

Cosmología: historia y futuro del Universo.

Juan Fabregat.

Introducción

El conocimiento de la naturaleza siempre ha ocupado al pensamiento humano. En todas las épocas la Humanidad ha tratado de conocer y dominar su entorno más inmediato, su medio ambiente, porque de esta forma facilitaba su supervivencia y mejoraba su calidad de vida.

Pero también ha tratado de entender la naturaleza en su conjunto, el Universo, y de comprender su lugar en él. Desde los orígenes de la civilización todas las culturas han propuesto representaciones del Universo e interpretaciones de su lugar en el orden del Cosmos. De tipo religioso o mitológico en la antigüedad, y desde un punto de vista científico después. El recorrido histórico por todas las imágenes del Universo que se han ido sucediendo es apasionante.

La ciencia actual tiene su propia interpretación de como es el Universo. Nuestra idea del Cosmos ha ido construyéndose a lo largo de los últimos cien años, apoyándose en nuevas teorías científicas y en descubrimientos astronómicos.

La visión actual nos presenta un Universo gigantesco, ordenado y en continua evolución, relativamente joven, con un pasado turbulento y un futuro incierto. Nuestro planeta Tierra, nuestro Sol, nuestra Galaxia, todo lo que constituye nuestro entorno más inmediato no es más que una minúscula fracción de la inmensidad de ese Cosmos.

La Astronomía es una ciencia de la naturaleza, El ámbito de su estudio es todo lo que se encuentra más allá de la atmósfera de la Tierra. Este estudio es completo, pues se ocupa tanto de la naturaleza de los objetos que pueblan el espacio -los astros- como de los procesos físicos y químicos que tienen lugar en ellos, de los movimientos y sus causas, y de muchos otros aspectos.

La Cosmología es la parte de la Astronomía cuyo objeto de estudio es el Universo. Llamamos Universo al conjunto de todo lo que es observable y medible, de todo aquello de lo cual nos llega alguna información, y que por tanto podemos estudiar de forma científica. La Cosmología se ocupa de proporcionarnos una descripción de cómo es el Universo en la actualidad, cómo fue en el pasado y cual será su futuro.

En la actualidad, como en épocas pasadas, también tenemos nuestra idea de cómo es el Universo. El modelo actual es conocido por los científicos como "modelo estándar", y también a un nivel más popular como modelo del "big bang", en inglés, o modelo de la "gran explosión" en castellano.

La gran explosión

A principios del siglo XX una cuestión que había ocupado a los astrónomos durante más de cien años todavía estaba sin resolver. Se centraba en algunos objetos celestes, las nebulosas, cuya naturaleza era objeto de debate. En aquella época se pensaba que el

Un universo era lo que llamamos la Galaxia, o la Vía Láctea, un gigantesco conglomerado de más de cien mil millones de estrellas, en forma de disco y con un tamaño de cien mil años luz de diámetro. Se le llamaba también el "universo-isla", al ser considerada como una isla de estrellas en el mar vacío que se creía que era el espacio exterior. Las nebulosas, llamadas así por su aspecto difuso, como de nube, se consideraban componentes de la Galaxia. Algunos científicos proponían que podrían ser sistemas solares en formación; su aspecto de disco girando parecía apoyar esta interpretación. Otros astrónomos, sin embargo, sostenían que las nebulosas eran en realidad galaxias gigantes como la nuestra, como la Vía Láctea. Si este era el caso debían estar muy alejadas, a tal distancia que las estrellas que las componen no se podían ver por separado, y de ahí el aspecto nebuloso.

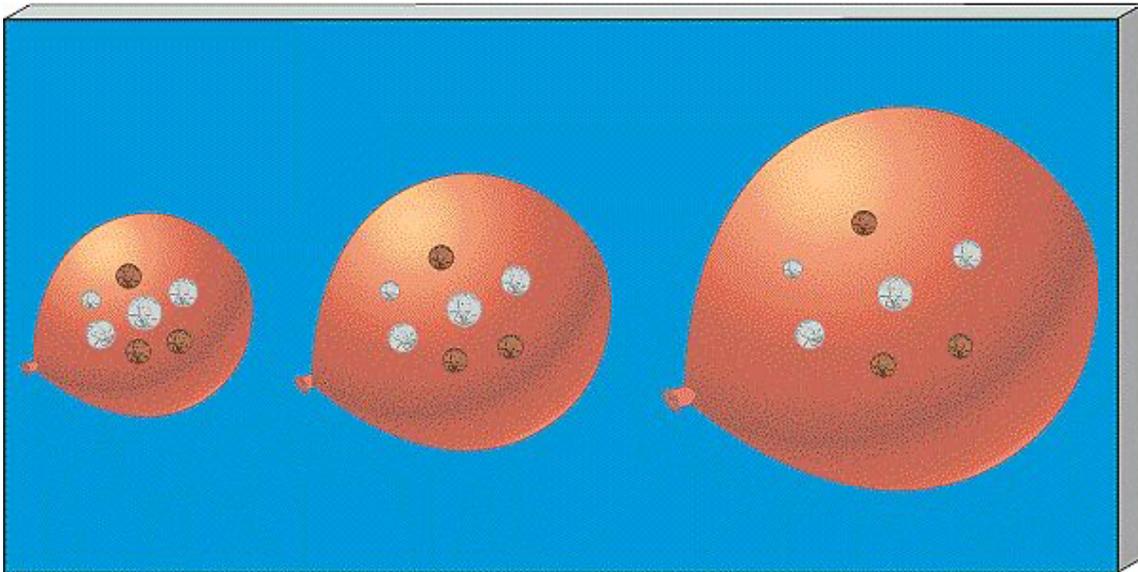


La galaxia de Andrómeda

Un hito importante para la resolución del dilema fue la puesta en marcha en 1917 del gran telescopio Hooker en el Monte Wilson, en California. Con su espejo de vidrio de dos metros y medio de diámetro era con diferencia el más potente de la historia. Edwin Hubble y sus colaboradores utilizaron el gran telescopio para observar las nebulosas. Pudieron reconocer que efectivamente estaban formadas por estrellas. Para una de ellas, la gran nebulosa de Andrómeda, Hubble pudo calcular su distancia a partir del estudio de las estrellas variables que identificó en su interior. La distancia que encontró era de 900.000 años luz, muy superior al tamaño de la Galaxia. Hoy sabemos que la distancia real es mucho mayor, de 2,5 millones de años luz. Andrómeda estaba por tanto fuera de la Vía Láctea, era una galaxia tan grande o más que la nuestra. Y lo mismo sucedía para la gran mayoría de las nebulosas conocidas, eran universos-isla, galaxias exteriores. Desde

entonces ya no se les llama nebulosas, sino galaxias, como la gran galaxia de Andr6meda.

Este descubrimiento result6 un hito en la historia de la Cosmologfa. El Universo era muchfsimo m6s grande de lo que se pensaba. No se limitaba a nuestra Galaxia, sino que era mucho m6s extenso, y estaba formado por un gran n6mero, millones de millones, de galaxias como la nuestra. Estas galaxias constitufan sus elementos fundamentales, los ladrillos con los cuales est6 construido el Cosmos.



Modelo de Universo en expansi3n.

Pero Hubble a6n realiz6 otro descubrimiento fundamental. Observ6 que todas las galaxias se est6n alejando de la nuestra. Adem6s, cuanto m6s lejana est6 una galaxia, m6s deprisa se aleja de nosotros. 3Qu6 tiene de particular la Vfa L6ctea para que todas las dem6s galaxias le huyan, cuanto m6s deprisa mejor? Nada. En realidad no son las dem6s galaxias las que se alejan de la nuestra, sino que todas se alejan unas de otras. Nuestro Universo est6 en expansi3n, las distancias entra las galaxias aumentan a medida que pasa el tiempo. En esta situaci3n, desde cualquier galaxia se observa a las dem6s alejarse, sin que la galaxia desde la que se observa tenga ninguna particularidad. Este efecto lo podemos ilustrar con el ejemplo de un globo -que representa al Universo- sobre el cual pegamos unos trocitos de papel -las galaxias-. Al hinchar el globo, los papelitos se alejan unos de otros, y desde cualquiera de ellos parece que son todos los dem6s los que retroceden a mayor velocidad cuanto m6s lejanos est6n.

La expansi3n no s3lo afecta a la materia, a las galaxias, que se alejan unas de otras. Tambi6n afecta a la radiaci3n. La luz participa de la expansi3n del Universo. Al viajar por un Universo que se va haciendo m6s grande, su longitud de onda aumenta al mismo ritmo con el que se expande el espacio. Por eso la luz se hace cada vez m6s roja. Cuando observamos una galaxia lejana, la vemos tal y como era en el pasado, porque la luz se desplaza a una velocidad finita, y ha tardado tiempo en llegar al observador. Esa luz empez6 a viajar en el pasado, y en su viaje hasta el presente ha participado de la

expansión, ha aumentado su longitud de onda, se ha enrojecido. Cuanto más lejana está la galaxia que observamos, más enrojecida llega su luz. Este fenómeno se llama desplazamiento o corrimiento al rojo, y es el que permitió a Hubble darse cuenta de que las galaxias se alejan.

El Universo, pues, tuvo su origen en el pasado, en la gran explosión. Para saber cual será su futuro necesitamos conocer con cierto detalle su contenido. Después de la explosión, que es la causa de la actual expansión, la única fuerza que actúa en el Universo a gran escala es la fuerza de la gravedad. La gravedad hace que las galaxias se atraigan unas a otras, y por tanto se opone a la expansión. En consecuencia, dicha expansión debería ser cada vez más lenta. ¿Llegará la gravedad a frenar la expansión? Eso depende de lo fuerte que sea la gravedad, lo cual a su vez está relacionado con la cantidad de materia que hay en el Universo, con la densidad de materia.

Si la densidad es grande, la fuerza de gravedad será muy intensa, y podría llegar a frenar la expansión. Si la expansión se detiene, como la gravedad sigue actuando, las galaxias se atraerán unas a otras, y comenzará una contracción. El Universo se hará cada vez más pequeño hasta que toda la materia vuelva a concentrarse en un punto, como en el origen. Podría darse el caso de que este punto a su vez volviese a explotar, dando lugar a un nuevo "big bang" y a un nuevo Universo en expansión, que a su vez volvería a detenerse y contraerse, de forma cíclica. A este modelo lo llamamos "Universo oscilante".

Por el contrario, si la densidad del Universo no es suficiente para que la gravedad frene la expansión, entonces el Universo se expandirá para siempre, será cada vez más grande, indefinidamente. Hay un caso límite, aquel en que la densidad del Universo es la justa para que la expansión se frene en un tiempo infinito. A esta densidad se le llama densidad crítica, y haría que el Universo esté también siempre en expansión, pero cada vez más lenta y tendiendo asintóticamente a detenerse.

De esta forma, si la densidad del Universo actual es superior a la crítica, la expansión se detendrá y seguirá una contracción. Si es igual o inferior a la crítica, la expansión continuará para siempre. Para saber cual de estos casos se corresponde al futuro real, hay que medir la densidad de materia en el Universo. A este empeño se dedican los astrónomos desde los años 50 del pasado siglo.

Hay varias formas de medir la densidad del Universo. La más inmediata es medir la cantidad de materia brillante, la materia que vemos en forma de galaxias y de su contenido en estrellas y nubes de gas. El resultado de esta medida da una cantidad muy pequeña: la densidad de materia brillante es sólo un 4% de la necesaria para detener la expansión. Por tanto, la expansión del Universo nunca se detendrá.

Otra forma de determinar la densidad es midiendo la masa dinámica. Las galaxias próximas giran unas alrededor de las otras, debido a su atracción gravitatoria mutua. Observando su movimiento podemos medir su masa, de la misma forma que observando el movimiento de los planetas medimos la masa del Sol. El resultado que obtenemos es que la masa dinámica representa el 30% de la densidad crítica. Y aquí surge uno de los grandes misterios de la cosmología moderna.

La masa determinada de forma dinámica es mucho más grande que la obtenida observando la materia brillante. Hay una gran cantidad de materia que sabemos que existe porque detectamos sus efectos gravitatorios, pero que sin embargo no vemos. Es lo que se denomina la materia oscura. Esta materia oscura existe en todas las galaxias, incluida nuestra Vía Láctea. Aunque se han apuntado varias posibilidades acerca de su naturaleza,

hoy en día aún no sabemos lo que es.

En cualquier caso, y aún considerando esta materia oscura, sólo encontramos en el Universo el 30% de la densidad crítica. Por tanto, todas estas medidas parecen indicar que la expansión será eterna, que el Universo nunca frenará. Volveremos sobre esta cuestión un poco más adelante.

La historia del Universo

En 1965 un descubrimiento casual vino a dar el espaldarazo definitivo al modelo del big-bang. Penzias y Wilson, de la compañía telefónica americana Bell, estaban haciendo pruebas con una antena de telecomunicaciones para tratar de detectar señales de radio procedentes del plano de la Galaxia. Se dieron cuenta de que había una señal que parecía llegar de todas partes. Tras comprobaciones muy minuciosas llegaron a la conclusión de que la radiación que observaban era de origen cósmico, y no procedía del Sol ni de nuestra propia Galaxia. A esta radiación se le llama fondo cósmico de microondas. Procede de todas partes del Universo, y llega desde todas las direcciones con la misma intensidad. Corresponde a una radiación de tipo térmico, la que emitiría un cuerpo si se encontrase a una temperatura de 2,7 grados Kelvin, es decir, 2,7 grados por encima del cero absoluto, 270,4 grados centígrados bajo cero.

La radiación de fondo nos indica que el Universo tiene una temperatura. Aunque esta sea muy baja, el espacio no está completamente frío. Esto se considera como una prueba de la expansión, nos habla de un Universo que en el pasado estuvo mucho más caliente, y nos permite trazar la historia del Universo.

En un pasado muy remoto, inmediatamente después de la gran explosión, el Universo era muy caliente. Estaba formado por partículas muy energéticas, muy masivas, que no existen en el universo actual. Al expandirse, la concentración de energía fue disminuyendo, las partículas masivas fueron desintegrándose dando lugar a partículas más estables, las que existen en el Universo actual. La materia del Universo formaba un plasma que llenaba todo el espacio. Un plasma es como un gas, pero formado por partículas cargadas, protones y electrones. Los gases a los que estamos acostumbrados en la Tierra están compuestos por átomos o moléculas neutros, sin carga eléctrica. Sin embargo, a temperaturas muy altas, estos átomos se mueven a tal velocidad que se rompen al colisionar, y quedan libres sus constituyentes elementales, los núcleos atómicos, los protones y los electrones. El gas de partículas cargadas, al contrario que el de partículas neutras, no es transparente. La luz interacciona, y esta en continua colisión, con las partículas cargadas. Así pues, ese plasma que llenaba el Universo primitivo era como una sopa formada por protones, electrones y fotones, en continua colisión unos con otros.

Dentro del plasma se producen reacciones nucleares que dan lugar a la formación de núcleos atómicos compuestos por varios protones y neutrones, como por ejemplo núcleos de Helio, Litio, etc. Sin embargo, las energías son tan altas que los núcleos recién formados son destruidos inmediatamente al colisionar con otras partículas. Llega un momento, al seguir enfriándose el Universo, en que los núcleos recién formados ya no se destruyen. La temperatura ha bajado lo suficiente para que los núcleos pesados resistan las colisiones sin fragmentarse. Se crea en este momento una gran cantidad de átomos de

Helio, aproximadamente el 25% de los protones que existían en el Universo se unen para formar núcleos de Helio. A este fenómeno se le denomina la nucleosíntesis primordial, y constituye una de las pruebas decisivas para la aceptación de la teoría del big-bang. Sabemos que el Universo actual está formado por un 25% de Helio, casi un 75% de Hidrógeno, y el resto por átomos más pesados que han sido sintetizados por las estrellas. La presencia de ese importante porcentaje de Helio implica la existencia de la nucleosíntesis primordial en un Universo que en el pasado fue muy caliente.

La nucleosíntesis primordial tiene lugar tres minutos después del big bang, y dura muy poco tiempo. Al seguir enfriándose el Universo las reacciones nucleares se detienen. Cuando la temperatura baja, los protones no tienen suficiente energía para interactuar, la repulsión electrostática impide que se acerquen. Al cesar la nucleosíntesis primordial el Universo se queda con la proporción de Hidrógeno y Helio que tiene en la actualidad.

El siguiente hito en la historia del Universo tiene lugar 380.000 años después. La temperatura ha descendido mucho, es de unos 3.000 grados. A esta temperatura los electrones se unen a los núcleos, formando átomos neutros. Antes esto también sucedía, pero los átomos se rompían inmediatamente por efectos de las colisiones. A menos de 3.000 grados los choques no destruyen los átomos, estos ya son estables. De repente, el Universo pasa de ser un plasma de partículas cargadas a convertirse en un gas formado por Hidrógeno y Helio. El Universo se hace transparente. Antes, la luz, los fotones, no viajaban libremente sino que estaba chocando continuamente con las partículas cargadas. En un gas atómico, sin embargo, la luz viaja libremente, por eso los gases son transparentes.

A la época en la que esto sucede se le llama época del desacoplo, porque la luz pasa de estar acoplada con la materia a viajar libremente. Desde entonces la luz ha estado viajando por el Universo, y es la misma luz que observamos ahora como fondo cósmico de microondas. Desde el principio de su viaje ha participado de la expansión del Universo y se ha enrojecido. Se ha ido enfriando y de los 3.000 grados de la época del desacoplo ha pasado a los 2,7 grados en la actualidad.

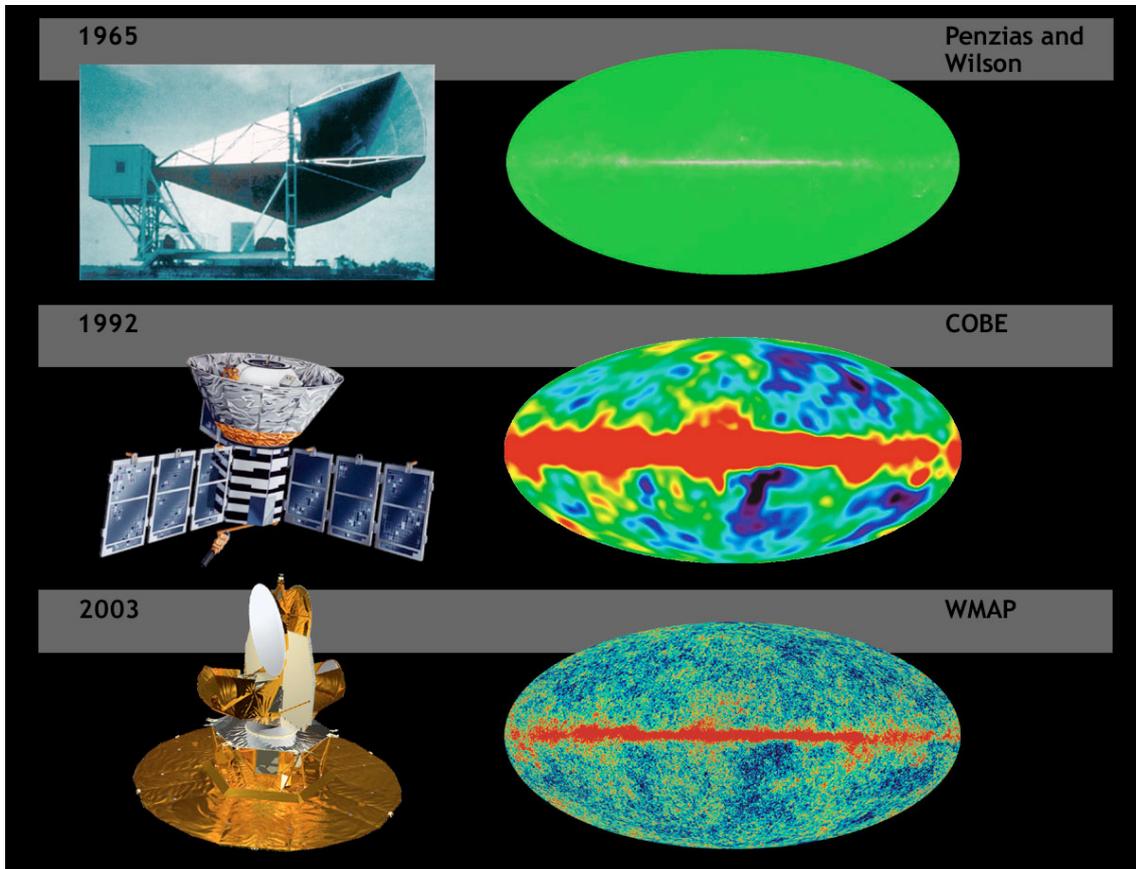
La radiación de fondo cósmico es lo más lejano que podemos ver. Como la luz tiene una velocidad finita, cuanto más lejos miramos más hacia el pasado estamos viendo. Lo más lejano que podemos ver es el Universo en la era del desacoplo, cuando la luz empezó a viajar. Más allá nunca podremos ver, porque antes del desacoplo la luz no viajaba.

Después del desacoplo el Universo está lleno de gas. Al seguir la expansión esta gas se va agrupando y formando estructuras, regiones de mayor densidad. Es en esas estructuras en las que se forman las primeras galaxias, y en ellas las estrellas y planetas, hasta llegar a la configuración del Universo actual.

La energía oscura

Como hemos visto, el descubrimiento de la radiación de fondo cósmica supuso un importante triunfo para la teoría de la gran explosión. Sin embargo, con el paso del tiempo, lo que al principio constituyó un éxito fue derivando hasta convertirse en un problema cada vez más incómodo. Las observaciones de la radiación de fondo realizadas después de 1965 mostraban que ésta era completamente homogénea, es decir, que su intensidad y su temperatura eran las mismas en todo el cielo, sin variación de un punto a otro. La radiación de fondo fue emitida por el Universo en la época del desacoplo, y su homogeneidad indica que la distribución de materia en el Universo era también homogénea. Es decir, en la era del desacoplo el Universo estaba ocupado por una

distribución de gas completamente regular y homogénea. Y aquí está el problema, porque muy poco después del desacoplo ya tenemos las primeras galaxias formándose. ¿Cómo es posible pasar en tan poco tiempo de una distribución uniforme de gas a nuestro Universo actual, con sus estructuras, sus galaxias, sus estrellas, sus grandes espacios vacíos?



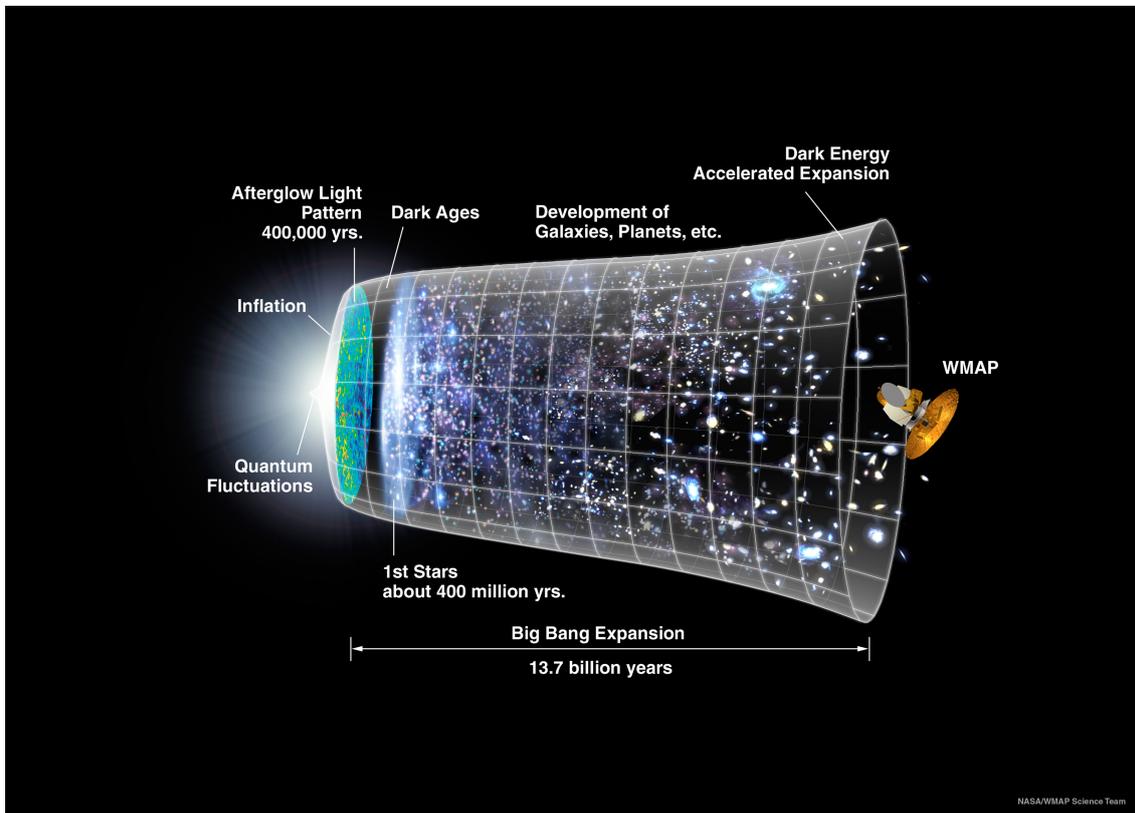
Mapas de la radiación de fondo (Credito: NASA/WMAP Science Team)

La magnitud del problema llevó a los científicos a realizar observaciones cada vez más precisas del fondo de microondas, primero desde tierra y luego mediante observatorios espaciales. El primer satélite diseñado para esta observación, llamado COBE (del inglés Cosmic Background Explorer, explorador del fondo cósmico) demostró que el fondo no era completamente homogéneo, había pequeñas diferencias de temperatura y densidad entre unos puntos y otros. Posteriormente, otro satélite más potente, el WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, sonda Wilkinson para la anisotropía de las microondas) realizó un mapa de la radiación de fondo mucho más detallado, que hacía aún más patentes esas diferencias.

El problema estaba resuelto. El Universo en la era del desacoplo no era completamente homogéneo, sino que ya contenía estructuras, la distribución del gas no era uniforme sino compleja y estructurada. Las estructuras fueron evolucionando después del desacoplo, dando lugar a una distribución de la materia en forma de filamentos, en los cuales se forman las galaxias y las estrellas.

El estudio de las inhomogeneidades del fondo cósmico, puestas de manifiesto por COBE y WMAP, nos permite conocer muchas más cosas acerca de la historia y el contenido del

Universo. Haciendo uso de modelos físicos que describen el comportamiento de la materia y la energía en la era del desacople, a partir del mapa de las inhomogeneidades podemos determinar muchos parámetros fundamentales de nuestro Universo. Uno de ellos es su densidad. Utilizando los mapas proporcionados por WMAP, obtenemos que la densidad del Universo es exactamente la densidad crítica, la necesaria para detener la expansión en un tiempo infinito.



La historia del Universo (Credito: NASA/WMAP Science Team)

Sin embargo, habíamos visto que la materia que podemos ver en el Universo, la materia visible, sólo permite alcanzar el 4% de esta densidad crítica. La materia que detectamos por sus efectos gravitatorios, lo que llamamos materia oscura, da cuenta de un 26% adicional de la densidad crítica. Si a partir del estudio del fondo cósmico concluimos que la densidad es exactamente la crítica, ¿cuál es el otro componente del Universo, que contribuye al 70% de su densidad, y que no es ni materia brillante ni materia oscura? A ese nuevo componente se le llama energía oscura, y en la actualidad no sabemos nada acerca de su naturaleza.

Además de medir la densidad, hay otra forma de estudiar el futuro del Universo. Consiste en medir la variación de la velocidad de expansión. Hoy en día, si observamos la velocidad de alejamiento de las galaxias como empezó a hacer Hubble con el telescopio de monte Wilson, podemos medir la velocidad de expansión en la actualidad. Por otra parte, recordemos que si miramos muy lejos en el Universo estamos mirando hacia el pasado, debido a que la velocidad de la luz es finita. Si observamos la velocidad de recesión de las galaxias más alejadas, podemos llegar a medir la velocidad de la expansión en el pasado. Comparando la velocidad de expansión en el pasado y en el presente podemos calcular a que velocidad disminuye la expansión, y por tanto si esa

expansión se detendrá o continuará hasta el infinito.

El estudio de la velocidad de recesión en galaxias muy lejanas se ha podido realizar desde hace unos pocos años, gracias al desarrollo reciente de los instrumentos y las técnicas de observación astronómica. Y el resultado ha sido sorprendente. En el pasado, la expansión era más lenta que en la actualidad. Dicho de otro modo, la expansión no es cada vez más lenta, sino más rápida. El Universo no está frenando, está acelerando.

Esto plantea un nuevo y complejo problema a la Cosmología. Con la física que conocemos, la única fuerza capaz de actuar a gran escala en todo el Universo es la fuerza de gravedad, que hace que las galaxias se atraigan unas a otras. Por tanto, la expansión debería frenarse gradualmente. Si el Universo está acelerando, debe existir una fuerza desconocida, de tipo repulsivo, y que en las grandes distancias es más intensa que la propia fuerza de gravedad. Hoy en día no sabemos cual es esa fuerza, aunque la suponemos asociada a la energía oscura. Es por tanto la energía oscura la responsable de la aceleración del Universo.

Epílogo

A modo de conclusión, vemos que en la actualidad nuestro modelo del Universo se enfrenta a dos grandes retos. El estudio de la radiación de fondo nos indica que desconocemos completamente el 70% del contenido del Universo. La expansión acelerada indica que también desconocemos la fuerza más importante de cuantas actúan en el Universo. La situación no parece, pues, muy satisfactoria. Sin embargo estos nuevos retos están estimulando a físicos y astrónomos a mejorar nuestro modelo del Cosmos, y las teorías físicas en las cuales este modelo se sustenta. En los próximos años vamos a vivir una de las eras más apasionantes de la Cosmología, e incluso podríamos ser testigos del nacimiento de nuevos modelos cosmológicos o de la revisión de las teorías físicas actuales.