

## EL BIG BANG

La teoría del **Big Bang** (también llamada **Gran explosión**<sup>nota 1</sup>) es el modelo cosmológico predominante para los períodos conocidos más antiguos del universo y su posterior evolución a gran escala.<sup>2 3 4</sup> Afirma que el universo estaba en un estado de muy alta densidad y luego se expandió.<sup>5 6</sup> Si las leyes conocidas de la física se extrapolan más allá del punto donde son válidas, encontramos una singularidad. Mediciones modernas datan este momento aproximadamente 13 800 millones de años atrás, que sería por tanto la edad del universo.<sup>7</sup> Después de la expansión inicial, el universo se enfrió lo suficiente para permitir la formación de las partículas subatómicas y más tarde simples átomos. Nubes gigantes de estos elementos primordiales se unieron más tarde debido a la gravedad, para formar estrellas y galaxias. A mediados del siglo XX, tres astrofísicos británicos, Stephen Hawking, George F. R. Ellis y Roger Penrose, prestaron atención a la teoría de la relatividad y sus implicaciones respecto a nuestras nociones del tiempo. En 1968 y 1979 publicaron artículos en que extendieron la teoría de la relatividad general de Einstein para incluir las mediciones del tiempo y el espacio.<sup>8 9</sup> De acuerdo con sus cálculos, el tiempo y el espacio tuvieron un inicio finito que corresponde al origen de la materia y la energía.

Desde que Georges Lemaître observó por primera vez, en 1927, que un universo en permanente expansión debería remontarse en el tiempo hasta un único punto de origen, los científicos se han basado en su idea de la expansión cósmica. Si bien la comunidad científica una vez estuvo dividida en partidarios de dos teorías diferentes sobre el universo en expansión, el *Big Bang* y la teoría del estado estacionario, la acumulación de evidencia observacional proporciona un fuerte apoyo para la primera.<sup>10</sup>

En 1929, a partir del análisis de corrimiento al rojo de las galaxias, Edwin Hubble concluyó que las galaxias se estaban distanciando, una prueba observacional importante consistente con la hipótesis de un universo en expansión. En 1964 se descubrió la radiación de fondo cósmico de microondas, lo que es una prueba crucial en favor del modelo del *Big Bang*, ya que esta teoría predijo la existencia de la radiación de fondo en todo el universo antes de ser descubierta. Más recientemente, las mediciones del corrimiento al rojo de las supernovas indican que la expansión del universo se está acelerando, observación atribuida a la energía oscura. Las leyes físicas conocidas de la naturaleza pueden utilizarse para calcular las características en detalle del universo del pasado en un estado inicial de extrema densidad y temperatura.

La expresión *big bang* proviene del astrofísico inglés Fred Hoyle, uno de los detractores de esta teoría y, a su vez, uno de los principales defensores de la teoría del estado estacionario, quien dijo, para explicar mejor el fenómeno, que el modelo descrito era simplemente un *big bang* (gran explosión).<sup>15</sup> En el inicio del universo ni hubo explosión ni fue grande, pues en rigor surgió de una «singularidad» infinitamente pequeña, seguida de la expansión del propio espacio.<sup>16</sup> Recientes ingenios espaciales puestos en órbita (COBE) han conseguido observar evidencias de la expansión primigenia.

La idea central del *Big Bang* es que la teoría de la relatividad general puede combinarse con las observaciones de isotropía y homogeneidad a gran escala de la distribución de galaxias y los

cambios de posición entre ellas, permitiendo extrapolar las condiciones del universo antes o después en el tiempo.

Una consecuencia de todos los modelos de *big bang* es que, en el pasado, el universo tenía una temperatura más alta y mayor densidad y, por tanto, las condiciones del actual son muy diferentes de las condiciones del universo en el pasado. A partir de este modelo, George Gamow en 1948 predecía que habría evidencias de un fenómeno que más tarde sería bautizado como radiación de fondo de microondas.

Michio Kaku ha señalado cierta paradoja en la denominación *big bang* (gran explosión): en cierto modo no puede haber sido grande ya que se produjo exactamente antes del surgimiento del espacio-tiempo. Habría sido el mismo *big bang* lo que habría generado las dimensiones desde una singularidad; tampoco es exactamente una explosión en el sentido propio del término, ya que no se propagó fuera de sí mismo.

Basándose en medidas de la expansión del universo utilizando observaciones de las supernovas tipo 1a, en función de la variación de la temperatura en diferentes escalas en la radiación de fondo de microondas y en función de la correlación de las galaxias, la edad del universo es de aproximadamente  $13,7 \pm 0,2$  miles de millones de años. Es notable el hecho de que tres mediciones independientes sean coincidentes, por lo que se considera una fuerte evidencia del llamado modelo de concordancia que describe la naturaleza detallada del universo.

El universo en sus primeros momentos estaba lleno homogénea e isotrópamente de una energía muy densa y tenía una temperatura y presión concomitantes. Se expandió y se enfrió, experimentando cambios de fase análogos a la condensación del vapor o a la congelación del agua, pero relacionados con las partículas elementales.

Aproximadamente  $10^{-35}$  segundos después del tiempo de Planck un cambio de fase causó que el universo se expandiese de forma exponencial durante un período llamado inflación cósmica. Al terminar la inflación, los componentes materiales del universo quedaron en la forma de un plasma de quarks-gluones, en donde todas las partes que lo formaban estaban en movimiento en forma relativista. Con el crecimiento en tamaño del universo, la temperatura descendió, y debido a un cambio aún desconocido denominado bariogénesis, los quarks y los gluones se combinaron en bariones tales como el protón y el neutrón, produciendo de alguna manera la asimetría observada actualmente entre la materia y la antimateria. Las temperaturas aún más bajas condujeron a nuevos cambios de fase, que rompieron la simetría, así que les dieron su forma actual a las fuerzas fundamentales de la física y a las partículas elementales. Más tarde, protones y neutrones se combinaron para formar los núcleos de deuterio y de helio, en un proceso llamado nucleosíntesis primordial. Al enfriarse el universo, la materia gradualmente dejó de moverse de forma relativista y su densidad de energía comenzó a dominar gravitacionalmente sobre la radiación. Pasados 300 000 años, los electrones y los núcleos se combinaron para formar los átomos (mayoritariamente de hidrógeno). Por eso, la radiación se desacopló de los átomos y continuó por el espacio prácticamente sin obstáculos. Esta es la radiación de fondo de microondas.

Al pasar el tiempo, algunas regiones ligeramente más densas de la materia casi uniformemente distribuida crecieron gravitacionalmente, haciéndose más densas, formando nubes, estrellas, galaxias y el resto de las estructuras astronómicas que actualmente se observan. Los detalles de este proceso dependen de la cantidad y tipo de materia que hay en el universo. Los tres tipos posibles se denominan materia oscura fría, materia oscura caliente y materia bariónica. Las mejores medidas disponibles (provenientes del WMAP) muestran que la forma más común de materia en el universo es la materia oscura fría. Los otros dos tipos de materia solo representarían el 20 por ciento de la materia del universo.

El universo actual parece estar dominado por una forma misteriosa de energía conocida como energía oscura. Aproximadamente el 70 por ciento de la densidad de energía del universo actual está en esa forma. Una de las propiedades características de este componente del universo es el hecho de que provoca que la expansión del universo varíe de una relación lineal entre velocidad y distancia, haciendo que el espacio-tiempo se expanda más rápidamente que lo esperado a grandes distancias. La energía oscura toma la forma de una constante cosmológica en las ecuaciones de campo de Einstein de la relatividad general, pero los detalles de esta ecuación de estado y su relación con el modelo estándar de la física de partículas continúan siendo investigados tanto en el ámbito de la física teórica como por medio de observaciones.

Más misterios aparecen cuando se investiga más cerca del principio, cuando las energías de las partículas eran más altas de lo que ahora se puede estudiar mediante experimentos. No hay ningún modelo físico convincente para el primer  $10^{-33}$  segundo del universo, antes del cambio de fase que forma parte de la teoría de la gran unificación. En el "primer instante", la teoría gravitacional de Einstein predice una singularidad en donde las densidades son infinitas. Para resolver esta paradoja física, hace falta una teoría de la gravedad cuántica. La comprensión de este período de la historia del universo figura entre los mayores problemas no resueltos de la física.

En su forma actual, la teoría del *Big Bang* depende de tres suposiciones:

1. La universalidad de las leyes de la física, en particular de la teoría de la relatividad general
2. El principio cosmológico
3. El principio de Copérnico

Inicialmente, estas tres ideas fueron tomadas como postulados, pero actualmente se intenta verificar cada una de ellas. La universalidad de las leyes de la física ha sido verificada al nivel de las más grandes constantes físicas, llevando su margen de error hasta el orden de  $10^{-5}$ . La isotropía del universo que define el principio cosmológico ha sido verificada hasta un orden de  $10^{-5}$ . Actualmente se intenta verificar el principio de Copérnico observando la interacción entre grupos de galaxias y el CMB por medio del efecto Siunyáiev-Zeldóvich con un nivel de exactitud del 1 por ciento.

La teoría del *Big Bang* utiliza el postulado de Weyl para medir sin ambigüedad el tiempo en cualquier momento en el pasado a partir de la época de Planck. Las medidas en este sistema dependen de coordenadas conformales, en las cuales las llamadas distancias codesplazantes y los tiempos conformales permiten no considerar la expansión del universo para las medidas de espacio-

tiempo. En ese sistema de coordenadas, los objetos que se mueven con el flujo cosmológico mantienen siempre la misma distancia codesplazante, y el horizonte o límite del universo se fija por el tiempo codesplazante.

Visto así, el *Big Bang* no es una explosión de materia que se aleja para llenar un universo vacío; es el espacio-tiempo el que se extiende. Y es su expansión la que causa el incremento de la distancia física entre dos puntos fijos en nuestro universo. Cuando los objetos están ligados entre ellos (por ejemplo, por una galaxia), no se alejan con la expansión del espacio-tiempo, debido a que se asume que las leyes de la física que los gobiernan son uniformes e independientes del espacio métrico. Más aún, la expansión del universo en las escalas actuales locales es tan pequeña que cualquier dependencia de las leyes de la física en la expansión no sería medible con las técnicas actuales.

De la observación de galaxias y cuasares lejanos se desprende la idea de que estos objetos experimentan un corrimiento hacia el rojo, lo que quiere decir que la luz que emiten se ha desplazado proporcionalmente hacia longitudes de onda más largas. Esto se comprueba tomando el espectro de los objetos y comparando, después, el patrón espectroscópico de las líneas de emisión o absorción correspondientes a átomos de los elementos que interactúan con la radiación. En este análisis se puede apreciar cierto corrimiento hacia el rojo, lo que se explica por una velocidad recesional correspondiente al efecto Doppler en la radiación.

Una de las predicciones de la teoría del *Big Bang* es la existencia de la radiación cósmica de fondo, radiación de fondo de microondas o CMB (*Cosmic microwave background*). El universo temprano, debido a su alta temperatura, se habría llenado de luz emitida por sus otros componentes. Mientras el universo se enfriaba debido a la expansión, su temperatura habría caído por debajo de 3000 K. Por encima de esta temperatura, los electrones y protones están separados, haciendo el universo opaco a la luz. Por debajo de los 3000 K se forman los átomos, permitiendo el paso de la luz a través del gas del universo. Esto es lo que se conoce como disociación de fotones.

La radiación en este momento habría tenido el espectro del cuerpo negro y habría viajado libremente durante el resto de vida del universo, sufriendo un corrimiento hacia el rojo como consecuencia de la expansión de Hubble. Esto hace variar el espectro del cuerpo negro de 3345 K a un espectro del cuerpo negro con una temperatura mucho menor. La radiación, vista desde cualquier punto del universo, parecerá provenir de todas las direcciones en el espacio.

En 1965, Arno Penzias y Robert Wilson, mientras desarrollaban una serie de observaciones de diagnóstico con un receptor de microondas propiedad de los Laboratorios Bell, descubrieron la radiación cósmica de fondo. Ello proporcionó una confirmación sustancial de las predicciones generales respecto al CMB —la radiación resultó ser isotrópica y constante, con un espectro del cuerpo negro de cerca de 3 K— e inclinó la balanza hacia la hipótesis del *Big Bang*. Penzias y Wilson recibieron el Premio Nobel por su descubrimiento.

En 1989, la NASA lanzó el COBE (COsmic Background Explorer) y los resultados iniciales, proporcionados en 1990, fueron consistentes con las predicciones generales de la teoría del *Big Bang* acerca de la CMB. El COBE halló una temperatura residual de 2,726 K, y determinó que el CMB era isotrópico en torno a una de cada  $10^5$  partes. Durante la década de los 90 se investigó más

extensamente la anisotropía en el CMB mediante un gran número de experimentos en tierra y, midiendo la distancia angular media (la distancia en el cielo) de las anisotropías, se vio que el universo era geoméricamente plano.

A principios de 2003 se dieron a conocer los resultados de la Sonda Wilkinson de Anisotropías del fondo de Microondas (en inglés *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* o *WMAP*), mejorando los que hasta entonces eran los valores más precisos de algunos parámetros cosmológicos. (Véase también *experimentos sobre el fondo cósmico de microondas*). Este satélite también refutó varios modelos inflacionistas específicos, pero los resultados eran constantes con la teoría de la inflación en general.

Históricamente han surgido varios problemas dentro de la teoría del *Big Bang*. Algunos de ellos solo tienen interés histórico y han sido evitados, ya sea por medio de modificaciones a la teoría o como resultado de observaciones más precisas. Otros aspectos, como el problema de la penumbra en cúspide y el problema de la galaxia enana de materia oscura fría, no se consideran graves, dado que pueden resolverse a través de un perfeccionamiento de la teoría.

Existe un pequeño número de proponentes de cosmologías no estándar que piensan que no hubo un *Big Bang*. Afirman que las soluciones a los problemas conocidos del *Big Bang* contienen modificaciones ad hoc y agregados a la teoría. Las partes más atacadas de la teoría incluyen lo concerniente a la materia oscura, la energía oscura y la inflación cósmica. Cada una de estas características del universo ha sido sugerida mediante observaciones de la radiación de fondo de microondas, la estructura a gran escala del cosmos y las supernovas de tipo IA, pero se encuentran en la frontera de la física moderna (ver problemas no resueltos de la física). Si bien los efectos gravitacionales de materia y energía oscuras son bien conocidos de forma observacional y teórica, todavía no han sido incorporados al modelo estándar de la física de partículas de forma aceptable. Estos aspectos de la cosmología estándar siguen sin tener una explicación adecuada, pero la mayoría de los astrónomos y los físicos aceptan que la concordancia entre la teoría del *Big Bang* y la evidencia observacional es tan cercana que permite establecer con cierta seguridad casi todos los aspectos básicos de la teoría.