

Una cosmogonía científica

Luis Álvarez Gaumé
1 julio, 1998

The Inflationary Universe
ALAN GUTH
Addison-Vesley, 1997

Cuando miramos al cielo en una noche clara podemos ver varios millares de estrellas, muchas de ellas concentradas cerca de una banda luminosa que conocemos como la Vía Láctea, y que es una visión desde dentro de la galaxia en la que vivimos. Al contemplar semejante espectáculo, la mayoría de los seres humanos, a lo largo de la historia, se han hecho esencialmente las mismas preguntas: ¿por qué es tan grande el universo?, ¿tiene límites?, ¿cuál es su tamaño?, ¿de qué está hecho?, ¿cuál es su forma?, ¿tiene principio?, ¿tendrá fin?, ¿por qué hay vida inteligente?, ¿tiene algún sentido o finalidad?...

Para el público en general, uno de los atractivos de la astronomía y la cosmología es la facilidad con la que se pueden hacer preguntas en la frontera de estas áreas del conocimiento. Si las comparamos con otras ramas de la ciencia, como la neurobiología, la teoría de números, la física de partículas o la electrónica cuántica, se puede constatar que los problemas que preocupan a los expertos no son tan fácilmente traducibles al lenguaje habitual.

Los diversos mitos de la creación que diferentes culturas han elaborado a lo largo de la historia están lejos de ser teorías científicas en un sentido moderno. Su objetivo no era revelar cosas nuevas del universo visible, sino buscar una manera de alejar el espectro de lo desconocido. El mito proporcionaba al hombre un lugar seguro en la jerarquía de la creación y alejaba así la necesidad de considerar aspectos de la realidad totalmente desconocidos. Las teorías científicas actuales no se preocupan de asegurar al ser humano un lugar más o menos privilegiado en el cosmos; más bien

parece todo lo contrario a partir de la revolución copernicana. Una explicación científica aceptable debe enseñarnos más cosas sobre el universo de las que incluimos al formularla. Debe ser capaz de hacer predicciones sobre propiedades desconocidas que sean accesibles a la experimentación y por tanto a la verificación; y al mismo tiempo proporcionar un esquema conceptual que aporte claridad, coherencia y unidad a un conjunto de hechos y datos diversos. Al aplicar al cosmos el método científico hay que tener en cuenta, sin embargo, que uno de sus pilares, la reproducibilidad de los resultados de un experimento, es algo que debe abandonarse en gran medida. La tecnología moderna no nos permite crear universos a nuestro antojo en los que podríamos variar a voluntad las condiciones iniciales, y esperar unos cuantos miles de millones de años para analizar el resultado. Sólo hay un universo visible, y por consiguiente las nociones de predictividad y reproducibilidad propias del método científico deben ser revisadas.

Uno de los aspectos más novedosos de la cosmología del siglo XX es que cuestiones relativas al universo primitivo pueden traducirse en preguntas detalladas sobre el comportamiento de la materia a altas energías y distancias pequeñas, a nivel subatómico o subnuclear. Dentro de esta reformulación de los interrogantes fundamentales sobre el origen del cosmos, podemos utilizar todo el arsenal teórico y experimental acumulado a lo largo del siglo por la física nuclear y la física de partículas para obtener respuestas sin necesidad de crear universos en el laboratorio, algo que, además de no ser factible, no sería financiado por ningún gobierno. Relacionar lo infinitamente grande (el universo) con lo infinitamente pequeño (las partículas elementales y sus propiedades) es un logro científico de nuestro siglo, y para comprender cómo pudo establecerse una relación aparentemente tan poco probable, el libro de Alan Guth proporciona una exposición lúcida y clara de cómo el misterio de los orígenes del universo está íntimamente ligado a la física de partículas.

A finales del siglo XIX o comienzos del XX, ni astrónomos ni filósofos ponían en duda el hecho de que el espacio y el tiempo eran absolutos y que proporcionaban el medio en el que el Sol, los planetas y demás cuerpos celestes describían sus movimientos. La cosmología moderna nace de la mano de Albert Einstein en 1917, un año después de la formulación de la teoría relativista de la gravitación, o relatividad general. Los conceptos de espacio, tiempo y dinámica fueron profundamente transformados dentro del esquema conceptual de la teoría general de la relatividad. La geometría del espacio y del tiempo dejan de ser objetos absolutos para formar parte de la dinámica de la materia. Una de las consecuencias extraordinarias de la relatividad general es que el universo en su conjunto se expande de forma homogénea e isotrópica, es decir, por igual en todos los lugares y en todas las direcciones. A pesar de que Einstein era consciente de que la expansión era una consecuencia natural de sus ecuaciones, en su artículo mantuvo la hipótesis de un universo estático, y para ello modificó las ecuaciones de la gravitación introduciendo un término adicional, conocido como constante cosmológica y que proporciona el equivalente de una fuerza gravitatoria repulsiva. En los años veinte E. H. Hubble demostró experimentalmente sin embargo que el universo se expande y que la velocidad de recesión de las galaxias lejanas es proporcional a la distancia que nos separa de ellas (cuanto más lejos, más rápido). Esto no implica que la Tierra o la Vía Láctea sean el centro de la expansión. La expansión es universal, y una forma de entenderla metafóricamente es imaginando un globo que se infla y en que hemos dibujado pequeños puntos que representan las diferentes galaxias.

Todas las galaxias se alejan unas de otras al inflar el globo sin que pueda hablarse de un centro de expansión o de explosión. Dicho de otra forma, la expansión es isótropa y homogénea para cualquier observador en cualquier punto del universo.

Si el universo está en expansión, una conclusión aparentemente inevitable es que si nos remontamos hacia el pasado su tamaño disminuye, de forma que en sus primeros instantes de existencia toda la materia y la radiación que hoy pueblan el universo estaban concentrados en una extensión minúscula de espacio-tiempo, así hasta quizás una singularidad inicial seguida de una gran explosión (*Big Bang* según el término introducido por Fred Hoyle y que ha alcanzado uso prácticamente universal).

La teoría del *Big Bang* no es una mera especulación. Es una visión científica detallada de los primeros instantes del universo y que hace predicciones precisas verificadas por la observación. Podemos destacar dos de ellas. La primera tiene que ver con la nucleosíntesis, o síntesis de los núcleos más ligeros. Según el universo se hace más pequeño su temperatura y presión aumentan sin límite. Entre el primer segundo y los tres primeros minutos de existencia, las temperaturas son suficientemente altas como para que se produzcan reacciones nucleares. Esto nos permite utilizar la física nuclear conocida para describir el estado del universo. Utilizando las leyes de la física nuclear junto con las leyes de la termodinámica (rama de la física que se ocupa de la transferencia de calor y energía y de los estados de equilibrio térmicos de la materia) es posible predecir el tipo y la cantidad de elementos que se produjeron en los primeros instantes del universo. Los únicos elementos que se sintetizaron fueron el hidrógeno (con sus isótopos deuterio y tritio, que difieren en el número de neutrones¹), el helio, con carga eléctrica igual a dos veces la carga de un protón y dos isótopos, He 3 con un neutrón y el He 4 con dos, y el litio con tres protones y cuatro neutrones. Sólo estos elementos fueron sintetizados durante los tres primeros minutos. Al estar en expansión, la temperatura del universo disminuía con enorme rapidez, y su enfriamiento impedía la formación de elementos más pesados como el carbono, el nitrógeno, el oxígeno, el azufre o el fósforo, todos ellos fundamentales para la formación de materia viva, al menos tal y como nosotros la conocemos. Los astrónomos, a base de medidas cuidadosas, han sido capaces de verificar que la abundancia de los elementos citados concuerdan con las predicciones del *Big Bang*. Esto tiene también como consecuencia el hecho de que los elementos más pesados se cocinan en el interior de las estrellas. Muchas de ellas, al terminar su vida, explotan de forma colosal originando lo que se llaman supernovas; de esta forma se difunden a lo largo de las galaxias los elementos más pesados. Todos los átomos pesados de nuestro cuerpo son polvo de estrellas muertas.

La segunda predicción de importancia capital está relacionada con el fondo de radiación cósmica. Al igual que los gases que se utilizan para producir frío en los refrigeradores, el universo se enfría al expandirse. Su densidad, temperatura y presión disminuyen al aumentar su volumen. Como hemos mencionado anteriormente, cuando el universo tenía menos de una décima de segundo su temperatura era tal que impedía la formación de núcleos. Al poco tiempo pudieron formarse los núcleos, pero la radiación era tan intensa que no permitía la formación de átomos. El universo se parecía a un plasma dominado fundamentalmente por la radiación electromagnética constituida por rayos X y gama de alta energía que disociaban los átomos cuando se formaban. Esta situación duró

hasta que el universo tenía alrededor de trescientos mil años. A partir de este momento la temperatura fue lo suficientemente baja como para que se pudieran formar átomos. Como los átomos son eléctricamente neutros, su interacción con la radiación es muy débil, de forma que el universo dejó de ser opaco para convertirse en transparente. Al desacoplarse de la materia la luz pudo viajar sin obstrucción a través del espacio sideral. De la misma forma que el universo se enfría al aumentar su volumen, la radiación fósil también pierde energía. Hoy su temperatura es cercana a los tres grados Kelvin (unos doscientos setenta grados centígrados bajo cero). Esta consecuencia del infierno primordial fue verificada durante los años sesenta por primera vez por Penzias y Wilson, lo que les valió el Premio Nobel de Física poco después.

A grandes rasgos, ya tenemos el estado de conocimiento de la cosmología cuando Alan Guth, entonces estudiante posdoctoral en el departamento de Física de la Universidad de Cornell (NY) empezó a interesarse en los problemas aparentemente residuales de la teoría del *Big Bang*. En aquella época, su trabajo científico se centraba en temas más ortodoxos de teoría cuántica de campos muy ajenos al universo primordial. Un seminario de Robert Dicke (reputado astrofísico y cosmólogo de Princeton), junto con la insistencia de uno de sus colegas (H. Tye) para trabajar en las consecuencias cosmológicas de las teorías de gran unificación², sirvieron de catalizadores para que poco a poco Alan Guth comenzara a interesarse por el origen del cosmos.

Cerca de la primera mitad del libro está dedicada a poner al lector al día en la teoría del *Big Bang* en detalle sin utilizar una sola fórmula (un auténtico triunfo) y al mismo tiempo a exponer todas las influencias intelectuales que sufrió en aquella época junto con las preocupaciones de cualquier científico joven para conseguir un trabajo estable. Si es excepcional el nivel y la claridad de la exposición científica, también es encomiable la honestidad personal y el rigor histórico con los que el autor describe la génesis de la teoría del universo inflacionario. A pesar de los triunfos del *Big Bang* descritos sucintamente, quedaban aspectos de su formulación que al menos para algunos se traducían en un incompletitud manifiesta (entre ellos R. Dicke). Hoy día estos problemas se conocen como los problemas del horizonte y de la planaridad del universo. Hasta la teoría de la inflación estos problemas se asimilaban a las «condiciones iniciales» del universo, es decir, formaban parte de la descripción del estado del universo en el momento en el que podemos aplicarle las leyes físicas conocidas. En otros ámbitos esta actitud puede ser plenamente justificable (como en meteorología, en la teoría de la evolución o en muchos fenómenos asociados a la teoría del caos), pero en la evolución y origen de nuestro universo cabría esperar una explicación detallada de las condiciones iniciales.

El problema de la planaridad está esencialmente relacionado con la pregunta de por qué el universo es tan grande, y el del horizonte con la pregunta de por qué el fondo de radiación cósmica es tan homogéneo. Si observamos rayos de luz del fondo cósmico que nos llegan de puntos diametralmente opuestos del universo es sorprendente que tengan esencialmente las mismas propiedades. Para que esto sea posible al remontarnos hacia atrás en el tiempo los rayos de luz han tenido que interactuar, es decir, intercambiar información. Si el cálculo se hace dentro de la teoría del *Big Bang* nos encontramos con que es imposible que estos rayos de luz hayan podido interactuar, la distancia

a la que se encontraban cuando se formaron los átomos y la radiación se desacopló de la materia es mucho mayor que la distancia que la luz (velocidad máxima de propagación de la información según la teoría de la relatividad) pudo haber recorrido desde el principio del tiempo.

La resolución de estos problemas requirió un cambio drástico en la formulación de las propiedades del universo primitivo, el nuevo paradigma es el universo inflacionario, que junto con todas sus variantes implica el hecho fantástico de que todo el universo visible es consecuencia virtualmente de una fluctuación cuántica. Utilizando las teorías de gran unificación, Guth fue capaz de demostrar que es posible encontrar al universo, muy poco después del tiempo inicial (la billonésima parte de la billonésima parte de un segundo después) en un estado metaestable, de forma que durante un período de tiempo corto sufrió una expansión vertiginosa. El universo fue doblando su tamaño de forma constante entre sesenta y cien veces. Esta expansión, técnicamente conocida como exponencial, se terminó con la desintegración del estado metaestable en lo que hoy conocemos como materia y radiación. Los conceptos necesarios para comprender la formulación de este nuevo paradigma se explican en el libro con claridad meridiana, aunque en algunos casos es probable que el lector deba volver atrás para releer algunos de los temas más abstractos, como son la rotura de simetrías, las transiciones de fase o los monopolos magnéticos. Aparte de resolver los problemas antes mencionados, la teoría del universo inflacionario también hace predicciones. En particular predice la estructura de las pequeñas fluctuaciones de densidad en la materia que quedaron cuando se desacopló la radiación. Estas pequeñas fluctuaciones fueron las semillas que en la evolución ulterior se convirtieron en las estructuras que vemos hoy, miles de millones de años después; en particular las galaxias. Tal predicción ha sido parcialmente verificada por el satélite COBE (Cosmic Background Explorer), que fue lanzado al espacio a finales de los ochenta y cuyos primeros resultados se dieron a conocer en el año 1992.

Para muchos lectores el párrafo anterior es probablemente algo oscuro. Podemos, sin embargo, exponer las ideas fundamentales de forma más asequible. Durante milenios, tanto filósofos como científicos han defendido la noción de que nada puede crearse de la nada. Lucrecio, en su libro *De Rerum Natura*, formula con claridad este principio que fue tácitamente incorporado y aceptado posteriormente a lo largo de la historia. En términos técnicos, esta noción se reformula en lo que hoy se conoce como leyes de conservación. Por ejemplo, la ley de conservación de la energía, que fue enunciada con claridad por primera vez durante el siglo XIX, y constituye la primera ley de la termodinámica dice que: «La energía ni se crea ni se destruye, sólo se transforma». En realidad, las primeras formulaciones hacían referencia a la materia (en particular en los famosos experimentos de Lavoisier antes de la Revolución francesa). Desde el punto de vista del siglo XX, si incorporamos la teoría de la relatividad, aprendemos que la masa y la energía son equivalentes, como en parte indica la fórmula más famosa de la historia $E = mc^2$, que nos dice que el equivalente de la masa en energía se obtiene multiplicando la masa por el cuadrado de la velocidad de la luz. El hecho de que la masa en reposo puede transformarse en energía permite explicar la cantidad fabulosa de energía que se libera en el corazón de las estrellas y todos los procesos de tipo nuclear, tanto de fisión como de fusión. Al incorporar la materia al balance de la energía, nos encontramos con que el universo visible contiene una cantidad de energía difícil de imaginar. Otra ley de conservación fundamental en física

es la conservación de la carga eléctrica: en cualquier proceso la carga eléctrica inicial es siempre igual a la carga eléctrica del estado final; sin embargo, todas las observaciones indican que el universo es eléctricamente neutro. Una de las claves básicas del universo inflacionario es la de afirmar que la energía total del universo es exactamente ¡CERO! Después de lo que acabamos de exponer sobre la cantidad de energía del universo, la única conclusión aparente que se puede sacar es que la nueva cosmología es absurda, producto de la visión trasnochada de algún enajenado. Nada más lejos de la realidad. Al hablar de energía nos referíamos a la energía almacenada en la radiación o en la materia que forman parte del universo visible. Para poder tener en cuenta toda la energía del universo, es decir, para poder obtener su «peso», debemos incluir también la energía gravitacional. La ley de la gravitación universal de Newton dice que todo cuerpo produce una atracción gravitatoria que es proporcional a su masa e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia del cuerpo sobre el que actúa. La relatividad general introduce modificaciones sutiles a la ley de Newton, pero mantiene una de sus propiedades más importantes: la energía contenida en el campo gravitatorio que se extiende a lo largo del universo es siempre negativa, y de hecho no hay límite a cuán negativa puede ser la energía de origen gravitacional. Cerca del instante inicial, la intensidad del campo gravitatorio producido por toda la materia y radiación del universo visible concentrado en un tamaño menor que el de un núcleo atómico es fabulosamente alta, y por tanto también lo es la energía contenida en su campo de fuerzas, de forma que es perfectamente imaginable que al hacer la suma total una cantidad positiva extraordinariamente grande (la energía de la materia y la radiación) se cancele con una cantidad enormemente grande pero negativa (la energía contenida en la fuerza de la gravedad) de forma que el resultado total sea nulo. Los procesos físicos, cualesquiera que sean, incluso si implican al universo en su conjunto, respetan las leyes de conservación. Desde este punto de vista, la creación cuántica del universo a partir de la nada deja de ser algo contradictorio y propio de la ciencia ficción, para convertirse en un esquema científico del que se puedan sacar conclusiones precisas verificables mediante la observación. Este aspecto fascinante de la cosmología inflacionaria todavía no ha calado entre los filósofos e intelectuales de finales de siglo, pero es uno de los conceptos más originales y una de las ideas más atrevidas de la física del siglo XX .

La última parte del libro está dedicada a toda una serie de especulaciones fascinantes sobre la estructura del universo, no sólo la del universo visible, el origen del tiempo, la estructura cuántica del espacio y un largo e interesante etcétera. Si nos dejamos llevar por el optimismo del autor en el epílogo, se podría concluir que las leyes de la física permiten explicar por qué el universo existe y es como se observa. Si algún día llegáramos a tener un conocimiento tan detallado nos quedaría aún otro gran misterio por resolver: por qué las leyes de la física son lo que son.

El libro de Alan Guth se convertirá probablemente en un clásico, no sólo por lo novedoso de las ideas propuestas por el autor sino también porque proporciona una atractiva, comprensible y excelente exposición de los logros de la cosmología del siglo XX.

1. El neutrón es una partícula de masa ligeramente superior al protón o núcleo del átomo de hidrógeno y cuya carga eléctrica es nula. Cuando no está confinado dentro de un núcleo es inestable y se desintegra con una vida media de alrededor de un cuarto de hora.

2. Las teorías de gran unificación son aquellas que pretenden fundir en una sola las tres interacciones conocidas: electromagnética, débil y nuclear. Dado que en bajas energías estas interacciones son tan dispares, las teorías de gran unificación predicen que para ver esta unificación hay que observar la materia a energías fantásticamente altas, del orden de diez mil billones de veces la energía en reposo de un protón. Estas energías están muy por encima de lo que nuestros aceleradores presentes y futuros pueden alcanzar pero sin embargo pueden hacer predicciones sobre el estado del universo muy al comienzo, cuando su temperatura y densidad eran inimaginablemente más altas que las de la materia nuclear.