

El Big Bang

Manuel Sanromà



EDITORIAL UOC

Diseño de la colección: Editorial UOC
Diseño del libro y de la cubierta: Natàlia Serrano

Primera edición en lengua castellana: febrero 2016
Primera edición en formato digital: febrero 2016

© Manual Sanromà, del texto

© Editorial UOC (Oberta UOC Publishing, SL) de esta edición, 2016
Rambla del Poblenou, 156, 08018 Barcelona
<http://www.editorialuoc.com>

Realización editorial: Oberta UOC Publishing, SL

Esta obra está sujeta –si no se indica lo contrario– a una licencia Creative Commons de Reconocimiento-No Comercial-Sin obra derivada 3.0 España. Puede copiar, distribuir y comunicar públicamente, siempre y cuando reconozca los créditos de las obras (autoría, Editorial UOC) de la manera especificada por los autores y la Editorial que la publica. No puede hacer uso comercial ni obra derivada sin el permiso del Editor y de los autores. La licencia completa se puede consultar en <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/deed.es>

Manuel Sanromà

Manuel Sanromà es profesor titular de Matemática Aplicada en la Universitat Rovira i Virgili y miembro de la Unión Astronómica Internacional.

QUÉ QUIERO SABER

Lector, lectora, este libro le interesará si usted quiere saber:

- Cómo ha evolucionado el estudio del Universo a lo largo de la historia.
- Cuáles han sido las aportaciones de científicos como Kepler, Galileo, Einstein o Hubble.
- Qué explica la teoría del Big Bang.
- Qué nos permite saber sobre el origen del Universo.
- Qué es todo lo que nos queda para saber.
- Cuándo lo sabremos, si es que lo descubrimos algún día.

Índice

QUÉ QUIERO SABER	7
UNA TEORÍA IMPRESIONANTE Y SÓLIDA	11
LA COSMOLOGÍA PRECIENTÍFICA	13
El cosmos antes de Copérnico	13
Alejandro Magno y Ptolomeo	17
De la revolución copernicana a la científica	22
Las armonías de Kepler	26
Llega Galileo	28
La ciencia newtoniana	31
Kant y la infinitud del Universo	34
El nuevo concepto de ciencia	37
LA COSMOLOGÍA SE CONVIERTE EN CIENCIA	41
La importancia de Einstein	41
Los grandes telescopios y Hubble	47

¡E hizo bang!	50
El gran descubrimiento	54
LA TEORÍA DEL BIG BANG	57
Cómo explicar tres problemas	58
La masa oscura	61
La energía oscura	65
Sabemos algunas cosas	67
LAS BASES OBSERVACIONALES	71
La radiación de fondo	71
La estructura del Universo a gran escala	73
Las lentes gravitatorias	74
Las supernovas	74
El bosque Lyman-Alpha	75
Nuevas observaciones	76
Aceleradores de partículas	76
UNA HISTORIA DEL UNIVERSO	79
Mirar atrás hacia adelante	79
Tres grandes periodos	82
La edad oscura	86
El Modelo Concordante	89
Más allá del Big Bang	93
Bibliografía	95

UNA TEORÍA IMPRESIONANTE Y SÓLIDA

Las preguntas sobre los orígenes son las más antiguas y a la vez las más profundas que se plantean los humanos. El origen del hombre, de la vida y del Universo ha estado siempre en el centro del interés humano, y de ello son prueba las explicaciones míticas y religiosas que aparecen en todas las culturas. Pero solo en los últimos cien años han estado al alcance de la investigación científica lo que nos ha permitido empezar a descubrir sus claves. La cosmología, combinando los adelantos teóricos y experimentales de la física de partículas con los espectaculares avances observacionales de la astronomía, no solo nos ha descubierto un Universo de unas dimensiones inimaginables sino que ha sido capaz de averiguar cuál ha sido el origen y la evolución de ese Universo. La teoría del Big Bang es actualmente una de las construcciones más impresionantes del intelecto humano y

constituye uno de los modelos científicos más sólidos de la ciencia del nuevo milenio.

LA COSMOLOGÍA PRECIENTÍFICA

La cosmología es tan vieja como la cultura humana. Como disciplina científica empieza con Einstein. Pero entre las cosmologías animistas de los primeros hombres que observaban el cielo estrellado y el mundo que los rodeaba y el Big Bang inflacionario que representa nuestro conocimiento del Universo en pleno siglo XXI hay una historia del pensamiento que tiene un primer salto cuántico en el paso del mito al logos con los filósofos presocráticos. La tradición de los filósofos milesios y de los pitagóricos, recogida por Aristóteles, configuró un primer modelo racional del mundo.

El cosmos antes de Copérnico

Aristóteles (384-322 a.C.) desarrolló un sistema del mundo en el que la Tierra era esférica y se encon-

traba inmóvil en el centro del Universo, mientras que el cielo, con todos sus astros, giraba a su alrededor. Además, postuló una diferencia fundamental entre los cuerpos terrestres y los celestes. Según Aristóteles, los cuerpos terrestres estaban formados por los cuatro elementos fundamentales presocráticos, que poseían movimientos naturales propios: la tierra y el agua hacia el centro de la Tierra, el aire y el fuego en sentido contrario. Cada elemento tenía como lugar natural una esfera (todavía hoy hablamos de litosfera, hidrosfera y atmósfera).

Con respecto a los cuerpos celestes, Aristóteles hace una contribución original e introduce una quinta sustancia, el éter, incorruptible e inmutable, del que están formados los cuerpos celestes, que trazan un movimiento natural de forma circular. Aristóteles consideraba que el Sol, la Luna y los planetas estaban fijados sobre sus esferas correspondientes. Las estrellas, a su vez, se encontraban fijas sobre una esfera que giraba en torno a la Tierra y correspondía a la frontera del Universo. Pero ¿qué había más allá de la esfera estelar? Aquí, Aristóteles tuvo que recurrir a varios juegos de manos filosóficos para explicar que, más allá, no había nada, pero que esta nada no equivalía a un vacío en extensión; todo ello para decir que el Universo se acababa «realmente» en la esfera celeste.

Si hay un pensador que contribuyó a configurar la cultura occidental, ese es Aristóteles. Su influencia se ha dejado sentir durante más de dos milenios,

tanto a través de la cultura judeocristiana como de la musulmana, y hasta la revolución científica prácticamente nadie osó cuestionar sus aportaciones en todos los campos del pensamiento. Así pues, no es extraño que el cosmos aristotélico fuera casi artículo de fe o modelo intocable y que marcara la historia del pensamiento occidental.

Las características básicas de su modelo han configurado el pensamiento cosmológico de una manera a menudo poco explícita pero tremendamente influyente. Así, mientras que adoptó los cuatro elementos básicos de los presocráticos, no hizo lo mismo con la idea de Leucipo y Demócrito de que toda la materia estaba formada por unas unidades básicas indivisibles llamadas átomos. Eso provocó, por una parte, que esta idea atomista fuera prácticamente inexplorada durante dos mil años y por otra que el microcosmos quedara relegado implícitamente en los modelos cosmológicos, que pasaron a ser un campo de estudio más relacionado con la astronomía, y por tanto con el macrocosmos, que con la física: de hecho no ha sido hasta el siglo XX, con el modelo del Big Bang, cuando la física de partículas ha empezado a interesarse por la cosmología.

Además, con la introducción del éter, o quintaesencia, Aristóteles también separaba el microcosmos de la Tierra (formado por los cuatro elementos clásicos) del macrocosmos de los cielos, permanentes e incorruptibles. Esta separación tuvo una gran influencia tanto desde el punto de vista religioso co-

mo científico. De hecho no es hasta el siglo XIX, con la espectroscopia, cuando la ciencia pudo demostrar que la composición de los objetos celestes era exactamente la misma que la materia terrestre. Y no es hasta la teoría de la relatividad del siglo XX cuando el éter pasa a la historia de los conceptos innecesarios o inexistentes. Finalmente, las esferas y los movimientos circulares, introducidos por Platón y Eudoxio, recogidos por Aristóteles y consagrados en el modelo matemático de Ptolomeo, conformaron el Universo helenístico y medieval que, después de ser adoptado por las grandes religiones monoteístas, sobrevivirá hasta la revolución científica no solo entre los estudiosos sino también en el imaginario popular.

El espectro de la luz

Todo el mundo ha visto un arco iris, sea en la atmósfera en tiempo tormentoso, sea a través de las gotas de agua que dispersa un aspersor de riego. Este fenómeno, causado por la descomposición de la luz en sus colores al pasar a través de las pequeñas gotas de agua en la atmósfera, pone de manifiesto lo que denominamos espectro de la luz.

La luz es una onda electromagnética, y lo que nosotros experimentamos como color no es más que el efecto fisiológico producido en nuestros órganos perceptores por la frecuencia de esta onda (más elevada hacia el azul y menos hacia el rojo). Cuando la luz pasa desde un medio material a otro (por ejemplo, del aire al agua) se produce el denominado fenómeno de refracción, en que los ra-

yos de luz cambian de dirección. El grado de cambio de los rayos depende de la frecuencia de la luz: los diferentes colores cambian de dirección en grados ligeramente diferentes y por eso es por lo que la luz blanca, compuesta por todos los colores, se descompone en todos ellos (lo que denominamos espectro continuo) y esto constituye el espectacular arco iris.

Si hacemos pasar la luz emitida en cualquier interacción física a través de un espectrógrafo (aparato para separar la luz en sus colores), observaremos su espectro característico que depende de los átomos que participan en esta interacción. En el espectro de una luz cualquiera, superpuestas al continuo (el arco iris) se pueden apreciar varias bandas oscuras (líneas de absorción) o luminosas (líneas de emisión), que son características de los diferentes elementos químicos que intervienen en el proceso que produce la luz estudiada. El espectro de la luz es una firma inequívoca de la composición de la materia que la emitió.

Alejandro Magno y Ptolomeo

Un macedonio, discípulo de Aristóteles, propagó la influencia griega por todo el mundo conocido. Alejandro Magno es sin duda uno de los personajes reales que han alcanzado casi el nivel del mito en la historia. No en vano, con sus conquistas, unió la civilización griega con Egipto y Oriente hasta la India. En términos actuales podríamos decir que protagonizó la primera globalización, ya que fue el creador de la llamada cultura helenística.

Alejandría, la capital de la dinastía de los ptolomeos, sucesores de Alejandro, se convirtió en el centro de esta cultura, punto de encuentro entre el este y el oeste, por donde fluían las ideas y las creencias en una y otra dirección. Allí encontramos el primer centro de investigación de la historia, fomentado y mantenido por el poder político: la mítica Biblioteca de Alejandría. A su alrededor surgió una serie de científicos que, aplicando el razonamiento y la observación, contribuyeron a cambiar radicalmente la visión del mundo y a establecer las bases sobre las que, más de mil años después, se produciría la revolución científica.

Aristarco, Eratóstenes, Hiparco y Ptolomeo son, desde todos los puntos de vista, precursores (de la misma importancia) de Copérnico, Kepler, Galileo y Newton. No podemos dejar de preguntarnos qué habría pasado si no hubiera habido una ruptura de más de un milenio entre la ciencia alejandrina y la reanudación renacentista. En cualquier caso, el hecho es que las investigaciones de estos cuatro científicos alejandrinos dieron paso a una nueva visión, basada en observaciones y cálculos meticulosos, de un mundo inimaginablemente mayor que el de nuestra realidad diaria.

La ciencia astronómica helenística culmina con Ptolomeo de Alejandría (hacia 90 d.C. - hacia 168 d.C.). Aparte de escribir sobre geografía, astrología y música, Ptolomeo compiló en su histórico tratado *Almagesto* todos los conocimientos astronómicos

acumulados hasta el momento en un modelo coherente que estará en la base de la cosmovisión occidental hasta la revolución copernicana y de hecho, como modelo cosmológico, hasta Newton. Desde el punto de vista cosmológico, Ptolomeo recoge el Universo aristotélico, pero, sobre la base de la ciencia helenística, introduce un modelo más sofisticado que las esferas de Platón y Eudoxio para explicar el movimiento de los planetas.

El modelo de los epiciclos (círculo que se mueve en otro círculo, llamado deferente), introducido originalmente por Apolonio de Perge, sirve para explicar el movimiento retrógrado observado en los planetas, así como la variación de su distancia (y por lo tanto, de su luminosidad). El centro del deferente no se encuentra en la Tierra sino que está ligeramente separado (un fenómeno que se llama excentricidad). Además, Ptolomeo introdujo el ecuante, o punto ligeramente alejado del centro del deferente, en torno al cual se produce el movimiento uniforme del epiciclo (de otro modo no se podía explicar la variación en el movimiento retrógrado de los planetas).

El modelo de Ptolomeo fue el primer modelo matemático del Universo con capacidad predictiva, ya que era capaz de predecir con bastante exactitud la posición de los planetas sobre la bóveda celeste. A estos efectos había que introducir un número variable de epiciclos (epiciclos dentro del epiciclo) según el planeta; todo ello configuraba un modelo bastante elaborado que, con el fin de ajustarse a las observa-

ciones, rompía con la perfección de las esferas platónicas y aristotélicas.

Como instrumento puramente matemático la capacidad predictiva del modelo heliocéntrico que plantearía Copérnico catorce siglos más tarde, no era mejor que la del modelo geocéntrico de Ptolomeo y tanto uno como otro en muchos casos fueron considerados por sus partidarios simples modelos para efectuar cálculos, y no representaciones del funcionamiento real del cosmos. La gran ventaja del modelo heliocéntrico fue, inicialmente, su simplicidad. En cualquier caso, el pensamiento aristotélico y la matemática helenística combinadas en el *Almagesto* solidificaron en un modelo cosmológico que sobrevivió durante catorce siglos.

A menudo parece que entre el *Almagesto* de Ptolomeo y el *De revolutionibus* de Copérnico nos separen catorce siglos de oscuridad intelectual con respecto a la visión del mundo. Dejando aparte que eso sería casi imposible (las revoluciones necesitan un caldo de cultivo), el hecho es que a menudo pasa desapercibido que, en los primeros siglos del cristianismo, se produce un cambio muy significativo en la cosmovisión, que tendrá un gran impacto en el debate cosmológico posterior. Dos pensadores cristianos, Tertuliano de Cartago (hacia 155-230) y Agustín de Hipona (354-430), introducirán la idea de la *creatio ex nihilo*, que hasta entonces había estado ausente en todas las consideraciones cosmogónicas o cosmológicas. Efectivamente, tanto en las cosmogonías míticas

como en el cosmos naturalista presocrático (recogido por Aristóteles) la materia es preexistente. El demiurgo platónico no crea la materia sino que trabaja en ella; los epicúreos negaban explícitamente la posibilidad de la creación de la nada; el Génesis no dice explícitamente que Dios creara el cielo y la tierra de la nada.

La idea de la creación a partir de la nada, introducida originalmente por Tertuliano, se consolida gracias a la figura de san Agustín, uno de los padres y doctores de la Iglesia de mayor influencia. Formulada por un pensador de su prestigio, en los mismos momentos en que el emperador Teodosio convertía el cristianismo en la religión oficial del Imperio romano y cuando se estaba produciendo la transición del mundo antiguo al medieval, la idea de un mundo creado de la nada quedará ligada al Universo aristotélico y ptolemaico en un sólido edificio, defendido firmemente por los poderes eclesiástico y político, que no se tambaleará hasta Galileo.

Desde San Agustín, el cielo del cosmos es el cielo creado por Dios, la Ciudad de Dios. Así será durante más de mil años y cuando Galileo defienda la realidad del modelo heliocéntrico de Copérnico, los teólogos de Roma le preguntarán cómo explica que Josué detuviera el Sol para ganar la batalla de Jericó.

De la revolución copernicana a la científica

Nicolás Copérnico (1473-1543), un erudito renacentista polaco que entre sus múltiples actividades incluyó la astronomía, es el autor de uno de los libros más influyentes de la historia: *De revolutionibus orbium coelestium*. Publicado poco después de su muerte, desató la revolución científica que culminaría con los *Principia* de Newton. En su libro, resultado de décadas de trabajo, Copérnico expone sus tesis. La Tierra no es el centro del Universo y este está cerca del Sol. La distancia de la Tierra al Sol es muy pequeña comparada con la distancia que hay hasta las estrellas. La rotación diaria de la Tierra es lo que causa el movimiento aparente de las estrellas sobre la bóveda celeste. El movimiento de la Tierra en torno al Sol es la causa de su movimiento aparente entre las estrellas y también la causa de las estaciones. El movimiento de los planetas entre las estrellas está causado por la combinación de su movimiento en torno al Sol y de la propia Tierra en torno a este.

Las distancias en astronomía

Mientras que en nuestra vida diaria el metro y sus múltiplos (kilómetros) y submúltiplos (centímetros y milímetros) son unidades útiles y familiares para medir distancias, para el Universo a gran escala se han adoptado otras unidades mayores, vistas las dimensiones implicadas. La Tierra es aproximadamente una esfera de 12.732 kilómetros de diámetro, la Luna está a unos 380.000 kilómetros y el Sol a unos 150 millones. La distancia del Sol a su planeta más

lejano es de unos 4.500 millones de kilómetros y a partir de aquí el sistema métrico deja de ser una herramienta útil.

Para las inmensas distancias implicadas en el estudio del Universo, utilizamos unidades mayores y más comprensibles. Para ello, aprovechamos que la velocidad de la luz es una constante universal y muy grande (para los estándares humanos), de aproximadamente 300.000 km/s. Si utilizamos como unidad de distancia lo que recorre la luz en un intervalo de tiempo (por ejemplo 1 segundo-luz serán 300.000 kilómetros; un año luz aproximadamente 10 billones de kilómetros) tendremos herramientas de medida mucho más útiles. La distancia del Sol a la estrella más próxima es de unos 4 años luz, el diámetro de nuestra galaxia es de unos 100 mil años luz y las galaxias de nuestro grupo local están separadas por distancias típicas de unos millones de años luz. Los astrónomos utilizan un múltiplo del año luz, llamado pársec, equivalente a 3,26 años luz. El pársec es la distancia a la que el radio de la órbita de la Tierra en torno al Sol tiene una paralaje de un segundo de arco (véase «Cómo medir las distancias astronómicas»).

Copérnico desarrolló su teoría heliocéntrica unas décadas antes de su publicación, pero era tan revolucionaria que se resistió a darla a conocer. Incluso en el prólogo de la primera edición (escrito por el teólogo Andreas Osiander) se especificaba que el modelo que se describía en el libro no quería ser una descripción de cómo era el Universo real sino simplemente un utensilio para simplificar el cálculo del movimiento de los planetas. Y la verdad es que la controversia

que desató el libro fue de carácter más científico que filosófico.

Hay que decir que, a efectos prácticos, la teoría de Copérnico, que pretendía una mayor simplicidad que la de Ptolomeo, no lo era tanto como él deseaba, dado que, con el fin de mantener las órbitas circulares perfectas también tenía que recurrir a los epiciclos ptolemaicos. Además, no había ninguna evidencia observacional en favor del modelo de Copérnico: ésta tendría que esperar a las observaciones telescópicas de Galileo de las fases de Venus. Uno de los argumentos contundentes contra el sistema heliocéntrico es que las estrellas no mostraban ninguna paralaje. Hoy día sabemos que este efecto existe, pero que no podía ser medido con las técnicas renacentistas: la primera medida de una paralaje se realizó bien entrado el siglo XIX. Copérnico argumentó (¡y acertó!) que eso podía ser debido a las enormes distancias estelares, pero no abandonó la esfera celeste sobre la que las estrellas se encontraban a una distancia enorme pero finita: el Universo copernicano tenía el mismo tamaño que el ptolemaico.

Cómo medir las distancias astronómicas

Medir las distancias de los objetos astronómicos no es una tarea sencilla. Las primeras medidas de los objetos más próximos, como la Luna y el Sol, las llevaron a cabo los astrónomos alejandrinos a partir del estudio de los eclipses y de las posiciones relativas de estos astros en el cielo. Para objetos más lejanos hay que recurrir a métodos específicos. En los objetos más próximos, la distancia se

puede conocer midiendo la llamada paralaje. Efectivamente, observando un mismo objeto desde dos puntos separados por una gran distancia, se puede medir el desplazamiento del objeto sobre el fondo de estrellas más lejanas (paralaje) de una manera tan precisa como los instrumentos de observación. Teniendo en cuenta que la órbita de la Tierra en torno al Sol nos permite observar desde posiciones separadas por el diámetro de la órbita (del orden de 300 millones de kilómetros) y con la actual precisión de los telescopios, con este método se llega a distancias de unos cuantos centenares de años luz.

Este método es pues claramente insuficiente para la mayoría de las medidas galácticas y, aún más, para las extragalácticas. Aunque hay diferentes métodos en circunstancias concretas (según el tipo de objeto observado), el único método general de medida de grandes distancias es el de las candelas patrón, que veremos más adelante.

A Giordano Bruno (1548-1600) corresponde el mérito de haber ampliado el Universo copernicano: «Hay un número innumerable de soles, y un número infinito de tierras que giran en torno a estos soles», osó afirmar (la idea ya había sido defendida por Lucrecio en el siglo I a.C. y por Nicolás de Cusa en el siglo xv). No obstante, Bruno llegó a estas conclusiones a partir de especulaciones metafísicas que poco tenían que ver con un método científico. Su visión del mundo es, en realidad, animista, y se acerca más al panteísmo que a la ciencia moderna. Y si puso al Sol en el centro del sistema solar, no fue por razo-

nes astronómicas, sino porque le asignaba a este astro propiedades vitalistas, al estilo de la filosofía hermética de su época. De todas maneras, las ideas de Bruno le valieron ser acusado de hereje y morir en una hoguera de la Inquisición romana, justo cuando se iniciaba el siglo XVIII, lo que le convirtió en un mártir del libre pensamiento.

Las armonías de Kepler

Un siglo después de Copérnico, el gran astrónomo alemán Johannes Kepler (1571-1630) se propuso encontrar las «armonías» que rigen el movimiento de los planetas. Convencido de que el Sol es el centro del Universo, Kepler dedicó largos y penosos años a estudiar los datos observacionales, recopilados por su maestro Tycho Brahe (1564-1601), con la esperanza de encontrar algunas de las leyes simples que regían con toda precisión el curso de los planetas. Su investigación no fue en vano; Kepler descubrió las famosas tres leyes que ahora llevan su nombre.

De golpe, se hundió el sistema de los epiciclos, del que ni Copérnico había podido liberarse, para dar paso a la inesperada simplicidad de las elipses: Kepler acaba con dos milenios de círculos como figuras perfectas que representan el movimiento de los astros. Por otra parte, a Kepler le desagradaba la idea de un Universo infinito. Consideraba que la cuestión de la finitud o la infinitud del mundo era ajena a la ex-

perencia humana. Encontró un argumento para demostrar que el Sol era muy diferente de las estrellas. Antes de que se inventaran los telescopios, se creía que el tamaño aparente de las estrellas correspondía a su tamaño real.

Kepler demostró que si las estrellas se encontraban tan distantes como implicaba el sistema de Copérnico, el diámetro real de una estrella típica tendría que ser mayor que la órbita terrestre. Aún más, el cielo visto desde de una estrella tendría una apariencia muy diferente de la que tiene desde la Tierra: las estrellas se verían como grandes bolas de luz y no como pequeños puntos luminosos. Hoy día, sabemos que el tamaño aparente de una estrella es solo un espejismo producido por la atmósfera terrestre, que amplía su imagen, pero este fenómeno era desconocido en tiempo de Kepler, por lo que su argumento parecía perfectamente sólido.

Las estrellas

Una estrella es una esfera de materia, formada por la atracción gravitatoria de su material, que genera energía en su centro como consecuencia de las reacciones nucleares que se producen en ella. La gravedad de la materia que constituye la estrella gobierna totalmente la evolución y el control de las reacciones nucleares que le permiten producir una gran cantidad de energía y brillar. Cuanta más masa tiene una estrella, más rápida es la evolución, es decir, consume más rápidamente el combustible nuclear. Ésta masa puede medir entre una décima parte de la masa del Sol y unas cien veces ésta. Las estrellas de más masa tienen una vida de unos pocos

millones de años, comparados con los 10 mil millones de años que puede vivir una estrella como el Sol.

Los últimos estadios de la vida de las estrellas marcan las diferencias más relevantes en su comportamiento. Durante gran parte de su vida, las estrellas producen elementos químicos a partir de la fusión de núcleos de hidrógeno. Una vez consumido el hidrógeno, y en función de su masa y también de su entorno, la estrella entra en fases diferenciadas. Algunas se acaban consumiendo lentamente. Otras se acaban en procesos explosivos que desprenden inmensas cantidades de energía, conocidos como supernovas. Las supernovas y algunas estrellas variables constituyen verdaderos faros, visibles a gran distancia, que nos permiten deducir información sobre el Universo a gran escala.

Llega Galileo

Pero el gran impulsor del Universo copernicano y uno de los primeros científicos modernos es Galileo Galilei(1564-1642). Quizás Galileo no fue el primer hombre que miró el cielo a través de un telescopio, sin embargo sí que fue el primero en hacerlo sistemáticamente, en interpretar sus observaciones y, sobre todo, en divulgar sus descubrimientos y hacerlos accesibles a un círculo más amplio que el de los eruditos versados en latín. Galileo fue un apasionado defensor de Copérnico, y sus observaciones astronómicas confirmaron sus convicciones. Pero bajo la presión de los aristotélicos que dominaban la vida

cultural de aquella época, la Iglesia romana ya había tomado partido por el sistema geocéntrico, por sus puestas congruencias con la narración bíblica. Con pruebas objetivas, Galileo se propuso convencer a los altos prelados de la Iglesia de que Copérnico tenía razón; pero después de insistir durante varios años, solo obtuvo una prohibición oficial de enseñar el sistema heliocéntrico.

A pesar de todo, en 1632, Galileo publicó el *Diálogo sobre los dos principales sistemas del mundo*, libro en el que confrontaba, de una manera supuestamente imparcial, las doctrinas de Aristóteles y de Copérnico. Pero nadie podía engañarse con la simpatía del autor: el héroe del libro era Salviati, defensor de Copérnico, quien refutaba de uno en uno los argumentos de su contrincante, el filósofo peripatético Simplicio, torpe defensor de Aristóteles. El *Diálogo* fue escrito originalmente en italiano y pretendía ser un libro de divulgación más que un texto científico. Del sistema de Copérnico, solo aparecía la idea heliocéntrica, sin los detalles matemáticos de la teoría. No todos los argumentos de Galileo eran claros, ni siquiera verdaderos: al final del libro, por ejemplo, aparece una teoría de las mareas, totalmente errónea, con la que pretendía demostrar el movimiento de la Tierra. Aún más, no se dice ni media palabra sobre los descubrimientos de Kepler, que Galileo no pudo valorar correctamente. Pero, a pesar de sus limitaciones, el *Diálogo* tuvo el efecto suficiente para causar revuelo en el medio científico y religioso. Nada más publicarse, fue veta-

do por la Iglesia, y Galileo fue juzgado y condenado a retractarse de sus convicciones.

Las observaciones realizadas con su telescopio le permitieron acumular argumentos contra el modelo ptolemaico y a favor del modelo copernicano. Observó montañas en la Luna y manchas variables en el Sol, con lo cual parecía claro que los cuerpos celestes no eran inmutables y no estaban formados por una sustancia diferente a la de la Tierra. Descubrió cuatro satélites del planeta Júpiter (los mayores, que hoy se llaman galileanos), lo que ponía en entredicho el modelo geocéntrico; y también fases en el planeta Venus, imposibles de explicar con aquel y en cambio perfectamente explicables con el modelo heliocéntrico. Y además descubrió que la Vía Láctea está formada por una infinitud de pequeñas estrellas que no se pueden distinguir si no es con un telescopio: así se aclaraba el misterio de esta banda luminosa del cielo que tanto había despertado la imaginación de los filósofos y los poetas.

Galileo también descubrió que el telescopio reducía el tamaño aparente de las estrellas. Sospechó que este tamaño era una ilusión óptica y lo atribuyó al mecanismo de visión del ojo. No obstante, siguió pensando que el diámetro aparente no era totalmente ilusorio y calculó que una estrella muy débil debía de encontrarse a 2.160 veces la distancia del Sol. Aunque erróneo, este valor permitía considerar seriamente que las estrellas son parecidas a nuestro Sol, al contrario de lo que mantenía su contemporáneo

Kepler. En cuanto al tamaño del Universo, Galileo se mostró excepcionalmente cauto. «Es todavía incierto (y creo que lo será siempre para la ciencia humana) si el mundo es finito o, por el contrario, infinito», llegó a afirmar y con cierta razón, dado que cualquier otra posición basada en los conocimientos de su época hubiera sido una simple especulación.

En años posteriores a Galileo, dos astrónomos, el holandés Christian Huygens (1629-1695) y el escocés James Gregory (1638-1675), agrandaron las estimaciones de las distancias a las estrellas, el primero en un factor 10 y el segundo todavía en otro factor 4 (¡y todavía se quedó corto en un factor 5!). En cualquier caso nos encontrábamos ante un Universo de unas dimensiones fabulosas. Huygens escribió admirado: «Una bala de cañón tardaría centenares de miles de años en llegar a las estrellas». Se quedaba corto.

La ciencia newtoniana

Las leyes de Kepler, basadas en los datos observacionales de Brahe y las observaciones y los experimentos físicos de Galileo, abrieron la puerta a la obra científica de lo que muchos consideran el científico más grande de la historia: Isaac Newton (1643-1727). Antes de Newton no se había establecido ninguna relación entre la caída de los cuerpos en la Tierra y el movimiento de los planetas en el cielo. Nadie había

refutado la doctrina de Aristóteles según la cual los fenómenos terrestres y los celestes son de naturaleza totalmente diferente, y que los sucesos más allá de la órbita lunar no pueden entenderse sobre la base de nuestras experiencias mundanas.

La situación cambió drásticamente cuando Isaac Newton descubrió que la gravitación es un fenómeno universal. Todos los cuerpos del Universo se atraen entre sí; y la fuerza de atracción (F) entre dos cuerpos es proporcional a sus masas (M_1 y M_2) e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (D) que los separa:

Según una popular leyenda, Newton llegó a esta conclusión un día que, mientras meditaba sobre la atracción que mantenía la Luna unida a la Tierra, vio caer una manzana. La realidad es más prosaica: Newton dedujo su ley a partir de las leyes de Kepler. Estas le dieron la pista de que el movimiento de los planetas en torno al Sol (y de la Luna en torno a la Tierra) se podía explicar a través de una única ley universal que regía la atracción de los cuerpos. A estos efectos Newton utilizó los métodos matemáticos que había inventado cuando era más joven: él fue el inventor, con Leibnitz, del cálculo infinitesimal. Junto con sus estudios sobre la mecánica de los cuerpos, basados en los de Galileo, publicó todos sus resultados, en el año 1687, en su obra monumental *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*.

La existencia de la gravitación universal implica que las estrellas tienen que estar muy alejadas para no

influir sobre el Sol y sus planetas. El mismo Newton perfeccionó los cálculos de Gregory y obtuvo unas estimaciones bastante aproximadas de las distancias a las estrellas más próximas. Pero, aunque muy pequeña, esta atracción no puede ser totalmente nula: un conglomerado de estrellas acabaría por colapsar sobre él mismo debido a la atracción entre sus partes, y este sería el destino de un Universo finito. Newton llegó a la conclusión de que, para que eso no suceda, el Universo tiene que ser infinito y uniforme; solo pequeñas regiones pueden colapsar sobre sí mismas para formar regiones más densas, y es quizás así como se forman las estrellas.

En cualquier caso, con la aparición de la física newtoniana quedó liquidada definitivamente la física aristotélica, con las esferas celestes y las regiones formadas por diferentes elementos. No quedaba duda: nuestro sistema solar es justo un punto en el espacio y las estrellas son los verdaderos componentes del Universo. De hecho algunos autores han querido ver una base científica para el racionalismo y el empirismo en las dos grandes obras de Newton, respectivamente los *Principia* y la *Óptica*. La primera es un gran sistema matemático deductivo, mientras que la segunda tiene un carácter más abierto, experimental e hipotético.

La magnitud de la obra de Newton y su prestigio pusieron las bases para las ideas de la Ilustración e influenciaron a las generaciones posteriores de pensadores y científicos, tanto teóricos como experimen-

tales. Locke y Voltaire aplicaron los conceptos de ley natural a los sistemas políticos, Adam Smith los aplicó a la economía. Por otra parte, su mismo prestigio también apoyó una visión teísta del cosmos. Efectivamente, Newton previno contra una utilización de sus leyes para formular un cosmos como si fuera un gran reloj.

Kant y la infinitud del Universo

Fue precisamente una de las grandes lumbresas de la Ilustración, el filósofo alemán Immanuel Kant(1724-1804), quien abordó el problema de la finitud o infinitud del Universo desde un punto de vista filosófico. Pero aunque sus especulaciones en este aspecto se volvieron obsoletas a medida que avanzaba la ciencia, otras especulaciones suyas sobre cosmología acabarían siendo inmortales.

Kant conocía el modelo de Wright del Universo planar y la teoría de la gravitación universal de Newton, y se dio cuenta de que eran incompatibles. El problema fundamental era mantener la estructura de la Vía Láctea sin que se colapsara sobre sí misma. Kant encontró la clave del problema en el Sistema Solar: los planetas son atraídos por el Sol, pero no se le caen encima porque giran a su alrededor y la fuerza centrífuga compensa la atracción gravitacional.

De la misma manera, la Vía Láctea podría mantenerse estable si las estrellas estuvieran distribuidas,

no en un plano infinito, sino en un disco en rotación. Las estrellas describirían gigantescas órbitas alrededor del centro de la Vía Láctea y su fuerza centrífuga impediría el colapso.

No lo bastante satisfecho con una hipótesis tan audaz, Kant dio un segundo paso todavía más espectacular. Si la Vía Láctea es un conglomerado de millones de estrellas con forma de disco, ¿no podría haber o tras Vías Lácteas, parecidas a la nuestra y tan lejanas de ella como las estrellas lo están de los planetas? Estos conglomerados se verían como simples manchas lumínicas a causa de sus enormes distancias y sus formas serían circulares o elípticas. Y precisamente este tipo de objetos ya habían sido observados, señaló Kant: eran las llamadas estrellas nebulosas, o al menos una clase de estas, manchas luminosas solo visibles con un telescopio, cuya naturaleza era un misterio en su época.

El gran astrónomo británico de origen alemán William Herschel (1738-1822) llegó a conclusiones parecidas, pero a partir de observaciones directas. Herschel construyó lo que fue el mayor telescopio de su época, y con él estudió la configuración de la Vía Láctea. Suponiendo que la extensión de una región sideral es proporcional al número de estrellas que se ven en ella, Herschel concluyó que nuestro sistema estelar tiene una forma aplanada, de contornos irregulares y con el Sol en la región central. Herschel también descubrió numerosas nebulosas y se preguntó, igual que Kant, si no serían conglomerados de es-

trellas muy lejanos. Parece que esta era su opinión, hasta que un día descubrió una nebulosa con forma de anillo y una estrella situada en su centro, asociada sin duda a la nebulosa; no podía ser un «universo-isla», sino materia circundante de la estrella.

Mientras pensadores como Kant o astrónomos como Herschel asentaban las bases de lo que sería una nueva revolución en nuestras concepciones sobre el Universo, la física iba dando pasos de gigante en nuestro conocimiento tanto del microcosmos como del macrocosmos y confirmándose como ciencia por excelencia. Durante el siglo XVIII la mecánica establecida sólidamente por Newton tuvo un gran desarrollo, fundamentalmente de la mano de matemáticos como Leonardo Euler (1707-1783), Louis Lagrange (1736-1813) y Pierre Laplace (1749-1827). Este último es particularmente significativo porque en su *Mécanique céleste*, que muchos autores consideran una reformulación de los *Principia* en términos estrictamente matemáticos, Laplace planteó un Universo con una visión absolutamente opuesta a la de Newton. El Universo de Laplace era un reloj mecánico en el que las leyes de Newton eran capaces de prever la posición y el movimiento de cada una de sus partículas una vez estaba en movimiento. Además, Laplace recogió la hipótesis nebular de Kant y le dio forma en su libro de 1796, *Exposition du système du monde*, en el que planteaba el origen del sistema solar por la condensación de una esfera de gas que daría origen a un disco en rotación y este, a partir de

una condensación central al Sol y de condensaciones locales, al resto de los planetas.

El nuevo concepto de ciencia

Si el siglo XVIII representó la consolidación de la física matemática, el siglo XIX es el momento en que la física toma un carácter propio como modelo de ciencia: los conceptos actuales de ciencia y de científico nacen en este siglo. Se desarrollan plenamente dos nuevas ramas que tendrán una importancia fundamental en nuestro conocimiento del microcosmos. Por una parte el electromagnetismo, obra de varios científicos como Faraday, Ampère, Oersted y otros, que culminará James Clerk Maxwell (1831-1879) con su obra magna, *A treatise on electricity and magnetism* (1873), un verdadero monumento de la física matemática. Maxwell condensó en cuatro ecuaciones diferenciales el comportamiento de los campos eléctrico y magnético y su interacción con la materia. Además, predijo la existencia de ondas electromagnéticas y su velocidad, independiente del observador. La primera predicción, comprobada experimentalmente en el año 1887 por Herz, producirá desarrollos tecnológicos que hoy son obvios para todo el mundo. La segunda será una de las bases sobre las que Einstein construirá treinta años más tarde su teoría de la relatividad especial.

El segundo gran desarrollo de la física del siglo XIX es la teoría del calor o termodinámica. Obra de un conjunto de físicos, entre los cuales hay que destacar a Joule, Clausius, Kelvin, Gibbs, Helmholtz, Boltzmann y al propio Maxwell, entre otros, introdujo dos conceptos que desde entonces han sido centrales en ciencia y tecnología: la energía y la entropía. Son dos cantidades que se pueden calcular matemáticamente a partir de las variables observables de un sistema, la primera de las cuales se conserva en todos los procesos físicos (Primera ley de la termodinámica) mientras que la segunda siempre crece (Segunda ley de la termodinámica).

Es importante subrayar la influencia de estos conceptos, introducidos el siglo XIX, para nuestra concepción del mundo material. Cuando la teoría de la relatividad especial de Einstein demuestre la equivalencia entre masa y energía, estos dos conceptos, el primero claramente asociado a la materia y el segundo más abstracto, quedarán ligados. Por otro lado, la entropía, concepto también abstracto, está íntimamente relacionado con el tiempo físico; el crecimiento de la entropía se asociará a la flecha del tiempo del pasado hacia el futuro.

El siglo XIX, además de asistir al desarrollo de la física como ciencia por excelencia, también es testigo de una de las otras grandes revoluciones científicas: nos referimos, lógicamente, a la teoría de la evolución de las especies de Charles Darwin. El impac-

to del darwinismo en la visión moderna del mundo es otro salto copernicano: no solo la Tierra no es el centro del Universo sino que el hombre deja de tener un papel central y singular entre las especies vivas. Estudiar los orígenes (del Universo, del hombre) se convertía en un terreno abonado para la ciencia.

En cualquier caso, al final del siglo XIX, la física y la astronomía eran ciencias que se fiaban plenamente de sus éxitos. Las leyes de Newton, las leyes de Maxwell y las leyes de la termodinámica configuraban un conocimiento matemático detallado del funcionamiento del mundo. Por otra parte, la imagen de un Universo formado por sistemas planetarios parecidos al nuestro y regidos por las leyes de la mecánica celeste, cuyo conjunto constituía un inmenso sistema conocido como galaxia, en el centro del cual estaba nuestro Sol, era un modelo consolidado y que de hecho perduraría hasta bien entrado el siglo XX.

La satisfacción era generalizada; la calma era absoluta. La perspectiva científica era ir profundizando en este modelo. Según una famosa frase, atribuida al físico norteamericano Albert Michelson en el año 1894, el futuro de la física era cuestión «de ir añadiendo decimales». Todo estaba a punto para la revolución.

El efecto Doppler

Todo el mundo que ha ido en moto o en coche sabe que, a una velocidad constante, el tono del ruido del motor es siempre el mis-

mo. En cambio, cuando estamos cerca de la carretera (sobre todo en carreras de motos o de coches, en las que las velocidades son muy grandes) y oímos uno de esos vehículos que se acerca, el tono del ruido es más agudo y, cuando ha pasado y se aleja, el sonido se hace más grave. Hoy en día podemos experimentar este fenómeno de forma cotidiana en el ruido de los vehículos que se acercan y alejan a gran velocidad, o en la sirena de una ambulancia o coche de bomberos.

El cambio en la frecuencia de las ondas (tanto las sonoras como las electromagnéticas) es proporcional a la velocidad, con una dependencia matemática descubierta por Doppler en el año 1842: si conocemos la frecuencia de emisión y la de recepción, podemos calcular la velocidad del emisor. Este efecto es una bendición en astronomía, donde los objetos están tan lejanos que no podemos observar su velocidad sobre la bóveda celeste; en cambio, sí que podemos saber si se alejan o se acercan, y a qué velocidad. Estudiando el espectro de la luz de un objeto e identificando las líneas de emisión o de absorción de los diferentes elementos químicos, podemos conocer la velocidad de alejamiento o acercamiento de los cuerpos comparando la frecuencia de estas líneas con las obtenidas en el laboratorio. Así, el espectro de una estrella o de una galaxia no solo nos informa de su constitución, sino también de su dinámica.

LA COSMOLOGÍA SE CONVIERTE EN CIENCIA

La cosmología es una de las ciencias más jóvenes: podemos fechar el acta de nacimiento de la cosmología en un artículo de Einstein publicado en el año 1917, después de haber establecido la teoría general de la relatividad. Visto en perspectiva, no es extraño que naciera en las tres primeras décadas del siglo xx, la época que el padre del Big Bang, George Gamow, calificó en un libro como «thirty years that shook physics» (treinta años que cambiaron la física).

La importancia de Einstein

Pocas veces las fechas redondas marcan el final de una era y el comienzo de otra como el año 1900 en el campo de la física. Aquel año William Thompson, Lord Kelvin (1824-1907), maestro de Maxwell y uno

de los grandes físicos del siglo XIX, dio una conferencia en la que planteaba un futuro luminoso a la física solo oscurecido por dos «nubes»: la radiación del cuerpo negro y el experimento de Michelson-Morley.

Hoy sabemos que la explicación a estas dos «nubes» daría origen a la teoría cuántica y a la teoría de la relatividad que revolucionaron la visión del mundo. Y de hecho en diciembre de aquel mismo año el físico alemán Max Planck (1858-1947) presentaba en otra conferencia su hipótesis cuántica que desataría la revolución.

Las nubes de Kelvin

Los dos problemas que provocaban sombras en la física del siglo XIX dieron origen a las dos grandes revoluciones de la física del siglo XX. El cuerpo negro es un objeto teórico, introducido por Gustav Kirchoff en 1860, que absorbe toda la radiación que le llega y la remite (no refleja nada). El estudio de la radiación de este objeto había encontrado dificultades teóricas insuperables para hacer cuadrar las predicciones de la termodinámica con las observaciones, hasta que en 1900 Planck introdujo la hipótesis de que la radiación no se emite en forma continua sino en paquetes conocidos como *cuantos*, lo que dio origen a la teoría cuántica.

Los físicos norteamericanos Albert Michelson y Edward Morley hicieron un experimento en 1887 con el que pretendían demostrar la existencia del éter, el medio en el que se propagaban las ondas electromagnéticas (se pensaba que cualquier onda necesitaba un medio de propagación). Los resultados negativos del experimento,

difíciles de explicar en el marco de la física clásica, encontraron una explicación natural en la nueva teoría de la relatividad de Einstein.

Las tres primeras décadas del siglo xx representaron una verdadera y continua revolución en las ciencias físicas y, de hecho, es el momento en que se puede hablar del nacimiento de la cosmología científica. Por un lado, la teoría cuántica permitió el conocimiento de la estructura interna de la materia, una visión del microcosmos que antes nunca se había alcanzado. Por otro lado, la teoría de la relatividad abordó el estudio del tiempo y del espacio, de la masa y la energía, y de sus relaciones, y fue capaz de formular por primera vez un modelo matemático del Universo que iba más allá del conocimiento limitado por las observaciones. Fue durante estas décadas cuando se estableció la nueva visión del cosmos que ha sobrevivido en gran medida hasta la actualidad.

Y en esta visión, sin duda hay un nombre propio que destaca sobre los demás: Albert Einstein (1879-1955). Este científico alemán, probablemente el más popular de todos los tiempos, contribuyó a las dos revoluciones de la física del siglo xx, pero fue el autor e impulsor en solitario de una de las dos, la teoría de la relatividad, que marcó un antes y un después en la cosmología.

En 1905 Einstein publicó los resultados sobre sus estudios en torno a la propagación de la luz. Teniendo en cuenta los resultados del experimento de Mi-

chelson y Morley que implicaban la constancia de la velocidad de la luz independientemente del observador, y aplicando el principio galileano según el cual dos observadores en movimiento relativo constante uno respecto al otro han de obtener los mismos resultados en los experimentos, llegó a la conclusión de que el tiempo y el espacio dependían de cada observador y que eran dos facetas de una misma realidad, llamada espacio-tiempo. En otro de sus artículos, todavía profundizaba más en este planteamiento revolucionario y llegaba a la conclusión de la equivalencia entre masa y energía, formulada en la ecuación más famosa de la historia:

$$E = mc^2$$

c es la velocidad de la luz, que es una constante universal.

Así pues, podemos hablar de masa-energía como una misma realidad que se manifiesta de dos formas diferentes. Hay que decir que todos los aspectos de la teoría de la relatividad especial o restringida concuerdan con todos los experimentos realizados hasta ahora y constituyen una de las bases más sólidas de la física moderna.

La teoría especial de la relatividad solo se aplicaba a los cuerpos en movimiento relativo a velocidad constante. Para extenderla a los cuerpos con movimiento acelerado, Einstein hizo un monumental *tour-de-force* matemático que culminó con la publicación

en 1915 de la teoría general de la relatividad. En ella Einstein geometriza la fuerza de la gravedad: la geometría del espacio-tiempo está determinada por la masa-energía. En una famosa y afortunada frase de uno de los grandes físicos del siglo xx y discípulo de Einstein, John A. Wheeler (1911-2008) dice: «La materia le dice al espacio-tiempo cómo se tiene que curvar; el espacio-tiempo le dice a la materia cómo se tiene que mover». En su teoría general, Einstein ligaba los dos nuevos conceptos que había introducido con la teoría especial, y le otorgaba a la gravedad, fuerza que domina todo el Universo, el carácter determinante de su geometría.

No es extraño que Einstein se planteara muy pronto (en 1917) la tarea de aplicar las ecuaciones de la teoría general de la relatividad al Universo en su conjunto: se enfrentaba a una tarea monumental que daría origen a la cosmología como ciencia. El problema conceptual que Einstein afrontaba era el de compatibilizar sus ecuaciones con la imagen preconcebida de un Universo estático. Esta imagen estaba tan arraigada que Einstein no osó ponerla en duda y no se atrevió a aceptar lo que resultaba una consecuencia evidente de sus ecuaciones: el Universo tenía que ser dinámico, o bien en expansión o bien en contracción.

Para evitar este comportamiento, Einstein añadió a sus ecuaciones un nuevo término, llamado constante cosmológica: su misión, *ad hoc*, era contrarrestar la atracción gravitatoria. En términos newtonianos, podríamos decir que sería una fuerza repulsiva, in-

introducida *ad hoc*. Así pues, el primer modelo cosmológico matemático era un modelo estático en el que se introducía la constante cosmológica para contrarrestar la atracción de toda la materia del Universo.

En el mismo año, el astrónomo holandés Willem de Sitter (1872-1934) publicó otro modelo cosmológico basado en las soluciones de las ecuaciones de Einstein en el que, en caso de no tener en cuenta los efectos de la materia, obtenía un modelo en expansión. Ninguno de los dos sabía que un matemático y meteorólogo ruso, Alexander Friedman (1888-1925), comprobaba que, sin introducir la constante cosmológica, las ecuaciones de Einstein tenían una solución que generaba un Universo en expansión.

Antes de seguir adelante, debemos detenernos un momento en la constante cosmológica, porque volverá a salir más adelante. Una vez Einstein hubo conocido el modelo de Friedman y los resultados observacionales de Hubble, se arrepintió de haber introducido la constante cosmológica: de hecho dijo que había cometido la «pifia» más grande de su vida. Y es que ciertamente no había que introducir un término adicional repulsivo en un Universo en expansión. Pero la verdad es que este término no ha sido nunca totalmente abandonado por los cosmólogos (ya sea por tradición, por el prestigio de Einstein o por la comodidad de tener un término a mano para jugar en las ecuaciones) y recientemente ha hecho una reaparición estelar.

Los grandes telescopios y Hubble

En cualquier caso, estos acontecimientos teóricos se producían lejos del lugar en donde la observación astronómica estaba a punto de dar un salto extraordinario en el conocimiento del Universo. Gracias al dinero de algunos filántropos, enriquecidos por el desarrollo económico producido por la expansión americana hacia el oeste, se construyeron en California los telescopios más grandes conocidos hasta entonces, y también tenían el suficiente dinero para contratar a los mejores astrónomos del momento. Aquí es donde entran en la historia dos de estos astrónomos, Harlow Shapley y Edwin Hubble. Shapley (1885-1972) es un caso muy interesante en la historia de la visión del Universo. Por una parte contribuyó a un nuevo salto copernicano al sacar el sistema solar del centro de la galaxia; a estos efectos, utilizó las estrellas cefeidas como indicador de distancia para demostrar que el Sol estaba a unos 26.000 años luz del centro. Pero, en cambio, erró en las conclusiones sobre la naturaleza de las nebulosas: Shapley defendió la idea de que estos eran objetos de nuestra galaxia.

Candelas patrón: las estrellas cefeidas

Una candela patrón es una fuente de luz de la que conocemos su luminosidad intrínseca: la relación entre esta y la luminosidad observada nos permite calcular la distancia a la que se encuentra, dado que, de acuerdo con el principio de conservación de la energía, esta decae con el cuadrado de la distancia. Las estrellas cefeidas

muestran una variación periódica de su luminosidad en escalas de tiempo de pocos días. Lo que las hace tan importantes y útiles como candelas patrón es que se ha podido establecer una relación matemática precisa entre este periodo y la luminosidad absoluta (intrínseca), lo cual nos permite inferir esta última midiendo el periodo de variabilidad. El fenómeno de las variables cefeidas corresponde a la variabilidad en luminosidad y tamaño de estrellas supergigantes (de 5 a 20 veces la masa del Sol). Se llaman así porque la primera de este tipo que se descubrió fue una estrella de la constelación de Cefeo. Con la observación del periodo de las cefeidas podemos llegar a distancias del orden de los 60 millones de años luz (suficiente para nuestra galaxia y las galaxias más próximas).

Mientras que Albert Einstein estableció el comienzo de la cosmología científica, fue Edwin Hubble (1889-1953) quien le dio carta de naturaleza observacional. Durante los años veinte del siglo pasado hizo una serie de observaciones que cambiaron radicalmente la visión del Universo. Gracias a su descubrimiento de estrellas cefeidas en algunas nebulosas, pudo concretar su distancia y, como consecuencia, determinar que estas nebulosas eran objetos externos a nuestra galaxia y, por lo tanto, galaxias en sí mismas. Solo con eso ya se hubiera hecho un nombre en la historia de la cosmología, ya que contribuyó a dibujar un Universo muy diferente del que se conocía hasta entonces. Pero todavía hizo más.

Desde la segunda década del siglo pasado, el astrónomo norteamericano Vesto Melvin Slipher (1875-1969) había ido acumulando observaciones es-

pectrales de nebulosas en las que parecía producirse un desplazamiento sistemático hacia el rojo en las rayas de su espectro: eso indicaba que estos objetos se estaban alejando. Al establecerse la naturaleza extragaláctica de estas nebulosas, esta observación adquiriría una importancia particular. Gracias a sus observaciones y al cálculo de las distancias utilizando las variables cefeidas, Hubble pudo establecer una relación entre la velocidad de alejamiento de estas galaxias y su distancia. Y en un artículo publicado en 1929 demostró que esta relación era lineal ($V = H D$); es decir, que la velocidad de alejamiento de las galaxias (V) es proporcional a la distancia D (H es una constante llamada de Hubble en honor a su descubridor). Esta relación, que ha sido confirmada desde entonces, pone en evidencia que el Universo, cuyo componente fundamental son las galaxias, está en expansión. Con esta frase se puede resumir la gran contribución de Hubble.

Qué es una galaxia

Las galaxias son conglomerados de millones (las mayores tienen centenares de miles de millones) de estrellas que son los constituyentes básicos del Universo observable. Se calcula que existen varios centenares de miles de millones de galaxias. Su tamaño varía entre miles y centenares de miles de años luz. De estos inmensos sistemas, solo cuatro son observables a simple vista. El primero, y mayor, es nuestra propia galaxia: el magnífico espectáculo que ofrece en una noche oscura la banda luminosa que cruza la bóveda celeste y que gráficamente fue llamada Vía Láctea por los roma-

nos. Hoy sabemos qué es nuestra galaxia vista desde dentro, un inmenso sistema formado por algunos centenares de miles de millones de estrellas que adopta una forma de disco con estructura espiral con un diámetro de unos 100.000 años luz y un grosor de unos 1.000 años luz.

Para poder identificar los otros tres sistemas, se tuvo que esperar a los años veinte del siglo pasado, cuando se pudieron utilizar los mejores telescopios del momento. Mientras que la absoluta mayoría de los puntos luminosos que vemos a simple vista de noche son estrellas, hay tres que no lo son. En el hemisferio norte, en la constelación de Andrómeda, hay una pequeña estrella muy débil que en realidad es una inmensa galaxia situada a unos 2,5 millones de años luz y con un tamaño relativamente parecido al nuestro. Por su parte, en el hemisferio sur hay dos nebulosidades perfectamente visibles a simple vista conocidas como Nubes de Magallanes, que resultan ser dos galaxias más pequeñas que la nuestra situadas a distancias relativamente pequeñas.

¡E hizo bang!

Así pues, la expansión no solo se podía detectar en los modelos teóricos sino que era una realidad observacional incuestionable. Y aquí entra el actor que combina todas las piezas del rompecabezas con una idea seminal que daría origen al modelo cosmológico actualmente aceptado. Se trata del físico y astrónomo belga, además de sacerdote católico, Georges Lemaître

tre (1894-1966). En el año 1931 publicó en *Nature* un artículo en el que planteaba su «hipótesis del átomo primordial», según la cual la expansión del Universo debió de empezar a partir de una singularidad inicial, una gran concentración de materia que al explotar habría producido la expansión posterior. En sus charlas públicas sobre su modelo, Lemaître acostumbraba a utilizar la imagen de un «huevo cósmico que explota en el momento de la creación». Eso facilitó el nombre que posteriormente le daría a este modelo uno de sus principales opositores, Fred Hoyle, que lo llamó Big Bang, con un tono más irónico que despectivo.

La idea de Lemaître permitía encajar tanto los datos observacionales, la expansión, como los teóricos, la relatividad general. Pero como hipótesis científica le faltaba capacidad predictiva. De hecho, incluso las primeras estimaciones sobre la posible edad del Universo extraídas de los datos obtenidos por Hubble, daban un valor muy por debajo de la edad de las rocas más antiguas de la Tierra, con lo cual parecía que el modelo no se aguantaba mucho. En los años cincuenta del siglo pasado el afinamiento de estas estimaciones hizo desaparecer el problema.

En cualquier caso, la posibilidad de hacer cálculos sobre «el átomo primordial» carecía de un conocimiento profundo de la estructura del núcleo atómico, dado que en el inicio la materia tendría que haber estado concentrada con unas densidades que solo conocemos en el núcleo atómico. Pero este cono-

cimiento estaba a punto de producirse en los años treinta con el desarrollo de la física nuclear: en el año 1932 se descubría el neutrón y empezaba el estudio del núcleo y de las reacciones nucleares.

Y es aquí donde aparece el padre real de la teoría del Big Bang, George Gamow (1904-1968), un físico ucraniano, que había sido alumno de Alexander Friedman en Leningrado durante un tiempo. A finales de los años veinte estudió con Bohr en Copenhague, donde conoció a todos los grandes protagonistas de la revolución cuántica. En 1933 se exilió a los Estados Unidos, donde empezó a trabajar en física nuclear. En 1948 publicó, junto con sus estudiantes Ralph Alpher (1921-2007) y Robert Herman (1914-1997), unos artículos en los que calculaban las reacciones nucleares que se producirían en un modelo como el de Lemaître. Una de las predicciones de este modelo era que las proporciones de los elementos químicos más elementales (hidrógeno y helio) se ajustaban con una aproximación notable a las proporciones observadas en el Universo. La otra predicción, que a la larga sería decisiva para establecer el modelo como nuevo paradigma, era que el Universo tenía que conservar una temperatura residual producto del fenómeno explosivo inicial. La verdad es que, en su momento, estos artículos pasaron sin pena ni gloria, y como veremos, los científicos que detectaron esta temperatura residual, lo hicieron sin buscarla.

El mismo año en que Gamow publicaba sus resultados, en Cambridge (Inglaterra) se publicaba otra teoría sobre cómo podría explicarse la expansión que a estas alturas todo el mundo consideraba un hecho evidente. Esta teoría recibió el nombre de teoría del estado estacionario, según la cual el Universo no había tenido un principio, como en el Big Bang: era pues infinitamente viejo y había tenido siempre el mismo aspecto, aunque estaba expandiéndose. Para hacer compatible ambas cosas, hace falta que se cree materia constantemente para llenar el espacio que va quedando vacío entre las galaxias.

La proporción de materia que hay que crear para contrarrestar la expansión es tan pequeña (aproximadamente un átomo de hidrógeno por año y por metro cúbico; mucho menor que el mejor de los vacíos que se puede crear en un laboratorio) que hace muy difícil su detección. La teoría fue obra de Fred Hoyle (1915-2001), Hermann Bondi (1919-2005) y Thomas Gold (1920-2004), con aportaciones posteriores del astrofísico hindú Jayant Narlikar (nacido en 1938).

La controversia entre los dos modelos contribuyó de manera notable a la transformación de la cosmología científica que, de ser una disciplina fundamentalmente matemática, pasó a ser una rama de la física, en la que la confrontación de los modelos teóricos con las observaciones tendría un papel fundamental, ya que las dos teorías alternativas podían ser validadas, en principio, por observaciones astronómicas. Ciertamente, a finales de los años cuarenta, las

predicciones de estos modelos parecían difícilmente contrastables. Pero una nueva rama observacional de la astronomía, la radioastronomía, que estaba desarrollándose en aquellos años (en gran medida a partir de la experiencia en el radar durante la Segunda Guerra Mundial), tuvo un papel fundamental.

Las primeras evidencias observacionales en contra de la teoría del estado estacionario provinieron precisamente de radioastrónomos británicos. Observando fuentes lejanas de ondas de radio, y por lo tanto el Universo primitivo, pusieron en evidencia que su distribución era diferente de las de las más próximas, y por lo tanto de ahí infirieron que había una evolución en el Universo: eso concordaba mucho mejor con el Big Bang que con el estado estacionario. El debate fue duro, desde todos los puntos de vista, durante años. Pero el golpe de gracia, a favor del Big Bang, lo dio también la radioastronomía, esta vez al otro lado del Atlántico.

El gran descubrimiento

El descubrimiento que marcó un punto de inflexión en la cosmología es, por muchas razones, uno de los momentos más interesantes de la historia de la astronomía. En primer lugar es uno de los ejemplos clásicos de serendipidad: encontrar alguna cosa inesperadamente cuando se está buscando otra. Además es uno de los primeros grandes descubrimientos he-

chos en astronomía en longitudes de onda no visibles; de hecho el fenómeno solo puede ser observado en ondas de radio. Si el modelo del Big Bang es correcto, constituye la reliquia más antigua del Universo, dado que corresponde a un momento (en torno a unos 300.000 años después del Big Bang) en que la materia y la radiación se desacoplaron por primera vez. Y *last but not least*, ya ha dado dos Premios Nobel de Física, en los años 1978 y 2006.

La realidad es que la predicción de Gamow y sus estudiantes, según la cual, si se produjo una gran explosión inicial, habría tenido que haber una temperatura remanente, pasó desapercibida durante más de una década. Curiosamente, los únicos astrónomos que hicieron caso a estas predicciones estaban empezando a buscarla experimentalmente en Princeton, a unas decenas de kilómetros de donde se hizo el descubrimiento. Sea como fuere, el caso es que el honor ha quedado para Arno Penzias y Robert Wilson, dos físicos que en el año 1964 estaban trabajando en una nueva antena de comunicaciones para los Laboratorios Bell de Nueva Jersey. Después de mucho tiempo identificando las diferentes fuentes de radiación que podían afectar a las comunicaciones (tormentas, motores eléctricos, el Sol, la galaxia), les quedaba una fuente de radiación de origen no identificado, que no dependía de la orientación de la antena y que era equivalente a una temperatura de unos tres grados. Sin saber el significado de lo que habían encontrado comentaron el hecho a un colega que sí que conocía

la predicción de Gamow, y este los puso en contacto con el grupo de Princeton, que sabía lo que buscaba. Finalmente decidieron publicar en paralelo dos artículos, que aparecieron en el año 1965, en los que se comunicaba al mundo el descubrimiento. En el año 1978, Penzias y Wilson recibieron el Premio Nobel de Física.

Las consecuencias para el debate entre el Big Bang y el estado estacionario fueron inmediatas. Un modelo que podía explicar la expansión, que podía explicar la abundancia de los elementos más importantes del Universo y que, además, hacía una predicción que acababa observándose era un excelente candidato a nuevo paradigma. Las pocas esperanzas de los escasos partidarios del estado estacionario se esfumaron: su teoría podía explicar la expansión y, a mucho estirar, la abundancia de elementos, pero no había previsto en absoluto la radiación de fondo. De poco sirvió que Hoyle y Narlikar adujeran que había explicaciones alternativas para la radiación de fondo. Pocos han sido desde entonces los estudiantes que han querido arriesgar sus carreras apostando por otro modelo que no fuera el Big Bang: después de 1965 las alternativas se fueron quedando sin público.

LA TEORÍA DEL BIG BANG

Como toda buena teoría científica, el modelo del Big Bang se construyó a partir de hipótesis que se generan para explicar observaciones o experimentos y que a la vez generan predicciones que se tienen que contrastar por medio de la observación. No fue un proceso lineal, y la idea primitiva de una explosión inicial con una expansión posterior en la que se fueron formando las estructuras que hoy conocemos no tenía bastante consistencia como para hacer frente al número creciente de datos observacionales que iba proporcionando la astronomía moderna. Lo que hoy llamamos Big Bang es un modelo más sofisticado y también sorprendente, en el que la teoría y la observación se entrelazan.

Cómo explicar tres problemas

A partir de la década de los setenta del siglo pasado, el modelo del Big Bang se convirtió en el paradigma en cuyo marco trabajan los cosmólogos. En los cuarenta años posteriores a su consagración, el modelo ha recibido un cúmulo de nuevos datos observacionales que afluyen de los numerosos telescopios operativos. La primera gran «operación de cirugía» que tuvo que sufrir el modelo para adaptarse a las nuevas observaciones lleva el nombre de inflación y fue introducida en el año 1981 por el físico norteamericano Alan Guth (nacido en 1947). Durante los años setenta, un creciente número de cosmólogos se dio cuenta de que un modelo sencillo como el Big Bang necesitaba unas condiciones iniciales muy rebuscadas (y, por lo tanto, improbables) para explicar tres problemas: el problema del horizonte, el problema de la llaneza del Universo y el problema de los monopolos.

El problema del horizonte es sencillo de formular. En el modelo del Big Bang hay regiones del Universo que no han estado nunca en contacto entre sí; en cambio, cuando observamos en diferentes direcciones vemos un Universo con las mismas propiedades. ¿Cómo es posible que regiones que no han estado en contacto «se pongan de acuerdo» para tener las mismas condiciones o condiciones parecidas?

El problema de la llaneza es un poco más complejo. Se observa que la densidad media del Univer-

so está muy próxima a la densidad que debería tener si fuera perfectamente plano (recordemos que en la teoría de la relatividad general la masa-energía determina la geometría): es mucha casualidad, dado que se puede demostrar que en un Universo en expansión la densidad se tendría que alejar de este valor, a no ser que inicialmente fuera exactamente igual a esta densidad crítica.

El tercer problema es todavía más sofisticado y proviene de los conocimientos desarrollados por la teoría cuántica a lo largo del siglo xx: la idea fundamental es que si esta teoría es correcta en el Universo primitivo, a altísimas densidades y temperaturas, se tendría que haber producido un número elevado de partículas llamadas monopolos que, simplemente, no se observan.

Guth pudo solucionar los tres problemas simultáneamente. Si supusiéramos que en sus primeros instantes el Universo hubiera estado sometido a un pequeño intervalo de expansión muy acelerada (la inflación), todo encajaría. En realidad, el «truco» es que todo el Universo observable estuvo en contacto en un momento determinado (lo que soluciona el problema del horizonte); una consecuencia de la inflación es que el Universo tiene una densidad crítica (lo que soluciona el problema de la llaneza), y además en el proceso inflacionario los monopolos que pueden haberse formado desaparecen. La «operación» de Guth arregló los tres problemas de golpe y fue bien recibida por la comunidad cosmológica. Ade-

más, marcó el maridaje definitivo entre el estudio del microcosmos y del macrocosmos, dos disciplinas que habían convivido divorciadas desde Aristóteles: desde entonces la cosmología es un terreno de interacción natural entre la física de partículas y la astronomía.

Hay que decir que, aunque se introdujo la idea de que el Universo experimentó una época inflacionaria (que duró un intervalo de tiempo minúsculo) con el fin de solucionar los problemas observacionales que presentaba el sencillo modelo de explosión inicial y expansión posterior, la teoría también tiene una justificación física. Sabemos que la materia, al pasar entre sus diferentes estados (sólido, líquido, gas), experimenta lo que se conoce como transición de fase: mientras que los cambios en las diferentes variables físicas (temperatura, presión, etc.) son continuos a lo largo de la evolución dentro de un mismo estado, al producirse el cambio de estado hay propiedades físicas que experimentan cambios bruscos.

El mecanismo de la inflación cósmica correspondería a una transición de fase, aunque no de la materia tal como la conocemos en la actualidad sino de la sopa cuántica que constituía el Universo después del instante inicial: al final de este cambio de fase el Universo pasa a un nuevo estado que es el que conocemos actualmente. La idea inicial de Guth fue perfeccionada posteriormente por los físicos norteamericanos Andreas Albrecht y Paul Steinhardt y por el ruso Andrei Linde.

Así pues, el modelo, además de solucionar los problemas mencionados, es capaz de hacer predicciones observables sobre cómo serán las fluctuaciones que habrían dado origen, por colapso gravitatorio posterior, a las estructuras que observamos actualmente y que habrían dejado su huella en la radiación de fondo. En este sentido, el modelo inflacionario ha ido superando todas las pruebas observacionales que se han llevado a cabo hasta ahora y forma una parte sólida del paradigma cosmológico aceptado.

La masa oscura

Un precio significativo que se debe pagar para «arreglar» los problemas del Big Bang con la introducción de la inflación es que en el nuevo Big Bang inflacionario la densidad de masa-energía del Universo tiene que ser exactamente igual a una cantidad perfectamente calculable en la relatividad general, la densidad crítica. Así pues tenemos una primera predicción del modelo que se enfrentaba a algunos problemas.

Cuando se planteó la inflación, la materia observada en el Universo estaba lejos (en un factor próximo a 100) de poder dar cuenta de toda la masa necesaria para obtener la densidad crítica. Pero hay que decir que eso no parecía preocupar a la mayoría de los astrónomos, porque desde hacía muchos años se sabía que había una gran cantidad de materia que no se

podía observar pero que tenía que existir para mantener ligadas las grandes estructuras galácticas.

Ya en los años treinta del siglo pasado, el astrónomo norteamericano de origen suizo Fritz Zwicky (1898-1974) había puesto en evidencia que, en algunos cúmulos, las galaxias iban demasiado deprisa para que el cúmulo fuera estable, si solo teníamos en cuenta la masa observada en este. Tanto si es porque Zwicky era un personaje un poco excéntrico o porque nadie quiso argumentar en contra ni pensar en las implicaciones, el hecho es que no se le prestó demasiada atención y no fue hasta los años setenta cuando alguien recordó que «Zwicky ya lo había dicho». Sea como sea, el problema de la «masa oscura» había sido planteado antes de que los cosmólogos lo mencionaran.

Además, este efecto también había sido puesto en evidencia por Vera Rubin (nacida en 1928), una astrónoma encantadora de la que nadie podía decir que tenía el mal carácter de Zwicky. Durante los años setenta, Rubin fue acumulando evidencias del hecho de que las galaxias espirales tenían una rotación demasiado rápida para ser estables gravitatoriamente, a no ser que contaran con más masa de la que observábamos. Era el mismo problema que había planteado Zwicky pero ahora en más casos y en un entorno más conocido como eran las galaxias espirales (como la nuestra). También fueron mayoría los que miraron hacia otro lado. El problema de la masa oscura empezaba a ser inquietante. Curiosamente, fueron los

teóricos (y no los observadores) los que hicieron decantar la balanza. James Peebles (nacido en 1935) y Jeremiah Ostriker (nacido en 1937), dos de los cosmólogos más prestigiosos y todavía en activo, publicaron en el año 1973 un artículo en el que demostraban matemáticamente que los discos de las galaxias espirales no podían ser estables gravitatoriamente, a no ser que hubiera un halo esférico de materia que los rodeara y contribuyera a esta estabilidad. La masa oscura era necesaria.

Así pues, cuando la inflación que apuntaló al Big Bang necesitó más masa que la observada, todo el mundo estuvo dispuesto a escuchar y a aceptar que la diferencia entre la densidad de materia observada y la densidad crítica (predicción de la inflación) era debida a la masa oscura. De manera que la mayoría de los cosmólogos acepta como un hecho que la densidad del Universo es la crítica y que tiene que haber masa oscura. La naturaleza de esta masa oscura es, sin embargo, desconocida.

En las dos últimas décadas son muchas las búsquedas que se han hecho, tanto en observaciones astronómicas como en laboratorios terrestres, para encontrar candidatos a esta masa oscura. La situación actual es que es prácticamente seguro que esta masa oscura no corresponde a materia bariónica, y por lo tanto tiene que ser materia «exótica» de algún tipo todavía no descubierto (los bariones, del griego «pesado», son las partículas que forman la materia atómica que conocemos).

Según las estimaciones actuales la cantidad de esta materia exótica representa el 22% del Universo, mientras que la materia bariónica es solo del 4%. El mismo modelo del Big Bang pone un límite muy estricto a la cantidad de materia bariónica que puede haber en el Universo: no puede superar el 4% de la materia total; de lo contrario no se podría explicar la producción de los elementos químicos originales, en particular de un isótopo del hidrógeno llamado deuterio. La cantidad observada de deuterio es una de las limitaciones observacionales en cualquier juego de parámetros del Big Bang.

Los cosmólogos distinguen entre tres tipos de materia oscura exótica, según la velocidad de sus partículas. Si esta es ultrarrelativista (velocidades próximas a la de la luz) la llaman caliente (HDM, por *hot dark matter*); si es elevada, aunque claramente por debajo de la velocidad de la luz, la llaman tibia (WDM, por *warm dark matter*); y si las velocidades son bajas la llaman fría (CDM por *cold dark matter*). Hay diferentes candidatos para cada una de las categorías, algunos ya observados como el neutrino (que sería HDM) y otros como el fotino, el gravitino (WDM) o el neutralino (CDM), que no se han observado todavía pero que son previstos por algunas teorías de partículas. Las observaciones y los resultados de las simulaciones en supercomputadoras parecen decantarse hacia la CDM, pero no hay nada cerrado.

Hemos dicho que el 4% del contenido del Universo es materia «normal», y el 22% es materia «exótica».

¿Y el otro 74%? Esta es una de las otras sorpresas de los últimos años.

La energía oscura

La cantidad de materia del Universo determina su geometría. Por lo tanto, estudiando una puede tenerse información sobre la otra. Por esta razón, durante la segunda parte de los años noventa dos equipos internacionales de astrónomos emprendieron sendos programas para medir las mayores distancias obtenidas hasta el momento a través de las supernovas de tipo I.

Su objetivo era poder medir el nivel de desaceleración de la expansión del Universo a lo largo de su historia: la expansión se tendría que ir desacelerando por efecto de la autogravitación de toda la materia del Universo. Para llevarlo a cabo, hay que llegar a distancias muy lejanas (y, por lo tanto, tiempos pasados en la historia del Universo). En 1998 se publicaron los resultados y la sorpresa fue mayúscula: no solo no observaban desaceleración, sino que ¡el Universo se estaba acelerando! He aquí que reaparece la constante cosmológica que Einstein había calificado de «pifia».

Candelas patrón: las supernovas de tipo I

Una supernova es una explosión que marca el final de la vida de una estrella. Según el fenómeno que da origen a esta explosión, las supernovas se clasifican en dos tipos, conocidos como I y II y diferenciables a partir del espectro de la luz. En las supernovas de tipo I la estrella original es una enana blanca que tiene una compañera gigante roja de la cual va acretando material hasta que supera un límite en el que la fuerza de la gravedad supera a todas las demás y la estrella colapsa literalmente y se producen unas reacciones nucleares que provocan una deflagración que destruye la estrella, emitiéndose tanta energía como la de una galaxia entera en cuestión de días o semanas. En las supernovas de tipo II el proceso se produce a partir de una estrella con mucha más masa que el Sol, en la que es su gravedad la que vence a todas las otras fuerzas y acaba produciendo una deflagración de una magnitud similar a la de una supernova de tipo I. La importancia de las supernovas de tipo I, como candelas patrón, reside en que en un subtipo de las mismas (las llamadas Ia) se ha podido determinar que hay una relación matemática precisa entre el tiempo de su decaimiento y su luminosidad absoluta. La gran ventaja de las supernovas es su gran luminosidad, lo cual nos permite observarlas hasta distancias mucho mayores que las cefeidas. La gran desventaja es que mientras que las cefeidas son objetos conocidos y estables a escalas humanas, las supernovas son imprevisibles a estas escalas y se necesitan programas observacionales muy sofisticados para detectarlas y hacer su seguimiento.

En estos momentos, una década después de este sorprendente hallazgo, nadie sabe qué es esta «energía oscura» (así se la ha llamado) que tiene el efecto

de una fuerza repulsiva. Se sabe cuánta tiene que haber para que el modelo del Big Bang sea coherente: el 74% del contenido energético total del Universo. Es decir, gracias a la inflación, el modelo del Big Bang tiene buena salud, ha estado de acuerdo con los datos dentro de los límites observacionales y ha ido superando todo el montón de datos de interés cosmológico que proporcionan los numerosos y sofisticados instrumentos disponibles en la actualidad. ¡Todo eso al precio de no saber en qué consiste el 96% del Universo!

Sabemos algunas cosas

La verdad, sin embargo, es que sabemos algunas cosas sobre esta energía oscura. Sabemos que ha de tener una distribución bastante homogénea en todo el Universo, que no es demasiado densa y que solo interactúa a través de la gravedad. Las últimas dos propiedades hacen que sea muy difícil detectarla en experimentos de laboratorio. Cualquier otra consideración es, a día de hoy, especulativa. De momento, sin embargo, se han planteado dos explicaciones alternativas.

Una sería que la energía oscura es perfectamente equivalente a la constante cosmológica introducida, recordémoslo, de forma *ad hoc* por Einstein en sus ecuaciones para describir el Universo. Eso equivale a decir que es una energía asociada a la misma exis-

tencia del espacio; por eso, a veces, se habla también de energía del vacío. Esta energía del vacío ejerce una presión negativa y por esta razón provoca una fuerza repulsiva que sería la causante de la aceleración en la expansión.

El motivo por el cual la presión es negativa es fácil de entender con una analogía termodinámica de un gas clásico. Si tenemos gas en un recipiente que ocupa un volumen, este gas ejerce una presión positiva que tiende a hacer aumentar el volumen enfriando el gas, por lo que este pierde energía. Pero si lo que tenemos es el vacío y este tiene energía, un aumento del volumen hará aumentar la energía contenida; si un aumento de volumen supone un incremento de la energía interna, eso quiere decir que la presión tiene que ser negativa. Hay que decir que el concepto de energía del vacío no es extraño a la teoría cuántica, que prevé la existencia de fluctuaciones de materia-energía en el vacío. El problema es que la energía del vacío asociada a estas fluctuaciones tendría que ser de un orden de magnitud extraordinariamente mayor que el observado en la energía oscura: ¡ni más ni menos que un 1 seguido de 120 ceros veces mayor!

Algunas teorías permiten establecer que la constante cosmológica predicha por la teoría cuántica sea exactamente cero, cancelando de manera exacta la energía del vacío asociada a las fluctuaciones cuánticas, sin embargo a fecha de hoy nadie sabe cómo explicar que no sea exactamente cero sino 120 órdenes

de magnitud menor que las predicciones de la teoría (muchos físicos consideran este desacuerdo como el más escandaloso que se ha producido nunca entre teoría y observación o experimento). Hay que decir, en cualquier caso, que si la energía oscura es debida a una constante cosmológica, su ecuación de estado (relación entre la presión y la densidad) sería constante y homogénea en todo el Universo.

Si la constante cosmológica es una explicación sencilla pero difícil de acomodar con el modelo estándar de la física de partículas, la alternativa que se plantea es la llamada quintaesencia (en recuerdo del éter aristotélico): un campo de energía que se puede describir por una ecuación de estado con una presión negativa (por lo tanto, sería una fuerza repulsiva), pero en este caso la ecuación de estado varía en el espacio y en el tiempo.

Todavía son pocos los datos experimentales que se tienen al alcance para delimitar la ecuación de estado de la energía oscura pero los primeros indicios apuntan a la constante cosmológica, y por lo tanto a la reivindicación de la «pifia» de Einstein. Como esta constante cosmológica se acostumbra a designar por el símbolo de la letra griega mayúscula lambda, el modelo de Big Bang inflacionario que cuenta con un mayor predicamento hoy día es el *lambda*-CDM (es decir, con materia oscura fría y constante cosmológica) también conocido con el nombre de modelo concordante.

LAS BASES OBSERVACIONALES

El descubrimiento de la radiación de fondo de microondas fue la observación que consagró el Big Bang como modelo de la cosmología científica. El estudio de esta radiación sigue siendo en gran medida la pieza clave para ir perfeccionando y consolidando el modelo, pero las técnicas astronómicas modernas han ido aportando otras observaciones, que constituyen piezas básicas en las pruebas a que está sometido el Big Bang.

La radiación de fondo

Tras las primeras observaciones con antenas que operan a frecuencias determinadas, la constatación de que el espectro de la radiación era el de un cuerpo negro y, por lo tanto, encajaba con las predicciones del Big Bang, tuvo que esperar al satélite COBE

(Cosmic Background Explorer, 1989-1996), que demostró que el ajuste con un cuerpo negro a una temperatura de 2,725 grados era perfecto.

El segundo gran resultado del COBE fue que esta radiación presentaba variaciones a lo largo de la bóveda celeste, del orden de una parte entre cien mil, que correspondían a las fluctuaciones en el momento de la recombinación. Estas pequeñas inhomogeneidades darían origen posteriormente a las estructuras que observamos actualmente (galaxias y cúmulos de galaxias). El éxito fue tan abrumador que proporcionó a sus investigadores el Premio Nobel de Física del año 2006. Un segundo satélite más preciso, WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 2001) confirmó los hallazgos del COBE y, además, sus resultados corroboran las predicciones de los modelos inflacionarios, tanto con respecto a las fluctuaciones iniciales como a las estimaciones de una edad del Universo de 13.700 millones de años (con un error posible de más o menos 200 millones de años) y la composición porcentual de los tres grandes componentes de materia ordinaria, oscura y energía oscura.

En 2008 se lanzará un tercer satélite, llamado Planck, que se espera que aporte nuevas claves para poner a prueba los modelos más precisos. Cuarenta años después de su descubrimiento, la radiación de fondo continúa siendo el banco de pruebas clave de la cosmología moderna.

La estructura del Universo a gran escala

Las galaxias se agrupan formando grupos y cúmulos que van desde unos pocos miembros a unos cuantos miles: son estructuras de un tamaño entre millones y decenas de millones año luz, que constituyen los objetos gravitatoriamente ligados mayores del Universo.

Estos cúmulos se presentan agrupados formando supercúmulos, que determinan una estructura filamentososa del Universo observable a gran escala, con grandes aristas y paredes de centenares de millones de años luz de tamaño, vacíos inmensos de este mismo tamaño donde casi no se encuentran galaxias y vértices en los que encontramos los grandes cúmulos con miles de galaxias.

Esta estructura es una reliquia del proceso de formación de las galaxias a partir de las primeras inhomogeneidades y por lo tanto su estudio tiene un elevado valor cosmológico como dato observacional de primer nivel para contrastar tanto la teoría como las simulaciones de la evolución del Universo que se realizan en supercomputadoras. Los *surveys* que actualmente están en marcha (como el Sloan Sky Digital Survey) permiten conocer la estructura detallada en tres dimensiones de una porción significativa del Universo observable a partir de la determinación del *redshift*, y por lo tanto de la distribución de más de un millón de galaxias.

Las lentes gravitatorias

Desde la relatividad general de Einstein sabemos que la gravedad curva el espacio-tiempo y, por lo tanto, que la luz de objetos lejanos puede ser desviada en su camino por grandes cantidades de materia; es el fenómeno conocido como lente gravitatoria, predicho por el propio Einstein, pero que no fue observado hasta finales de los años setenta del siglo pasado. Actualmente es una de las herramientas fundamentales para detectar grandes cantidades de materia oscura. Observando los objetos más masivos del Universo (los cúmulos ricos con miles de galaxias) se puede ver la distorsión de la luz de las galaxias de fondo que pasa a través de ellos formando imágenes distorsionadas de estas galaxias de fondo. Eso nos permite no solo estudiarlas sino deducir la masa oscura contenida en los cúmulos y su distribución.

Las supernovas

Ya hemos visto la importancia que tiene la observación de las supernovas como verdaderos faros que nos informan sobre las distancias entre las galaxias y, como consecuencia, de un resultado tan inesperado como la aceleración en la expansión del Universo. La observación sistemática de un gran número de supernovas debería permitir estudiar la evolución de

la densidad del Universo y aportar claves sobre la naturaleza de la energía oscura. Pero para eso hace falta un proyecto como el futuro satélite SNAP (Super-Nova Acceleration Probe) que podrá observar miles de supernovas y que en estos momentos todavía está en fase de proyecto.

Actualmente la observación de supernovas en galaxias lejanas, por su carácter impredecible, requiere una complicada coordinación logística que en la práctica limita las observaciones a una docena al año.

El bosque Lyman-Alpha

La emisión que recibimos de los quásares, que son objetos de interés cosmológico en sí mismos, pasa a través del medio intergaláctico y, por lo tanto, de las nubes de hidrógeno neutro que abundan en él. En el espectro de esta radiación podemos encontrar las rayas de absorción por hidrógeno. Como estas nubes se encuentran a diferentes distancias (y *redshifts*) estas rayas de absorción forman un «bosque» en el espectro de la radiación de los quásares.

La posición y el tamaño de estas rayas nos proporcionan información sobre la distribución de materia a gran escala del Universo y su evolución. Los quásares nos proporcionan así una herramienta cosmológica de gran valor para estudiar la evolución del Universo y la distribución de materia.

Nuevas observaciones

Los nuevos instrumentos, las nuevas técnicas observacionales y la imaginación de los astrónomos proporcionan continuamente nuevas observaciones y tests a los que se somete el Big Bang. Algunas de las más recientes son la observación del hidrógeno neutro primordial (anterior a la formación de estrellas y galaxias, en la llamada edad oscura) y los experimentos propuestos con ondas gravitatorias. Estas técnicas y observaciones están hoy todavía en el límite de lo que se puede alcanzar pero sin duda irán abriendo nuevas ventanas del conocimiento en un futuro próximo.

Aceleradores de partículas

Seguramente una de las partidas más interesantes y significativas para el futuro del Big Bang y de la física en general se jugará en el mundo del microcosmos. Las miradas de toda la comunidad científica están puestas en el nuevo *Large Hadron Collider* (LHC), que entrará en servicio en el año 2008 en Ginebra.

Además de poner a prueba las partes más especulativas del modelo estándar, son muchos los físicos que creen que el LHC puede aportar claves definitivas para el conocimiento de la materia oscura y tal vez también de la energía oscura. Cualquier avance

en esta dirección, así como en la unificación de la gravedad con las demás fuerzas, puede proporcionar información muy valiosa para el conocimiento sobre el origen y la evolución del Universo.

UNA HISTORIA DEL UNIVERSO

Como modelo científico, el Big Bang tiene capacidad predictiva y, por lo tanto, de las observaciones y de los modelos teóricos podemos extrapolar el pasado y el futuro para delinear cómo ha sido la historia del Universo desde el instante inicial, saber qué podemos observar hoy y predecir cuál será su destino.

Mirar atrás hacia adelante

El conocimiento actual de la física de las partículas y sus interacciones permite averiguar la historia del Universo desde una fracción de tiempo extraordinariamente minúscula después del Big Bang hasta la época actual.

Durante el siglo pasado, la física fue acumulando evidencias de que todas las interacciones (fuerzas) de la naturaleza se reducen a cuatro tipos. Dos de estas

interacciones las experimentamos en la vida diaria y ya eran conocidas en el siglo XIX, la gravitatoria y la electromagnética, la primera estudiada por Newton y posteriormente por Einstein en la relatividad general, y la segunda producto del genio de Maxwell al conjugar los fenómenos eléctricos y magnéticos en una formulación unificada.

Las otras dos, descubiertas durante el siglo XX, son fuerzas nucleares y por lo tanto ajenas a nuestra experiencia diaria: son la fuerza fuerte, responsable de las interacciones que mantienen unido el núcleo atómico con protones y neutrones, y la fuerza débil, responsable de la desintegración radiactiva espontánea. Hay que decir que el proceso de unificación de las interacciones iniciado por Newton (la fuerza que mantiene ligada la Tierra a la Luna es la misma que hace que caiga una manzana) y continuado por Maxwell con la fuerza electromagnética siguió a lo largo del siglo XX: hoy sabemos que la fuerza electromagnética y la débil son manifestaciones de una única interacción (llamada electrodébil) y el mismo modelo estándar ofrece un marco de unificación también con la fuerza nuclear fuerte. Pero hoy todavía nos falta una formulación unificada de estas tres fuerzas con la gravedad: las primeras, en el modelo estándar, son objeto de la teoría cuántica y la última de la relatividad general y todavía no se ha llegado a una teoría cuántica de la gravedad.

Además de las interacciones, la física de partículas ha logrado también un marco unificado para la materia ordinaria que forma el Universo conocido (y que en el modelo del Big Bang, recordémoslo, es solo el 4% del contenido total del Universo). Según el modelo estándar hay básicamente dos tipos de materia: los quarks y los leptones. Los primeros constituyen las partículas pesadas que forman el núcleo atómico, los protones y los neutrones, mientras que los segundos son los conocidos electrones, pero también otros tipos de partículas más exóticas como los neutrinos.

El modelo estándar, completado a principios de los años setenta del siglo pasado como culminación de décadas de trabajos teóricos y descubrimientos experimentales, forma un todo coherente pero incompleto de la estructura de la materia conocida y sus interacciones. Coherente porque es capaz de explicar casi todos los procesos físicos y químicos conocidos y ha logrado grandes éxitos con predicciones que se han confirmado en sofisticados experimentos; incompleto porque además de la carencia mencionada de inclusión de la gravedad en el esquema hay muchas otras razones teóricas y observacionales (estas provenientes básicamente de la cosmología dentro del modelo del Big Bang) que nos indican que el modelo estándar todavía no es la TOE (acrónimo de *Theory of Everything*, teoría total) que buscan los físicos.

Tres grandes periodos

En cualquier caso, con el modelo estándar y en el marco del Big Bang, podemos ir muy atrás en los cálculos (e incluso especulaciones) de cómo ha evolucionado el Universo desde el inicio. En la película de una expansión continuada que va enfriando la gran explosión inicial, podríamos distinguir tres grandes periodos que llamaremos primitivo, físico y astronómico. Estos nombres son arbitrarios pero quieren reflejar nuestro conocimiento actual.

El periodo primitivo, que va desde el instante inicial hasta el final de la inflación, descansa casi exclusivamente en el ámbito de la especulación y es más lo que desconocemos que lo que podemos asegurar que sucedió: conocemos los grandes rasgos pero no los detalles. El segundo, que llega hasta el momento en que empiezan a formarse las primeras estructuras astronómicas conocidas, se basa en la física conocida dentro del modelo estándar y por lo tanto hay pruebas teóricas y observacionales sólidas que apoyan la historia que se cuenta. El tercero, que llega hasta el presente, se encuentra fundamentado en las observaciones cada vez más numerosas y sofisticadas que nos proporcionan los instrumentos astronómicos actuales y en modelos y cálculos sólidos sobre la evolución estelar y la física gravitatoria que forman parte del conocimiento astronómico actual.

La física actual todavía no nos permite saber qué es lo que sucedió exactamente en el periodo primi-

tivo, que duró un instante de tiempo inimaginablemente pequeño (centésima de quintillonésima de segundo, o lo que es lo mismo, una cifra que se expresa en segundos con un 1 precedido por ¡32 ceros!). Pero podemos especular.

Primeramente tuvo lugar la llamada época de Planck (¡solo diez billonésimas partes del periodo primitivo!: un 1 precedido por 43 ceros) en la que las cuatro fuerzas conocidas (también la gravedad) fueron una sola. Cuando tengamos una Teoría Cuántica de la gravedad deberíamos ser capaces de correr este último «velo» que nos tendría que dejar ver el momento del «parto» de nuestro Universo (¿tal vez desde otra dimensión?).

A continuación tendríamos la época GUT (acrónimo de Grand Unified Theories), que dura hasta un 1 precedido de 35 ceros, y que empieza con la separación entre la gravedad y las otras tres fuerzas y acaba con la separación de la fuerza fuerte del electrodébil.

La tercera época de este periodo es precisamente la inflación: un periodo muy pequeño de tiempo (de todas maneras representa prácticamente el 99,9% de todo el periodo primitivo) en el que el Universo crece en tamaño unos treinta órdenes de magnitud. Para hacernos una idea de lo que eso significa, es como si en este ínfimo intervalo de tiempo un guisante creciera hasta los extremos de nuestra galaxia. Como hemos visto más arriba, este sensacional acontecimiento es capaz de explicar todo lo que observamos a continuación.

Una vez acabada la inflación tenemos un Universo en expansión formado por un plasma de quarks, leptones y gluones (las partículas que envían la fuerza nuclear fuerte) que interactúan los unos con los otros. El periodo físico, en el que podemos seguir acontecimientos conocidos en nuestros modelos y laboratorios, empieza con la llamada época electrodébil, al final de la cual (solo ha transcurrido una billonésima de segundo desde el inicio) se separan la fuerza electromagnética y la débil y por lo tanto las cuatro fuerzas conocidas adoptan su configuración actual.

Sigue la época de los quarks (hasta una millonésima de segundo desde el inicio) en la que dominan estas partículas que en el Universo actual no se encuentran aisladas sino formando parte de partículas como el protón y el neutrón. Eso es lo que sucede en la época hadrónica (hasta 1 segundo desde el inicio) en que los quarks se agrupan con los gluones y forman los hadrones, las partículas que experimentan la fuerza nuclear fuerte; en esta época también se produce otro acontecimiento significativo como es el desacoplamiento (dejan de interactuar con las otras) de unas partículas muy importantes en varios fenómenos astrofísicos, los neutrinos. Los neutrinos solo experimentan interacción débil y en consecuencia son extremadamente difíciles de detectar. La época que va entre 1 y 3 segundos después del instante inicial se conoce como época leptónica, dominada por este tipo de partículas.

Las dos últimas épocas del periodo físico concentran muchos de los esfuerzos de los cosmólogos actuales, dado que es cuando se configura la materia y los objetos astronómicos tal como los conocemos hoy día. La primera de estas épocas es la llamada fotónica, ya que está dominada por estas partículas que envían la fuerza electromagnética y va desde los 3 segundos hasta unos 380.000 años después del Big Bang. Durante los primeros 3 minutos de esta época se produce la nucleosíntesis primordial, es decir, la formación de los primeros núcleos atómicos tal como los conocemos hoy en día, básicamente hidrógeno (en sus isótopos protio y deuterio), helio (isótopos 3 y 4) y un poco de litio.

Después de estos minutos iniciales la expansión ha enfriado el Universo hasta un punto en que ya no se puede producir más nucleosíntesis: el resto de todos los elementos que forman la materia conocida se tendrá que formar en el interior de las estrellas, en las explosiones de supernovas o en procesos puntuales de choques de rayos cósmicos en el medio interestelar. Así pues, casi el 98% de los núcleos que constituyen la materia conocida (esta es la abundancia del hidrógeno, 74%, y el helio, 24%, en el Universo) se han formado solo 3 minutos después del Big Bang. Hay que decir que estos primeros cálculos (aunque no con el afinamiento proporcionado por los conocimientos actuales) ya fueron efectuados por Gamow, Alpher y Herman y significaron un primer éxito del primitivo modelo del Big Bang.

A partir de este momento el Universo está compuesto por una sopa de núcleos de los elementos más sencillos, así como por leptones y de fotones. Se empiezan a formar átomos a partir de estos núcleos aunque los fotones interactúan continuamente con aquellos, haciendo saltar los electrones que, a su vez, vuelven a formar átomos con otros núcleos: la materia y la radiación se dice que están «acopladas». El desacoplamiento, también conocido como recombinación, se produce al final de la época fotónica, unos 380 mil años después del Big Bang. Es un momento particularmente importante de nuestra historia, porque a partir de este momento los fotones viajan libremente y forman una «instantánea» de cómo era el Universo en el momento de la recombinación, o dicho de otra manera, de cómo eran las semillas de lo que posteriormente, gracias a la gravedad, serán las primeras estrellas y/o galaxias. Esta instantánea la podemos estudiar a través de la radiación de fondo de microondas, la imagen más antigua a la que podemos acceder de la historia del Universo.

La edad oscura

La última época del periodo físico es conocida muy ilustrativamente como edad oscura. Sabemos que después de la recombinación se tienen que haber formado las primeras estructuras autogravitantes, pero hasta que estas no se encienden (no se pro-

ducen las primeras reacciones nucleares en el seno de las estrellas) no conocemos ninguna otra manera de detectarlas que la emisión de hidrógeno neutro. Este es un proceso físico conocido en el que el átomo más sencillo del hidrógeno (un protón y un electrón) experimenta una transición energética extremadamente improbable (en un átomo sucede una vez cada 10 millones de años), pero que por las grandes cantidades de hidrógeno presente en el Universo primitivo tiene que ser en principio observable.

A través de estas observaciones podríamos llegar a saber cómo evolucionan las semillas iniciales («congeladas» en la información de la radiación de fondo). La edad oscura acaba en torno a los 500 millones de años después del Big Bang cuando se encienden las primeras estrellas y galaxias.

El último periodo de nuestra historia, el que hemos llamado astronómico, está dominado por los objetos conocidos de nuestra experiencia astronómica: las estrellas y las galaxias. Actualmente todavía no tenemos una teoría bien establecida de su formación primordial. Por una parte hay evidencias de que debe haber habido una generación primordial de estrellas, la llamada «población III». Las galaxias que observamos están formadas por estrellas, gas y polvo (además, claro está, de masa oscura).

Estas estrellas son de dos grandes tipos, las llamadas poblaciones I y II: la primera está constituida por estrellas jóvenes formadas a partir de material procesado anteriormente en el interior de otras

estrellas, mientras que la segunda está formada por estrellas viejas y, por lo tanto, formadas con material primordial. Pero incluso estas tienen una cierta «metalicidad» (es decir, una cierta cantidad de elementos químicos elaborados que no se pudo producir en la nucleosíntesis primordial y tiene que ser el producto de la evolución estelar): así pues parece claro que tiene que haber existido una población más antigua que todavía no ha podido ser observada directamente. Seguramente fue una generación de estrellas supermasivas de pocos millones de años de vida que, al extinguirse en extraordinarias explosiones de supernova, enriquecieron el Universo con elementos químicos más elaborados que los producidos en los tres primeros minutos.

Las primeras galaxias, a su vez, se habrían formado por colapso gravitatorio lo que observamos actualmente como quásares (acrónimo de *quasi stellar radio sources*) que se cree que son núcleos activos de galaxias jóvenes en cuyo interior hay un agujero negro de gran masa. Esta época en que se forman las primeras estrellas y galaxias es conocida como la época de la reionización, porque la energía generada ioniza (hace que los electrones se separen del núcleo) y dura unos quinientos millones de años, hasta aproximadamente unos mil millones de años después del Big Bang.

A partir de este momento la historia del Universo es menos espectacular y la gravedad va haciendo que se formen las galaxias, que se agrupan en grupos y

cúmulos, y en su interior se forman las estrellas. Una estrella joven como nuestro Sol, por ejemplo, se formó entre 8.000 y 9.000 millones de años después del Big Bang. 13.700 millones de años después del Big Bang nosotros observamos todos estos fenómenos y tratamos de encajarlos en un todo coherente.

Este mismo modelo que nos permite explicar el pasado, también nos permite predecir el futuro. Hoy, si realmente el Universo es plano y la energía oscura equivale a la constante cosmológica, podemos predecir que el futuro del Universo será una expansión acelerada que producirá la disgregación progresiva de los supercúmulos, de los cúmulos y de las propias galaxias. Pero, más que predecir el futuro o estudiar el pasado, a los cosmólogos les interesa ajustar exactamente un modelo, cuya capacidad predictiva se tendrá que poner a prueba necesariamente en los próximos años.

El Modelo Concordante

Aunque en estos momentos, en 2007, todavía no se sabe qué es la masa oscura y mucho menos aún la energía oscura —es decir, el 96% del Universo—, debido a la concordancia del modelo del Big Bang inflacionario con las observaciones, la comunidad cosmológica tiene la confianza de que estos enigmas se irán resolviendo y que las características básicas del

modelo se confirmarán. Eso ha llevado a los más optimistas (que son mayoría entre la comunidad) a hablar del Modelo Concordante, en analogía con el Modelo Estándar de la física de partículas.

El Modelo Concordante (o Big Bang inflacionario con *lambda*-CDM) es el paradigma aceptado por la comunidad cosmológica. De hecho, según algunos de los miembros más activos y optimistas de esta comunidad, esta ciencia ha entrado en un estadio que llaman cosmología de precisión en el que, a la espera del descubrimiento final de la naturaleza de la masa y la energía oscura, lo que hay que hacer es perfeccionar el modelo y afinar el valor de las constantes.

El hecho es que en esta última década, desde el descubrimiento de la aceleración de la expansión y la necesidad de introducir un tercer componente en el contenido del Universo (la energía oscura), los parámetros fundamentales del modelo del Big Bang han ido convergiendo aunque hay técnicas observacionales cada vez más sofisticadas y variadas.

Tomemos por ejemplo lo que seguramente es el parámetro más importante del modelo, la constante de Hubble H , que se mide en unidades de velocidad por unidad de distancia. Hasta bien entrada la última década del siglo pasado los cosmólogos no se ponían de acuerdo con respecto a su valor. Dos escuelas defendían valores muy diferentes: para unos H se movía en torno a los 50 kilómetros por segundo y por megapársec (millones de pársec); para otros era más bien del orden de los 100 kilómetros por segundo y

por megapársec (eso quiere decir que, a causa de la expansión del Universo, dos galaxias separadas por un millón de pársec, o 3,26 millones de años luz, se separan a 50 o 100 kilómetros por segundo).

La discrepancia no era solo académica. Para el valor más alto, y según los valores de la densidad de materia conocidos en aquellos momentos, el Universo resultaría ser más joven que alguna de las estrellas que se observan en él, lo cual sería obviamente un grave contratiempo para el modelo del Big Bang. A principios de la década de los noventa había más observadores que favorecían valores altos de H , y por lo tanto una edad joven del Universo; lo cual implicaba problemas para el modelo. El descubrimiento de la aceleración y de la energía oscura actuó como un bálsamo. Por una parte permitía «alargar» la edad del Universo; por otra, favorecía un Universo plano como el que había predicho la inflación.

Desde entonces se han completado al menos tres experimentos diferentes que han permitido medir H con una precisión que nunca antes se había alcanzado. El llamado Hubble Key Project utilizó durante ocho años el telescopio espacial Hubble para medir distancias en galaxias próximas utilizando estrellas cefeidas (como hizo el ilustre pionero que da nombre al telescopio, pero lógicamente con una precisión extraordinariamente mayor): el resultado fue un valor de 72 kilómetros por segundo y por megapársec, con un posible error de ± 8 .

Otros estudios han utilizado el llamado efecto Zunyaev-Zeldovich, que no es más que la distorsión de la radiación de fondo de microondas cuando atraviesa el medio intergaláctico en los cúmulos y que se puede utilizar como un estimador de la distancia hasta los cúmulos: el valor obtenido para H es de 71 (siempre en las mismas unidades), con un error de 5.

Finalmente, el satélite WMAP, que estudió la estructura de las fluctuaciones de la radiación de fondo de microondas, ha permitido obtener un valor de 70 con un error de 3. Los valores anteriores son todos compatibles (teniendo en cuenta los errores) pero cada vez más precisos. Este, y otros ejemplos con otros parámetros, permiten a los astrónomos hablar de una cosmología de precisión.

La determinación con precisión de la constante de Hubble y el Modelo Concordante (Big Bang inflacionario con masa oscura fría y constante cosmológica) permiten establecer una edad bastante ajustada de nuestro Universo de unos 13.700 millones de años, con un error posible de 200 millones de años. Esta cifra encaja con nuestro conocimiento actual sobre estrellas y galaxias, dado que deja tiempo suficiente para que se formen las estrellas más antiguas que se conocen (los modelos de evolución estelar son totalmente aceptados por la comunidad astronómica puesto que están basados en cálculos que utiliza la física nuclear).

Más allá del Big Bang

El Big Bang inflacionario, lejos de ser un modelo cerrado, abre unas posibilidades inmensas para nuevos descubrimientos potencialmente revolucionarios. Por una parte, si el modelo es correcto estamos a las puertas de grandes descubrimientos (siempre es difícil decir si dentro de unos años o décadas): saber de qué está formado el 96% del Universo, lo que ahora llamamos materia oscura y energía oscura, cuya naturaleza desconocemos totalmente. Con respecto a este punto, son muy ilustrativas las palabras del profesor Per Carlson, presidente del Comité que otorgó el premio Nobel de Física en el año 2006, precisamente por las observaciones sobre la radiación de fondo que dieron un significativo apoyo al modelo del Big Bang inflacionario. En la entrevista posterior al anuncio del Premio, cuando le preguntaron cuándo habría un Premio Nobel relacionado con la materia y la energía oscuras dijo «sobre la materia oscura no sabemos nada, sobre la energía oscura sabemos menos que nada».

Estos descubrimientos serán, pues, históricos y sin precedentes en la historia de la ciencia. Porque a buen seguro que también nos abrirán la posibilidad de ir más allá del modelo estándar de la física actual, empezar a desvelar cómo fue el periodo primitivo, el origen de nuestro Universo. Especulaciones muy razonables (pero especulaciones de momento) nos dicen que podemos avistar una Teoría total aunque, tal

vez también la existencia de un Universo de más dimensiones (un multiuniverso) u otros universos. Especulaciones más atrevidas nos dicen que, de la misma manera que la humanidad ha podido trabajar hasta ahora con la materia y la energía que constituye el Universo, tal vez estos descubrimientos nos lleven a comprender (o manipular) la misma fábrica del espacio-tiempo.

Especulaciones en otra dirección (más bien sociología en este caso) nos advierten de que el estado actual del Big Bang recuerda un cierto *dejà vu* en la historia de la ciencia. Efectivamente, al igual que Lord Kelvin no podía imaginar las revoluciones cuántica y relativista solo unos años antes de que se produjeran, cuando hablaba de las «nubes» de la física a las puertas del siglo XIX, tal vez la materia oscura o la energía oscura sean nuevas nubes que nos lleven a avances ni siquiera imaginables en estos momentos.

De todos modos es más que probable que, sea como sea, de la misma manera que la física cuántica y la relativista no invalidaron sino que superaron (y en gran medida incluyeron) la física newtoniana, la cosmología de las próximas décadas no invalidará el camino abierto por el Big Bang. Y en lo que todo el mundo está de acuerdo es en otra de las sabias frases de John A. Wheeler: «Los mejores descubrimientos todavía tienen que llegar».

Bibliografía

- Ferguson, K.** (2000). *La medida del universo*. Barcelona: Ediciones Robinbook.
- Freeman, K.; McNamara, G.** (2006). *In search of dark matter*.
- Guth, A. H.** (1997). *The inflationary universe*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Harrison, E.** (2003). *Cosmology the science of the universe*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Hooper, D.** (2006). *Dark cosmos: in search of our universe's missing mass and energy*. New York: Harper Colinos.
- Kirshner, R. P.** (2006). *El Universo extravagante: estrellas explosivas, energía oscura y cosmos*. Madrid: Ediciones Siruela.
- Kragh, H.** (1996). *Cosmology and controversy*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Greene, B.** (2004). *The fabric of the Cosmos*. London: Penguin Books.
- Martínez, V. J.** (2006). *Mariners que solquen el cel: l'aventura de descobrir l'univers*. Valencia: Universidad de Valencia.
- Martínez, V. J.; Trimble, V.; Pons-Bordería, M. J.** (eds.) (2001). *Historical development of modern cosmology*. San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific.

- Rees, M** (2001). *Seis números nada más. Las fuerzas que ordenan el universo*. Madrid: Debate.
- Silk, J.** (2006). *The infinite cosmos: questions from the frontiers of cosmology*. New York: Oxford University Press.
- Smith, R. W.** (1993). *El universo en expansión*. Madrid: Alianza.
- Smoot, G.; Davidson, K.** (1994). *Arrugas en el tiempo*. Barcelona: Plaza & Janés.
- Smolin, L.** (2006). *The Trouble with Physics*. Boston, MI: Houghton Mifflin.
- Susskind, L.** (2007). *El paisaje cósmico*. Barcelona: Editorial Crítica.
- Vilenkin, A.** (2006). *Many worlds in one: the search for other universes*. New York: Hill & Wang.

