

COLECCIÓN **DIVULGACIÓN**

Claroscuro del Universo

MARIANO MOLES VILLAMATE
COORDINADOR



CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

Claroscuro del Universo



COLECCIÓN **DIVULGACIÓN**

Claroscuro del Universo

Mariano Moles Villamate (coord.)
Xavier Barcons Jáuregui
Narciso Benítez Lozano
Rosa Domínguez Tenreiro
Jordi Isern Vilaboy
Isabel Márquez Pérez
Vicent J. Martínez García
Rafael Rebolo López



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

© Mariano Moles Villamate (coord.), Xavier Barcons Jáuregui, Narciso Benítez Lozano, Rosa Domínguez Tenreiro, Jordi Isern Vilaboy, Isabel Márquez Pérez, Vicent J. Martínez García y Rafael Reboló López, 2007

Foto portada: NGC 602, región de formación estelar en la Nube Pequeña de Magallanes, tomada por el *Hubble Space Telescope*.

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: 978-84-00-08536-0

NIPO: 653-07-036-0

Depósito legal: M-32.450-2007

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

Índice

Agradecimientos	7
Sobre los autores	9
Introducción	13
1. Las estrellas, fábricas de luz y generadores químicos	19
1.1. Las propiedades de las estrellas. El diagrama HR	21
1.2. La física de las estrellas. El origen de la luminosidad	24
1.3. Nacimiento y vida de las estrellas. Reacciones nucleares	25
1.4. Últimas etapas de la evolución estelar	33
1.5. La química de las estrellas. La producción de elementos	38
2. El mundo de las galaxias	41
2.1. Tipos de galaxias. El diapasón de Hubble	43
2.2. Las fuentes nucleares de luz no estelar	50
2.3. Dinámica de galaxias. La masa oculta de las galaxias	52
2.4. Formación y evolución de las galaxias	55

3. Más allá de las galaxias. El Universo a gran escala	61
3.1. La vecindad de nuestra Galaxia. El Grupo Local	62
3.2. Cúmulos de galaxias. Poblaciones galácticas y la influencia del entorno	66
3.3. Masa de los cúmulos. Cómo pesar lo invisible	67
3.4. El Universo a gran escala	75
4. La Cosmología entra en escena	85
4.1. El reino de la Cosmología	87
4.2. Los parámetros cosmológicos	91
4.3. Cosmología física. Geometría y observaciones	92
4.4. El Universo evolutivo	94
Epílogo. A modo de conclusiones	107

Agradecimientos

La investigación que desarrolla cada uno de los colaboradores de este opúsculo tiene el soporte y la financiación del Ministerio de Educación y Ciencia, a través de los Programas Nacionales de Astronomía y Astrofísica y del Espacio. Cuentan también con la financiación y ayuda de los programas de investigación de sus respectivas comunidades autónomas, concretamente la Generalitat de Cataluña, la Generalitat de Valencia, la Junta de Andalucía, la Junta de Canarias, el Gobierno de la Comunidad de Madrid y el Gobierno de Cantabria.

Agradecemos el esfuerzo de los integrantes del Observatori de l'Universitat de València por disponer de imágenes e ilustraciones de calidad adecuada.

Queremos agradecer también a Susana Asensio por su trabajo y por su paciencia, digna del mejor de los astrónomos.

El contenido de esta publicación pretende ser una recopilación estructurada de los avances que han producido la Astrofísica y la Cosmología en los últimos dos decenios. Son varios centenares los astrónomos de todo el mundo que dedican su esfuerzo a esta disciplina, a los que se vienen sumando físicos de otras especialidades, atraídos por la precisión y sentido físico que los primeros han sido capaces de dar a su trabajo. Y son muchos más los que, con sus elaboraciones y puntos de vista, intervienen también en los debates que se suscitan. Tratándose de un trabajo de presentación general, hemos considerado innecesario dar las referencias precisas a todos los trabajos específicos que han contribuido a dibujar el panorama que hemos descrito. De la misma forma, no hemos incluido referencias a trabajos, discusiones y conversaciones con colegas que han contribuido, sin duda, a configurar nuestras opiniones.

Sobre los autores



Mariano Moles Villamate es profesor de Investigación del CSIC, en el Instituto de Astrofísica de Andalucía. Doctor en Ciencias por la Universidad de París. Sus campos de trabajo son la Astronomía Extragaláctica y la Cosmología. Fue co-director del Observatorio de Calar Alto y director del IAA. Ha sido coordinador del área de Física y Ciencias del Espacio de la ANEP. Ha recibido en 2007 el Premio de Investigación en Ciencias Experimentales de la Junta de Andalucía, Premio “Maimónides”.



Xavier Barcons es profesor de investigación en el Instituto de Física de Cantabria. Trabaja en Astronomía con rayos X, particularmente en agujeros negros masivos y galaxias activas. Ha sido asesor científico de la Agencia Europea del Espacio (ESA) (2001-2005), gestor del Programa Nacional de Astronomía y Astrofísica (2004-2006) y en la actualidad encabeza la delegación española en el Observatorio Europeo del Sur (ESO).



Narciso Benítez. Nacido en Barakaldo (Vizcaya) en 1968. Recibió un máster en Física y Matemáticas con honores por la Universidad Estatal de Moscú “Lomonósov”. Doctorado en Física por la Universidad de Cantabria, y becario postdoctoral en la Universidad de California en Berkeley. Ha trabajado como investigador científico en la Universidad Johns Hopkins de Baltimore, formando parte del proyecto de la Advanced Camera for Surveys instalada en el Telescopio Espacial Hubble, y desde 2004 en el Instituto de Astrofísica de Andalucía. En la actualidad es investigador Científico del CSIC en el Instituto de Matemáticas y Física Fundamental de Madrid.



Rosa Domínguez Tenreiro es catedrática de Astronomía y Astrofísica en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid. Doctora en Ciencias por las Universidades de París y Autónoma de Madrid, ha trabajado en diferentes campos, particularmente en Astropartículas, Cosmología y Astrofísica Extragaláctica. En la actualidad su trabajo se centra en el estudio de la formación y evolución de galaxias en un contexto cosmológico mediante simulaciones numéricas, y su comparación con datos observacionales.



Jordi Isern es profesor de Investigación del CSIC y director del Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC)/Institut d'Estudis Espacials de Catalunya. Es doctor en Física por la Universidad de Barcelona. Sus campos de trabajo son: Astrofísica Nuclear y de Altas Energías (explosiones de supernova, nucleosíntesis y emisión gamma) y Evolución Estelar (enfriamiento de estrellas enanas blancas y sus propiedades como población fósil de la Galaxia).



Isabel Márquez Pérez es científica titular del CSIC desde 2003, investiga en el departamento de Astronomía Extragaláctica del Instituto de Astrofísica de Andalucía (Granada). Se dedica fundamentalmente al estudio de la actividad nuclear en galaxias de distintos tipos y en diferentes entornos. Miembro de la Unión Astronómica Internacional, forma parte del panel de expertos de la Comunidad Europea y del Comité de Asignación de Tiempos del Observatorio de Calar Alto.



Vicent J. Martínez. Nacido en Valencia en 1962, licenciado en Matemáticas por la Universidad de Valencia, doctor. Realizó su tesis doctoral en el Instituto Nórdico de Física Atómica (Nordita). Profesor titular de Astronomía y Astrofísica en la Universidad de Valencia. Desde el año 2000 es el director del Observatorio Astronómico de la Universidad de Valencia. Sus trabajos de investigación están fundamentalmente dedicados al estudio de las galaxias y de la estructura del Universo a gran escala, siendo uno de los científicos pioneros en la aplicación de los fractales en este campo. Es autor de dos libros de texto de nivel universitario. En el año 2005 obtuvo el Premio de Divulgación Científica “Estudi General” por su obra *Marineros que surcan los cielos*.



Rafael Rebolo López es profesor de Investigación del CSIC en el Instituto de Astrofísica de Canarias. Ha llevado a cabo diversas investigaciones sobre el origen de los elementos químicos, el Fondo Cósmico de Microondas, estrellas de baja masa, enanas marrones y exoplanetas. Ha sido responsable del Área de Investigación del IAC.

Introducción

*En efecto, las cosas que aparecen nos hacen
vislumbrar las cosas no-patentes.*
Anaxágoras

La luz, si se nos admite usar esta denominación para la radiación electromagnética en todo el rango del espectro, es la señal que nos llega del Universo. La luz, parafraseando a Galileo, es la mensajera celestial que nos aporta la información sobre los astros, sus propiedades y sus vicisitudes.

Desde las observaciones visuales sin ayuda instrumental, hasta las más recientes capaces de explorar todo aquel rango, desde las ondas de radio hasta los rayos γ más energéticos, las observaciones astronómicas han consistido en coleccionar primero y analizar después esa luz, débil, que nos llega de las estrellas. Aun sólo con las observaciones visuales, y valiéndose de instrumentos de medida de ángulos, la Astronomía de posición consiguió elaborar un panorama completo de los planetas y sus movimientos, y describir el Universo tal y como entonces se percibía. La entrada en escena del telescopio constituyó una extraordinaria revolución que supuso poner un nuevo Universo, infinitamente más vasto y rico que el anterior, a disposición de la ciencia que estaba emergiendo. Maravillado, Galileo abre su *Sidereus Nuncius* en 1610 con un *Avviso Astronomico* en el que dice al lector:

*Verdaderamente grandes son las cosas que propongo en este breve tratado a la
visión y a la contemplación de los estudiosos de la naturaleza. Grandes, digo, ya*

*sea por la excelencia del tema por sí mismo, ya sea por su novedad jamás oída en todo el tiempo transcurrido, ya sea incluso por el instrumento, gracias al cual aquellas mismas cosas se han hecho manifiestas a nuestros sentidos.*¹

F. Brunetti, Galileo, *Opere. I. Sidereus Nuncius*

El libro nos relata el descubrimiento de los *planetas mediceos*, que así llama su descubridor a los cuatro satélites mayores de Júpiter. Y las observaciones de la Luna, de las estrellas fijas y de la Vía Láctea. Con las revoluciones de los mediceos alrededor de Júpiter, profusamente ilustrada por Galileo en su obra, queda afirmado de manera rotunda el sistema copernicano, y con la actitud metodológica de Galileo se cimenta la Ciencia moderna. A partir de ese momento, el firmamento se convierte en fuente inagotable de descubrimientos y sorpresas. La aplicación, dos siglos más tarde, de la naciente espectroscopia al análisis de la luz estelar abrirá el camino de la Astrofísica y, con él, el de la comprensión de los fenómenos que se observan en el cielo.

Mientras, Newton enunció su ley universal de la gravitación en 1687. Universal porque rige para todos los cuerpos, en la tierra y en los cielos. Se comprenden los movimientos de los planetas y se predicen sus posiciones. La confianza en su capacidad es total y, por un método en cierto modo análogo al que después nos ha permitido llegar a los conceptos que hoy maneja la Cosmología, se predice la existencia de otros planetas: las perturbaciones observadas en los movimientos de planetas conocidos con respecto a las predicciones de la teoría conducen a concluir que existen otros cuerpos aún no identificados que las causan. Incluso, se anticipa dónde deben encontrarse, y las observaciones consagran de manera indisputable la veracidad de la teoría. La luz reflejada por los planetas conocidos había conducido a reconocer la existencia y a descubrir nuevos planetas, que habían permanecido *ocultos* hasta entonces.

Ése era el Universo para los científicos hasta comenzado el siglo XX. Los planetas con sus satélites, orbitando alrededor del Sol, y las estrellas, conformando, junto con nebulosas de diferentes formas y aspecto, la Vía Láctea. Nuestra Galaxia era, para los científicos de esas épocas, todo el Universo. La entrada en escena de nuevos y más poderosos telescopios en las primeras décadas de 1900, como antes

1. *Grandi invero sono le cose che in questo breve trattato io propongo alla visione e alla contemplazione degli studiosi de la natura. Grandi, dico, sia per l'eccellenza della materia per sé stessa, sia per la novità loro non mai udita in tutti i tempi trascorsi, sia anche per lo strumento, in virtù del quale quelle cose medesime si sono rese manifeste al senso nostro.*

con el telescopio de Galileo, iba a cambiar de manera extraordinaria nuestra percepción del Universo.

Resulta ya muy conocido el largo debate sobre la existencia de galaxias exteriores como para ni siquiera tener que resumirlo aquí. El hecho es que ese debate quedó cerrado con los datos aportados por Hubble sobre las distancias a algunas de las nebulosas conocidas, Andrómeda entre ellas. Quedaba fuera de toda duda que esas distancias eran mucho mayores que el tamaño admitido para nuestra Galaxia y, por lo tanto, se trataba de nuevos sistemas, similares al nuestro y, en algunos casos, incluso mayores que la Vía Láctea. Acababa de descubrirse *el mundo de las galaxias*, con sus formas características, poblando el Universo en cualquier dirección que se observase. De pronto, el Universo físico se había convertido en un enjambre poblado por un inmenso número de galaxias diversas en formas, tamaños y luminosidades. El cambio que supuso ese descubrimiento fue fenomenal: si nuestra Galaxia tiene un tamaño aproximado de 100.000 años luz, Andrómeda, la más próxima visible desde el Hemisferio Norte, se encuentra a más de 2.000.000 de años luz. Había ya que usar un gran múltiplo de la unidad parsec (equivalente a 3,28 años luz), el Mpc, para hablar de las distancias de las galaxias.

A partir de ese momento, podemos comenzar a hablar de Cosmología en el sentido moderno de la palabra. La revolución cosmológica que se produce tiene, por otro lado, un nuevo soporte teórico necesario: la Teoría de la Relatividad General de Einstein de 1905, una nueva formulación de la teoría de la gravedad, que contiene y supera a la de Newton. La conjunción de ambos descubrimientos hará posible el florecimiento que hoy conocemos.

El avance, en materia de Cosmología, será sin embargo lento. Los datos se toman con dificultad debido a la poca sensibilidad de los detectores usados hasta tiempos relativamente recientes. De modo que la acumulación de información, necesaria para poder extraer conclusiones fiables, es muy costosa. Es por ello de resaltar el golpe de genio que supone el hallazgo por el mismo Hubble de la ley que lleva su nombre, y que nos dice que la distancia a la que se halla una galaxia está en relación directa con el desplazamiento hacia mayores longitudes de onda (de ahí el nombre de *desplazamiento hacia el rojo*) de sus líneas espectrales. Y que esa relación es de simple proporcionalidad cuando esas galaxias no están demasiado lejos.

La *ley de Hubble* se constituye en la piedra angular de la Cosmología actual. Su interpretación en términos de *expansión del Universo* nos proporciona una visión estructurada y evolutiva del mismo, descrita por modelos extraídos de la Relatividad General de Einstein. El problema a resolver está bien formulado y, por tanto, se trataría *solamente* de encontrar, con las observaciones, los valores de los parámetros

que particularizan el modelo de Universo que mejor se ajusta de entre todos los que ofrece la teoría.

En ese recorrido de décadas hacia la determinación de esos parámetros, el progreso en el conocimiento astrofísico ha sido extraordinario. Y, con el conocimiento, han ido viniendo las sorpresas. Nuestra guía sigue siendo el análisis de la luz que nos llega de los astros, pero lo visible muy pronto apuntó hacia lo que no veíamos. Así, desde los primeros análisis, la dinámica de los cúmulos de galaxias ya indicaba claramente la presencia de materia que, si bien no veíamos, se manifestaba por su acción gravitatoria. Como en el caso de Neptuno, o de la compañera de Sirio, su presencia no había sido delatada por su propio brillo, sino por su efecto en los movimientos de los cuerpos que forman parte del mismo sistema. Sólo que ahora, como se iría poniendo de manifiesto poco a poco, juntando argumentos diferentes, esa materia no estaba simplemente oculta (como se le llamó en un principio), sino que resultaba ser de una naturaleza diferente a la que constituyen las estrellas, los planetas o a nosotros mismos. Aparecía en escena la *materia oscura*.

Los argumentos sobre su existencia y características básicas se han ido multiplicando con los años, aunque sigue sin haber sido caracterizada. Podemos decir, salvo que consideremos errónea la teoría gravitatoria actual, que ha sido ya descubierta, puesto que sus efectos están medidos. Pero no sabemos cuál es su naturaleza y propiedades, lo que está motivando importantes esfuerzos observacionales en la confluencia entre la Física de partículas y la Astrofísica.

La estructura básica del Universo, la métrica del espacio-tiempo, se ha ido determinando paulatinamente, usando fuentes cada vez más lejanas, que permiten una mejor separación entre las predicciones de los diferentes modelos. Y con la capacidad de medidas cada vez más precisas ha llegado la segunda gran sorpresa: *la expansión del Universo es acelerada*. Dado que la presencia de materia y energía, cualesquiera que sean sus naturalezas, sólo puede frenar la expansión por sus efectos gravitatorios, se deduce que debe haber una nueva componente, que se comporte de manera diferente, que sea responsable de esa aceleración de la expansión.

Una componente de ese tipo fue ya incluida por Einstein en su teoría, no en su primera formulación, pero sí cuando elaboró el primer modelo cosmológico y quiso darle estabilidad: la *constante cosmológica*. No tuvo buena prensa al principio, precisamente por haber sido introducida *ad hoc* para salvar el modelo estático, lo que significó, de hecho, el retraso en la admisión de los primeros modelos evolutivos de Friedman. Pero no desapareció nunca completamente de la escena cosmológica, ya que se recurrió a ella en varias ocasiones para conseguir que la edad del Universo-

modelo no fuese inferior a la del Universo-real, indicada por sistemas reconocidos como muy viejos, tales como los cúmulos globulares. Pero su estatus como ingrediente necesario para comprender los datos disponibles, que apuntan a que la expansión es acelerada, es relativamente reciente. Con un añadido, y es que, en el lado teórico, aun manteniendo la posibilidad de que sea una constante de la teoría, se ha ensanchado el concepto para abarcar la posibilidad de que se trate de una entidad física, totalmente desconocida por el momento, que también evolucione con el tiempo. Estamos hablando de la *energía oscura*.

Entre los triunfos de la Cosmología actual, convertida en herramienta fundamental para determinar los diferentes parámetros cosmológicos, está sin duda la predicción y descubrimiento de la *radiación cósmica de fondo*. Esa radiación, que producía un extraño ruido en la antena que estaban caracterizando Penzias y Wilson, se ha revelado como una componente cosmológica, la más homogénea e isótropa del Universo, que nos informa de una época remota en la que el Universo estaba mucho menos diferenciado y estructurado que ahora. El análisis de sus propiedades y de sus minúsculas irregularidades ha abierto un auténtico camino real por el que nuestro conocimiento cosmológico dará, sin duda, un gran salto adelante. Junto con las otras componentes de la disciplina, está haciendo posible el conocimiento del Universo con una precisión y detalle inimaginables hace tan sólo unos años. Conocimiento que, no sería de extrañar, nos llevará a nuevas sorpresas y nuevos retos que constituirán los objetivos de la Cosmología inmediatamente futura.

No sin cierta ironía, presentida desde muy antiguo, el hilo de la luz que nos llega del cielo nos ha ido conduciendo hacia la evidencia de que, finalmente, esa parte luminosa del Universo no sería sino una minúscula fracción de su contenido total. Contenido que, por ahora, sólo hemos sido capaces de nombrar como materia y energía oscuras, y a cuyo desvelamiento se están orientando grandes esfuerzos coordinados tanto en el dominio observacional como en el teórico. Pequeña parte sí, pero como el hilo de Ariadna, imprescindible para salir de este hermoso laberinto al que el desarrollo de la Astrofísica y la Cosmología en las últimas décadas nos ha conducido. Y que nos llevará, como no puede ser de otra forma, a un nivel superior de comprensión del Universo y de los astros.

Como se dice en un informe reciente sobre la necesidad de coordinar esfuerzos para abordar el estudio de la energía oscura:

La aceleración del Universo es, junto con la materia oscura, el fenómeno observado que de forma más directa demuestra que nuestras teorías de partículas

*elementales y gravedad son incorrectas o incompletas. La mayoría de los expertos cree que se necesita nada menos que una revolución en la manera en que comprendemos la física fundamental para entender plenamente la aceleración cósmica.*²

Albrecht *et al.*, *Report of the Dark Energy Task Force*, Abstract, 2006,
astro-ph/0609501

Es fácil también comprender por qué la revista *Science*, al listar los 100 problemas más interesantes de la Ciencia, pone el de la energía oscura en primer lugar. Si la Ciencia avanza sobre todo cuando se plantean nuevos problemas fundamentales, no cabe duda de que la Astrofísica y la Cosmología han hecho una aportación extraordinaria, desafiando a la Física a resolver los problemas que la paciente acumulación de datos y elaboraciones ha planteado.

MARIANO MOLES VILLAMATE
Coordinador

2. *The acceleration of the universe is, along with dark matter, the observed phenomenon that most directly demonstrates that our theories of fundamental particles and gravity are either incorrect or incomplete. Most experts believe that nothing short of a revolution in our understanding of Fundamental Physics will be required to achieve a full understanding of the cosmic acceleration*

1. Las estrellas, fábricas de luz y generadores químicos

Qué sería de la humanidad si no fuera por la débil luz que nos llega de las estrellas.

Jean Perrin

La ruptura aristotélica de la unidad del Universo y su visión dual con el mundo sublunar habitado por los humanos, efímero, corruptible, impuro y variable, con una atmósfera llena de cometas, meteoros y auroras, y el mundo astral, eterno, puro y armonioso, ocupado por el Sol, el astro perfecto e inmaculado, los planetas y las estrellas fijas, dominó durante siglos en la civilización occidental. Cada uno de estos planetas ocupaba una esfera y las estrellas ocupaban la octava y última, todas con el centro en la Tierra.

Esta concepción aristotélica estalló definitivamente cuando Tycho Brahe descubrió, el 11 de noviembre de 1572,

la presencia de una nueva estrella en la constelación de Casiopea. Esta *nova stella* apareció súbitamente en el firmamento, se debilitó gradualmente con el transcurso de los días y meses y, finalmente, desapareció. Durante todo este proceso, su posición con respecto a las estrellas fijas permaneció invariable, por lo que debía moverse en los mismos círculos perfectos que seguían las demás, lo que demostraba que era un miembro de pleno derecho de la octava esfera. La conclusión inevitable era que las estrellas están sujetas a las mismas imperfecciones que los habitantes del mundo sublunar, de modo que quedaba demostrado que no había dos mundos cualitativamente distintos, sino que todos eran uno.

Por entonces Copérnico ya había planteado la teoría heliocéntrica y la

cadena de sucesos que se produjeron a continuación es sobradamente conocida. Kepler, después de analizar las observaciones de los planetas realizadas por Tycho, descubrió las leyes del movimiento planetario alrededor del Sol, el nuevo centro. Galileo inventó el primer telescopio y demostró por primera vez que la Luna tenía montañas y lo que él llamó mares, que Júpiter se comportaba como un sistema planetario en miniatura y que el Sol, el astro perfecto, tenía manchas. Finalmente, Newton descubrió, con la ley universal de la gravitación, el mecanismo que controla el movimiento de los astros. Como consecuencia de estas ideas, durante muchos años hasta bien entrado el siglo XX, prevaleció la idea de un Universo ilimitado y lleno de estrellas, regido por las leyes armoniosas de la mecánica celeste.

La introducción de las técnicas espectroscópicas permitió a Fraunhofer obtener en 1814 el primer espectro solar. Lo que, junto con los trabajos posteriores de los físicos espectroscopistas, permitió demostrar que el Sol es una esfera autogravitante de gases incandescentes, con una temperatura superficial de 5.780 K, y con los mismos elementos químicos que se encuentran en la Tierra. Con la salvedad, como es bien sabido, del helio, elemento que era desconocido en la Tierra y que se descubrió por primera vez en el espectro solar, de ahí su

nombre. El continuo perfeccionamiento de los telescopios permitió demostrar también que las estrellas eran astros similares al Sol, lo que planteó de inmediato una cuestión fundamental: si las estrellas son simples esferas de gas incandescente, debían tener una vida finita, es decir, debían nacer y debían morir. La pregunta era pues ¿cómo nacen y cómo mueren las estrellas? Los indicios sobre la muerte de las estrellas pronto se hicieron evidentes, pero no ocurrió lo mismo con los indicios sobre su nacimiento.

Paradójicamente, lo que se había bautizado como estrellas nuevas correspondía en realidad a etapas tardías y aun finales de la evolución de las estrellas, como iba a verse posteriormente. En efecto, a finales del siglo XIX ya se sabía que las nuevas estrellas de Tycho o *novas* no eran astros que acabaran de nacer, sino que eran objetos ya existentes que experimentaban un aumento brusco de su luminosidad, de hasta 60.000 veces el valor inicial, para ir después recuperando paulatinamente su brillo normal. Pronto se vio, sin embargo, que entre las *novas* existía una variedad asociada a las nebulosas espirales que alcanzaban máximos de luminosidad muy superiores a lo habitual. El caso más significativo fue el de la catalogada como *S Andromedae*, descubierta en 1885 en la nebulosa espiral de Andrómeda o M31 (por aquel entonces

todavía no se sabía que M31 era una galaxia), que alcanzó una magnitud visual de seis, es decir, el límite de detección a simple vista. A finales de 1920, cuando se revisó la escala de distancias, se vio que las nebulosas espirales estaban muy alejadas de nosotros y que cada una de ellas era, en realidad, una inmensa aglomeración de estrellas. Es decir, de pronto se descubrió que las estrellas formaban grandes islas bien diferenciadas —las galaxias— separadas por centenares de miles o incluso millones de años luz. Esto significaba que las *novas extragalácticas* debían ser extremadamente brillantes y claramente distintas a las *novas* habituales. En el año 1933, Baade y Zwicky propusieron llamarlas *super-novas*. Pronto vieron que el fenómeno debía estar relacionado con la muerte de las estrellas, pues durante una erupción de estas características se expulsaban gases a velocidades de entre 5.000 y 10.000 km/s, por lo que un simple cálculo mostraba que la energía implicada era del orden de 10^{51} ergios y la masa expulsada claramente superior a la del Sol. Ante estas evidencias, propusieron eliminar el guión y denominarlas *supernovas*, para enfatizar que se trata de un fenómeno con entidad propia y no una simple variedad de *novas*.

Las nebulosas planetarias proporcionan el segundo ejemplo del proceso de acabamiento estelar. Se

llaman así porque se veían como pequeños objetos extensos, como si fuesen planetas, con los telescopios de los siglos pasados. Las primeras fotografías ya revelaron la gran belleza de estos astros que están constituidos por anillos de gases (en imágenes de gran resolución y sensibilidad se aprecia que tienen una estructura mucho más compleja), que se expanden a una velocidad de entre 10 y 30 km/s. En el centro del anillo se encuentra una estrella muy brillante y caliente, de pequeño diámetro. La teoría de la evolución estelar nos permite comprender que se trata de una fase tardía de la evolución estelar en la que la estrella se hace inestable y expulsa una parte de sus capas que se convierten en ese anillo de gases, quedando la estrella *desnuda* en el centro. Los cálculos así lo indican, y nos muestran que la masa de los gases es comparable a la estrella central, lo que pone de manifiesto la violencia del fenómeno. También se conoce hoy que todo el proceso es relativamente rápido y que los gases se dispersarán en un tiempo muy corto, de unos 100.000 años.

Vislumbrar el nacimiento de las estrellas resultó mucho más difícil porque es mucho menos espectacular y manifiesto. Por razones físicas se llegó a la conclusión de que las estrellas nacen en el seno de nubes frías interestelares, en un proceso del que se conocen los

grandes rasgos, pero cuyos detalles son de gran complejidad. En efecto, en términos generales, una nube interestelar está sometida a dos fuerzas, la gravitatoria que tiende a concentrar la materia y las fuerzas de presión debidas a la agitación térmica de los átomos y moléculas del gas que tienden a dispersarla. Cuando la energía gravitatoria, que es negativa y depende de la masa y radio totales del sistema, supera en valor absoluto a la energía térmica, que depende de la temperatura y la masa total, es cuando se dice que empieza el proceso de nacimiento de una estrella. Esta circunstancia, conocida como condición de Jeans, indica que las estrellas deben nacer en el interior de regiones frías y densas, totalmente opacas a la radiación visible, y que solamente son observables con radiación infrarroja o radio, por lo que para encontrar pruebas observacionales del nacimiento de las estrellas se tuvo que esperar a que se desarrollaran los instrumentos y los métodos para operar a esas longitudes de onda.

Entre el nacimiento y la muerte se encuentra todo el proceso de la evolución estelar, que encierra y explica el misterio de la producción de energía luminosa en las estrellas y de su funcionamiento. Desentrañarlo ha significado uno de los grandes triunfos de la ciencia, que nos ha dado la posibilidad de entender cómo nacen, viven y mueren las estrellas. Y nos ha

permitido explicar las razones de las propiedades estelares que observamos, en sus detalles y variedad. Pero el primer paso necesario para llegar a esa teoría de la evolución estelar fue sin duda la acumulación de datos de observación de calidad y su sistematización y estudio. Por ahí vamos a comenzar.

1.1. Las propiedades de las estrellas. El diagrama HR

El dato primario que puede extraerse de la observación de las estrellas es el de su brillo o, más técnicamente, su luminosidad aparente. Más allá del brillo, la simple inspección visual del cielo nos permite distinguir entre el color azul-blanco de estrellas como Sirio y el rojizo de Betelgeuse. Esos colores de las estrellas, captados de tan simple manera, nos informan sobre sus características físicas básicas. Dicho de un modo algo más técnico, del uso de la información de la luminosidad de una estrella en dos o más bandas espectrales, se podrán sacar conclusiones sobre sus propiedades generales.

Antes de continuar debemos hacer un pequeño paréntesis para comprender las dificultades de la tarea. Para poder obtener información sobre las propiedades intrínsecas de un astro a partir de las observadas, es necesario

determinar su distancia. Bien sabido es que ése es un problema mayor en Astronomía, que sólo sabemos resolver con suficiente precisión para un pequeño número de casos. La manera de aplazarlo es considerar propiedades relativas entre diferentes estrellas (también se usa la misma técnica para el caso de galaxias) que pertenecen a una misma entidad, sea una asociación o un cúmulo estelar y que, por lo tanto, están a la misma distancia. De esta forma podemos estudiar las diferencias en propiedades y fase evolutiva de las estrellas, si bien, al final, habrá que calibrar la distancia de algunas de ellas, por lo menos, para así conocer las propiedades intrínsecas de todas las demás.

Dada la brevedad de la vida de la humanidad, no es posible seguir la vida de una estrella para identificar las diferentes fases evolutivas. De modo que será necesario caracterizar estrellas en diferentes fases y ordenarlas en el sentido evolutivo, sin esperar a poder presenciar todo el proceso. La herramienta observacional que permitió establecer la conexión evolutiva entre los distintos tipos de estrellas y captar sus fases es el llamado diagrama HR (figura 1.1). En el año 1910, los astrónomos Hertzsprung y Russell estudiaron la relación que existía entre la luminosidad de las estrellas, que es el dato primario, y sus colores. La razón está en que el color de una estrella es un

indicador de la cantidad relativa de energía que se emite en cada región espectral, que caracteriza su tipo espectral. Éste, a su vez, es un indicador directo de la temperatura superficial de la estrella, puesto que, en la medida en que una estrella se comporta en primera aproximación como un cuerpo negro, cuanto más azulado sea su brillo, mayor tiene que ser su temperatura superficial.

En principio podría esperarse que cualquier combinación de luminosidad y temperatura es posible, de modo que el plano luminosidad-color o diagrama HR debería estar poblado de manera más o menos uniforme. Sin embargo, los datos claramente demuestran lo contrario. La gran mayoría de las estrellas se encuentra situada sobre una banda relativamente estrecha, denominada *Secuencia Principal* (ver figura 1.1), que va desde valores de alta luminosidad y temperatura superficial muy elevada, que corresponden a las estrellas llamadas gigantes azules, hasta los de baja luminosidad y temperatura superficial muy baja, que corresponden a las llamadas estrellas enanas rojas. En la zona central de esa Secuencia se encuentra el Sol, de color amarillo, con una luminosidad moderada y una temperatura superficial próxima a los 6.000 grados, como ya dijimos. Además de nuestro Sol, estrellas como Beta Centauri, Spica, Bellatrix, Vega, Sirio, Proción o α -Centauri, pertenecen también a la Secuencia Principal, como

se ilustra en la figura 1.1. En esa figura también se señalan las líneas de radio constante. Está claro que la luminosidad de una estrella va a depender de la temperatura y de la superficie radiante, es decir, del tamaño. De modo que de dos estrellas con la misma temperatura, digamos Proción-B y Altair, la más luminosa es también la de mayor tamaño. Así, cuando hablamos de estrellas gigantes o enanas, nos estamos refiriendo tanto al radio como a la luminosidad.

Aunque la mayoría de las estrellas se sitúa en la Secuencia Principal, existen otras zonas del diagrama HR que están pobladas de estrellas. Así, no sólo hay estrellas amarillas o rojas en dicha Secuencia, sino que también aparecen formando agrupaciones menos pobladas que se hallan situadas por encima de ésta. Estas estrellas reciben el nombre genérico de *gigantes*, debido a que su radio es mucho mayor que el del Sol, tal como puede apreciarse en la figura 1.1. Ejemplos conocidos son: Aldebarán, Pólux y Arturo. También se aprecia en el diagrama una banda de estrellas de alta luminosidad que va del azul al rojo, las estrellas *supergigantes*, que son las más luminosas de todas. Como ejemplos podemos citar, entre las rojas a Betelgeuse, en Orión, que tiene un radio 400 veces mayor que el del Sol y una luminosidad 20.000 veces mayor, y entre las azules, puede citarse a Rigel, también en Orión, que tiene

un radio 100 veces superior al del Sol y una luminosidad 50.000 veces mayor.

Por último, existe una clase de estrellas situadas muy por debajo de la Secuencia Principal que se denominan *enanas blancas*, que se caracterizan por tener un radio muy pequeño y, en muchos casos, una temperatura superficial muy elevada. Sirio B es un buen ejemplo, pues tiene un radio similar al de la Tierra, una masa ligeramente superior a la del Sol y una temperatura superficial de casi 30.000 grados.

El diagrama HR es, como ya hemos dicho, la sistematización básica de los datos sobre estrellas para abordar los problemas teóricos de generación de energía y modos evolutivos. Un simple examen de ese diagrama nos muestra, además de la distribución de las estrellas solamente en zonas determinadas del mismo, otra característica básica: el número de estrellas que pueblan cada una de esas regiones es muy diferente. La más poblada de ellas, con gran diferencia, es la Secuencia Principal. De esta constatación básica se deduce, a

partir de consideraciones estadísticas elementales, que las estrellas pasan mucho más tiempo de sus vidas en esa región del diagrama que en cualquier otra y, por lo tanto, la etapa evolutiva a la que corresponde la Secuencia Principal es la más larga de todas. Algo que la teoría permitirá comprender en términos físicos.

Para poder convertir el diagrama HR observacional en otro equivalente, pero que contiene las propiedades intrínsecas de las estrellas, es necesario, como dijimos, medir las distancias a las estrellas. Los datos proporcionados por el satélite HIPARCOS han permitido extender las medidas directas de paralajes a numerosas estrellas, y el futuro GAIA lo extenderá a cientos de millones de estrellas. Sus datos permitirán construir la base de información intrínseca más extensa y definitiva. Cuando, además, las estrellas forman parte de un sistema estelar doble, se pueden medir parámetros de la órbita relativa y, bajo determinadas condiciones, su masa, otro de los datos básicos de difícil acceso. La

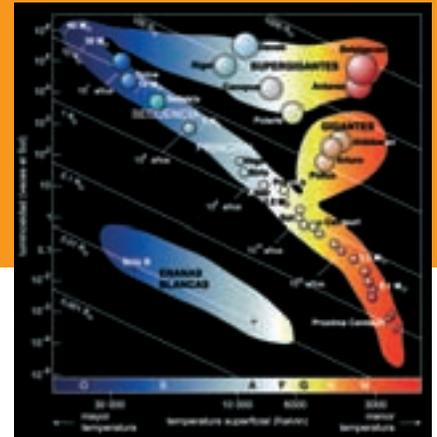


Figura 1.1. El diagrama HR muestra cómo se hallan distribuidas las estrellas en función de su brillo intrínseco y su temperatura superficial. En ordenadas se halla representada la luminosidad en escala logarítmica y en abscisas, la temperatura, ordenada de mayor a menor, o lo que es lo mismo, el tipo espectral o el color. Las líneas rectas representan dónde se hallan situadas aquellas estrellas que tienen radios iguales. Se han marcado las posiciones de algunas estrellas próximas en el diagrama HR para su identificación.

disponibilidad de datos de luminosidad intrínseca y masa estelar han permitido estudiar el tipo de relación entre estas dos características fundamentales. El resultado que se obtiene es que cuanto más masiva es una estrella de la Secuencia Principal, más luminosa es, de acuerdo con la ley que va con el cubo de la masa aproximadamente, $L \propto M^3$. Es decir, una estrella 10 veces más masiva que otra será 1.000 veces más brillante. De modo que la masa, que es

el combustible estelar como vamos a ver a continuación, se consume tanto más rápidamente cuanto más masiva (y luminosa) es una estrella. En otras palabras, las estrellas serán tanto más efímeras cuanto más masivas sean al nacer.

1.2. La física de las estrellas. El origen de la luminosidad

Las estrellas brillan. Ése es el hecho básico. Pero ¿cuál es el origen de esa luminosidad? La respuesta a esta simple pregunta planteó graves contradicciones en su momento y tuvo que esperar al desarrollo de la Física Cuántica para dar una respuesta satisfactoria. Pero vayamos por partes.

Las estrellas, como lo reveló la espectroscopia, son sistemas de gas a alta temperatura. Son sistemas autogravitantes (es decir, dominados por su propia gravedad), de forma aproximadamente esférica, que se encuentran en *equilibrio hidrostático*. Esto significa que la acción atractiva de las fuerzas gravitatorias es exactamente compensada por las fuerzas de presión, que tienden a disgregar la materia. En términos globales, esto se traduce (siempre y cuando las partículas de que está compuesta la estrella se muevan con una velocidad mucho menor que la de la luz) en que la energía térmica o interna (que refleja la agitación de esas

partículas) es igual en valor absoluto a la mitad de la energía gravitatoria. De tal modo que, cuando un sistema pasa de una configuración de equilibrio a otra, convierte la mitad de su energía gravitatoria en energía térmica y emite la otra mitad. Dicho de otra manera, si una estrella pierde energía (lo que ocurre necesariamente, pues está continuamente radiando luz), la compensa contrayéndose y aumentando su energía interna en una cantidad exactamente igual a la perdida.

Las consideraciones anteriores se derivan de teoremas generales de conservación que se aplican a sistemas mecánicos. Su aplicación al caso de las estrellas dio origen a una importante paradoja que desconcertó a los físicos de los siglos XIX y principios del XX, y que no se resolvió hasta finales del primer tercio de dicho siglo. La conclusión que de esos principios podía extraerse en el caso del Sol es que nuestra estrella sería más joven que la Tierra. Pero empezemos por el principio.

Para el Sol, de acuerdo con el teorema del virial, que refleja la condición de equilibrio global de un sistema dado, la energía gravitatoria es del orden de 4×10^{48} ergios y, por lo tanto, como venimos diciendo, su energía interna debe ser del mismo orden. Esa energía podría bastar para que el Sol pudiese brillar con la luminosidad actual (alrededor de

4×10^{33} ergios/s) durante unos 30 millones de años. Esta edad, conocida como la de Kelvin-Helmholtz, en honor de los primeros científicos que efectuaron este cálculo, sería por tanto su edad máxima posible. En cuanto a la Tierra, el primer intento científico conocido para determinar su edad se debe a Halley, quien supuso que los océanos habían sido inicialmente de agua dulce y que el aumento de la concentración de sal era debido al aporte de sales minerales por parte de los ríos y a la evaporación de los océanos. La edad que obtuvo para nuestro planeta era de entre 90 y 350 millones de años, por lo que, dadas las incertidumbres en los diferentes factores que intervienen en su estimación y la crudeza de las hipótesis, se consideraba que no estaba en contradicción flagrante con la edad estimada para el Sol. Hubo otros intentos similares de calcular la edad de la Tierra basados en las propiedades de los sedimentos, pero aunque todos ellos son capaces de proporcionar edades relativas muy precisas, fallan a la hora de dar edades absolutas. La contradicción se hizo manifiesta cuando el descubrimiento de las series radioactivas permitió a Rutherford y a Boltwood estimar con certeza que la edad de la Tierra era de unos cuantos miles de millones de años, más concretamente, de unos 4.300 millones de años, valor irrefutable a la luz de la nueva ciencia atómica y

nuclear. Ahora sí que la contradicción con la edad de Kelvin-Helmholtz para el Sol es flagrante y definitiva, por lo que para resolver la paradoja sólo cabían dos soluciones: o bien la Tierra era un objeto capturado por el Sol, con un origen totalmente independiente, o bien el Sol tenía otra fuente de energía.

Lo que se planteaba, en suma, era el problema del origen de la energía emitida por el Sol. Los cálculos anteriores demostraban que no podía ser de origen mecánico, y que había que buscar la respuesta en otros procesos que la naturaleza pudiera poner en juego. El camino para su descubrimiento lo inició, también aquí, Einstein con su Teoría Restringida de la Relatividad, formulada en los años 1905-1906. En ella se establece la equivalencia entre masa y energía, lo que abre la vía a nuevas formas, mucho más eficaces, de producir energía. Sobre esa base, y habiendo ya la nueva Mecánica Cuántica experimentado un desarrollo apreciable, Eddington pudo conjeturar en 1929 una nueva hipótesis sobre el origen de la energía radiada por el Sol. Un simple cálculo muestra que si el Sol pudiese convertir toda su masa en energía, podría brillar durante 14 mil millones de años al ritmo actual, duración en órdenes de magnitud superior a la que podía proporcionar la hipótesis del origen mecánico de esa energía.

Sobre esta más que prometedor base se desarrolló toda la teoría de la

estructura de las estrellas, hasta que en 1938 Bethe y von Weizsäcker, con el descubrimiento del mecanismo de *fusión termonuclear* y sus propiedades, que permite convertir el hidrógeno en helio, dieron la solución definitiva a la paradoja de la edad del Sol. La teoría establece que esa reacción tiene un rendimiento del 0,07% en masa, por lo que el Sol necesita quemar unos 5 millones de toneladas de hidrógeno por segundo para mantener su actual luminosidad. Los modelos evolutivos teóricos indican que, a ese ritmo, nuestra estrella tiene combustible para unos 5.500 millones de años más y que su edad actual es de 4.500 millones de años. Determinaciones en perfecto acuerdo con los datos más recientes y precisos obtenidos por la sonda SOHO de la Agencia Espacial Europea (ESA) que, usando técnicas similares a las sismológicas, ha podido medir la cantidad de helio acumulado en el centro y, a partir de ahí, deducir las edades citadas.

Quedaba definitivamente aclarado el enigma del origen de la energía emitida por el Sol y, por tanto, de las estrellas: el Sol y las estrellas son auténticos reactores nucleares de fusión. De esta forma no sólo quedaba resuelta la vieja paradoja de las edades, sino que se ponían las bases de la teoría de la evolución estelar, que nos ha permitido comprender las razones por las que diferentes estrellas tienen unas u otras

propiedades, cuáles deben ser las condiciones para que pueda formarse una estrella y, al final de su evolución, las diferentes formas en que pueden acabar su vida las estrellas.

1.3. Nacimiento y vida de las estrellas. Reacciones nucleares

Cuando una región dentro de una nube interestelar fría se desestabiliza, comienza a contraerse por efecto de las fuerzas gravitatorias, siempre atractivas. La contracción hace aumentar su energía gravitatoria y, en consecuencia, también aumenta la temperatura: la región en cuestión comienza a calentarse, a la par que pierde la misma cantidad de energía por radiación a través de su superficie, como ya hemos argumentado. Mientras el aumento correspondiente de presión en el interior de la nube es incapaz de equilibrar el efecto de la fuerza gravitatoria, el proceso de contracción y calentamiento de la nube continúa. Llega, sin embargo, un momento en que la temperatura central de la nube es tan alta que comienza a operar un nuevo proceso, la fusión termonuclear. Y el proceso de contracción se detiene. Se alcanza un estado de equilibrio global y decimos que acaba de nacer una estrella (figura 1.2). Apresurémonos a decir que las estrellas suelen nacer en pequeños grupos o muy



Figura 1.2. La Nebulosa Trífida o M20, así llamada porque las estructuras de polvo la dividen en tres lóbulos. Se halla situada en la constelación de Sagitario, a una distancia de 9.000 años luz. En esta imagen de una zona interior de la nebulosa, obtenida por el *Hubble Space Telescope*, se aprecian las nubes de gas y polvo dentro de las cuales se forman las estrellas. La emisión de la nebulosa se debe a una única estrella masiva y joven situada en el centro de la imagen. Se calcula que la edad de dicha estrella es de tan sólo 300.000 años.

grandes regiones, llamadas por eso de formación estelar, como puede verse en las figuras 1.3 y 1.4.

El inicio de las reacciones termonucleares es, sin embargo, un proceso físico relativamente complejo, que merece una breve explicación. Veamos pues cómo ocurre. A medida que la temperatura de la nube aumenta, los átomos que contiene van perdiendo sus electrones y se quedan los núcleos, formados, como es bien sabido, por protones y neutrones, desnudos. La materia llega a estar totalmente ionizada, de modo que esos núcleos son partículas cargadas eléctricamente, que



Figura 1.3. Nebulosa de Orión, número 42 del catálogo de Messier. Región de formación estelar, situada a unos 1.600 años luz. El gas y el polvo son calentados por el flujo luminoso de las estrellas recién formadas que contiene la nebulosa. El gas emite en las líneas del hidrógeno. Imagen tomada por el Dr. Birkle con la cámara Schmidt del CAHA. Cortesía del CAHA.

se repelen unas a otras por efecto de la interacción de Coulomb. Por otra parte, su estabilidad está garantizada por la llamada interacción fuerte, que opera entre protones y neutrones para mantenerlos unidos. A medida que la temperatura va aumentando, estas partículas estables que se repelen mutuamente adquieren cada vez mayores velocidades de agitación (recordemos que la temperatura es,

precisamente, una medida de esas velocidades), de modo que van aumentando las probabilidades de que, a pesar de esa repulsión, se produzcan, de vez en cuando, violentas colisiones entre ellas. No obstante, bajo condiciones normales de temperatura y densidad la violencia de la colisión no es suficiente para vencer la repulsión eléctrica y no llegan a fusionarse. Pero llega un momento en que, si la temperatura aumenta suficientemente, el número de partículas que tiene una energía suficiente para vencer la repulsión electrostática (llamada barrera de Coulomb) crece de manera notable y se inicia finalmente el proceso de fusión termonuclear, con la producción consiguiente de energía. La barrera de Coulomb será tanto más grande cuanto mayor sea la carga eléctrica de los núcleos que se fusionan, lo que significa que, para cada tipo de núcleo, habrá una temperatura determinada para que la fusión pueda comenzar. A partir de este simple esquema podemos trazar a grandes rasgos el proceso por el que nace una estrella, va generando energía



Figura 1.4. Región de formación estelar, denominada NGC 602 o N90, situada en la Nube Pequeña de Magallanes, galaxia satélite de nuestra Vía Láctea, situada a unos 200.000 años luz. La imagen, tomada por el *Hubble Space Telescope*, muestra un pequeño enjambre de estrellas azules, recién formadas, cuyo flujo luminoso y material está barriendo el material dentro del cual se formaron, y creando una especie de cavidad. Esta región de formación estelar está muy alejada de las partes centrales de la nube, por lo que son casi transparentes, permitiendo ver a su vez galaxias lejanas proyectadas en el mismo plano de la imagen.

y fusionando los diferentes núcleos que contiene o ha creado, hasta que o bien explota por no poder mantener el equilibrio, o se convierte en una estrella moribunda, mientras agota todos los combustibles que hacían posible esa hoguera termonuclear.

Dado que el hidrógeno es no sólo el elemento de menor carga eléctrica, sino también el más abundante en la naturaleza, no es de extrañar que sea el primer y más importante combustible termonuclear. La primera reacción termonuclear que se produce, y que marca el nacimiento de la estrella, es la fusión de dos núcleos de H para dar uno de helio. Dada la abundancia del hidrógeno, éste no es sólo el mecanismo inicial de funcionamiento de las estrellas, sino que es también el que opera durante la mayor parte de su vida. Recordando lo que comentamos al hablar del diagrama HR, esta fase evolutiva de combustión del H se corresponde con la estancia de esas estrellas en la Secuencia Principal que, por esa misma razón, es la zona más poblada del diagrama HR.

Este proceso que acabamos de describir brevemente no es, sin embargo, trivial. Si recordamos que el hidrógeno consta de un único protón, mientras que el helio consta de dos protones y dos neutrones, hace falta algo más que fusionar dos núcleos de H para producir uno de He. En el proceso, de alguna forma, habrá que

incorporar dos neutrones para poder llevarlo a buen término. Si lo que más abundan son los protones, esos neutrones tendrán que provenir de la transformación de otros dos protones. De modo que el proceso completo tendrá que contener pasos intermedios más o menos complicados. En las estrellas existen dos mecanismos diferentes para llevar a cabo la fusión, conocidos como cadena PP (protón-protón) y ciclo CNO (carbono-nitrógeno-oxígeno). En el primer caso la reacción dominante es la fusión directa de dos protones para dar deuterio (que está formado por un protón y un neutrón), lo que significa que durante el proceso de fusión uno de los protones se convierte en un neutrón (con la emisión de un positrón y un neutrino). Éste es el paso más crítico para el proceso global, y condiciona la eficiencia global del mismo, puesto que es una reacción nuclear muy lenta, con un tiempo característico de 14 mil millones de años. Gracias a la gran abundancia de protones, este proceso, aun a pesar de su lentitud, puede dar lugar a un número suficiente de núcleos de deuterio para que el proceso no se detenga. El paso siguiente, en el que el deuterio se fusiona con otro protón para producir helio-3, es, sin embargo, muy rápido, con un tiempo característico de tan sólo unos seis segundos. A partir de aquí se abren

diversas posibilidades, aunque todas ellas tienen como resultado neto la formación de un núcleo de helio por fusión de cuatro protones (que al final resultan en dos protones y dos neutrones). Los productos iniciales tienen más masa que los finales y esa diferencia de masa es la que se transforma en energía (recordemos, $E = mc^2$) y aparece, tras un largo proceso a través de la estrella, como luminosidad. Esa transformación de masa en energía es, finalmente, la responsable de que brillen las estrellas.

En el caso del ciclo CNO, estos elementos (carbono, nitrógeno y oxígeno) actúan como catalizadores para la transformación de un protón en un neutrón y la posterior formación de helio. Desde el punto de vista del rendimiento energético, este mecanismo es más eficaz que el primero, si bien, debido a la intervención de núcleos de carga eléctrica elevada, sólo puede operar a temperaturas relativamente altas. De modo que sólo las estrellas que tienen una masa superior a una vez y media la del Sol son capaces de extraer energía a través del ciclo CNO. En cualquier caso, la temperatura a la cual se produce la fusión del hidrógeno es del orden de las decenas de millones de grados.

Como hemos dicho, la etapa más larga de la vida de una estrella corresponde a aquella en la que el hidrógeno es el combustible nuclear.

Pero este combustible, aunque es el más abundante de todos ellos, llega a agotarse al convertirse en helio. En ese momento las reacciones de fusión se detienen y la estrella ya no es capaz de mantener el equilibrio, al no poder contrarrestar su propia gravedad. Como resultado, la estrella se contrae, lo que, como hemos comentado, conlleva un aumento de temperatura para hacer frente a las pérdidas de energía que se producen a través de su superficie. *Si la estrella es suficientemente masiva*, el proceso continúa y pasa por diferentes etapas. La primera se produce cuando la temperatura central alcanza los cien millones de grados. En estas condiciones, el helio puede comenzar a ser usado como combustible y se produce una nueva situación de equilibrio, el de la fusión del helio, estabilizándose de nuevo, por un tiempo, las propiedades estelares. Es decir, gracias a la contracción, la estrella es capaz de reciclar sus propias cenizas y continuar brillando. Pero la estrella ya ha salido de la Secuencia Principal y comienza así una nueva fase en su evolución.

El proceso de fusión del helio tampoco es trivial. Cuando se analiza la estabilidad de los núcleos atómicos, se ve que aquellos que poseen cinco u ocho nucleones (protones o neutrones), que son los que pueden resultar de la fusión H-He o de la fusión He-He, son inestables. Así, el berilio-8, que resulta

de la fusión directa de dos núcleos de helio, se desintegra otra vez en los dos núcleos iniciales. Sin embargo, el proceso no es totalmente simétrico, pues, dada la elevada temperatura a la que se produce la fusión del helio, la reacción de destrucción del berilio es ligeramente más lenta que la de su formación. Esta pequeña diferencia es suficiente para que algunos núcleos de berilio-8 tengan tiempo y oportunidad de capturar un nuevo núcleo de helio y dar lugar así a un átomo de carbono-12. Pero las dificultades no han terminado todavía, pues el carbono producido de esta forma se halla en un estado excitado que, normalmente, se rompe a su vez para volver a dar de nuevo un núcleo de helio y otro de berilio. Hay, sin embargo, una alternativa a este proceso de fisión que algunos átomos excitados de carbono-12 consiguen transitar, emitiendo dos fotones y convirtiéndose en carbono estable. Aunque el camino es angosto, el proceso ha encontrado una situación de estabilidad que le permite seguir avanzando, superar la zona de inestabilidad de los núcleos con 5 y 8 nucleones y producir, finalmente, la conversión gradual del helio en carbono. El carbono-12 puede ahora capturar otro núcleo de helio y convertirse en oxígeno-16, de modo que, en términos globales, el resultado de la fusión del helio es una mezcla de carbono y oxígeno.

Este proceso sigue operando mientras haya helio suficiente para alimentarlo. Cuando finalmente se agota, la estrella volverá a comportarse como se espera: comienza de nuevo a contraerse hasta, siempre que su masa sea suficientemente grande, alcanzar la temperatura central necesaria para que se produzca la fusión del carbono, lo que ocurre cuando se alcanzan los 600 millones de grados. La fusión de este elemento produce neón-20, sodio-23 y magnesio-24, así como protones y partículas alfa (núcleos de helio), que son rápidamente capturados por alguno de los isótopos presentes, bien recién formados o heredados del medio interestelar, para construir una mezcla de elementos químicos que, cuando el carbono se agota, está dominada por oxígeno-16, neón-20 y magnesio-24.

A medida que se van agotando los diferentes combustibles, la estrella se va contrayendo por etapas, alcanzando precarios equilibrios en los que se van consumiendo diferentes núcleos. Así, cuando se alcanzan los 1.200 millones de grados, entra en juego el neón-20 que, tras un complejo proceso, da lugar a una mezcla de oxígeno-16, magnesio-24 y otros isótopos. La etapa siguiente es la fusión del oxígeno, para lo cual se necesitan temperaturas en el entorno de los 1.500 millones de grados, para dar silicio-28, fósforo-31 y azufre-32. Al final de este proceso se obtiene una mezcla de silicio e isótopos de su

entorno, generados por la participación de todas las impurezas presentes en la captura de los protones y partículas alfa, que se liberan durante la fusión del oxígeno. El proceso progresa rápidamente hacia su final, que se alcanza con la fusión del silicio que finalmente se convierte en hierro-56 y otros núcleos de la zona del hierro-níquel. Estos núcleos, las llamadas cenizas termonucleares, son los más fuertemente ligados de todos y ya no se puede extraer energía de ellos por fusión termonuclear. El proceso, si ha sido capaz de llegar hasta aquí, habría terminado y la estrella habría llegado a su fin.

Como hemos venido indicando, la evolución de una estrella, el número de etapas termonucleares por las que pasa y su final vienen determinados básicamente por su masa. Sólo las estrellas más masivas, como vamos a relatar inmediatamente, acaban consumiendo todo el combustible termonuclear, mientras que las que tienen menos masa (recordemos que hay más estrellas cuanto menos masivas son) detienen en alguna fase intermedia los procesos termonucleares. Y, al final, aunque si se supera cierto límite, la muerte de una estrella es necesariamente violenta y espectacular, la mayoría de las estrellas desaparece gradualmente de escena, tras un largo proceso de decaimiento que, a veces, puede también acabar de manera

catastrófica si las condiciones del entorno son adecuadas. Veamos, pues, cómo es este proceso. Pero antes, es necesaria una breve digresión física que nos permitirá, gracias a la mecánica cuántica, comprender los detalles de la evolución estelar.

Los electrones, como fermiones que son, satisfacen el principio de exclusión de Pauli, según el cual no puede haber dos ellos que ocupen exactamente el mismo estado físico. Éste, para electrones libres, viene definido por la posición en el espacio (tres coordenadas), el momento lineal (tres valores, según los tres ejes de coordenadas) y el espín (dos valores, $+1/2$ y $-1/2$). Cuando se consideran conjuntamente la posición y el momento, la situación puede describirse como si los electrones se localizasen en un espacio de seis dimensiones, llamado espacio de fases, en el que cada punto está definido por las tres coordenadas de posición y las tres componentes del momento. Dado que, según establece el principio de incertidumbre de *Heisenberg*, no se puede determinar simultáneamente la posición y el momento de una partícula con una precisión arbitraria, en lugar de puntos en el espacio de fases, deberemos considerar pequeñas celdillas que permitan dar cuenta de esa imprecisión. Esto significa que en un volumen dado del espacio de fases sólo cabe un número finito de estas celdas y

que, en cada una de ellas, por el principio de exclusión, sólo caben dos electrones, uno con espín positivo y otro con espín negativo.

Durante el proceso de contracción estelar, el volumen físico que pueden ocupar los electrones se restringe y, con él, el número de celdillas para cada nivel de energía. De ellas, las de menor energía se ocupan en primer lugar (puesto que corresponden a estados energéticos más probables) y, por lo tanto, puesto que en cada celda sólo caben dos, cada vez más electrones se ven forzados a ir ocupando celdas de momento lineal más elevado. El aumento de velocidad va acompañado de un aumento de presión del gas, que está ligada al número de choques por unidad de tiempo y superficie y a la cantidad de momento que transfieren en cada uno de ellos. En definitiva, por el solo hecho de restringir el volumen, e independientemente de cuál sea la temperatura, los electrones son capaces de ejercer una presión que crece con la densidad. El hecho de que la temperatura no tenga nada que ver con el proceso que estamos describiendo implica que, a medida que la estrella se va contrayendo, la presión originada en la competencia por la ocupación de las celdillas por los electrones pueda llegar a dominar sobre la agitación térmica. Cuando eso ocurre, se dice que la estrella se encuentra en estado de *degeneración electrónica*. Puesto que,

como venimos diciendo, ese aumento de presión es independiente de la temperatura, se deduce que a cualquier temperatura (incluso cero absoluto) pueden existir estructuras de equilibrio, al contrarrestar la presión debida a la degeneración de efecto de la gravedad. De modo que la degeneración electrónica puede detener el proceso de colapso y calentamiento de una estrella, sin necesidad de que tengan lugar nuevos procesos termonucleares.

Volvamos ya al curso de la evolución estelar. Vimos que las fases de combustión termonuclear se producen a temperaturas bien definidas, que corresponden a la situación en que los núcleos que van a servir de combustible pueden comenzar a vencer la barrera de Coulomb. Puesto que la fuente primaria de energía es la gravitatoria, es fácil admitir que para alcanzar una temperatura determinada, las estrellas de menor masa deben tener una densidad más elevada que las de mayor masa. Mayores densidades implican, por otro lado, que se va a llegar antes a la fase degenerada. *De modo que las estrellas de masa pequeña pueden llegar a la fase degenerada antes de alcanzar la temperatura de ignición de una determinada fase termonuclear.* En otras palabras, el recorrido termonuclear de una estrella está gobernado básicamente por su masa y, en función de ésta, podrá tener más o menos combustibles diferentes,

más o menos fases, ya que el proceso termonuclear quedará interrumpido al alcanzar la degeneración electrónica. La teoría nos enseña que las estrellas que tienen una masa inferior a 0,08 masas solares nunca llegan a iniciar la combustión del hidrógeno, por lo que nunca se convierten en verdaderas estrellas ni alcanzan, por tanto, la Secuencia Principal. A las más masivas de éstas se las conoce como *enanas marrones* y, aunque se les llama estrellas, no lo son en sentido estricto. Si la masa inicial está comprendida entre 0,08 y 0,3 masas solares, se produce la combustión del hidrógeno y las estrellas se sitúan en la Secuencia Principal, pero nunca serán capaces de iniciar la fusión del helio. Sucesivamente, si la masa está entre 0,3 y alrededor de 8 masas solares, podrán usar el hidrógeno primero y después el helio como combustibles, pero nunca llegarán a quemar el carbono, mientras que aquéllas, cuya masa es superior a esta cifra pero que no supera las 10-12 masas solares, nunca llegarán a quemar el neón.

Hasta aquí hemos ido trazando la vida termonuclear de las estrellas. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que el inicio de cada fase significa un reajuste de la estrella (recordemos que al acabarse un combustible, la estrella se contrae y se calienta, hasta que pueda comenzar la ignición del siguiente), que, a veces, puede resultar imposible.

Hay, pues, otro aspecto clave a considerar en el proceso de evolución de las estrellas, el de la estabilidad de las sucesivas configuraciones.

Cada una de esas etapas corresponde a una fase de la vida de una estrella, con propiedades características que la Astrofísica ha ido describiendo y explicando. Las estrellas que sólo son capaces de utilizar el hidrógeno como combustible termonuclear son completamente convectivas, lo que significa que los elementos que contienen en su interior están bien mezclados y el helio que se va formando no se acumula en el centro, sino que se distribuye por toda la estrella. Su evolución es muy lenta, y ninguna de ellas, ni siquiera las de la primera generación, ha tenido tiempo de culminar la fase de evolución termonuclear. Son las más frías y menos luminosas de las estrellas que queman hidrógeno y ocupan el extremo inferior de la Secuencia Principal. Cuando agoten el hidrógeno, se convertirán en enanas blancas de helio, que, en principio, se limitarán a enfriarse lentamente.

La siguiente categoría, las estrellas cuya masa no supera las 8 masas solares, queman hidrógeno en el centro vía cadena PP, si la masa es inferior a 1,5 masas solares, o vía ciclo CNO si la masa es superior. En ambos casos, el helio ya no se mezcla como en el caso anterior y se va acumulando en la

región central de tal modo que, cuando se agota el hidrógeno en esa zona, ésta se contrae para poder permanecer en equilibrio. Esto tiene como consecuencia una combustión muy vigorosa del hidrógeno en una delgada capa alrededor del núcleo central de helio. Este aporte de energía provoca simultáneamente un aumento de la luminosidad y una expansión de las capas más externas que se enfrían, convirtiendo a la estrella en una gigante roja. Dentro del diagrama HR estas estrellas emigran desde la Secuencia Principal hasta la base de la zona ocupada por esas gigantes.

Mientras esto sucede, el núcleo estelar de helio crece paulatinamente y se calienta hasta alcanzar el punto de ignición y empezar a producir carbono y oxígeno. En el caso de estrellas de masa inferior a 1,5 masas solares, esta ignición es violenta, ya que se realiza en condiciones parcialmente degeneradas, pero sólo provoca un simple reajuste de la estrella. El aporte de energía desde el centro hace que las capas exteriores del núcleo de helio se dilaten y que la capa de combustión del hidrógeno se apague, con lo cual disminuye la luminosidad y se contrae la envoltura. Dentro del diagrama HR la estrella abandona la región de las gigantes y entra en la zona de la rama horizontal, que es la zona de las gigantes amarillentas. Una vez en la rama horizontal, el proceso se repite y

cuando el helio se agota en el centro, el núcleo de carbono-oxígeno se contrae y se enciende el helio circundante en una capa alrededor de este núcleo. La principal diferencia con el caso anterior es que ahora también se enciende el hidrógeno en otra capa. Esta combustión en doble capa hace que la luminosidad aumente mucho y que se expanda la envoltura, de manera que la estrella se convierte en un miembro de la llamada rama asintótica y pasa a ocupar la cima de la región de las gigantes rojas. Debido a la diferencia de velocidad de las reacciones de fusión del hidrógeno y del helio, la combustión en doble capa es inestable y se producen pulsos térmicos que provocan la expulsión de la envoltura, dando lugar a una nebulosa planetaria, dejando expuesto el núcleo central (figura 1.5). El objeto central, compuesto básicamente de carbono y oxígeno, es incapaz de liberar energía nuclear y lo único que hace es enfriarse como una enana blanca. Dentro del diagrama HR, la estrella pasa bruscamente desde la cima de las gigantes rojas a la zona más azul de las enanas blancas.

Si la masa supera las 8 masas solares, la combustión del helio en capa es tan violenta que provoca la ignición del carbono en la parte más externa del núcleo, desde donde se propaga hasta el centro. Al igual que antes, la envoltura se hace inestable y se acaba expulsando, quedando como residuo una enana

blanca de oxígeno y neón. La diferencia entre ambos casos es que estas enanas son más masivas que las de carbono-oxígeno.

¿Cuál es el límite físico a este proceso? Aunque la comprensión de los detalles requiere complejos argumentos, podemos hacernos una idea de manera relativamente simple. Puesto que la presión de los electrones en la situación de degeneración depende de la densidad, cuanto mayor es la masa de la estrella, menor tiene que ser su radio para mantener el equilibrio. Para sostener esa estructura, es necesario que los electrones tengan cada vez mayores momentos lineales, es decir, se muevan a mayores velocidades. Si no existiese un límite absoluto a la velocidad de una partícula y se pudiese superar la velocidad de la luz, se podría soportar cualquier estructura, pues bastaría que los electrones se movieran a velocidades arbitrariamente grandes. Pero eso es imposible, lo que significa que hay un límite a la masa de esas configuraciones. Esa masa, que se conoce como *masa límite de Chandrasekhar*, es tal que, para sostenerla, todos los electrones deberían moverse a la velocidad de la luz. Su valor es de 1,4 masas solares aproximadamente y cuando una estructura degenerada se acerca a ella, experimenta una catástrofe.

Ésa es a muy grandes rasgos la Física de la Evolución Estelar, uno de

Figura 1.5. Imagen de NGC 2440 que muestra el último aliento de una estrella similar al Sol. La estrella entra en la fase final de su vida, expulsando sus capas externas y dejando al descubierto el núcleo. Al quedar desnudo, el núcleo, que acaba de convertirse en una enana blanca, radia en el ultravioleta y hace brillar el material expulsado. En la imagen tomada por el *Hubble Space Telescope*, el punto brillante en la región central (ligeramente descentrado) es la enana blanca.



los capítulos mejor configurados y más espectaculares de la Astrofísica, que nos permite comprender desde cómo se forman las estrellas hasta que, agotadas sus posibilidades de equilibrio, entran en la fase final de sus vidas. Disciplina que nos permite entender cómo es la vida de las estrellas, deducir cuáles son sus edades y determinar su luminosidad y el origen de las mismas. Que nos permite, en suma, conocer el origen y cuantía de una fracción muy importante de la energía radiante que observamos en el Universo y, gracias a su soporte teórico, caracterizar una parte de la materia luminosa del Universo, hasta no hace muchas décadas identificada con toda la materia del Universo. Hoy sabemos, como luego diremos, que sólo es una de las componentes materiales del Universo y ni siquiera la dominante. Pero eso no resta un ápice a su importancia física y crucial para las observaciones que, hasta la fecha y salvo en contadísimas ocasiones, se realizan siempre en base al estudio del espectro electromagnético.

1.4. Últimas etapas de la evolución estelar

Las fases evolutivas por las que pasa una estrella dependen, ya lo hemos dicho, de la masa de la misma. Dependiendo de ese proceso, las fases últimas de cada estrella serán también diferentes según sean sus masas. Empecemos por las más masivas.

Vimos que sólo las estrellas con más de 10-12 masas solares son capaces de pasar por todas las etapas de la combustión termonuclear antes de llegar a la degeneración electrónica.

Éstas son las que van a acabar de manera más espectacular, explotando como supernovas y dando lugar a residuos ligados que serán estrellas de neutrones o incluso agujeros negros según las condiciones. Todo ese proceso es, por las condiciones extremas en que se produce, muy complejo y aquí vamos a intentar resaltar tan sólo los aspectos más salientes.

El final del proceso termonuclear es la acumulación de núcleos de hierro en la parte central de la estrella. Agotado el proceso termonuclear, la estructura se

mantiene esencialmente por la presión de los electrones degenerados. La estructura global de la estrella es entonces similar a la de una cebolla en la que cada capa está rodeada por otra que se halla en una fase de la combustión termonuclear menos avanzada. Así, la región central, de hierro, está rodeada por la capa de combustión del silicio, la del silicio por la del oxígeno, la del oxígeno por la del neón, la del neón por la del carbono, la del carbono por la del helio y la del helio por la del hidrógeno. Rodeando al conjunto se halla el resto del material de la estrella que es inerte, pues la temperatura no es lo suficientemente elevada como para provocar ninguna combustión termonuclear. Dado el ritmo diferente de las distintas combustiones termonucleares, la duración de cada etapa de la combustión termonuclear es muy distinta. Por ejemplo, en el caso de una estrella de 25 masas solares, la combustión del hidrógeno dura unos 7 millones de años, la del helio unos 500 mil años, la del carbono unos 600 años, la del neón 1 año, la del oxígeno unos 6 meses y la del silicio tan sólo 1 día. En el diagrama HR las estrellas muy masivas se sitúan inicialmente en la región de las gigantes azules de la Secuencia Principal para evolucionar después hacia la zona de las supergigantes rojas, pero manteniendo una luminosidad muy parecida.

A medida que la combustión termonuclear avanza, la masa del núcleo crece y se va acercando a la masa de Chandrasekhar, lo que provoca un aumento paulatino de la densidad hasta alcanzar un valor para el que los núcleos de hierro pueden capturar electrones. Este proceso de captura tiene dos consecuencias: por un lado, reduce la presión; y por el otro, disminuye el valor de la masa crítica. Además, si la estrella es suficientemente masiva, se alcanza la temperatura de fotodesintegración del hierro en partículas alfa y neutrones, con la consiguiente absorción de energía. El resultado final es que el núcleo estelar pierde presión y colapsa hacia una estrella de neutrones.

Cuando se produce el colapso, se forman dos regiones. Una más interna, en la que la velocidad de caída es proporcional a la distancia y siempre es inferior a la velocidad del sonido, y otra más externa, que se mueve supersónicamente. Cuando la materia situada en la zona interna alcanza la densidad de la materia nuclear, se hace muy “dura”, de manera que cuando la más externa cae sobre ella, rebota y provoca la formación de una onda de choque en la interfase sónica que separa ambas regiones. Esta onda de choque, que por sí sola tendría energía suficiente (unos 10^{51} ergios) para provocar la explosión de la estrella, se estanca como consecuencia de estar situada en el

interior del núcleo de hierro y debe invertir su energía en la fotodesintegración de los núcleos atómicos de hierro.

Mientras ocurren estos fenómenos, en el interior de la estrella se crea una gran cantidad de neutrinos a expensas de la energía gravitatoria (unos 10^{53} ergios), que se ha liberado durante el proceso de colapso. En las regiones cuya densidad supera los 2×10^{11} g/cm³, los neutrinos quedan atrapados y no pueden escapar libremente, por lo que permanece en situación de casi equilibrio con la materia. La pausa introducida por el estancamiento de la onda de choque da tiempo a que los neutrinos atrapados puedan transportar hacia el exterior, mediante difusión y convección, la enorme cantidad de energía que poseen y formar una burbuja muy caliente que provoca la explosión de las capas más externas.

Todo este proceso tiene una duración de tan sólo un segundo, por lo que las capas exteriores no tienen tiempo de reaccionar hasta el momento en que les llega la onda de choque provocada por el colapso. Esta onda de choque provoca un calentamiento súbito del material y su rápida expansión, por lo que las capas de combustión termonuclear se sobreactivan, generan nuevos isótopos y se apagan. El resultado es que todos los residuos generados durante el proceso

de extracción de energía, excepto aquellos que se incorporan a la estrella de neutrones, son expulsados al medio interestelar, enriqueciéndolo con nuevos elementos químicos.

La explosión de las capas más internas actúa como un pistón sobre las capas más externas, de forma que, por un lado, expulsan los fotones que estaban atrapados en la envoltura de la estrella y, por el otro, le inyectan elementos radioactivos, especialmente níquel-56, que, al desintegrarse, hace brillar los residuos en expansión. Se dice en este caso que se ha producido una erupción de *supernova*. En la figura 1.6 mostramos la imagen del resultado de una reciente (en 1987) explosión de supernova en la Gran Nube de Magallanes. La extraordinaria energía del fenómeno se traduce en el camino ya recorrido por el material expulsado en el medio interestelar. Proceso que siga durante muchos miles de años, hasta que ese material se va convirtiendo en tenues residuos, que van tejiendo esa especie de encajes como el que puede verse en la figura 1.7.

Tanto la luminosidad como su evolución temporal, la forma de la llamada curva de luz, dependen de la estructura de la envoltura de la estrella justo antes de la explosión, que a su vez depende de la masa total, de la extensión de la envoltura y de su composición química, por lo que

existen grandes diferencias entre los distintos individuos.

¿Y qué les ocurre a los residuos ligados? Las estrellas de neutrones no pueden tener una masa arbitraria, sino que, al igual que ocurre con las enanas blancas, existe una masa crítica más allá de la cual no pueden oponerse a la acción de la gravedad. Esta masa recibe el nombre de Oppenheimer-Volkoff y se halla situada entre 2 y 4 masas solares. Su valor exacto se desconoce todavía, ya que depende de las propiedades de la materia nuclear, que no están todavía bien caracterizadas. Si durante el proceso de formación de una estrella de neutrones ésta no consigue expulsar toda la masa que le rodea, puede ocurrir que una fracción importante vuelva a caer sobre ella y sobrepase de esta forma la masa crítica. En este caso no existe forma conocida de parar el colapso gravitatorio y la estrella se convierte en un *agujero negro*.

Un agujero negro es un objeto cuya gravedad es tan elevada que, en lenguaje mecánico, ni siquiera la luz puede escapar de él, de ahí el nombre. Aunque la posibilidad de tales sistemas fue presentada en el siglo XVIII por Laplace, hace falta todo el aparato conceptual y matemático de la Relatividad General para tener plena conciencia de su significado. En breves palabras, un agujero negro es un sistema de tales propiedades que ningún tipo de información que se genere



Figura 1.6. Imagen obtenida por el *Hubble Space Telescope* de la región de la Gran Nube de Magallanes, donde se halla la Supernova SN1987A, diez años después de la explosión. El remanente de la explosión se ve en el centro de la imagen en forma de anillos. La velocidad del material que explotó es tan grande y es tal la energía que tiene que será capaz de ir barriando el material que le circunda y seguirá expandiéndose por miles de años. Por otro lado, unas tres horas antes de que la luz alcanzase la Tierra, se detectaron en tres observatorios de neutrinos (Kamiokande II, IMB y Baksan) la llegada de un flujo anómalo de estas partículas que duró unos 13 segundos. La interpretación más aceptada es que provenían del núcleo de la supernova.

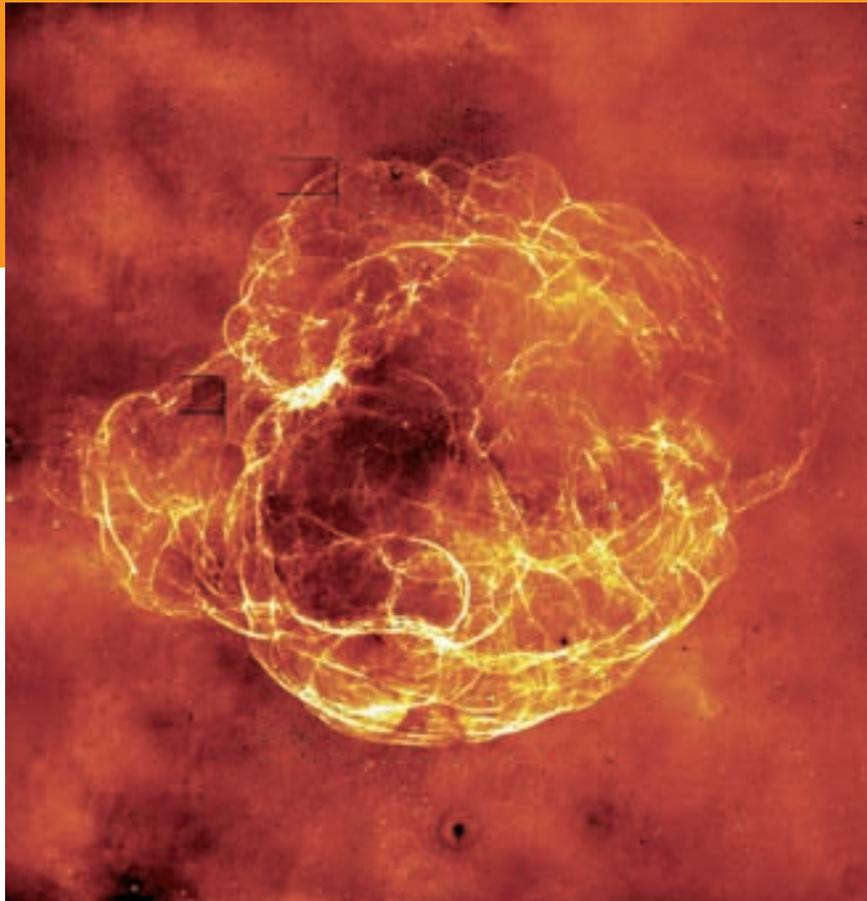


Figura 1.7. Imagen del remanente de supernova catalogado como S147 en la región de Taurus/Auriga. Se estima que la supernova explotó hace 30.000 años. Los gases se están expandiendo a una velocidad de unos 1.000 km/s. Se encuentra a una distancia de unos 3.900 años luz.

dentro del volumen definido por la superficie (matemática), conocida como horizonte de sucesos, podrá escapar y alcanzar un observador exterior. De modo que un agujero negro sólo se puede detectar a través de los efectos que su gravedad produce sobre los objetos que le

rodean. En la actualidad, se conocen diversas fuentes galácticas de rayos X que se consideran formadas por un agujero negro y una estrella normal, en las que la materia arrancada a la estrella cae hacia el agujero, se calienta y emite grandes cantidades de energía en forma de rayos X (un ejemplo típico es Cygnus X-1).

Las fuentes eruptivas gamma o GRB (acrónimo de la denominación en inglés, *Gamma Ray Bursts*) fueron descubiertas en el año 1967 por los satélites VELA que los Estados Unidos habían puesto en órbita para verificar el cumplimiento, por parte de la Unión Soviética, del tratado de prohibición de pruebas nucleares en la atmósfera. Son erupciones de rayos gamma que duran entre unos milisegundos y un millar de segundos. El origen de estas erupciones todavía es un enigma, pero se han dado ya grandes pasos hacia su solución. La constatación (gracias a los datos del satélite Compton) de que esas fuentes están distribuidas isotrópicamente indica que deben estar situadas a distancias cosmológicas y, por tanto, la energía que emiten es extraordinaria, del orden de unos 10^{51} ergios, canalizados, eso sí, dentro de un pequeño ángulo sólido, como si de un faro se tratara. La variabilidad temporal indica que la fuente de energía debe ser muy compacta, de medidas estelares, por lo que su origen debe estar relacionado con una estrella de

neutrones o con un agujero negro. Estas fuentes eruptivas se dividen en dos grupos, las de larga duración, más de 10 segundos, y las de corta duración. En el año 2003 se consiguió asociar por primera vez una erupción de larga duración con una explosión de supernova asociada a un colapso estelar. En la actualidad, se cree que los GRB de larga duración representan la primera manifestación del nacimiento de un agujero negro durante el colapso de una estrella que esté en rápida rotación. Hasta la fecha no se ha podido establecer ningún modelo satisfactorio que explique el origen de los GRB de periodo corto, pero se supone que son el resultado de la colisión de dos estrellas de neutrones o de una estrella de neutrones con un agujero negro.

¿Y qué les ocurre a las estrellas de menor masa? Tal como se ha visto anteriormente, éstas no pueden acabar su ciclo de combustión termonuclear y dejan, al final de sus vidas, un residuo degenerado que contiene una gran cantidad de energía nuclear sin utilizar, y que es potencialmente explosivo. Si este residuo está aislado, tal como ocurre con las enanas blancas, es inerte y lo único que hace es enfriarse. Pero si forma parte de un sistema estelar doble, la compañera puede transferirle energía y activarlo. El caso más emblemático es el de las estrellas enanas blancas de carbono-oxígeno que, si tienen una

compañera próxima, pueden capturar materia, aumentar su masa y aproximarse a la masa de Chandrasekhar. Durante este proceso de crecimiento, la estrella se comprime y se calienta suavemente, de tal manera que alcanza el punto de ignición termonuclear bajo condiciones degeneradas. Una vez se ha encendido el combustible, la llama se propaga rápidamente por toda la estrella y provoca su explosión. Se sabe que la velocidad de propagación del frente de combustión es subsónica, es decir, que no es una detonación, sino que se trata de una deflagración, lo que complica extraordinariamente el problema de entender cómo se propaga la llama, pues ésta, al moverse con una velocidad inferior a la del sonido, se ve afectada por todo tipo de perturbaciones e inestabilidades procedentes de la zona quemada. Una complicación adicional proviene del hecho de que la llama puede prender inicialmente en varios puntos a la vez, por lo que su geometría es complicada y sólo el análisis completo y detallado del problema permite tratar plenamente el proceso.

Durante la explosión se genera una gran cantidad de elementos radioactivos, entre 0,6 y 1 masas solares de níquel-56, que, al desintegrarse, hacen brillar intensamente y durante mucho tiempo a los residuos. Un punto interesante es que el objeto que explota siempre es una enana blanca cerca del

límite de Chandrasekhar, por lo que su espectro y su luminosidad no varían apreciablemente ni de un individuo a otro, ni con el paso del tiempo, suponiendo que las leyes de la Física son inamovibles. Esta unicidad, que debe demostrarse sin atisbos de duda, convierte a dichas explosiones, también conocidas como *supernovas de tipo Ia*, *SNIa*, en un patrón ideal para medir distancias, pues basta comparar el brillo aparente con el brillo intrínseco para deducirlas. El brillo extremo hace que estos fenómenos sean visibles hasta grandes distancias, por lo que se han convertido en una de las herramientas fundamentales de la Cosmología.

La materia degenerada también puede provocar otros fenómenos interesantes como son las erupciones de nova, durante las cuales el hidrógeno se quema de forma explosiva. Éste es un buen combustible pero un mal explosivo, debido a que en el proceso de fusión para generar helio debe convertir dos protones en dos neutrones, y este proceso, como dijimos, es comparativamente lento, por lo que las explosiones que provocan son de menor cuantía.

Cuando una estrella enana blanca obtiene hidrógeno de su compañera, éste se acumula sobre la superficie y se comprime lentamente. Si el ritmo de caída es relativamente bajo, del orden de una mil millonésima de masa solar por año, el calor de compresión se

disipa y el hidrógeno se degenera. Cuando la masa acumulada alcanza un valor crítico, del orden de cien milésimas de masa solar, se encienden las reacciones termonucleares y se excita el ciclo CNO, sólo que en este caso el proceso es tan rápido y la temperatura tan elevada que se generan muchos elementos radioactivos de vida corta, que son transportados por convección hacia la superficie del material acumulado, donde depositan su energía y provocan la explosión de la estrella. En este caso, la diferencia con las supernovas es que la erupción sólo afecta a las capas más externas y la estrella no desaparece con la catástrofe.

Así van muriendo las estrellas. El proceso es complejo en sus últimos momentos, pero el resultado es la liberación de energía luminosa, a veces de forma catastrófica y espectacular, y la expulsión de material nuclear procesado, que va enriqueciendo el medio interestelar en cantidad cada vez mayor de átomos pesados a medida que se van sucediendo las generaciones de estrellas.

1.5. La química de las estrellas. La producción de elementos

De acuerdo con el modelo cosmológico estándar, unos minutos después de la Gran Explosión el Universo sólo

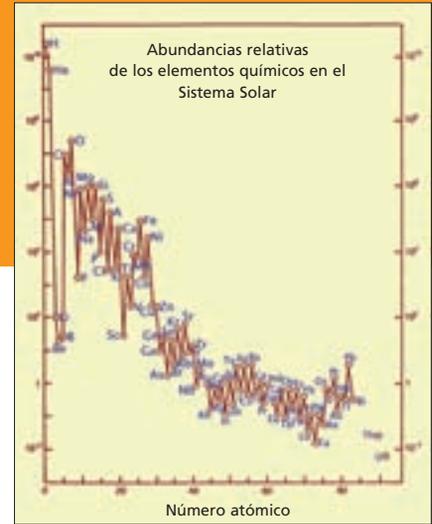
contenía hidrógeno, helio-4 y trazas de deuterio, helio-3 y litio-7. Al cabo de cierto tiempo se formaron las primeras estrellas, que, tal como se ha descrito, sintetizaron los primeros elementos químicos en los procesos termonucleares que rigen su funcionamiento. Si estas estrellas fuesen siempre estables, esos elementos hubieran permanecido atrapados en su interior y ni el gas interestelar ni el gas intergaláctico hubieran evolucionado químicamente. En esas circunstancias, fuera de las estrellas todo sería hidrógeno (mezclado con los elementos producidos en el Big-Bang). Pero, como acabamos de discutir, algunas estrellas explotaron como supernovas y esparcieron sus residuos nucleares por toda la Galaxia, donde se mezclaron con la materia primordial y se incorporaron a las generaciones siguientes de estrellas, que explotaron a su vez y añadieron su contribución al contenido químico de la Galaxia. La riqueza y complejidad química de diferentes regiones del Universo tiene ahí su origen. Si las supernovas no hubieran existido, hoy en día tampoco existirían planetas con substrato rocoso, ni agua, ni oxígeno, ni seres vivos. Pero no fue así, afortunadamente.

Esta idea de cómo se han generado los elementos químicos se debe esencialmente al trabajo de M. Burbidge, G. Burbidge, W. A. Fowler y F. Hoyle e, independientemente, al de

Cameron, que fueron quienes, en 1957, desentrañaron el enigma del origen de los elementos químicos gracias a los avances que había experimentado la Física Nuclear durante las décadas de los cuarenta y cincuenta del siglo XX.

Uno de los pasos claves para plantear adecuadamente el problema debía ser, sin duda, la determinación observacional de las abundancias de los diferentes elementos químicos en el Sistema Solar y en las estrellas (figura 1.8). La compilación más famosa es la de Suess y Urey de 1956. La distribución de abundancias muestra que el hidrógeno y el helio son los elementos más abundantes de la naturaleza, que el litio, berilio y boro son muy escasos, como corresponde a núcleos con 5 u 8 nucleones, que, como ya dijimos, son inestables. También se constata que el carbono y el oxígeno son los siguientes elementos más abundantes y que los demás experimentan un decrecimiento en su abundancia hasta llegar a la zona del hierro, donde aparece un aumento relativo. Este repunte se debe a que los isótopos situados en esta zona son los más estables de la naturaleza, las llamadas cenizas nucleares. Más allá del hierro existen elementos más pesados, cuyas abundancias decrecen paulatinamente excepto en las zonas de máxima estabilidad, proporcionadas por la presencia de 50, 82 y 126 neutrones.

Figura 1.8. Abundancias de los elementos químicos en el Sistema Solar, en función del número atómico. La distribución refleja tanto las propiedades de estabilidad de los diferentes núcleos, como los procesos de fusión y transmutación que explican su producción.



A finales de los años cuarenta, poco después de haber lanzado la idea del Big-Bang, Gamow, Alpher y Herman habían propuesto que todos los elementos se habían creado durante la Gran Explosión, a partir de una sopa de neutrones que se desintegrarían al cabo de pocos minutos para dar protones libres, los cuales irían capturando paulatinamente los neutrones libres que quedasen para construir el resto de los elementos químicos. Pronto se vio, sin embargo, que esta idea era inviable a causa de la barrera que representaba la inestabilidad de los núcleos con 5 y 8 neutrones, por lo que fue necesario buscar su origen en las estrellas y en las explosiones de supernovas, cosa que consiguieron los autores mencionados más arriba. De la teoría cosmológica quedó, no obstante, una reliquia: el origen del deuterio, el helio y el litio. El primer elemento es tan frágil que las estrellas sólo lo destruyen y el segundo es tan abundante que las estrellas no pueden generarlo en cantidad suficiente, por lo que ambos se atribuyen al Big-Bang. En cuanto al

litio, sigue siendo necesario invocar el Big-Bang para poder explicar su abundancia.

Hemos hablado de la evolución termonuclear de las estrellas que, cuando hay masa suficiente, llega a producir núcleos de hierro y de los elementos de esa familia. Como se ha dicho anteriormente, los isótopos situados alrededor del hierro son los núcleos más estables de la naturaleza, y las estrellas no son capaces de superar esa barrera y producir elementos aún más pesados. ¿Cómo se producen entonces esos átomos más pesados que el hierro?

Puesto que el hierro y demás elementos de su grupo son los más estables, para poder utilizarlos para producir nuevos elementos más pesados, será necesario aportar energía. Los desarrollos teóricos que siguieron al descubrimiento del tecnecio en las estrellas pusieron de manifiesto que un mecanismo de captura de neutrones podría explicar los procesos de generación de elementos más allá del hierro. La idea básica es que los

neutrones, que son producidos en abundancia durante algunas fases de la evolución estelar y que carecen de carga eléctrica, son fácilmente absorbidos por los núcleos. Después de la captura de un neutrón, un elemento con Z protones y N neutrones, denotado por (Z, N) , incrementa este último valor en una unidad y se convierte en el elemento $(Z, N+1)$. Si el núcleo resultante es estable, puede incorporar otro neutrón y construir la serie isotópica (mismo valor de Z , diferentes valores de N) del elemento Z . Llegará un momento, sin embargo, en que el isótopo resultante será inestable frente a la desintegración, en la que un neutrón se convierte en un protón y emite un positrón y un antineutrino. Si la abundancia de neutrones es baja, el

ritmo de captura será lento y el proceso de desintegración acabará dominando, de modo que el núcleo inestable Z acabará por tener un protón más y se convertirá en el siguiente elemento, $Z+1$. El proceso se repite, con la captura sucesiva de neutrones, y se va construyendo la serie isotópica del elemento $Z+1$, y así sucesivamente. A este procedimiento se le llama *proceso s*, del inglés *slow*, pues el ritmo de captura de los neutrones es más lento que el de desintegración de los núcleos. Por este mecanismo, si partimos del hierro, se podrán construir núcleos cada vez más pesados hasta llegar al plomo-210, que, cuando captura un neutrón, siempre emite una partícula alfa, impidiendo así ir más hacia allá en la construcción de nuevos núcleos. Se había resuelto el problema aunque tan sólo en parte. ¿Cómo se produce el resto de los elementos?

Cuando la densidad ambiente de neutrones es muy elevada, los núcleos inestables son capaces de capturar varios neutrones antes de desintegrarse, por lo que cuando cesa la irradiación por neutrones, las transiciones dominan y los núcleos convierten paulatinamente sus neutrones en protones hasta que el núcleo consigue estabilizarse en algún lugar de la tabla periódica. Éste es el *proceso r*.

Los *elementos s* se producen durante la combustión en doble capa que caracteriza a las estrellas de la rama asintótica, pues las inestabilidades hacen que el carbono-13 y el neón-22 reaccionen con partículas alfa y se libere el exceso de neutrones, uno y dos respectivamente, que tienen. Por el contrario, los *elementos r* se producen en ambiente explosivos, como son los colapsos estelares, durante los que se expulsan grandes cantidades de materia

muy neutronizada hacia el medio interestelar. Es preciso señalar aquí que para activar el proceso es necesario que existan elementos semilla procedentes de otras fases de la combustión o de otras generaciones de estrellas.

En lo que se refiere a los elementos ligeros, Li, Be y B, actualmente se admite que son producidos por la interacción de la radiación cósmica con el medio interestelar. En el caso del litio-7, el isótopo más abundante de este elemento, éste no es, sin embargo, suficiente y es preciso recurrir a un aporte adicional de las gigantes rojas y las novae.

El mundo de abundancias químicas, que permite explicar la variedad de cuerpos, desde la Tierra y todo lo que contiene hasta las más exóticas estrellas, queda así atrapado en esa teoría que con tanto éxito ha dado cuenta hasta de los detalles de la evolución estelar.

2. El mundo de las galaxias

De hecho la GALAXIA no es otra cosa que una congregación de innumerables estrellas diseminadas en grupos; que, en cualquier región a la que se dirija el telescopio, una ingente multitud de estrellas se presenta a la vista de repente, de las cuales algunas se ven suficientemente grandes y distintamente; pero la multitud de las pequeñas es del todo inexplorable.¹

F. Brunetti, Galileo, *Opere. I. Sidereus Nuncius*

Galileo había claramente discernido de qué está compuesta la Vía Láctea: innumerables grupos de estrellas que se extienden casi indefinidamente, de las que las más débiles constituyen una

mayoría inexplorable, como se aprecia en la figura 2.1. Ese mundo de estrellas era el Universo para Galileo y su tiempo. Como dijimos en la Introducción, hubo que esperar a las primeras décadas del siglo XX para que fueran descubiertas las galaxias y se ampliase súbitamente nuestro concepto científico del Universo, que tuvo que ensancharse casi hasta el infinito, para abarcar este nuevo *mundo de las galaxias*. Ése fue, sin duda, el hito observacional fundamental de la moderna Astrofísica. Los posteriores análisis apenas modificaron la percepción de Galileo de que las galaxias son enormes amasijos de

1. *È infatti la GALASSIA nient'altro che una congerie di innumerevoli Stelle, diseminate a mucchi; ché in qualunque regione di essa si diriga il cannonchiale, subito una ingente folla di Stelle si presenta alla vista, delle quale parecchie si vedono abbastanza grandi e molto distinte; ma la moltitudine delle piccole è del tutto inexplorabile.*



Figura 2.1. Campo de estrellas en dirección al centro galáctico, en la región de Sagitario. Aunque se trata de una región con mucho contenido en polvo, que impide ver a su través, esta imagen del telescopio VLT de ESO ha sido tomada en una pequeña zona libre de polvo, por lo que se puede acceder a todo el mundo de estrellas que configura la región central de nuestra Galaxia.



Figura 2.2. Imagen tomada con el telescopio VLT de ESO de la galaxia Messier 83 (NGC 5236), situada en la región de Hidra. Situada a una distancia de unos 15 millones de años luz, tiene un tamaño sensiblemente menor al de nuestra Galaxia, alrededor de la mitad. Tiene un bulbo central pequeño y un sistema de brazos espirales muy bien definidos, con abundantes estrellas jóvenes y regiones de formación estelar, que se aprecian como pequeñas nebulosas o concentrados enjambres de estrellas. También se aprecian regiones de polvo en todo el disco, que forman una especie de retícula intrincada en algunas partes de la galaxia.

estrellas, aunque sí enriquecieron la descripción, revelando, como ya se había hecho para nuestra Vía Láctea, que las galaxias también contienen, en

variadas proporciones, gas en diferentes fases físicas y partículas diminutas que los astrónomos nombramos con el nombre genérico de polvo (figura 2.2).

Para Hubble y sus seguidores, las galaxias eran los auténticos elementos constitutivos del Universo, los ladrillos con los que está construido el edificio cosmológico. Conocer las galaxias era la vía para conocer el Universo. Había que clasificarlas, caracterizar las diferentes familias que pudieran existir y estudiar su distribución en el cielo. Había nacido la *Astronomía Extragaláctica*. Pero ese nuevo mundo de las galaxias, como lo demostrarían los posteriores análisis, iba a deparar grandes sorpresas, de las que la presencia mayoritaria de materia no-luminosa, como veremos después, no fue la menor. Aunque fue el estudio de los cúmulos de galaxias el que por primera vez planteó el problema de la existencia de más materia de la que brilla y se aprecia en las imágenes, pronto aparecieron las primeras indicaciones en las galaxias al constatar, ya en 1939, que las partes externas de la galaxia de Andrómeda giraban mucho más deprisa de lo esperado según las leyes de la dinámica. Esas indicaciones se fueron consolidando a medida que se iban refinando los análisis y se acumulaban datos sobre otras galaxias. El trabajo de Rubin y colaboradores, en los años setenta del siglo XX, claramente mostraba que el fenómeno de la superrotación de las galaxias era universal. Las medidas de la rotación de las partes muy externas de las galaxias, donde la presencia de materia luminosa

estelar es prácticamente inapreciable, usando observaciones de la línea a 21 cm del hidrógeno atómico, confirmaron fuera de toda duda que los datos no podían ser explicados con las leyes de Newton si la masa era solamente la luminosa. La llamada *materia oscura* aparecía también en el mundo de las galaxias como ingrediente mayoritario.

A las componentes estelar, gaseosa y de polvo que se habían ya detectado y que habían guiado las observaciones, se añade ahora la componente oscura que, al igual que en los casos de Neptuno o de la compañera de Sirio, sólo se manifiesta a través de su acción gravitatoria. Sólo que ahora lo que se estaba poniendo de manifiesto, como luego iba a argumentarse, no era una materia simplemente oculta, sino de naturaleza distinta a la habitual.

2.1. Tipos de galaxias. El diapasón de Hubble

Cuando se examinan las imágenes de galaxias relativamente próximas tomadas con un telescopio, como puede apreciarse en la figura 2.2, no es difícil advertir que, en términos generales, las galaxias están constituidas por millones de estrellas de masas y edades diversas, por zonas dominadas por nubes de polvo que absorbe la radiación y por difusas nubes de gas a diferentes

temperaturas, densidades y grados de ionización. Ésa es, de hecho, la definición operativa de galaxia que venimos usando.

Ese examen visual nos revela también, cuando el análisis se sistematiza, que la proporción de cada una de esas componentes, su distribución en la galaxia y, en definitiva, la forma global de la misma varían según patrones bien marcados. En efecto, mucho de lo que se sabe acerca de las galaxias comenzó a cimentarse poco después de su descubrimiento, con la cuidadosa clasificación de su apariencia, tal y como quedaba registrada en las placas fotográficas tomadas con los grandes telescopios de la época. Basándose en esos estudios, Edwin Hubble propuso, en la segunda década del siglo XX, un esquema de clasificación que se usa aún hoy día y que, por su forma, ha recibido el nombre de *diagrama en diapasón de Hubble*, representado en la figura 2.3. En él se distinguen dos categorías básicas: galaxias *elípticas* (E), con una distribución de luz suave, sin estructuras marcadas, y de forma redondeada o elipsoidal (ver figura 2.4), y galaxias *espirales* (S), con forma de disco aplanado, a menudo con una estructura en forma de brazos espirales en él, de ahí su nombre (ver figura 2.2). Las espirales se subdividen en dos grupos: barradas y normales, según tengan o no una estructura en forma de

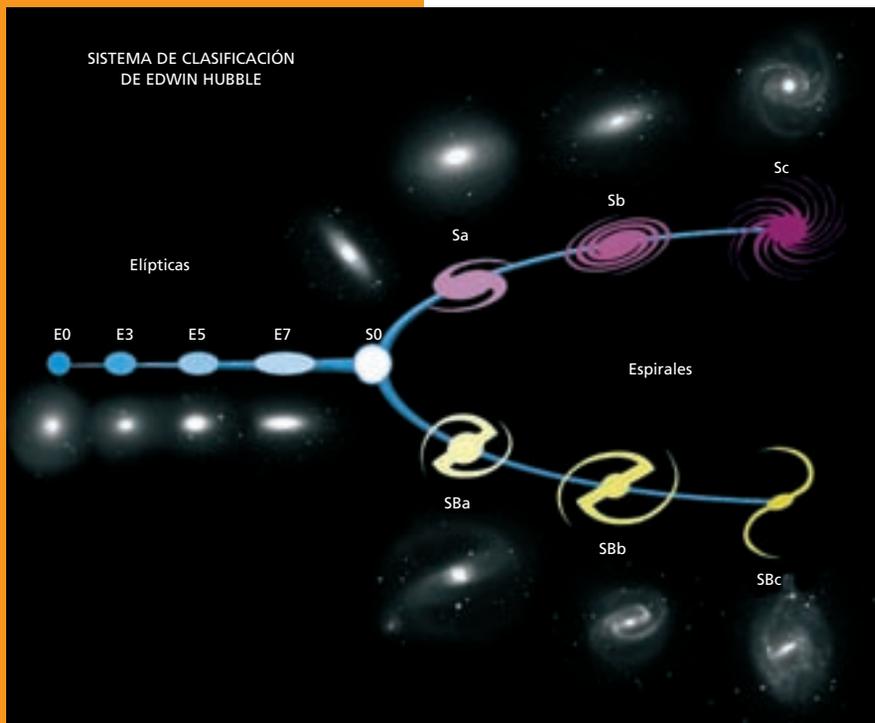


Figura 2.3. Diagrama en diapason de Hubble. Cada tipo morfológico está ilustrado por una galaxia del tipo correspondiente. El número tras la E indica el grado de elipticidad de la imagen, de 0 (esféricas) a 7 (las más achatadas). La letra minúscula tras la S indica el grado de desarrollo de los brazos espirales, creciente de a a c. La mayúscula B indica la presencia de una barra, que se aprecia como una estructura lineal que cruza el núcleo de la galaxia.

barra en la que terminan sus brazos espirales en la zona central (figura 2.5). Todas ellas se subdividen en subtipos, como se muestra en el diagrama de la figura 2.3, que contiene los tipos de galaxias. Las galaxias E se clasifican según su elipticidad (indicado por el número que sigue a la inicial E), mientras que las S se clasifican por el grado de desarrollo de los brazos espirales (indicado por la letra que sigue a la inicial S). Si la

galaxia es barrada, se indica con B. Las galaxias *lenticulares* (L o S0), llamadas a veces espirales sin brazos, fueron añadidas al esquema clasificatorio con posterioridad, para representar galaxias de disco sin estructura espiral evidente. Comparten propiedades intermedias entre las espirales y las elípticas. Finalmente, se añadieron las galaxias *irregulares* (I), de apariencia desordenada y muy poco estructuradas (figura 2.6).

La clasificación de Hubble, basada en la morfología de las distribuciones de luz observadas, ha sobrevivido hasta nuestros días porque fue corroborada con medidas cuantitativas y, sobre todo, porque, como se ha ido poniendo de manifiesto, encierra información importante más allá de la mera descripción cualitativa. Pero su interpretación tiene también restricciones que hay que considerar en cada caso.

Por un lado, las imágenes que sirven para la clasificación son tomadas en una determinada banda espectral, habitualmente en la zona visible del espectro. Ahora bien, la apariencia de una galaxia puede depender muy fuertemente de la ventana espectral seleccionada para su observación. La razón es clara. Las galaxias son entidades complejas, que contienen estrellas de diferentes tipos, luminosidades y edades. Cada tipo de estrellas, como vimos anteriormente,



Figura 2.4. M87 (NGC 4486), galaxia elíptica gigante, la más brillante del cúmulo de la Virgen. Se aprecia la distribución suave de luz que ocupa casi toda la imagen. En sus proximidades se ven otras galaxias que pertenecen al mismo cúmulo, pero de tamaños mucho menores. La galaxia tiene un núcleo central muy brillante, del cual emerge una estructura lineal (un *jet* en la jerga astronómica). El brillo del núcleo y el *jet* atestiguan la actividad nuclear de la galaxia. Imagen tomada con el telescopio JKT en La Palma, Observatorio del Roque de los Muchachos.

tiene su máxima emisión en una región diferente del espectro, de modo que, en cada banda espectral que elijamos para observar, estaremos viendo, preferentemente, una población diferente de estrellas. Así, en las longitudes de onda del ultravioleta y el azul, la luz emitida está dominada por la población de estrellas más luminosas y azules, que son las más jóvenes. Esta



Figura 2.5. Galaxia NGC 1365, prototipo de espiral barrada. Se trata de una galaxia de gran tamaño, con un diámetro del disco de unos 200.000 años luz, situada en el cúmulo de Fornax, en la dirección de la constelación del mismo nombre. Se halla a una distancia de alrededor de 60 millones de años luz. Una barra masiva cruza el disco de la galaxia incluyendo su núcleo. El color rojizo en la imagen indica que está compuesta por estrellas más viejas que las del disco. La perturbación gravitatoria que produce la barra es la causa de la formación de los brazos espirales que emergen de sus extremos. Nótese el color azulado de esos brazos, que indica la predominancia de estrellas jóvenes. Imagen tomada con el telescopio VLT de ESO.



Figura 2.6. NGC 6822 es una galaxia irregular próxima (pertenece al Grupo Local). Sobre un fondo rico de estrellas de nuestra Galaxia se ve un cuerpo central, que semeja una barra, con una mayor densidad de estrellas y una luminosidad neblinosa, que constituyen la galaxia. Aunque no se aprecia estructura, un incipiente brazo se dibuja en la parte derecha de la imagen. Imagen tomada con el telescopio INT en La Palma, Observatorio del Roque de los Muchachos.

población es muy minoritaria en galaxias E, pero domina en algunas S y en las I. En cambio, en el infrarrojo, además de ser mucho menos absorbida por el polvo, la luz aparecerá dominada por la emisión de estrellas más frías y, generalmente, más viejas. Por el proceso mismo de formación estelar en las galaxias, la distribución de las estrellas viejas y de las que se están formando no es necesariamente la misma, por lo que la galaxia puede llegar a presentar un aspecto diferente según la observamos a la luz de las unas o de las otras. Así, sabemos que las estrellas viejas son las que predominan en las galaxias E o en los bulbos centrales de las galaxias S, mientras que los discos y brazos espirales contienen una mayor proporción de estrellas jóvenes, lo que les da un color más azulado.

El polvo interestelar tiene también un efecto en la apariencia de una galaxia, que depende de la longitud de onda, ya que obstruye más eficazmente la luz azul que la roja; en el infrarrojo lejano la emisión producida por el polvo calentado por estrellas, o por la radiación emitida en los alrededores del agujero negro central, puede dominar a todas las demás. A longitudes de onda aún más largas (radiofrecuencias), la contribución estelar puede ser muy débil, y la apariencia de una galaxia vendrá determinada por la radiación sincrotrón (radiación producida por electrones moviéndose a velocidades

relativistas en un campo magnético intenso) o bien por la emisión de hidrógeno atómico neutro.

Además del problema que acabamos de mencionar, existe otro que viene a complicar aún más la situación. Es el llamado *efecto k*, ligado al fenómeno de la expansión del Universo. En efecto, por el hecho de esa expansión, las longitudes de onda de la radiación emitida por una galaxia se observan desplazadas hacia el rojo en un factor $(1+z)$, donde z es la medida de ese desplazamiento. Esto significa que *la región espectral observada corresponde a una región espectral emitida diferente para cada valor de z*. Para ilustrar esta cuestión, consideremos una galaxia lejana, por ejemplo, a $z = 1$. La luz que recibimos en el visible, longitud de onda de 0,55 micras, en realidad corresponde a la luz emitida a $0,55/(1+z) = 0,225$ micras, es decir, en la región ultravioleta del espectro. Pero, como acabamos de decir, el aspecto de una galaxia depende de la región espectral en que se estudie, de modo que el análisis morfológico que podamos llevar a cabo con nuestras observaciones no es directamente comparable con el que hagamos de una galaxia mucho más próxima, salvo que cada una de ellas sea observada en la banda espectral adecuada para que en ambos casos tengamos informaciones equivalentes, es decir, correspondientes a la misma banda espectral emitida.

Este fenómeno se hace patente cuando examinamos una imagen de un campo del cielo que contenga muchas galaxias, como el Campo Ultra-profundo del *Hubble Space Telescope* (figura 2.7). Las galaxias que se acumulan en esa imagen son de tipos distintos y se encuentran a diferentes distancias, es decir, a diferentes valores del desplazamiento hacia el rojo, de modo que esos efectos a los que estamos aludiendo se dan de manera combinada.

Finalmente, hay otra complicación que debemos tomar en consideración para poder entender las formas del mundo de las galaxias. Y es que, dado que el Universo evoluciona, las poblaciones de galaxias evolucionan también, de modo que las que se encuentran más distantes, es decir, a mayores valores de z , son más jóvenes en promedio que las más próximas, puesto que estamos viéndolas en fases evolutivas anteriores. Como suele decirse, mirar más lejos en el espacio es mirar antes en el tiempo, debido a que la luz tarda un tiempo determinado en

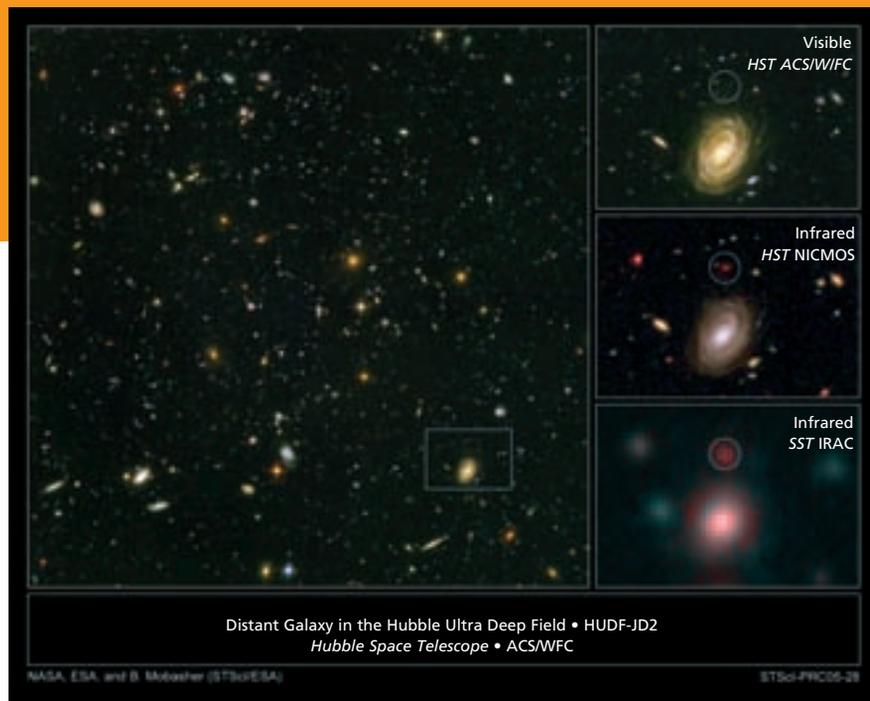


Figura 2.7. Imagen del Campo Ultra-profundo del *Hubble Space Telescope*. Se puede apreciar la variedad de tamaños formas y colores de las galaxias que contiene. La imagen es una combinación de las obtenidas en varios filtros en el dominio visible-próximo infrarrojo (bandas fotométricas B, V y z), con un tiempo de exposición de 11,3 días. Se puede comprobar que algunas galaxias tienen formas clasificables dentro del esquema de Hubble, pero abundan las irregulares. Para poder discernir lo que corresponde a irregularidad intrínseca o lo que corresponde a efecto k , hay que determinar el valor de z para cada galaxia. En los insertos de la derecha se aprecia el detalle de la zona marcada en la imagen principal. Se aprecia, no sólo en la galaxia dominante en la imagen, sino en las más pequeñas también, el cambio de aspecto según se observen en el dominio visible, en el infrarrojo próximo o en el infrarrojo lejano.

traer la información. Así, para una galaxia a una distancia de mil millones de años luz, la información que nos llega corresponde a una etapa evolutiva anterior en mil millones de años a la nuestra.

No es de extrañar, pues, que el esquema de clasificación de Hubble, obtenido en el Universo local, tenga algunas dificultades para describir adecuadamente la morfología de las galaxias lejanas tales como las que nos



Figura 2.8. Galaxias de Las Antenas. Se trata de la colisión de dos galaxias, en proceso de fusión. Las grandes colas visibles en la imagen de la izquierda se han producido en las primeras etapas de la colisión. En la imagen de la derecha, tomada por el *Hubble Space Telescope*, podemos apreciar la complejidad de la zona de choque (delimitada en la imagen de la izquierda por un polígono de color verde), con zonas azules que corresponden a la formación actual de estrellas, y zonas oscuras que corresponden a regiones con alto contenido en polvo y gas molecular, en donde con toda probabilidad se están formando, y se formarán, estrellas posteriormente.

revelan las imágenes más profundas como la que acabamos de comentar. En esas épocas tempranas, las condiciones eran diferentes, una gran parte de la población de galaxias estaba aún en proceso de formación y las condiciones de equilibrio todavía no se habían alcanzado para muchas de ellas. Todo lo cual, unido al efecto *k* que acabamos de describir, hace del estudio de la evolución morfológica de las galaxias un difícil arte, aún no completamente desvelado.

De todas formas, y aun con todas las precauciones necesarias, el esquema en diapason de Hubble, con sus versiones y refinamientos posteriores,

sigue siendo válido y útil en la actualidad. La razón es que permite sistematizar el estudio y su discusión y, sobre todo, que contiene valiosa información física, puesto que traduce el contenido estelar de las galaxias y, por ende, la historia evolutiva de ese contenido. Más aún, como vamos a ver, está íntimamente ligada a las condiciones de equilibrio dinámico, que es diferente para cada tipo de galaxia. Y, finalmente, nos informa también de las condiciones del entorno en que ha evolucionado, puesto que, como se ha determinado, existe una relación entre el tipo morfológico de una galaxia y la densidad de galaxias del entorno en que se encuentra, siendo las elípticas más numerosas en entornos de alta densidad y las espirales, en entornos de baja densidad, en el Universo local.

Estas constataciones, a partir del examen cualitativo de las imágenes, se fueron confirmando a medida que se pudo disponer de datos de calidad suficiente. El análisis cuantitativo de esos datos ha confirmado los aspectos básicos del diagrama en diapason de Hubble. En particular, que existen dos tipos básicos de galaxias, unas que son esferoidales y otras que tienen una estructura característica en forma de disco. De hecho, lo que se constata es que existen dos componentes básicos, de los que ya hemos hablado por ser tan evidentes en las imágenes de las

galaxias, que conforman todas esas galaxias: el bulbo (componente esferoidal) y el disco. El hecho importante es que cualquier galaxia a lo largo de la secuencia de Hubble se puede explicar como una combinación, en proporciones adecuadas, de bulbo y disco. En un extremo, las galaxias E masivas sólo tienen bulbo, mientras que, en el otro, las I sólo tienen un disco apenas organizado (o incluso totalmente ausente en algunos casos de fusiones recientes, ver más abajo), sin presencia de bulbo. Los demás tipos son una mezcla de ambos componentes, de modo que la importancia relativa del bulbo disminuye a lo largo de la secuencia de Hubble, desde las S0 a las Scd.

Si bien la influencia del entorno en la morfología de las galaxias, debido en parte a colisiones e interacciones entre ellas, está bien establecida, es evidente que esos procesos pueden dar lugar en ocasiones a sistemas con formas que, al menos transitoriamente, no pueden

encajarse dentro del esquema de Hubble. En efecto, un simple examen de catálogos de galaxias en interacción nos indica que las colisiones pueden generar una infinidad de formas diferentes, con fuertes asimetrías, estructuras lineales como colas de marea, y modificar la tasa de formación estelar. En la figura 2.8 mostramos la imagen tomada con el *Hubble Space Telescope* de la galaxia de Las Antenas, así llamada por la forma sugerente que tiene. Es obvio que la forma que presenta es debida a la colisión entre dos galaxias, que se está desarrollando ante nuestros ojos.

Los procesos de colisión producen, mientras se desarrollan, violentas redistribuciones de las estrellas y del gas de las galaxias que intervienen, que cobran apariencia de galaxias *accidentadas*. Sin embargo, consideraciones de tipo general nos permiten concluir que esas formas son transitorias y que el resultado final será un sistema relajado, con forma regular esferoidal. La figura 2.9 nos muestra la Galaxia IC1182 en un

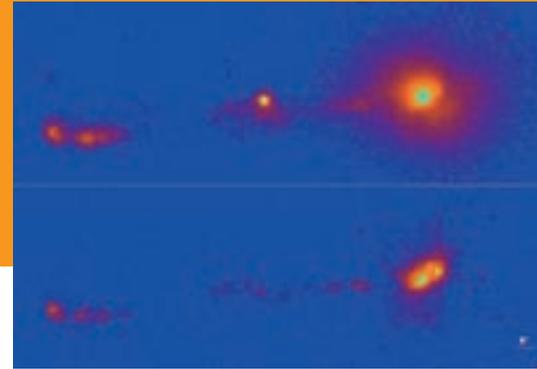


Figura 2.9. Galaxia IC1182, perteneciente al cúmulo de Hércules. La imagen superior está tomada en la luz del continuo estelar. En la parte central de la galaxia se aprecia un núcleo brillante, redondeado y simétrico. La estructura circundante presenta una hendidura en la distribución de luz, a la derecha del núcleo, debida a la presencia de una enorme banda de polvo. Hacia la izquierda emerge una estructura lineal, cuya longitud es varias veces superior al tamaño del cuerpo de la galaxia. Juzgando por este aspecto, la galaxia fue clasificada como S0 peculiar. La imagen inferior está tomada en la luz de la línea de hidrógeno $H\alpha$ y traza el gas ionizado. En ella se aprecian las estructuras de formas diferentes del gas, que revelan la existencia de un proceso violento. La región central de la galaxia aparece ahora con estructura, con varios núcleos. El resultado del análisis permite concluir que se trata de la fusión de dos galaxias, en fase muy avanzada. Mientras las estrellas de ambas galaxias ya han constituido un sistema único relajado, el gas aún mantiene la identidad inicial de las dos galaxias. Las simulaciones indican que el sistema quedará definitivamente relajado, con forma esferoidal regular, en un plazo de tiempo relativamente corto. Mientras, algunos de los nódulos que se ven en la estructura lineal emergente darán lugar a galaxias enanas que se independizarán de la progenitora.



Figura 2.10. Simulación numérica del proceso de aproximación y colisión de dos galaxias espirales. Puede apreciarse cómo en las primeras fases se producen puentes de materia y, finalmente, colas de marea, como las que se aprecian en Las Antenas. En las últimas fases, las galaxias han perdido casi su identidad, para formar un solo sistema que, en fases posteriores, se convertirá en una galaxia relajada, elíptica.

estado más avanzado de fusión que las Antenas; de hecho, en los catálogos aparece como una galaxia de tipo lenticular con la peculiaridad de la larga cola de marea que emerge hasta distancias considerables del centro de la galaxia. Un examen detallado del cuerpo de la galaxia ha puesto de manifiesto que se trata de dos espirales en los últimos estadios del proceso de fusión.

La fusión de dos galaxias espirales de masas similares puede, en conclusión, producir como resultado una galaxia regular con las propiedades fotométricas y dinámicas propias de una S0 o una elíptica discoidal (en la que la rotación aún es importante). Este resultado, que se ha supuesto para explicar la evolución morfológica, desde S hasta E de las galaxias, queda corroborado por las simulaciones numéricas como las que se muestran en

la figura 2.10. Estas simulaciones sugieren que el tiempo necesario para que la galaxia resultante tenga una morfología bien definida no es excesivamente largo y, en consecuencia, el mecanismo ha podido ser operativo, en particular en las épocas en las que la densidad del Universo era mucho mayor que ahora. Cuando hablemos de formación y evolución de galaxias, los procesos de colisión y fusión volverán inevitablemente a ser los protagonistas de la discusión.

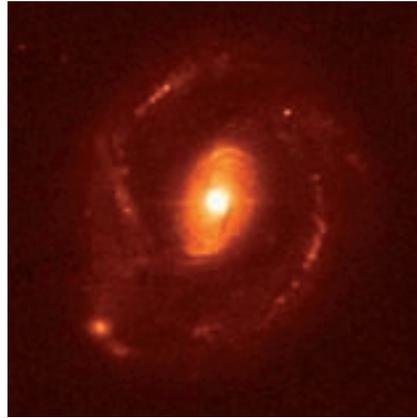
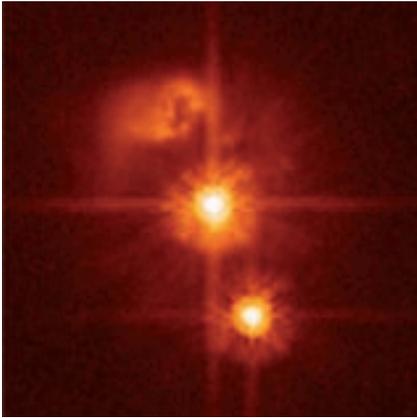
2.2. Las fuentes nucleares de luz no estelar

Una importante novedad en cuanto a la distribución de luz en las galaxias es la de la existencia del fenómeno llamado *Actividad Nuclear*. Aunque revelado por el análisis espectroscópico, en los casos más notorios puede apreciarse en algunas galaxias un núcleo extraordinariamente luminoso, que puede representar una fracción notable de la luminosidad total. La existencia de

tal componente luminosa, con sus peculiaridades espectroscópicas, fue puesta de manifiesto a mediados del siglo pasado por K. Seyfert, con cuyo nombre se bautizaron este tipo de galaxias. Su apariencia puede ser la de galaxias normales, pero las propiedades de sus núcleos planteaban tales problemas de balance energético que hicieron entrar en la escena astrofísica a los *agujeros negros*. Dado que la radiación observada en los núcleos de esos astros no podía explicarse en términos de emisión estelar, hubo que recurrir a esos objetos masivos, capaces de acelerar la materia que cae hacia ellos a velocidades relativistas, lo que permite explicar su origen y sus características.

Abandonamos así el terreno de la radiación térmica, producida en situaciones de equilibrio, por la de la radiación no-térmica, que pone de manifiesto lo que a veces se llama Universo violento, puesto que se produce en procesos violentos, fuera de equilibrio.

Este descubrimiento adquirió su verdadera dimensión cuando años más tarde se descubrieron los llamados



cuásares, castellanización del acrónimo inglés *Quasi Stellar Objects* (QSO), así llamados porque en las imágenes de los telescopios apenas se diferenciaban (o no se diferenciaban en absoluto) de las estrellas. La población extragaláctica se incrementó de esa forma de manera espectacular, a la vez que se iban introduciendo clasificaciones en los tipos de Actividad y aparecían en la literatura científica nombres como BL Lacs (por ser la *estrella* BL Lacertae, de hecho una galaxia E con un núcleo muy activo, el prototipo), *Blazars*, etc., que suponen el extremo superior de la actividad nuclear en galaxias, con núcleos tan extraordinariamente luminosos que dominarían el aspecto global, dejando apenas perceptible la galaxia subyacente.

A pesar de ello, ya en los años setenta se avanzó la hipótesis de que

todos esos astros, con apariencia estelar, eran en realidad los núcleos extremadamente luminosos de galaxias, por otro lado, normales, en el sentido de tener morfologías relativamente regulares y, sobre todo, estar formadas por estrellas. Lo que se ha podido confirmar en la última década, gracias al estudio sistemático de esas fuentes con telescopios espaciales o, desde tierra, usando técnicas que permiten liberarse del efecto emborronador de la atmósfera y aumentar considerablemente la resolución (óptica adaptativa). En la figura 2.11 se muestran imágenes de cuásares con ese tipo de técnicas, que permiten poner de manifiesto la envoltura extensa alrededor del núcleo brillante. El análisis espectral de esa envoltura ha permitido confirmar que se trata de una galaxia de estrellas en todos los casos.

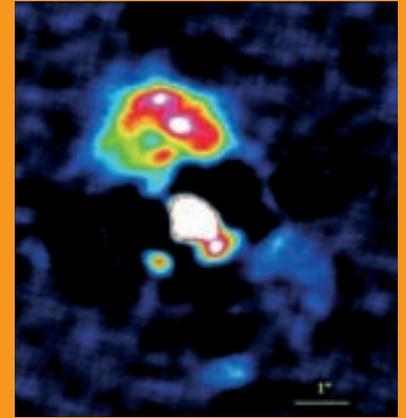


Figura 2.11. Imágenes de los cuásares HE0450-2958 (izquierda) y HE1239-2426 (centro), obtenidas con el HST, y que permiten estudiar las propiedades de las galaxias que los albergan. La imagen de la derecha es del cuásar PKS1700+514 en el infrarrojo cercano, obtenida con el telescopio CFHT en Hawai. La utilización de óptica adaptativa permitió obtener una imagen con resolución de 0,16 segundos de arco, que permite detectar detalles tanto de la galaxia que lo alberga, como de la compañera (de aspecto similar a una espiral con un gran anillo), no distinguibles en las imágenes previas del HST.

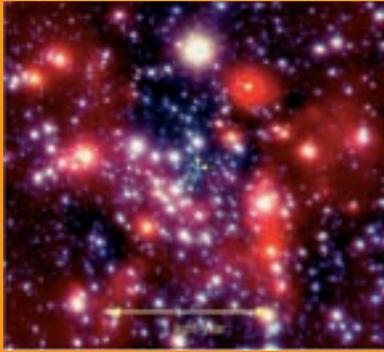


Figura 2.12. Imagen en JHK de las estrellas del centro galáctico.

Las explicaciones que se dan del fenómeno de la Actividad Nuclear se basan en admitir la presencia de un agujero negro masivo en el centro de esas galaxias. Si bien los detalles están por elucidar, argumentos muy generales relacionados con la luminosidad y con las características espectrales de la radiación que emiten esos núcleos de galaxias sugieren fuertemente que esa hipótesis es la más razonable. Hasta el punto de que hoy se admite como idea plausible, apoyada por las observaciones, que todas las galaxias podrían contener un agujero negro en su centro, tanto más masivo cuanto mayor sea el bulbo de la galaxia que lo alberga. El hecho que la Actividad Nuclear sólo se manifieste en un pequeño porcentaje de las galaxias, podría deberse a que, en la mayor parte de los casos, está *inactivo*. Entre los resultados que avalan ese punto de vista (aunque no todavía con la fuerza de una constatación irrefutable), cabe citar en lugar distinguido los que se refieren a los movimientos de las estrellas que se observan en la proximidad del centro de la Vía Láctea.

Gracias al esfuerzo constante y al avance de las técnicas de observación, se han podido establecer las órbitas de algunas de esas estrellas. Conocidas las órbitas, se puede establecer la masa del *objeto* responsable de esos movimientos. La situación está ilustrada en la figura 2.12. De nuevo, aplicando las leyes de

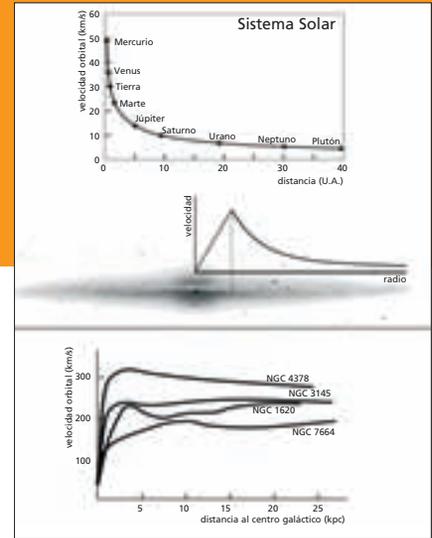
Newton, se puede obtener esa masa, que resulta ser de tres millones de masas solares. Dada esa masa y el tamaño máximo del objeto, se trata sin duda de un objeto masivo y compacto. La idea de que se trata de un agujero negro (poco masivo en este caso) aparece, para muchos especialistas, como la más plausible.

2.3. Dinámica de galaxias. La masa oculta de las galaxias

A la pregunta obvia ¿de qué están hechas las galaxias?, la respuesta que venimos dando es de estrellas, polvo, gas... pero ¿eso es todo? Es cierto que el Universo y sus componentes se nos manifiestan a través de la luz que emiten, pero no hay ninguna de razón para que todo su contenido sea luminoso. ¿Cómo averiguarlo?

Sólo hay una fuerza que afecta a todas las formas de materia y energía, cualesquiera que sean sus propiedades y condiciones: la gravedad. Toda la materia gravita, nos dice la ley universal de Newton; *todo* gravita nos dice la Relatividad General de Einstein, incluso la energía. De modo que sondeando los efectos de la gravedad, a través de su influencia dinámica, podremos poner de manifiesto todo el contenido material de un sistema, sea o no materia luminosa, sea o no similar a la materia habitual de la que estamos hechos.

Figura 2.13. Rotación de un sistema material. En la parte superior se ilustra la disminución de las velocidades orbitales de los planetas en función de la distancia al Sol, de acuerdo con las leyes de Kepler. En el centro, superpuesta a la imagen de una galaxia, se ilustra el resultado esperado para la curva de rotación de una galaxia espiral. En la parte inferior se presentan las curvas de rotación de varias galaxias de tipo S, que ponen de manifiesto un comportamiento inesperado que se interpreta como debido a la presencia de una componente material no-luminosa.



Volvamos ahora a las galaxias. Los dos grandes grupos de galaxias, E y S, del esquema de Hubble no sólo tienen diferentes formas y contenido estelar, sino que también tienen propiedades cinemáticas diferentes. Si nos centramos en las galaxias masivas, en las *elípticas* y en los bulbos de las grandes espirales, los movimientos de sus estrellas que las forman responden al campo de atracción gravitatoria de la propia galaxia, es decir, a su distribución de masa. Desde el punto de vista del equilibrio, podemos decir que la *dispersión de velocidades* de los movimientos de las estrellas compensa y equilibra el campo gravitatorio. En el caso de las galaxias *espirales*, el material en *el disco gira ordenadamente* alrededor del centro, respondiendo y equilibrando al campo gravitatorio de la galaxia. Hay que señalar que, sin modificar ese esquema general, en muchos bulbos y en algunas galaxias *elípticas* menos masivas, en particular en las llamadas *discoidales*, se superponen el movimiento de rotación ordenado y el de dispersión de velocidades.

Como nos enseña la ley de Newton, las masas de las galaxias pueden ser determinadas a través de los movimientos orbitales de sus estrellas o del gas. Empecemos por las *elípticas* en las que, según lo que acabamos de indicar, es necesario medir la dispersión de velocidades de las estrellas para poder determinar la masa. Cuando observamos un espectro de una galaxia E, cada una de las líneas de origen estelar en ese espectro contiene la contribución de cada una de las estrellas individuales que produce esa línea. La situación física es la siguiente: cada estrella individual, de una determinada población, producirá sus líneas espectrales características. Los movimientos de las estrellas hacen que la contribución de cada una de ellas a la línea que apreciamos en el espectro de la galaxia se haga a longitudes de onda ligeramente diferentes en función de su velocidad (efecto Doppler). El resultado, cuando se observa la contribución sumada de todas las estrellas como es el caso, es una línea ensanchada por ese efecto. De modo

que del análisis de esas líneas se podrá obtener la medida de la dispersión de velocidades causante del ensanchamiento. A partir de ahí, estimando previamente el tamaño característico de la galaxia, y aplicando las leyes de Newton, es posible estimar la masa de la galaxia. Naturalmente, ese ensanchamiento será mayor cuanto más masiva sea la galaxia.

En el caso de las galaxias S, que, como dijimos, están en equilibrio gracias a la rotación, habrá que observar algún trazador adecuado (gas ionizado o gas neutro, o estrellas) a diferentes distancias del centro de la galaxia y, utilizando las líneas espectrales para estimar las velocidades por efecto Doppler, determinar la curva de rotación. De nuevo, la aplicación de las

conocidas leyes de Newton nos permiten determinar las masas. La amplitud de la rotación será tanto mayor cuanto más masiva sea la galaxia. Para la Vía Láctea, esta velocidad de rotación, en la posición del Sol, corresponde a 270 km/s.

En la figura 2.13 se presentan las curvas de rotación de varias galaxias S, junto con las previsiones deducidas de la distribución de materia luminosa y los resultados para el Sistema Solar. La figura ilustra claramente el problema del que venimos hablando: tan sólo si admitimos la presencia dominante de materia oscura se pueden interpretar los datos sobre rotación de galaxias espirales.

Aunque ya había indicaciones sobre existencia de *materia oculta* a partir de los análisis dinámicos de cúmulos de galaxias por F. Zwicky, el resultado para las galaxias no dejó de ser sorprendente, ya que, hasta entonces, se suponía que el problema no se presentaba a estas escalas, en las que, en principio, *lo que se medía se podía explicar por lo que se veía*. Desde los primeros trabajos de sistematización del estudio de curvas de rotación de galaxias espirales de Vera Rubin y colaboradores en los años setenta, quedaba patente que no declinaban con la distancia al centro como la distribución de materia luminosa hacía esperar, sino que la forma más habitual es como la que se muestra en

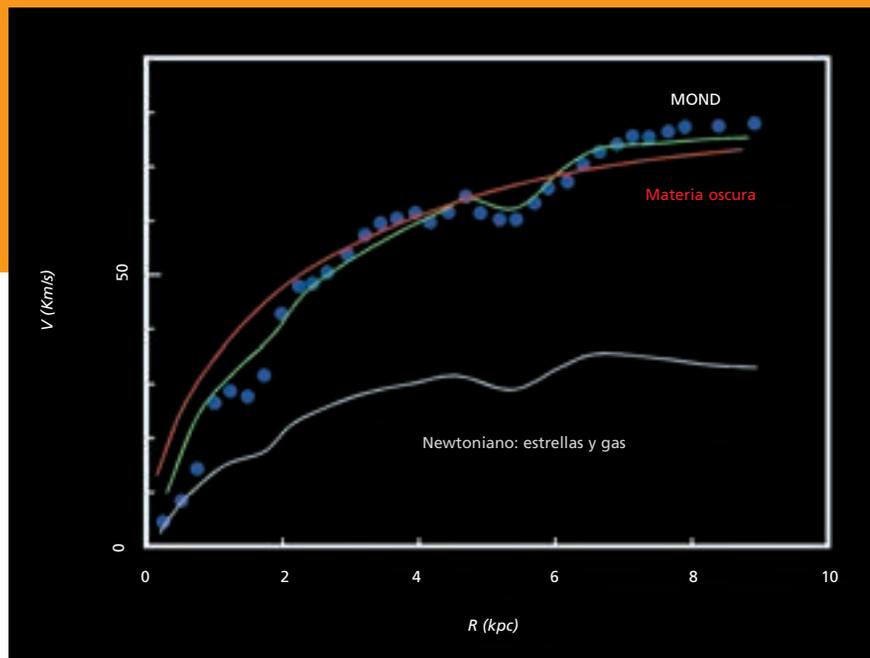
la figura, con un crecimiento rápido en la región central, seguido de una zona en la que la velocidad de rotación permanece prácticamente constante. Obviamente este tipo de comportamiento no puede explicarse si se considera que la distribución de masa en la galaxia es únicamente la contenida en las distintas componentes visibles (estrellas, polvo y gas): la materia en las regiones externas del disco gira mucho más rápido de lo que se espera aplicando las leyes de la gravitación de Newton a este modelo. Es decir, la forma plana de las curvas de rotación indica la presencia de materia que no *brilla* en ninguna de las longitudes de onda observadas, y cuya importancia relativa con respecto a la materia luminosa se incrementa a medida que nos alejamos del centro. Esta *materia oscura* puede llegar a constituir hasta un 90% de la masa total de una galaxia.

Nada nos dice este análisis, sin embargo, sobre la posible naturaleza de la materia oscura, pues sólo tenemos indicación de su existencia a través de sus efectos gravitatorios, que son indiscriminados. No puede descartarse en principio, por medio de argumentos dinámicos, que se trate de materia bariónica, es decir, similar a las de las observaciones cotidianas y a la que constituye las estrellas por ejemplo. Podría tratarse de gas neutro

muy frío, de planetas, de estrellas enanas marrones, o de agujeros negros relativamente poco masivos. No obstante, como se explicará más adelante, hay motivos para pensar que la naturaleza física de la mayor parte de la materia oscura hay que buscarla en algún tipo de partícula no-bariónica (a veces se usa el adjetivo exótica), cuya naturaleza no se ha determinado por el momento.

En todos estos razonamientos dinámicos se admite desde el principio que las leyes de Newton (en tanto que aproximación razonable a la teoría de Einstein) son ciertas en todas las escalas y en la mayoría de las circunstancias. Lo que no es de extrañar, por otro lado, dado el grado de verificación de esa teoría en escalas más pequeñas y de las indicaciones observacionales que, como luego iremos viendo, se acumulan en el dominio de la Cosmología. Dada, sin embargo, la envergadura de las conclusiones a las que conduce, como es en el caso de la dinámica de galaxias, admitir la existencia de una componente material muy dominante sobre la que no tenemos ninguna otra indicación, pronto hubo quien propusiera alternativas a la teoría de Newton, que lograsen evitar esa conclusión. Entre otras, citamos aquí la *Dinámica de Newton Modificada (Modified Newtonian Dynamics, o MOND)*. Se

trata de una propuesta heurística, *ad hoc*, que si bien es capaz de reproducir con precisión las curvas observadas de galaxias enanas (ver figura 2.14), no ha logrado encontrar una explicación unificada para todas las situaciones que requieren la presencia de materia oscura en el marco newtoniano. Además, sólo recientemente se ha logrado una formulación covariante de una teoría de tipo MOND, cuyas consecuencias están por evaluar. Y, aunque la hipótesis de validez de la teoría de Newton (como límite de la Teoría de la Relatividad General aplicable a estas situaciones) y, por tanto, la consecuencia de que existe materia oscura constituye hoy el estándar, el caso es que se mantiene un saludable nivel de debate científico sobre esta cuestión, que implica a astrónomos y a físicos teóricos. De manera fehaciente, el Universo se ha convertido definitivamente, y en la práctica cotidiana de la Ciencia, en el mayor laboratorio imaginable para nuestras concepciones y teorías.



2.4. Formación y evolución de las galaxias

Habiendo caracterizado las principales propiedades de las galaxias, e identificado algunos hitos en su evolución, se traza la cuestión de su formación. El problema se plantea necesariamente en el contexto cosmológico, puesto que el ensamblado de las masas de las galaxias se produjo, según hoy se entiende, por crecimiento de las perturbaciones de densidad iniciales del fluido cósmico. Como ocurre siempre en Cosmología,

Figura 2.14. Curva de rotación de la galaxia de baja masa NGC1530. R (en kiloparsec) es la distancia al centro de la galaxia. Los datos están representados con símbolos azules. La línea blanca es la predicción newtoniana basada en la distribución de materia luminosa. La línea roja es el ajuste del modelo con materia oscura. Finalmente, la línea verde es el ajuste que puede hacerse usando MOND.

cualquier análisis que se haga debe ponerse en la perspectiva de la evolución temporal de las condiciones en que se desarrollan los diferentes fenómenos. Cuestiones como la formación de las galaxias o su evolución son cuestiones básicas de la Cosmología que, aunque los aspectos generales se suponen conocidos, carecen aún de respuesta detallada.

En términos generales, se viene admitiendo que las galaxias se formaron por agregación de bloques de materia (predominantemente oscura) más pequeños, en un proceso de abajo hacia arriba, hasta que se van configurando sistemas (o halos, como se les denomina) cada vez más masivos. A partir de un cierto momento, la materia bariónica se acumula en las partes centrales de esos halos oscuros y acaba por formar estrellas. Ha nacido una galaxia en el sentido habitual que damos a esa palabra, es decir, un gran sistema organizado de estrellas, gas y polvo. Después, por fusión de galaxias u otros mecanismos se van formando galaxias de diferentes tipos. Si tenemos en cuenta que, además de las discrepancias en forma y contenido estelar, las galaxias S y E se diferencian por su cinemática, no es difícil prever que este simple esquema presente algunos problemas. En particular, las galaxias de menor tamaño, esos bloques que al agregarse formarán galaxias de mayor masa y tamaño, tienen

poblaciones estelares que son más azules y jóvenes que el supuesto resultado de su fusión. Para salvar el esquema general habría que invocar mecanismos de rejuvenecimiento del contenido estelar de esas galaxias poco masivas antes de agregarse, o explicar en términos de baja metalicidad en lugar de en términos de juventud. Ambas posibilidades plantean a su vez dificultades, por lo que el problema no está resuelto.

La formación de galaxias esferoidales muy masivas presenta dificultades. Como venimos de apuntar, es un hecho refrendado por las observaciones que, cuanto más masiva es una galaxia, más viejas son las poblaciones de estrellas que contiene. Se han observado recientemente galaxias E muy masivas a alto *redshift* o, equivalentemente, en etapas tempranas de la evolución del Universo, cuyas estrellas eran ya viejas cuando se emitió la luz que ahora observamos. Ahora bien, esas poblaciones estelares son mucho más viejas que las situadas en los discos de las galaxias S o en galaxias menos masivas, por lo que difícilmente podrían haberse formado, ya sea por fusión o por inestabilidad de una espiral inducida por la presencia de una barra, como algunos autores han propuesto, o por ensamblaje de galaxias más pequeñas. Por otra parte, se ha observado que existe un límite inferior natural a la masa de las galaxias

elípticas, de tal forma que las galaxias menos masivas tienen características de galaxias espirales. Estas observaciones, entre otras, indican que en la Naturaleza puede haber otras maneras posibles de formar galaxias elípticas sin pasar necesariamente por una galaxia espiral o por fusión de bloques pequeños, como se explica más adelante, y que probablemente éstas sean las habituales en entornos densos.

Los resultados más recientes empiezan a indicar que, efectivamente, las galaxias más masivas son realmente las más viejas, por lo que se formaron entre las primeras. Más aún, el proceso de formación de galaxias masivas se habría detenido en épocas relativamente tempranas de la evolución, de modo que, por decirlo un poco esquemáticamente, la época de formación de galaxias ha sido tanto más corta (y más temprana) cuanto más masivas son. Estos recientes datos y hallazgos nos indican claramente que los paradigmas de formación y evolución están en un momento de cambio inevitable para que puedan integrar esos datos que se están produciendo en los últimos años.

Del estudio dinámico de las galaxias se concluye que la materia luminosa es sólo una fracción minoritaria de la total. Y, en efecto, la formación de galaxias, fenómeno puramente gravitatorio hasta que la materia está

ensamblada, está dominada por la materia oscura. Pero no quiere eso decir que la materia bariónica, minoritaria, no sea importante. En efecto, una vez agregada toda esa materia que constituye la proto-galaxia, la componente oscura, que apenas interactúa con el resto salvo gravitatoriamente, pasa a tener un papel en cierto modo pasivo. Es la materia bariónica la que irá modificando su distribución. Por ejemplo, en el caso de las galaxias espirales, se irán formando nubes moleculares y, al final, estrellas, conformando la galaxia tal y como aparece en las imágenes. La formación estelar y, como resultado, la masa en estrellas de una galaxia son elementos clave para entender la evolución de las galaxias. La materia luminosa está codificada en la luminosidad de cada galaxia. Como ya dijimos, en cada banda espectral obtenemos información sobre diferentes familias de estrellas, de modo que habrá que analizar la luminosidad en diferentes bandas para obtener una información completa. A partir de ahí, se puede determinar, a grandes rasgos al menos, cuál es la masa estelar y el ritmo de formación de estrellas que ha tenido una galaxia.

Para construir la función de luminosidad, es decir, el número de galaxias por intervalo de luminosidad, se necesita conocer la distancia a cada galaxia para poder deducir sus propiedades intrínsecas a partir de las

observadas. Por eso, muy a menudo se construye para galaxias de un cúmulo, que se encuentran todas a la misma distancia del observador. Los resultados indican, como era de esperar, que hay proporcionalmente muy pocas galaxias de alta luminosidad, mientras que son tanto más abundantes cuanto más débiles. Hay que decir, sin embargo, que la contribución de esas galaxias luminosas al total es muy importante. Y, en cuanto a la forma de esa distribución, si bien la hipótesis de partida es que, en el Universo local, es una función universal, esto no está confirmado, en parte por las dificultades intrínsecas que entraña la determinación de la función de luminosidad. En cuanto a la distribución de colores, se recupera la información proporcionada por el análisis del diapason de Hubble: hay una secuencia roja, cuyo contenido estelar está dominado por estrellas viejas, constituida por galaxias elípticas masivas y lenticulares, y una secuencia más azul, con contenidos estelares mucho más jóvenes, constituida por galaxias espirales e irregulares.

Como consecuencia simple de esta constatación, la *tasa de formación estelar* ha tenido que ser muy diferente para ambas secuencias. Las E y S0 masivas habrían formado casi todas las estrellas inmediatamente, las estrellas más masivas y azules habrían desaparecido en tiempos relativamente cortos y lo que

hoy observamos son las estrellas menos masivas (y más rojas), que evolucionan en escalas de tiempo muy largas. Por su parte, las espirales e irregulares han ido formando estrellas a lo largo del tiempo con ritmo ligeramente descendente o incluso a ritmo constante. El color más azul traduce la presencia de estrellas jóvenes. También esa información está contenida en el diagrama en diapason de Hubble.

La información que obtenemos estudiando una galaxia determinada se refiere a un instante preciso de su evolución. Observamos las poblaciones estelares que contiene en ese momento, pero no su historial. Para poder reconstruir esa historia, se admite que las estrellas se forman en proporciones determinadas según su masa en cada brote de formación estelar. Es la llamada *función inicial de masas*, que representa la fracción de estrellas que se forma en cada intervalo de masa. Esta función también se supone universal, si bien no es un hecho establecido definitivamente. Así, de las estrellas que han sobrevivido hasta un instante dado, podemos deducir cuántas se formaron. Las conclusiones obtenidas de esos estudios se confirman, por los estudios espectroscópicos, que permiten identificar de manera más precisa las poblaciones estelares de las galaxias.

El estudio de la formación y evolución de las galaxias en un marco cosmológico definido pone de



manifiesto el papel fundamental que desempeña la tasa de formación estelar. Si bien no conocemos qué es lo que determina esa tasa, el esquema funciona adecuadamente. De modo que, promediando para poder suavizar las peculiaridades de cada galaxia (en función de, entre otras, las condiciones de contorno), las galaxias serían tanto más jóvenes cuanto más lejos las observamos. La cuestión inmediata es, por consiguiente, ¿cómo son las galaxias lejanas, comparadas con otras más próximas? Ésta es una cuestión difícil de responder porque se requiere estudiar grandes poblaciones de galaxias a grandes distancias, es decir, muy débiles. Sólo recientemente, gracias a los grandes telescopios operativos en tierra y a los telescopios espaciales, entre ellos el *Hubble Space Telescope*, se han podido obtener datos sobre la morfología, luminosidad y distribución espectral de energía en diferentes rangos espectrales

de galaxias a alto corrimiento hacia el rojo. Y aunque no hay una respuesta precisa todavía y, de hecho, han aparecido algunas sorpresas, empezamos a disponer de información como para esbozar ya un esquema evolutivo concreto.

Los resultados obtenidos hasta ahora indican que las proporciones de galaxias de diferentes morfologías cambiaría con el tiempo, tanto en los cúmulos de galaxias como en el campo general. La evolución sería en el sentido de disminuir con el tiempo la proporción de irregulares y espirales a favor de las elípticas y lenticulares. El papel de la interacción gravitatoria en esa evolución parece bien establecido. Sin embargo, este esquema, como apuntábamos, no carece de problemas. Así, por ejemplo, tanto la secuencia azul como la roja, que se han establecido en el Universo cercano, se observan a distancias que corresponden a épocas muy anteriores en

la evolución, de modo que esa bimodalidad en la distribución de los colores de las galaxias se mantiene al menos durante la segunda mitad de la vida del Universo. Con la particularidad de que las galaxias rojas eran más brillantes en el pasado, mientras que sus masas estelares eran menores. El problema está en que, si bien el primer aspecto podría explicarse como debido a la simple evolución de las estrellas formadas en la época inicial, con muy poca o nula formación estelar adicional (lo que se conoce como evolución pasiva), el segundo requiere la adquisición de más masa estelar por canibalismo de galaxias pequeñas rojas, incapaces ya de formar nuevas estrellas. Todo lo cual es indicativo de un desacople entre, por una parte, la formación de las estrellas que constituyen hoy las galaxias elípticas y, por otra parte, la acumulación de masa estelar.



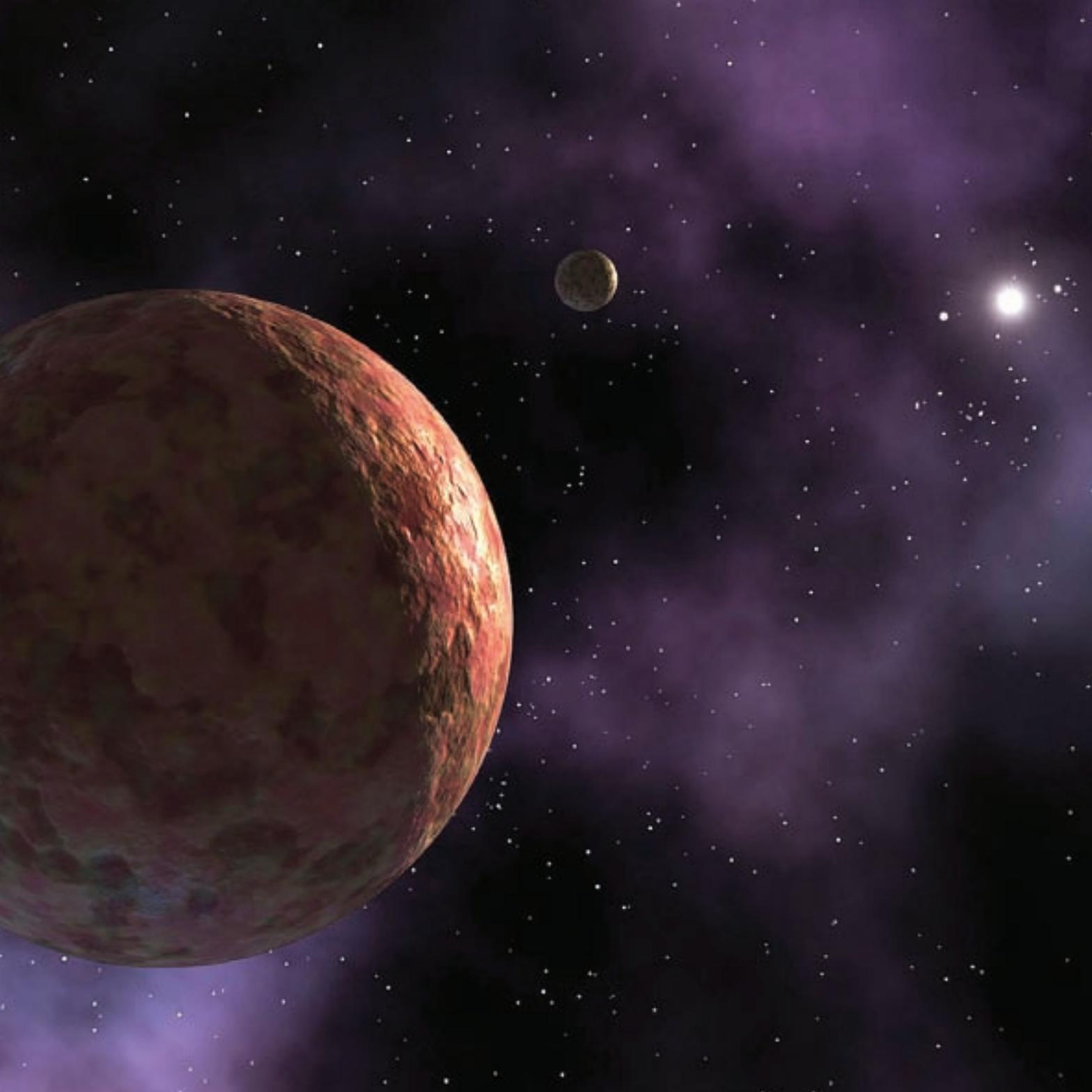
En síntesis, el esquema que parece capaz de contener la información empírica de la que hoy disponemos incluye la idea de que las galaxias más masivas se formaron las primeras, que la formación estelar en épocas remotas sería la consecuencia de procesos de colapso y fusiones, que darían lugar a sistemas mayoritariamente muy brillantes y con formas no relajadas, explicando así la mayor proporción de galaxias irregulares observadas en estas épocas y la mayor frecuencia de sistemas muy brillantes observados a alto corrimiento hacia el rojo. Según este esquema, serían las estrellas que constituyen las galaxias elípticas y, posiblemente también, los bulbos de las galaxias espirales y lenticulares los primeros que se habrían formado. Los discos de las espirales se habrían creado con posterioridad, por acrecimiento de gas que se organizaría, debido a la conservación del momento angular, como un disco plano, y su

posterior transformación en estrellas. Las posibles fusiones posteriores de estos discos estelares serían un camino posible para la formación de galaxias elípticas con estructuras discoidales reminiscentes en primera instancia. Las inestabilidades de esas estructuras de disco darían lugar posteriormente a sistemas paulatinamente más parecidos a galaxias elípticas tales como hoy las conocemos.

Éstas son diferentes sugerencias sobre los grandes rasgos, todavía incompletos, de los procesos que habrían determinado la formación y evolución de las galaxias. Es de señalar que diferentes estudios de simulación, tanto los que usan una aproximación semianalítica como los puramente numéricos, indican que ese esquema podría ser aceptable. No obstante, el origen de la secuencia de Hubble, con sus implicaciones en cuanto formas, contenido estelar y cinemática y las conexiones evolutivas entre los diferentes tipos de galaxias, sigue siendo

un tema de investigación abierto y objeto de debates intensos de los que se esperan resultados importantes en los próximos años.

Habíamos comenzado de manera casi ingenua inspeccionando visualmente las imágenes de las galaxias y construyendo el diapason de Hubble, para llegar finalmente a uno de los problemas candentes de la Astrofísica y de la Cosmología, de cómo se han formado y evolucionado las galaxias. El análisis de la luz emitida por las galaxias cuando el Universo era mucho más joven que ahora, que los avances tecnológicos están haciendo posible, nos permitirá avanzar en el conocimiento de esos problemas y construir un cuadro coherente en el que se integre el crecimiento de las pequeñas irregularidades puestas de manifiesto por el análisis de la radiación de fondo de microondas, como luego discutiremos, hasta formar las galaxias que hoy observamos.



3. Más allá de las galaxias. El Universo a gran escala

Las galaxias aisladas no son frecuentes. La gravedad las hace sociables y se agrupan muy a menudo en estructuras de diferentes tamaños y jerarquías. Si bien el mismo Hubble y sus colaboradores inmediatos pensaban que esas galaxias que acababan de descubrir constituían las *moléculas del fluido cosmológico*, como ellos mismos decían y, por tanto, admitían que su distribución debía ser homogénea e isotrópica, los datos que se iban acumulando empezaron pronto a complicar este esquema. De hecho, el mismo Hubble advertía ya que podría haber dos irregularidades en la distribución de galaxias, ambas no muy alejadas de la dirección del polo norte galáctico. Esas irregularidades correspondían a lo que después se conocería como cúmulos de la Coma y de Virgo, respectivamente. Los datos

hoy disponibles nos permiten ya una buena caracterización de la distribución de galaxias. Y, aunque existen galaxias relativamente aisladas en el Universo, una gran parte de ellas se encuentra formando agregados a los que los astrónomos se refieren con el nombre de *grupos* o *cúmulos de galaxias*. O, incluso, estructuras todavía de mayor tamaño que se engloban en la llamada *Estructura a Gran Escala de la distribución de galaxias*.

Los grupos contienen desde unas pocas galaxias hasta algunas decenas (por ejemplo, los llamados Grupos Compactos contienen típicamente entre 4 y 6 galaxias), mientras que los cúmulos pueden albergar miles; no obstante esa diferencia en contenido, el tamaño típico de grupos y cúmulos es similar en muchos casos: el diámetro de los cúmulos es del orden de unos pocos

Mpc, mientras que el de los grupos presenta un rango más amplio, desde 2 Mpc hasta 200 kpc, que es el valor mediano para los Grupos Compactos. A su vez, los cúmulos de galaxias pueden organizarse formando estructuras todavía mayores que se conocen como supercúmulos, cuya extensión supera las decenas de Mpc. En determinadas regiones del Universo son observables estructuras todavía mayores en forma de *filamentos* y *paredes*, que constituyen un tejido cósmico majestuoso, rodeando grandes vacíos en los que prácticamente no se observa materia luminosa.

Esta descripción de la macroestructura cósmica es el resultado de un esfuerzo observacional considerable llevado a cabo por los astrónomos en los últimos 30 años. Para valorarlo mejor hay que tener en cuenta que, hasta no hace mucho, tan sólo se conocía la posición de cada galaxia sobre el plano del cielo, sin que pudiésemos asignarle una distancia fiable que la ubicase en el espacio tridimensional. De modo que tan sólo podía analizarse la distribución de galaxias proyectada sobre la esfera celeste. Dado que la única forma de asignar razonablemente las distancias a las galaxias es a través de la ley de Hubble, como luego

veremos, se necesita la obtención de espectros de miles de galaxias para poder tener esa imagen tridimensional del Universo. Esto sólo ha sido posible en las dos últimas décadas, gracias al uso de espectrógrafos especialmente diseñados, que permiten obtener datos de muchos objetos simultáneamente. De este modo, se han realizado cartografiados que muestran las grandes estructuras en la distribución de galaxias. La instrumentación astronómica actual permite medir simultáneamente centenares de desplazamientos hacia el rojo, con lo que los catálogos tridimensionales de galaxias han pasado de contener centenares de objetos en la década de los ochenta, a varios miles en la de los noventa, y a centenares de miles en la actualidad. En cualquier caso, dado que la espectroscopia requiere tiempos de exposición comparativamente largos con telescopios grandes, esta acumulación ha evolucionado más lentamente de lo que los cosmólogos quisieran. Es más, por razones obvias, la espectroscopia, para un telescopio y detectores dados, nunca puede llegar tan profundo como la fotometría. Por tanto, hemos visto cómo, en los últimos 20 años, se han desarrollado técnicas que usan la información fotométrica para estimar los desplazamientos al rojo, lo que está permitiendo sondear grandes volúmenes de Universo y, de ese

modo, construir grandes catálogos que posibiliten el estudio de esa distribución en toda su magnitud, así como su evolución con el tiempo cósmico, desde el pasado más remoto hasta nuestros días.

3.1. La vecindad de nuestra Galaxia. El Grupo Local

La mejor manera de ilustrar la tendencia al agrupamiento de las galaxias es empezar por el entorno más próximo a nuestra propia Galaxia que, por no ser una excepción, forma parte de diferentes estructuras según las escalas que consideremos.

Nuestra Galaxia, la Vía Láctea, es miembro de un pequeño grupo formado por una treintena de galaxias (detectadas hasta la fecha) al que conocemos como Grupo Local. Dominan el grupo tres galaxias espirales, la galaxia del Triángulo (M33), la Vía Láctea y Andrómeda (M31). Andrómeda (figura 3.1), la más masiva, es aproximadamente un 50% más luminosa que la Vía Láctea, siendo el objeto del cielo más lejano visible a simple vista. M33 es la menor de las tres y su luminosidad es el 20% de la luminosidad de nuestra Galaxia. Los dos objetos más prominentes, la Vía Láctea y Andrómeda, están separados 0,8 Mpc el uno del otro. Las masas del resto de



Figura 3.1. Andr6meda (M31), situada a una distancia de 2,6 millones de a1os luz, es una galaxia espiral, algo mayor que la V1a L1ctea, y el objeto celeste m1s lejano que podemos observar a simple vista. Hubble, en 1923, demostr6 que efectivamente estaba m1s all1 de los l1mites de nuestra Galaxia y que, por tanto, se trataba de otra galaxia como la nuestra. Junto con la V1a L1ctea domina el Grupo Local, formado por una treintena de miembros, la mayor1a de ellos galaxias enanas. En la fotograf1a se observan dos de ellas, sat6lites de Andr6meda: M32 y M110. Cortes1a de Vicent Peris y Jos6 Luis Lamadrid, imagen de 5 horas de exposici6n tomada desde el Pico del Buitre en Javalambre (Teruel), con un telescopio reflector de 20 cm y c1mara reflex d1gital.

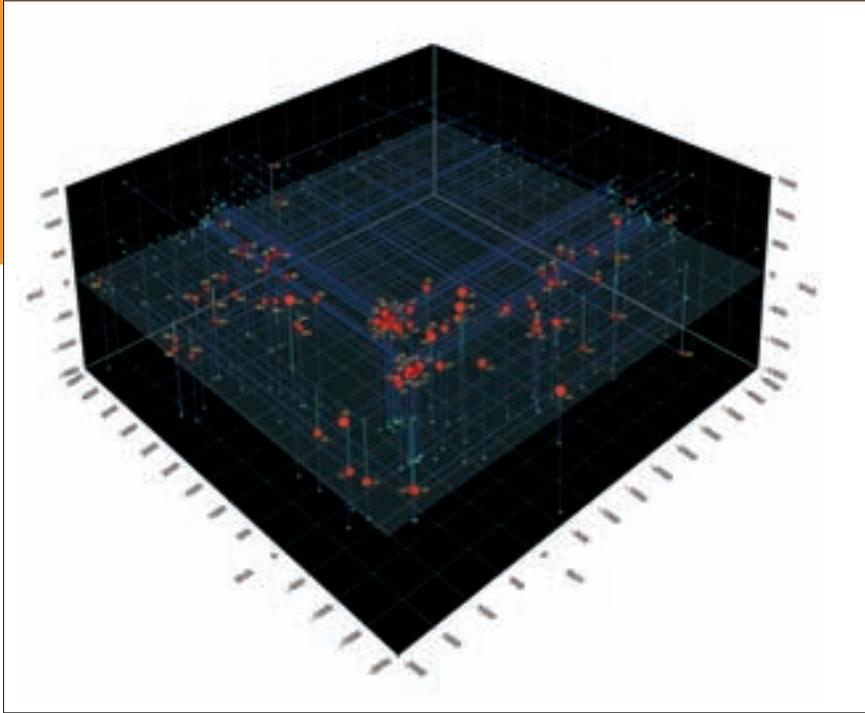


Figura 3.2. En esta representación tridimensional vemos el Grupo Local, junto con otros grupos cercanos similares como el grupo de Maffei o el grupo de Sculptor. El primero queda detrás de las regiones centrales de la Vía Láctea y por eso, pese a su riqueza, su descubrimiento no fue fácil, ya que el polvo, el gas y las estrellas de nuestra Galaxia lo ocultan. El segundo definitivamente influye en la dinámica del Grupo Local debido a su cercanía. Es apreciable su estructura filamentosa. Las galaxias están identificadas con una letra, en función del grupo al que pertenecen: M (Maffei), S (Sculptor), L (Local) y un número correlativo. L11 es Andrómeda y L37 es la Vía Láctea. El sistema de coordenadas utilizado es el supergaláctico. La escala indicada en los ejes son kiloparsecs. El plano supergaláctico está insinuado en gris y las distancias de algunas galaxias a este plano están indicadas con líneas verdes o azules, según estén situadas al norte o al sur del plano. Cortesía de Rami T. F. Rekola, Tuorla Observatory.

las galaxias del grupo son, como mucho, unas diez veces menores que la de la Vía Láctea. El diámetro del Grupo Local es de 2 Mpc y se considera que es un grupo gravitacionalmente ligado, en el que sus miembros se mueven bajo la influencia de toda la masa del grupo. Por esta razón, Andrómeda y la Vía Láctea se están aproximando con una velocidad relativa de 130 km/s, lo que producirá que ambas galaxias eventualmente se fusionen dentro de unos 4.000 millones de años.

Las galaxias del Grupo Local no están distribuidas aleatoriamente (figura 3.2): en torno a las galaxias dominantes se sitúa un enjambre de galaxias satélites. En el caso de la Vía Láctea cabe destacar las Nubes de Magallanes, dos pequeñas galaxias irregulares observables a simple vista desde el hemisferio sur, y que están situadas a unos 50 kpc de la nuestra. Alrededor de Andrómeda giran dos galaxias elípticas enanas M32 y M110 (visibles en la figura 3.1). El resto de los componentes del grupo

son galaxias enanas irregulares (como NGC 6822, ilustrada en el capítulo anterior) o esferoidales muy difíciles de detectar por su escaso brillo superficial, que orbitan en torno a M31, M33, la Vía Láctea, o bien en torno al centro de masas del grupo. Es interesante hacer notar la ausencia de galaxias elípticas de gran tamaño en nuestro entorno local.

3.1.1. El cúmulo de Virgo y el Supercúmulo Local

En la década de 1930, comenzó la tarea de estudiar la distribución de galaxias. El procedimiento inicial fue fotografiar grandes áreas del cielo con los telescopios de mayor diámetro del momento y con tiempos de exposición muy largos. En 1932, Harlow Shapley y Adelaide Ames publicaron un catálogo con las posiciones en el cielo de 1.250 galaxias. Sus imágenes pusieron en evidencia la existencia de regiones donde la concentración de galaxias era superior a la media. En particular, el cúmulo de Virgo es la característica dominante de este catálogo. Se trata de una concentración formada por aproximadamente 1.500 galaxias que cubre un área del cielo de $10^\circ \times 10^\circ$. Se encuentra a una distancia de unos 20 Mpc y en su centro predominan las galaxias elípticas, siendo M87 (ilustrada en el capítulo anterior), la mayor de todas (figura 3.3). Las

galaxias espirales se sitúan fundamentalmente en el halo que rodea el centro del cúmulo. Como consecuencia de la enorme masa que contiene el cúmulo, muchas de las galaxias que lo constituyen se mueven con grandes velocidades peculiares, que pueden alcanzar los 1.500 km/s con respecto al centro de masas del cúmulo. Este hecho produce que aquellas galaxias que se mueven en el seno del cúmulo en dirección a la Tierra presenten desplazamiento hacia el azul, en lugar de hacia el rojo.

El cúmulo de Virgo tiene una forma bastante irregular y ocupa la posición central del llamado Supercúmulo Local, del cual forma parte también nuestra Galaxia y todo el Grupo Local (aunque ciertamente en la periferia). El supercúmulo, con un diámetro aproximado de 30 Mpc (figura 3.4), está formado por miles de galaxias, pero se puede afirmar que no es un sistema gravitacionalmente ligado: se trata de una agrupación poco estructurada de diferentes grupos y cúmulos, junto a regiones de más baja densidad. Recientemente, hemos podido comprobar que el propio Supercúmulo Local forma parte de una estructura aún mayor, dominada por una enorme concentración de masa que se ha venido a llamar Gran Atractor, hacia la que el supercúmulo está cayendo. Su detección ha sido solo posible gracias al estudio de los movimientos coherentes



Figura 3.3. El cúmulo de Virgo ocupa una amplia región del cielo. En este mosaico de $2^\circ \times 1,5^\circ$ podemos observar la parte central del cúmulo, dominada por la galaxia gigante M87 (la más brillante en el panel izquierdo de la imagen), rodeada por un enjambre de pequeñas galaxias. A la derecha (oeste) podemos observar en la parte superior una cadena de galaxias, conocida como cadena de Markarian, de la que las más brillantes son dos galaxias lenticulares, M84 y M86. En la imagen pueden contarse cientos de galaxias, que pertenecen al cúmulo. Cortesía de NOAO/AURA/NSF.

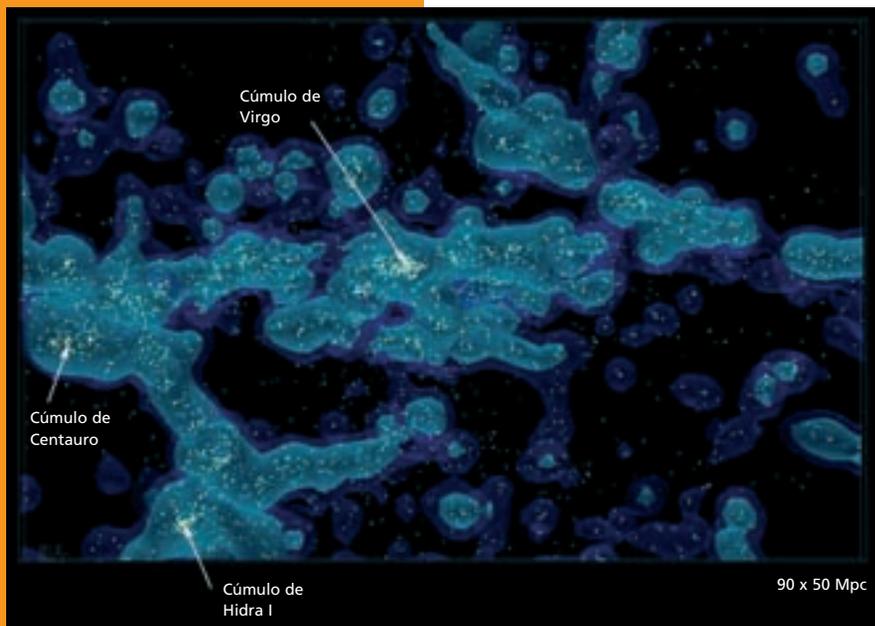


Figura 3.4. El Supercúmulo Local, cuyo centro se sitúa en el cúmulo de Virgo. En esta representación cada galaxia se indica por un punto, mientras que las superficies semitransparentes azules delimitan regiones donde la densidad en la distribución de galaxias es mayor. Cortesía de Brent Tully (Universidad de Hawai).

a gran escala de muchas galaxias, pues el centro de este enorme aglomerado galáctico, que contiene 5×10^{16} masas solares, está escondido detrás del velo que produce el polvo del disco de nuestra propia Galaxia.

3.2. Cúmulos de galaxias. Poblaciones galácticas y la influencia del entorno

Entre los primeros astrónomos que avanzaron la idea de que las galaxias deberían presentarse asociadas en estructuras cabe citar a Zwicky y su

imponente cartografiado del cielo con el telescopio Schmidt de 48 pulgadas de Monte Palomar. Fue, sin embargo, George Abell, quien, siguiendo la estrategia de Shapley y Ames, hizo el primer estudio sistemático y publicó en 1958 un catálogo que contenía 2.712 cúmulos de galaxias. Ese resultado se obtuvo como conclusión del análisis de alrededor de 1.000 placas fotográficas de $6^\circ \times 6^\circ$, en las que Abell fue identificando las regiones en las que se ubicaban las concentraciones de galaxias más sobresalientes, los cúmulos. Este método puede producir detecciones espurias, ya que por efecto de proyección se puede considerar que diferentes galaxias, situadas aproximadamente en la misma línea visual, constituyen un cúmulo, aun cuando estén realmente a diferentes distancias y, por tanto, no se encuentren ligadas físicamente. Abell era consciente de este efecto y fue muy meticuloso y exigente a la hora de considerar lo que debería ser un cúmulo.

Los cúmulos de galaxias y el mundo de la estructura a gran escala entraban así en escena. El catálogo de Abell permitió iniciar toda una serie de estudios sobre las propiedades y características de estos inmensos sistemas, clasificarlos según su riqueza y su aspecto global, motivando los análisis dinámicos de cuyos resultados vamos a hablar enseguida. Era toda una

nueva etapa la que se abría a la Astrofísica y la Cosmología, que se veían impulsadas a tener que considerar la agrupación de las galaxias a escalas antes no imaginadas. Los cúmulos conducían de manera natural al estudio de supercúmulos, grandes filamentos y vacíos, es decir, al descubrimiento, caracterización y estudio de la estructura a gran escala.

Ya hemos visto que existen diferentes tipos de galaxias: espirales, elípticas, lenticulares, etc. El propio Hubble era ya consciente de que existía una correlación entre el tipo morfológico y la densidad del entorno cuando afirmaba que “en los cúmulos todos los tipos de galaxias se encuentran representados, pero, contrariamente a lo que pasa en el campo, los tipos más tempranos y, especialmente, las galaxias elípticas predominan”. Las observaciones actuales no dejan ninguna duda acerca de que las zonas más densas en el interior de los cúmulos tienden a albergar galaxias elípticas y lenticulares, como hemos visto en el caso del cúmulo de Virgo (M84, M86, M87), mientras que las galaxias espirales se encuentran preferentemente en regiones de más baja densidad o en los grupos pequeños, como hemos visto en el caso del Grupo Local (Andrómeda y la Vía Láctea). Esta segregación morfológica, que pone de manifiesto una estrecha influencia entre las propiedades del

entorno y las de las propias galaxias, debe ser consecuencia de la evolución cósmica. Por el momento los astrónomos no se han puesto definitivamente de acuerdo sobre cómo ha tenido lugar esta evolución: no está claro, por tanto, si la relación entre morfología y densidad está asociada a las fases iniciales de la formación de estructuras, o es consecuencia de la evolución galáctica, condicionada por el entorno, en la que eventualmente las galaxias pueden transformarse de un tipo morfológico a otro.

3.3. Masa de los cúmulos. Cómo pesar lo invisible

En la medida en que los cúmulos de galaxias sean sistemas gravitacionalmente acotados, su dinámica traducirá directamente la masa total que contienen. Ante los primeros resultados, la discusión se centró en primer lugar sobre su estado dinámico, habiendo astrónomos que cuestionaban su estabilidad. Dado que las conclusiones que se obtengan dependen precisamente de si están estabilizados o no, ése es un punto crucial. Finalmente, con la acumulación de datos que se ha ido produciendo, queda patente que al menos las partes centrales de los cúmulos están estabilizadas y las consecuencias del estudio dinámico son inapelables: la

mayor parte de la masa de los cúmulos de galaxias es no-luminosa. Pero vayamos por partes.

3.3.1. La masa luminosa. Galaxias y gas caliente intracumular

La primera opción para determinar la masa de un cúmulo es sin duda la de sumar las masas de las galaxias que lo componen. El proceso no es simple por varias razones. En primer lugar, hay que determinar cuáles son las galaxias que pertenecen realmente al cúmulo. Como ya hemos apuntado, determinar el desplazamiento hacia el rojo y, de ahí, la distancia a cada galaxia es un trabajo muy costoso en tiempo de telescopio y esfuerzo. De modo que en el mejor de los casos sólo se dispone de esa información para una fracción de las galaxias de un cúmulo dado. Para obviar este problema se recurre a técnicas estadísticas que nos permiten obtener la población del cúmulo de manera suficientemente precisa para los propósitos que perseguimos. Por las mismas razones, tampoco es posible disponer de la masa de cada galaxia, de modo que hay que obtenerla de manera indirecta. El parámetro que suele usarse es la de la relación Masa-Luminosidad, M/L . De los estudios individuales de diferentes galaxias se puede obtener valores representativos de dicho parámetro para los diferentes tipos de galaxias. De esa forma, al estudiar un

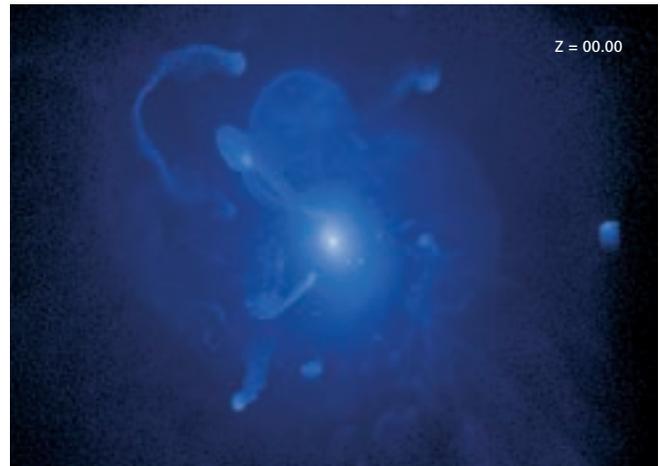


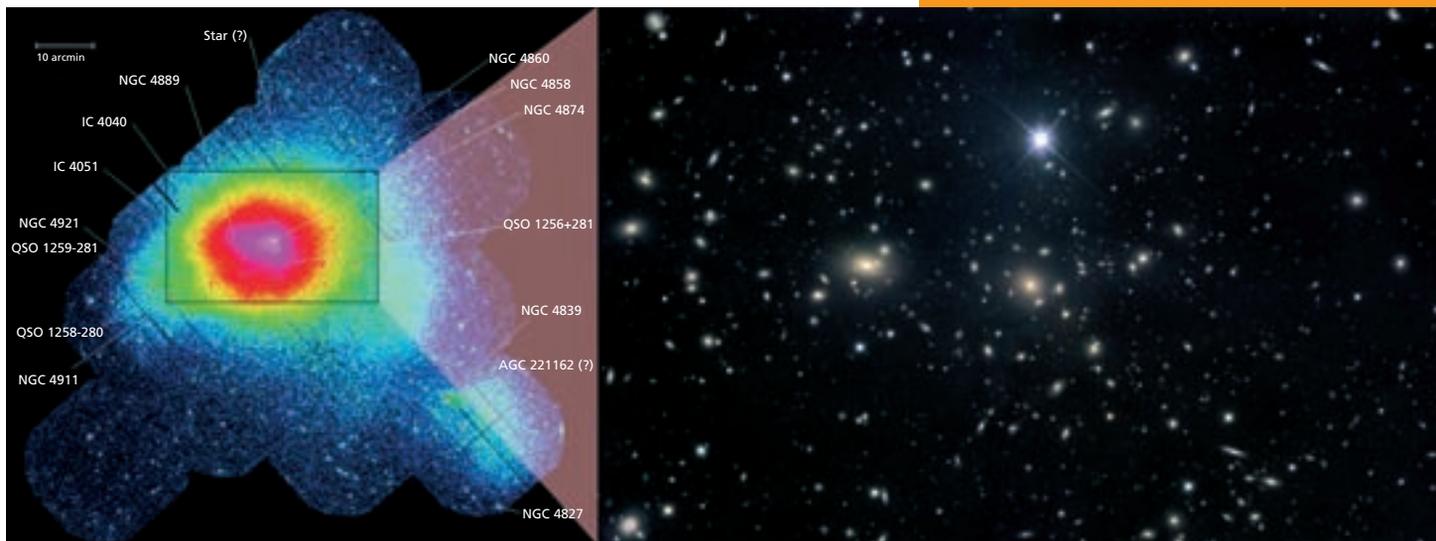
Figura 3.5. Estas dos figuras muestran la distribución de la materia oscura (izquierda) y el gas (derecha) en un cúmulo de galaxias simulado numéricamente. Es muy apreciable la diferencia entre ambas distribuciones. Mientras que la materia oscura presenta una gran subestructura, con miles de pequeños objetos del tamaño de galaxias individuales, el gas se distribuye de forma difusa. Aquellos objetos que caen al cúmulo por efecto de su atracción gravitatoria pierden su gas formando "colas de marea" como consecuencia de la presión que ejerce el gas que hay en el interior del cúmulo. El tamaño físico de la imagen es de unos 3 Mpc. Cortesía de Yago Ascasíbar.

cúmulo de galaxias, podemos transformar las luminosidades medidas en masas estimadas y obtener la masa total del cúmulo.

Motivado por los resultados de sus análisis (que veremos a continuación), Zwicky había conjeturado que la materia necesaria para poder explicar la dinámica de los cúmulos, si bien no era luminosa en las bandas espectrales en las que se había medido, podría quizás manifestarse en otras regiones espectrales, por estar en condiciones físicas muy diferentes. Podría estar en forma de estrellas muy frías y polvo, que se manifestarían en el infrarrojo, o en forma de gas muy caliente, cuya emisión habría que buscar en la región de los rayos X. Los datos ulteriores han mostrado que la contribución a la masa

total del gas caliente es muy importante. Pero para ello hubo que esperar a los telescopios espaciales capaces, al evitar la atmósfera, de observar en esas longitudes de onda del espectro electromagnético.

Las razones físicas que se dieron en aquel momento para prever la presencia de gas caliente en los cúmulos de galaxias son relativamente directas y se explican a continuación. Las galaxias que forman un cúmulo están en un medio de alta densidad, en el que las colisiones y las interacciones son frecuentes. En algunos casos se produce una fusión, como vimos para IC1182 (que pertenece al cúmulo de Hércules), y el gas de cada galaxia se convierte muy rápidamente en estrellas. En muchos otros, esa interacción arranca



grandes cantidades de gas de las galaxias, que pasa al medio intergaláctico dentro del cúmulo. Este gas queda por su parte atrapado dentro del campo gravitatorio del cúmulo, calentándose a las temperaturas que corresponden a la dispersión de velocidades, es decir, decenas o centenares de millones de grados. Este tipo de argumentos llevan a concluir que debe existir una gran cantidad de materia a esas temperaturas en el cúmulo y, más importante aún, que debe haber una gran cantidad de materia oscura que mantenga atrapado este gas tan caliente. En los últimos años, las simulaciones numéricas de formación de cúmulos de galaxias en un

contexto cosmológico, que incorporan gas y sus procesos de calentamiento y enfriamiento, sugieren que el gas caliente de los cúmulos sea, en su mayor parte, gas primordial calentado por choques hidrodinámicos que siguen al colapso y, en su caso, a las fusiones que dieron lugar al cúmulo (figura 3.5). A esas temperaturas, los átomos más ligeros (como el hidrógeno y el helio) están totalmente ionizados, es decir, han perdido todos sus electrones, mientras que los átomos más pesados (magnesio, silicio, hierro, etc.) consiguen conservar alguno de los electrones más internos.

El *plasma* que se forma en el cúmulo emite intensamente en el

Figura 3.6. En la imagen de la derecha podemos observar una imagen en el óptico del cúmulo de la Coma situado a unos 100 Mpc de nuestra Galaxia. Se trata de un cúmulo compacto con más de mil galaxias. En la imagen de la izquierda se muestra un mosaico realizado a partir de 16 exposiciones del telescopio espacial en rayos X, XMM Newton. Sobre esta imagen se ha situado un rectángulo que corresponde al campo de la imagen en el óptico. Algunas fuentes puntuales pueden ser detectadas, debido al extraordinario poder colector del telescopio, e identificadas como galaxias del cúmulo. La intensidad de la radiación X se ha representado con falsos colores, siendo mayor en el centro del cúmulo. La imagen proporciona también una clara visión de la estructura del cúmulo, mostrando cómo las galaxias en torno a NGC4839, en la parte inferior derecha, se están moviendo hacia el centro del cúmulo. Cortesía de Jim Misti (óptico) y U. Briel, MPE Garching, y ESA (rayos X), MPE Garching, y ESA (rayos X).

dominio de rayos X, tanto por el frenado de los abundantes electrones libres que circulan por el medio a elevadísimas velocidades al tropezarse con los iones, como por las líneas de emisión que emiten los átomos pesados cuando uno de los escasos electrones que han retenido cambia de nivel energético. En ambos casos se produce una emisión de fotones muy energéticos en rayos X que permite tener una visión completamente diferente de los cúmulos de galaxias: son áreas difusas y extensas en las que la emisión en rayos X demuestra la existencia de grandes nubes de gas caliente e ionizado, con temperaturas del orden de 10^7 K, llenando el espacio que dejan las galaxias en el seno del cúmulo (figura 3.6).

Las características y distribución de esa emisión reflejan las condiciones generales del cúmulo y, en particular, su estado dinámico. En efecto, el plasma intracumular está en condiciones de equilibrio hidrostático, lo cual significa que su presión contrarresta la acción de la gravedad (al igual que ocurre en el interior de las estrellas). Gracias a las técnicas de observación en rayos X, los astrónomos han sido capaces de medir la presión del gas en los cúmulos, combinando la medida de su temperatura —reflejada en el espectro de emisión— y de la densidad del gas que se deriva de la intensidad de los rayos X

emitidos. Al conocer la presión, la hipótesis de equilibrio hidrostático (que debe mantenerse en el cúmulo, ya que en caso contrario se observarían grandes movimientos del gas, algo que no se ha detectado en 50 años de observaciones) nos permite obtener no solamente la masa total del cúmulo, sino también la forma en la que está distribuida dentro del mismo.

Como conclusión, hoy sabemos que *la mayor parte de la materia luminosa de un cúmulo de galaxias se encuentra en forma de gas caliente intracumular*, siendo la masa encerrada en las galaxias una pequeña fracción tan sólo de la misma.

3.3.2. La masa dinámica

Venimos repitiendo que la masa luminosa no es suficiente para explicar el estado de los cúmulos o, en otras palabras, que es inferior a la masa dinámica necesaria para mantenerlos en equilibrio. ¿Cómo se mide la masa de un cúmulo? Como ya apuntamos al hablar de las galaxias elípticas, el equilibrio dinámico de un sistema como un cúmulo requiere que las galaxias se muevan como las abejas en un enjambre (como se ilustra en la figura 3.7), compensando de ese modo el potencial gravitatorio. Puesto que las velocidades de las galaxias son consecuencia de la influencia gravitatoria ejercida por toda la masa

del cúmulo, si somos capaces de medir esas velocidades, podremos estimar esa masa. Más exactamente, podemos decir que la distribución de velocidades está relacionada con la energía cinética (K) y la masa total del cúmulo y su distribución espacial con la energía potencial (U), y en un sistema gravitacionalmente ligado y en equilibrio, la relación entre ambas viene determinada por el teorema del virial ($2K + U = 0$). Conociendo la extensión del cúmulo y la dispersión de velocidades —cantidad que nos dice cuál es la rapidez media con la que se mueven las galaxias dentro del cúmulo— y aplicando el teorema del virial, podemos determinar la masa total del cúmulo.

Como ya hemos apuntado anteriormente, en la década de 1930, el astrónomo suizo Fritz Zwicky pudo determinar la dispersión de velocidades del cúmulo de la Coma, ilustrado en la figura 3.6, situado a unos 100 Mpc, midiendo los desplazamientos hacia el rojo de 8 galaxias. Admitiendo que las galaxias están en un sistema en equilibrio, la media de las velocidades correspondientes a esos valores de z representaría el sistema en su conjunto, mientras que las diferencias individuales con respecto a esa media darían las velocidades de cada galaxia en el sistema. De ese modo, se puede obtener la *dispersión de velocidades*. El valor encontrado era 1.000 km/s. Por otro

lado, Zwicky razonó que la masa total del cúmulo sería, como antes dijimos, la suma de las masas de todas las galaxias, que estimó a partir de sus luminosidades. Aplicando el teorema del virial, encontró que esa masa, la luminosa, era muy inferior a la que se necesitaría para mantener el sistema en equilibrio. De modo que, o había que abandonar la idea de que el cúmulo estuviese en equilibrio (lo cual plantea más problemas de los que resuelve) o era forzoso concluir que una gran parte de la masa del cúmulo estaba, en palabras de Zwicky, oculta.

Esta conclusión, con los reajustes numéricos debidos al refinamiento de las medidas, se mantiene en toda su extensión: la masa luminosa de los cúmulos asociada a las galaxias es muy inferior a la masa dinámica total, de la que a lo sumo representa un 5%. Cuando se incluye también la masa luminosa en rayos X, es decir, la del gas caliente intracumular, que es mayoritaria, el resultado final es que *la masa luminosa del cúmulo no supera el 20% de la masa total*. El 80% restante

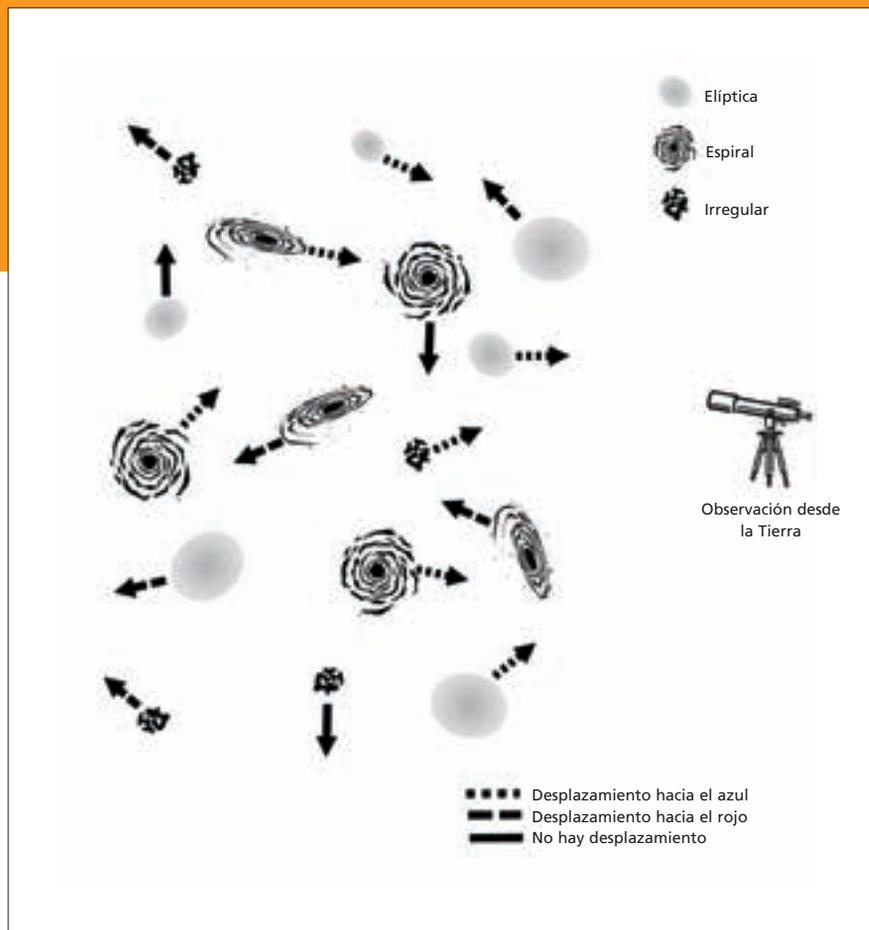


Figura 3.7. Un observador puede detectar la componente en la línea visual de las velocidades peculiares de las galaxias que forman parte de un cúmulo, midiendo los desplazamientos hacia el rojo de cada una de las galaxias individuales. Con ello podemos obtener una medida bastante fiel de la dispersión de velocidades y estimar la masa total del cúmulo como hizo F. Zwicky. A partir de una figura de E. Chaison y S. McMillan 2002, *Astronomy Today*, Prentice-Hall, Inc.

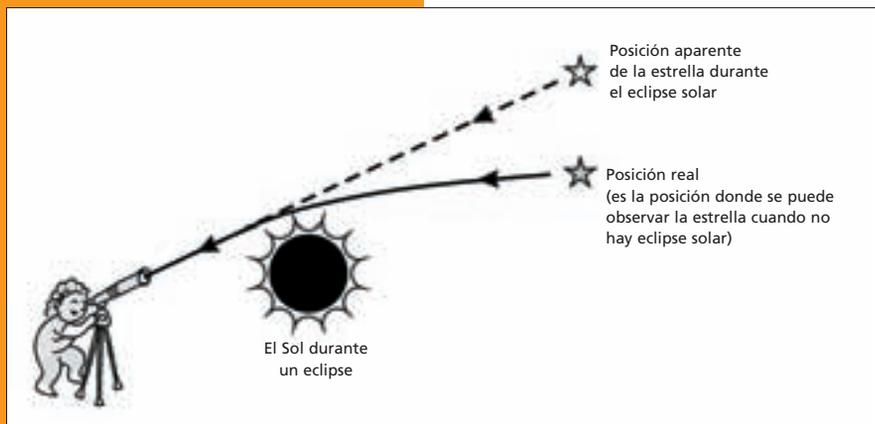


Figura 3.8. En este esquema se muestra cómo los rayos de luz de una estrella distante se doblan cuando pasan por las proximidades del limbo solar. Esta deflexión sólo podía observarse aprovechando un eclipse total de Sol, en el que la Luna oculta el disco solar. Durante los minutos que dura el eclipse, la posición de la estrella se observa desplazada respecto a su posición cuando el Sol no está presente.

constituye la llamada materia oscura que, como luego veremos, tiene que ser de naturaleza diferente a la bariónica.

3.3.3. Otra forma de medir las masas. El efecto lente en cúmulos de galaxias

Existe otro método completamente diferente para estimar la masa total de los cúmulos que está basado en el efecto producido por la acción gravitatoria sobre los rayos luminosos. Además de afectar el movimiento de los cuerpos materiales, la fuerza de la gravedad también influye en la trayectoria de los rayos de luz, algo que el propio Isaac Newton conjeturó en 1704 cuando se preguntaba en su libro de Óptica: “¿No actúan los cuerpos sobre la luz a distancia, y por esta acción tuercen sus rayos; y no es esta acción [...] más fuerte a distancias menores?”. Hoy

sabemos que los rayos de luz se desvían bajo la acción de la atracción gravitatoria ejercida por un cuerpo. Esto es lo que se conoce como el *efecto lente gravitatoria*.

Einstein, con su teoría de la Relatividad General recién estrenada, calculó la desviación de la luz de una estrella lejana producida por la masa del Sol cuando pasa cerca de su superficie. El ángulo de deflexión debería ser muy pequeño: 1,74 segundos de arco. Para medirlo era necesario aprovechar un eclipse total de Sol y comparar la posición de las estrellas en torno al limbo solar durante el eclipse con la posición de esas mismas estrellas cuando el Sol no se encontraba en su línea visual (figura 3.8). Una expedición liderada por Arthur Eddington a la Isla de Príncipe en la costa oeste de África y a Sobral en Brasil para observar un eclipse total de Sol en 1919 sirvió para confirmar que la predicción de Einstein se cumplía. Supuso el primer triunfo público de la Teoría de la Relatividad General.

En 1937 Zwicky fue de nuevo el primero en predecir que este fenómeno provocaría la amplificación y distorsión de la luz de galaxias lejanas al ser observadas a través de un objeto masivo, y en proponer la utilización de este efecto para medir la masa de cúmulos y galaxias (figura 3.9). La fuerza de este método consiste en que los rayos de luz de objetos lejanos sienten la acción de toda masa

contenida en la lente, sea ésta oscura o visible, y es, de hecho, la única forma que conocemos para medir directamente la masa total de un objeto cósmico sin intermediarios.

Los astrónomos tuvieron que esperar, sin embargo, casi medio siglo para observar el fenómeno predicho por Zwicky. El fenómeno causado por las lentes gravitatorias ya había sido puesto de manifiesto con el estudio de imágenes dobles de cuásares, y a mediados de la década de 1980 se pudo demostrar fehacientemente que se trataba de imágenes múltiples de un mismo cuásar, mostrando cómo las curvas de luz de ambas imágenes eran exactamente iguales pero desplazadas en el tiempo, debido a la diferencia de camino óptico entre ambas.

Confirmación en la que se participó activamente desde el Observatorio de Calar Alto. Hacia la misma época, el aumento extraordinario de sensibilidad que supuso el uso generalizado de cámaras CCD en los grandes telescopios hizo posible que se descubrieran varias estructuras

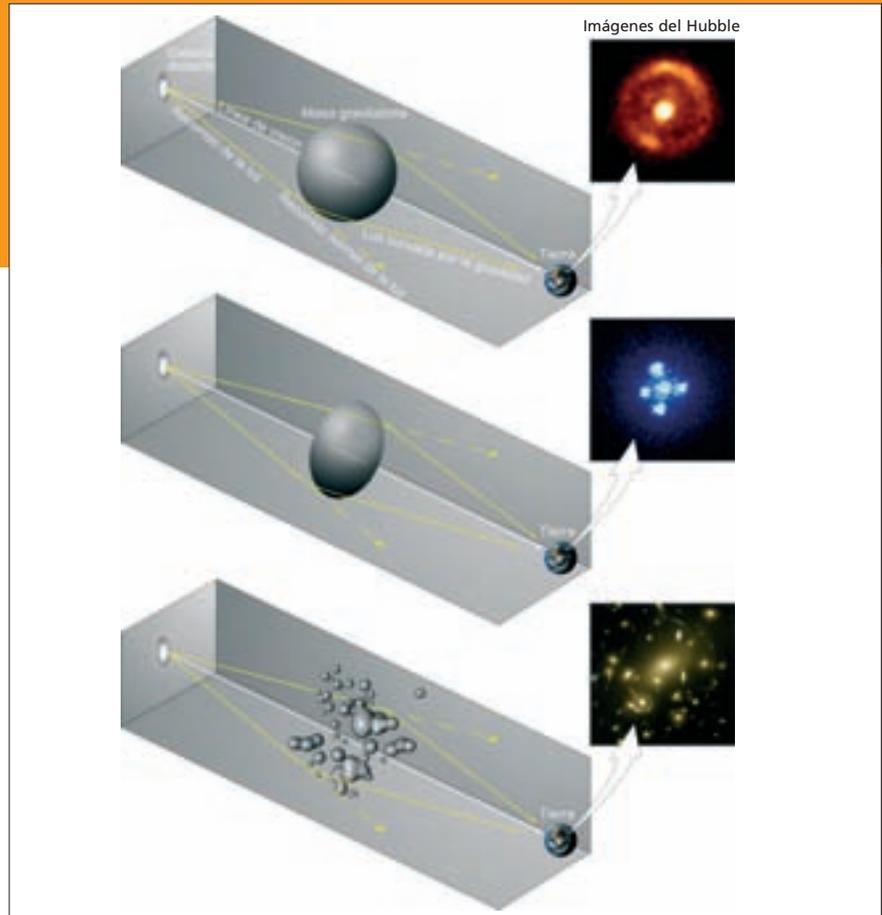


Figura 3.9. En este esquema se muestra cómo actúa una lente gravitatoria, aquí representada por un solo cuerpo, pero que ciertamente podría ser un cúmulo de galaxias. El efecto que produce la lente dependerá de la posición relativa entre lente, objeto y observador. A veces se producen anillos, como el llamado anillo de Einstein, B1938+66, ilustrado en la imagen superior derecha (la galaxia-lente es el disco brillante que se ve en el centro del anillo, imagen del HST). La imagen del medio corresponde al caso de múltiples imágenes, cuatro en este caso, producido por la lente G2237+030, conocido como la cruz de Einstein. Para que se produzca esta multiplicación de imágenes es necesario que la lente, el receptor y el emisor estén perfectamente alineados. En general se producen imágenes más complejas, en forma de arcos, como los que se observan en el caso de la deflexión producida por cúmulos de galaxias, como se ilustra en la imagen inferior. Cortesía de ESA.

alargadas, con forma de arco, en la parte central de algunos cúmulos de galaxias masivos. Hubo una considerable polémica sobre su naturaleza hasta que los datos espectroscópicos probaron que estos objetos no pertenecían al cúmulo, sino que se trata de objetos lejanos, situados a distancias mucho mayores que la del propio cúmulo, cuyas imágenes están distorsionadas por el efecto lente producido por el propio cúmulo. En muchos casos, las lentes gravitatorias incrementan notablemente el brillo aparente de las fuentes remotas, de manera semejante a como lo hace una lente óptica, haciendo visibles objetos que de otro modo no lo serían, debido a que son demasiado débiles para ser detectados.

Si bien la detección y medida puede ser muy difícil y compleja, la física del efecto lente es relativamente simple y, por lo tanto, la interpretación de las observaciones es relativamente directa. Es fácil imaginar que cuanto mayor es la masa de la lente gravitatoria, mayor es el ángulo de deflexión de las trayectorias de los rayos de luz. Por otro lado, la configuración objeto-lente-observador dará también lugar a diferentes tipos de distorsiones y de imágenes múltiples. Así, una lente esférica perfectamente alineada con el objeto emisor y el observador, produce una estructura característica llamada *anillo de Einstein*, mientras que una

lente elíptica también perfectamente alineada produce una *cruz de Einstein*, como se ilustra en la figura 3.9.

Hoy en día se han detectado cerca de un centenar de lentes gravitatorias, y este efecto se ha convertido en una herramienta fundamental para *pesar* e incluso medir la distribución de materia en los cúmulos de galaxias, herramienta que también se aplica, con el mismo fin, a grupos de galaxias o a galaxias elípticas individuales. Dado que el efecto es tanto mayor cuanto más grande y más concentrada está la materia de un cúmulo, los candidatos ideales son aquellos más masivos. Una vez seleccionados, deberemos buscar las imágenes distorsionadas que corresponderán a objetos situados muy lejos, detrás del cúmulo. En la práctica requiere de observaciones muy precisas y de alta calidad. Desde el punto de vista del análisis, también se requieren métodos muy elaborados, ya que la lente gravitatoria que desvía la luz está formada por todas las componentes de masa del cúmulo, lo que puede producir un resultado muy complejo con imágenes múltiples de un mismo objeto en muchas ocasiones. Reconstruyendo el rompecabezas que suponen estas múltiples visiones de un mismo objeto y estudiando la distorsión de otros menos afectados por la masa del cúmulo, se puede ponderar la cantidad total de masa

que contiene, e incluso la forma en la que está distribuida.

La necesidad de resolución y calidad de imagen hacen del *Hubble Space Telescope*, sobre todo tras la instalación de la *Advanced Camera for Surveys* (ACS), el instrumento ideal para obtener los datos que requieren esos análisis. El HST ha proporcionado imágenes de gran interés científico, e incluso de indudable valor estético, que han permitido a los astrónomos aplicar este método con grados de precisión probablemente nunca soñados ni por la fértil imaginación de Zwicky (figura 3.10). Todos los análisis prueban, sin ninguna duda, la existencia de materia oscura en la parte central de los cúmulos de galaxias.

Estos estudios, que en los últimos años están en razonable acuerdo con los obtenidos a través de la emisión de rayos X y de los estudios dinámicos, permiten afirmar que el perfil de masa observado de los cúmulos de galaxias está en buen acuerdo con el modelo estándar de distribución de la materia oscura. Las masas estimadas por el método del efecto lente gravitatoria son compatibles con las de los otros métodos y tiene la ventaja adicional que no hace ninguna hipótesis sobre el estado del cúmulo y, además, proporciona una estimación directa de la masa total del cúmulo ya esté constituida por galaxias, gas o materia oscura.

Los cúmulos también nos permiten realizar un importante test cosmológico: la medición de la cantidad de bariones en el Universo. La mayor parte de los bariones o *materia normal*, de la que estamos hechos nosotros y los objetos que nos rodean, se encuentra en forma de gas caliente que emite en rayos X. Ésta supone, como máximo, alrededor de un 15-20% de la masa total del cúmulo. La masa en estrellas, incluyendo todas las contribuciones posibles, es menos de un 5%, y las observaciones parecen mostrar que la cantidad de gas difuso y frío que no emite en rayos X es muy pequeña, alrededor de un 0,1% de la masa total. *En resumen, alrededor del 20% de la masa del cúmulo está formada por bariones.*

3.4. El Universo a gran escala

3.4.1. Grandes estructuras: observaciones

Como se indicaba en la introducción de este capítulo, desde la década de 1980 se han ido construyendo cartografiados de amplias regiones del cielo, midiendo los desplazamientos al rojo de miles de galaxias, creando así auténticos mapas tridimensionales de la estructura a gran escala del Universo trazada por la distribución de galaxias. La primera “rebanada del Universo” publicada en



1986 contenía aproximadamente 1.000 galaxias en un ángulo sólido de 120° en ascensión recta y 6° de declinación, con una profundidad de unos 200 Mpc. Era el catálogo del Center for Astrophysics de Harvard, que sorprendió a la comunidad astronómica por la presencia de estructuras (filamentos, paredes y vacíos) casi tan grandes como el propio volumen cartografiado (figura 3.11). Estos catálogos están limitados en flujo, es decir, son completos en la

Figura 3.10. El cúmulo de galaxias Abell 1689 situado a unos 730 Mpc ($z=0,18$) visto por la cámara ACS a bordo del *Hubble Space Telescope*. Los arcos que se observan entre los centenares de galaxias que conforman el cúmulo son imágenes múltiples de galaxias individuales situadas mucho más lejos que el propio cúmulo. Su luz ha sido distorsionada y amplificada por toda la masa del cúmulo, actuando como una lente gravitatoria. Cortesía de NASA, N. Benítez (JHU), T. Broadhurst (The Hebrew University), H. Ford (JHU), M. Clampin (STScI), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO/Lick Observatory), el ACS Science Team y ESA.

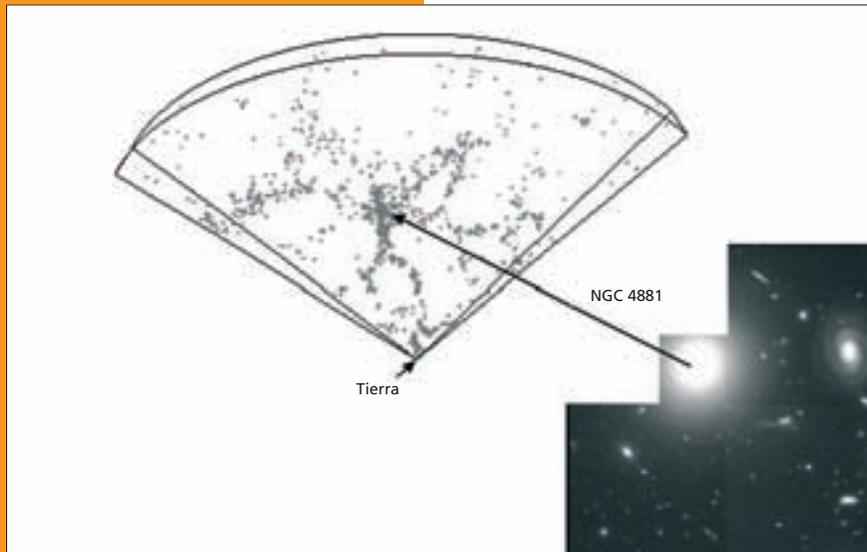


Figura 3.11. En este esquema vemos cómo se realizan los cartografiados que muestran la distribución de galaxias a gran escala. La galaxia NGC4881, en el cúmulo de la Coma (ver figura 3.6), presenta un desplazamiento hacia el rojo de $z = 0,024$, que corresponde a una distancia de 100 Mpc. Obteniendo el desplazamiento hacia el rojo de cada una de las galaxias presentes en esta “rebanada” del Universo, V. de Lapparent, M. Geller y J. Huchra obtuvieron en 1986 este mapa tridimensional de la distribución de galaxias.

región del cielo que observan hasta una magnitud aparente límite, lo que implica que no son homogéneos con la profundidad: a grandes distancias, sólo las galaxias intrínsecamente más brillantes pueden detectarse, lo que puede sin duda introducir sesgos y extraños efectos en la distribución observada.

A partir de este momento se siguieron diferentes estrategias observacionales para construir estos cartografiados cósmicos: o bien se decidía cubrir una región amplia del cielo y se sacrificaba la profundidad, o bien en una pequeña área del cielo se sondeaba hasta grandes distancias. Los proyectos más recientes han tratado de cubrir regiones amplias con una

profundidad del orden de 1.000 Mpc, como en el caso del *Two-Degee Field Galaxy Redshift Survey* (2dFGRS), realizado con un espectrógrafo multifibra instalado en el telescopio anglo-australiano de 3,9 m y que ha medido el desplazamiento hacia el rojo de aproximadamente 250.000 galaxias, o en el del *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS), realizado con un telescopio de 2,5 m situado en Nuevo México y dedicado en exclusiva a este proyecto. Su objetivo es cubrir aproximadamente la mitad del cielo y al final contendrá cerca de 1.000.000 de galaxias con un desplazamiento al rojo de hasta 0,25.

El tejido cósmico revelado por estos cartografiados nos muestra una estructura filamentosa, en la que supercúmulos del tamaño de algunas decenas de Mpc se organizan en torno a regiones vacías, con un diámetro que puede alcanzar los 60 Mpc, en las que la densidad de galaxias es muy baja (figura 3.12). Los cúmulos de galaxias más ricos se sitúan en los nodos de esta red cósmica, siendo éstos los lugares de mayor densidad, mucho mayor que la densidad en los filamentos, que solamente son dos o tres veces más densos que los propios “vacíos”. Las estructuras mayores alcanzan un tamaño de 200 Mpc, mientras que a partir de esta escala el Universo empieza a ser más homogéneo, en el sentido de que volúmenes de este diámetro contienen porciones de Universo que

son muy semejantes entre sí, independientemente de su ubicación (figura 3.13).

Para caracterizar estadísticamente la distribución de galaxias se utilizan diferentes cantidades que describen la tendencia al agrupamiento, la amplitud de las fluctuaciones de densidad a diferentes escalas, o la presencia de determinadas características morfológicas en la estructura a gran escala como filamentos, paredes, etc. Uno de los estadísticos más utilizados es la función de correlación a dos puntos, $\xi(r)$, que mide cómo se agrupan las galaxias reales en comparación con una distribución que fuese completamente aleatoria, de modo que $\xi(r) > 0$ indica exceso, mientras que $\xi(r) < 0$ indica defecto en el agrupamiento si se compara con una distribución aleatoria. El análisis de los catálogos tridimensionales de galaxias ha mostrado que la función de correlación sigue una ley de potencias de la forma $\xi(r) \propto (r/8 \text{ Mpc})^{-1.8}$, para $r < 30 \text{ Mpc}$. El denominador de la cantidad entre paréntesis es la llamada longitud de correlación, $r_0 = 8 \text{ Mpc}$. Su interpretación es la siguiente: a 8 Mpc de una galaxia cualquiera, la densidad es, en promedio, el doble de la densidad media de galaxias en el Universo. A escalas inferiores a esta distancia, la densidad aumenta considerablemente, siguiendo una ley de potencias, atestiguando la tendencia

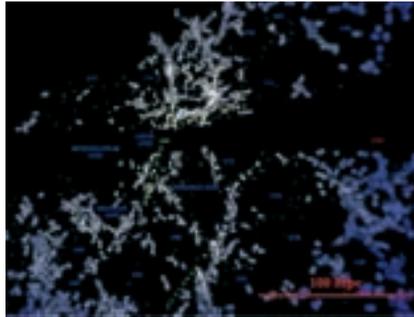


Figura 3.12. Una región del catálogo 6dF marcada por la presencia de varios "vacíos" de gran diámetro. Cortesía de A. Fairall.

al agrupamiento característica de la macroestructura cósmica.

Recientemente se ha detectado que a escalas de 140 Mpc la función de correlación presenta un marcado máximo local, como una pequeña elevación que rompe la tendencia marcada por la ley de potencias (figura 3.14). Este pico corresponde a lo que se conoce como oscilaciones bariónicas, directamente relacionadas con la correlación entre fluctuaciones de temperatura que se miden en la radiación cósmica de fondo, de las que hablaremos en el capítulo siguiente. Este nuevo dato de observación concuerda con la teoría de formación de estructura cósmica y con la densidad de materia bariónica que se determina a partir de los estudios de radiación cósmica de fondo y de la núcleo-síntesis primordial, aportando así una nueva fuente de estudio para caracterizar las propiedades del Universo.

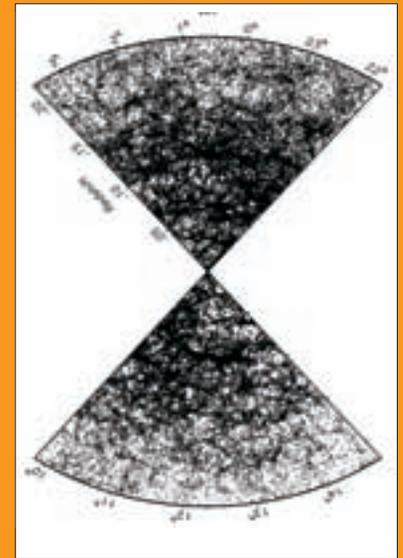


Figura 3.13. La distribución de galaxias en el catálogo 2dGRSF. La profundidad de esta muestra alcanza los 900 Mpc. En estas dos rebanadas hay 250.000 galaxias. La jerarquía de estructuras no continúa de forma ininterrumpida, sino que a escalas suficientemente grandes los patrones que forman las macroestructuras cósmicas son semejantes en cualquier parte del Universo y la distribución de galaxias se hace relativamente homogénea.

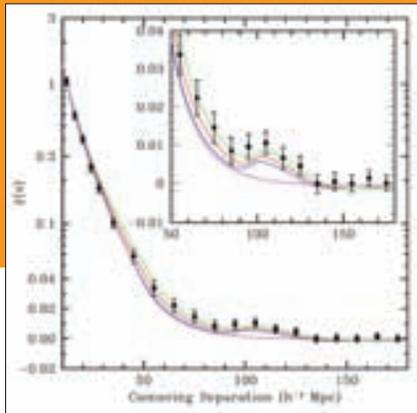


Figura 3.14. La función de correlación a dos puntos de las galaxias del SDSS, mostrando el comportamiento de ley de potencias y el pico acústico bariónico a unos 140 Mpc (h es la constante de Hubble en unidades de 100 km/s Mpc $^{-1}$ y su valor determinado observacionalmente es aproximadamente 0,72).

3.4.2. Grandes estructuras: simulaciones

Como ya se ha indicado anteriormente, la formación de las galaxias y de los cúmulos se produce por amplificación gravitatoria de pequeñas fluctuaciones de densidad. Este escenario se conoce como crecimiento por inestabilidad gravitacional, en el cual las pequeñas perturbaciones crecen por colapso gravitatorio atrayendo la materia circundante, en un proceso de agrupamiento gravitacional en el que se va formando una intrincada red tridimensional de filamentos que enlazan concentraciones de masa en torno a los futuros cúmulos de galaxias, mientras que, al mismo tiempo, se produce evacuación de materia de los grandes vacíos.

La densidad en las galaxias es hoy en día miles de veces superior a la

densidad media del Universo, pero en el Universo primitivo el contraste de densidad entre las regiones más densas y las menos densas era extraordinariamente pequeño, como reflejan los valores de las anisotropías en la radiación cósmica de fondo que estudiaremos en el próximo capítulo. Las teorías de formación de estructura han de explicar cómo se ha pasado de una situación casi homogénea, con pequeñas perturbaciones en la densidad, a la distribución de galaxias observada actualmente, con fuertes contrastes. Para valores pequeños del contraste de densidad, podemos perturbar las ecuaciones que gobiernan un Universo homogéneo e isótropo y calcular analíticamente su evolución. Mediante ciertas aproximaciones, podemos incluso adentrarnos en contrastes de densidad mayores, lo que técnicamente se conoce como el régimen no lineal. Así, por ejemplo, la formación de la red tridimensional de filamentos con nodos masivos, mencionada en el párrafo anterior, se puede explicar en el marco del llamado

modelo de Adhesión. Se trata simplemente de añadir un término de viscosidad al popular *modelo de Zeldovich* (incorrectamente llamado de los *pancakes*), que actuaría sólo en las —inicialmente— pequeñas regiones donde hay grandes variaciones de velocidad en el fluido cósmico, o, equivalentemente, densidades extraordinariamente altas, que se conocen como *singularidades* o *cáusticas* en lenguaje matemático. Esta viscosidad evita el cruce de capas inherente al modelo de Zeldovich, produciendo la adherencia de la masa en torno a estas semillas de gran densidad. El modelo de Adhesión permite saber aproximadamente dónde y cuándo van a aparecer las cáusticas, pero no permite saber nada acerca de la distribución de masa dentro de los objetos que se forman por agrupamiento gravitatorio. El modelo de Press-Schechter y sus modificaciones permite calcular, de forma probabilística, los perfiles de densidad de masa de los cúmulos de galaxias si se asume simetría esférica.

Para conocer la distribución de masa en el régimen no lineal de una forma realista, incluyendo los filamentos y sus nodos o cúmulos, es necesario utilizar simulaciones numéricas de N cuerpos. Estas simulaciones nos permiten estudiar la evolución de las perturbaciones de densidad y la formación de las grandes estructuras observadas.

Los primeros métodos numéricos integraban las ecuaciones de movimiento de N partículas, haciendo una suma directa de las fuerzas entre cada par, lo que resulta ser muy costoso computacionalmente cuando se pretende utilizar valores grandes de N para hacer las simulaciones más realistas. Por otro lado, dado que no puede decirse que el Universo tiene una frontera, las condiciones de contorno deben formularse de manera adecuada. De modo que en estas simulaciones se usan condiciones de contorno periódicas, lo que resulta difícil de programar con algoritmos de sumas directas de las fuerzas. En la década de los ochenta, se introdujeron métodos basados en mallas de puntos, de manera que la evolución de la densidad se calcula sobre los nodos de esa red. Estos procedimientos son computacionalmente más eficientes y, además, en ellos las condiciones periódicas de contorno son fáciles de implementar. El tamaño de la celda limita la resolución espacial en este tipo

de algoritmos. Más tarde se introdujeron métodos que combinaban las dos estrategias o que incluso utilizaban mallas con celdas de diferentes tamaños, adaptándose a la densidad local, de manera que se utilizan mallas más finas en las regiones de mayor densidad. El progreso en la capacidad de computación y en la adecuación de los algoritmos ha permitido que se elaboran modelos donde N se acerca al billón.

Queda claro que las simulaciones pueden proporcionarnos la distribución de la materia que, como hemos visto ya, es fundamentalmente oscura. De modo que el resultado de las simulaciones no es en principio comparable con los resultados extraídos del análisis de los catálogos de galaxias, que sólo contienen información sobre la materia luminosa. Por otro lado, dado que la materia oscura se supone que sólo interacciona gravitatoriamente, podemos confiar en que las simulaciones den una buena representación de su distribución. Para comprender el origen y la dinámica del gas caliente observado, por su emisión en rayos X, en los cúmulos de galaxias, es preciso incorporar gas a las simulaciones y describir su evolución mediante las ecuaciones de la hidrodinámica y de la termodinámica, que permiten estudiar su calentamiento y enfriamiento. Esto complica enormemente el cálculo, debido sobre

todo a la aparición de discontinuidades u ondas de choque en el fluido. Gracias al dramático desarrollo de la capacidad de cálculo y memoria de los ordenadores y sus nuevas arquitecturas, así como al desarrollo de nuevos métodos para la integración de las ecuaciones de la hidrodinámica (como el llamado *Smooth Particle Hydrodynamics* (SPH), o los basados en el algoritmo de Godunov), hoy resulta factible realizar simulaciones cosmológicas en grandes volúmenes incorporando el gas.

El paso siguiente es analizar el comportamiento de la materia bariónica para poder llegar a identificar las galaxias en nuestras simulaciones. Para obtener detalles de lo que ocurre a escalas menores, en las que la materia bariónica puede ya jugar un papel destacado, es necesario introducir otros procesos que son relevantes a esas escalas: la formación de estrellas y sus consecuencias energéticas y de enriquecimiento químico del medio, mediante, por ejemplo, las explosiones de supernovas y los vientos de las estrellas masivas. La complejidad de estos mecanismos y fenómenos es tal que por el momento la disciplina se encuentra en estado que podríamos llamar incipiente. La mayor parte del trabajo es, de hecho, un formidable reto para el futuro inmediato. La importancia del problema y el progreso creciente en la tecnología de los

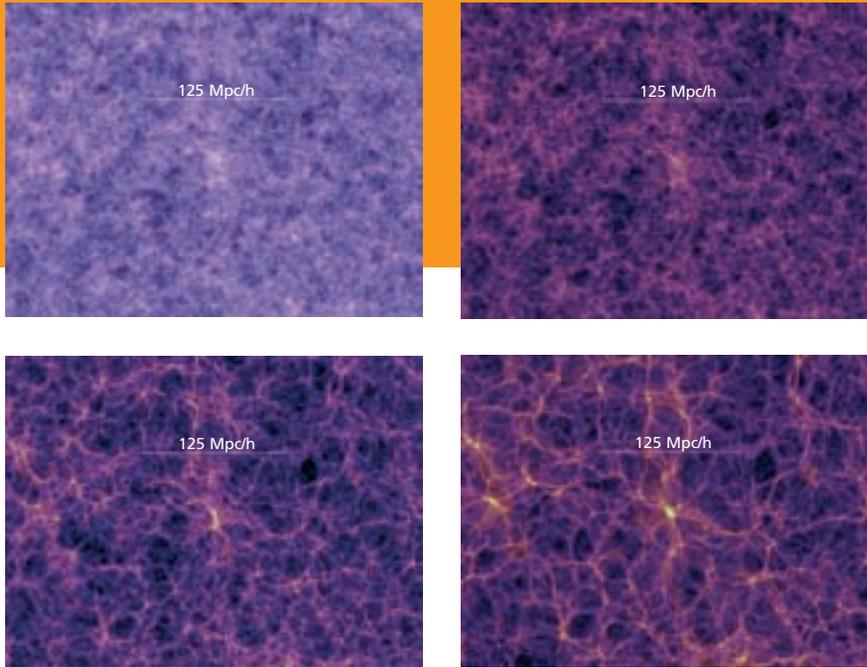


Figura 3.15. Estos cuatro paneles muestran la evolución de una región del Universo obtenida por la simulación cosmológica conocida como "Millennium Run". En la simulación completa se han utilizado más de diez mil millones de partículas para trazar la evolución de la distribución de la materia en un volumen cúbico de 625 Mpc de lado. La simulación estuvo ejecutándose durante un mes en el superordenador principal del Centro de Supercomputación de la Sociedad Max Planck en Garching (Alemania). Los diferentes paneles corresponden a diferentes épocas en la evolución del Universo. Las edades del Universo en cada panel (de arriba a abajo y de izquierda a derecha) son 210, 1.000, 4.700 y 13.600 millones de años.

ordenadores hacen que el campo de las llamadas simulaciones cosmológicas, capaces de acabar dando la verdadera distribución no sólo de la materia oscura, sino también de las galaxias y del gas intracumular, esté en continua evolución.

Las simulaciones cosmológicas actuales, como las que se ilustran en la figura 3.15, combinan muchos de los aspectos deseables para que sean consideradas realistas: se realizan en un volumen grande y con un elevado número de partículas, con una buena resolución y un rango dinámico

adecuado (el rango de escalas sobre el que el método computa fiablemente las interacciones), y algunas ya incorporan gas en volúmenes enormes (figura 3.16). Existen diferentes técnicas para obtener catálogos simulados de galaxias a partir de las simulaciones cosmológicas (simulacros), que podemos comparar con las observaciones de la distribución de galaxias. Además, de esta manera podemos también comprobar el funcionamiento de los métodos de análisis de las observaciones, ya que en los simulacros la información disponible es completa: de cada galaxia conocemos todos los detalles, masa, posición, velocidad real, etc., mientras que esto no es así, como ya se ha explicado, en las observaciones. Variando los parámetros cosmológicos en las simulaciones y haciéndolas evolucionar, obtenemos diferentes distribuciones de materia a gran escala. La comparación de estas distribuciones con las observaciones reales nos proporciona una valiosísima información sobre los modelos

cosmológicos que mejor explican los datos observacionales. Las simulaciones hidrodinámicas son también muy adecuadas para comprender la estructura, formación y evolución de los cúmulos de galaxias en sus diferentes aspectos, así como la localización de los bariones no observados por el momento, cuya presencia en el Universo se deduce del análisis de las anisotropías del fondo cósmico de microondas y de la núcleo-síntesis primordial.

3.4.3. Distribución del gas en el medio intergaláctico general

Las simulaciones numéricas nos muestran que, en el proceso de formación de galaxias y cúmulos, una parte importante de la materia bariónica queda fuera de las estructuras que se forman (galaxias, cúmulos, etc.). Esto nos permite interpretar algo que desde hace casi 40 años se ha estado detectando en el espectro de los cuásares lejanos: la presencia de deficiencia en la luz emitida en ciertas

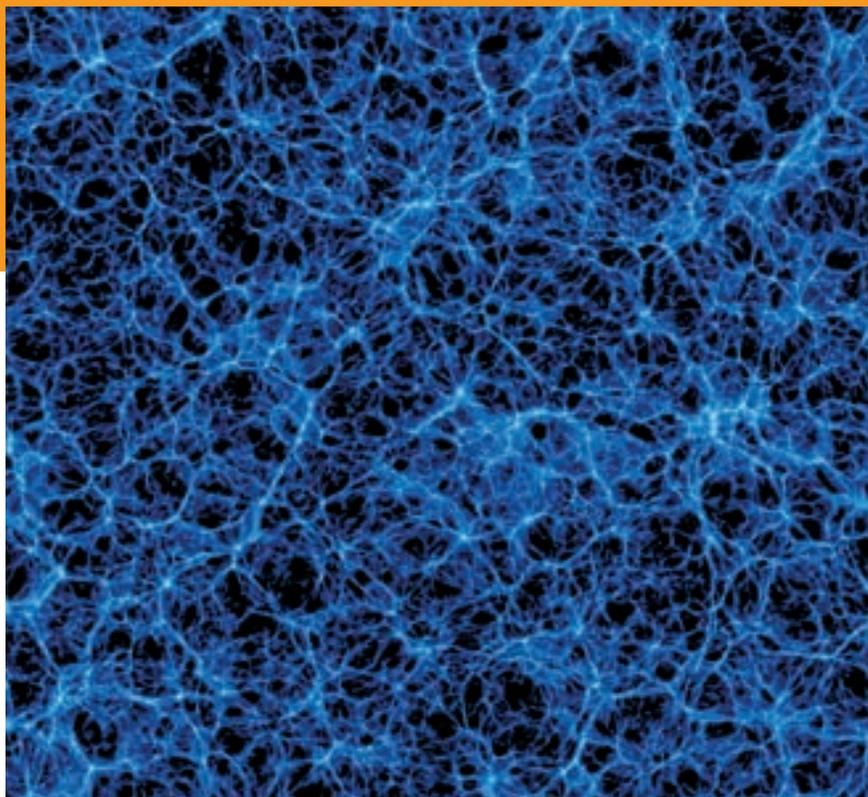


Figura 3.16. Esta imagen muestra la distribución de gas a gran escala en el Universo. Se ha obtenido a partir de los datos de una de las simulaciones hidrodinámicas más grandes llevadas a cabo hasta la fecha. Para ello se simula la formación de estructuras en un volumen cúbico de Universo de 500 Mpc de lado. La materia oscura y el gas son modelizados con más de 2 mil millones de partículas y se consideran las fuerzas gravitatorias e hidrodinámicas que actúan sobre ellas. La imagen representa la densidad de gas en una proyección de un corte del cubo total de unos 150 Mpc de profundidad. Se aprecian claramente las estructuras que constituyen el tejido cósmico a gran escala, trazado por la distribución subyacente de materia oscura. Los zonas brillantes representan el gas en los cúmulos de galaxias, que se encuentra a una temperatura tan alta que es capaz de emitir rayos X. El gas en los filamentos está mucho más frío y solamente puede ser detectado por las trazas que deja en el espectro de la luz que proviene de los objetos más primitivos (cuásares). Esta simulación recibe el nombre de MareNostrum Universe, por haber sido realizada en el superordenador MareNostrum del Centro Nacional de Supercomputación en Barcelona, y es el resultado de una colaboración internacional llamada MareNostrum Numerical Cosmology Project. Cortesía de Gustavo Yepes.

partes del espectro, una especie de “dentelladas” en la distribución espectral de energía observada. La idea que emerge es que esas deficiencias son debidas a que parte de la luz emitida por esas fuentes lejanas es absorbida por gas, que se encuentra entre la fuente y nosotros, en la línea de visión. De este modo, la luz que recibimos de los objetos más distantes en el Universo no nos trae solamente información de lo que ocurrió cuando esta luz se emitió, sino de lo que le ha ocurrido a lo largo de su viaje por el espacio hasta nosotros.

La mayor parte de estas líneas de absorción, que dejan su huella en el espectro de los cuásares, están causadas por nubes de hidrógeno, nada sorprendente ya que éste es el elemento químico más abundante en el Universo. Las absorciones más intensas son atribuibles a galaxias enteras que se ven atravesadas por la luz del cuásar que observamos, pero la mayoría son mucho más débiles. Los astrónomos son capaces no sólo de medir la cantidad de átomos que ha atravesado la luz en una de estas nubes, sino que también pueden medir su temperatura. Paradójicamente, el Universo más distante está mejor estudiado en este tema, debido a que la luz ultravioleta (donde se producen los fenómenos de absorción en los

átomos de hidrógeno) nos llega desplazada al rojo, gracias a la expansión del Universo y, por tanto, la podemos observar en el rango óptico con telescopios convencionales (recordemos aquí el efecto de la corrección k, presentado cuando hablábamos de galaxias). En ese Universo distante, las nubes de absorción de hidrógeno tienen temperaturas en el rango de los diez mil grados. Sin embargo, gracias al *Hubble Space Telescope* y otros observatorios que nos han permitido acceder a la ventana ultravioleta del espectro de la luz, se ha podido verificar que el número de estas nubes de gas disminuye dramáticamente cuando nos vamos acercando a nuestra era actual. Una parte de estas bolsas de átomos habrían sido capturadas por galaxias, pero la mayoría quizás siga libre.

Aunque es materia de estudio y debate todavía, podría ser que del total de bariones que contiene el Universo, además de los que ya conocemos en las galaxias y en el gas caliente intracúmulo, una parte considerable (¿hasta el 40%?) podría estar en tales condiciones que no hemos podido detectarlo. Sería la componente bariónica oscura, por contraste con la no-bariónica. Se sospecha, nuevamente gracias a las simulaciones numéricas, que estos bariones perdidos están entre las galaxias, pero con temperaturas que oscilan entre los cien mil y los diez

millones de grados, siguiendo los filamentos en los que se distribuye también la materia oscura en el Universo. En estas circunstancias, y al igual que ocurre en el interior de los cúmulos, el hidrógeno está totalmente ionizado y, por tanto, no deja líneas de absorción en el espectro de la luz que los atraviesa. Para detectar esa fracción de gas intergaláctico tan caliente, será necesario buscar la absorción que producen otros elementos menos abundantes (como el oxígeno) pero que mantienen algún electrón atrapado a esas temperaturas. Aunque se ha empezado tímidamente a detectar esta componente perdida, habrá que esperar a la próxima generación de espectrógrafos de rayos X.

3.4.4. Sutiles distorsiones gravitatorias. Una nueva manera de sondear lo oscuro

Como hemos visto anteriormente, los cúmulos de galaxias, las estructuras más masivas del Universo, estiran y retuercen la luz de galaxias lejanas hasta generar fenómenos tan espectaculares como los arcos presentes en Abell 1689, que ya mostramos en la figura 3.10. Hay, por otro lado, otro posible efecto lente mucho más sutil y difícil de detectar pero que, sin embargo, puede aportar una valiosísima información sobre la distribución de materia en nuestro Universo.

La luz de las galaxias lejanas, en su viaje hasta nosotros, sufre las desviaciones en uno u otro sentido a medida que pasa por sistemas de diferentes masas en su camino hacia el observador (figura 3.17). Esto se traduce finalmente, en el caso de las galaxias, en leves cambios en su forma, en distorsiones que provocan que su elipticidad se incremente en un pequeñísimo porcentaje. Los efectos en cada galaxia son muy pequeños, pero, si se dispone de observaciones de calidad para grandes cantidades de galaxias, se pueden estudiar. El esfuerzo es rentable, puesto que esas sutiles distorsiones contienen información directa sobre la cantidad de materia atravesada por la luz y, por tanto, sobre la densidad media de la misma en el Universo. La variación de la intensidad de una línea de visión a otra está relacionada directamente con las fluctuaciones de materia en el Universo, y nos permite medir su espectro de potencias de una manera directa, sin tener que pasar por el peldaño intermedio de suponer una

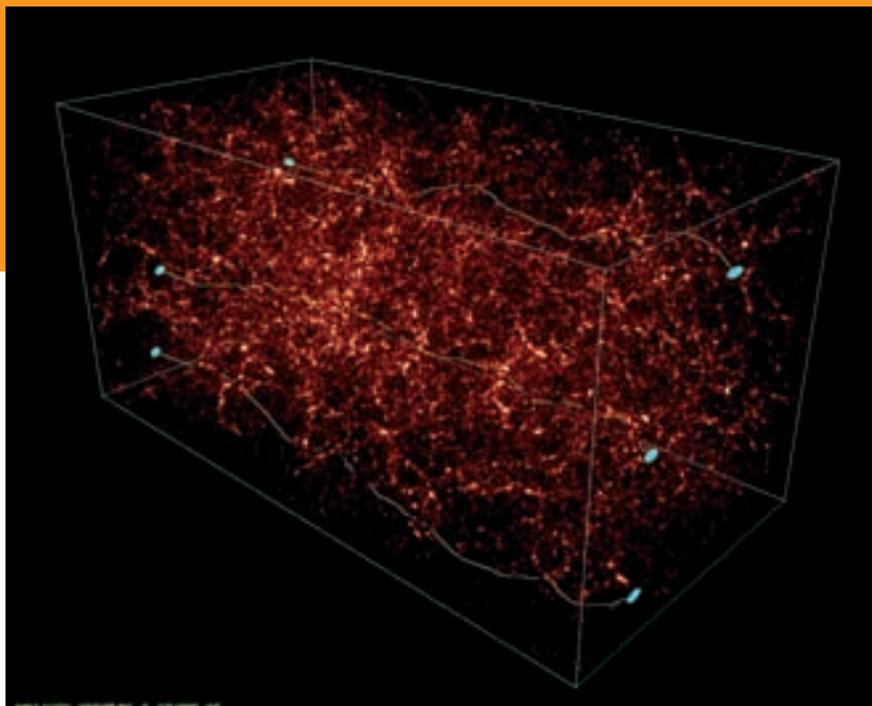


Figura 3.17. En este esquema se muestra la distribución de materia oscura obtenida a partir de una simulación cosmológica. El tamaño de la simulación es de aproximadamente 300 Mpc. La luz de las galaxias remotas del fondo de la imagen viaja hasta el observador (en primer plano), siguiendo una trayectoria que es distorsionada por la acción gravitatoria de la materia. En ausencia de materia, el camino seguiría una línea recta. Las imágenes de las galaxias, cuando llegan al observador, se han deformado. El análisis estadístico de estas deformaciones, en una muestra suficientemente representativa, permite inferir cómo se distribuye la materia oscura, ya que, por ejemplo, se pueden observar orientaciones de las galaxias alineadas preferentemente en las direcciones de los filamentos de la estructura a gran escala. Cortesía de S. Colombi, IAP.

relación entre la luz de las galaxias que observamos y su contenido en masa.

De la misma manera que al observar el embaldosado del fondo de una piscina llena de agua, vemos las líneas rectas distorsionadas por las

ondulaciones de la superficie, la luz de las galaxias distantes se distorsiona como consecuencia de su paso a través de una distribución no uniforme de la materia oscura. El análisis de estas distorsiones y elipticidades en una

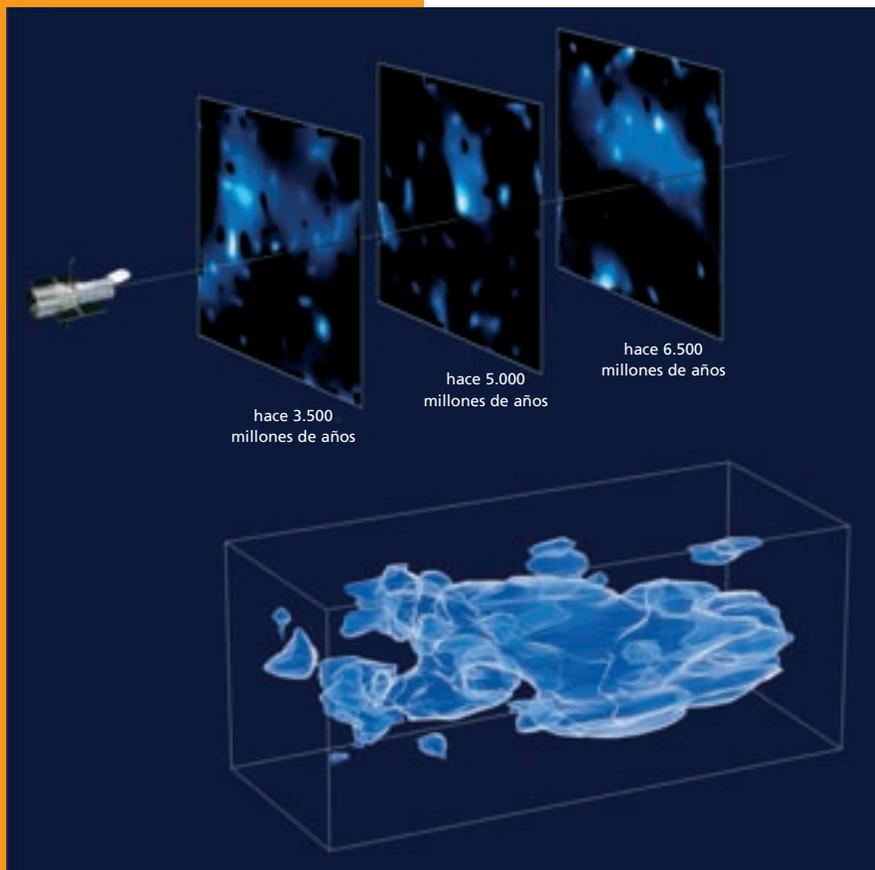


Figura 3.18. Imagen de la distribución de materia oscura según el análisis del efecto de lente gravitatoria débil de observaciones realizadas con el *Hubble Space Telescope*. Se trata del sondeo más extenso realizado con este telescopio y recibe el nombre de COSMOS (Cosmic Evolution Survey). En la imagen de abajo, el mapa muestra la red intrincada de filamentos que traza la distribución de materia oscura en una región del Universo de 2,25 grados cuadrados. La distribución manifiesta un grado de agrupamiento mayor en el Universo cercano, correspondiendo a etapas más recientes de la evolución cósmica. Arriba vemos tres cortes bidimensionales de esta distribución realizados en tres tiempos cósmicos diferentes. La evolución del grado de agrupamiento de las estructuras es también apreciable. Hay que notar que el área física de estos mapas (semejantes a una tomografía) crece con la distancia, pasando de 18 Mpc de lado en el corte más cercano a 30 Mpc en el más alejado. Cortesía de NASA, ESA i R. Massey (CalTech).

muestra suficientemente representativa del Universo permite obtener una estimación de la distribución de la materia oscura, como recientemente ha realizado el grupo liderado por R. Massey (figura 3.18). Los resultados, una auténtica primicia, han proporcionado el primer mapa directo

de materia oscura en una región del Universo, que nos muestra algo así como el esqueleto de la distribución de materia. Pero es sólo el principio. La vía está abierta y en poco tiempo vamos a disponer de datos mucho más detallados que nos permitirán trazar con mucha más precisión el armazón del Universo. Posteriormente, seremos capaces de entender cómo la distribución de la materia bariónica, en su luminosa minoría, se acomoda dentro de ese armazón. Todo un programa que nos va a llevar, sin lugar a dudas, a una nueva y espléndida época en la comprensión del Universo.

4. La Cosmología entra en escena

El papel del conocimiento es explicar lo visible complejo por lo invisible simple.

Jean Perrin

El objetivo de la ciencia clásica quizás podría resumirse con las palabras anteriores de Jean Perrin. De la dispersión y agitación que de la realidad se perciben en primera instancia, se van decantando las leyes que la rigen y que nos permiten una descripción sistemática de la misma. No es, pues, de extrañar que todas las civilizaciones, fuese cual fuese su nivel de desarrollo científico, hayan elaborado una visión cosmológica que les permitiese una comprensión unificada de la diversidad que se observa, a la mayor escala posible. La nuestra no es una excepción y sobre la acumulación de datos de observación y de desarrollos teóricos, que son de esta época, ha desarrollado

sus propias concepciones cosmológicas.

La Cosmología pretende abordar el estudio del Universo en su conjunto. Pero, de hecho, no es fácil encontrar una definición precisa de la misma. Es cierto que la idea de abandonar los detalles para abordar el estudio de la estructura de lo que subyace queda sugerida en ese tipo de definiciones, pero, a fin de cuentas, se trata de enunciados tautológicos. En la práctica, el Universo objeto de ciencia se va construyendo a medida que avanzan los conocimientos: de un Universo de estrellas se pasó a otro de galaxias, y ahora consideramos que está conformado por aglomerados de galaxias, grandes estructuras... Lo extraordinario de este proceso en lo que respecta a nuestra época, además de los descubrimientos, es que el aparato

teórico proporcionado por la Relatividad General haya sido capaz de acomodar en su seno los cambios de escala que hemos conocido en menos de un siglo.

En el lado observacional, como venimos insistiendo, el descubrimiento de las galaxias por Hubble es lo que abre la era contemporánea de la Cosmología. En el teórico, ese papel lo ha jugado la Teoría de la Relatividad de Einstein, es decir, la nueva teoría de la gravedad. Y esto es así porque sólo las fuerzas gravitatorias parecen capaces de actuar eficazmente a las escalas de interés para la Cosmología.

Como es bien sabido, se conocen cuatro tipos de fuerzas en la naturaleza: nucleares o fuertes, débiles, electromagnéticas y gravitatorias. De las cuatro tan sólo las dos últimas tienen rangos de actuación suficientemente grandes como para ser capaces de influir a grandes escalas. En cuanto a la interacción electromagnética, debemos recordar que no es una fuerza universal, en el sentido de que no actúa sobre cualquier tipo de materia, puesto que sólo lo hace sobre la que tiene carga eléctrica. Dado que no parece que, a grandes escalas, el Universo contenga sistemas materiales cargados, la conclusión a la que se llega es que, en el dominio de la Cosmología, las únicas fuerzas relevantes son las gravitatorias. Esto no significa que las otras fuerzas, electromagnéticas, débiles y nucleares,

no jueguen su papel en los correspondientes dominios y, en particular, en los primeros instantes del Universo. Pero no para conformar el Universo a gran escala como hoy lo conocemos. De modo que, salvo nuevos argumentos o datos de observación que así lo impusieran en el futuro, nos basta con la gravedad para poder entender el Universo a gran escala.

Dicho de otro modo, la Cosmología, en su lado teórico, es una rama de la teoría de la gravedad y los modelos cosmológicos serán, por tanto, soluciones de las ecuaciones que rigen el comportamiento de dichas fuerzas.

La Cosmología, que comienza a desarrollarse en las primeras décadas del siglo XX, puede definirse como la aplicación de la teoría de Einstein al mundo de las galaxias, consideradas como las partículas de lo que puede denominarse como *fluido cósmico*. Se necesitan, sin embargo, algunas otras constataciones-guía para poder delimitar el problema y abordar su solución. El paso fundamental, en este sentido, lo constituye el descubrimiento, también por Hubble, de la relación de proporcionalidad que existe entre la distancia a la que se encuentra una galaxia y el desplazamiento hacia el rojo (*redshift*, denotado por z) de sus líneas espectrales. La universalidad de este fenómeno es inapelable: salvo unas pocas excepciones (que corresponden

a galaxias muy próximas y debido a causas bien determinadas y comprensibles, como dijimos al hablar del cúmulo de Virgo), *todas las galaxias que se observan presentan sus líneas espectrales desplazadas hacia la parte roja del espectro*. La interpretación de este resultado de observación en términos de *expansión del espacio-tiempo* (es decir, del Universo) es la piedra angular de todo el edificio cosmológico.

Es de señalar que la primera versión del modelo en expansión, desarrollada por Friedman en 1924, es anterior a las conclusiones observacionales de Hubble. La sistematización posterior de esos modelos puso de manifiesto su estructura matemática y las restricciones que imponen a las ecuaciones de Einstein, lo que permitió hacer una clasificación exhaustiva de los mismos. La formulación de Friedman-Robertson-Walker sigue siendo hoy por hoy la base conceptual de las elaboraciones cosmológicas.

Admitir la expansión del Universo es admitir su historicidad. El Universo que se describe es un Universo evolutivo que, partiendo de una situación calificada como singular (popularizada con el nombre de *Big-Bang*), va cambiando sus propiedades a medida que se expande, se va enfriando, pasa por fases en las que se sintetizan algunos elementos químicos, las irregularidades iniciales se van amplificando por virtud de las fuerzas gravitatorias, hasta que en un momento

determinado ya no se puede mantener el equilibrio reinante hasta entonces entre materia y radiación, que se separan y siguen caminos evolutivos independientes. El Universo que hoy observamos sería el resultado de esa evolución.

Entre los triunfos de la Cosmología moderna está, sin duda, el descubrimiento de la *radiación cósmica de microondas* o *radiación cósmica de fondo*, testigo de aquella época remota en que materia y radiación estaban en equilibrio. Como fósil de aquella situación física, contiene información sobre los fenómenos físicos que entonces ocurrieron. Sus minúsculas irregularidades son las antecesoras de nuestras galaxias y de los aglomerados de galaxias que ahora observamos. Y sus propiedades nos revelan las propiedades del espacio-tiempo. Retrazar el hilo de la historia física del Universo se ha convertido así en parte esencial de la Cosmología y del estudio de su contenido. Y, por vía de necesidad, ha hecho converger en su estudio a físicos de diferentes disciplinas, que han visualizado en el Universo el mayor laboratorio imaginable.

La coherencia de ese edificio, que de forma tan extraordinaria se ha construido a lo largo del siglo XX y, en particular, en los tres últimos decenios,

reposa, sin embargo, sobre ingredientes cuya naturaleza se desconoce. La *materia oscura* y la *energía oscura*, inevitables para el encaje de las diferentes observaciones dentro del modelo, son absolutamente desconocidas excepto por su acción gravitatoria. No es de extrañar así que la revista *Science* catalogase como primer problema de toda la Ciencia la elucidación de la naturaleza de las componentes oscuras del Universo.

4.1. El reino de la Cosmología

Para Newton, toda la materia gravita. La teoría de Einstein va más allá, puesto que no sólo la materia gravita, sino también cualquier forma de energía. Nada es pues ajeno a la gravedad. La Relatividad General reposa sobre el principio de equivalencia (igualdad entre la masa inerte —la que siente las fuerzas dinámicas— y la masa grave —la que siente la gravedad—) y sobre la no-existencia de observadores privilegiados: las leyes de la Física son las mismas y tienen la misma formulación sea cual sea el observador.

Sobre esas premisas, Einstein construyó una teoría en la que el espacio-tiempo posee curvatura. Y es esa curvatura la que finalmente

determina la gravedad y, a la vez, condiciona el comportamiento dinámico de la materia-energía que contiene, como se ilustra en la figura 4.1. O, leído en el otro sentido, las ecuaciones de Einstein nos dicen que el contenido energético-material determina la estructura del espacio-tiempo. Ha desaparecido pues la dualidad entre sistema que evoluciona y sustrato espacio-temporal en el que esa evolución tiene lugar. En la teoría de Einstein el espacio-tiempo adquiere carácter dinámico y puede evolucionar, dependiendo de la materia-energía que haya en el sistema.

Tras un largo proceso reflexivo, Einstein formuló la Relatividad General, la nueva teoría de la gravedad, en 1916. De manera sintética, las ecuaciones de Einstein pueden escribirse:

$$\text{Geometría espacio-temporal} \blacksquare \text{ materia-energía} \\ G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

La expresión anterior quiere significar que la geometría espacio-temporal determina el movimiento de la materia-energía y, viceversa, ese contenido material y energético determina la geometría del espacio-tiempo. Los símbolos expresan el tensor¹ de Einstein ($G_{\mu\nu}$) y el tensor materia-energía ($T_{\mu\nu}$) y κ es una

1. Los tensores son entidades matemáticas que no varían al cambiar de coordenadas. Lo que equivale a decir que la descripción que se hace del sistema físico es la misma cualquiera que sea el observador.

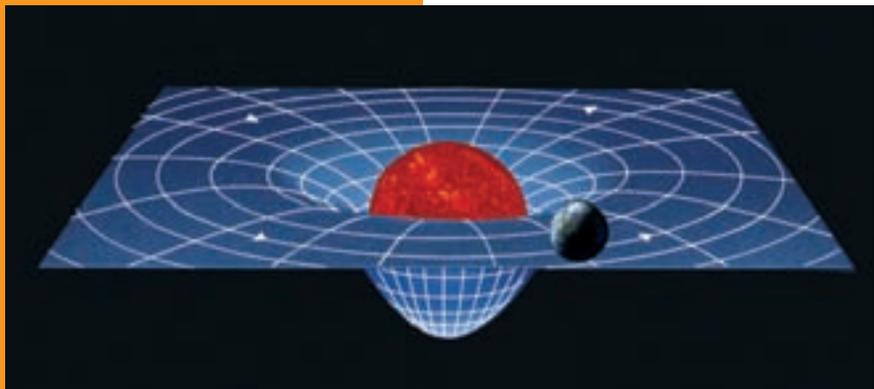


Figura 4.1. Ilustración gráfica de la idea de Einstein sobre la gravedad. Un cuerpo masivo (digamos, el Sol) modifica a su alrededor la forma del espacio-tiempo, representado por la malla de líneas continuas y, de esa forma, gobierna el movimiento de otro cuerpo (la Tierra, por ejemplo) a lo largo de la órbita indicada por la flecha.

constante de proporcionalidad relacionada con la velocidad de la luz y con la constante de Newton. Porque, en efecto, la teoría de Einstein contiene a la de Newton como una aproximación para gravedad débil y velocidades muy inferiores a la de la luz. De esta forma, la Relatividad General hereda los triunfos de la de Newton, a la vez que la despoja de su defecto fundamental al convertirla en una teoría de campos, y la proyecta hacia dominios a los que aquella no podía llegar.

Bajo esa formulación compacta se esconden 10 ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de hasta segundo orden (de las que sólo 6 son independientes), de imposible solución analítica salvo en casos muy particulares. Conviene señalar desde ahora que el tensor geométrico contiene *una nueva constante*, que no aparecía en

la teoría de Newton. Se trata de la llamada *constante cosmológica*, denotada con la letra griega Λ , de la que después tendremos que hablar más en detalle. En la primera formulación de Einstein, dicha constante no aparecía. Como muchas veces se ha dicho, la introdujo *a mano* para hacer estable el modelo cosmológico estático que acababa de elaborar. Esta maniobra resultaba posible sin cambiar las bases de la teoría, aunque la motivación fuese circunstancial. Sin embargo, como más tarde se demostró, la formulación completa de la teoría contiene esa constante necesariamente, lo que después de todo justificaba la maniobra de Einstein. De hecho, y desde este punto de vista, lo arbitrario sería asignarle el valor cero a priori. Bien es verdad que el éxito de los modelos evolutivos la hizo innecesaria en esos momentos, puesto que los datos podían interpretarse sin su ayuda. Pero, a medida que la masa de datos aumentaba y las dificultades de interpretación aparecían, nuestra constante fue invocada tantas veces como fuera necesario para encajar los datos dentro de los modelos. Finalmente, desde principios de los años noventa, las observaciones la han impuesto de manera inevitable y forma parte natural de la descripción del Universo, a pesar de que no sepamos todavía ni de qué se trata ni cuáles son sus propiedades, salvo que no se trata ni

de materia ni de radiación tales como las conocemos. No es así de extraño que se haya convertido no sólo en el problema número uno de la Física, sino en el de toda la Ciencia.

Los diferentes modelos cosmológicos son, como ya apuntamos, soluciones de las ecuaciones de Einstein bajo ciertas restricciones razonables, que se conocen como *Principios Cosmológicos*. El propio Einstein, al elaborar su modelo, impuso como restricción que, a la escala apropiada para que los efectos locales no sean relevantes, el Universo debía tener las mismas propiedades siempre y en todo lugar. Lo que se traduce, de manera necesaria, en que todas las variables, incluida la métrica espacio-temporal que define la geometría, deben ser las mismas en cualquier lugar y momento. Esta restricción, ciertamente muy fuerte, es conocida como *Principio Cosmológico Perfecto*. Su aplicación sistemática permite construir otro modelo cosmológico, llamado el Universo de De Sitter. Tanto éste como el de Einstein tienen propiedades que difícilmente pueden corresponder al Universo observado, ya que el de Einstein no es estable, mientras que el de De Sitter no contiene ni materia ni energía, está vacío. Ambos tienen una constante cosmológica diferente de cero.

Más tarde, dentro de este mismo contexto, Bondi, Gold y Hoyle, sobre

la base de interesantes consideraciones físicas y filosóficas, formularon su Modelo Estacionario. En este caso, la métrica evoluciona con el tiempo, pero las propiedades medias del Universo se mantienen. Esto significa en el caso de la densidad que, para contrarrestar el efecto de la expansión y mantenerla constante en el tiempo, se necesita un proceso de creación continua de materia-energía. La ley de Hubble, por un lado, y más tarde, el descubrimiento de la radiación cósmica de fondo, que ponía de manifiesto un Universo evolutivo, acabaron con esos modelos definitivamente.

La Cosmología avanzó desde el descubrimiento de la ley de Hubble por el camino de los modelos evolutivos. Éstos responden a consideraciones de simetrías menos restrictivas que la anterior. Se admite que el Universo tiene las mismas propiedades en cualquier región espacial, para un instante dado. Pero no enuncia nada en concreto sobre el comportamiento en el tiempo, de modo que esas propiedades pueden cambiar de un instante a otro. Es lo que se conocía como Principio Cosmológico Simple o, desde que se impuso definitivamente, rebautizado como *Principio Cosmológico* sin adjetivos. Desde el punto de vista matemático, se demuestra que esa restricción es suficiente para determinar la forma de la métrica y, por tanto, el comportamiento espacial y temporal del

modelo. La métrica de Friedman-Robertson-Walker, que así se llama, corresponde a un espacio-tiempo que puede, si se nos permite la expresión, rebanarse, de modo que en cada instante está representado por un espacio 3-dimensional. Según la curvatura, ese espacio 3-dimensional será equivalente a una esfera (curvatura positiva), a un hiperboloide (curvatura negativa) o a un espacio plano (curvatura nula). Todas esas secciones espaciales tienen la misma curvatura y, además, cualesquiera dos de entre ellas, correspondientes a dos instantes diferentes, tienen la propiedad de que no se cortan. Cada una de ellas viene unívocamente caracterizada por el momento al que corresponde. De esa forma, es posible ordenar esas rebanadas por el instante al que corresponden y atribuir a ese instante el carácter habitual que damos al tiempo.

Un aspecto esencial de esta métrica es la presencia del parámetro de escala que corresponde, en cierto modo, al tamaño del Universo. Su dependencia temporal es la que da el carácter dinámico y evolutivo a estos modelos y es la base geométrica de nuestra Cosmología. La descripción básica del modelo, desde el punto de vista geométrico, se hace, por tanto, en base al parámetro de escala y a la curvatura de las rebanadas espaciales.

Hemos repetido varias veces que el dato fundamental de observación sobre

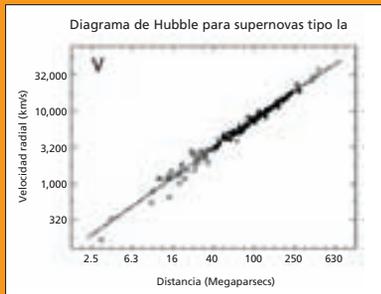


Figura 4.2. Diagrama de Hubble para supernovas de tipo Ia en galaxias relativamente próximas ($d < 500$ Mpc). En ordenadas se da el valor $V = cz$ (en escala logarítmica). En abscisas se da la magnitud aparente de la SN que, dado que todas tienen una luminosidad intrínseca similar, indica directamente la distancia (también en escala logarítmica).

el que reposa la Cosmología actual es la ley de Hubble, que recoge el hecho universal del desplazamiento hacia el rojo y su relación directa con la distancia. En la figura 4.2 reproducimos esa relación tal y como se mide en nuestros días para galaxias relativamente próximas. Debemos añadir que el valor del desplazamiento hacia el rojo que se mide es independiente de la región espectral que se considere, por lo que ese diagrama podría establecerse en cualquier banda fotométrica.

La ley de Hubble es el hecho de observación. ¿Cuál es la explicación de la misma? La primera virtud de la métrica de Friedman-Robertson-Walker es, precisamente, que puede aportar de manera inmediata tal explicación a ese fenómeno, gracias a la dependencia temporal del parámetro de escala, que denominamos por $a(t)$. Sin entrar en los detalles, por otro lado sencillos, se puede demostrar que, definiendo el desplazamiento hacia el rojo z como el desplazamiento espectral relativo de una línea cualquiera del espectro, se tiene:

$$1 + z = \frac{a_0}{a_1}$$

en donde el subíndice 0 se refiere al momento de la observación, mientras que el subíndice 1 se refiere al momento de la emisión, necesariamente anterior. Ésta es la relación básica de los modelos cosmológicos, puesto que nos

va a permitir explicar tanto el que z no dependa de la región espectral en que se mide, como su relación con la distancia.

De la fórmula anterior se desprende inmediatamente que, dependiendo de que a_0 sea mayor, menor o igual que a_1 , el valor de z sería positivo, negativo o nulo. El modelo teórico nada dice sobre cómo debe ser, pero las observaciones nos ayudan a fijarlo de manera inequívoca: puesto que siempre observamos un desplazamiento hacia el rojo, es decir, $z > 0$, necesariamente tiene que ser $a_0 > a_1$, lo que significa que *el parámetro de escala* (que, como dijimos, está relacionado con el tamaño del Universo) *crece con el tiempo*. Se concluye así que *el Universo está en expansión*.

La expresión simple que acabamos de escribir para el desplazamiento hacia el rojo nos indica que, contrariamente a lo que suele decirse, éste no se debe a la velocidad de alejamiento de las galaxias, sino al hecho de que el espacio-tiempo evoluciona de una manera determinada. Se trata de un concepto propio y exclusivo de la Relatividad General. Ciertamente es que el efecto Doppler, producido por el desplazamiento relativo entre emisor y observador, presenta analogías con la expansión, pero no deben ser confundidos, pues son de naturaleza física diferente.

Una vez caracterizada la métrica de los modelos y sus principales propiedades, es necesario determinar el

segundo miembro de las ecuaciones de Einstein, el tensor materia-energía, para completar el enunciado del problema. Ese tensor tiene que estar sujeto a las mismas restricciones que el tensor geométrico, a saber, homogeneidad e isotropía espaciales. Como ya apuntamos antes, se considera que la parte energética-material se puede representar como un fluido perfecto, lo que determina unívocamente sus propiedades. El fluido vendrá caracterizado por su densidad $\rho(t)$ y presión $p(t)$ (que dependerán del tiempo, pero no de la localización espacial) con la ecuación de estado que las liga. Así queda determinado el problema y podemos ya buscar las soluciones de las ecuaciones de Einstein.

4.2. Los parámetros cosmológicos

No es el lugar de plantear las 3 ecuaciones (más la de estado) independientes que rigen el modelo. Con ellas se puede caracterizar la variación de cualquier variable con el tiempo y determinar el Universo-modelo que resulta. Generalmente, esas ecuaciones se escriben en función de los llamados *parámetros cosmológicos*, no sólo por comodidad, sino porque nos conectan de manera más directa con magnitudes que las medidas pueden

proporcionar. Los parámetros más usados son:

- *La constante de Hubble*, denotada por H , que indica cómo va variando el parámetro de escala, $a(t)$, con el tiempo. En otras palabras, mide la *tasa de expansión* en cada momento. Es importante señalar que, aunque se llama constante de Hubble, este parámetro varía con el tiempo. Así, cuando consideramos épocas cada vez más próximas al Big-Bang (es decir, cuando el factor de escala se aproxima a 0), el valor de H crece indefinidamente. De hecho, cada tipo de modelo cosmológico se caracteriza por la forma en que H varía con el tiempo. A pesar de ello, se conserva la denominación de constante por razones históricas y porque, como le ocurre a todas las propiedades del modelo cosmológico estándar, en un instante dado tiene el mismo valor en todos los lugares. Su variación sólo es apreciable a escalas de tiempo muy largas, cosmológicas.
- *Parámetro de densidad*, denotado por Ω_m , que mide la relación entre la densidad de materia-energía y la expansión. Es un parámetro que, intuitivamente, nos informa sobre la relación entre dos contrarios: la atracción gravitatoria, relacionada con la cantidad de materia-energía que existe en todas sus formas y

estados, y la expansión, que tiende a disgregarlo todo en el espacio-tiempo. Cuando ambos términos se igualan, se tendrá $\Omega_m = 1$ y la densidad del Universo se llama crítica, pues es el valor para el que gravedad y expansión se igualan exactamente. Un valor $\Omega_m > 1$ nos indica que la materia-energía es suficiente para frenar y detener la expansión, y forzar un recolapso del Universo que, por esa razón, se dice que es cerrado. En el caso contrario, la expansión acaba sobreponiéndose a la gravedad de la materia-energía y el Universo se expandiría indefinidamente.

El parámetro de densidad varía con el tiempo, desde un valor inicial (en el Big-Bang) $\Omega_m = 1$. Pero si el Universo es abierto, siempre será inferior a 1, y si es cerrado, siempre será superior a 1. En el caso crítico, el valor $\Omega_m = 1$ se mantiene a lo largo de toda la evolución del Universo.

- *Parámetro de curvatura*, denotado por Ω_k , que es una medida de la curvatura espacial. Se anula para el caso crítico, en que, además de $\Omega_m = 1$, se tiene $k = 0$.
- *Parámetro de constante cosmológica*, denotado por Ω_Λ , que mide el efecto de la nueva constante que la teoría de Einstein proporciona, cuando se generaliza el concepto, el de la energía del vacío. Al igual que

los demás parámetros, varía con el tiempo. Comienza teniendo un valor nulo en el Big-Bang y va creciendo a medida que el Universo se expande. En el modelo actualmente aceptado, este parámetro llega a ser dominante.

También se define el llamado parámetro de deceleración, que mide la variación de H . Su nombre se debe a que, en el caso en que $\Lambda = 0$, la expansión sólo puede frenarse con el tiempo, debido a la acción gravitatoria de la materia. Como la descripción del modelo sólo requiere tres parámetros, los que suelen usarse son los tres últimos que hemos definido que, recordémoslo, contienen en su expresión a la constante de Hubble.

Usando esos parámetros, la ecuación que caracteriza el modelo cosmológico viene dada por una simple relación entre ellos, que se escribe

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda - 1 = \Omega_k$$

que expresa de nuevo que el contenido energético-material, dado por el primer miembro, determina la curvatura espacial del Universo. En el caso en que $\Lambda = 0$, la ecuación se reduce a una relación entre los parámetros de densidad y curvatura muy sencilla de

interpretar: Si $\Omega_m > 1$ (expansión seguida de contracción), la curvatura debe ser positiva y el Universo es cerrado. En caso contrario (expansión sin fin), la curvatura es negativa y el Universo abierto. El argumento puede repetirse en iguales términos si consideramos $(\Omega_m + \Omega_\Lambda)$ frente al parámetro de curvatura.

El desarrollo de la Cosmología observacional puede asimilarse a la búsqueda de los valores precisos de los parámetros cosmológicos, que permitiesen determinar el modelo concreto que corresponde a las medidas que nos proporcionan las observaciones. Ni que decir tiene que éste ha sido un camino largo y aún hoy subsisten incertidumbres importantes respecto a los mismos.

4.3. Cosmología física. Geometría y observaciones

Poco hemos hablado hasta ahora del tensor materia-energía, salvo que debe corresponder a un fluido perfecto con las propiedades que corresponden al Principio Cosmológico. Como dijimos, este fluido queda caracterizado por su presión y densidad, y por la ecuación de estado que las liga. La cuestión es, desde esta perspectiva, ¿cómo es ahora nuestro Universo?

Puesto que conocemos con cierta precisión la densidad actual del Universo y, con gran detalle la temperatura de la radiación cósmica de fondo que, por tratarse de un cuerpo negro, determina todas sus propiedades, es un ejercicio trivial comprobar que el Universo, en el estado actual de evolución, está totalmente dominado por la materia, siendo despreciable la contribución de la radiación. Es más, conocemos que las galaxias se mueven con velocidades —excluida la expansión—, que representan una pequeña fracción de la velocidad de la luz, lo que hace que la contribución de la presión material sea también despreciable. En definitiva, *el Universo actual se puede representar como un fluido material con $p = 0$ como ecuación de estado*. Resuelta esta cuestión, la ecuación entre los parámetros escrita más arriba determina el problema completamente.² Nos apresuramos a decir que no siempre fue así a lo largo de la evolución cósmica, como veremos más adelante. Pero esas consideraciones se aplican a todo el Universo de galaxias accesible con nuestros telescopios.

La métrica espacio-temporal nos permite definir distancias, superficies y volúmenes. Precisamente, a través de esas definiciones, se conecta el modelo con las observaciones. Detengámonos

2. Es de destacar que Sandage llegó a esta conclusión en 1961 (ApJ 133, 355), antes de que se hubiese descubierto la RCM, con brillantes argumentos indirectos.

un momento en la cuestión de la distancia, que nos permitirá plantear la ley de Hubble en función de los parámetros cosmológicos y, por esa vía, conectar con los datos de observación. Por el lado observacional, la medida que obtenemos de la luminosidad de una galaxia depende obviamente de la luminosidad intrínseca (emitida) de esa galaxia y de la distancia a la que se encuentra. Cuanto más lejos esté, más débil la observaremos, en proporción inversa al cuadrado de la distancia. Ahora bien, el cálculo de esa distancia hace intervenir los parámetros cosmológicos, con lo cual queda patente que éstos pueden, en principio, determinarse a partir de las observaciones. La complicación viene del hecho que tenemos que conocer la luminosidad intrínseca para conocer la distancia, pero sin la distancia, ¿cómo conocer la luminosidad intrínseca? Aquí interviene un principio de uniformidad que nos va a permitir definir lo que se conoce como luminarias estándar, es decir, astros que tienen la misma luminosidad intrínseca. Naturalmente, esta afirmación debe reposar sobre constataciones empíricas (medidas de luminosidades de astros para los que medimos directamente la distancia) o teóricas (conocimiento detallado de los mecanismos de producción de la luminosidad).

Conocido es cómo los astrónomos han ido construyendo, peldaño a peldaño, lo que se conoce como *escalera*

de distancias, comenzando por nuestro entorno próximo, y transportando los métodos cada vez más lejos. A principios del siglo XX el trabajo que culminó Leavitt en 1912 estableció una relación entre el periodo con el que varía la luz de las estrellas Cefeidas (que es independiente de la distancia a la que se encuentran) y la luminosidad intrínseca de las mismas. Teníamos el primer calibrador de distancias. Si se conseguía detectar y medir Cefeidas en otras galaxias, sería posible determinar sus distancias y añadir peldaños a aquella escalera. Recordemos que fue con este método como Hubble midió distancias a varias nebulosas que resultaron ser galaxias, y que le permitió después, junto con las medidas de desplazamientos hacia el rojo, establecer la ley que lleva su nombre.

El número de indicadores de distancia se ha ido multiplicando y refinando, lo que ha permitido determinaciones precisas del valor de la constante de Hubble actual, H_0 . Tras largos debates que han durado décadas, motivados en parte por los errores sistemáticos de las medidas (debidos, a su vez, al conocimiento parcial de algunos fenómenos), parece que se ha ido convergiendo en los últimos 10 años hacia un valor determinado. Una parte del esfuerzo del HST se ha dedicado a esta tarea, detectando y midiendo Cefeidas en galaxias a

distancias de hasta 15-20 Mpc. El valor admitido hoy es $H_0 = 71$ km/s/Mpc. Sin embargo, el reanálisis de esas determinaciones, junto con las suyas propias, han llevado recientemente a Sandage y colaboradores a concluir que $H_0 = 63$ km/s/Mpc. Si bien la diferencia no es demasiado grande, podría tener implicaciones en cuanto a otros cálculos cosmológicos y al ajuste global del modelo. De modo que aunque el grado de convergencia es importante y, de hecho, esos dos valores no son, dentro de los errores respectivos, incompatibles, el camino hacia la Cosmología de precisión no está aún completamente despejado.

De entre las luminarias estándar conocidas, las supernovas de tipo Ia, SNIa son las más prometedoras, puesto que, como ya dijimos al hablar de las estrellas, tienen propiedades muy similares entre ellas (poca dispersión en la luminosidad intrínseca, primera condición para ser luminaria estándar) y son detectables a muy grandes distancias. De ahí su importancia para medir los parámetros cosmológicos. De hecho, gracias a la acumulación de datos sobre SNIa en los últimos años se ha podido establecer, como puede verse en la figura 4.3, que el modelo que mejor ajusta corresponde a los parámetros cosmológicos $\Omega_m \approx 0,3$ y $\Omega_\Lambda \approx 0,7$, poniéndose así de relieve que la

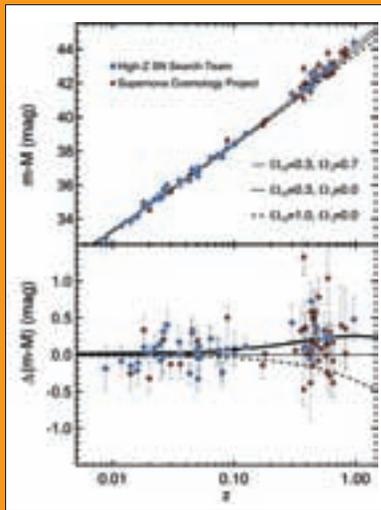


Figura 4.3. Panel superior. Módulo de distancia ($m-M$), de supernovas de tipo Ia, en función del valor del desplazamiento hacia el rojo (escala logarítmica). Para luminarias estándar, como las SNIa, el valor de la magnitud absoluta M es el mismo para todas, por lo que el módulo de distancia es una medida directa de la distancia. La gráfica muestra, por tanto, la ley de Hubble para esos astros. Las líneas representan las predicciones para distintos valores de los parámetros cosmológicos, según la leyenda de la figura. Panel inferior. Residuos para el mejor ajuste. La conclusión principal es que la contribución del término de constante cosmológica es importante y el Universo está en expansión acelerada.

constante cosmológica no sería nula, lo que está significando una revolución mayor en Cosmología y en Física Fundamental.

Como ya dijimos en el capítulo anterior, el parámetro de densidad también se determina por métodos dinámicos y haciendo uso del efecto de lente gravitatoria. La condición para que esas estimaciones tengan carácter cosmológico es que los sistemas que se consideran sean suficientemente grandes como para puedan considerarse representativos del Universo a gran escala. Ése es el caso de los cúmulos de galaxias y estructuras aún mayores.

El resultado es que la densidad material por sí sola es claramente inferior al valor crítico. Los resultados observacionales dan $0,2 \leq \Omega_m \leq 0,3$.

En resumen, las medidas relacionadas con el Universo actual, dominado por materia, nos proporcionan valores para la constante de Hubble, el parámetro de densidad y la constante cosmológica, que nos llevan a concluir que la expansión es acelerada debido al valor no nulo de la constante cosmológica. Nada nos dicen, sin embargo, sobre el parámetro de curvatura. Es el momento de indagar sobre la historia del Universo para buscar nuevos datos y argumentos que nos permitan acotar mejor esos

parámetros y fijar el modelo óptimo con precisión.

4.4. El Universo evolutivo

El Universo tiene historia. La especial estructura del espacio-tiempo del modelo estándar (que, como dijimos, resulta de la aplicación del Principio Cosmológico) hace posible definir un *tiempo cósmico*, válido para toda la extensión espacial del Universo, que permite marcar los hitos de su evolución. Dado, por otra parte, que el desplazamiento hacia el rojo, z , marca la evolución temporal del parámetro de escala, nos encontramos con una relación biunívoca entre ese tiempo y z , por lo que esa historia puede relatarse de manera equivalente en función del desplazamiento hacia el rojo. Y, finalmente, dada la relación entre z y distancia, también se puede relatar en función de ésta, lo que es otra forma de decir que mirar más lejos es mirar antes en la evolución del Universo.

Si, partiendo del Universo actual dominado por materia, nos remontamos a lo largo de ese tiempo, nos encontraremos con un sistema cada vez más denso y más caliente. Mientras la densidad y la temperatura no sean muy elevadas, podremos seguir describiendo el Universo de la misma forma que el actual. Ahora

bien, dado que la densidad material varía como $a(t)^3$, mientras que la densidad de radiación varía como $a(t)^4$, en algún momento del pasado ambas densidades se igualaron, contribuyendo por igual al contenido energético-material del Universo (denominado época de equipartición). De ahí hacia atrás el comportamiento del Universo estaba dominado por la radiación. La historia de ese Universo de radiación es la que queremos caracterizar ahora.

4.4.1. El Universo radiativo

Para ello, sigamos ahora el curso de los acontecimientos. Dejando para luego el problema de las condiciones iniciales, después del Big-Bang, el Universo estaba en rápida expansión con valores muy altos de la presión, la temperatura y la densidad. En toda esta fase de radiación la ecuación de estado es también simple, puesto que la contribución al tensor materia-energía de la presión es un tercio de la contribución de la energía de radiación. El Universo

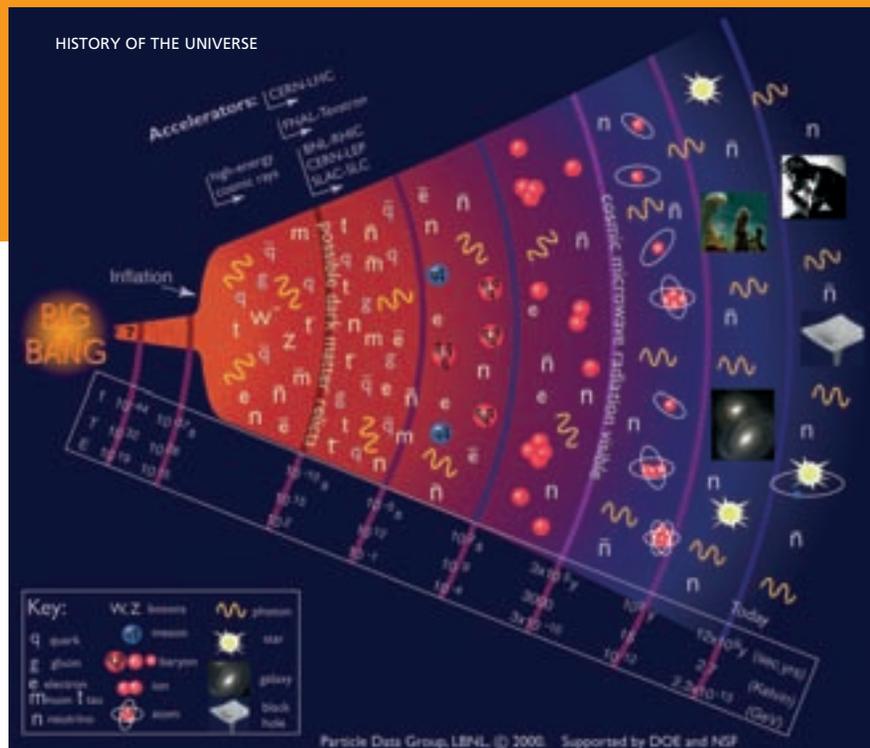


Figura 4.4. Ilustración de la historia del Universo. Se han delimitado las principales etapas evolutivas, codificada en términos de tiempo transcurrido desde el Big-Bang, con la temperatura y energía correspondientes. Tras el Big-Bang, se señala la época de inflación, que produce un aumento extraordinario y casi instantáneo del tamaño del Universo, tras el cual la expansión recupera su ritmo. Los ingredientes iniciales se van combinando, produciendo otras partículas compuestas, cuyo dominio va marcando las diferentes épocas. Llegado un cierto momento, alrededor de 100.000 años tras el Big-Bang, se recombinan los protones y electrones, y el Universo se hace transparente a la radiación de fondo, que evoluciona enfriándose de manera independiente hasta nuestros días. Mientras, la materia irá formando estrellas y galaxias, produciendo las diferentes especies químicas y propiciando la eclosión de formas y composiciones que hoy observamos.

progresivamente se enfría conforme se expande y esto tiene un efecto importante sobre los constituyentes de la materia y sobre las interacciones que rigen su comportamiento.

Los constituyentes esenciales de la materia ordinaria en el Universo son los electrones, los neutrinos y los *quarks* (estos últimos forman los protones y neutrones). Todas estas partículas elementales fueron descubiertas a lo largo del pasado siglo (el último tipo de quark fue descubierto en 1995) y configuran hoy día los pilares del Modelo Estándar de la Física de Partículas. En los instantes cercanos al origen del Universo, después de la época inflacionaria (que luego presentaremos), estas partículas elementales y los fotones se encontraban en perfecto equilibrio termodinámico, formando lo que llamamos el *plasma primordial*. Partiendo de una situación de densidad y temperatura extremas, con la expansión del Universo, el plasma se va enfriando pasando por varias transiciones de fase. La primera, que da como resultado el confinamiento de los *quarks* en protones y neutrones, termina aproximadamente cuando el Universo tiene una edad de una diezmilésima de segundo. Cuando la temperatura disminuyó aún más, los procesos que mantienen en equilibrio a los electrones, neutrinos, protones y neutrones dejaron de ser eficientes,

mientras que otros comenzaron a ser significativos. Cada vez que ese tipo de transición ocurre, el modelo predice la formación de un fósil de la época precedente que ha podido sobrevivir hasta nuestros días. Son tres los principales: el *fondo primordial de neutrinos*, los *elementos ligeros* (hidrógeno, deuterio, helio-4 y litio-7) y la *radiación cósmica de microondas*. Cada uno de estos fósiles se origina en etapas sucesivas cronológicamente y responde a los cambios que sufren los componentes de la materia y radiación en el Universo entre las primeras cienmilésimas de segundo y los primeros cientos de miles de años.

El fondo cósmico de neutrinos

Cuando la temperatura del Universo decreció a menos de mil millones de grados, el ritmo de las reacciones en las que participaban los neutrinos (interacciones débiles) se hizo mucho más lento que el ritmo de expansión del Universo, por lo que dejaron de interactuar con los demás componentes. A partir de ahí el gas de neutrinos primordiales evolucionó independientemente, por lo que tan sólo ha disminuido su temperatura por efecto de la expansión (se estima que actualmente es de unos 2 K), sin que su distribución haya cambiado. La densidad se estima en varios cientos por centímetro cúbico.

De momento, la tecnología de detección de neutrinos, que tan satisfactoriamente ha permitido investigar los generados en el interior del Sol o, incluso, los que se generaron en la explosión de la Supernova 1987A, no está, sin embargo, suficientemente desarrollada para lograr la detección de los neutrinos primordiales, muchísimo menos energéticos. Revelar su existencia, que es una predicción fuerte de nuestra Cosmología, es un reto que quizás algún día no muy lejano podamos abordar.

La producción de elementos ligeros

Como vimos en el primer capítulo, las estrellas son hornos termonucleares en los que, a partir del hidrógeno, se sintetizan los elementos químicos en procesos bien conocidos. Y la abundancia de cada especie refleja precisamente esos procesos y la estabilidad de los núcleos. Sin embargo, también indicamos que hay un problema con algunos elementos como el D, He y Li que, por una u otra razón, no son producidos en las estrellas o en el medio interestelar en la cantidad que se observa. La solución a este problema, y ése es otro de los éxitos del modelo cosmológico estándar, está en el comportamiento del Universo caliente del que procedemos. En efecto, a medida que el Universo se va enfriando desde las extremas temperaturas iniciales, hay un momento determinado

en que las condiciones son adecuadas para que actúen las reacciones termonucleares y se fusionen núcleos de hidrógeno para producir helio y los demás elementos ligeros.

Los primeros cálculos asociados a estas predicciones fueron realizados por Gamow, Alpher y Bethe en los años cuarenta. Sus predicciones originales se han refinado notablemente al incorporar las últimas medidas de laboratorio sobre la eficiencia de las reacciones nucleares involucradas, la vida media del neutrón y el número de familias de neutrinos. Los resultados no han cambiado esencialmente las predicciones sobre la síntesis de elementos que pudo haber tenido lugar en los tres primeros minutos del Universo, cuando aquellas condiciones necesarias se alcanzaron. La densidad de nucleones en el Universo es el único parámetro del que depende esta producción ahora que sabemos, por experimentos en el CERN, que el número de familias de neutrinos es tres y que la incertidumbre sobre la vida media del neutrón es tan pequeña que

resulta poco relevante al calcular la producción de He-4. Esas predicciones, en función de la densidad bariónica, el único parámetro libre en los cálculos, se presentan en la figura 4.5.

¿Qué dicen las medidas astronómicas al respecto? ¿Cómo se puede medir la composición química de la materia que emergió de esos procesos? Obviamente el problema potencial es la contaminación de esos valores primordiales por los procesos que sabemos que ocurren en las estrellas y que van variando la composición química de esos sistemas. De modo que, para minimizar esos efectos, hay que identificar objetos muy antiguos, cuyas características permitan suponer que o no han sido alterados en su composición química original, o que el cambio ha sido mínimo, o que podemos determinar esas contribuciones locales. Después, se ha de buscar la huella de los elementos químicos en los que estamos interesados en el espectro de la radiación que emiten.

Las medidas de las abundancias de esos elementos son delicadas tanto técnicamente como por la

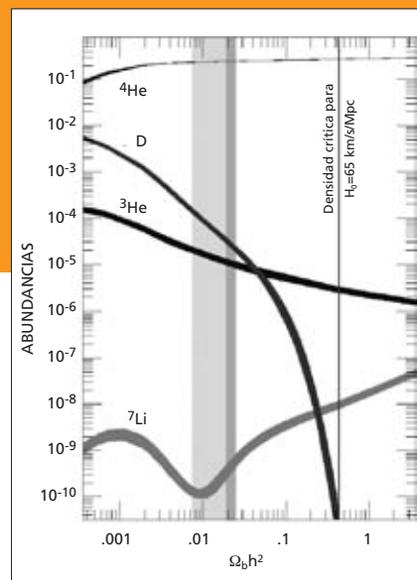


Figura 4.5. Predicciones cosmológicas de las abundancias de elementos ligeros y datos de observación. En ordenadas se indican las abundancias de ^4He , D, ^3He y ^7Li relativas a núcleos de hidrógeno (en fracción de masa). En el eje horizontal inferior se indica el parámetro de densidad bariónica que corresponde a cada caso, normalizada con el parámetro $h = H_0/100$. Las curvas predichas para el ^4He asumen una vida media del neutrón de 10,6 minutos y tres familias de neutrinos. La franja vertical muestra la zona de concordancia de todas las medidas obtenidas, siendo la más oscura la de mayor probabilidad. Se constata inmediatamente que el valor que se obtiene de esa comparación para la densidad bariónica es muy bajo, sensiblemente inferior al valor crítico para un valor de la constante de Hubble similar al que dan las medidas e inferior a las medidas de densidad material que se obtiene de análisis dinámicos. Lo que viene a significar que sólo una pequeña fracción de la materia del Universo es de naturaleza bariónica.

contaminación de la que hablamos. En cuanto al helio-4, se ha hecho un gran esfuerzo para medirlo en galaxias en las que los elementos más pesados, llamados genéricamente metales en Astrofísica, son muy poco abundantes. La idea subyacente es que esa baja metalicidad se debería a que son sistemas químicamente jóvenes y, por lo tanto, sin contaminación apreciable por su propia evolución. Las incertidumbres sobre la evolución de esos objetos permanece sin embargo y lo que ha podido obtenerse es un valor con una cierta dispersión, como se representa en la citada figura 4.5.

Para los demás elementos, la situación no es muy diferente, precisamente por la posibilidad de que ocurran procesos de formación o destrucción que alteren sensiblemente sus valores primordiales. Mención especial merece el caso del Litio-7, puesto que la predicción es bivaluada. En cualquier caso, las abundancias que se derivan de todas estas observaciones encajan dentro de las predicciones del modelo estándar. Como corolario no menos importante, y a pesar de esas incertidumbres, permiten también acotar el valor de la *densidad de materia bariónica*, que resulta ser unas veinte veces menor que la densidad crítica y varias veces menor que la densidad total obtenida por métodos dinámicos o usando el efecto lente gravitatoria. Una vez más, y por un camino radicalmente diferente, se impone la conclusión de

que la mayor parte de la materia del Universo es *materia oscura, de naturaleza no-bariónica*.

La radiación cósmica de fondo

Durante todo el tiempo en que el comportamiento del Universo estaba dominado por la radiación, la materia se encontraba en equilibrio termodinámico con ella. Cuando la temperatura del Universo bajó hasta unos 3.000 K (que corresponde a unos 380.000 años tras el Big-Bang), las reacciones necesarias para mantener el equilibrio ya no eran capaces de mantener el ritmo adecuado, por lo que la materia y la radiación comenzaron a separarse. La atracción coulombiana entre protones y electrones empieza a imponerse a la agitación térmica y se produce la *recombinación*, proceso que denota la formación masiva de átomos de hidrógeno por captura de los electrones que quedan atrapados en órbitas alrededor de los protones. La materia del Universo pasa a un estado eléctricamente neutro, cuya principal componente (bariónica) son esos átomos de hidrógeno. Como consecuencia del proceso de recombinación, los electrones ya no pueden afectar a los fotones, que ahora pueden moverse sin ser apenas atenuados o desviados: desde ese momento, el Universo se hizo transparente a esa radiación que siguió su evolución de manera independiente.

En cuanto a la materia, observamos hoy cuál fue su destino: formar estrellas, galaxias y aglomerados, distribuirse en el medio intergaláctico, configurar el Universo que nos van mostrando los telescopios y que los análisis dinámicos nos revelan. ¿Y qué fue de aquella radiación?

Dada la rapidez de los procesos de desacoplo y recombinación, esa radiación emergió conservando su espectro de cuerpo negro. Desde entonces se ha ido enfriando progresivamente conservando, y éste es un aspecto clave, su espectro planckiano. La razón es que, en el caso de expansión que contempla el modelo cosmológico estándar, la temperatura de esa radiación cambia solamente en función de la época, es decir, del valor del desplazamiento hacia el rojo, de manera simple: $T_z = T_0 (1+z)$. De modo que hoy sigue manteniendo el carácter de radiación de cuerpo negro, a muy baja temperatura.

Las primeras predicciones sobre la existencia de esa radiación y su temperatura actual fueron hechas por Gamow y colaboradores. Ya en los años sesenta del siglo XX, mientras en Princeton un grupo de científicos estaba ultimando la preparación de instrumentos específicos para medir esa radiación, Penzias y Wilson, que trabajaban para la compañía Bell Telephone tratando de caracterizar el comportamiento de una antena, se

encontraron con un extraño ruido que no lograban reducir y que resultó ser la *radiación cósmica de microondas*. Desde entonces se han hecho muchas medidas y se ha caracterizado exhaustivamente. En la figura 4.6 mostramos el espectro de esa radiación medido con precisión extraordinaria por el satélite COBE en los años noventa.

Esa radiación de fondo corresponde a un cuerpo negro perfecto a la temperatura de 2,73 K. Basta ese dato para caracterizar las propiedades intrínsecas de la radiación. En particular, eso significa que hay en el Universo actual unos 400 fotones por centímetro cúbico, cuyo origen hay que buscarlo en los procesos que ocurrieron cuando el Universo era un plasma caliente y denso. Pero no se agota ahí la información que esa radiación contiene.

Una constatación inmediata de las observaciones, como ya hemos comentado antes, es la distribución en aglomerados y grandes estructuras que presenta la materia. Estas grandes irregularidades en la distribución de materia, que han ido formándose por el juego de las fuerzas gravitatorias, tienen que haber tenido su correlato en etapas anteriores del Universo, incluidas las más tempranas. De otra forma no podrían haberse generado. De modo que la radiación, que estuvo en equilibrio con la materia en esas etapas anteriores del Universo, debería mostrar también la huella de esas irregularidades

primordiales en la materia, y de manera correspondiente en cuanto a la amplitud de las mismas. En otras palabras, el análisis de la variación espacial de la intensidad de la radiación de fondo debería poner de manifiesto irregularidades compatibles con las que puede suponerse que presentaba la distribución de materia cuando ambas estaban en equilibrio.

Ya desde los primeros años setenta del siglo XX, se diseñaron instrumentos y experimentos para medirlas, pero sin los resultados esperados. Lo que causó no poca sorpresa, puesto que la sensibilidad instrumental era suficiente para medir las irregularidades que se preveían. En efecto, dado que se aceptaba entonces que toda la materia era bariónica, las fluctuaciones primordiales de la materia podían calcularse a partir de las fluctuaciones de densidad que observamos en el mundo de las galaxias, rehaciendo el proceso de crecimiento hacia atrás. La radiación de fondo debería mostrar el mismo nivel de fluctuaciones, que resultaba ser del orden de una parte en mil. Pero no se encontraron. O, por mejor expresarlo, se encontraron pero con la distribución que corresponde al dipolo creado por el movimiento del observador respecto a la radiación de fondo. Una vez tenida en cuenta ésta, las cotas superiores que se establecieron eran muy inferiores a aquellos valores esperados.

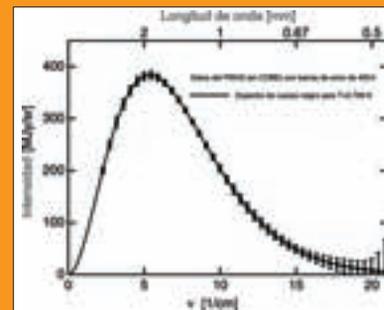


Figura 4.6. Distribución espectral de energía del fondo cósmico de microondas medido por el satélite COBE. Las distorsiones están por debajo de $1,5 \times 10^{-5}$ para cualquier frecuencia.

Este resultado se reconsideró desde entonces como un indicio de la existencia de *materia oscura, no-bariónica*, cuyo comportamiento diferenciado del de la materia bariónica pudiese explicar esas discrepancias entre lo esperado y lo medido.

El primer experimento que midió la intensidad de esas irregularidades en la radiación cósmica de fondo fue COBE. En primer lugar, los datos reflejaban que la intensidad de esta radiación (medida por su temperatura) era mayor que el promedio en una cierta región de la bóveda celeste e inferior al promedio en otra. La amplitud de esta variación a gran escala, que corresponde a la anisotropía dipolar que acabamos de mencionar, es tan sólo de unas 3 milésimas de grado, y refleja esencialmente el movimiento de nuestra Galaxia en el medio intergaláctico. Anisotropía que no es de origen cosmológico, sino local, y que había sido ya determinada por los primeros experimentos que se hicieron a partir de los años setenta del siglo XX. La gran novedad que aportan los datos de COBE es la detección de anisotropías de origen cosmológico en el fondo cósmico de microondas, a menores escalas angulares, con un nivel aproximado de una parte en cien mil (figura 4.7). Este descubrimiento fue pronto corroborado por experimentos desde tierra y, hoy día, no hay duda de que las fluctuaciones espaciales de la

temperatura del fondo cósmico de microondas detectadas por estos experimentos a escalas espaciales de 5 a 8 grados tienen un origen cosmológico que nos transporta a etapas muy primitivas del Universo. El experimento de Tenerife sobre el fondo de microondas, tras confirmar el resultado de COBE, localizó las primeras huellas cosmológicas (directas, no estadísticas) a principios de 1994.

Aquí se impone un pequeño inciso. Hemos dicho que las fluctuaciones que se esperarían en la radiación cósmica de fondo para que correspondiesen a las irregularidades en la densidad de la materia bariónica serían unas 100 veces superiores a las que se observan. ¿Cómo es entonces posible que se puedan explicar los contrastes de densidad que se observan en el mundo de las galaxias? El papel de la materia oscura es, como hemos apuntado, esencial y, de hecho, constituyó un argumento mayor mientras aún no se disponía de datos directos. El razonamiento es relativamente simple. La mayor parte de la materia es de naturaleza no-bariónica y, por tanto, tiene otras condiciones de equilibrio con la radiación. Si esa materia oscura se desacopló de la radiación antes que la bariónica, en un momento en que las fluctuaciones habían crecido poco, las irregularidades que dejaron eran correspondientemente pequeñas. Una vez desacoplada, las fluctuaciones de

materia oscura continuaron creciendo y ésta fue aglomerándose y formando sistemas cada vez más densos; pero este comportamiento ya no podía alterar la radiación, puesto que ya eran independientes. Mientras, la materia bariónica siguió en equilibrio con la radiación, sin que se produjesen mayores irregularidades. Cuando éstas se separaron, la radiación mantenía las pequeñas fluctuaciones que corresponden a la época en que estaba en equilibrio con la materia oscura, mientras que la materia bariónica fue acumulándose rápidamente en las zonas de atracción creadas por la materia oscura tras su propio desacoplo. De modo que las fluctuaciones de la parte bariónica crecieron muy deprisa, incluso más de lo que lo habían hecho las de la materia oscura, debido a que los bariones están sujetos a procesos disipativos. De ese modo se puede entender que las fluctuaciones en la radiación de fondo sean pequeñas y los contrastes de densidad en la materia bariónica, muy grandes.

Volviendo a las propiedades de la radiación cósmica de fondo, COBE mostró el camino para profundizar en el conocimiento de sus fluctuaciones y para extraer la información que contiene. Ese primer experimento traía información sobre escalas espaciales grandes (varios grados). Los pasos siguientes tenían que dirigirse, además de a mejorar la sensibilidad, a sondear

escalas cada vez menores. A partir de la segunda mitad de los años noventa, se pusieron en marcha varios experimentos a bordo de globos estratosféricos como BOOMERANG y MAXIMA, que han mostrado que la amplitud de las fluctuaciones presenta, efectivamente, una fuerte modulación dependiendo de la escala angular de la observación —en perfecta consonancia con las predicciones de algunas teorías de formación de estructura en el Universo— y alcanza un máximo a escalas angulares de 1 grado. En el año 2003, el satélite WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*, de NASA) hacía públicas medidas de alta precisión de los dos primeros picos en el espectro de potencias angulares de las fluctuaciones del fondo cósmico de microondas y de la función de correlación entre temperaturas y polarización de la radiación. Las más recientes observaciones de los experimentos interferométricos VSA (en Tenerife), CBI y BOOMERANG03 ponen también de manifiesto la existencia de un tercer

pico acústico en el espectro de potencias. Los resultados del análisis de los datos se muestran en la figura 4.8.

Datos como los que mostramos en la figura encierran información sobre las principales características del Universo. La posición y amplitud de los picos acústicos es sensible a la densidad total de energía y materia y a cada una de las componentes materiales (materia oscura, bariónica, neutrinos) y al término de constante cosmológica. En particular, la posición del primer pico permite determinar la densidad total. Dentro de las incertidumbres de la medida, el valor que se encuentra es $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$. Comparando este resultado con la ecuación que dimos antes, que describe la estructura global del Universo, llegamos a la conclusión que $\Omega_k = 0$, ó lo que es equivalente, $k = 0$. Esto significa que las secciones espaciales del espacio-tiempo son planas. También significa que la densidad correspondiente es la crítica, equivalente a $0,9 \times 10^{-29} \text{ g/cm}^3$. La densidad de materia bariónica coincide, dentro de las incertidumbres, con la

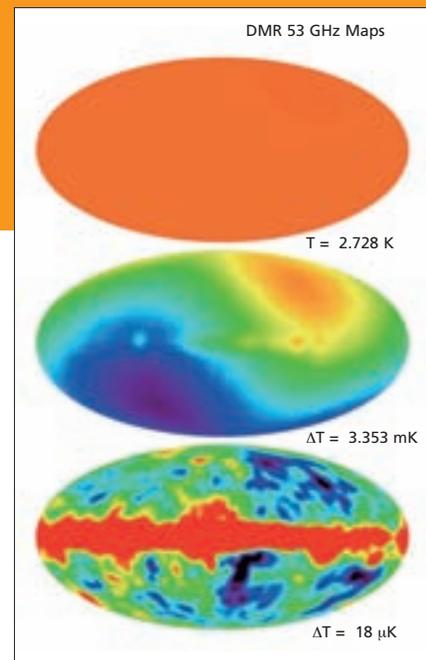


Figura 4.7. Mapas del fondo cósmico de microondas. El superior muestra la uniformidad. Estos mapas muestran la uniformidad de dicho fondo en primera aproximación. En el mapa del medio se muestra la componente dipolar de la distribución de irregularidades. Esta componente revela el movimiento del observador. En el inferior se muestran las fluctuaciones intrínsecas y la emisión del plano de nuestra Galaxia. Como se indica, la intensidad de esas fluctuaciones es de 18 millonésimas de grado.

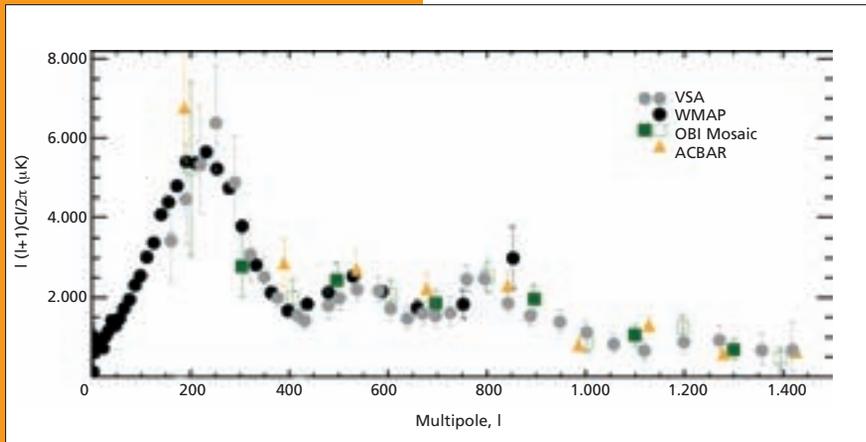


Figura 4.8. Espectro de potencias de las fluctuaciones del fondo cósmico de microondas medido por varios experimentos: WMAP, VSA (mostrado en dos agrupamientos de datos), CBI y ACBAR. Se puede apreciar los tres primeros picos en el espectro de potencias, resultado de oscilaciones acústicas en el plasma primordial. La amplitud, anchura y posición de estos picos permite restringir un elevado número de parámetros cosmológicos.

obtenida del análisis de la nucleosíntesis primordial y las abundancias de elementos ligeros. Se deduce que la componente de materia oscura es aproximadamente unas cinco veces superior a ésta. Las próximas misiones espaciales, Planck en particular, van a aportar datos de superior calidad y precisión, a escalas angulares todavía menores, que, sin duda, permitirán avanzar significativamente en el conocimiento del Universo temprano.

Por otro lado, esos picos en las fluctuaciones de la radiación de fondo deben tener su correlato en la distribución de la materia bariónica, las galaxias, a la escala correspondiente al cambio de tamaño del Universo desde que se desacopló de la radiación hasta hoy. El pico en la distribución de galaxias a escala de unos 140 Mpc, al

que aludíamos en el capítulo anterior (ver figura 3.14), corresponde precisamente a la escala proporcionada por el primer pico en el espectro de potencias de las fluctuaciones de la radiación de fondo.

El problema cosmológico queda así acotado. Este modelo con $k = 0$ tiene la notable propiedad, como ya dijimos, que la condición $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$ se mantiene a lo largo de toda su evolución, desde las épocas más tempranas hasta las más alejadas en el futuro. De modo que de esa simple relación se puede ya conjeturar cómo se comporta el Universo, globalmente, a lo largo de su evolución. Así, en las etapas más tempranas, el término de constante cosmológica es despreciable y la radiación domina completamente ese comportamiento. Desde el Big-Bang, la expansión fue decelerándose hasta el momento en que el término de la constante cosmológica comenzó a tener importancia. También se va enfriando y la radiación comienza a perder su preponderancia, pasando la materia a gobernar, junto con la constante cosmológica, el comportamiento global del Universo. Finalmente, hay un momento en que el término dominante es el de la constante cosmológica. Según los datos que se desprenden tanto del análisis de la radiación de fondo como de la ley de Hubble, esa fase ya comenzó, de modo que en la época actual la expansión se acelera por

influencia de esa constante cosmológica. Las ecuaciones del modelo nos dicen que esa tendencia ya no puede alterarse, de modo que la expansión continuará acelerándose indefinidamente. En ese sentido, por analogía con la fase de inflación temprana que ahora describiremos, se puede decir que hemos entrado en la fase de inflación inevitable y definitiva.

4.4.2. El Universo primitivo. La etapa de inflación

El esquema que hemos ido presentando tiene algunas dificultades de fondo que se han ido planteando con el tiempo y que demandan soluciones que, aunque mucho se ha avanzado, todavía no se han logrado. El problema central es precisamente el de las condiciones iniciales, el punto de partida de este Universo.

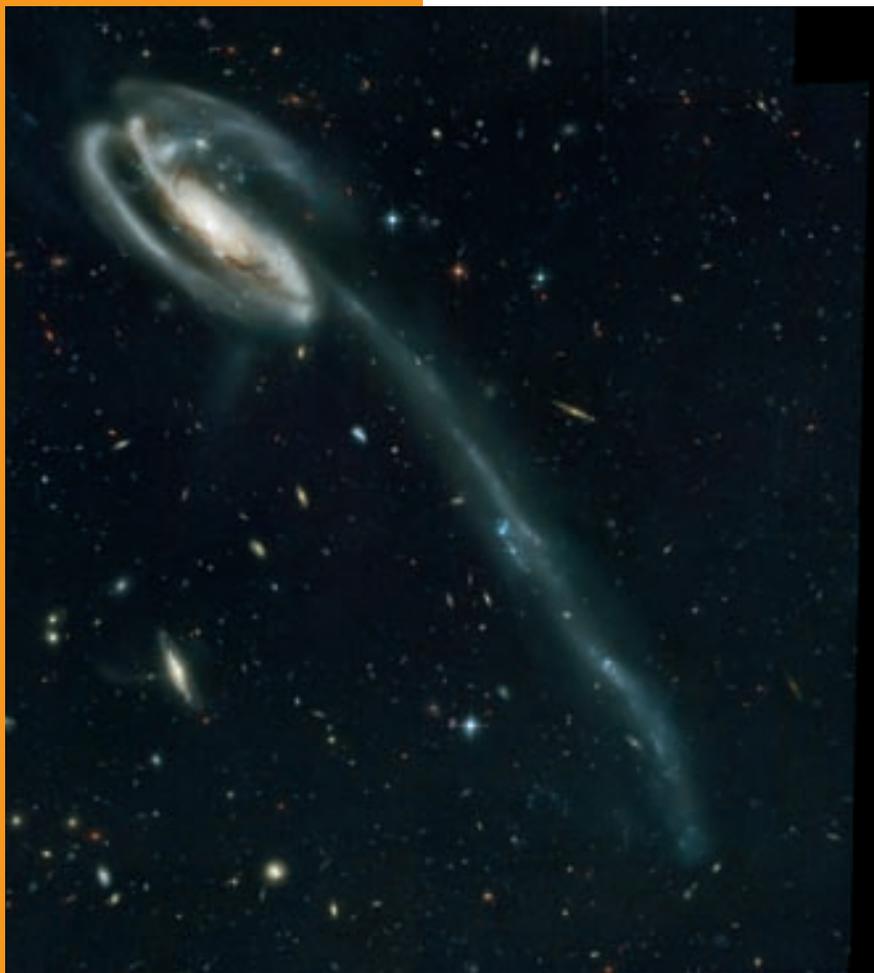
Como ya planteó Weyl en los años veinte del siglo pasado, la única posibilidad de que las diferentes partes de un Universo evolutivo, como el que estamos considerando, hayan estado en contacto físico en el pasado es que tengan un origen común. Ese origen común es lo que después fue bautizado por Hoyle como Big-Bang. Este planteamiento es un simple postulado o principio (que durante algunos años se conoció como principio de Weyl), que no soluciona el problema físico antes mencionado.

Planteado en términos algo diferentes, el problema es el siguiente: dadas las propiedades generales del modelo, dos zonas cualesquiera del Universo que hoy observamos, se encontraban en horizontes disjuntos, es decir, sin posibilidad de contacto causal, en algún momento anterior. Entonces ¿cómo es posible que cuando medimos una propiedad del Universo en esas dos regiones, por ejemplo la temperatura de la radiación de fondo, encontremos el mismo valor? ¿Cómo *conoce* una región el valor en las otras regiones? El tamaño del horizonte cuando la radiación de fondo comenzó su evolución independiente equivale a unos 2 grados en el Universo actual. Si medimos T en dos zonas separadas por más de dos grados, los valores tendrían que ser totalmente independientes. Pero no lo son. Es más, dos regiones con horizontes disjuntos en algún momento siempre estuvieron en horizontes disjuntos en el pasado, puesto que el tamaño del horizonte aumenta más deprisa que el tamaño del Universo. Dos sistemas no relacionados causalmente en un momento dado siempre estuvieron causalmente desconectados. ¿Cómo es entonces posible que encontremos el mismo valor de T (o cualquier otra propiedad global) cualquiera que sea la región del cielo en que la midamos?

La idea de la *inflación* fue introducida para resolver, entre otros, el

problema del horizonte. La idea es relativamente simple, aunque su implementación sea complicada. Se trata de explorar la posibilidad de que el Universo, en sus primeras etapas evolutivas, haya pasado por una fase en que su tamaño haya aumentado más deprisa que el del horizonte. De ahí el nombre de inflación. La causa de esta hiper-expansión sería la evolución de un cierto campo material, cuya existencia y propiedades son por el momento hipotéticas. La violenta expansión que cambiaría el tamaño del Universo exponencialmente en el pequeñísimo intervalo de tiempo que va entre 10^{-43} y 10^{-30} segundos después de la singularidad inicial habría producido el contacto causal de todas las regiones del Universo hasta entonces desconectadas, y uniformizado las propiedades.

La idea de la inflación ha motivado una importante cantidad de trabajos que exploran diferentes formulaciones en busca de la más adecuada. Los resultados son, en cierto modo, satisfactorios, aunque todavía no se ha encontrado la que resuelva todos los problemas, en gran medida porque no pueden ser sino planteamientos heurísticos mientras no se tenga una teoría de la gravedad cuántica. Pero está claro que la idea permite plantear un contexto físico en el que los problemas ligados con las condiciones iniciales puedan encontrar una explicación.



Además, el planteamiento de la inflación permite también abordar el problema del origen de las fluctuaciones que después dieron lugar a las galaxias y estructuras. Hasta ahora hemos hablado

de ellas sin preocuparnos por su origen. La inflación permite plantear una respuesta. En efecto, el campo material responsable de la inflación está, por su naturaleza cuántica, sujeto a fluctuaciones intrínsecas. Esas fluctuaciones serían las semillas de las galaxias que andábamos buscando.

Se ha podido calcular, bajo ciertas hipótesis, algunas de las características de esas fluctuaciones. El espectro que se predice es plano (es decir, no se privilegia ninguna escala), que es lo que los análisis de la radiación cósmica de fondo permiten concluir. En cuanto a las amplitudes, aunque pueden predecirse con el valor apropiado, requieren sin embargo de ajustes finos no totalmente satisfactorios.

El cuadro general que emerge del estudio del Universo temprano, incluyendo la inflación, es de armonía. Se puede comprender el origen de la homogeneidad e isotropía a gran escala, pero también el origen de las fluctuaciones a partir de las que se han generado las estructuras que observamos. Se puede comprender el origen y propiedades de la radiación de fondo y las abundancias de los elementos ligeros, D, He, Li. Y se puede concluir que el Universo es del tipo $k = 0$, y que la constante cosmológica ha empezado ya a dominar la expansión, acelerándola para siempre. Pero no sin costo en hipótesis, que vamos a discutir a continuación.

4.4.3. El Universo acelerado. De la constante cosmológica a la energía oscura

Entre las grandes novedades que el avance de la Cosmología en los últimos 15 años nos ha aportado está, sin duda, el que *actualmente, la expansión del Universo es acelerada*. Dado el carácter atractivo de las fuerzas gravitatorias que, en consecuencia, tienden a frenar esa expansión, tan sólo el término de constante cosmológica puede causar tal aceleración y, como hemos dicho, sólo a partir de un cierto momento en la evolución del Universo.

Los valores que se obtienen para el término tanto del análisis de la relación de Hubble como del análisis de la radiación cósmica de fondo son coincidentes dentro de los errores de medida y lo fijan en 0,7 aproximadamente. Hay que señalar también que, dado que $k = 0$, el valor que corresponde a Ω_m es 0,3, de acuerdo con lo que se deduce de la dinámica de los cúmulos de galaxias.

Esos parámetros determinan un modelo de Universo en el que el ritmo

de expansión no es monótono. A una fase inicial de desaceleración, debido al efecto contrario de la atracción gravitatoria, sigue una fase en que la expansión se acelera indefinidamente. Aceleración cuya causa hay que buscarla en la constante cosmológica o, en términos más generales, en la energía oscura. Dado que, siempre dentro del modelo estándar, la transición entre la fase de desaceleración y la de aceleración ya habría ocurrido, estaríamos ya en esa fase de expansión cada vez más rápida que se asemeja a una nueva inflación, final.

Hasta ahora venimos hablando de la constante cosmológica. En nuestras consideraciones así la hemos usado y, en efecto, puede causar los efectos que se están observando. En la teoría de Einstein aparece como una constante de integración, sin que haya ninguna indicación sobre su posible valor, ni siquiera sobre si es positiva o negativa. Por otro lado, desde el punto de vista observacional, tan sólo en el dominio de la Cosmología puede ser discernible.

La constante cosmológica ha sido también considerada desde otro punto de vista. El término se puede separar



del resto del tensor geométrico y añadirlo al segundo miembro, como si se tratase de una contribución energético-material más. Si ahora consideramos el caso en que no hay más aportaciones al tensor materia-energía que la de la constante cosmológica, podría considerarse que Λ corresponde a la *densidad de energía del vacío*. Esta idea es la que motiva el cambio de denominación a *energía oscura*. Analizada en términos de un fluido, correspondería al caso en que la ecuación de estado es $p \propto -\rho$, es decir, una tensión en lugar de una presión. De ahí que su efecto gravitatorio sea contrario al de atracción de la materia-energía ordinaria. El efecto de la energía oscura es el de una repulsión. De ahí que sea capaz de acelerar la expansión.

Por otro lado, para que haya una aceleración basta con que haya una componente que se comporte como una tensión, de modo que la ecuación

de estado anterior puede generalizarse para tomar la forma $p \propto w\rho$, en donde el coeficiente w puede tomar un valor entre 0 (caso $\Lambda = 0$) y -1 (corresponde al de la constante cosmológica). Esa relación anterior se conoce como *ecuación de estado del Universo* y constituye uno de los objetivos principales de los esfuerzos observacionales que se están planificando, y de los teóricos.

En efecto, también en el campo de la Física Teórica plantea la constante cosmológica problemas formidables. Considerada como energía del vacío, su valor debería poder fijarse por argumentos relativamente directos sobre los campos materiales y su contribución a la misma. Pero el valor mínimo que de esa forma se puede encontrar para esa densidad es extraordinariamente superior, nada menos que 120 órdenes de magnitud, al valor máximo que las observaciones astrofísicas más básicas permiten. Se comprende que ya al final

de los años ochenta, ante tal situación, Weinberg escribiera que es el problema más grave de la Física. Y se comprende también que la revista *Science*, como ya dijimos, lo proclamase como el primer problema de la Ciencia.

Siempre se ha considerado el Universo como un inmenso, insuperable, laboratorio, aunque no pocas veces no pasase de ser un planteamiento algo retórico. Hoy, a principios del siglo XXI, la Astrofísica y la Cosmología lo han revelado como el único laboratorio en donde los componentes básicos puedan revelarse y ser ponderados y analizados. Sujetas a las condiciones y a las precauciones propias de una ciencia observacional como son aquéllas, su progreso nos ha mostrado que lo que vemos por su luz y entendemos con nuestras teorías no sería, a día de hoy, sino una ínfima parte de lo que conforma el Universo.

Epílogo. A modo de conclusiones

*Si no se espera, no se encontrará lo inesperado;
puesto que lo inesperado es difícil y arduo.*

Heráclito

Lo que acabamos de relatar nos lleva a concluir que el Universo se expande con un ritmo que hoy es, dentro de los errores de medida, de 71 km/s/Mpc. Que esta expansión comenzó hace unos 14 mil millones de años, que generó fluctuaciones que fueron creciendo hasta formar las galaxias y aglomerados que hoy vemos. También nos dice que la radiación de fondo que observamos a 2,73 K es el residuo fósil de la radiación que existió en el pasado cuando la materia y la radiación estaban aún en equilibrio. Y que las abundancias que medimos de algunos elementos como D, He y Li son también la prueba del pasado caliente y denso del Universo que pudo formarlos cuando las condiciones eran apropiadas.

Este modelo nos dice que el Universo tiene una historia y que las galaxias más lejanas están, en términos generales, en fases evolutivas anteriores a las más próximas; y que el grado de estructuración de la materia que vemos en el Universo próximo es muy superior al que debió de existir en etapas anteriores.

Una gran cantidad de datos de observación puede hacerse encajar en ese esquema. El modelo está asentado (a veces se le ha denominado Modelo Cosmológico de Consenso) y estaríamos en el inicio de la Cosmología de precisión, de ajustar los detalles.

Pero ¿de qué está hecho el Universo? Hemos comenzado con las estrellas, las galaxias y sus agregados... Materia ordinaria que participa en la producción de luz, principalmente a través de las reacciones termonucleares que tienen lugar en los interiores estelares. Ciertamente es que si examinamos, por ejemplo, el Sistema Solar, nos encontramos con cuerpos que no producen luz, los planetas, asteroides... Pero el Sol representa más del 99% de la masa total, de modo que es una buena aproximación decir que la masa del sistema viene dada por la de la estrella central. Se puede pensar que haya cuerpos de masas tan inferiores a la del Sol, desde estrellas enanas marrones a planetas similares a Júpiter, que no se alcancen en su interior las condiciones necesarias para iniciar el proceso termonuclear. También existe gas en diferentes fases, polvo..., pero no contribuyen entre todos esos componentes de manera significativa a la masa total que representan las estrellas. De modo que admitir que la masa en estrellas, la masa luminosa, no es muy inferior a la total era un punto de partida históricamente razonable.

No sabemos si porque, como recomendaba Heráclito, los astrónomos han estado siempre atentos a lo inesperado o simplemente por la fuerza de los datos de observación, las sorpresas se han presentado de manera contundente. La primera de ellas, firmemente apuntada desde los primeros estudios dinámicos de cúmulos de galaxias y de galaxias individuales, es que *la materia luminosa estelar sólo representa una pequeña fracción de la masa luminosa total*. El análisis de detalle de las propiedades de los cúmulos de galaxias reveladas por su emisión en el dominio de los rayos X prueban que, en el sentido extendido del término luminoso que aquí utilizamos para abarcar cualquier rango del espectro electromagnético, *la mayor parte de la materia luminosa, bariónica, no está en las estrellas, sino en forma de plasma caliente en el medio intergaláctico de los cúmulos o, incluso, entre los cúmulos*.

La segunda sorpresa es que *la masa dinámica es muy superior a la masa luminosa total. La mayor parte de la materia que existe es oscura*. Como ya dijimos antes, esta componente ha sido puesta de manifiesto por sus efectos gravitatorios y, en ese sentido, ha sido descubierta. Es un resultado de la Astrofísica, independiente de cualquier consideración cosmológica, que se sustenta tan sólo en nuestras concepciones sobre la gravedad. Pero ¿cuál es su naturaleza? Para responder a esta cuestión tenemos que utilizar argumentos que vienen de la Cosmología. En el marco del modelo estándar hemos visto que las abundancias de los elementos ligeros ponen cotas a la densidad bariónica del Universo, puesto que de otra forma no se podrían explicar los valores medidos de esas abundancias. Aun teniendo en cuenta las incertidumbres de las medidas, la conclusión es que *la cantidad de materia bariónica permitida por la Cosmología es muy inferior a la masa total dinámica*. La

conclusión final es, en consecuencia, que la mayor parte de la materia del Universo es no solamente no-luminosa, sino que es *de naturaleza diferente a la materia bariónica*. Más aún, debería estar constituida por partículas que *interaccionan muy débilmente* con las demás, salvo por la acción universal de la gravedad, lo que hace extremadamente difícil su detección. No conocemos todavía qué es la materia oscura, *pero sabemos lo que no puede ser*.

La última sorpresa, por ahora, es la constatación que la expansión es acelerada y, por lo tanto, *existe una componente en el Universo que se comporta de forma diferente a la de la materia y que constituye la mayor parte del contenido energético-material del Universo*. Que se trate de la constante cosmológica o de energía oscura es algo que tendrá que dilucidarse con nuevos datos y elaboraciones teóricas. Pero, como decíamos antes para la materia oscura, puede decirse que ya ha sido descubierta por sus efectos (anti) gravitatorios.

En términos cuantitativos, la situación que nos presentan los datos existentes es que el balance global viene dado $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$ (recordemos que aunque ambas componentes varían a lo largo del tiempo, la ecuación es válida para cualquier etapa evolutiva del Universo). Con los valores hoy admitidos para los diferentes parámetros cosmológicos, incluida la constante de Hubble, la importancia relativa de los mismos es la que damos en el cuadro resumen final.

La composición y naturaleza de la materia y energía oscuras es uno de los desafíos más importantes con que se enfrenta no sólo la moderna Cosmología sino la Física. Las partículas que podrían constituir la materia oscura son objeto de búsqueda directa desde hace ya algunos años con experimentos sofisticados y, gracias a las técnicas de detección, con observaciones de los rayos γ que se producirían en el proceso de aniquilación de las mismas. Las teorías, por su parte, intentan poner cotas a las propiedades que podrían tener esas partículas para orientar los experimentos.

En cuanto a la energía oscura, dado que sus efectos son sólo apreciables en el dominio cosmológico, determinar su naturaleza, establecer si se trata de una constante o de una nueva componente del Universo exigen un esfuerzo de tal calibre que sólo será abordable en el marco de grandes colaboraciones, que ataquen el problema desde diferentes perspectivas y con métodos diferentes, que pongan en común medios poderosos de observación, capacidad de análisis de datos y flexibilidad teórica para poder interpretarlos. Aquí casi sólo cabe esperar lo inesperado.

El problema de la energía oscura plantea un reto formidable a la Física. Como ya dijimos, la Física de partículas no ha podido explicar cómo el valor que hoy

observamos de la constante cosmológica es tan pequeño (más de 120 órdenes de magnitud) con respecto a sus predicciones más básicas. Nadie descarta en este momento que el avance en la caracterización empírica del problema pueda forzar cambios drásticos en alguna de nuestras concepciones teóricas, particularmente en el dominio de la gravedad, como se dice en el citado informe sobre la energía oscura y como se reconoce en todos los ámbitos científicos.

Cuadro resumen de la composición del Universo

$\Omega_\Lambda = 0,73$. La energía oscura, de naturaleza desconocida, domina la evolución del Universo a partir de cierto momento, por el que el Universo ya habría pasado. La expansión se acelerará indefinidamente en el futuro

$\Omega_m = 0,27$. La materia-radiación dominó en el pasado, pero ya no es el caso. En el futuro su importancia irá decreciendo paulatinamente. Este término tiene varias componentes:

$\Omega_m \sim 0,06$. La componente bariónica es minoritaria. Tiene a su vez dos componentes,

$\Omega_m \sim 0,012$. Contenida en las estrellas

$\Omega_m \sim 0,048$. En forma de plasma en los cúmulos de galaxias

$\Omega_m \sim 0,21$. Es la materia oscura, el mayor contribuyente a Ω_m , cuya naturaleza es hoy desconocida

Claroscuro del Universo

Nuestra principal guía para conocer el Universo es el análisis de la luz que nos llega de los astros, pero lo visible nos ha llevado rápidamente, con los avances de los últimos años, hacia aquello que no vemos, la materia que sabemos que existe por su efecto en los movimientos de los cuerpos que forman parte del mismo sistema. Su naturaleza es diferente a la que constituyen las estrellas, los planetas o a nosotros mismos: es la *Materia Oscura*.

La estructura básica del Universo se ha ido determinando paulatinamente, usando fuentes cada vez más lejanas y que permiten una mejor separación entre las predicciones de los diferentes modelos. Con la capacidad de medidas cada vez más precisas ha llegado una gran sorpresa: *la expansión del Universo es acelerada*. Dado que la presencia de materia y energía, cualquiera que sea su naturaleza, sólo puede frenar la expansión por sus efectos gravitatorios..., se deduce que debe haber un nuevo componente que sea responsable de esa aceleración de la expansión.

Para explicar este nuevo componente, Einstein incluyó entre sus teorías la llamada *Constante Cosmológica*, que no tuvo buena prensa al principio, pero que nunca desapareció de la escena cosmológica. Su estatus como ingrediente necesario para comprender la expansión acelerada es relativamente reciente, y con la novedad de que su concepción se ha ensanchado para abarcar la posibilidad de que se trate de una entidad física, totalmente desconocida por el momento y que evoluciona con el tiempo. Estamos hablando de la *Energía Oscura*.

Claroscuro del Universo

MARIANO MOLES VILLAMATE
COORDINADOR



CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS