una estrella

Las supernovas de tipo Ia son tan espectaculares como las de tipo Ib, Ic y II, y muestran, además, una extraordinaria uniformidad en brillo debido a la peculiar evolución de la estrella progenitora —una enana blanca— en un sistema binario.

Las enanas blancas son los restos de una estrella como el Sol que, tras gastar su combustible nuclear, han expulsado su atmósfera y conservan un núcleo muy compacto. Incapaces de generar energía, se enfriarán y se perderán de vista. Existe, sin embargo, una posibilidad que les permitirá brillar de nuevo, y que se atribuye a su pertenencia a un sistema binario. El proceso se desarrollaría del siguiente

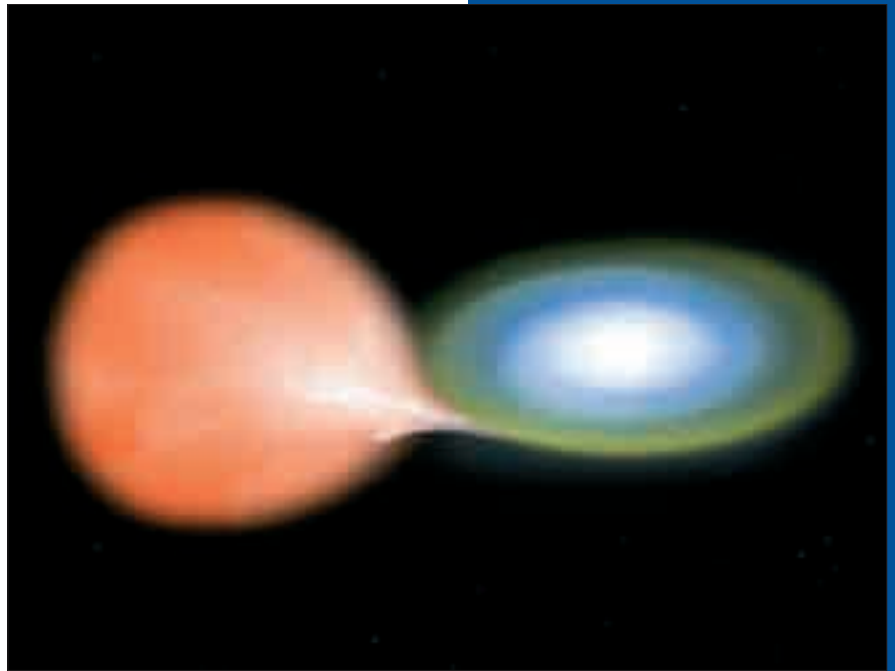


Figura 28.1. Binarias. Traspaso de materia de una gigante roja a un disco que rodea a la enana blanca. Cuando se acumule una cantidad de materia suficiente, se desencadenarán las reacciones que darán lugar a una explosión de supernova de tipo Ia.

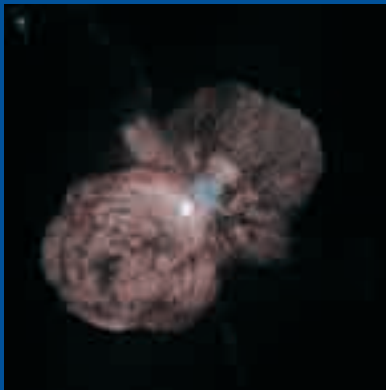


Figura 28.2. Condenada. Eta Carina, una estrella unas cien veces mayor que el Sol, es una excelente candidata a supernova, aunque se ignora cuándo explotará. Fuente: HST-WFPC2.



Figura 28.3. Brillante. Imagen tomada desde tierra de la supernova 1994D. Fuente: HST.

modo: cuando la estrella compañera agota su hidrógeno, el descenso de energía provoca la contracción y el calentamiento del núcleo, en tanto que las capas externas se expanden y se enfrían. Esto conlleva un importante aumento de tamaño y posibilita el volcado de material sobre la enana blanca (ver figura 28.1), cuyas peculiares propiedades le impiden llegar al atracón: existe un límite de masa —denominado de Chandrasekhar en honor a su descubridor— que una enana blanca no

puede sobrepasar sin sufrir desequilibrios tales que la desintegrarían por completo. Cuando la enana blanca está a punto de alcanzar ese límite, que se halla en 1,4 masas solares, la materia que la estrella compañera cede a la enana blanca aumenta la densidad del núcleo hasta tal punto que comienza la quema de carbono, lo que a su vez desata una serie de reacciones termonucleares incontroladas que provocan la explosión y la desintegración total de la enana blanca.

## Candelas estándar

En astronomía, la medición de distancias constituye una tarea primordial. La esencia de muchas de las técnicas empleadas resulta, a pesar del nombre —ley inversa del cuadrado de la distancia—, bastante sencilla: si tenemos una bombilla a un metro y nos alejamos otro metro, el brillo aparente de la bombilla disminuirá cuatro veces; si triplicamos la distancia, el brillo disminuirá nueve veces, y así de forma sucesiva. Entonces, si conocemos el brillo intrínseco de un objeto celeste podemos determinar su distancia y emplearlo como patrón de medida, o candela estándar. No obstante, hay que tener en cuenta que la distancia en el Universo no es sólo espacial, sino

también temporal, de modo que las imágenes que recibimos corresponden al pasado de los objetos: igual que la luz que emite el Sol tarda ocho minutos en llegar a la Tierra, las imágenes de las galaxias lejanas corresponden a una etapa de su evolución muy anterior, tanto que emplearlas como patrón de medida podría ser engañoso. Era preciso, pues, encontrar un tipo de objeto cuya luminosidad fuera comparable con la de las galaxias, pero que apenas variara de un objeto a otro, tanto en el Universo cercano como en el lejano. La respuesta a estos problemas llegó con el descubrimiento, en 1988, de la primera supernova distante de tipo Ia. Estas supernovas constituyen, en la actualidad, un valioso patrón de medida de distancias astronómicas.

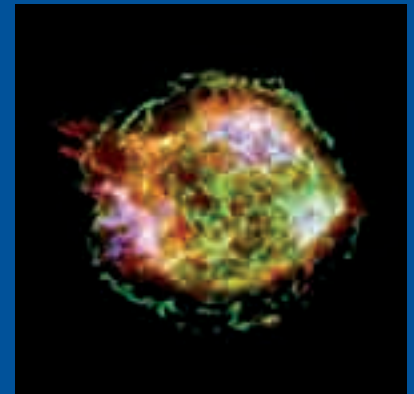


Figura 28.4. Restos. El remanente de la supernova Casiopea A, una nube con los restos de la explosión. Fuente: NASA, CXC, GSFC.

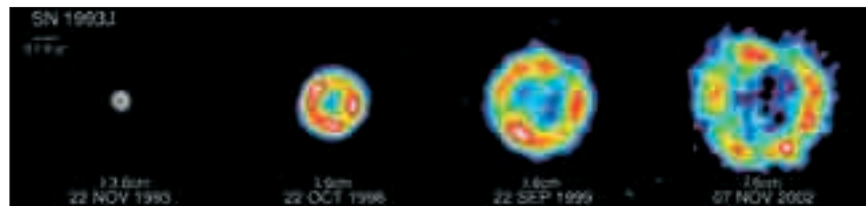
### Investigación

#### SN1993J: Interacción con el medio

Los astrónomos predijeron, hace más de veinte años, que la explosión de una supernova de tipo II debería dar lugar a la formación de un cascarón esférico, como consecuencia de la interacción del material eyectado a velocidades de hasta 20.000 kilómetros por segundo con el viento estelar de la estrella progenitora, muy denso y lento. Sin embargo, ninguna supernova había explotado lo suficientemente cerca como para contrastar los modelos. Afortunadamente, en 1993 explotó una supernova en la galaxia cercana M81:

conocida como SN1993J, constituye la confirmación más espectacular de las predicciones de los modelos teóricos. En la imagen, los colores más cálidos indican las

zonas de mayor emisión. Nótese cómo la estructura se expande con el tiempo y cómo el cascarón empieza a destruirse (noviembre de 2002). Fuente: IAA.





## 29. Los restos de las supernovas

**L**a muerte no constituye el fin de las estrellas de alta masa. Su cadáver dejará un importante rastro: un agujero negro o una estrella de neutrones

En una explosión de supernova, la estrella expulsa todas sus capas exteriores —técnicamente, su envoltura—, que pueden sumar de una a veinte veces la masa del Sol. Este cadáver estelar, denominado “remanente de supernova”, queda flotando en el medio interestelar y continúa expandiéndose durante cientos de años. Pero no todo se destruye en una explosión de supernova, sino que el núcleo de la estrella permanece. Este núcleo, rico en hierro, proseguirá su hundimiento sin que se produzcan reacciones nucleares. El hundimiento se detendrá o, por el

contrario, continuará indefinidamente dependiendo de la masa del núcleo tras la explosión. El valor mágico es, en este caso, tres veces la masa del Sol.

### Estrellas de neutrones o púlsares

Si el núcleo de la estrella no supera este valor, el hundimiento se detendrá por acción de los neutrones, que viajan libres porque la temperatura es ya tan alta que toda la materia se encuentra disociada en los componentes más simples: protones, neutrones y electrones. En este momento nace una estrella de neutrones, también conocida como púlsar.

Los púlsares, como si fueran faros, emiten luz de forma pulsada con una

cadencia que puede reducirse a milésimas de segundo. Su descubrimiento vino acompañado por la sorpresa, ya que estos objetos tenían que ser extremadamente calientes y compactos para emitir tal cantidad de energía en tiempos tan pequeños. Se elaboró una explicación teórica que supone que la estrella se contrae brutalmente por la fuerza de la gravedad, de forma que los núcleos atómicos se “estrujan” entre sí y los electrones y los protones interaccionan formando un “plasma de neutrones”. Una estrella de neutrones de este tipo puede contener la masa del Sol en un radio de decenas de kilómetros, lo que equivale a cientos de millones de toneladas por centímetro cúbico. En algunos casos, y debido a las condiciones extremas, la radiación de los púlsares se concentra en unos haces muy estrechos, de modo que la emisión sólo se detecta cuando los haces apuntan en dirección a la Tierra.

## Los agujeros negros

Por otro lado, si el núcleo de la estrella moribunda tiene una masa superior al límite, nada podrá detener su hundimiento. Seguirá contrayéndose hasta que su densidad se vuelva infinita y, finalmente, se convertirá en un agujero negro. Esto sucede con las estrellas con masa original superior

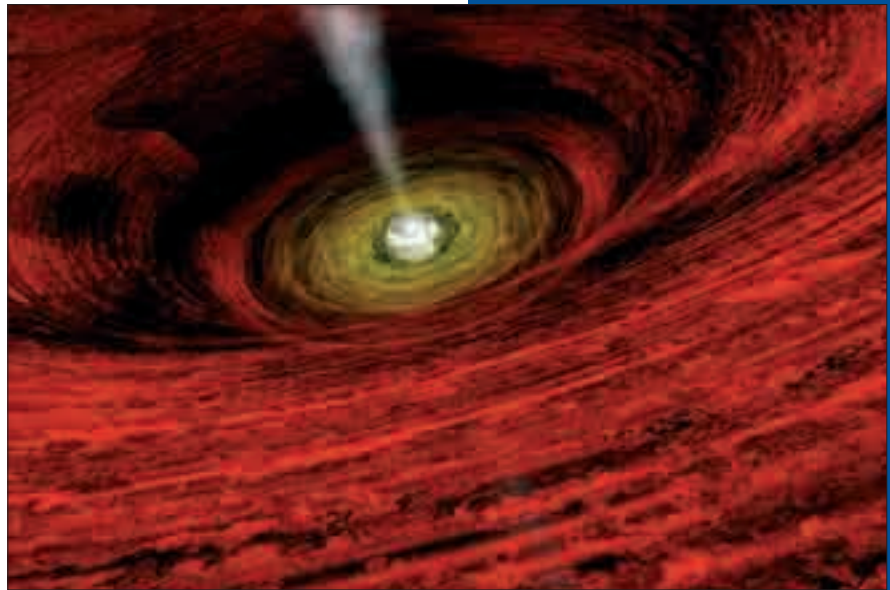


Figura 29.1. Evidencia. Ilustración de GRO J1655-40, un agujero negro detectado por la energía desprendida por el gas que le rodea. Fuente: A. Hobart, CXC.



Figura 29.2. El Púlsar del Cangrejo. Esta estrella de neutrones, que gira unas treinta veces por segundo, se encuentra en el centro de la Nebulosa del Cangrejo, fruto de una explosión de supernova acaecida en el año 1054. Fuente: J. Hester (ASU) et al., CXC, HST, NASA.

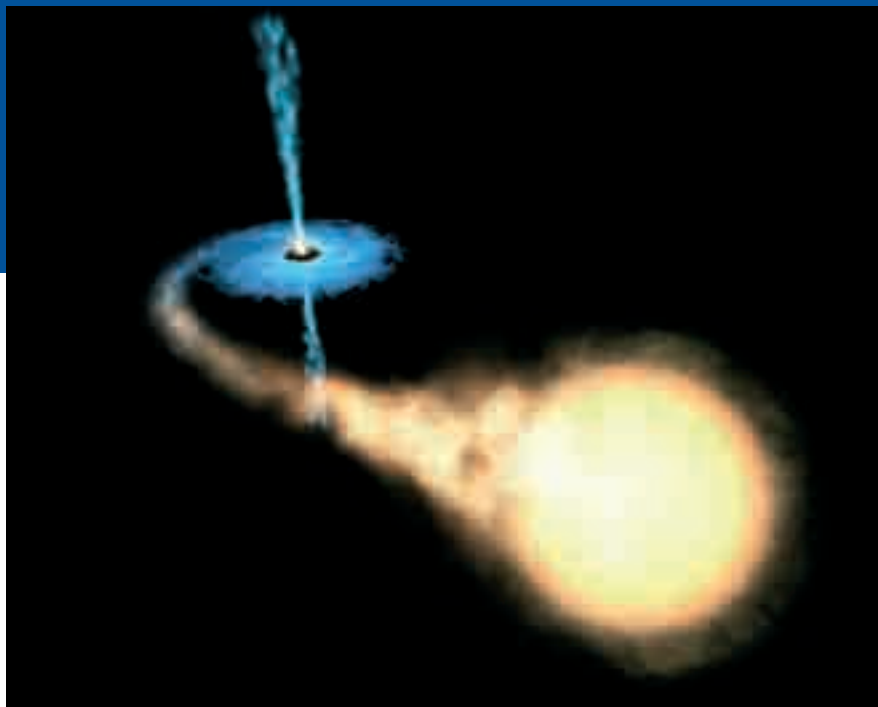


Figura 29.3. Binarias. La fuerza de gravedad del agujero negro atrae materia de la estrella compañera, que forma un disco a su alrededor.

a diez veces la del Sol, mientras que las que oscilan entre seis y diez masas solares darán lugar a púlsares.

La fuerza gravitatoria que ejerce un agujero negro es tan intensa que ni la luz puede escapar. Existe, no obstante, una región límite, denominada horizonte de sucesos, a partir de la que sí es posible la huida, aunque a la velocidad de la luz. La distancia entre el agujero y el horizonte de sucesos se conoce como Radio de Schwarzschild, y nos da una idea del “tamaño” del agujero negro. A modo de ejemplo, el tamaño de un agujero negro con la masa del Sol sería de

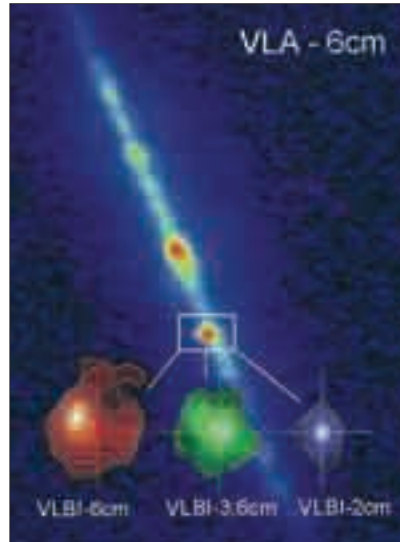
2,9 kilómetros, y para uno con la masa de la Tierra sería de 9 milímetros.

Pero si este tipo de objetos no emiten ni reflejan luz, y tampoco dejan que nada escape de su radio de acción, ¿cómo podremos detectarlos? Efectivamente, nunca podremos “ver” un agujero negro, pero sí que podemos observar los efectos que provoca en sus inmediaciones y, en concreto, en los objetos cercanos a él. Por ejemplo, si forma parte de un sistema binario, su fuerza de gravedad atraerá material de la compañera y formará un disco cuyo borde interno será el horizonte de sucesos (ver figura 29.3). Este material, en su caída hacia el agujero, sufrirá un fuerte calentamiento y liberará abundante energía en rayos X. Esta radiación constituye un indicio de la existencia de un agujero negro, aunque existen otros indicativos, como la expulsión de chorros de materia o diversos fenómenos eruptivos muy energéticos y violentos. Todo esto, además de su complejidad y su exótica naturaleza, hace de los agujeros negros uno de los objetos más fascinantes de nuestro Universo.

## Investigación

### Primera prueba

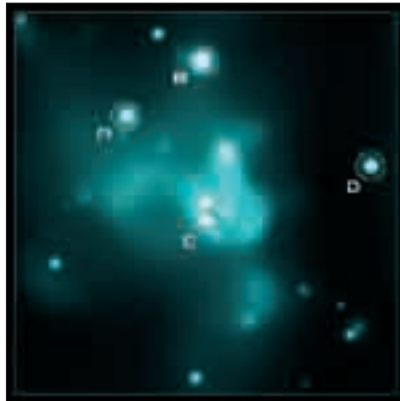
La supernova SN1986J fue descubierta en 1986, aunque los científicos creen que explotó tres años antes. Las observaciones —en radio y de muy alta resolución angular— en varias longitudes de onda han desvelado la presencia de un objeto compacto y muy brillante en su centro, lo que constituye la primera prueba experimental del modelo teórico que afirma que tras la explosión de una supernova debería quedar un objeto compacto, bien un agujero negro o una estrella de neutrones. “Se trata de una predicción de los libros de texto presenciada por primera vez”, comentó uno de los investigadores. Fuente: Bietenholz y Bartel.



## Actualidad

### Enjambre de agujeros negros

El observatorio de rayos X Chandra (NASA) ha hallado indicios de un enjambre de agujeros negros cerca del centro de nuestra galaxia, la Vía Láctea, gracias a las medidas de variabilidad de flujo de rayos X. Se estima que dichos agujeros, que pueden sumar un total de 20.000, emigraron desde regiones más externas —junto con un buen número de estrellas de neutrones— a lo largo de miles de millones de años. Durante el “rastreo”, los investigadores seleccionaron las fuentes con mayor emisión en rayos X, que corresponden a sistemas binarios donde un agujero negro o una estrella de neutrones arranca material a la estrella compañera.



## 30. El latido de las estrellas

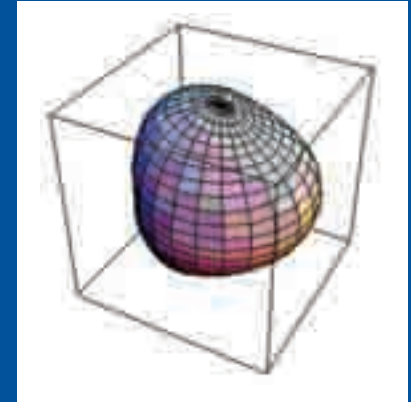
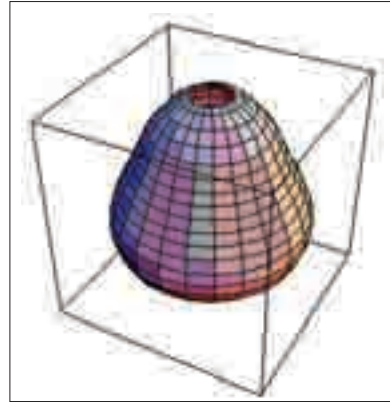
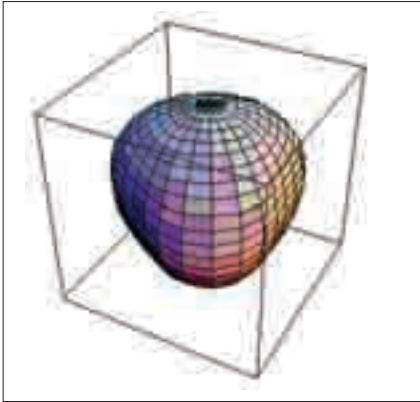
### **E**l movimiento del gas dentro de las estrellas produce “terremotos” estelares, cuyo estudio aporta información esencial para los astrónomos

En el siglo IV a.C., el filósofo griego Aristóteles elaboró una teoría cosmológica que, aunque errónea, dominó el pensamiento científico durante casi dos milenios: la Tierra se encontraba en el centro del Universo y todo giraba a su alrededor. Las estrellas se hallaban en una esfera, más allá de la lunar, donde permanecían fijas e inalterables. Nadie advirtió la referencia de Plinio el Viejo a una estrella nueva, bautizada “nova”, que apareció el año 134 a.C. Tampoco se conocía en Occidente la estrella nueva que apareció el año 1054 y que fue descrita con detalle por los astrónomos chinos.

Sin embargo, la concepción de los cielos inmutables terminó, finalmente, por agrietarse: en 1572, el astrónomo danés Tycho Brahe describió la aparición de otra estrella “nova” y, en 1596, David Fabricius dio la primera noticia sobre las variaciones periódicas de brillo de la estrella Ceti, apodada “Mira” —o maravillosa— por salirse del esquema aristotélico.

### **Primeras teorías**

En 1786, el científico John Goodricke atribuyó la variación de la luz de estas estrellas, cuya cifra iba en aumento, a los eclipses producidos por objetos que giran a su alrededor. Esta explicación, que se aplicó a todas las estrellas variables, perdió adeptos en el siglo XIX, cuando se comprobó que la



“curva de luz” no era la misma para todas las estrellas. La interpretación de las curvas de luz como consecuencia de los eclipses resultó imposible en el caso de las llamadas variables Cefeidas, de modo que se revisó la teoría: en 1912, Henrietta Leavitt descubrió que la relación entre el periodo y la luminosidad en estas estrellas sólo se explicaba si la estrella experimentaba variaciones de brillo intrínsecas, es decir, originadas y mantenidas por la propia estrella. Esta relación entre periodo y luminosidad establecida por Leavitt dio lugar a importantes avances: el periodo de oscilación de una estrella nos puede revelar su densidad —a mayor densidad, periodos más breves— y, conocida la densidad, los astrónomos pueden calcular el brillo intrínseco de la estrella. Como el brillo aparente disminuye con el cuadrado de la

distancia, podemos incluso calcular la distancia a la que se encuentran las estrellas. Cuando, en los años 20, se midieron los periodos de pulsación de las Cefeidas en las galaxias más próximas, el concepto de Universo se modificó: se comprobó que la luz de las Cefeidas tardaba en llegar a la Tierra millones de años, lo que dilataba enormemente las distancias y convertía las galaxias en verdaderos universos-islas.

### La música de las estrellas

Hace unos treinta años se descubrió que, al igual que el movimiento de las placas tectónicas provoca terremotos en la Tierra, el movimiento del gas dentro del Sol produce ondas sísmicas que alteran su superficie y producen

Figura 30.1. Modos de pulsación. Las estrellas poseen infinitos modos de oscilación, como puede apreciarse en las imágenes. Fuente: CNES.

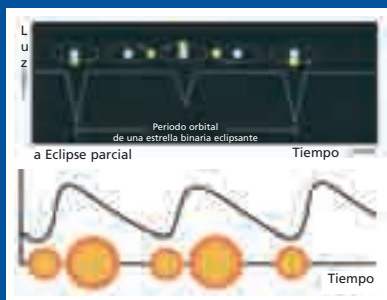


Figura 30.2. Comparación. Las curvas de luz de una estrella eclipsada y de una estrella variable muestran los errores en la teoría de John Goodricke.



Figura 30.3. Telescopio espacial. Ilustración de COROT, la misión que mide la pulsación de las estrellas. Fuente: ESA.

oscilaciones (algunas zonas se elevan mientras otras se hunden). Las ondas sísmicas no son sino ondas sonoras, pero con una frecuencia tan baja que el oído humano no puede detectarlas. Así, el movimiento del gas dentro de las estrellas produce el mismo efecto que nuestros dedos al agitar las cuerdas de una guitarra y, del mismo modo que el sonido que produce un instrumento musical depende de su forma, tamaño y constitución, la frecuencia de las oscilaciones de una estrella dependerá de su estructura.

Aunque el estudio de las oscilaciones en el Sol ya ha permitido realizar

sorprendentes avances, la búsqueda de esas pulsaciones en otras estrellas ha resultado más compleja debido a la distancia. No obstante, los astrónomos han hallado una alternativa: se trata de medir las variaciones en luminosidad que se producen cuando la estrella pulsa, método que aplica COROT, la primera misión espacial dedicada a la astrosismología en su programa central.

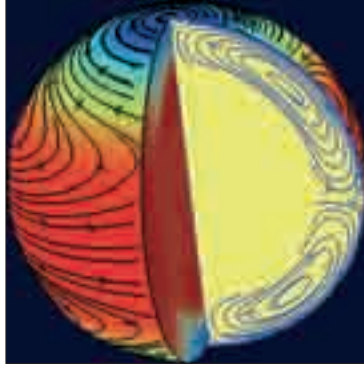
El seguimiento desde tierra de los “terremotos estelares” presentaba dos inconvenientes graves: las interferencias provocadas por la atmósfera, que hacen que las estrellas parpadeen, y la imposibilidad de realizar observaciones



## Investigación

### La heliosismología

El Sol vibra con periodos de oscilación de unos cuantos minutos, pero con amplitudes tan pequeñas que no se detectaron hasta los años 60. Su estudio constituye una rama de la astrofísica denominada heliosismología. Esta disciplina nos ha permitido “ver” dentro del Sol y descubrir las grandes corrientes de plasma que fluyen del ecuador a los polos, quizá una clave para comprender las variaciones seculares del brillo solar; a su vez, se cree que estas variaciones pueden ser de gran importancia para explicar las sucesivas glaciaciones terrestres.



de muy larga duración debido a las lagunas que la salida del Sol —y la “puesta” de las estrellas— dejarían; la misión COROT, constituida por un telescopio pequeño dedicado a la fotometría con una precisión extrema para observaciones de larga duración, salva estos inconvenientes y puede medir las oscilaciones en otras estrellas como el Sol con una precisión extrema.

La misión, en la que la participación española está coordinada por el IAA, nos permitirá calcular la edad de las estrellas más viejas de nuestra Galaxia con precisiones de hasta el 1%, lo que impondrá a su vez un límite para la edad de la Vía Láctea. De nuevo, la “música” estelar servirá para profundizar en el conocimiento del Universo.

## 31. Entre las estrellas

**E**l medio interestelar constituye el hábitat de las estrellas, e influye tanto en su existencia como en la luz que recibimos de ellas

Existe una tendencia general a pensar que el espacio entre las estrellas está vacío, algo que, aunque no muy lejos de la realidad, trunca nuestro conocimiento del Universo. Si exhalamos aire una sola vez y dejamos que se expanda en un espacio cerrado y vacío de un kilómetro cúbico, la densidad resultante superaría la de la mayor parte del medio interestelar. Aunque esto invita a pensar en un perfecto vacío, hemos de tener en cuenta que hablamos de un vastísimo espacio y que, a pesar de su baja densidad, sólo en la Vía Láctea se acumula una cantidad de materia interestelar superior a cinco mil

millones de soles. Pero ¿qué interés puede tener el estudio de lo que está en medio de las grandes protagonistas, las estrellas? Dos pistas: el medio interestelar no sólo afecta al modo en que recibimos su luz, sino que constituye su hábitat: las estrellas nacen a partir del material interestelar y, a lo largo de toda su vida, van devolviéndole materia en forma de viento estelar hasta que, al morir, expulsan su masa y enriquecen el medio, materia prima para una nueva generación de estrellas.

### Gas en diferentes formatos

El material interestelar de la Vía Láctea y, posiblemente, del resto de galaxias, abarca de un 10 a un 15% de la masa total galáctica y se compone de gas

y polvo distribuido en las siguientes proporciones: un 99% de gas, del que, aproximadamente, un 90% es hidrógeno y el resto elementos más pesados —principalmente helio—, y un 1% de polvo, compuesto por carbono, hierro y silicatos.

El hidrógeno, elemento principal, forma distintos tipos de “nubes” según el estado en que se encuentre: bien en forma de átomos neutros, de átomos ionizados —a los que les falta un electrón— o bien en forma de moléculas.

El primero es el elemento constituyente de las nubes frías y ocupa, aproximadamente, la mitad del volumen del medio interestelar. En segundo lugar, y en general como consecuencia de la proximidad de estrellas muy masivas y energéticas, encontramos nubes calientes de gas ionizado —regiones HII—, también conocidas como nebulosas de emisión. Estos objetos constituyen una pista inequívoca de la existencia de estrellas jóvenes, y existen ejemplos ya famosos como la nebulosa de Orión o la de la Roseta. Finalmente, encontramos grandes concentraciones de moléculas de gas confinadas dentro de nubes de gas y polvo muy densas y frías, conocidas como nebulosas oscuras o de absorción, donde la luz no puede penetrar. Este bloqueo de la luz produce imágenes curiosas, a modo de huecos en el espacio, como el Gran



Surco que divide la Vía Láctea en dos o la nebulosa llamada Bolsa de Carbón.

### Polvo interestelar

Aunque el polvo constituye apenas un 1% del material interestelar, sus efectos en las regiones más densas, como en las nebulosas oscuras, pueden llegar a ser dramáticos.

Figura 31.1. Emisión. La nebulosa de la Roseta, una nube caliente de gas ionizado en cuyo centro se distinguen las estrellas responsables de la ionización.



Figura 31.2. Nebulosa de la Cabeza de Caballo. El polvo interestelar, que bloquea el paso de la luz, ha dado lugar a esta peculiar forma. Fuente: Loke Kun Tan (StarryScapes).

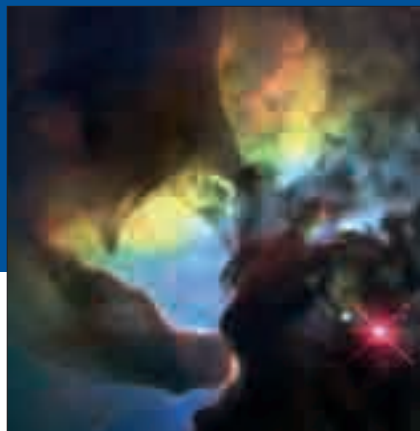


Figura 31.3. Retorcidos. Esta imagen del Telescopio Espacial Hubble (HST) muestra un par de remolinos interestelares en el corazón de la nebulosa Messier 8. Fuente: A. Caulet (ST-ECF, ESA) and NASA.

Las partículas de polvo afectan a la luz de las estrellas de dos formas, conocidas como extinción y enrojecimiento interestelar. La primera consiste en la atenuación de la luz en todas las longitudes de onda, un fenómeno similar a lo que nos ocurre al conducir con niebla: las gotitas de agua de que se compone la niebla bloquean la luz y hacen que todo aparezca más tenue y, como tendemos a relacionar la falta de nitidez con el distanciamiento, podemos creer que una luz tenue muy próxima se encuentra muy lejos. Del mismo modo, las estrellas parecen menos luminosas a causa de la falta de transparencia absoluta del medio (por ejemplo, en el rango visible, de cada 100.000 millones de fotones emitidos por una estrella en el centro de la Vía Láctea, sólo uno consigue llegar hasta nosotros), un efecto que los

astrónomos deben corregir para evitar errores a la hora de asignar distancias.

El segundo efecto del polvo interestelar, el enrojecimiento, proviene de la relación entre la longitud de onda de la luz y el tamaño de las partículas de polvo y se manifiesta en una mayor dispersión de los fotones azules, o de menor longitud de onda. Así, la radiación que emite un objeto lejano irá perdiendo por el camino una mayor proporción de fotones azules y, como consecuencia, parecerá más rojo de lo que en realidad es. Se trata del mismo efecto que provoca los atardeceres rojizos: cuando el Sol se halla cerca del horizonte, su luz ha de atravesar más aire (y por lo tanto, más polvo), de modo que se pierden muchos fotones azules y el Sol enrojece.

## Reciclaje

Mediante las reacciones nucleares que se producen en su interior, las estrellas traspasan los elementos: una vez

Figura 31.4. Reciclaje. Este esquema muestra la compleja relación del medio interestelar con las estrellas, con los sistemas planetarios e incluso con la vida. Fuente: Peter Woitke.

transformado todo el hidrógeno en helio, comienzan a fusionar el helio en carbono, después el carbono en oxígeno, y éste en magnesio, silicio y toda una serie de elementos pesados. Cuando las estrellas mueren, expulsan al medio la mayor parte de su masa, de

modo que éste se va enriqueciendo y da origen a generaciones de estrellas que, al igual que el Sol, ya cuentan desde su nacimiento con elementos más pesados que el hidrógeno y el helio que componían las primeras generaciones.



## 32. Estadillos cósmicos de rayos gamma

**L**a muerte de estrellas decenas de veces mayores que el Sol o la fusión de dos agujeros negros pueden dar lugar a los eventos astronómicos más violentos conocidos

En 1967, la serie de satélites espía norteamericanos Vela, diseñados para verificar que la URSS cumplía los tratados de no proliferación de armas nucleares, registró una serie de explosiones de rayos gamma —el tipo de radiación más energética del espectro— que procedían del espacio. Este casual descubrimiento abrió uno de los grandes enigmas de la astrofísica del siglo XX que, bajo el nombre de GRBs —del inglés Gamma Ray Burst, o explosiones de rayos gamma—, constituye uno de los fenómenos más energéticos del Universo.

### Fenómenos escurridizos

Los GRBs son intensos destellos de rayos gamma cuya duración oscila entre la centésima de segundo y los cien segundos. Su extrema brevedad es tan sólo una de las dificultades para su estudio, ya que nuestra atmósfera bloquea el paso de la radiación gamma e impone la utilización de satélites para la detección de GRBs. Para mayor complicación, la localización que proporcionan los satélites no es lo bastante precisa como para identificar el objeto responsable de la radiación, de modo que se necesita también el apoyo de telescopios en tierra que detecten su emisión en otras longitudes de onda, como la luz visible o el infrarrojo. Además, los GRBs se producen prácticamente en todas las regiones del cielo, sin ninguna orientación

preferente y sin previo aviso, lo que los hace especialmente escurridizos: si bien se estima que se producen unos tres GRBs al día, sólo tres mil han sido detectados desde 1967 y, de ellos, tan sólo cincuenta se han podido identificar desde la Tierra.

Con estos datos no resulta extraño que el enigma de los GRBs se haya extendido durante décadas y que, por ejemplo, su origen fuera objeto de un intenso debate hasta la década de los noventa: algunos científicos aseguraban que las explosiones de rayos gamma se producían en el Universo lejano, en tanto que otros apostaban por la Vía Láctea como origen de los mismos. La primera identificación en tierra de un GRB en 1997 cerró el debate para asombro de muchos: las explosiones procedían de galaxias muy lejanas, a miles de millones de años luz, lo que implicaba que los GRBs eran los objetos más violentos del Universo: de hecho, la energía liberada por un GRB equivale a la que emiten mil estrellas como el Sol a lo largo de sus diez mil millones de años de vida.

## Violentos progenitores

Pero ¿qué objeto es capaz de generar una explosión semejante? La lista de posibles progenitores, al principio larga, se ha reducido a dos: estrellas muy masivas —de más de treinta masas



Figura 32.1. Satélite. Concepción artística del satélite Swift (NASA), con una explosión de rayos gamma de fondo. Fuente: Spectrum Astro.



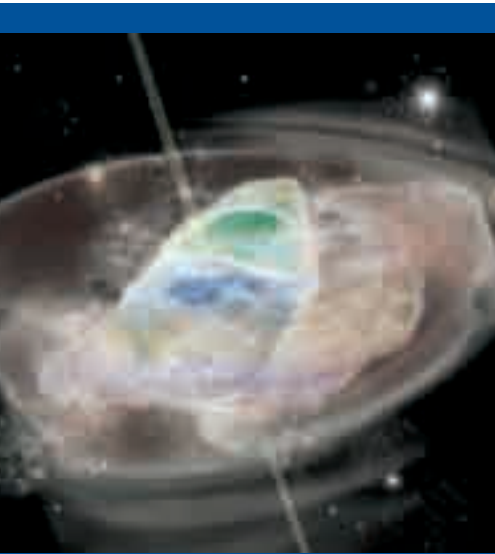


Figura 32.2. Modelo. Concepción artística de la fusión de dos estrellas de neutrones, uno de los posibles progenitores de las explosiones de rayos gamma.  
Fuente: NASA E/PO, Sonoma State University, Aurore Simonnet.



Figura 32.3. Post-luminiscencia. La explosión de GRB viene seguida de una especie de resplandor (o post-luminiscencia), cuyo brillo decrece rápidamente con el tiempo. La imagen muestra el GRB030329, acaecido el 29 de marzo de 2003. Fuente: ESO.

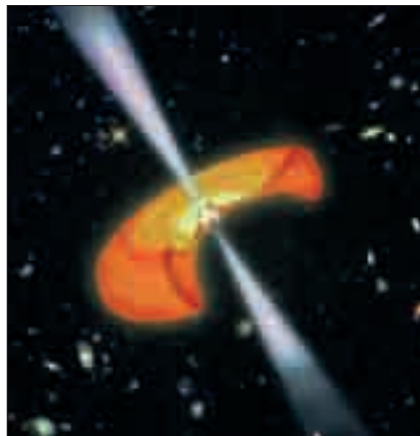


Figura 32.4. Hipernova. Concepción artística del origen de un GRB a partir de la explosión de una estrella muy masiva.

solares— y sistemas binarios compuestos por estrellas de neutrones o agujeros negros. El primer caso nos acerca a un fenómeno conocido, las supernovas, pero en una versión tan intensa que se ha denominado “hipernova”: el núcleo de hierro de las estrellas tan masivas se derrumba para dar lugar a un agujero negro, proceso en el que se libera gran cantidad de energía en forma de explosión de rayos gamma. Se piensa que los GRBs “largos”—de duración mayor a dos segundos— proceden de este tipo de eventos, mientras que la familia de los GRBs “cortos”, de apenas dos segundos, se atribuyen a sistemas binarios. De los cincuenta GRBs identificados, todos pertenecen a la familia larga, de modo que los cortos constituyen un completo misterio. Sin embargo, los astrónomos han desarrollado un modelo, el de “coalescencia”, que explica el proceso: un sistema binario de estrellas masivas, tras miles de millones de años, se convertirá en un sistema de agujeros negros o de estrellas de neutrones. Con el tiempo, los dos objetos caerán, como si de un desagüe se tratara, hacia el centro común, donde se fusionarán y formarán un único agujero negro. De nuevo, la energía liberada toma la forma de una explosión de rayos gamma.

## Investigación

### DetECCIÓN DE GRBS EN GRANADA

Recientemente, la NASA ha enviado al espacio la misión Swift, con la que se espera localizar e identificar más de cien GRBs al año. Esta misión necesita, sin embargo, el apoyo desde tierra de observaciones complementarias, lo que constituye uno de los objetivos de BOOTES-IR. Se trata de un telescopio robótico, desarrollado por el Instituto de Astrofísica de Andalucía y situado en el Observatorio de Sierra Nevada, que vio su primera luz en febrero de 2005. BOOTES-IR es capaz de apuntar a cualquier región de la esfera celeste en menos de un minuto, de modo que cuando reciba —vía Internet o incluso mediante teléfono móvil— las alertas de Swift, girará rápidamente a la posición proporcionada y tomará imágenes del GRB antes de que su emisión en luz visible se extinga. Dotado, de momento, de una cámara óptica, BOOTES-IR se equipará con una cámara infrarroja que permitirá detectar los GRBs más lejanos. Se estima que, en



Figura 32.5. El telescopio BOOTES-IR (IAA).

un futuro próximo, los telescopios de mayor tamaño —como el Gran Telescopio Canarias— utilizarán los datos sobre la posición de los GRBs obtenidos por BOOTES-IR para profundizar en el análisis de estos escurridizos eventos. La rapidez de apuntado de este pequeño telescopio permitirá, quizá, detectar e identificar por primera vez un GRB de corta duración.

## 33. Llovizna cósmica

**L**a atmósfera terrestre nos protege de ellos con la misma eficacia que un muro de hormigón de cuatro metros de ancho, pero los rayos cósmicos se las arreglan para aterrizar

En el espacio ocurren cosas extrañísimas: pedazos minúsculos de materia que viajan casi a la velocidad de la luz chocan todos los días con la atmósfera terrestre, se descomponen en otras partículas secundarias y éstas, literalmente, nos atraviesan. Aunque ni las vemos ni las sentimos: si alzamos la mano durante diez segundos, unas doce partículas la traspasarán, y nosotros tan contentos.

### Un descubrimiento azaroso

Para conocer un poco mejor a estos inofensivos atacantes, denominados rayos cósmicos, tenemos que remontarnos a principios del siglo pasado: el físico neozelandés Ernest Rutherford se hallaba inmerso en sus investigaciones sobre el fenómeno de la ionización, o proceso por el que un átomo, al perder un electrón, adquiere carga positiva. Rutherford descubrió que, incluso dentro de una caja de cinco toneladas de plomo, se producían unos seis iones por segundo por cada centímetro cúbico: algo tremendamente penetrante tenía que llegar desde fuera y arrancar los electrones de los átomos.

Al principio se pensó que esa “radiación ionizante” provenía del propio planeta Tierra, hipótesis que se creyó cierta al tomar medidas desde

lugares muy altos, como la torre Eiffel, donde se comprobó que el número de iones disminuía. Sin embargo, el físico Víctor Hess y sus experimentos desde un globo aerostático desvelaron una realidad más compleja: tras la disminución inicial anteriormente medida, se registraba un aumento espectacular en el número de iones, hasta superar los ochenta por centímetro cúbico. Se descartó el origen terrestre de estas partículas y, ya que venían del cielo, comenzaron las investigaciones para averiguar con exactitud de dónde. Esto provocó una nueva conmoción, ya que los rayos cósmicos no provenían de ninguna dirección particular, sino que llegaban de todas las partes del cielo. Si estaban tan esparcidos, el origen debía hallarse a enormes distancias, mucho más allá de los confines del Sistema Solar —de hecho, se encuentran esparcidos por toda la Galaxia—.

Quedaba, sin embargo, una última sorpresa, que incluso pondría en entredicho el bonito nombre asignado. Los rayos cósmicos no son, en realidad, un tipo de radiación (como los rayos X, la luz visible o el infrarrojo), sino pedacitos de materia ordinaria que experimentan una aceleración tan grande que los convierte en las partículas más veloces del Universo: se trata de núcleos de átomos, sobre todo de hidrógeno, y algunos electrones que, al estar eléctricamente cargados, son

desviados por los diversos campos magnéticos existentes en nuestra Galaxia. Imaginemos que los rayos cósmicos son virutas de metal pululando en un espacio salpicado de imanes: el recorrido de las virutas variará tanto que resultará imposible reconstruir su trayectoria. De ahí que parezca que provienen de todas partes y que su origen sea tan difícil de determinar.

### Tipos de rayos y orígenes

Tras su descubrimiento, y ante la carencia de aceleradores de partículas potentes, los rayos cósmicos fueron estudiados como una fuente de partículas. Gracias a ellos se descubrieron partículas subatómicas como los positrones o muones y, aunque estas aplicaciones continúan, hoy día la investigación se centra en averiguar su origen, el motivo de su aceleración y sus efectos en la Galaxia.

Los rayos cósmicos más comunes son los procedentes del Sol, también conocidos como viento solar, que se producen durante los fenómenos propios de la actividad solar (erupciones o eyecciones de masa coronal) y se caracterizan por su baja energía. En segundo lugar encontramos los rayos cósmicos de energía media, también bastante comunes aunque con un origen mucho más distante: este tipo de



Figura 33.1. Esquema. Lluvia de partículas secundarias a partir de la colisión de una única partícula de alta energía. Fuente: Sten Odenwald.

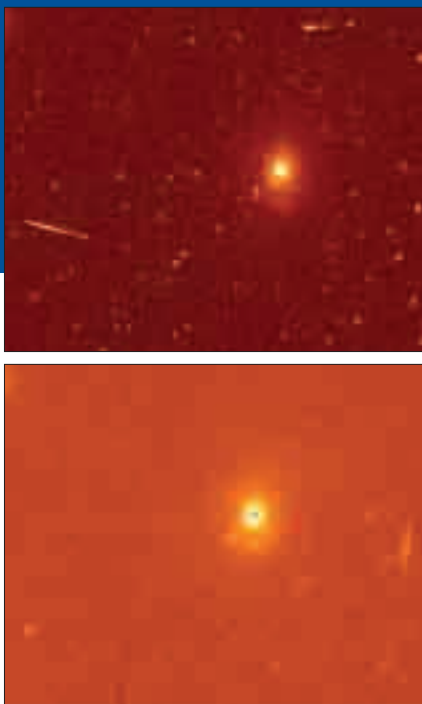


Figura 33.2. Obstáculos. Los rayos cósmicos ensucian las imágenes astronómicas, como vemos en estas fotografías tomadas por David Floyd (la primera en bruto y la segunda tras la corrección). Para eliminar los rayos cósmicos es necesario comparar varias imágenes: como se trata de eventos muy breves, sólo hay que eliminar los puntos luminosos que no aparecen en las distintas tomas.



Figura 33.3. Microscópicas. Imagen tomada a través de un microscopio donde se observa la colisión de una partícula y la trayectoria de las partículas secundarias.  
Fuente: NASA.

partículas se asocia con las explosiones de supernova, en las que las estrellas expulsan al medio gran parte de su masa; así, los núcleos atómicos podrían ser acelerados bien por la propia explosión o por las ondas de choque generadas por la misma.

La clasificación termina con los rayos cósmicos ultra energéticos, muy escasos (a una media de uno por kilómetro cuadrado por siglo) pero capaces de avergonzar a los mejores aceleradores de partículas construidos por el hombre. La energía de los rayos cósmicos se mide en electronvoltios y, si bien los de baja energía apenas llegan al millón y los

de media pueden alcanzar los mil billones —un uno seguido de quince ceros—, los ultraenergéticos han llegado a precisar de 22 ceros. Los rayos cósmicos de esta magnitud, denominados primarios, chocan con las partículas de la atmósfera terrestre y producen varias partículas secundarias, que a su vez generan una cascada de colisiones de partículas secundarias y lluvias de millones de fragmentos que pueden abarcar varios kilómetros cuadrados y penetrar hasta un kilómetro de profundidad bajo la superficie terrestre.

La velocidad de los rayos cósmicos ultraenergéticos, que puede superar el 99% de la velocidad de la luz, resta efectividad a los campos magnéticos y las trayectorias apenas experimentan cambios. No obstante, llegan con tan poca frecuencia a la Tierra que su origen aún levanta controversia. Algunas teorías los relacionan con cuásares difuntos —agujeros negros supermasivos como núcleos de galaxias que, a pesar de su



Figura 33.4. Expedición. El físico Víctor Heiss, autor de diversas medidas desde globos aerostáticos.

“certificado de defunción”, aún conservan algo de actividad—, y otras especulan con “defectos” en el espacio-tiempo o con dimensiones

desconocidas, aunque, a la espera de mejores datos, estos rayos cósmicos conservan su halo de misterio y siguen siendo un desafío científico.

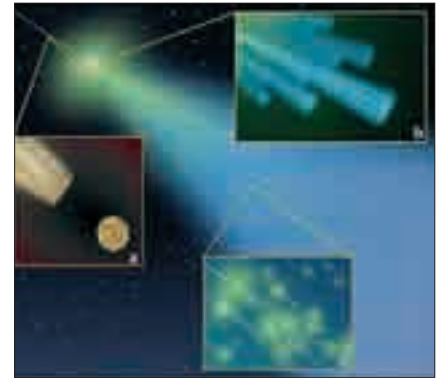


Figura 33.5. Choque. La imagen “a” muestra el choque de una partícula cósmica contra una de la atmósfera, lo que provoca una cascada de partículas secundarias —“b”— que, a su vez, producen una lluvia de millones de partículas —“c”—. Fuente: Universidad de Utah.

## 34. El zoo de las galaxias

**L**as galaxias son conjuntos de estrellas, gas y polvo que se mantienen unidos por efecto de la gravedad. Todas ellas existían antes de que naciera la Tierra

Vivimos en una galaxia espiral, la Vía Láctea, que contiene alrededor de doscientos mil millones de estrellas. Nuestro vecindario más cercano comprende, entre otras, las Nubes de Magallanes —un par de pequeñas galaxias satélite que se encuentran a 100.000 años luz— y la galaxia de Andrómeda, otra espiral situada a unos dos o tres millones de años luz. Todo esto constituye, no obstante, una diminuta entidad dentro del Universo, formado por miles de millones de galaxias que se agrupan, debido a su fuerza de gravedad, en pares de galaxias, grupos de decenas de ellas, cúmulos de cientos y supercúmulos.

Aunque las galaxias presentan diferentes colores, formas, tamaños y edades, a principios del siglo XX los astrónomos Hubble y Lundmark las clasificaron, por su forma, en tres tipos fundamentales (elípticas, espirales e irregulares), lo que resultó en el esquema básico que aún se utiliza.

### Galaxias espirales

Las galaxias espirales, como la Vía Láctea, presentan tres componentes básicos: una zona esférica central, o bulbo, que envuelve el núcleo y se compone de estrellas viejas; a su alrededor hallamos una estructura casi plana, el disco, compuesto por estrellas, gas y polvo, en el que destaca una estructura en forma de espiral donde se concentra la actividad de formación



estelar. Y ciñendo la galaxia encontramos el halo, una amplia esfera formada por algunos cúmulos globulares y estrellas viejas dispersas. Se piensa que, a distancias muchísimo mayores, se extiende un halo de materia no visible, o materia oscura.

Las espirales son el tipo de galaxias más abundante en nuestra vecindad y muestran diversas variedades, dependiendo del grosor de su bulbo o la definición de los brazos. La presencia de “barras” —estructuras que se extienden a ambos lados del núcleo— constituye otra característica fundamental de estas galaxias (de hecho, dos tercios de las espirales, incluida la Vía Láctea, son barradas). Las simulaciones numéricas, que han reconstruido la evolución de una barra comprimiendo miles de millones de años en unos pocos segundos, muestran que la aparición y evolución de la barra produce efectos fundamentales en la vida de una galaxia espiral, ya que actúa como un transportador de material desde las partes exteriores del disco hacia el centro y engorda el bulbo. Curiosamente, esto puede llevar a la autodestrucción de la barra y a un cambio en la clasificación morfológica de la galaxia. Se cree que las barras podrían, además, producir la formación de estrellas de manera violenta en las partes próximas al núcleo galáctico, así como proporcionar el material necesario para alimentar el agujero

negro central. Esto da lugar, a su vez, a la llamada actividad nuclear, que produce una cantidad de energía mucho mayor de la que se podría atribuir a los procesos normales de las estrellas o del material interestelar en el núcleo de esas galaxias.

### Elípticas e irregulares

Las galaxias elípticas son sistemas semejantes, grosso modo, a un balón de rugby. Se componen de estrellas viejas y polvo (apenas tienen gas) y no presentan detalles estructurales importantes, aparte de un núcleo concentrado alrededor del que se observa una nebulosidad cuyo brillo decrece suavemente hacia el exterior. Estas galaxias constituyen la población dominante de las partes centrales de los cúmulos de galaxias.



Figura 34.1. Lenticular. Existe un tipo de galaxias que parece un estado de transición entre las elípticas y las espirales; se trata de las galaxias lenticulares que, como NGC 2787, poseen una suave extensión similar a un disco que emerge del bulbo pero que carece de estructura espiral. Fuente: HST.

Figura 34.2. Barrada. La galaxia espiral NGC 5850 muestra claramente una barra. Fuente: HST.

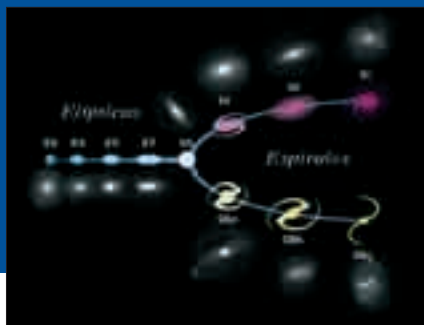


Figura 34.3. Diversas formas. Este esquema muestra la clasificación morfológica propuesta por Hubble.



Figura 34.4. Irregular. La gran Nube de Magallanes, una galaxia satélite de la Vía Láctea. Fuente: NASA.

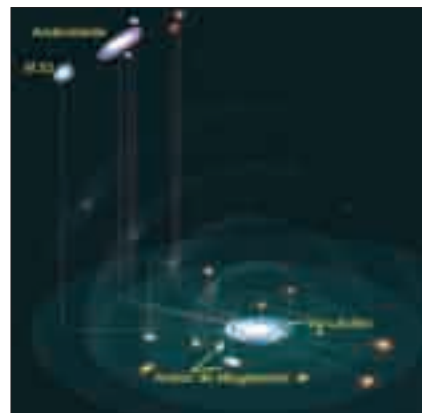


Figura 34.5. Vecindario galáctico. La Vía Láctea, rodeada de un séquito de galaxias enanas. Más allá se encuentra Andrómeda, otra galaxia espiral. Fuente: Mark A. Garlick.

Por su parte, las galaxias irregulares muestran un aspecto muy variado, aunque en general bastante amorfo. Contienen gran cantidad de gas y son ricas en estrellas jóvenes. Aún se ignora la razón de su forma irregular, aunque en muchos casos se atribuye a la interacción o a la colisión con otras galaxias cercanas que, además de romper las formas originales, puede

disparar el proceso de formación estelar.

### Las excepciones

Existen, finalmente, galaxias que no se ajustan al esquema de Hubble, como las galaxias perturbadas por la interacción con otras. Pero también

quedan fuera de la clasificación aquellas cuya apariencia no está conectada con la interacción de forma evidente, como las conocidas como galaxias enanas por su tamaño físico —menos de la mitad de una galaxia normal—, junto con otras que, con tamaños similares a los de galaxias espirales, muestran luminosidades muy inferiores —conocidas por ello como galaxias de bajo brillo superficial—.

#### Investigación Evolución galáctica

Hubble diseñó un esquema evolutivo donde las galaxias elípticas constituían las galaxias tempranas que se convertirían en galaxias tardías, o espirales. Ahora sabemos que esto es incorrecto: las galaxias espirales muestran un alto grado de rotación y las elípticas no. Como éstas no pueden empezar a rotar de forma espontánea, resulta poco probable que se conviertan en espirales. En sentido inverso, la evolución sí puede tener lugar ya que todo apunta a que algunas galaxias elípticas se han formado tras la colisión y fusión de dos o más galaxias espirales.

En la actualidad, los astrónomos no consideran las galaxias como sistemas inmutables en el tiempo, sino en permanente cambio; en consecuencia, su lugar en la secuencia de Hubble cambiará a lo largo de sus vidas.

Quedan, todavía, muchas preguntas abiertas: ¿Qué provoca que una galaxia sea de un tipo morfológico u otro? ¿Mantiene la misma forma durante toda su vida? ¿Existe una relación entre ésta y el momento en la vida del Universo en el que se formó?

## 35. La historia de nuestra Galaxia

**L**a humanidad lleva siglos intentando responder a dos preguntas básicas: ¿Qué es la Vía Láctea? Y ¿cómo se formó?

La historia de la Astronomía nos ha puesto en contacto con diversos entes que podrían considerarse trazadores de la evolución del pensamiento humano. Uno de estos objetos, quizás uno de los más hermosos, es la Vía Láctea.

La Galaxia ha conformado mitos, ha generado historias, paradojas y poesías y es sujeto del arte y de la ciencia. Hoy en día, aparte de dar nombre a numerosos productos comerciales, constituye un laboratorio cosmológico singular.

### El conocimiento de la Galaxia

El primer trabajo científico acerca de la naturaleza de la Vía Láctea data del siglo XVI. En 1609, Galileo apunta su rudimentario telescopio a la Vía Láctea y escribe: "... lo que hemos observado en tercer lugar es la naturaleza o materia de la Vía Láctea [...]

La galaxia no es, en efecto, más que un amasijo de innumerables estrellas diseminadas por grupos".

Por primera vez conocemos de forma científica de qué está hecha la Galaxia, lo que, entre otras cosas, potencia el espíritu crítico: el conocimiento griego no es inmutable, Aristóteles se equivoca como cualquier hijo de vecino y, por lo tanto, debemos revisar el cuerpo de doctrina a la luz de la nueva filosofía.

A finales del XVIII, William Herschel determina la forma y las dimensiones de la Galaxia. Sus hipótesis de partida eran demasiado simples y su resultado erróneo, pero la metodología propuesta sigue siendo utilizada en la actualidad: contando estrellas se puede conocer mucho acerca de las galaxias.

A finales del XIX y comienzos del XX, la cámara fotográfica, el espectrógrafo, los grandes telescopios y el desarrollo de teorías físicas sobre la interacción entre la materia y la luz propiciaron el nacimiento de la Nueva Astronomía, la Astrofísica. Uno de los mayores éxitos de esta nueva ciencia vino de la mano de Edwin Hubble, que amplió la taxonomía del mundo natural con la inclusión del reino de las galaxias. La Vía Láctea no era el Universo, sino uno más de los Universos Islas propuestos por Kant. La escala de distancia se multiplicó y el término de distancia astronómica empezó a cobrar el sentido de inmensidad que tiene hoy en día. Las galaxias eran enormes, pero la distancia que separa unas de otras sobrepasaba cualquier presupuesto de nuestra imaginación.

La primera mitad del siglo XX fue una época dorada en el desarrollo del conocimiento astronómico que llevó, entre otras cosas, al primer esquema realista de la Vía Láctea. La Galaxia parece estar formada por dos grandes subsistemas, el disco y el halo: el disco,



Figura 35.1. Pionero. Galileo publicó en su obra *Sidereus nuncius* sus descubrimientos sobre la Galaxia.

con sus brazos espirales, contiene la mayor parte del gas, es nuestro criadero de estrellas y el lugar donde el ciclo de la vida estelar se desarrolla en su forma extrema. Por el contrario, el halo muestra una forma casi esférica, no contiene gas y envuelve el activo disco: es el cementerio de las primitivas estrellas, el lugar donde ir a buscar fósiles.

## Origen incierto

A finales de los 50 ya se sabía cómo eran las galaxias espirales, pero ¿cómo se formaron? En 1962, los astrónomos Eggen, Lynden-Bell y Sandage aplicaron el modelo de la formación de planetas a una escala galáctica y propusieron que la Vía Láctea se formó por el hundimiento gravitatorio de una gran nube de gas primigenio. Esta propuesta parecía explicar algunas propiedades de los fósiles galácticos, los



Figura 35.2. Similar. Esta imagen, de la galaxia espiral M51, podría ser muy semejante a la de la Vía Láctea tomada desde otra galaxia. Fuente: HST.

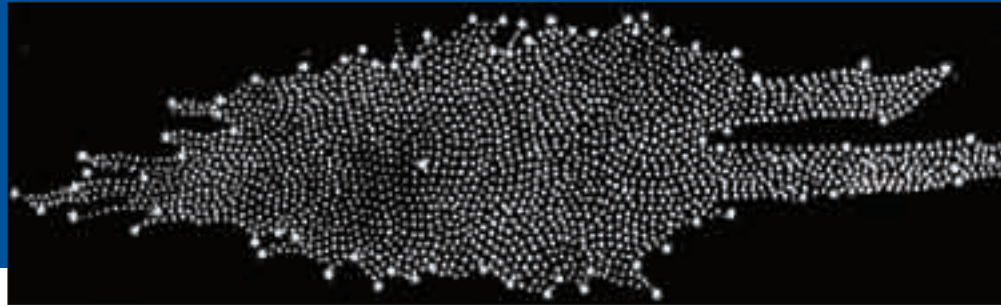
cúmulos globulares, y conectaba la química de las estrellas con su cinemática. El modelo de Eggen, Lynden-Bell y Sandage (ELS) pronto se convirtió en el paradigma de la formación de la Vía Láctea.

¿Habíamos llegado a la edad de oro? Eso parecía. Había cabos sueltos, pero los astrónomos consideraban que era cuestión de tiempo rellenar estos huecos y, sobre todo, que no habría que tocar los cimientos de la teoría.

Sin embargo, a finales de los 70 empezaron a oírse las primeras voces disonantes: las observaciones parecían indicar que las partes más externas de la Galaxia habían sido añadidas después del hundimiento, como si estos fósiles se hubieran formado en otro ambiente y depositado después en las playas galácticas. Se rompió la idea de un proceso monolítico. Quizá no sólo había habido una nube, sino un cúmulo de nubes danzando alrededor de su centro de masas. Algunos fragmentos podrían haber sobrevivido, formado sus propias estrellas y orbitado alrededor del trozo más masivo, hasta fundirse posteriormente en un único sistema. No obstante, Allan Sandage escribió un apasionado alegato intentando salvar el modelo ELS. Ciencia, literatura y genio se fundieron en uno de los más bellos artículos



Figura 35.3. Aproximación. Ilustración de la Vía Láctea realizada por William Herschel a finales del siglo XVIII.



científicos que he tenido la oportunidad de leer, pero todo fue inútil.

La tecnología espacial, la fortuna y una suerte de Génesis denominado “Modelo Estándar Inflacionario” se confabularon para mostrarnos un escenario alternativo donde las piezas iniciales eran más pequeñas y numerosas que las singulares nubes propuestas en los 50, y su mecanismo de ensamblaje mucho más violento e impredecible que el tranquilo madurar del modelo ELS. ¿Supone un cambio tan drástico pasar de una nube a una nube de nubes? Aparte de dar satisfacción a nuestra curiosidad científica, es también una de las pocas observaciones que nos permite fijar las condiciones iniciales del Inicio, un anclaje ancestral. Y en esas andamos.

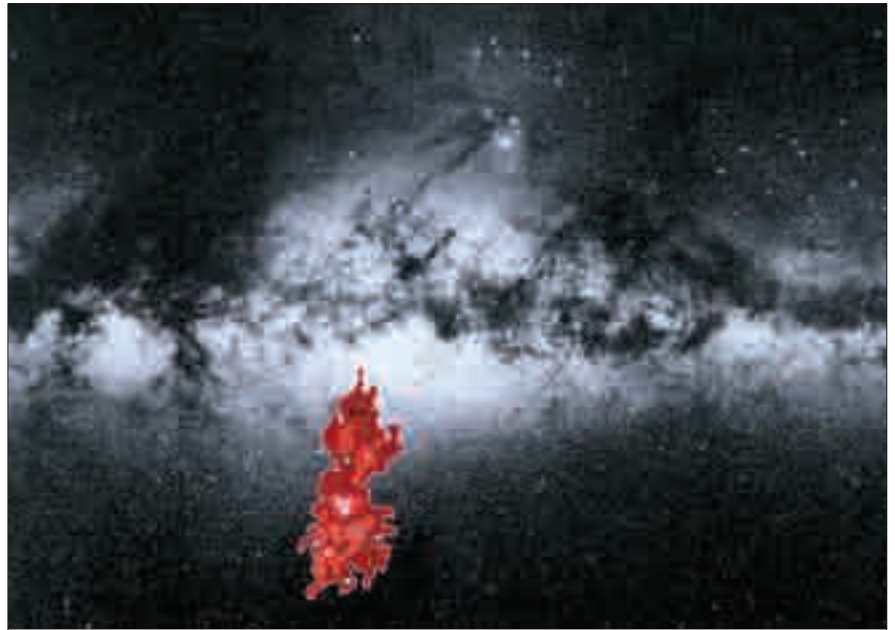


Figura 35.4. Enana. La galaxia enana de Sagitario (en rojo) en interacción con el centro de la Vía Láctea.



## 36. Galaxias en colisión

**L**a imagen de un Universo estático dista mucho de la realidad: las interacciones que sufren las galaxias provocan en ellas transformaciones espectaculares

Podríamos pensar que las galaxias no cambian, debido principalmente a dos razones: los procesos que sufren tienen lugar a enormes distancias —la galaxia similar a la nuestra más cercana, apenas visible como un borrón a simple vista, se encuentra a dos millones de años luz— y, además, transcurren muy lentamente: entre dos fotogramas de la película de las galaxias pueden transcurrir varios millones de años.

Gracias a que disponemos cada vez de mejores telescopios, hemos descubierto que unas dos terceras partes de las galaxias viven junto a otras

formando pares, grupos y cúmulos, y que la cercanía entre ellas es tal que sufren colisiones que afectan profundamente a su estructura y a su composición. Esta idea cobró importancia en los años 70 y hoy día es uno de los fenómenos más estudiados en la investigación extragaláctica.

### Consecuencias de las interacciones

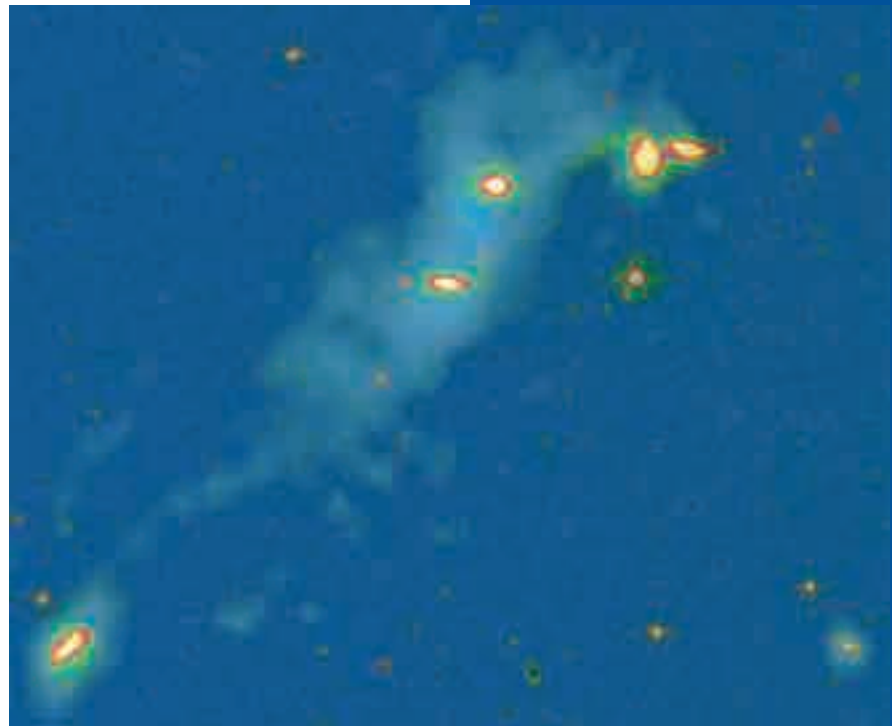
La interacción de una galaxia con sus vecinas afecta en gran manera a su evolución, al producir una redistribución de la materia bien dentro de la misma galaxia o expulsándola hacia el exterior. Se pueden originar, por ejemplo, acumulaciones de gas molecular en las regiones centrales de

las galaxias, lo que a su vez puede disparar violentos brotes de formación estelar.

Pero las fuerzas de marea, debidas a la interacción gravitatoria entre las galaxias y similares a las que la Luna ejerce sobre los océanos terrestres, no sólo afectan a la distribución de materia, sino también a sus velocidades.

Cuando una galaxia sufre una perturbación, sus ejes pueden perder la perpendicularidad o, en general, la simetría. En muchos casos, la perturbación consiste en una rotación inversa —o contrarrotación— en las partes centrales de la galaxia, cuyo origen se atribuye a una fusión entre dos galaxias o a la incorporación de una pequeña en otra mayor.

Cuando un choque entre dos galaxias tiene como consecuencia la expulsión de materia hacia el exterior, aparecen estructuras alargadas que parecen largas colas y que constituyen un puente de materia entre las galaxias. El material eyectado puede volver a las galaxias, dispersarse en el medio intergaláctico o desplomarse para formar enanas de marea, pequeñas galaxias que pueden contener tanto estrellas procedentes de las galaxias que han colisionado como nuevas estrellas nacidas por la contracción del gas acumulado.



## Distintas interacciones

Aunque existe todo un rango intermedio, las interacciones se pueden encuadrar en dos tipos básicos: menores y mayores. En las primeras, la diferencia de masa entre las dos galaxias en colisión es muy grande, ya que se trata de una galaxia y su satélite. Un resultado espectacular de este tipo de colisiones es la formación de un anillo polar, constituido por los restos de la galaxia satélite que giran en torno a la galaxia dominante en una órbita

Figura 36.1. Grupo en interacción.

Hickson 16 es un grupo compacto formado por seis galaxias. Vemos en azul claro el gas atómico, el elemento más frágil en las colisiones, que forma colas y puentes de marea, indicios de la colisión.

Fuente: Lourdes Verdes-Montenegro y colaboradores (IAA).



Figura 36.2. Anillo polar. La galaxia NGC 4650a sufrió una colisión con una galaxia satélite, cuyos restos forman un anillo similar a la órbita que antes trazaba dicha galaxia. Fuente: HST.



Figura 36.3. Rueda de carreta. La peculiar morfología de esta galaxia-anillo se atribuye al paso por su centro de una galaxia satélite. Fuente: HST.

polar. En otros casos, la galaxia satélite no queda en órbita, sino que es absorbida hasta el propio centro de la galaxia mayor y da lugar a un doble núcleo. La galaxia pequeña puede, incluso, provocar en la galaxia dominante importantes efectos: vemos un ejemplo en la galaxia-anillo de la Rueda de Carreta, que presenta un núcleo central conectado con un anillo externo por una serie de radios. Su formación se atribuye al paso de una galaxia satélite a través del centro de la galaxia dominante, con un efecto similar a la onda expansiva generada al lanzar una piedra a un estanque: cuando la compañera se acerca, la masa de ambas galaxias se suma y las estrellas son arrastradas hacia el centro, mientras que

al alejarse se produce un rebote hacia fuera.

A diferencia del primer tipo, en las interacciones mayores las galaxias que chocan tienen masas similares, y los efectos de la colisión dependerán del número de galaxias involucradas—desde pares hasta cúmulos de cientos y miles de galaxias—. Cuando dos galaxias se cruzan, puede tener lugar un solo encuentro o formarse un sistema ligado, lo que llamamos un par de galaxias. Dicho proceso puede terminar en fusión, provocando que dos galaxias espirales creen una galaxia elíptica.

Si atendemos a las colisiones que implican un mayor número de galaxias, encontramos un ejemplo en el Grupo Local, un conjunto de unas treinta galaxias al que pertenece nuestra Galaxia: de hecho, la misma Vía Láctea podría estar experimentando una interacción con las nubes de Magallanes, un par de pequeñas galaxias satélite.

Finalmente, encontramos colisiones de galaxias en los cúmulos



—los mayores objetos del Universo unidos por la fuerza de la gravedad—, donde las interacciones resultan diferentes debido a la gran velocidad, de miles de kilómetros por segundo, que pueden alcanzar las galaxias dentro del cúmulo. Ahora bien, una mayor velocidad

no conlleva mayores estragos en las colisiones, sino todo lo contrario. Los choques a alta velocidad, a excepción de los frontales, hacen que las galaxias pasen muy escaso tiempo a corta distancia y que se reduzcan sus posibilidades de quedar ligadas gravitatoriamente.



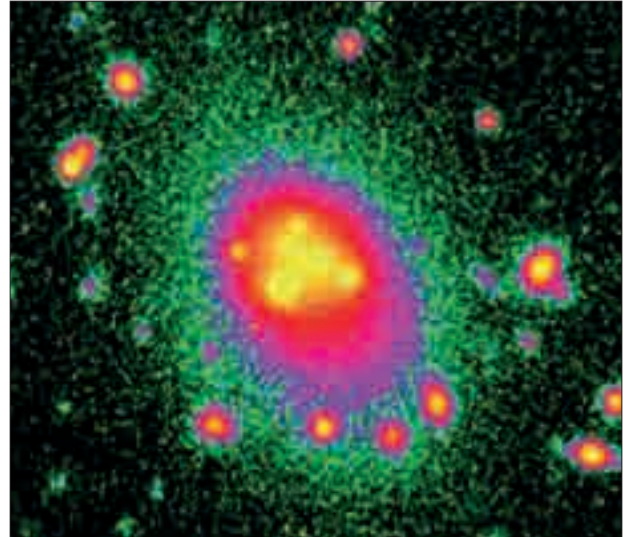
Figuras 36.4. La galaxia de Andrómeda (M31), cuyo doble núcleo podría deberse a la ingesta de una galaxia de su entorno.

## Canibalismo galáctico

### Las más hambrientas

El canibalismo es un fenómeno frecuente en los cúmulos de galaxias, donde una galaxia gigante se alimenta de "pequeñas" galaxias que se aproximan a ella. Es el caso de Abell 3827, que aparece en esta imagen de falso color rodeada de más de una decena de galaxias cuyo tamaño es similar al de nuestra Vía Láctea. Es, por tanto, el tamaño monstruoso de la galaxia caníbal lo que hace que parezcan enanas. En el interior de ella se pueden apreciar algunas recientemente devoradas.

Fuente: M. J. West y ESO.



## 37. La intensa actividad galáctica

**L**as galaxias activas presentan condiciones extremas e incluyen algunos de los objetos más energéticos del Universo

En el Universo existen galaxias que presentan características diferentes a las del resto, tales como una luminosidad muy elevada —en algunas o todas las longitudes de onda—, la expulsión de enormes chorros de materia desde su centro o la presencia de una fuente de energía muy compacta y variable en su núcleo. Estamos hablando de las galaxias activas, también denominadas AGNs —del acrónimo en inglés de “núcleos de galaxias activas”— porque su energía, muy superior a la que pueden producir las estrellas que forman la galaxia, se halla concentrada en la región central, o núcleo.

### Seyferts y radiogalaxias

En 1943, el astrónomo Karl Seyfert examinó una serie de galaxias espirales que mostraban un núcleo de apariencia estelar y un espectro que revelaba temperaturas muy elevadas y la existencia de gas moviéndose a grandes velocidades. Para que el gas se moviera tan rápidamente sin dispersarse por el espacio debía estar sujeto a una fuerza gravitatoria muy intensa, lo que implicaba la presencia de un objeto muy masivo que, para mostrar la mencionada apariencia estelar, debía además estar muy concentrado. Éste fue el primer intento para definir estos objetos, denominados galaxias Seyfert en honor a su descubridor, que inauguraron la clasificación de las galaxias activas.

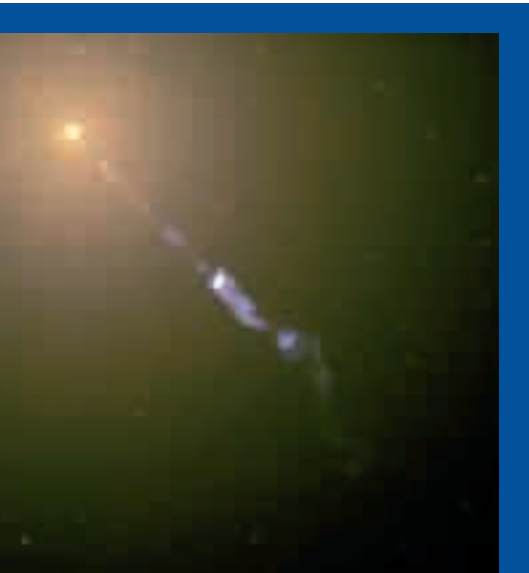


Figura 37.1. Chorro. La radiogalaxia M87 muestra un chorro de materia que parte del núcleo y que se extiende a lo largo de miles de años luz de distancia.

Fuente: HST.



Figura 37.2. Activa. NGC 7742 se agrupa dentro de las galaxias Seyfert, un tipo de galaxias espirales que presentan un núcleo muy brillante y cuya emisión varía entre sus valores máximos y mínimos en cuestión de minutos. Fuente: HST.

Mientras, el desarrollo de la radioastronomía permitió realizar detecciones precisas de radiofuentes en el espacio y, a partir de los años 50, los astrónomos intentaron buscar la imagen correspondiente en el rango óptico de los objetos que emitían ondas de radio. Así, los científicos descubrieron galaxias con una fuerte emisión en radio muy localizada a ambos lados del núcleo galáctico. Se denominaron radiogalaxias y, si bien en el óptico parecían galaxias elípticas normales, mostraban alguna peculiaridad: M87, por ejemplo, presentaba un chorro de materia que partía del núcleo y se extendía a lo largo

de miles de años luz, mientras que Centaurus A parecía una galaxia elíptica normal pero “cortada” en dos por un sendero irregular de gas y polvo.

Con la mejora de las técnicas en radioastronomía, el número de radiogalaxias descubiertas creció considerablemente y su estructura fue cartografiada en gran detalle, como podemos ver en las imágenes.

## Los más lejanos

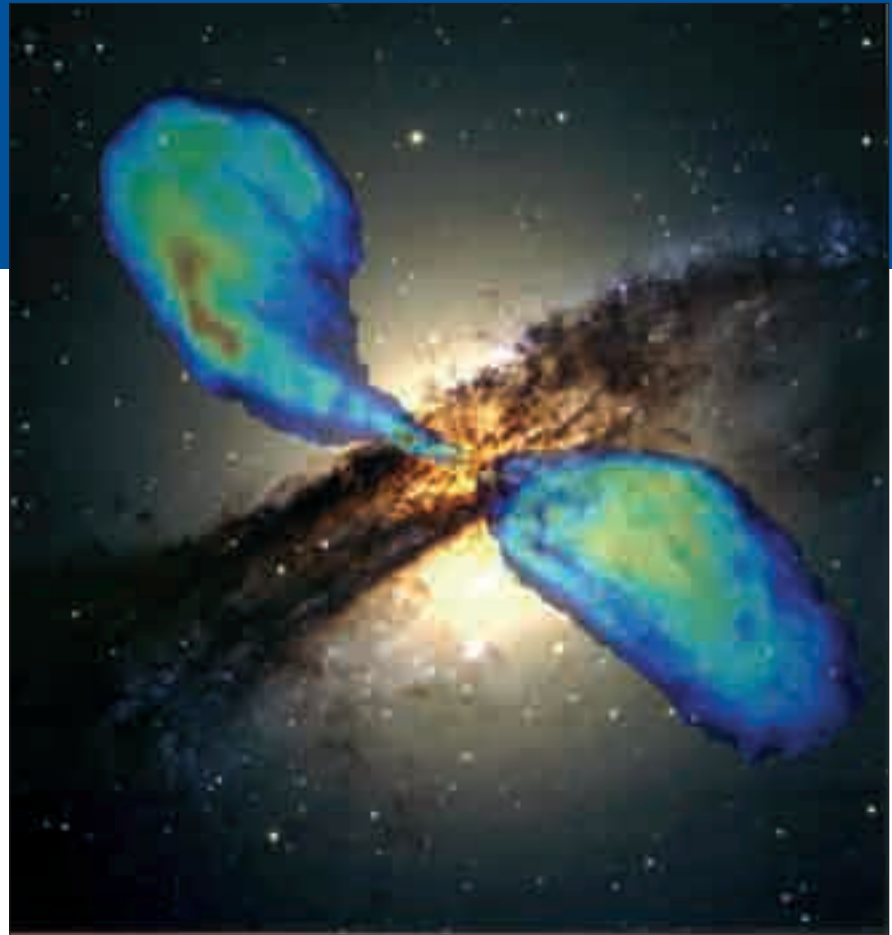
En 1960, un grupo de astrónomos se topó con algo desconcertante. Alan Sandage, uno de los investigadores, relata: “El objeto —3C48— se veía como una débil estrellita azul; le tomé un espectro esa noche y salió la cosa más rara que había visto jamás. Al examinar sus colores, resultaron diferentes a los de cualquier objeto celeste que hubiese observado antes ¡todo era sumamente exótico!”.

Comparado con las cantidades relativas de luz roja, azul y violeta de las estrellas normales, 3C48 mostraba un exceso de esta última, pero el análisis de su espectro resultó aún más desconcertante: el espectro de luz muestra una serie de líneas correspondientes a los elementos químicos que forman el objeto pero,



en el caso de 3C48, los científicos no pudieron identificar de forma inmediata ni una sola línea. ¿Se trataba de elementos desconocidos hasta la fecha?

En 1963, Maarten Schmidt descubrió, en otro objeto similar, que las líneas espectrales observadas correspondían al hidrógeno, aunque corridas hacia el rojo. El corrimiento al rojo viene provocado por la expansión del Universo y el distanciamiento progresivo de las galaxias, aunque se trata de un efecto de las ondas electromagnéticas que también observamos en la Tierra: igual que una sirena de policía nos llega con un tono más agudo al acercarse y más grave al alejarse, la luz tiende al rojo del espectro en caso de distanciamiento y al azul si el emisor y el receptor se acercan. El descubrimiento de Schmidt suponía que 3C48 se alejaba de nosotros a una velocidad de 47.000 kilómetros por segundo —más de un décimo de la velocidad de la luz— y se encontraba



a 3.000 millones de años luz de distancia. Si se trata de objetos tan lejanos y compactos, el hecho de que podamos observarlos desde la Tierra implica que liberan más energía que cualquier galaxia con sus billones de estrellas, lo que los sitúa

Figura 37.3. Diferente. La radiogalaxia Centaurus A observada en el óptico (imagen de fondo) y, superpuesta, su imagen tomada por radiotelescopios. Se aprecian lóbulos de materia expulsados desde el centro de la galaxia.

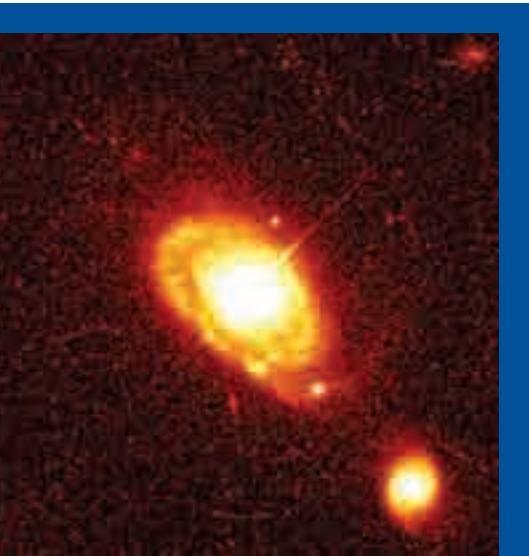


Figura 37.4. Lejano. El cuásar PG 0052+251, a 1400 millones de años luz, en el centro de una galaxia espiral. Fuente: HST.

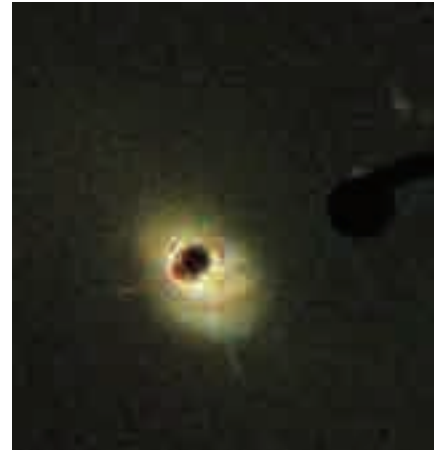


Figura 37.5. Brillante. El Telescopio Espacial Hubble logró, bloqueando la luz del cuásar 3C273 (izquierda), desvelar algunos de los rasgos de la galaxia que lo alberga, que se mostró más compleja de lo que se pensaba (derecha). Fuente: NASA, ESA.

muy arriba en el *ranking* de los energéticos, sólo superados por las explosiones de rayos gamma.

Los cuásares son, al igual que las Seyfert y las radiogalaxias, un tipo de galaxia activa, pero mucho más brillante y lejana que las demás. Y es que, aunque los distintos tipos de galaxias activas presentan diferencias en uno u otro aspecto (distancia, emisión en radio, luminosidad variable...), la visión actual argumenta que todas ellas responden a un mismo fenómeno y que la presencia de actividad no es sino un episodio más en la vida de cualquier galaxia, aunque más común en etapas pasadas del Universo. Lo veremos en el capítulo siguiente.

## Objetos BL Lacertae

A finales de los años 70, los astrónomos descubrieron que algunos de los objetos incluidos en los catálogos de estrellas variables correspondían, en realidad, a núcleos de galaxias. Denominados a partir del primer hallazgo, los BL Lacertae —o BL Lac— resultaron frustrantes a través de los telescopios ópticos porque su luminosidad borraba la de las galaxias circundantes pero no ofrecía ninguna pista para determinar su distancia o sus características. No obstante, se ha hallado una posible respuesta a su notable variabilidad: podría tratarse del núcleo de una galaxia elíptica visto de frente, de modo que uno de sus coros apunta directamente hacia nosotros. Su orientación constituiría, por tanto, el motivo de su alta luminosidad en radio. Estos objetos son mucho menos abundantes que, por ejemplo, las galaxias Seyfert, de modo que la información que se tiene de ellos resulta aún escasa.

## 38. La unificación de las galaxias

**D**écadas de investigación han desvelado que la diversidad de las galaxias activas responde a un mismo fenómeno, pero observado desde diferentes puntos de vista

“Une y vencerás” podría ser una buena manera de comenzar a hablar sobre el modelo unificado de las galaxias activas, aunque quizá sería más apropiado decir “clasifica, relaciona y entenderás”, máxima válida para cualquier parcela del conocimiento científico. El fenómeno de la actividad nuclear en galaxias es tan apasionante como fue desconcertante durante los años que siguieron a su descubrimiento. La enorme energía liberada, inimaginable desde una perspectiva humana, hace que estos objetos sean observables a distancias no menos inimaginables, correspondientes a edades muy

tempranas del Universo. Desde que Karl Seyfert comenzó, en los años 40, el estudio de unas galaxias peculiares con un núcleo muy brillante, las galaxias activas han ocupado buena parte del tiempo de los astrofísicos y de los telescopios empleados para el estudio del Cosmos.

### El modelo unificado

Ante la avalancha de datos obtenidos y la diversidad de galaxias con actividad nuclear intensa, se hacía necesaria una clasificación como primer paso para obtener una visión global sobre la actividad en galaxias. Paralelamente, se fueron elaborando modelos para explicar las causas de la actividad, trabajo que culmina con la elaboración del modelo “estándar”, estándar en el

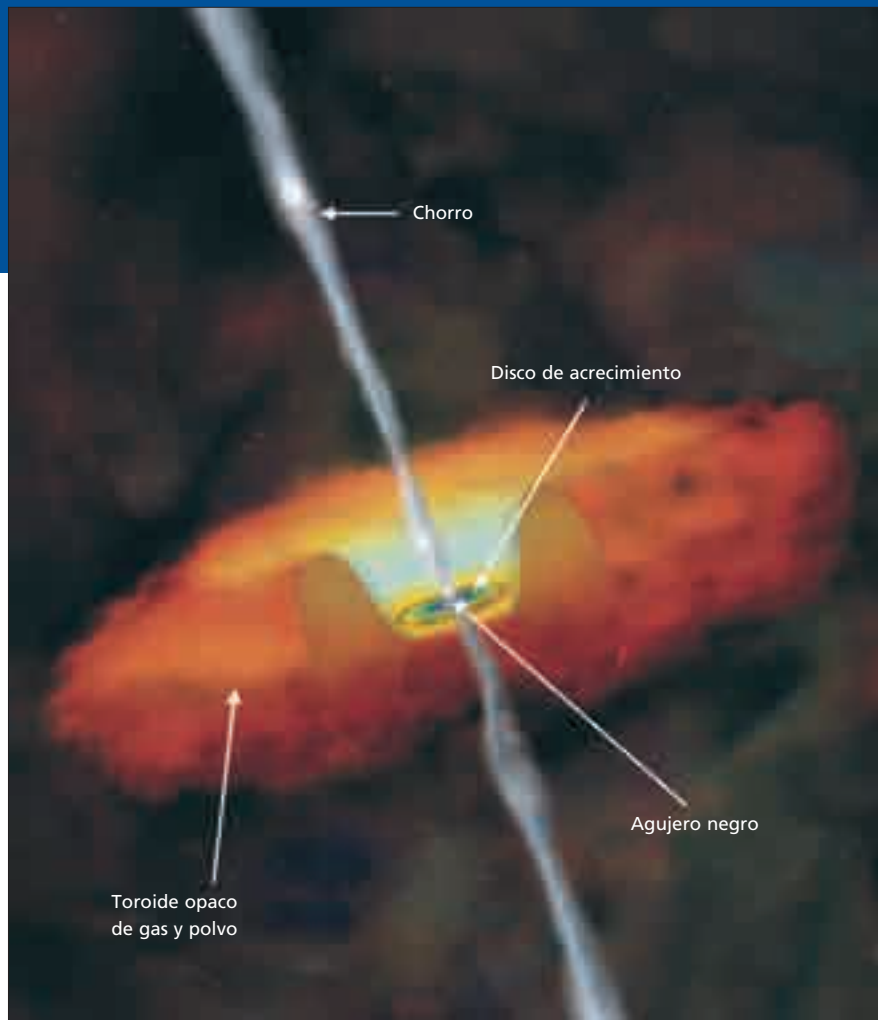
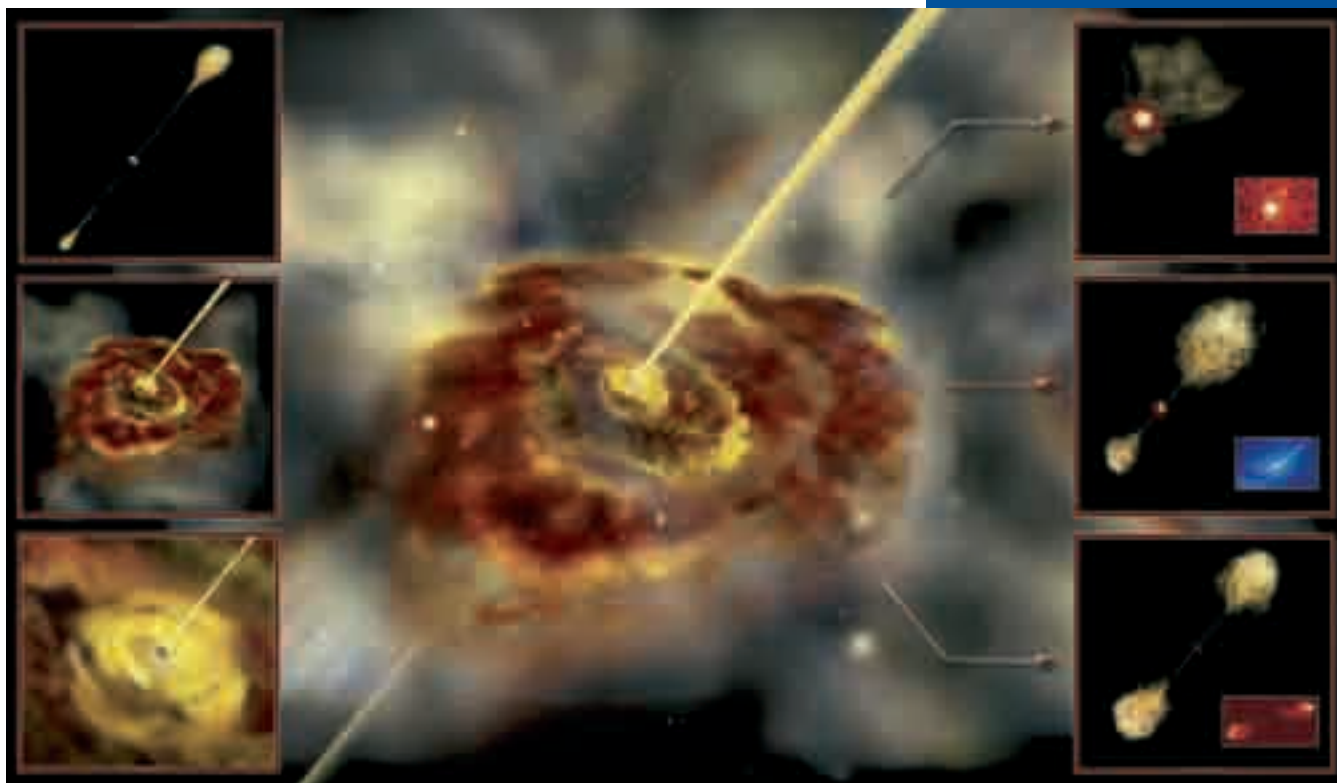


Figura 38.1. Por partes. Concepción artística del núcleo de una galaxia activa.

sentido de que es el admitido por la mayor parte de la comunidad astronómica. Según este modelo, la principal causa de la actividad proviene de la existencia de un campo gravitatorio muy intenso en el núcleo de la galaxia, probablemente producido por un agujero negro con una masa equivalente a la de varios millones de soles. Es la materia existente en el entorno del agujero negro la que, en su proceso de caída, libera grandes cantidades de energía. A distancias mayores, encontramos nubes de gas ionizado que giran a gran velocidad alrededor del pozo gravitatorio, y por último, rodeándolo todo, hallamos un toroide o “donut” de gas y polvo. En algunos casos, por causas aún no del todo claras, se produce una intensa emisión en ondas de radio, cuyo origen son unos chorros de partículas relativistas (partículas que viajan casi a la velocidad de la luz) que emanan del núcleo en dirección aproximadamente perpendicular al plano definido por el toroide.



### El origen de la diferencia

En este modelo se distinguen dos elementos que pueden dar lugar a diferencias en el aspecto de las galaxias activas: el toroide y los chorros de partículas relativistas. El primero, opaco a la radiación visible, mostrará o velará la parte central de la galaxia —donde se produce la energía y se mueven las nubes— dependiendo de su posición

con respecto al observador. Y el efecto de las partículas relativistas dependerá, igualmente, de la orientación de los chorros: su emisión en radio se amplificará si apuntan hacia nosotros, dando lugar a los radio-cuásares y BL-Lacs, o se debilitará con el resto de las orientaciones posibles, como ocurre con las radiogalaxias.

Así pues, el modelo de unificación viene a decir que los núcleos de galaxias

Figura 38.2. Puntos de vista. En el centro, una ilustración de un núcleo de galaxia activa. La columna de la derecha corresponde a un zoom hacia la región central y la de la izquierda a las diferentes vistas que se obtienen dependiendo de la orientación de la galaxia con respecto a nosotros: en la primera vemos los chorros de frente, en la segunda los vemos con cierta inclinación y en la tercera con un ángulo de inclinación de 90 grados. Fuente: GLAST.

activas responden a un mismo fenómeno, pero que muestran propiedades distintas según la orientación con respecto al observador. Por supuesto, existen muchas sutilezas en el modelo y es necesario hacer salvedades y refinamientos, pero en líneas generales funciona bastante bien. Los problemas abiertos y detalles que quedan por aclarar apuntan a que la naturaleza de

las galaxias activas es más compleja de lo que podría deducirse de la sencillez de los modelos (algo, por otro lado, lógico y esperable). Otros factores, al margen de la orientación, como la evolución temporal de la galaxia, la masa del agujero negro central o la eficiencia del acrecimiento de materia hacia el agujero negro son claves para entender la diversidad de galaxias activas.

## Investigación

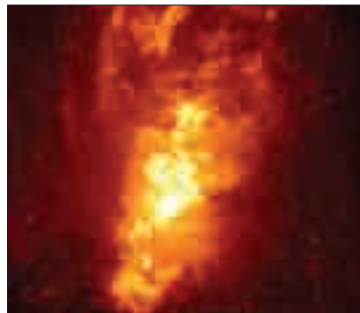
### La confirmación del modelo unificado

Quizá uno de los resultados más espectaculares que apoyan el modelo unificado es el relacionado con la observación de líneas anchas de emisión en galaxias activas, que había dado lugar a la distinción entre galaxias de tipo Seyfert 1 (con líneas anchas) y Seyfert 2 (sin estas líneas). Según el modelo estándar, las líneas anchas de emisión proceden de las nubes de alta velocidad en la parte interior del

toroide: como ya vimos en el capítulo anterior, el efecto Doppler provoca que la luz tienda al rojo del espectro si el objeto emisor se aleja del observador y al azul si se acerca; como tenemos un enjambre de nubes girando en torno al núcleo galáctico, en un instante dado encontraremos tanto nubes alejándose como acercándose a nosotros.

Es decir, habrá luz de esas nubes desplazándose al rojo y al azul simultáneamente. El efecto neto es un ensanchamiento de las líneas espectrales, que da idea de la velocidad a la que se mueven las nubes.

Si el modelo unificado es cierto, las nubes de alta velocidad deben existir tanto en las galaxias de tipo Seyfert 1 como en las de tipo Seyfert 2, pero las líneas anchas se observarán dependiendo de la orientación del toroide con respecto al observador. Si dispusiésemos de un espejo que nos permitiera ver la parte interna del toroide en una Seyfert 2, deberíamos observar líneas anchas. Ese espejo existe: la luz procedente del interior del toroide, aunque no llega directamente al observador, sí llega reflejada en nubes que se hallan más alejadas. La reflexión provoca la polarización de la luz, por lo que observando galaxias Seyfert 2 en luz polarizada se esperaría encontrar líneas anchas de emisión. Efectivamente es así, tal y como observaron Antonucci y Miller en 1985 en la galaxia NGC 1068.



Vista general de NGC 1068 y un acercamiento a su núcleo. Fuente: HST.

## 39. Filamentos y vacíos

**L**as galaxias no viven aisladas en el espacio, sino que forman agrupaciones diversas cuyo estudio ha desvelado la estructura a gran escala del Universo

La fuerza de la gravedad mantiene a raya el Universo: la existencia de sistemas con planetas que giran alrededor de una estrella responde al mismo fenómeno que agrupa a las estrellas en cúmulos, y no hace excepciones con las galaxias. Éstas también forman agrupaciones diversas, desde pares de galaxias hasta supercúmulos de varios miles de ellas.

### Cartografiado cósmico

Hasta 1989 se creía que los supercúmulos de galaxias eran las mayores estructuras del Universo y que

se distribuían de modo uniforme en todas las direcciones. Ese año, los astrónomos Margaret Geller y John Huchra realizaron una intensa exploración basada en el corrimiento al rojo de las galaxias, o desplazamiento de las líneas espectrales hacia el rojo debido a su distanciamiento progresivo. El mapa del Universo que obtuvieron, que abarcaba una franja de unos 6 grados e incluía unas 1.100 galaxias, desveló lo que denominaron “La Gran Muralla”, una película de galaxias de más de 500 millones de años luz de largo y 200 millones de ancho, pero sólo de 15 millones de grosor —como comparación, un año luz equivale a 1.300 millones de murallas chinas—.

La existencia de esta estructura gigante había pasado inadvertida hasta entonces porque su detección exigía el conocimiento de la posición de las



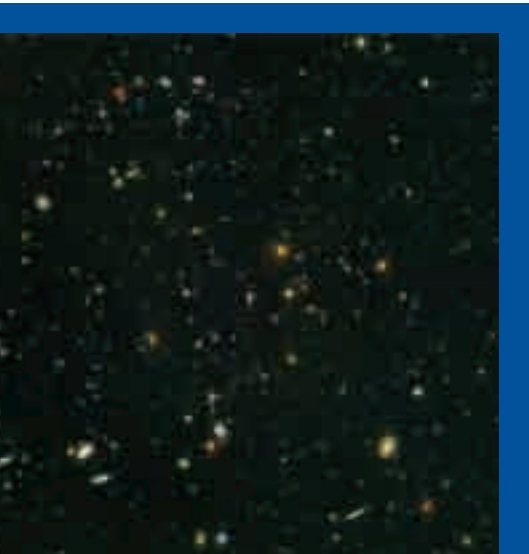


Figura 39.1. Retrato. Esta imagen, llamada “Campo Ultra Profundo del Hubble”, muestra una porción del cielo que contiene unas diez mil galaxias y que, desde telescopios terrestres, aparece totalmente vacía. Constituye el retrato más profundo del Universo, y desvela las primeras galaxias que emergieron tras el Big Bang. Fuente: NASA, ESA y S. Beckwith (STScI) y el grupo HUDF.

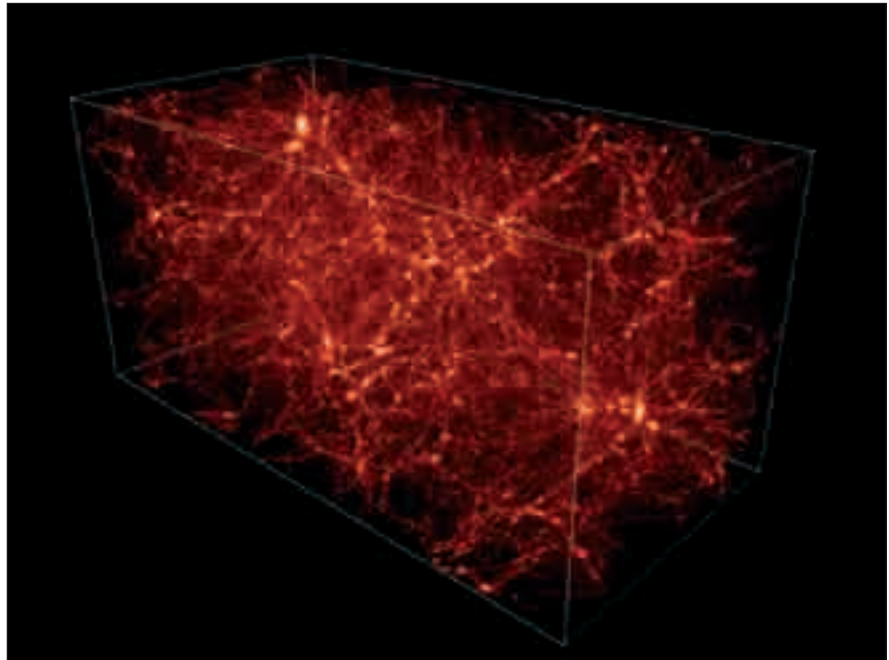


Figura 39.2. Filamentos y vacíos. Esta simulación reconstruye la estructura a gran escala del Universo, dominada por regiones filamentosas —constituidas por la materia luminosa— alternadas con grandes vacíos. Fuente: Pichon y colaboradores (MNRAS).

galaxias en tres dimensiones, lo que requiere combinar la información de su posición en el cielo con sus distancias, calculadas mediante el corrimiento al rojo. El empleo de este método permitió, en octubre de 2003, el hallazgo de otra “muralla”, cuyo tamaño supera en un 80% a su predecesora. El descubrimiento se encuadra en el proyecto Sloan Digital Sky Survey, que proporcionará el mapa cósmico más completo obtenido hasta el momento y que constituirá una

valiosa herramienta para comprender el origen de la estructura a gran escala del Universo, que no es, ni mucho menos, uniforme o aleatoria: la distribución de las galaxias en el espacio se muestra como una colección de vacíos gigantes con forma de burbuja, separados por películas y filamentos de galaxias, con los supercúmulos apareciendo ocasionalmente como nodos relativamente densos. Parece que las “murallas” son sólo la punta del iceberg.

## Otros indicios

De hecho, existen otros indicios que confirman esta imagen del Universo, en cierto modo similar a una esponja. El primero de ellos, el Gran Atractor, parece casi de ciencia ficción: se trata de una anomalía gravitatoria que atrae a millones de galaxias —entre ellas al Grupo Local, donde se encuentra la Vía Láctea— en la dirección de la constelación de Centauro a una velocidad de entre 600 y miles de kilómetros por segundo. El Gran Atractor se encuentra a unos 250 millones de años luz y, aunque se ha calculado que debe de tener una masa equivalente a decenas de miles de galaxias para ejercer tal poder de atracción, no fue identificado hasta varios años después de su descubrimiento. Parece estar relacionado con el Supercúmulo de Norma que, por hallarse en una región oscurecida por el polvo y las estrellas de la Vía Láctea, no ha podido ser estudiado en toda su dimensión.

Otra prueba de la estructura a gran escala es el Bosque de Lyman Alfa, que sugiere la existencia de finas “hojas” o películas de hidrógeno intergaláctico. Para entenderlo, imaginemos el Universo como un bosque, donde los árboles son nubes de hidrógeno que absorben la luz de objetos distantes

como los cuásares. Esta absorción queda reflejada en el espectro del cuásar, que presenta tantas líneas de absorción como nubes haya entre el cuásar y nosotros.

## El futuro

Los diferentes indicios de la existencia de la estructura de filamentos y vacíos, como las “murallas”, el Gran Atractor o el Bosque de Lyman Alfa, deben complementarse con un cartografiado que, gracias a los avances tecnológicos, cada vez resulta más eficaz. De hecho, se ha hablado del “fin de la grandeza”: si bien hasta ahora hemos podido incluir los objetos celestes en sistemas cada vez mayores (las estrellas en cúmulos y éstos en galaxias, y éstas a su vez en cúmulos y supercúmulos), parece ser que ya no se encontrarán estructuras mayores y que la imagen del Universo será uniforme aunque se consigan mapas con escalas mucho mayores.

Son muchas las preguntas que surgen al observar la estructura a gran escala del Universo: ¿cómo se formaron los vacíos? ¿Qué tipo de materia contienen?... preguntas directamente relacionadas con el nacimiento, formación y evolución del Universo, es decir, con la cosmología. Lo abordaremos en el siguiente capítulo.

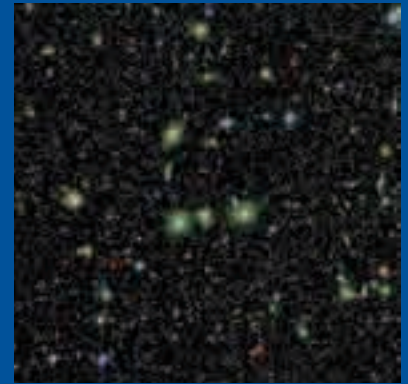


Figura 39.3. El Gran Atractor. Esta anomalía gravitatoria, que atrae a millones de galaxias en la dirección de la constelación de Centauro, parece tener su centro en el cúmulo de Norma, que vemos en la imagen. Fuente: ESO.

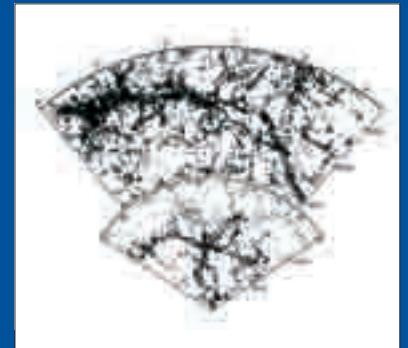


Figura 39.4. Grandes murallas. Estos “mapas galácticos” muestran la nueva muralla, descubierta por el Sloan Digital Sky Survey (superior), y la hallada por Geller y Huchra en 1989 (inferior). Fuente: M. Juric y J. R. Gott y colaboradores.

## 40. Las leyes del Universo

**L**a humanidad ha desarrollado innumerables teorías para explicar el Universo, pero sólo una, el modelo estándar, goza hoy día de la aceptación de los científicos

—¿Por qué estás deprimido, Alvy?

—El universo se expande, y si se expande ¡algún día se romperá y será el fin de todo!...

—¿Qué tiene que ver el Universo con esto? ¡Tú estás aquí en Brooklyn, y Brooklyn no se expande!”

De esta cómica manera, Woody Allen reflejaba en *Annie Hall* su preocupación por el futuro del Universo. Y es que esta curiosidad por lo que nos rodea forma parte de nuestra naturaleza humana. Preguntas como ¿es el universo infinito?, ¿tuvo un origen?, ¿cuál es nuestra posición en él? y otras

muchas, han sido objeto de sistemas de pensamiento que abarcan desde la mitología, la teología, la filosofía y la ciencia, sin que muchas veces quede clara la frontera entre ellas.

### Los antiguos

La cosmología más antigua de la que tenemos constancia escrita es la Babilónica, cuyo *Enuma elish* (“Cuando en la parte superior”), escrito quince siglos antes de Cristo, describe el nacimiento del mundo a partir de un caos primordial. Al igual que en casi todas las primeras civilizaciones, su cosmología se basaba en creencias mitológicas y divinas.

Los pensadores griegos fueron los primeros en abordar las cuestiones sobre el Universo de una manera más

racional, sin un dios detrás de cada proceso natural: para Anaximandro (611-545 a.C.), la realidad se generó a partir de una sustancia primaria llamada “apeiron” —indefinida e infinita—, de la que surgieron el resto de elementos. Esta idea supuso un gran avance en la historia de la filosofía, ya que se introducía un concepto completamente abstracto y no observable para explicar la realidad. Además, el Universo de Anaximandro cumplía un continuo ciclo de nacimiento y destrucción sucesiva, pero la Tierra siempre ocupaba un lugar central. Lo mismo le ocurrió a Aristóteles (384-322 a.C.), que defendía la idea de un Universo finito, precisamente porque “lo infinito no tiene centro”. Esta cosmología geocéntrica se mantuvo hasta el siglo XVII, y halló su máximo exponente en las ideas de Ptolomeo (90-168).

El modelo ptolomeico no era un sistema filosófico como los anteriores: se trataba de un sistema científico, basado en la observación, que explicaba con relativa exactitud el movimiento aparente de los planetas en el cielo. Para Ptolomeo, el centro del Universo era la Tierra, y la Luna y el resto de los planetas orbitaban en torno a ella siguiendo los llamados epiciclos: círculos girando sobre círculos. El resto era un fondo finito de estrellas fijas.



Figura 40.1. Curiosidad. Este grabado medieval anónimo refleja la curiosidad del ser humano por el Cosmos.





Figura 40.2. Modelos. A la izquierda, el modelo de Ptolomeo, con la Tierra en el centro del Universo y, a la derecha, el modelo heliocéntrico de Copérnico.

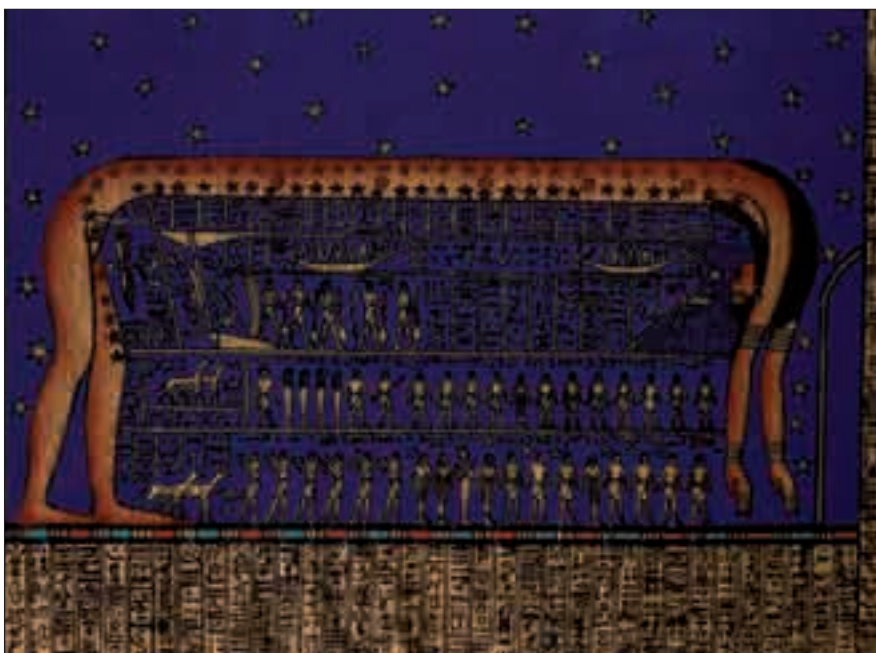


Figura 40.3. Diosa-cielo. En el Antiguo Egipto, la bóveda celeste estaba representada por la diosa Nut, que se arqueaba sobre la Tierra de modo que sólo sus manos y sus piernas tocaban el suelo. Ella era el cielo nocturno y todas las mañanas daba a luz al dios Ra, que representaba al Sol.  
Fuente: Universidad de Arizona.

## Hacia la modernidad

En el año 1543, poco antes de su muerte, el astrónomo polaco Nicolás Copérnico (1473-1543) publicaba “La revolución de las esferas celestes”, donde retomaba la vieja idea de Aristarco de Samos (310-230 a.C.) de situar al Sol en el centro del Universo, y a la Tierra junto al resto de planetas girando en torno a él. Había nacido el sistema heliocéntrico. En cualquier caso, para Copérnico el Universo seguía siendo una esfera finita de estrellas fijas. Más adelante, el filósofo y poeta Giordano Bruno (1548-1600) escribía: “... existe una cantidad innumerable de soles, y un número infinito de tierras que giran alrededor de esos soles...”, lo que le valió ser quemado en la hoguera.

En 1687, Isaac Newton publica su *Ley de la Gravitación Universal*, donde demuestra de que en el Universo existe una fuerza, la gravedad, que afecta por igual a manzanas y a planetas. Por primera vez el Universo no resulta algo diferente y separado de nuestro mundo terrestre. A pesar del avance que supuso

esta idea, la teoría de Newton presentaba grandes problemas a nivel cosmológico. Bentley, Seeliger y Neumann demostraron que, bajo el prisma newtoniano, el Universo era inestable, tanto si era finito como infinito. La solución a este problema vino años después, en 1915, cuando otro genio, Albert Einstein, publicó su *Teoría de la Relatividad General*, que veremos en próximos artículos.

Pocos años después, Edwin Hubble (1889-1953) descubrió que el Universo estaba lleno de sistemas de estrellas como nuestra galaxia, la Vía Láctea, y que se hallaban a unas distancias inimaginables. Además, descubrió que las galaxias se alejan las unas de las otras en una continua expansión. El Universo pequeño y estático que imaginó Aristóteles finalmente se mostró inmenso y en continuo movimiento.

Con el descubrimiento de Hubble surge la cosmología moderna y, con ella, la teoría por ahora más aceptada sobre el Universo: el modelo estándar, más conocido como “Big Bang”. Según él, el Universo se formó hace unos 13.000 millones de años a partir de una singularidad —un lugar donde las leyes de la física carecen de validez—: toda la materia y la energía del Universo se hallaban infinitamente concentradas, hasta que comenzó una expansión, primero de forma explosiva y, progresivamente, con más y más moderación. A lo largo de este proceso de expansión y enfriamiento se originaron el tiempo, el espacio y las estructuras que vemos hoy en el cielo.

En cualquier caso, no debemos nunca olvidar que Brooklyn no se expande.



Figura 40.4. Serpientes y tortugas. Un concepto de Universo de origen hindú. La Tierra se encuentra sobre una tortuga que descansa sobre una gran serpiente, símbolo de la eternidad.

## 41. El Universo en expansión

**E**n 1929, Edwin Hubble demostró que las galaxias se alejan unas de otras, lo que sólo se explica si el Universo se está expandiendo en todas direcciones

Los distintos modelos que, a lo largo de la historia, se han construido para describir el Universo eran un reflejo de las teorías físicas más avanzadas de cada momento. Sin embargo, y a diferencia de otras disciplinas científicas, la Cosmología cuenta con un único sujeto de estudio, el Universo, de modo que algunas nociones científicas habituales como repetibilidad o predictibilidad no pueden aplicarse con ingenuidad a su estudio. Por esta razón, en el desarrollo histórico de esta disciplina se han reflejado de forma especial los prejuicios vigentes en cada periodo.

### Los modelos teóricos

En este sentido, la idea de un Universo estático ha estado profundamente enraizada en la comunidad científica desde el comienzo de la física moderna. Así, Newton aplicaba su teoría de la gravitación a un modelo de Universo estático, a pesar de que él mismo mostraba la extraordinaria inestabilidad de esta situación física. A pesar de tales intuiciones tempranas sobre el carácter dinámico del Universo, la idea de un Universo estático sobrevivió a la aparición de una nueva y revolucionaria teoría de la gravedad, la Relatividad General. En el primer modelo cosmológico relativista, y con la intención de preservar el carácter estático del Universo, Einstein (1917) introdujo una fuerza repulsiva mediante un término adicional en sus ecuaciones,



conocido como constante cosmológica. Sin embargo, el trabajo de otros científicos exploró las posibilidades de un Universo dinámico, como el modelo de De Sitter que, a través de las investigaciones de Friedmann (1922) y de Lemaître (1927), dio lugar a escenarios donde el Universo se expande o se contrae.

## La expansión

Fueron, no obstante, los resultados observacionales de Hubble (1929) los que finalmente implantaron la idea de que el Universo se expande: la observación del desplazamiento hacia el rojo de los espectros de galaxias, que indicaba su distanciamiento progresivo, y la medición de las distancias a las mismas, permitieron a Hubble concluir que las galaxias se alejan a una velocidad proporcional a la distancia que las separa.

A partir de ese momento se consolidó el nuevo paradigma de Universo en expansión. Si rebobinamos la “película” de dicha expansión, en la que las galaxias son puntos que se separan unos de otros, dichos puntos terminarán por converger en un instante inicial, lo que permite calcular la edad del Universo. Curiosamente, los primeros cálculos conducían a un Universo demasiado joven (¡más joven que la edad medida de la Tierra!), lo que obligó a

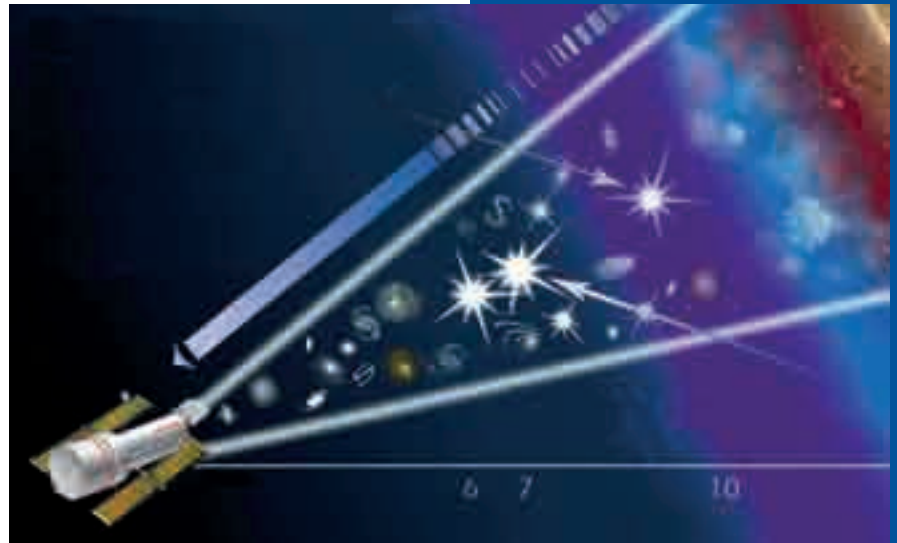


Figura 41.1. Supernovas. Los estudios de las supernovas indican que, tras una etapa de expansión decelerada, comenzó un proceso de aceleración que llega hasta el presente. Fuente: NASA.

reintroducir la escurridiza constante cosmológica, una fuerza repulsiva que acelera la expansión. De hecho, dicha constante representa uno de los aspectos más intrigantes de la Cosmología moderna, apareciendo y desapareciendo repetidamente en los sucesivos modelos.

En los años cincuenta, la combinación de estos modelos cosmológicos con la física de partículas se concreta en la Teoría del Big Bang (o Gran Explosión) introducida por Gamow (1948). Las progresivas mejoras al modelo de Big Bang configuran lo que hoy se conoce como modelo cosmológico estándar.



Figura 41.2. Hubble. La observación de las galaxias permitió a Edwin Hubble (en la imagen en el Observatorio de Monte Palomar) confirmar la expansión del Universo.



Figura 41.3. Teóricos. Mientras que Einstein (izquierda) propuso un modelo de Universo estático, Lemaître (derecha) exploró las posibilidades de un Universo dinámico. Fuente: La Recherche.

## El final

Respecto al destino último de la expansión, el carácter atractivo de la gravedad actúa como un freno, de manera que la evolución final del Universo depende de la cantidad de materia que contenga: en principio, si se supera un cierto límite, la gravedad acabará por detener completamente el proceso de expansión dando lugar a una fase de contracción y eventual derrumbamiento final, mientras que si la cantidad de materia es insuficiente la expansión proseguirá indefinidamente. Sin embargo, los estudios de supernovas realizados en 1998 permiten concluir que el Universo está, de hecho, en un

proceso de expansión acelerada. Dichos estudios sugieren que cerca del 70% de la energía del Universo está asociada a una componente que ejerce una presión negativa (una especie de “antigravedad”). Nuevamente, la constante cosmológica aparece como una posible explicación, si bien su justificación física, como energía del vacío, presenta profundos problemas conceptuales. Otras posibles explicaciones teóricas involucran un nuevo campo físico conocido como quintaesencia.

Finalmente, conviene señalar que la idea de un Universo en expansión no obliga a admitir una creación inicial. Frente al modelo del Big Bang, los científicos Bondi, Gold y Hoyle desarrollaron la denominada teoría del estado estacionario, en la que el Universo presenta siempre el mismo aspecto. La expansión es alimentada por una creación continua de materia, sin una creación del Universo como tal. En la actualidad esta teoría ha sido abandonada frente al éxito del modelo estándar, confirmando al Big Bang

como paradigma dominante. Sin embargo, las posibles sorpresas que aún nos reserva la Cosmología observacional, junto con la reaparición en la física de altas energías de alguna de las objeciones conceptuales por las

que la teoría del estado estacionario fue abandonada, nos sugieren, como indicábamos al comienzo, la necesidad de una actitud abierta y crítica respecto a nuestras ideas preconcebidas sobre el Universo.

## La singularidad

A pesar de la existencia de un instante inicial, conocido como "singularidad" —un lugar donde las leyes de la física carecen de validez—, el Universo no se expande a partir de un punto dado. En una analogía ya clásica, las galaxias pueden verse como



puntos pintados sobre la superficie de un globo. A medida que hinhamos el globo, la distancia entre los puntos aumenta, si bien ninguno de ellos representa el origen de la expansión. Pero, a diferencia del globo, el Universo no se expande



en ningún espacio externo. Son las propias reglas de medición del espacio-tiempo las que evolucionan y en estos modelos no tiene sentido preguntarse dónde se expande el Universo.



## 42. Los fósiles del Big Bang

**E**l Universo se halla impregnado de una radiación fósil que ha aportado información primordial sobre los primeros instantes del Cosmos

La ciencia, en ocasiones un asunto de fe, nos exige de nuevo que creamos lo que no vemos. Una radiación, invisible para el ojo humano, impregna todo el espacio y nos revela los secretos mejor guardados del Universo: aquellos que se refieren a su origen, cuando sólo tenía 300.000 años. Si se tratara de la vida de una persona de ochenta, los datos hablarían sobre su primer día, apenas veintitrés horas después del nacimiento.

### Descubrimiento casual

En 1931, Karl Jansky, un ingeniero de los laboratorios Bell Telephone (EE.UU.) que estudiaba las perturbaciones de las líneas telefónicas, descubrió “algo que procedía del espacio” y distorsionaba la señal, pero que no pudo concretar. En 1965, la misma compañía asignó a Arno Penzias y Robert Wilson la tarea de eliminar el ruido detectado en la antena de radio dedicada a las telecomunicaciones por satélite. Una vez suprimidas todas las posibles fuentes de ruido, descubrieron con sorpresa una señal de microondas que no variaba con el día ni con la estación del año y que además era isotrópica: presentaba la misma apariencia en todas las direcciones, de modo que no podía emanar de una estrella o una galaxia. Por la misma

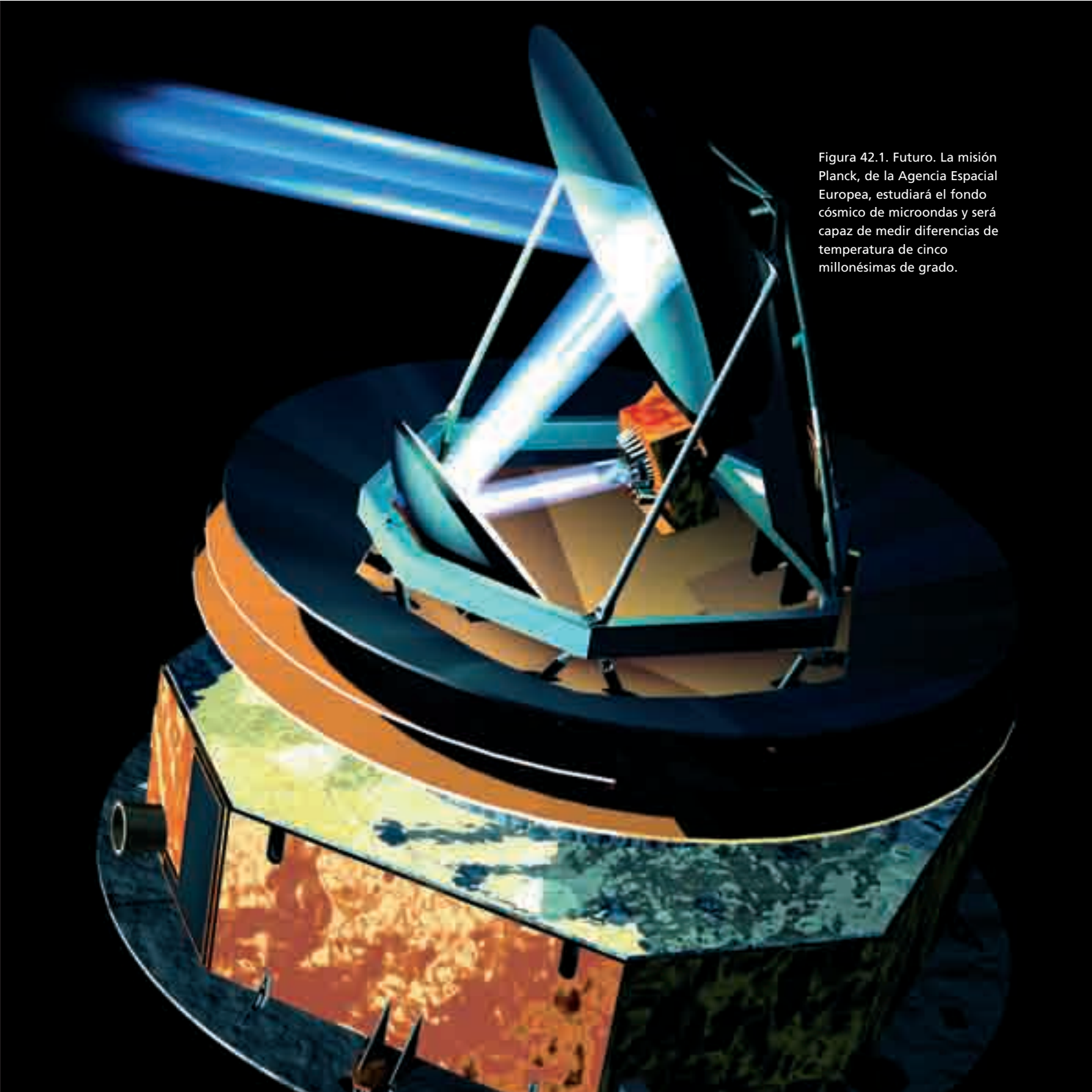


Figura 42.1. Futuro. La misión Planck, de la Agencia Espacial Europea, estudiará el fondo cósmico de microondas y será capaz de medir diferencias de temperatura de cinco millonésimas de grado.

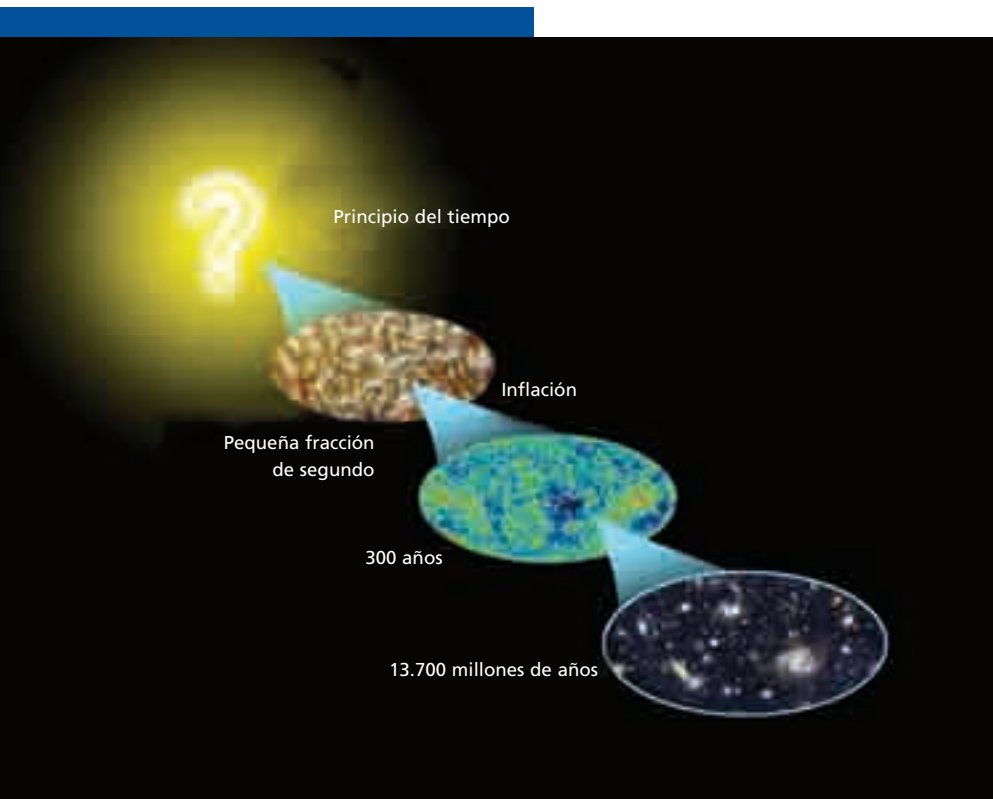


Figura 42.2. Evolución. Este esquema muestra, con breves pinceladas, la evolución del Universo. Fuente: NASA.

fecha, James E. Peebles sugería la existencia de un fondo de radiación residual del Universo primitivo, teoría acorde con la uniformidad observada. Estudios posteriores reafirmaron esta hipótesis y provocaron el abandono definitivo de las teorías del universo estacionario en favor de la del Big Bang, que postula la creación del Universo a partir de una gran explosión.

### El sí definitivo al Big Bang

Penzias y Wilson obtuvieron el Premio Nobel de Física en 1978, un galardón muy discutido por tratarse de un descubrimiento ya anticipado en la teoría “alfa, beta, gamma” de George Gamow y Ralph Alpher. Según esta teoría, en los instantes iniciales del Universo la temperatura era tan elevada que toda la materia estaba descompuesta en núcleos atómicos. No había galaxias ni estrellas, tan sólo núcleos de hidrógeno, helio, electrones libres —todos ellos objetos eléctricamente cargados— y radiación, mucha radiación. El Universo se encontraba en lo que se denomina “era de la radiación”, en la que la materia era un débil y escaso componente suspendido en un hábitat de luz densa.

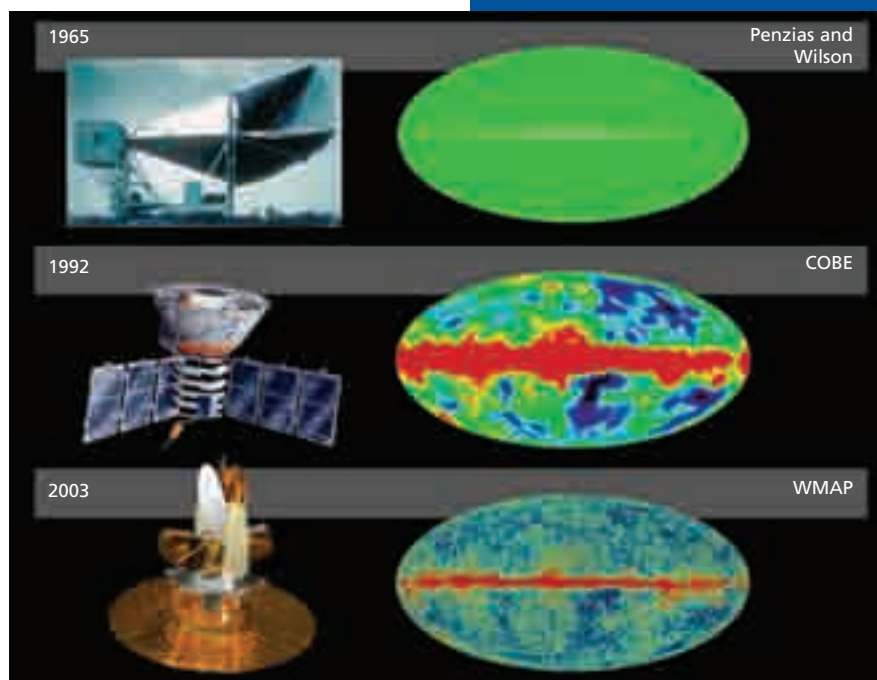


Aun así, la densidad de partículas cargadas era tan alta que un fotón —la partícula elemental de la radiación— tenía muchas probabilidades de interactuar rápidamente con ellas o, lo que es lo mismo, sólo podía recorrer un camino muy corto hasta encontrarse con un electrón o un núcleo de materia.

Pero, a medida que el Universo se expandía y la temperatura iba disminuyendo, llegó un momento en que los electrones comenzaron a ser “atrapados” por los núcleos, formando los primeros átomos de hidrógeno y helio, objetos neutros, sin carga. A su vez, los fotones dejaron de tener obstáculos con los que interactuar, de modo que comenzaron a viajar por su cuenta: la materia y la radiación se desacoplaron. Esto ocurrió cuando el Universo contaba con unos 300.000 años.

Desde entonces, aquellos fotones han proseguido su camino sin interrupción e impregnan todo el Universo bajo la forma de una radiación fósil tremendamente uniforme, cuya temperatura ha disminuido hasta los 270° bajo cero y que se sitúa en la zona de microondas del espectro electromagnético, es decir, imposible de observar a simple vista.

Esta radiación primordial se denominó radiación cósmica de fondo (o fondo cósmico de microondas, CMB de su nombre en inglés), y su



uniformidad constituye una de las pruebas de la teoría del Big Bang: sería, aunque se ha intentado, muy difícil imaginar una fuente de radiación local que presentara tal uniformidad.

Nosotros podemos detectar esta radiación encendiendo el televisor sin sintonizar: aproximadamente un 1% de la multitud de puntos que brillan desordenados en la pantalla son el remanente de la gran explosión, emitidos directamente desde el Big Bang a nuestro salón.

Figura 42.3. Evolución. Penzias y Wilson, descubridores de la radiación de fondo, la percibieron como homogénea en 1965. El satélite COBE, en 1992, descubrió las variaciones de temperatura y WMAP afinó en gran medida los resultados de COBE. Fuente: NASA.



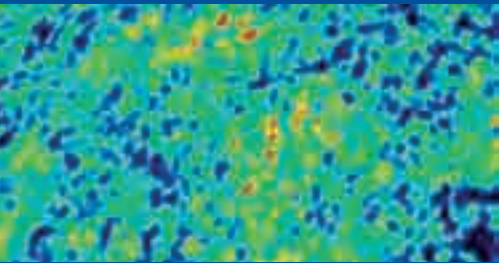


Figura 42.4. Detalle. Los resultados de la sonda WMAP, de la NASA, muestran en detalle las variaciones de temperatura, de millonésimas de grado, del fondo cósmico de microondas. Fuente: NASA.

## No tan homogéneo

A pesar del espectacular descubrimiento, los científicos se toparon con un importante problema: la homogeneidad de la radiación. La existencia de galaxias y su actual agrupación exigían que hubiera algunas irregularidades en el plasma primordial, que constituirían la semilla a partir de la que habrían de crecer las estructuras que hoy observamos. Por lo tanto, el carácter isótropo del fondo cósmico de microondas no debía serlo tanto. Los científicos encontraron la solución en

los instantes previos a la puesta en libertad de los fotones de la sopa cósmica: existían fluctuaciones cuánticas, es decir, minúsculas irregularidades que fueron cobrando intensidad con la violenta expansión inicial y generaron las acumulaciones que originarían las estructuras a gran escala.

Estas irregularidades, o anisotropías, han sido detectadas por varios satélites en forma de pequeñas variaciones de temperatura, tan pequeñas que equivalen, estadísticamente, a una parte por cien mil.

## 43. El Big Bang: problemas y soluciones

**Aunque la teoría del Big Bang prevaleció como modelo cosmológico por ser la que mejor se adapta a las observaciones, no está exenta de preguntas sin respuesta**

Observando los confines del firmamento inferimos que estamos inmersos en un mar homogéneo e isótropo de galaxias en expansión: la distancia entre dos galaxias cualesquiera (lo suficientemente alejadas para no formar parte de una misma subestructura) aumenta con el tiempo en la misma proporción. Esta observación, unida a la naturalidad con la que la teoría de Einstein para la gravitación —la teoría de la relatividad general— podía explicar este fenómeno, dio lugar a la idea de que quizá el espacio mismo y todo lo que contiene haya venido expandiéndose, y

enfriándose, desde un tiempo remoto y primero (tiempo cero), denominado Big Bang, hasta nuestros días.

### Los problemas

Aunque la teoría del Big Bang se considere en la actualidad la descripción más plausible de nuestro pasado, no está, sin embargo, exenta de preguntas sin respuesta. Separemos la historia del Universo en el antes y el después de un tiempo de referencia, que llamaré “tiempo frontera”, definido como el momento a partir del cual la física que conocemos debería ser suficiente para entender los fenómenos del Universo (este tiempo corresponde a un punto cercano pero, a la vez, suficientemente alejado del tiempo cero o “singularidad” a la que se hace alusión

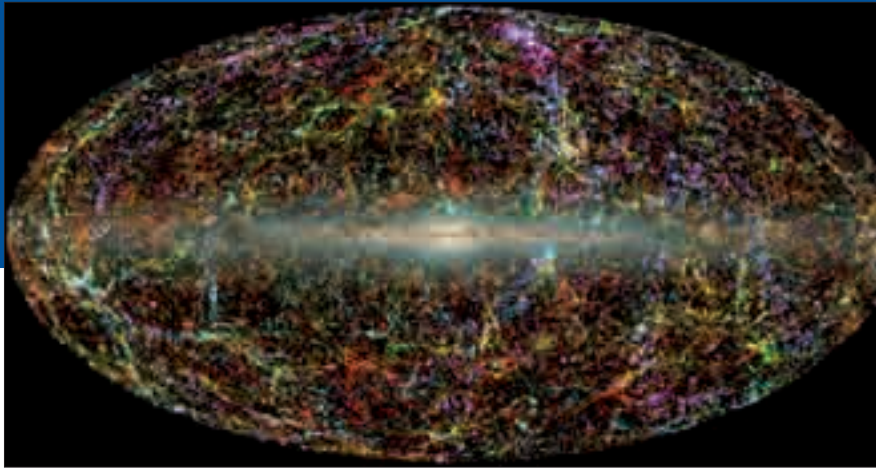


Figura 43.1. Panorámica. Esta imagen muestra la distribución de galaxias más allá de la Vía Láctea, donde se observa una tendencia a la homogeneidad. Fuente: XSC y PSC.

en otros artículos). Antes de ese momento no sabemos muy bien cómo describir el Universo; a partir de él, podemos suponer que el Universo consiste en un gas de partículas con una altísima temperatura promedio que irá disminuyendo al compás de la expansión. La porción de Universo que hemos conseguido observar hasta la fecha, unos 13.000 millones de años luz, resulta ser a grandes rasgos muy homogénea, una característica que se manifiesta especialmente en la radiación de fondo de microondas: la temperatura de esta radiación varía solamente en una parte por millón miremos al punto del cielo que miremos. Según el modelo cosmológico estándar, esta gran homogeneidad del Universo observable solamente podría darse si la región que dio origen a este Universo hubiera sido en su inicio (en el “tiempo frontera”

cuasi-perfectamente homogénea y, por tanto, tremendamente especial. Esto es así porque, dada una región con inhomogeneidades iniciales, no existe ningún proceso físico que hubiera podido homogeneizarla con posterioridad: durante el tiempo transcurrido entre el “tiempo frontera” y el momento en que fue emitida la luz más remota detectada, ni tan siquiera se pudo establecer una “comunicación” luminosa entre distintas zonas del Universo observable.

## La inflación

No satisfechos con esta conclusión se vio que, fuera del marco de la teoría estándar del Big Bang, sí que existe un proceso que, de haber sucedido, hubiera homogeneizado porciones enormes del Universo aunque no hubiesen sido homogéneas en el “tiempo frontera”. Sólo se necesitaría que éste hubiera sufrido un brevísimo periodo de expansión exponencial: ¡en unas centésimas de quintillonésima de

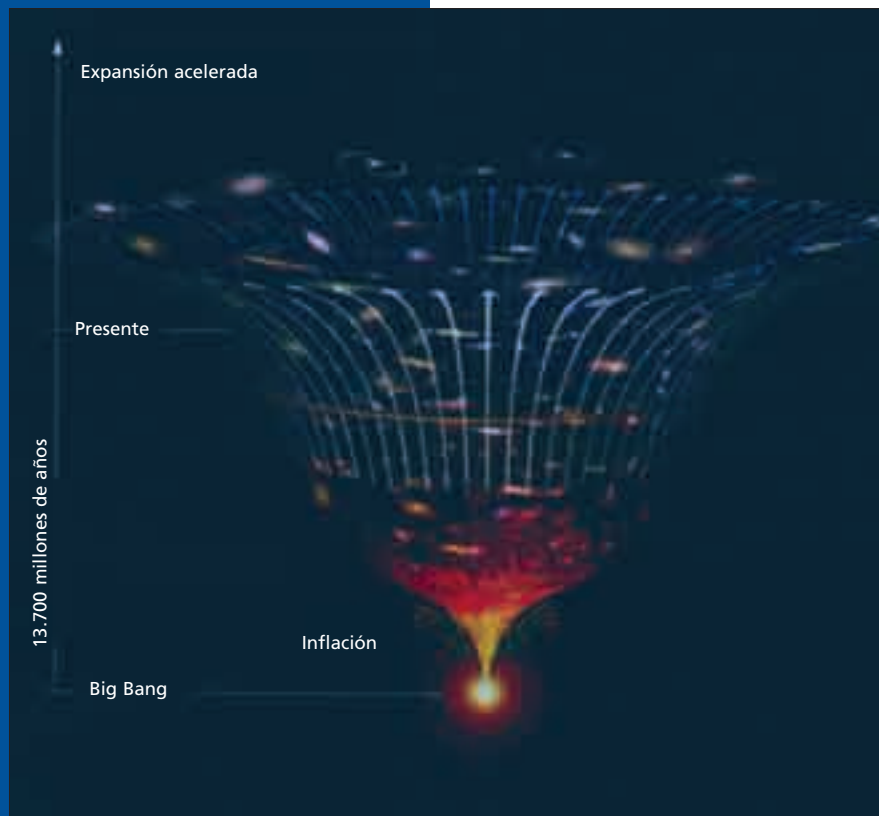
segundo ( $10^{-32}$  segundos) el Universo tendría que haber multiplicado su tamaño por un sesenta-llone ( $10^{60}$ !), lo que podría equivaler a que un guisante alcanzara el tamaño de una galaxia en un instante. De esta forma, cualquier pequeña región del Universo inicial habría crecido en muy poco tiempo hasta poseer un tamaño mucho mayor que el Universo observable, diluyendo a su vez enormemente cualquier traza inicial de inhomogeneidad. Esta expansión exponencial es lo que se conoce como la teoría inflacionaria del origen del Universo. Otra característica esencial de este proceso inflacionario es que, aunque durante la fase expansiva el calentísimo gas inicial se habría enfriado brutalmente, al final de la inflación este gas habría vuelto a

calentarse a temperaturas próximas a la inicial (la energía necesaria para producir la inflación, una vez terminada ésta, es devuelta en forma de calor). De esta forma, la inflación generó también una cantidad ingente de entropía, una medida de lo probable que es una configuración (ver recuadro).

Afortunadamente, este proceso inflacionario de homogeneización no es perfecto, sino que dejaría en el gas de partículas que puebla el Universo pequeñas inhomogeneidades (zonas con mayor o menor densidad respecto a un promedio). Estas inhomogeneidades son las que darían cuenta de las mínimas fluctuaciones de temperatura que muestra la radiación de fondo de microondas y, ulteriormente, de la



Figura 43.2. El pasado. Los datos de la sonda WMAP (NASA) sobre el fondo cósmico de microondas permiten estudiar el pasado del Universo.



formación de todas las estructuras en el Universo a gran escala.

La teoría inflacionaria parece hacer innecesario entender qué sucedió realmente en tiempos anteriores al “tiempo frontera”. Muchos tipos de condiciones iniciales para el Universo darían lugar al mismo resultado en la actualidad y, por tanto, las observaciones actuales no impondrían restricciones a la física pre-frontera. Sin embargo, como comentamos antes, la inflación genera un cantidad enorme de entropía y, por lo tanto, y aunque parezca contradictorio, el estado inicial del Universo tendría que ser uno de entropía bajísima, o lo que es lo mismo, un estado muy pero que muy especial. Pero ¿no es esto lo que intentaba evitar la inflación en un principio? A mi entender, necesitamos comprender mejor la física pre-frontera si queremos seguir avanzando en nuestra comprensión del origen del Universo.

### La entropía

Las leyes de la termodinámica dicen que, aunque la energía no se crea ni se destruye, cualquier cambio en ésta generará una disminución de la energía utilizable (por ejemplo, un conjunto de imanes alineados podrán atraer piezas de metal, pero si los desordenamos sus efectos se anularán y su energía no será utilizable). La entropía es una medida del

desorden en el Universo relacionada con la energía utilizable: si la entropía es cero toda la energía será utilizable, en tanto que, a mayor entropía, habrá menos energía útil. Los estados de baja entropía también se caracterizan por ser muy especiales y difíciles de crear al azar. Las características del proceso inflacionario crearían una inmensa cantidad de entropía.

## 44. El futuro del Universo

**L**os científicos barajan tres posibles futuros para el Universo, que dependen de la cantidad de materia total que éste contenga

Muchos han sido los modelos propuestos para explicar la evolución del Universo. De todos ellos, el llamado modelo estándar es actualmente el más aceptado, dado que ha conseguido explicar mejor los datos observacionales existentes. Este modelo se basa en la Teoría de la Relatividad General, formulada por Einstein en 1915 y en la que se establece una relación entre la geometría del Universo y la materia que contiene. La resolución de sus ecuaciones nos permite conocer la evolución temporal del Universo, pero para ello es necesario establecer una serie de hipótesis, que en el caso del modelo estándar es principalmente la

de aceptar un Universo homogéneo e isótropo, también conocido como principio cosmológico o copernicano: a gran escala, la distribución de materia y energía en el Universo es, en promedio, igual en todos sus puntos y muestra un aspecto similar independientemente de la dirección en la que se observe.

### Geometrías

Bajo el principio cosmológico (y sin considerar la energía oscura, de la que hablaremos más adelante), la ecuación de Einstein presenta tres posibles soluciones, correspondientes a tres diferentes geometrías para el Universo: plana, esférica e hiperbólica. Desde el punto de vista temporal, lo primero que se deduce en cualquiera de estas tres soluciones es que, en el pasado, el



Imagen 44.1. Tres posibles historias del Universo. Si el Universo contuviera mucha materia, su fuerza gravitatoria frenaría la expansión y provocaría un colapso final (arriba); si tuviera muy poca se expandiría para siempre y constituiría lo que se conoce como Universo abierto (centro y abajo).

Universo tuvo un estado singular, en el que la distancia entre todos sus puntos era prácticamente nula y la densidad de materia infinita.

Pero ¿qué predicciones nos da el modelo estándar para el futuro del Universo? Para los casos de geometría plana e hiperbólica se tiene que, si en el presente el Universo se está expandiendo (como demuestran las observaciones), éste seguirá expandiéndose eternamente, por lo que estos dos casos se conocen como modelos abiertos. Por el contrario, en el caso de un Universo esférico (modelo cerrado) el Universo seguirá expandiéndose hasta alcanzar un tamaño máximo, momento en el cual comenzará a derrumbarse hasta que, en un tiempo finito, alcance el llamado Big Crunch.

Esto está muy bien, pero ¿qué determina que nos encontremos en una solución o en otra? Pues básicamente la cantidad de materia que contenga el Universo (recordemos que geometría y materia están relacionadas por la ecuación de Einstein). Efectivamente,

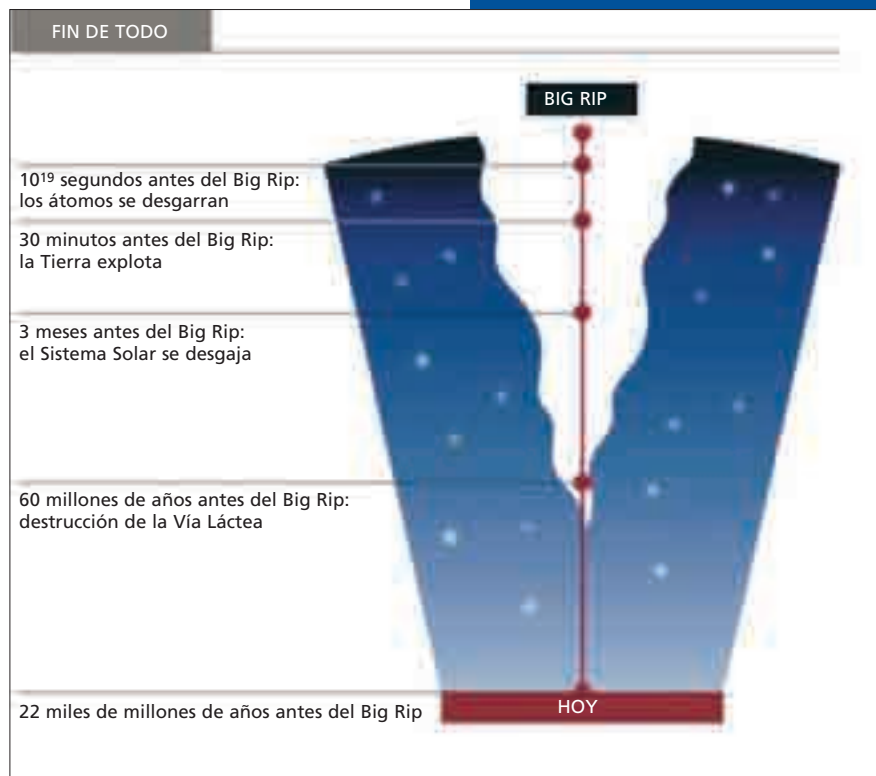


a estas escalas la única fuerza dominante en el Universo es la gravedad, que es atractiva. Si la cantidad de materia es lo suficientemente grande, la acción de la gravedad será lo suficientemente intensa como para ir frenando la expansión y comenzar el hundimiento (modelo cerrado). En el caso contrario, la expansión será cada vez más lenta, pero no se detendrá nunca (modelos abiertos).

## Hipótesis

Nuevas observaciones cosmológicas, que van desde el estudio de supernovas muy distantes a la detección de variaciones de temperatura en el fondo cósmico de microondas, parecen indicar que la geometría del universo es plana y que, por tanto, nos encontramos en un modelo abierto. Pero estas mismas observaciones también concluyen que la expansión del Universo no sólo no se está frenando, sino todo lo contrario, se está acelerando.

Como se ha visto en artículos anteriores, se piensa que esta etapa de expansión acelerada es debida a un tipo de energía llamada comúnmente “energía oscura”, que constituye aproximadamente el 70% de la densidad de la energía total del Universo y provoca una repulsión antigravitatoria que justificaría la aceleración.



Algunos investigadores apoyan la idea de que este efecto repulsivo de la energía oscura, lejos de mantenerse o debilitarse, crecerá con el tiempo, hasta el punto de que la velocidad de expansión del Universo será, en un tiempo finito, tan alta que ni siquiera la luz podrá llegar de un lugar a otro.

Este nuevo posible “final” cosmológico se conoce como Big Rip (“Gran desgarramiento”), ya que

Imagen 44.2. Big Rip . Este esquema muestra el proceso de uno de los posibles finales del Universo, el “Gran desgarramiento”.



Imagen 44.3. Posibilidades. Este esquema relaciona el tiempo con la el tamaño del Universo para mostrar sus tres posibles futuros.

finalmente la fuerza de la expansión superaría la gravedad provocando el desgarramiento sucesivo de todas las galaxias, de nuestro Sistema Solar, de la Tierra en sí, y finalmente de moléculas, átomos, núcleos y nucleones.

Otra parte de la comunidad científica no está de acuerdo con este apocalíptico final y defiende la idea de una expansión eterna y mucho más tranquila. De momento, el destino final del Universo es aún un interrogante.

### En resumen

## La Relatividad Especial y General de Einstein, en tres puntos

- Las leyes físicas son invariantes en cualquier punto del Universo: tanto en un laboratorio terrestre como en uno marciano, o en cualquier otro rincón del Universo, las leyes físicas observadas (gravedad, electromagnetismo, etc...) son exactamente las mismas.
- Hasta la aparición de la Relatividad, los conceptos de espacio y tiempo se habían considerado dos entes separados con naturalezas bien diferenciadas. Con la Relatividad Especial estos dos conceptos pasan a formar un todo único, que Einstein denominó "espacio-tiempo" y que se caracteriza por su "geometría".
- Por otro lado, la Relatividad General sugiere que esta geometría del

espacio-tiempo no es rígida sino que la presencia de materia hace que ésta se modifique y, más concretamente, se "curve" en las inmediaciones de esta materia. Esta curvatura en la geometría del espacio-tiempo debido a la presencia de materia es la causante de los efectos gravitatorios que rigen el movimiento de los cuerpos.



## 45. Más allá de la Relatividad

**L**a Teoría de la Relatividad constituye el eje de nuestra comprensión del Universo, pero dicha comprensión presenta aún retos a los científicos

Como habrán escuchado en numerosas ocasiones, la Teoría de la Relatividad versa sobre la medida del transcurso del tiempo y de las distancias en el espacio con relojes reales (puede llamarse reloj a cualquier fenómeno que transcurra en el tiempo con cierta periodicidad); también versa sobre cómo estas mediciones se distorsionan en presencia de objetos con mucha materia (o energía). La Teoría de la Relatividad nos dice, por ejemplo, cómo unos relojes se adelantan o atrasan en relación a otros relojes igualmente contruidos, tan sólo por seguir distintas trayectorias en el espacio (imaginad distintas naves espaciales,

cada una con su reloj de a bordo). Es más, se puede llegar a la Teoría de la Relatividad razonando exclusivamente sobre experiencias con relojes.

### Los límites de la medida

En todos los razonamientos con la medida del tiempo que conducen a la Relatividad, siempre hay una suposición implícita: independientemente del comportamiento concreto de un reloj (si adelanta o atrasa con respecto a otros, etc.), siempre podemos saber la posición de sus agujas en un momento dado con precisión arbitraria. Sin embargo, toda la experiencia acumulada ensayando con diversos sistemas en laboratorios nos induce fuertemente a pensar que la naturaleza no satisface



Fuente: Mark Ridel.

esta suposición fundamental. Razonemos un momento; primero, ¿qué queremos decir con la posición de las agujas? Una aguja siempre tendrá un grosor, por pequeño que sea, y ¿cómo calculo entonces a qué punto concreto de la esfera apunta? Para calcularlo con infinita precisión tendría que mirar la punta de la aguja usando una lupa de infinitos aumentos; pero conseguir una lupa así, ¿no es imposible? Hagamos al menos el esfuerzo de fabricar una lupa tan poderosa que nos permita calcular qué hora marca el reloj con una imprecisión máxima de, digamos, un microsegundo por arriba o por abajo. Esto es equivalente a usar en vez de un reloj de agujas un reloj digital que dé un “tic” cada microsegundo. Una vez que tengamos construida la lupa o el reloj digital anterior, empecemos a construir otra lupa u otro reloj digital con diez veces más precisión, una décima de microsegundo; cuando terminemos éstos, empecemos a construir otros de mayor precisión, y así sucesivamente. Resulta obvio que cuando intentamos construir relojes con mayor y mayor precisión (menor y menor separación entre sus “tics”), tenemos que recurrir a ingeniosos sistemas basados en propiedades de la materia en escalas atómicas y subatómicas. Sin embargo, sabemos que los objetos que pueblan estos mundos microscópicos no se comportan de la forma a la que estamos acostumbrados con los objetos cotidianos de nuestro mundo, el mundo

macroscópico. Después de muchos años de experimentación con el mundo microscópico, en los años veinte se llegó al establecimiento de unas reglas de comportamiento acordes con las observaciones: estas reglas corresponden a lo que se da en llamar mecánica cuántica. Una de estas reglas, llamada de complementariedad, nos dice que algunos descriptores de un sistema físico (su tamaño, su velocidad, etc.) son complementarios, de tal forma que conocer con precisión el valor de un descriptor implica desconocer ampliamente el valor de su descriptor complementario. Resulta que el descriptor duración de un proceso (tiempo) y el descriptor cantidad de energía en el sistema (energía) son complementarios: alcanzar una precisión más y más grande en la medida del tiempo conlleva que desconozcamos en mayor y mayor medida la energía que posee el sistema que está siendo utilizado como reloj. Pero la teoría de la relatividad nos dice que el discurrir del tiempo en un lugar se ve afectado por la presencia de grandes acumulaciones de energía cercanas. Por lo tanto, utilizar relojes cuánticos para razonar en relatividad nos lleva a concluir que intentar medir el tiempo con precisión conlleva tener una gran imprecisión en la energía del dispositivo, lo que a su vez genera una gran imprecisión en el propio discurrir del tiempo: parece resultar imposible medir el tiempo con total precisión. De

hecho, estos razonamientos nos conducen a la existencia de un límite absoluto a la precisión que puede alcanzar un reloj, lo construyamos de la forma que lo construyamos. Esta precisión máxima se llama habitualmente tiempo de Planck y se puede estimar, dando como resultado  $10^{-44}$  segundos, una centésima de septillonésima de segundo (éste es un número extraordinariamente pequeño que corresponde a dividir un segundo en 100 millones de millones de millones..., y así 7 veces, de partes; por supuesto, la precisión alcanzada por los mejores relojes atómicos construidos hasta el momento,  $10^{-17}$  o  $10^{-18}$  trillonésimas de segundo, está muy lejos de llegar a este valor límite).

## Distancias

Los mismos razonamientos pueden aplicarse a la medida de distancias: también parece haber una precisión máxima alcanzable. Cuando consideramos procesos físicos que involucran distancias o tiempos de evolución grandes con respecto a los límites fundamentales, la Teoría de la Relatividad sigue teniendo todo su sentido, pero como teoría aproximada: podemos imaginar el mundo como un ente geométrico que contiene toda la información sobre el devenir del tiempo y las distancias entre sus distintos

lugares. Nuestra descripción del mundo cuando consideremos a la vez procesos con escalas de variación en el espacio y en el tiempo cercanas a los límites de resolución tiene que ser muy diferente a la que nos proporciona la Teoría de la Relatividad. Aunque hasta la fecha no se ha conseguido explorar experimental u observacionalmente la estructura del espacio ni la del tiempo con las precisiones requeridas (los augurios sobre la posibilidad de hacerlo en el futuro cercano son muy esperanzadores, sin embargo), encontrar una descripción cuantitativa y consistente de esta nueva naturaleza del espacio

## Dos teorías

Se suelen considerar, por razones históricas, dos teorías de la relatividad, la relatividad especial y la general. La primera es solamente un caso particular de la segunda cuando se pueden despreciar las distorsiones debidas a grandes acumulaciones de materia; en este artículo consideramos en todo momento la situación más general.

y del devenir del tiempo se ha convertido en uno de los mayores y más apasionantes retos de la ciencia contemporánea.

## 46. La edad del Universo

**T**ras más de medio siglo de aproximaciones y cálculos fallidos, las últimas estimaciones indican que el Universo tiene 13.700 millones de años de edad

El infinito es un concepto que repele al ser humano, y más aún el infinito temporal: la eternidad. No es casual que la mayoría de las cosmogonías primitivas, por no decir todas, establecieran un principio y un final para el mundo conocido. Pero ¿qué dice la ciencia a este respecto?; mejor dicho, ¿tiene algo que decir? Parece que sí, aunque la respuesta ha venido más tarde de lo que uno podía pensar y dejando también algunos cadáveres, eso sí, sólo académicos, por el camino.

### Eternidad contra finitud

La Cosmología científica, el estudio de la formación, estructura y evolución del Universo como un todo no nació hasta el primer cuarto del siglo XX. En esos años coincidieron la aparición de la Teoría de la Relatividad General de Einstein, el descubrimiento de que el Universo era más vasto de lo que pensábamos y el establecimiento observacional de que las galaxias, las componentes materiales visibles del Universo, se alejan unas de otras con una velocidad proporcional a la distancia que las separa. La constante de proporcionalidad entre velocidad de separación y distancia es conocida como constante de Hubble, en honor del astrónomo que descubrió la expansión del Universo.



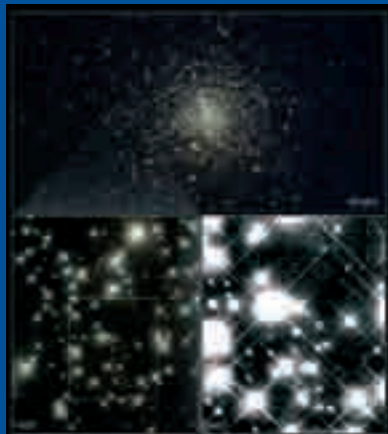


Figura 46.1. Las más viejas. Esta imagen presenta el acercamiento progresivo a una región del cúmulo globular M4, donde se han hallado las estrellas más viejas de la Vía Láctea (señaladas en círculos azules). Su edad, entre doce y trece mil millones de años, concuerda con las últimas estimaciones de la edad del Universo. Fuente: HST.



Hasta mediados de los 60 del último siglo, dos grandes líneas de pensamiento se disputaron la hegemonía de la Cosmología. Una recibía el nombre de Teoría del Estado Estacionario y postulaba un Universo sin principio ni fin. La otra, conocida como la Gran Explosión (o Big Bang), presentaba algunas semejanzas con las creencias ancestrales más enraizadas: el Universo tuvo un principio. Esta última es la más aceptada hoy en día entre los astrónomos y, aunque el modelo estacionario levanta la cabeza algunas veces, una gran explosión lo

vuelve al polvo de nuevo; pero ésta es una historia que merece ser contada aparte.

### El cálculo

La siguiente pregunta es obvia: si el Universo tuvo un principio, ¿cuándo sucedió? Resulta claro que el Universo no puede ser más joven que cualquiera de sus componentes; así pues, si medimos la edad de los objetos más viejos a nuestro alcance, si buscamos los fósiles galácticos más antiguos, éstos nos darán una cota inferior de la edad del

Universo. Por otro lado, si la constante de Hubble mide la variación de la velocidad de expansión con el radio del Universo, su inversa nos proporcionará una estimación del tiempo transcurrido hasta el momento actual. ¡Qué felicidad, al menos dos métodos para medir lo mismo! Pues bien, durante años ha sido nuestra peor pesadilla: no había quien se pusiera de acuerdo. Tanto las edades derivadas de “las constantes” de Hubble medidas, como las obtenidas a través de los cúmulos globulares, o agrupaciones de estrellas muy viejas, presentaban valores que iban de los 12 a los 20 mil millones de años. Algunos se preguntarán: ¿éste es el grado de fiabilidad que tiene la astronomía? Pues sí, y retamos al lector a pensar en métodos para datar una estrella o un sistema estelar o para medir la constante de Hubble. Cualquiera de ellos es, sin duda, indirecto, además de requerir de teorías intermedias que conecten causas y efectos paso a paso, el uso de constantes y parámetros ya medidos pero cuyo valor sólo se conoce con una determinada precisión, buenos telescopios, una buena dosis de paciencia... y mucha suerte.

Tuvimos suerte. Un experimento especialmente diseñado para medir las variaciones de temperatura de la radiación de fondo del Universo (WMAP), la huella imperecedera de la

gran explosión, permitió medir la edad del Universo. La interpretación de los resultados no es trivial y necesita de un buen conjunto de hipótesis, pero es lo mejor que tenemos y el valor obtenido es muy similar al calculado para los fósiles más viejos de nuestra galaxia: casi catorce mil millones de años. La antigüedad del todo y de las partes parecen coincidir, viniendo de métodos y teorías claramente diferenciadas. Ahora todo parece estar en orden..., aunque hemos tardado una eternidad en descubrirlo.



Figura 46.2. NGC 4603. Esta galaxia es la más lejana en la que se han hallado estrellas variables cefeidas, empleadas como velas estándar. Su estudio contribuyó en el cálculo de la constante de Hubble. Fuente: HST.

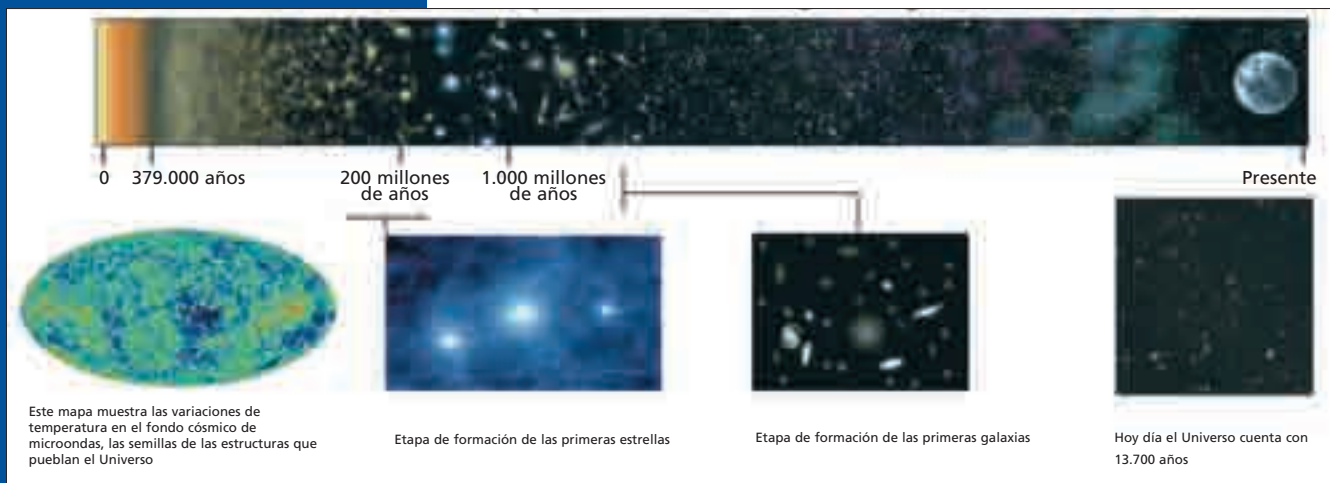


Figura 46.3. Historia. Breve esquema de la evolución del Universo, desde el Big Bang hasta nuestros días. Fuente: NASA.

### Investigación

#### La constante inconstante

La constante de Hubble, que relaciona la distancia de las galaxias con la velocidad a la que se alejan, ha sido objeto de intensas discusiones desde que se descubrió que el Universo se expandía. Se mide en kilómetros por segundo por megaparsec (un megaparsec —mpc— es algo más de tres años luz), de modo que si la constante fuera 50 km/s/mpc, una galaxia situada a 10 megaparsecs de distancia se alejaría a una velocidad de 500 kilómetros por segundo.

La primera estimación de la constante fue realizada por el mismo Hubble, que la fijó en 500 km/s/mpc. La edad del Universo inferida a partir de sus cálculos era de dos mil millones de años, un cálculo que se topó con un escollo cuando el estudio radiactivo de las rocas terrestres desveló que la edad de nuestro planeta era ¡mil millones de años mayor que la del propio

Universo! Ante esta incongruencia, Walter Baade realizó, en la década de los cincuenta, una serie de estudios con los que descubrió el origen del error: lo que Hubble tomó por “candelas estándar” —objetos cuya luminosidad no varía con la distancia— no eran estrellas individuales, sino cúmulos globulares, o agrupaciones de estrellas cuya luminosidad sí varía. A pesar de este avance, el debate prosiguió a cargo de, por un lado, Alan Sandage, cuya constante de Hubble descendió de 180 a 55 km/s/mpc en apenas quince años, y, por otro, de Gerard de Vaucouleurs, que apostaba por un valor en torno a los 100 km/s/mpc.

La discusión se zanjó a finales del siglo pasado cuando un grupo de astrónomos empleó el Telescopio Espacial Hubble para establecer, con un margen pequeño de error, la constante de Hubble en 70 km/s/mpc.

## 47. El germen de las galaxias

**P**equenísimas fluctuaciones en la densidad de la materia original fueron la semilla de las estructuras que hoy día pueblan el Universo

Desde la prehistoria, casi todas las culturas han buscado el orden en el azar del firmamento nocturno, y un buen ejemplo de ello son esas agrupaciones arbitrarias llamadas constelaciones. No obstante, el orden real va por otro camino: las estrellas que vemos en el cielo forman parte de nuestra galaxia, la Vía Láctea, cuya estructura comenzó a esbozar William Herschel a finales del siglo XVII. A principios del siglo XX, Edwin Hubble descubrió que la Vía Láctea pertenece a un grupo formado por treinta galaxias, que a su vez se encuentra en las afueras de un “supercúmulo” que mide unos 145 millones de años luz y contiene 50

cúmulos de galaxias. Algunos de estos cúmulos, como el situado en la constelación de Virgo, son verdaderos gigantes que agrupan a más de mil galaxias.

Hasta los años 80 se pensaba que las mayores estructuras en el Universo eran del tamaño de un supercúmulo. Sin embargo, en 1986 se descubrió el Gran Atractor, una estructura situada a unos 250 millones de años luz de nuestra galaxia y que recibe su nombre porque ejerce un tirón gravitatorio tan poderoso que tanto nosotros como todo el supercúmulo local estamos cayendo en su dirección.

Los cartografiados, o mapas de galaxias realizados a finales de los 80, demostraron que las estructuras como el Gran Atractor son comunes en nuestro Universo: la distribución de las galaxias tiene una estructura irregular,

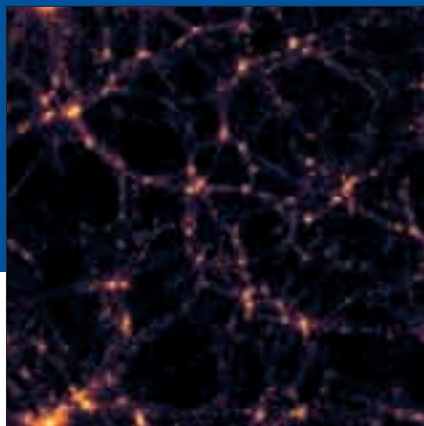


Figura 47.1. A gran escala. La distribución de galaxias en el Universo dibuja una estructura de filamentos y vacíos. Fuente: Universidad de Kentucky.

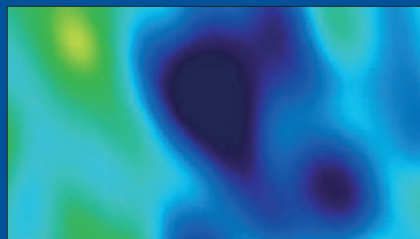
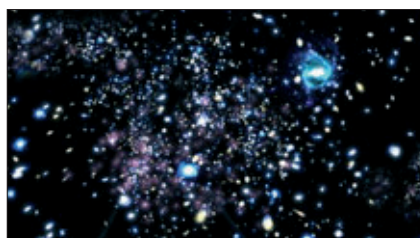
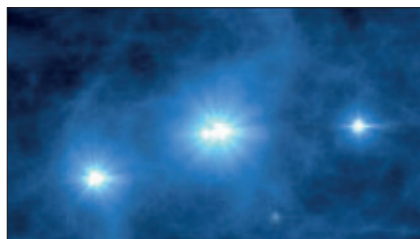


Figura 47.2. Evolución. Las fluctuaciones de temperatura existentes en el Universo primitivo dieron lugar a las grandes estructuras galácticas que observamos hoy día. Fuente: NASA.



con paredes y filamentos que rodean vacíos desprovistos de galaxias. En los nodos de dicha distribución se sitúan las grandes concentraciones de galaxias, como el supercúmulo local o el Gran Atractor.

## El origen de las estructuras

¿Cuál es el proceso que dio lugar a estas estructuras? ¿Y cómo evolucionaron en el tiempo? Éstas son dos de las cuestiones más importantes por resolver en la Cosmología moderna y, por desgracia, el edificio teórico más sólido del que disponemos, la teoría del Big Bang, no nos ofrece ninguna pista al respecto. En su forma más sencilla, esta teoría presupone que la materia y la radiación están distribuidas de manera homogénea en el Universo y, por tanto, la solución al problema de la estructura a gran escala necesita de elementos adicionales. Parece evidente que el Universo temprano presentaba

pequeñas fluctuaciones que fueron creciendo amplificadas por los efectos de la gravedad hasta dar lugar a las estructuras actuales.

En la actualidad, la hipótesis más popular para explicar su origen entre los cosmólogos alude a fenómenos cuánticos ocurridos durante el período de inflación. Ésta es una época muy temprana del Universo, poco después del Big Bang, durante la que todo el universo se expandió con una velocidad que aumentaba de manera exponencial. Durante este proceso, las fluctuaciones cuánticas provocaron que algunas partes del Universo se expandieran a velocidades ligeramente distintas, lo que provocó que, una vez detenido el proceso, algunas regiones presentaran una densidad ligeramente mayor que la de su entorno.

Por ejemplo, se supone que cuando el Universo era aproximadamente mil veces más pequeño que en nuestra época —medio millón de años después del Big Bang, más o menos—, la densidad de materia en la región del espacio que ahora contiene la Vía Láctea era quizá un 0,5% más alta que la de las regiones adyacentes. Eso provocó que esta región se expandiera ligeramente más despacio que el resto del Universo y que, por tanto, su volumen creciera

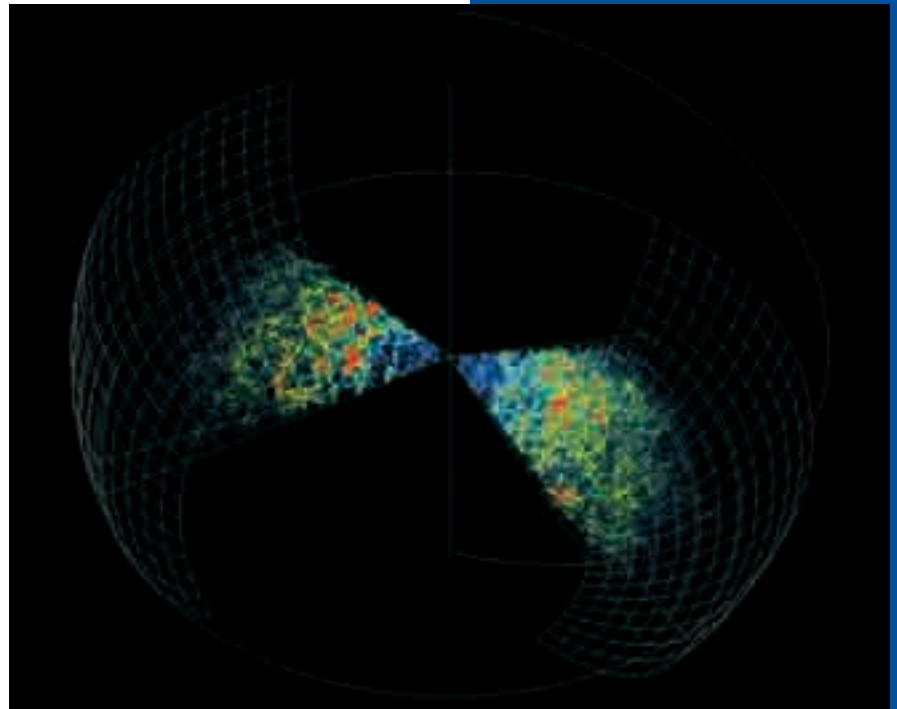


Figura 47.3. Mapa. Distribución en tres dimensiones de galaxias obtenida a partir de los datos del proyecto 2dF.

menos que el resto. Así, su “sobredensidad” siguió aumentando de manera paulatina. Cuando el Universo tenía un tamaño cinco veces más pequeño que el actual, aproximadamente 1.200 millones de años después del Big Bang, la región presentaba una densidad que doblaba la media. Se cree que fue en este momento cuando las regiones centrales de las galaxias como la nuestra empezaron a formarse.





Figura 47.4. SDSS. El proyecto de cartografiado del cielo SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*) cuenta con un telescopio de 2,5 metros de apertura.

## Evidencias observacionales

Los modelos del origen de las fluctuaciones, unidos a la teoría de la evolución de las perturbaciones de densidad, permiten realizar predicciones concretas que pueden ser verificadas observacionalmente. Encontramos una primera prueba en la radiación de fondo de microondas, el eco del Big Bang: las pequeñas diferencias de densidad presentes en aquella época han dejado huellas en la radiación de fondo que fueron detectadas en 1992 por el satélite COBE. Las recientes observaciones del satélite WMAP han confirmado estos resultados y, aunque la discusión científica sobre estos datos todavía está abierta, parece que, tal y como se esperaba, están de acuerdo con las predicciones de la teoría de la inflación.

Por otro lado, dos grandes proyectos de cartografiado cósmico buscan verificar la teoría de formación de estructuras observando el Universo actual. Se trata del 2dF (el campo de 2 grados) y el SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*), que han permitido establecer mapas tridimensionales detallados de la distribución de galaxias en el universo local. Los modelos de evolución de estructuras predicen un exceso de aglomeraciones de galaxias a una escala de 500 millones de años luz; un efecto sutil y muy difícil de detectar que los análisis recientes de los datos del SDSS y el 2dF han verificado de manera independiente.

Podemos concluir que, aunque todavía no entendemos completamente cómo se originaron y evolucionaron las estructuras que observamos en el Universo, parece que nos encontramos cerca del objetivo.



## 48. A tientas por el Universo

**L**a materia bariónica, de la que se componen las estrellas, la Tierra o nosotros mismos, pierde protagonismo ante la materia y la energía oscuras

“¿Sabéis de qué está hecha la Vía Láctea? Yo sí”, dice Galileo en la obra de Bertolt Brecht que lleva su nombre. Aunque diera los primeros pasos para desentrañar la estructura de la Vía Láctea, parece que Galileo se apresuró al afirmar que “no es más que un ingente conglomerado de estrellas...”. Hoy día sabemos que el Universo no es sólo lo que brilla, y que incluso esta parte roza lo excepcional al abarcar a duras penas el 4% del Cosmos. El estudio de la materia luminosa ha aportado, sin embargo, las pistas para la detección de esa materia oscura que, además de no brillar, se compone de

partículas exóticas y no de bariones (protones, neutrones y electrones), como la materia que conocemos y de la que estamos compuestos.

A principios de la década de los treinta del siglo pasado, los astrónomos Jan Oort y Fritz Zwicky infirieron, mediante observaciones independientes, la existencia de materia oscura. Zwicky partió de que, si las galaxias permanecen agrupadas en cúmulos por la fuerza de la gravedad, sus velocidades individuales deberían ser menores que la velocidad de escape del cúmulo. Al medir las velocidades de las galaxias en el cúmulo de Coma descubrió que se movían tan rápidamente que la gravedad atribuible a la materia luminosa resultaba insuficiente para mantenerlas unidas. Debía, por lo tanto, existir algún tipo de materia no visible cuya gravedad impidiera la

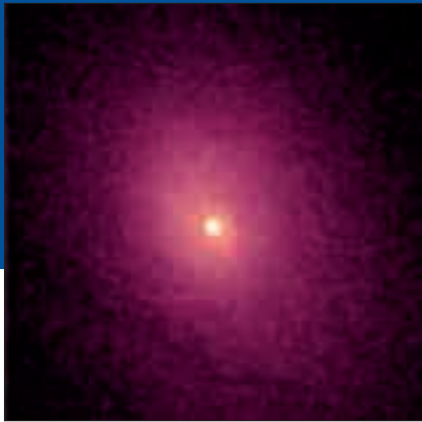
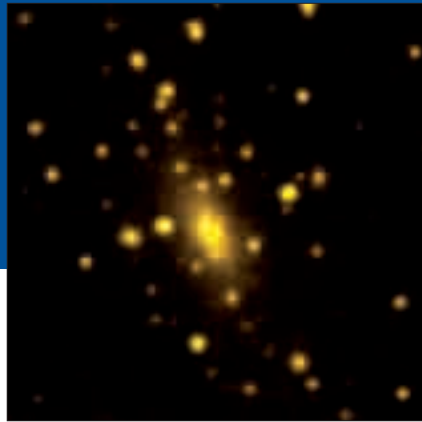


Figura 48.1. Abell 2029. Este cúmulo de galaxias, observado en rayos X y en el óptico, se halla envuelto en una nube de gas caliente (en rosa). Se cree que puede contener una cantidad de materia oscura equivalente a cien billones de soles. Fuente: Chandra.



separación. Jan Oort llegó a una conclusión similar, pero aplicada al movimiento de las estrellas dentro de las galaxias.

### Materia de naturaleza exótica

Un fuerte argumento en favor de la existencia de materia oscura procede de las medidas del fondo cósmico de microondas: la comparación de las fluctuaciones primigenias con la densidad y vacíos actuales lleva a la conclusión de que los 13.700 millones de años que se le atribuyen al Universo son insuficientes para el desarrollo de estructuras tan grandes.

La existencia de materia oscura no bariónica, en combinación con la bariónica, explicaría, no obstante, el

origen y desarrollo de dichas estructuras: supongamos que, al principio, hay materia oscura y bariónica en equilibrio. Como la primera tiene unas propiedades de interacción diferentes a la segunda, se separa primero de la radiación y empieza a agruparse mucho antes. Cuando la materia bariónica se libera de la radiación, ya tiene el camino preparado y cae sobre los grumos ya formados.

Queda pendiente, no obstante, la tarea de determinar la naturaleza de la materia oscura, lo que permite la entrada en escena de partículas exóticas, entre las que destacan los neutrinos y las distintas variedades de partículas masivas de interacción débil o WIMPs (del inglés Weakly Interacting Massive Particles), cuya existencia ha sido predicha por las teorías de partículas elementales aunque nunca se han detectado en laboratorios terrestres. Se trata de partículas que apenas interactúan con la materia ordinaria y que se conocen colectivamente como

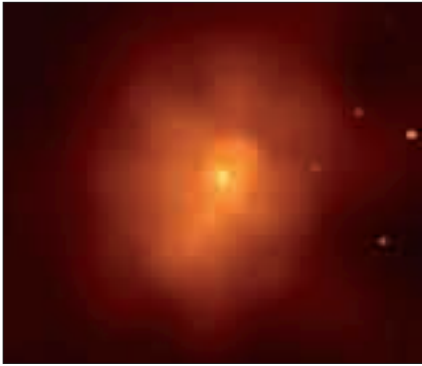


Figura 48.2. Materia oscura. Esta imagen del cúmulo EMSS 1358+6245 ha permitido a los científicos determinar que la cantidad de materia oscura que contiene es cuatro veces mayor que la de materia ordinaria. Fuente: Chandra.

“materia oscura fría”, en contraposición con los neutrinos o “materia oscura caliente”. Aunque al principio se pensó que uno de estos tipos podría predominar, hoy día se tiende a pensar en un modelo mixto en el que tanto la materia oscura fría como la caliente tienen su función.

## Energía, también oscura

La existencia de materia oscura tiene importantes consecuencias en la evolución del Universo, en relación con la cantidad total de masa y energía que éste alberga. La teoría de la inflación predice que vivimos en un universo plano, es decir, la densidad de materia debería equivaler a la densidad crítica (o equivaler a 1). En ausencia de una constante cosmológica, un Universo plano no sufriría un Big Crunch

(rehundimiento) o un Big Chill (expansión eterna acelerada), pero el problema estriba en que la cantidad de materia visible apenas alcanza el 1% de lo que se necesitaría para evitar esta aceleración eterna. En este caso, la proporción de materia oscura necesaria para cuadrar el modelo resultaría demasiado elevada y no ofrece una descripción adecuada del comienzo de formación de las galaxias y del ritmo de formación de estructuras.

Existe, sin embargo, una alternativa que puede reducir la presión sobre el problema de la “materia faltante”: se trata de la constante cosmológica, fuerza repulsiva introducida por Einstein en su modelo de universo estático para evitar que la gravedad provocara el hundimiento del Universo bajo su propio peso. Cuando Hubble demostró que el Universo se hallaba en expansión, Einstein renegó



Figura 48.3. Gas caliente. Imagen tomada por el observatorio de rayos-X ROSAT, que revela la presencia de grandes nubes de gas muy caliente en un cúmulo de galaxias. Aunque su contribución en la masa del cúmulo es insuficiente para dar cuenta de la materia oscura, proporciona un método independiente para medirla: debe haber al menos cuatro veces más materia de la que vemos para que el gas caliente no escape del cúmulo.

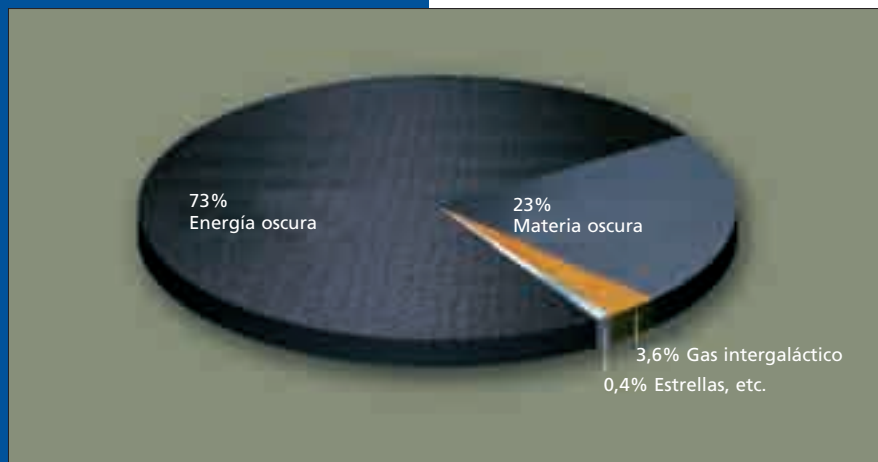


Figura 48.4. Proporciones. La energía y materia oscuras predominan en el Universo. Fuente: Chandra.

de esta “antigravedad”, aunque los resultados de los estudios de supernovas lejanas, que indican que el Universo se está acelerando, obligan a reintroducir el término,

conocido hoy día como energía oscura. Esta energía, que se atribuye al propio espacio vacío, debe contribuir en un 0,7 a la densidad crítica para que tanto el modelo inflacionario como la geometría espacial plana preserven su vigencia. Así llegamos a unas proporciones estimativas de la composición del Universo que atribuyen un somero 4% a la materia bariónica, un 30% a la materia oscura y un 65-70% a la energía oscura.

Un duro golpe para la especie humana, que históricamente ha pasado de considerarse el centro del Universo a comprobar que constituye un fenómeno compuesto de materia poco común, en tanto que el Universo es algo totalmente distinto.

## 49. El gran ojo del astrónomo

**D**esde su invención hace unos cuatro siglos, la evolución de los telescopios ha sido imparable y aún depara muchas sorpresas

El Sol es una pelota roja que se oculta tras la vega. Desde el Observatorio de Sierra Nevada (OSN), el cielo al oeste aparece rojo con ligeras nubes muy bajas y alejadas. Es hora de abrir las cúpulas. Las seis cúpulas se ponen en marcha y dejan al descubierto los telescopios, dando comienzo a una jornada de observación que se prolongará hasta el amanecer.

### Los primeros telescopios

Todo comenzó en el año 1200, cuando Roger Bacon consiguió tallar la primera lente con forma de lenteja, que se

empleó, noventa años después, en las primeras gafas para miopes. Aunque varios autores se disputan el invento del telescopio, lo más probable es que su verdadero inventor fuera el holandés Hans Lippershey, que construyó el primer telescopio hacia 1608. Galileo, al oír hablar de este instrumento, construyó su primer telescopio según le habían contado y con él descubrió los satélites de Júpiter, los cráteres de la Luna y los anillos de Saturno.

El astrónomo Johannes Kepler pidió a Galileo un ejemplar de su pequeño libro —de 24 hojas— *Sidereus nuncios* (El mensajero de las estrellas), en el que describe sus observaciones astronómicas con el telescopio. Y aunque Galileo ni siquiera le contestó, Kepler pudo hacerse con el ejemplar y en 1611 construyó su primer telescopio de lentes, mejor incluso que el de Galileo

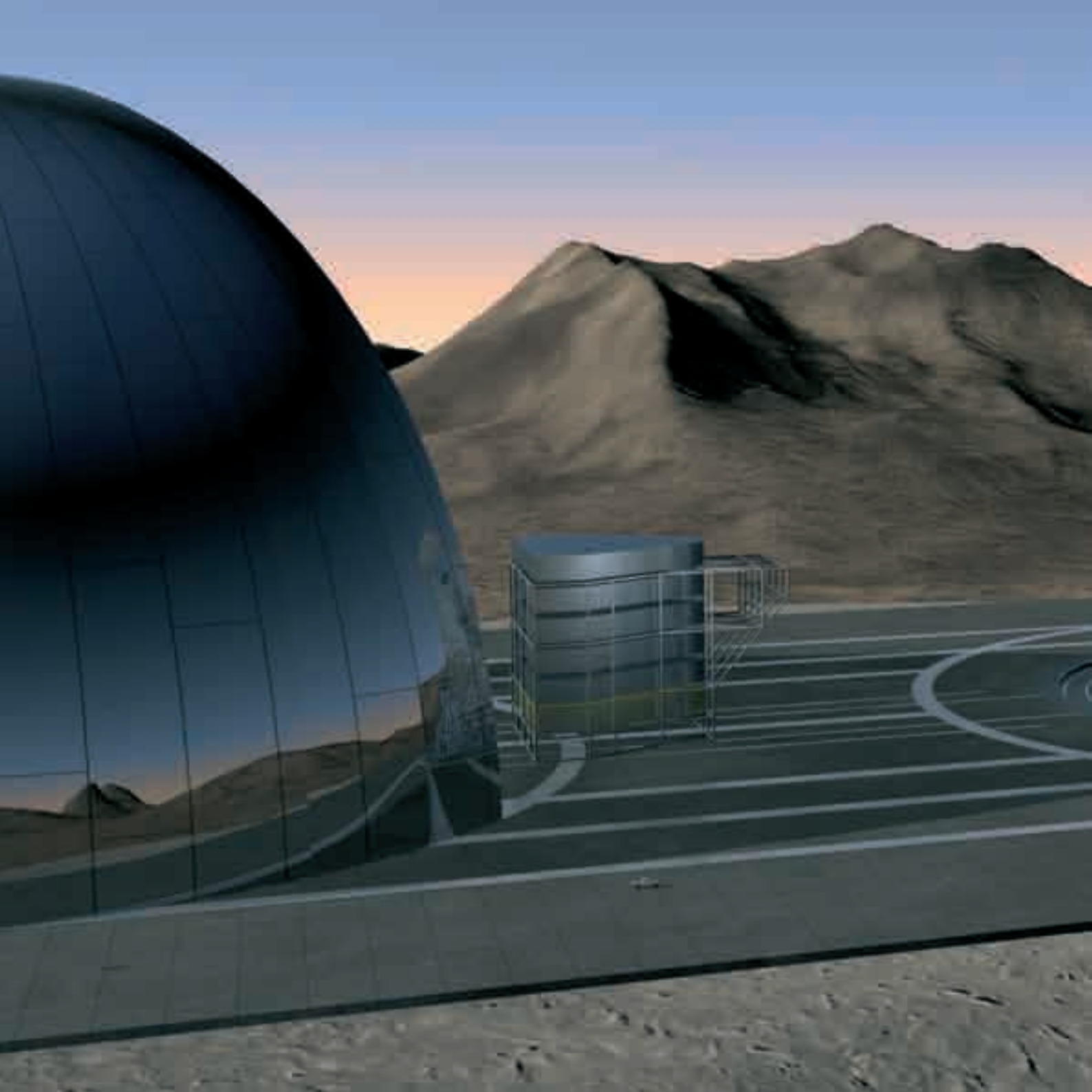
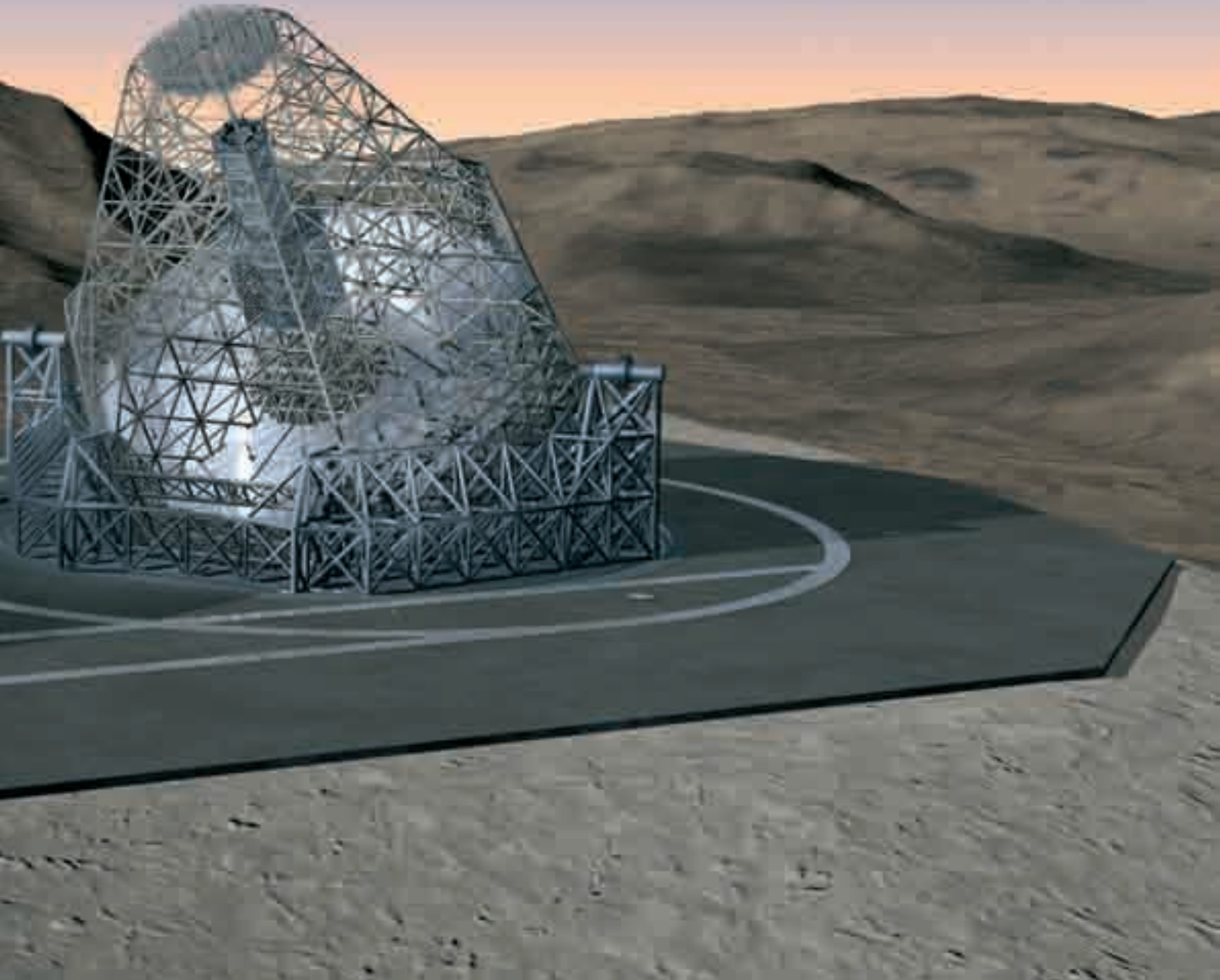




Figura 49.1. OWL. El telescopio de 100 metros que entrará en funcionamiento en el 2017.  
Fuente: ESO.





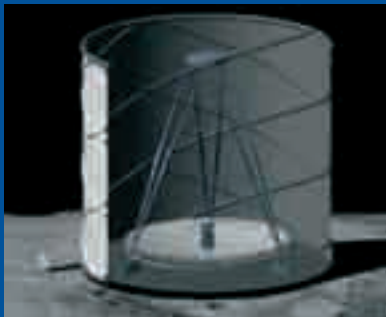


Figura 49.2. Lunar. Concepción artística de un futuro telescopio en la Luna. Fuente: Univ. Arizona.



Figura 49.3. Interminable. El telescopio refractor de J. Helvelios (1670), de 42 metros de largo. Fuente: King H.C. (1995).

ya que conseguía enderezar la imagen al añadir una tercera lente convexa.

Los telescopios refractores, como el de Galileo, siguieron desarrollándose a pesar de la aberración cromática, un defecto que consiste en una coloración anormal de los bordes del objeto observado a través de una lente. Precisamente para corregir esta aberración se inventaron los telescopios reflectores (de espejos), campo en el que Newton se anticipó al crear el primero. Persistían, sin embargo, dos problemas: la aberración esférica, consecuencia de usar un espejo esférico, y la reducida luminosidad, producto de la elaboración del espejo a partir de metales pulidos. Todo ello provocó que los telescopios reflectores se desarrollaran poco, dejando el campo libre a los refractores.

Estos últimos intentaban minimizar las aberraciones disminuyendo la curvatura de las lentes (haciéndolas menos convergentes), lo que producía

un aumento del tamaño del instrumento. Así, a partir de 1640 los telescopios se hicieron más y más largos: desde el telescopio de Galileo, que medía algo más de metro y medio, pasaron a medir cuatro, cinco y seis metros, como el de Huygens (construido en 1656), de siete metros y cien aumentos. Y así siguió la carrera hasta 1670, año en el que J. Helvelios fabricó un telescopio de cuarenta y dos metros de largo. A pesar de las mejoras, estos interminables telescopios se mostraron inútiles porque se movían con el viento y era difícil mantener las lentes alineadas.

## Los telescopios modernos

Tras el telescopio de Newton, los reflectores se desarrollaron poco debido a la falta de luminosidad. Pero con la confección de espejos a partir de vidrio recubierto de plata los telescopios

reflectores fueron adquiriendo más protagonismo, en parte porque su fabricación no requería la gran perfección óptica necesaria en la elaboración de las lentes de los refractores. No obstante, ambos tipos fueron predominando alternativamente desde 1608 hasta 1950, momento en que la construcción del telescopio Hale (Monte Palomar, EE.UU.) establece finalmente la hegemonía de los reflectores. El Hale, con sus cinco metros de diámetro, ostentó el récord en tamaño hasta 1976, año en que se construye el telescopio de seis metros soviético BTA. Éste, a su vez, cedió el primer puesto en 1993 al primero de los Keck, un par de telescopios gemelos situados en Hawái que, con sus casi diez metros de apertura, siguen siendo hasta el momento los mayores del mundo.

Para solventar uno de los mayores problemas para la observación astronómica, la absorción de la luz por parte de la atmósfera terrestre — especialmente del infrarrojo por el vapor de agua—, se elaboraron proyectos para poner telescopios en el espacio, como el Telescopio Espacial Hubble, que lleva ya quince años en activo. Pero, por el momento, resulta más barato construir grandes telescopios en tierra que ponerlos en órbita, de modo que gran parte del esfuerzo se está enfocando a la mejora de las capacidades y al aumento del



Figura 49.4. Leviatán. El telescopio reflector de 183 centímetros construido por Lord Rosse en 1845. Fuente: King H.C (1995).

tamaño de las instalaciones terrestres. Por ejemplo, para el estudio de explosiones de rayos gamma (GRBs) o la detección de objetos cercanos a la Tierra (NEOs), se construyen telescopios robóticos, totalmente automatizados, que realizan la observación de manera autónoma: eligen el objeto a observar en función de las condiciones, abren la cúpula, apuntan el telescopio y realizan la adquisición de datos.

En la actualidad se están construyendo telescopios que superarán

la “barrera” de diez metros de los Keck hawaianos, como el Large Binocular Telescope (LBT) o el Gran Telescopio Canarias, que verán su primera luz este mismo año. Otros proyectos a más largo plazo constituyen verdaderos desafíos: en 2010 entrará en funcionamiento el TMT (30 metros), en 2014 el EURO-50

(50 metros) y en 2017 el OWL (100 metros). Y más adelante, hacia 2035, quizá sea posible colocar un telescopio en la Luna: en la actualidad se estudia su ubicación en el cráter Shackleton, en el polo sur lunar, donde nunca llega el Sol y cuya baja temperatura evitaría la necesidad de enfriar la instrumentación. Además, en el borde

del cráter hay zonas bañadas por el Sol durante todo el año, de modo que podría aprovecharse para recoger energía. Y, finalmente, parece bastante probable que haya agua en su interior. Aunque sería necesario crear una base espacial en el propio cráter, no parece muy aventurado suponer un telescopio líquido de veinte metros en el cráter lunar.

## 50. Un desafío tecnológico

**E**l desarrollo de una misión espacial comprende un proceso de preparación, diseño y fabricación de instrumentos que dura varios años

Nadie podía imaginar en 1957 que, con el lanzamiento del Sputnik 1 por la antigua URSS y, un año más tarde, del Explorer 1 por Estados Unidos, el hombre, en su afán por conocer el Universo, había iniciado la era espacial. El punto culminante se produjo el 16 de julio de 1969 cuando Armstrong dio su “pequeño paso”. Desde aquella época han sido lanzados al espacio varios miles de satélites y naves espaciales que, equipados con instrumentos, han realizado innumerables y variadas misiones.

Es un hecho que la era espacial regaló al hombre dos nuevas perspectivas: una nueva visión de la Tierra y otra del

Universo. De ahí la importancia de la investigación espacial, del uso de vehículos espaciales, de las misiones que se han realizado hasta la fecha y las ventajas que, para la vida cotidiana, ofrece la conquista del espacio.

Los descubrimientos producidos en la era espacial han revolucionado las ciencias básicas: se han abierto nuevas líneas de investigación para la geofísica, la astronomía, la física del Sistema Solar y la climatología, así como para las ciencias aplicadas y las sociales, las telecomunicaciones o el derecho espacial.

### Las naves

Para la exploración planetaria existen dos tipos de naves espaciales: mientras los satélites orbitan, las sondas

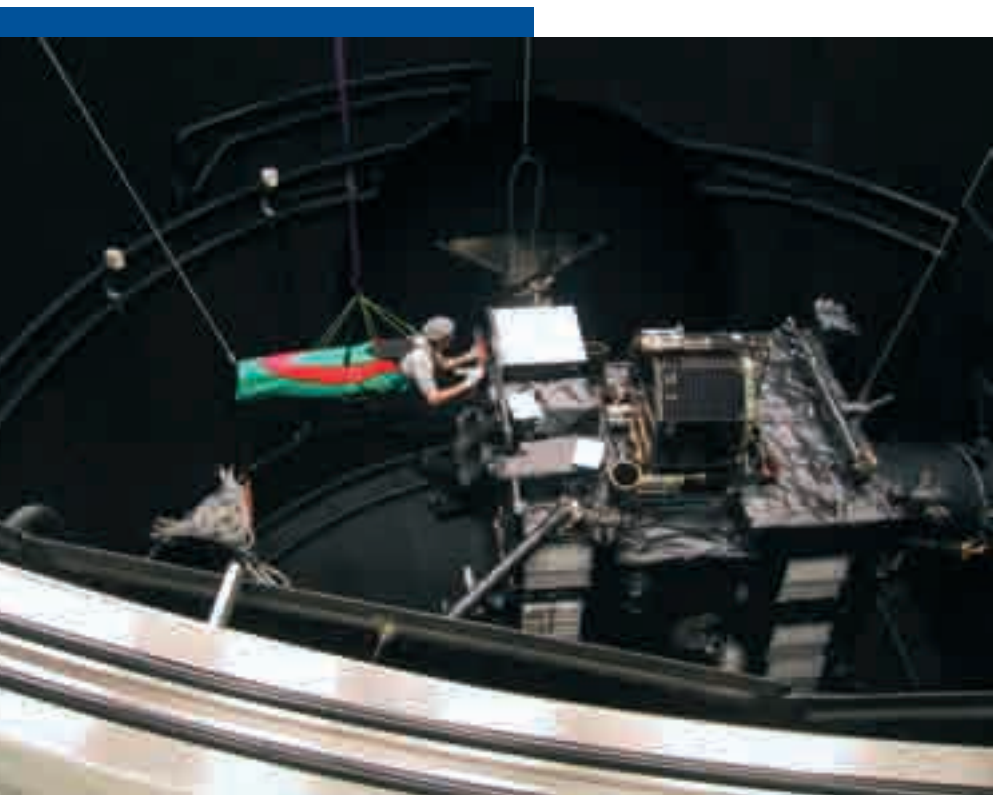


Figura 50.1. Rosetta. Reparaciones de la nave Rosetta dentro del gran simulador espacial. Fuente: ESA.

interplanetarias suelen adentrarse en el espacio, algunas destinadas a abandonar nuestro Sistema Solar, a seguir su camino a través de la Vía Láctea o a tomar “tierra” en los planetas o sus lunas. Estos últimos son los denominados landers.

Las naves tripuladas cumplen con requisitos más estrictos debido a las necesidades de la propia tripulación. Están diseñadas con tecnología capaz de proveer aire, agua y comida a los tripulantes, equipos de navegación y control, asientos y compartimentos para dormir y equipos de transmisión para enviar y recibir información. Una de las partes más delicadas de las naves tripuladas es la pantalla o escudo térmico que las recubre para protegerlas del calor que se produce al volver a la atmósfera terrestre.

Para adentrarnos en el mundo de las misiones espaciales, debemos mencionar que en la exploración espacial se utilizan básicamente dos métodos científicos. Por una parte, la detección *in situ*, que consiste en la exploración directa con instrumentos, ya sea a lo largo de la trayectoria del vehículo espacial o mientras éste explora los cuerpos o espacios de interés. Por otra, la teledetección, es decir, la detección a grandes distancias.

Figura 50.2. Huygens. La sonda Cassini-Huygens antes de ser alojada en el cohete para su lanzamiento. Fuente: NASA/ESA.

## Preparación de la misión

El proceso de selección de una misión espacial es realizado por un equipo de ingenieros y científicos de alguna de las agencias espaciales existentes, teniendo en cuenta el trinomio “costes, riesgos y beneficios” y sin olvidar una cuestión fundamental: ¿por qué se elige ese objetivo?

El diseño de una misión espacial, que puede durar una media de cinco años, se desarrolla en varias fases, a lo largo de las que se lleva un control exhaustivo de la misma mediante revisiones periódicas y realizando una revisión final en cada fase, tras la cual se obtiene un equipo específico. El producto resultante de cada fase generará gran volumen de informes, ya que es importantísimo documentar todo para evitar olvidos en las siguientes fases o seguir el hilo a posibles fallos.

La máxima “divide y vencerás” es aplicable a esta primera fase: es necesario desmenuzar en partes tan pequeñas como sea posible el problema para poder establecer los requerimientos







científico-técnicos. Este proceso de síntesis y análisis representa la parte más creativa del diseño de la misión y da lugar a diferentes conceptos de la misma (masa, volumen, energía, programación temporal y costes relacionados con el vehículo lanzador, el satélite, la instrumentación y las operaciones científicas).

También se deben formar equipos internacionales que apoyen los costos, diseñen y construyan los instrumentos, dirigidos por un investigador principal y un jefe de proyecto que clarifiquen funcionalmente cada parte y cómo se unirán más tarde.

### **Diseño y fabricación de los instrumentos**

Los instrumentos de a bordo se diseñan para operar en un ambiente muy hostil, ya que se verán sometidos a radiaciones, cambios de presión y temperatura, falta de gravedad, grandes aceleraciones y vibraciones acústicas y mecánicas durante el lanzamiento. Para paliar estos efectos durante el diseño, los ingenieros adoptan una serie de estrategias que minimizarán la posibilidad de fallo, como son: realizar un diseño simple y sin complicaciones, duplicar, en la

medida de lo posible, los subsistemas de los que está compuesto un instrumento (filosofía de redundancia), elegir componentes espaciales, aunque éstos tengan un coste hasta 10.000 veces mayor que un componente comercial, y realizar un control de calidad adecuado. También es conveniente construir diferentes modelos sobre los que realizar campañas de ensayos funcionales y estructurales para minimizar los errores y construir simuladores que permitan emular todas las operaciones con el satélite y los instrumentos.

Una vez finalizado el proceso vendrá la integración de todos los instrumentos en el satélite, donde se verá el fruto de tantos meses de planificación, diseño, fabricación y calificación de subsistemas e instrumentos con nuevas pruebas globales, principalmente para analizar posibles problemas entre los distintos instrumentos y analizar el comportamiento de los mismos con el satélite.

Por último, y generalmente como la parte más olvidada, se ensamblará todo dentro del cohete y, tras el lanzamiento, comenzará la transmisión de los datos al centro de control, donde se entregarán a los científicos para su análisis y posterior depuración.



## Futuras misiones

Las misiones espaciales de las próximas décadas requerirán nuevas expectativas (descubrimiento de vida en planetas más lejanos y desconocidos

hasta hoy) y distintas filosofías de trabajo. El avance en las micro y nanotecnologías permitirá realizar mejores investigaciones, instrumentos con menos masa y que consuman menos potencia, y plataformas más

pequeñas construidas más rápidamente y a menor coste. Actualmente el IAA está trabajando en la fase de definición de la futura misión Bepi-Colombo, el primer orbital europeo con rumbo a Mercurio que será lanzado en 2012.

## 51. El atractivo multimedia de la astrofísica

**L**a abundancia de sociedades astronómicas es un ejemplo del interés social por esta ciencia, protagonista de muchas películas de ciencia-ficción

Los medios de comunicación saben del *sex-appeal* de la astrofísica, del poder de fascinación y de la belleza estética que poseen las imágenes de planetas, cometas o galaxias lejanas. Prueba de ello es que la astrofísica es probablemente la disciplina científica que cuenta con un mayor número de aficionados fuera del ámbito estrictamente profesional, así como la expectación que generan eventos astronómicos como los eclipses de Sol o las lluvias de meteoros, u otros relacionados, como el lanzamiento de las misiones espaciales. Son noticias de las que rápidamente se hacen eco los

medios de comunicación, o si no recordemos las imágenes del tránsito de Venus que abrieron la casi totalidad de los noticiarios del mundo el 8 de junio de 2004. Además, es muy común encontrarnos en los medios términos puramente astronómicos, incluso en las noticias deportivas, donde un famoso equipo de fútbol recibe el epíteto de “los galácticos”. En cualquier caso, este interés de los medios por las noticias del Cosmos no debería justificar la falta de rigor científico en su tratamiento que muy a menudo encontramos.

### Divulgación escasa

La divulgación, en cambio, no goza de esta continua presencia en los medios de comunicación. Los documentales astrofísicos son poco frecuentes, y aquí

Figura 51.1. El “showman” de la Ciencia. El astrónomo Carl Sagan, autor de la serie de documentales de astrofísica *Cosmos*.



hay que destacar un clásico del género, *Cosmos*, tan magistralmente concebido y ejecutado por Carl Sagan y que hizo que muchos jóvenes quisieran dedicarse a la astrofísica. En este campo nos ganan los leones en la sabana: ¿por qué se televisan más documentales sobre animales que sobre el Universo? Seguramente por la dificultad intrínseca que conlleva la explicación de conceptos físicos. La biología es más visual e intuitiva. Quizá deberíamos aprovechar ejemplos como el de “FameLab”, un concurso británico en el que los participantes deben enganchar en tres minutos a un público no científico explicándoles de una manera original y comprensible un concepto científicamente preciso.

Normalmente la prensa suele hacerse eco de la actualidad astrofísica y últimamente hemos podido encontrar en la española (y en particular en la granadina) varios ejemplos de ello, como la serie de artículos de *Granada Hoy* en la que se incluyó éste. Es también usual encontrar en los quioscos de prensa coleccionables sobre el Universo que son siempre traducciones, a veces pésimas, de originales generalmente estadounidenses. Mención aparte merece el esfuerzo de las aún escasas revistas de divulgación especializada por transmitir el conocimiento de los astros de una manera amena y sencilla.



Figura 51.2. *Los Simpsons*. Imagen del capítulo donde aparece el astrónomo Stephen Hawking.



Figura 51.3. Pionero. Fotograma de la película *Un viaje a la luna*, dirigida por Georges Méliès en 1902.

## La astrofísica en el cine

Pero, sin duda, es en el terreno de la ficción, y concretamente de la ciencia-ficción, donde la presencia de elementos astrofísicos es permanente. Desde la impactante retransmisión radiofónica de una adaptación de la novela *La guerra de los mundos*, por Orson Welles en 1938, los cómics de Flash Gordon o *Viaje a la Luna* de Julio Verne, la astrofísica ha conformado uno de los pilares básicos de este fascinante género.

De manera general, podemos agrupar esta presencia en cuatro grandes temas. Por un lado, la relación entre el hombre y el Cosmos, que viene siendo dual desde tiempos remotos, oscilando entre el miedo a lo desconocido y la curiosidad ante las incógnitas del Universo, auténtico motor para adquirir nuevos conocimientos. La vida extraterrestre es otro tema estrella, ya que responde a la necesidad del hombre de no sentirse solo en el Cosmos, de que la vida sea una de sus constantes. La tecnología ocupa ya un lugar casi fundamental en nuestras vidas, y las sondas espaciales, con sus airbag, no son ya únicamente elementos de las películas de ciencia ficción, sino que ocupan titulares en las noticias. Finalmente encontramos la búsqueda de otros mundos, un sueño muy arraigado en el hombre, unas veces como un puro instinto explorador

y otras con la hipotética posibilidad de poder explotar otros mundos cuando los recursos de la Tierra estén agotándose.

Más concretamente, la ciencia-ficción en TV tuvo su *boom* astrofísico durante los años 60, 70 y 80 cuando podíamos deleitarnos con series como *Star Trek* y todas sus sucesoras, *Perdidos en el espacio*, *Los invasores*, *V*, *Galáctica*, *Espacio 1999*, o la precursora del ecologismo: *Quark*, *la escoba espacial*. Hoy en día este tipo de series prácticamente no existe, aunque no hay que olvidar a *Los Simpson*, que nos deleitan con un humor afilado e inteligente y con varias referencias a la Astrofísica (recordemos la aparición estelar de Stephen Hawking en uno de sus capítulos o el paseo de Homer en un universo tridimensional). Pero es en el medio cinematográfico donde sin duda la astrofísica es la reina, y eso que el cine tiene ya reinas con las que es difícil competir. Es cierto que el cine ha violado en numerosas ocasiones las leyes de la física, pero aceptamos que debe tener sus licencias para poder conservar su magia. A cambio, ha prestado su apoyo a campañas mediáticas para inclinar la opinión pública a favor de misiones espaciales a la Luna o más recientemente a Marte (también el cine se ha beneficiado materialmente de la astrofísica, así Kubrik usó en *Barry Lyndon* unos objetivos especiales desarrollados por la NASA para su

Figura 51.4. Vida extraterrestre. *E.T.*, como ejemplo de uno de los temas estrella de la ciencia ficción, la vida fuera de la Tierra.

programa Apolo). Pero, sobre todo, el cine nos ha permitido visitar galaxias muy, muy lejanas, conocer a *E.T.*, contemplar la terrible colisión de un asteroide contra la Tierra o pasear por la superficie de Marte, entre otras muchas cosas. Y es que, en general, a los astrofísicos nos gusta la ciencia-ficción porque nuestro trabajo es riguroso y sus resultados se obtienen a largo plazo y el cine nos permite librarnos por un momento de la necesaria rigidez del método científico y hacer volar la imaginación en busca de respuestas imposibles... o tal vez algún día posibles.



## 52. ¿Han pasado 13.700 millones de años o 52 semanas?

**F**inalizamos nuestro viaje por el Cosmos con una revisión de algunos de los grandes interrogantes a los que los astrónomos buscan respuesta

Con este artículo, damos por finalizado nuestro viaje por el Universo. Han sido 52 semanas en las que hemos abarcado una historia de 13.700 millones de años. Hemos podido familiarizarnos con los objetos astronómicos, entender las razones por las que emiten radiación, entender su ubicación en el Universo y su interrelación con los demás objetos que pueblan el Cosmos. Y también hemos sido conscientes de todo lo que todavía no sabemos, de los interrogantes que todavía quedan por

resolver. Es a ellos a los que dedicamos este último artículo.

Es difícil hacer una selección de las preguntas más importantes que los astrofísicos debemos tratar de responder en los próximos años. Seguro que cada astrónomo y cada lector harían su propia selección. Por ello, y en aras de buscar un criterio global y científicamente riguroso, vamos a ayudarnos del trabajo realizado por los editores de la prestigiosa revista *Science*. Con motivo de su 125 aniversario, el comité editorial de la revista ha seleccionado los 125 enigmas más importantes que afronta la ciencia para los próximos años. La celebración del 125 cumpleaños de *Science* es apasionante y parte de un principio que detalla el

Figura 52.1. Materia oscura. Esta imagen del cúmulo EMSS 1358+6245 ha permitido a los científicos determinar que la cantidad de materia oscura que contiene es cuatro veces mayor que la de materia ordinaria.  
Fuente: Chandra.



editor jefe de la revista: “Mi amor por la Ciencia tiene mucho que ver con su misterio. De hecho, si tuviera que elegir, preferiría la ciencia a la investigación: la ciencia está relacionada con las preguntas, mientras que la investigación lo está con las respuestas”. Ése es el reto: la revista nos plantea las grandes preguntas, preguntas cada vez más difíciles y exigentes; nosotros, los investigadores, tendremos que tratar de responderlas. Los interrogantes que plantea *Science* van desde lo más cercano a las grandes estructuras del Cosmos. Detallamos en este artículo aquellos interrogantes relacionados con la Astrofísica.

## ¿De qué está hecho el Universo?

La materia ordinaria, aquella de la que están formadas estrellas y galaxias, apenas constituye el 5% del

Universo. Si tenemos en cuenta la materia oscura, materia cuya naturaleza y distribución no conocemos pero cuya existencia está sugerida por diferentes resultados observacionales, como la distribución grumosa de las galaxias en el Cosmos o sus curvas de rotación, alcanzamos el 30% del contenido global del Universo. ¿Y el 70% restante? Los científicos estiman que está relacionado con la denominada “energía oscura”. Esta energía sería responsable de que el Universo se vaya expandiendo cada vez a mayor velocidad en lugar de contraerse, como cabría esperar de acuerdo con las leyes de la Física. Su naturaleza es, sin embargo, un misterio. Las observaciones del fondo de radiación cósmica, de las lentes gravitatorias y de las supernovas tipo Ia contribuirán al esclarecimiento de algunas de estas cuestiones.

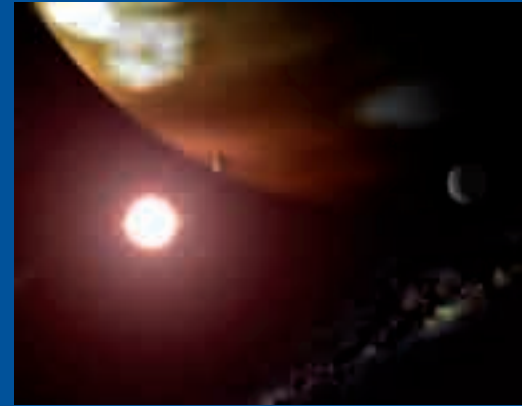


Figura 52.2. Extrasolar. Concepción artística del planeta que gira en torno a la estrella Gliese 876, recientemente hallado.  
Fuente: NASA y STScI.



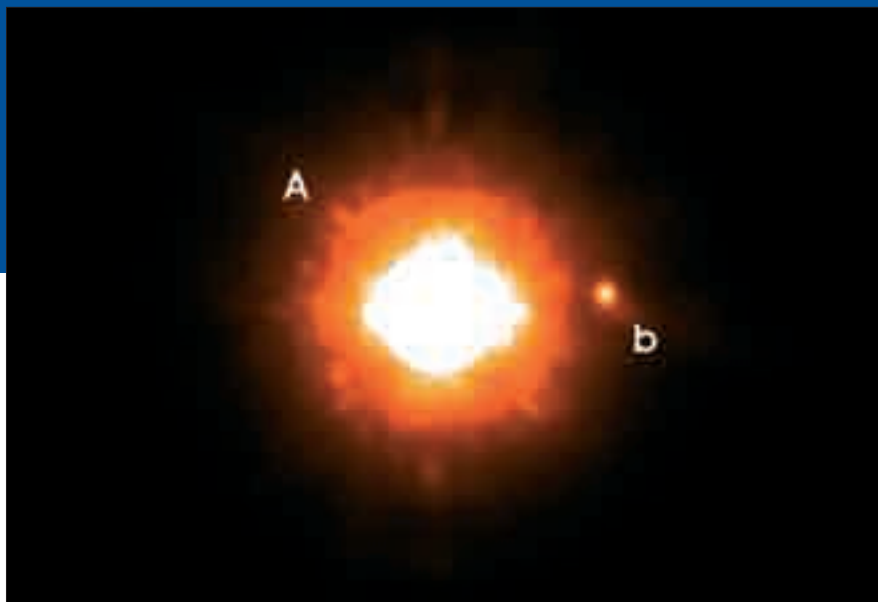


Figura 52.3. Hallazgo. Esta es la primera imagen de un planeta extrasolar, obtenida con el telescopio VLT. La "a" corresponde a la estrella, GQ Lupi, y la "b" a su pequeño compañero. Fuente: ESO/VLT.

### ¿Vivimos solos en el Universo?

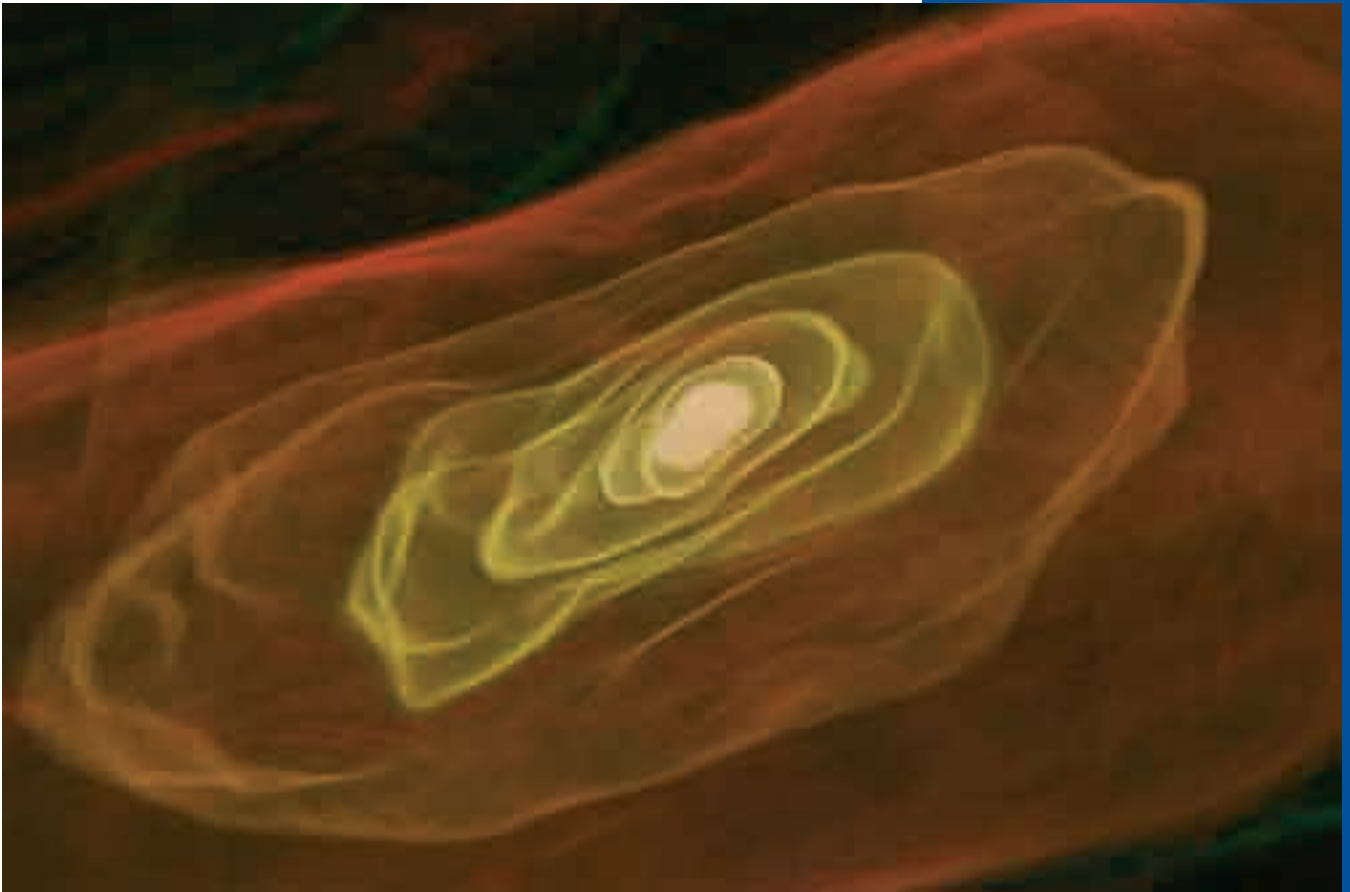
En los últimos años se han descubierto alrededor de 150 planetas extrasolares en la vecindad del Sol. Recientemente se ha obtenido incluso la primera imagen directa de alguno de ellos utilizando óptica adaptativa en uno de los telescopios del VLT (Very Large Telescope; es una gran instalación telescópica formada por cuatro telescopios de 8,2 metros situados en Cerro Paranal, Chile). El objetivo de los astrofísicos en los próximos años consiste en la búsqueda de indicios de actividad biológica en alguno de ellos.

### ¿Qué causó la inflación cosmológica?

En los primeros momentos después del Big Bang y en un tiempo cortísimo, el Universo se expandió de forma exponencial. En  $10^{-32}$  segundos el Universo se expandió en un factor  $10^{60}$  (lo que podría equivaler a que un guisante alcanzara el tamaño de una galaxia en un instante). Como ya se describió en esta serie de artículos, este fenómeno se conoce como la teoría inflacionaria del origen del Universo. El interrogante sobre qué produjo esta expansión exponencial sigue abierto.

### ¿Cuándo y cómo se formaron las primeras estrellas y galaxias?

Uno de los descubrimientos más impactantes de la astronomía en los últimos dos años ha sido el de que en el Universo temprano ya existían grandes cantidades de gas molecular, que eventualmente



podrían formar nuevas generaciones de estrellas. Este descubrimiento se realizó estudiando la galaxia J1148+5251, que se formó cuando el Universo tenía una edad de 870 millones de años, una edad muy corta en relación a la edad actual estimada para el Universo (13.700

millones de años). Las observaciones detectaron la presencia de grandes masas de gas molecular (monóxido de carbono, CO), equivalentes a las que encontramos en las galaxias gigantes hoy en día. Estos átomos de carbono y oxígeno se generaron necesariamente en algunas de las

Figura 52.4. Primeras estrellas. Modelo generado por ordenador que muestra una etapa en la formación de las primeras estrellas, treinta veces mayores que el Sol. Fuente: NASA.

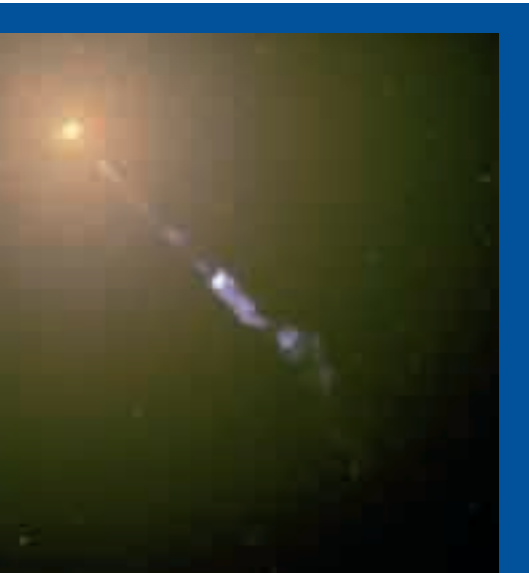


Figura 52.5. Chorro. La radiogalaxia M87 muestra un chorro de materia que parte del núcleo y que se extiende a lo largo de miles de años luz de distancia. Fuente: HST.

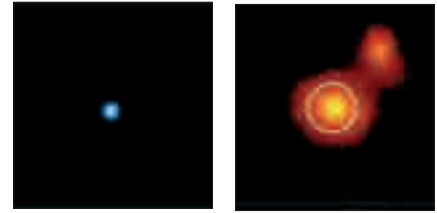
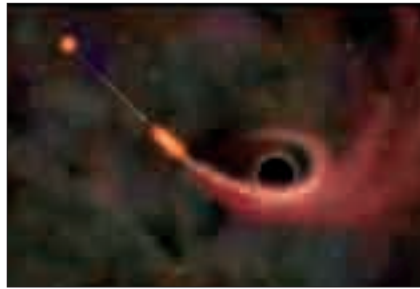


Figura 52.6. Despedazada. Esta composición muestra cómo la fuerza gravitatoria de un agujero negro atrae y destruye una estrella cercana. A la derecha, imágenes en rayos x y el óptico del fenómeno. Fuente: NASA/ESO.

primeras estrellas que se formaron, tan sólo unos 650 millones de años después del Big Bang. Algunas de ellas explotaron como supernovas en los siguientes 200 millones de años y enriquecieron el medio de carbono y oxígeno. Este descubrimiento ha suscitado nuevos interrogantes sobre la naturaleza de las primeras estrellas y sobre cómo se formaron las primeras galaxias.

### ¿De dónde obtienen su energía los chorros que emanan de los cuásares y los núcleos activos de galaxias?

Los chorros relativistas presentes en los cuásares y núcleos activos de galaxias son los aceleradores de partículas más eficientes del Universo, pues aceleran

las partículas relativistas hasta distancias de varios kilopársec. Gracias a las técnicas radiointerferométricas, se dispone de imágenes de alta resolución angular de estos chorros. Sin embargo, no están claros todavía los procesos físicos involucrados en la formación, colimación y aceleración de los chorros hasta velocidades relativistas (próximas a la velocidad de la luz); ni siquiera se conocen con certeza los procesos físicos que originan la actividad en galaxias.

### ¿Cuál es la naturaleza de los agujeros negros?

La comprensión de la naturaleza, formación y evolución de los agujeros negros es un reto abierto. Con el descubrimiento de los núcleos activos de galaxias surgió la necesidad de encontrar un mecanismo de emisión que fuera capaz de liberar la cantidad

tan enorme de energía que producen estos objetos. Se encontró que esa energía debería tener un origen gravitatorio, siendo producida por un objeto muy masivo como pudieran ser estrellas supermasivas, cúmulos estelares o agujeros negros. Diversos indicios experimentales favorecen la hipótesis de que en el interior de las galaxias activas hay un agujero negro muy masivo (del orden de 1.000 millones de veces la masa del Sol). La enorme fuerza gravitatoria que ejercen estos agujeros negros atrae el gas y las estrellas de las inmediaciones, que son materialmente “trituras” por efectos de marea, formando el denominado disco de acrecimiento que está en rotación diferencial en torno al objeto masivo (la velocidad del gas aumenta conforme disminuye la distancia al agujero negro). El modelo de “agujero negro + disco de acrecimiento” es el más satisfactorio hoy en día para explicar las propiedades de los núcleos activos de galaxias, pero la naturaleza de los agujeros negros es todavía un enigma.

### ¿Cómo se forman los planetas?

La cuestión de cómo se unen pequeñas partículas de polvo, hielos y gas para formar un planeta, sin ser previamente devorados por el Sol, es un misterio. El descubrimiento de discos

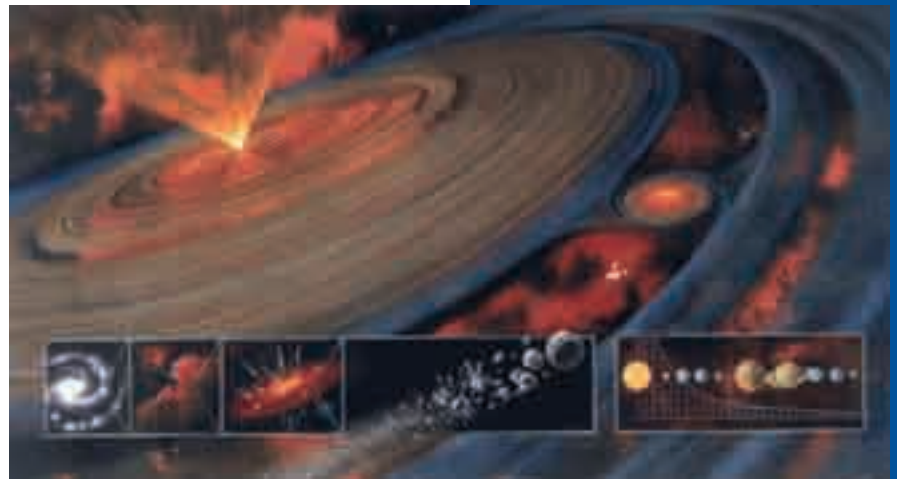


Figura 52.7. Evolución. Concepción artística que muestra un disco protoplanetario alrededor de una estrella joven, a partir del que se formarán los planetas.

protoplanetarios y de sistemas planetarios en otras estrellas está ayudando a abordar estas cuestiones. Por ejemplo, el año pasado se obtuvo la imagen más nítida obtenida hasta el momento de un disco de polvo alrededor de una estrella, que revelaba estructuras que indicaban la existencia de planetas en formación. Aunque no se puede ver directamente la imagen de los planetas, éstos revelan su presencia a través de su influencia gravitatoria, formando irregularidades, o grumos, en el mar de polvo que rodea la estrella. Hallazgos como éste permitirán, en un futuro, mejorar las teorías sobre la formación de sistemas planetarios y ahondar en el conocimiento de cómo se formó nuestro Sistema Solar.

Este libro terminó de imprimirse  
el día 17 de mayo de 2007 en los talleres  
de Cyan, Proyectos y Producciones Editoriales, S.A.



# Un viaje al Cosmos en 52 semanas

Hoy día existe tanta información en Internet que alguien que busque iniciarse en la astrofísica puede encontrarse perdido. Y ese interés de los ciudadanos por esta fascinante ciencia constituye, desde hace años, un importante desafío. Así, esta serie de artículos busca ofrecer una herramienta básica, completa y rigurosa, que bien pueda establecer las bases de una futura profundización. Por ello hemos tratado de abarcar el mayor número posible de temas, desde el Sistema Solar hasta el origen del Universo, pasando por la vida de las estrellas y la interacción de las galaxias, entre otros, siempre combinando los conceptos fundamentales con pinceladas sobre la investigación astronómica más actual. Todos ellos coordinados por científicos expertos y redactados con un lenguaje ameno y sencillo, acorde a las necesidades de cualquiera que, sin conocimientos previos, busque adentrarse en los secretos del Cosmos.



MINISTERIO  
DE EDUCACIÓN  
Y CIENCIA



ISBN: 978-84-00-08535-3



9 788400 085353