

# Cosmología: el mito de la Creación

Marc Davis

Traducción de Jaime Moreno Villarreal

Quisiera tratar esta noche la historia de las ideas acerca del origen del universo a partir de la época de Copérnico, y resumir rápidamente los acontecimientos más importantes que han conducido a nuestras teorías cosmológicas actuales. Como muchos de ustedes saben, a lo largo de la década pasada surgieron numerosas ideas nuevas en el campo de la cosmología, entre ellas algunas francamente extraordinarias que fueron introducidas por los puntos de vista de la física de partículas, es decir por el estudio de la naturaleza en sus escalas mínimas. En cosmología, estas ideas han revolucionado totalmente nuestro modo de entender la física del universo a escalas mayores. Aunque el tema es muy especializado, intentaré ser lo menos técnico posible y reducir al mínimo la jerga de misterio.

En tiempos de Copérnico, e incluso un siglo más tarde, en la época de Galileo, la mayor validez de la teoría cosmológica copernicana no era del todo obvia; la teoría ptolemaica resultaba funcional. Con ella se podía calcular y predecir las posiciones de los planetas en fechas dadas, con bastante exactitud. La versión original de la teoría copernicana, que desplazó al hombre del centro del universo y colocó en su lugar al sol, era de hecho menos exacta en capacidad de predicción que la teoría ptolemaica, a la que estaba destinada a reemplazar. Llevó algún tiempo acumular las pruebas suficientes en favor del punto de vista de Copérnico. Específicamente, la balanza de la evidencia se inclinó enérgicamente de su lado sólo hasta que Kepler, contemporáneo de Galileo, demostró que los planetas se movían no en órbitas circulares —como lo había planteado Copérnico— sino elípticas. Pero sólo hasta fines del siglo XVII inventó Newton la mecánica, que pronosticaba a partir de principios fundamentales que los planetas se desplazarían en órbitas elípticas. Dando por sentada una sencilla ley universal del cuadrado inverso, o de la gravitación, combinada con los principios de la inercia formulados y experimentados por Galileo, Newton fue capaz de explicar matemáticamente tanto por qué los planetas seguían órbitas elípticas, como todos los demás hechos relevantes extraídos de la observación de planetas y lunas en órbita. Para decirlo con términos propios de un físico, Newton proporcionó una explicación dinámica para un conjunto de datos de la experiencia. Esto puso fin al debate entre las teorías copernicana y ptolemaica. Antes de Newton, se sabía que la teoría copernicana modificada funcionaba: podía predecir con exactitud las posiciones de las órbitas; pero

lo que no se sabía era por qué funcionaba. Era como si Dios hubiera dicho "Háganse las órbitas elípticas". Después de Newton, el problema pudo invertirse. Los movimientos planetarios observados obedecían a la ley del cuadrado inverso de la distancia, y el papel de Dios se limitaba a especificar que la gravedad obedecería dicha ley. En cierto sentido, Dios se había retirado del sistema solar.

La cosmología se desarrolló con lentitud. En el siglo XVIII Kant y Laplace trataron el concepto de "universos isla" al identificar correctamente las manchas borrosas que veían en sus telescopios como galaxias autónomas, semejantes a la nuestra. Aunque parezca difícil de creer, esta idea no fue ampliamente aceptada por los astrónomos hasta ya bien entrado el siglo XX. Hoy nos parece inconcebible que los astrónomos de antaño no hubieran aceptado unánimemente las ideas de Kant. Pero tenían su razón: esos objetos borrosos no estaban distribuidos uniformemente en el cielo, parecían esquivar la franja de la Vía Láctea y se veían sólo en altas latitudes. Los cosmólogos de entonces habían discutido la noción de universo infinito, tratada por primera vez por Newton, y argumentaban que si las manchas borrosas fueran galaxias separadas en un universo infinito, deberían estar distribuidas uniformemente en el cielo, y no tendrían por qué esquivar la franja de la Vía Láctea; no tendría por qué existir una orientación privilegiada. En vez de eso —discutían—, las manchas borrosas serían quizá sistemas solares en formación dentro de nuestra propia galaxia. Lo que esos astrónomos no tomaban en consideración era que el espacio interestelar está lleno de polvo y que ese polvo absorbe la luz que viene hacia nosotros desde las latitudes galácticas bajas. Podemos ver esos objetos sólo en latitudes galácticas altas; y conforme más próximos se encuentran de la Vía Láctea se tornan menos visibles. Hacia principios de la década de los veinte de este siglo, tras el interminable debate entre Shapley y Curtis, la mayoría de los astrónomos se había convencido ya de que las nebulosas eran galaxias aisladas que se hallaban fuera de la nuestra.

1915 fue un año decisivo en el comienzo de la era moderna de la cosmología. Ese año se publicó la teoría general de la relatividad, de Einstein. Se trata de una verdadera teoría de la gravedad, que puede describir matemáticamente la forma y la evolución del universo. Es una teoría brillante de la que hacen uso actualmente todos los estudios clásicos de cosmología. Poco después de publicar su teoría, Einstein comenzó a trabajar en sus aplicaciones cosmológicas. Entre las primeras cosas que descubrió fue que, en su forma original, la teoría no admitía soluciones estáticas (es decir que no estuvieran en estado de evolución). Einstein tuvo que modificar sus ecuaciones añadiendo algo que llamó la constante cosmológica, inventada estrictamente para hacer posible una solución estática del problema cosmológico. Nadie en ese

\* Marc Davis es profesor de Astronomía y Física en la Universidad de California, en Berkeley. Leyó esta conferencia el 15 de noviembre de 1991, en el California Institute of Technology de Pasadena, en la edición número 1734 de la Stated Meeting de The American Academy of Arts and Sciences.

momento, incluido Einstein, imaginó lo que poco después comprenderíamos: que el universo no es estático sino que está en expansión. Al poco tiempo, un matemático llamado De Sitter descubrió una extraña solución de las ecuaciones de Einstein que delineaba un universo en expansión sin materia. Casi al mismo tiempo, un astrónomo desconocido, de nombre Slipher, que trabajaba en el Observatorio Lowell, midió por vez primera los espectros de varias galaxias próximas. Esto es algo extremadamente difícil de hacer: tomar la luz de un objeto tenue y descomponerla en todos sus colores para buscar las líneas espectrales de elementos ordinarios como el sodio, el hidrógeno o el oxígeno, y examinar cómo varían de posición en relación con las mediciones de laboratorio. Slipher encontró que, de 41 espectros, 36 mostraban un corrimiento hacia el extremo rojo del espectro. Estos corrimientos al rojo fueron estudiados sistemáticamente por Hubble, quien cartografió la expansión del universo a partir de 1924. Por medio de complicados cálculos de las distancias de esas galaxias, Hubble demostró que el corrimiento al rojo —que en corrimientos pequeños puede interpretarse como proporcional a la velocidad a la que se está separando de nosotros la galaxia— es proporcional a la distancia del objeto. Hubble demostró concluyentemente que el universo estaba en expansión, lo que significó una enorme sorpresa para todos, y exigió asimismo una completa reevaluación de todas nuestras nociones cosmológicas.

Si el universo se está expandiendo, debe de haber un tiempo finito en el pasado en el que fuera extremadamente denso y pequeño —quizá semejante a un punto. Designemos a este momento como  $t = 0$ , el instante de la gran explosión, el Big Bang. Hubble se las vio negras para calcular las distancias de los objetos; los cálculos actuales de la velocidad de expansión son aproximadamente diez veces menores que los estimados por Hubble. El inverso de la velocidad de expansión es aproximadamente la edad del universo. Con el valor de la velocidad de expansión de Hubble (que recibió el nombre de constante de Hubble), él y otros cosmólogos de su época calcularon una edad del universo menor a la edad conocida de la Tierra. La edad de Hubble se estimaba en dos mil millones de años, una cifra muy insatisfactoria basada en datos erróneos. Sin embargo, eran los mejores datos asequibles en ese momento, y Hubble no podía saber que sus técnicas de cálculo de distancias eran defectuosas.

Durante la década de 1930, el acertijo continuó. Lemaitre, entre otros, inventó nuevos modelos cosmológicos que incluían la constante cosmológica de Einstein, en un esfuerzo por construir modelos de universo más antiguos que la Tierra. Pero el estado de la cuestión iba languideciendo por la carencia de datos. Al final de la Segunda Guerra sabíamos que el universo estaba en expansión; sabíamos que las más sencillas soluciones a las ecuaciones de Einstein implicaban un tiempo finito en el pasado cuando todo habría crujido con el Big Bang. La revolución copernicana, que había destronado al hombre del centro del universo se hacía actual. Ni la Tierra, ni el Sol, ni la Vía Láctea eran el centro del universo. Todo observador, todas las galaxias verían a las demás galaxias apartarse de modo uniforme, tal como nosotros las vemos.

Esto significaba, desde luego, un avance tremendo a una escala temporal de cincuenta años, pero si se le compara con las pautas actuales, el avance sería más bien lento. Sin

la presión experimental y con una muy engañosa estimación de la edad del universo derivada de los datos de Hubble, las condiciones al final de los cuarenta estaban suficientemente maduras para el nacimiento de una herejía que habría de persistir a lo largo de los cincuenta y parte de los sesenta. Era una modificación del principio cosmológico, versión moderna del principio copernicano —la idea de que la Tierra y nuestra galaxia no ocupan un lugar especial. Los inventores de esta herejía, Hoyle, Gold y Bondi sostenían el principio cosmológico perfecto: el universo era el mismo no sólo en todo lugar sino en todos los tiempos. O dicho de otro modo, no hubo ningún Big Bang y el universo se halla en estado estacionario. El hecho demostrable de que el universo se halla en expansión implicaba que para mantenerse en estado estacionario, la materia debería estar produciendo continuamente y así evitar que la densidad promedio del universo disminuyera con el tiempo. El principio cosmológico perfecto presupone que las propiedades promedio no cambian con el tiempo y que la mágica, continua creación de materia debe balancear precisamente la dilución provocada por la expansión. ¿De qué modo se creaba esa materia? ¿Nacía como átomos de hidrógeno individuales distribuidos uniformemente en el espacio, o bajo la forma de galaxias totalmente conjuntas como la nuestra? La respuesta a esta interrogante se puso a consideración de los cosmólogos del porvenir.

En ausencia de datos, el debate continuó a lo largo de los cincuenta. Mientras tanto, a fines de los cuarenta había sido terminado el telescopio de 200 pies. El gancho original de este telescopio gigante era que iba a resolver los misterios cosmológicos del universo. Su meta original había sido medir específicamente dos números. Con su enorme área de acopio, el telescopio de 200 pies podía medir la constante de Hubble ( $H_0$ ) con mayor precisión, lo que con el tiempo se logró; pero medirla además otro número, conocido como  $q_0$ , que es la velocidad a la que el universo se está desacelerando. El concepto de desaceleración es bastante fácil de entender. El universo se expande rápidamente, pero al mismo tiempo se está alejando por su propia gravitación. Sabemos que si arrojamus una pelota al aire, su velocidad disminuye por la gravedad de la Tierra. Si la arrojamus con suficiente fuerza, escapará a esa gravedad; si la arrojamus menos fuertemente, en algún momento volverá y caerá al suelo. No importa de qué modo lo hagamos, la pelota se desacelerará siempre. El universo está desacelerándose; por lo menos así es como nos lo hemos representado hasta la década pasada. Se desacelera por la propia gravitación del universo entero. La desaceleración es una cifra mensurable, y tal fue el motivo para construir ese gran telescopio. Para calcular  $q_0$  es necesario medir la luminosidad aparente de galaxias muy distantes (con alto corrimiento al rojo) y compararla con la de galaxias más cercanas (con bajo corrimiento). El problema de esta técnica —problema que hoy se nos hace evidente pero que no lo era así a fines de los cuarenta y en los cincuenta— es que cuando observamos una galaxia distante, la luz que vemos ha tardado un tiempo larguísimo en llegar a nosotros. Desde luego, siempre se comprendió que los telescopios eran máquinas del tiempo, pero no se valoraba qué tan difícil iba a ser deducir consecuencias cosmológicas a partir de consideraciones sobre la evolución de las galaxias. Si examinamos una galaxia cuyo tiempo de recorrido en años-luz equivale a la mitad

de la edad del universo, estamos suponiendo, al equiparar tal objeto con una galaxia actual, que no ha cambiado desde entonces. Pero en un universo del modelo Big Bang, con un origen finito, ese objeto es dos veces más viejo de lo que era entonces, y sus propiedades en el pasado pudieron haber sido desde luego muy diferentes. Hoy en día todavía no sabemos cómo calcular esa corrección evolutiva —que así se llama— para esta prueba cosmológica. No sabemos siquiera si la corrección aumenta o disminuye la luminosidad aparente de las galaxias distantes. Hay varios resultados opuestos, que apuntan en direcciones diversas. Algunos discuten que la evolución va en cierto sentido, otros que va en otro. Es extremadamente difícil calcular las correcciones evolutivas con la menor certeza, lo que provoca que se haya pasado por alto el uso de esta prueba cosmológica directa durante los últimos veinte años —a pesar de esfuerzos denodados, especialmente de parte de Sandage y sus colaboradores. Los resultados de todas las mediciones directas del  $q_0$  han sido siempre ambiguos.

La era moderna de la cosmología comenzó verdaderamente en 1965 con el descubrimiento de la radiación de fondo de microondas, que pronto marcó el fin de la teoría del estado estacionario del universo como modelo cosmológico. El fondo de microondas es un baño de radiación térmica que llega a nosotros de todas direcciones desde el cielo. Su espectro, que actualmente ha sido medido con mucha precisión, es el de un "cuerpo negro" radiador, a una temperatura de  $2.7^\circ$  Kelvin (absoluta). La temperatura se ha calculado actualmente en un número de cuatro cifras, y corresponde en lo esencial a la curva de un cuerpo negro. Esto es el remanente del así llamado Big Bang Caliente; se cree que iguala el espectro de un cuerpo negro con una muy alta precisión, aunque no perfecta. Se supone que presentará distorsiones del orden de una en  $10^4$  o  $10^5$ . Estas distorsiones podrían ser observables con el satélite COBE (Cosmic Background Explorer) que se halla actualmente en órbita. Casi con precisión absoluta puede decirse que la radiación de microondas que atraviesa todo el espacio debe adoptar la forma de un cuerpo negro. Un cuerpo negro no es otra cosa que el espectro de radiación emitido por una cavidad a una temperatura dada; es independiente del tipo de material que forme las paredes de esa cavidad. La temperatura actual del universo, de  $2.7^\circ$  Kelvin sobre el cero absoluto, mide en escala inversa el tamaño del universo. Cada época del universo puede clasificarse según la temperatura de la radiación.

A partir del descubrimiento del fondo de microondas, el modelo cosmológico más aceptado ha sido el del Big Bang Caliente. Se le denomina caliente dado que se puede contar el número de fotones que hay en el universo —aproximadamente 400 fotones por centímetro cúbico en todo el espacio. Si se toma la proporción entre la densidad de fotones y la densidad de átomos (sobre todo de hidrógeno), se llega a una cifra de aproximadamente mil millones, o  $10^9$ . Este número fundamental casi no ha variado en el tiempo, y requiere de una explicación. Dado que hay tantos fotones en proporción al número de átomos, el universo se considera caliente, aunque  $2.7^\circ$  Kelvin es una temperatura bastante fría. Fue caliente en el pasado.

El Big Bang Caliente y la posibilidad de existencia de una radiación térmica residual habían sido examinados original-

mente por Gamow y sus colaboradores a principios de los cincuenta, pero sus ideas cayeron en el olvido y fueron reinventadas en la época en que se detectó esa radiación, a mediados de los sesenta. Hay muchas consecuencias significativas de la historia térmica del Big Bang Caliente. Actualmente, a los  $t = 10^{10}$  años aproximadamente, la temperatura es muy baja, pero con un tiempo de  $t = 1$  segundo la temperatura fue superior a los  $10^{10}$  grados. Ahora bien,  $t = 1$  segundo parece una enorme extrapolación en el tiempo, pero la física capaz de describir esa fase de la historia térmica del universo es bien conocida y no resulta para nada exótica. Las energías implicadas caben sin problema en el rango de las pruebas experimentales —como la densidad, por ejemplo. Se puede extrapolar inversamente con razonable confianza hasta ese momento. Uno de los más sorprendentes resultados del Big Bang Caliente es la deducción de que, entre el primero y el tercer minutos, se creó todo el deuterio y la mayor parte del helio del universo. El deuterio es un isótopo del hidrógeno que probablemente será usado algún día en reactores de fusión para producir energía para la humanidad. Es inquietante pensar que casi todo fue creado durante los primeros tres minutos del universo. La formación de elementos se detuvo en el nivel del helio, con apenas unos cuantos indicios de formación de elementos más pesados. Todo esto se ha explicado actualmente con todo detalle; en buena parte, poco después del descubrimiento de la radiación de microondas. El propio Gamow había calculado en los años cincuenta algunos pormenores de la formación de elementos; de entonces a ahora nuestro conocimiento de la física nuclear ha avanzado mucho.

Después de que se comprendieron las consecuencias de la radiación de fondo de microondas a fines de los sesenta, los cosmólogos se dieron cuenta de que habían realizado un enorme progreso y tuvieron confianza suficiente para considerar la historia del universo retrocediendo hasta  $t = 1$  segundo; más allá de este tiempo ya no se podía confiar en nuestras ideas sobre la física. Considerábamos conocer todo lo que había ocurrido después de entonces, pero no antes. No obstante, había algunos enigmas fundamentales que permanecían sin explicación, y que Peebles y Dick pusieron particularmente en relieve hacia 1969. Examinaron cuatro problemas no explicados, enigmas que durante diez años persistieron sin solución en el horizonte. En cierto sentido se trataba de enigmas metafísicos porque no teníamos conocimiento de cómo abordarlos desde la física. Parecían corresponder al campo de lo que se llama cuestiones de valor o de principio:

1) ¿Por qué la proporción entre el número de fotones y el de átomos es de  $10^9$ , y no de otra magnitud, como  $10^{29}$ , digamos? ¿Qué procedimientos físicos seleccionaron esta cantidad?

2) ¿Por qué ha de ser homogéneo el universo? Por ejemplo, cuando apuntamos al cielo en direcciones divergentes, la radiación de microondas que medimos tiene esencialmente la misma temperatura. Sin embargo, según nuestro método de cálculo ordinario, las dos regiones en dirección opuesta se hallan tan aparte en el espacio y el tiempo que la luz de una nunca ha tenido tiempo suficiente para llegar a la otra. Es decir, que no conocen entre sí su existencia (hablando técnicamente, ambas están fuera del horizonte de partículas de la otra), y sin embargo emiten de algún modo radiación a la misma temperatura. ¿Por qué? ¿Por qué no tienen temperaturas totalmente distintas? ¿Por qué no es totalmente caótico

el universo en una escala mayor? Como no puede concebirse explicación de este enigma dentro de nuestro marco cosmológico ordinario, tendríamos que tratar a éste como un problema de principios: éstas son las condiciones que puso Dios cuando creó el universo.

3) ¿Por qué es el universo aproximadamente plano en el sentido de su curvatura espacial? Sabemos por las ecuaciones de Einstein que el universo se expandirá indefinidamente o que en algún momento ha de contraerse hasta el colapso. Si la densidad del universo excede un cierto valor crítico, entonces no podrá escapar a su propia gravitación, e irá virtualmente hacia el colapso. La observación directa sugiere que su densidad es menor a ese valor crítico, pero que se halla cerca, dentro de un factor de 10, y nuestros cálculos podrían estar pasando por alto algún componente de la distribución de la materia. ¿Por qué se mantiene la densidad tan cerca del valor crítico? Esta es una solución precaria de las ecuaciones de expansión. Si el universo comienza con una densidad apenas menor al valor crítico, rápidamente la densidad disminuye por debajo de lo crítico. De modo inverso, si la densidad fuera inicialmente mayor que el valor crítico, rápidamente se elevaría mucho más. De nuevo estamos ante un problema metafísico de principios. Dios debió especificar que la densidad inicial del universo fuera extremadamente próxima al valor crítico.

4) ¿Qué fue lo que propició las fluctuaciones de densidad que darían forma a las galaxias que nos rodean? Este, de nuevo, es un problema acausal; las fluctuaciones iniciales fueron de algún modo impuestas en escalas mayores a las de nuestro horizonte, lo que implica otro problema de principio. ¿Cómo sobrevivieron esto y por qué?

Todas estas interrogantes rebasaban los límites de nuestro alcance. Cuando yo era estudiante universitario en Princeton discutíamos estos tópicos metafísicos, pero no teníamos la clave para abordarlos desde la física. En cambio, dedicábamos nuestra atención a otras cuestiones más susceptibles de desarrollarse. Durante la década de los setenta, se consagró muchísima atención a las aglomeraciones de galaxias. Las galaxias constituyen sustanciales fluctuaciones de densidad en el universo, y de ninguna manera se hallan distribuidas al azar. Donde se localiza una galaxia, generalmente se observan otras más en pequeños grupos o en enormes aglomeraciones.

Amplias investigaciones recientes sobre galaxias nos han rendido un conocimiento estadístico muy desarrollado de sus propiedades de aglomeración. Catálogos de millones de galaxias han visto la luz en la última década, sin el corrimiento al rojo. En los ochenta atestigüamos además grandes progresos en la investigación sistemática de galaxias con el corrimiento al rojo. Lo que le llevó a Slipher una semana de tiempo de telescopio, hoy sólo ocupa unos minutos en un telescopio de tamaño semejante, gracias a los avances tecnológicos. Estas investigaciones del corrimiento nos muestran que las galaxias están distribuidas en largas redes filamentosas a lo largo del cielo. Se pueden hallar largas cordilleras de galaxias, como la denominada Gran Muralla. ¿Qué es lo que estas aglomeraciones nos dicen sobre la naturaleza del universo? ¿Por qué son tan pronunciadas las aglomeraciones? Durante los setenta pudimos definir la aglomeración de galaxias, pero no interpretar su significado.

Los setenta atestigüaron también un incremento en el

intercambio entre cosmólogos y físicos de partículas. El éxito de la unificación de la energía nuclear débil y la electromagnética estimuló el desarrollo de teorías de la "gran unificación" de todas las leyes físicas, pero dichas teorías tendrían su única posibilidad de prueba experimental en las energías alcanzadas durante las etapas más tempranas del universo. Al mismo tiempo, los cosmólogos recurrieron a los físicos de partículas en busca de posibles explicaciones de los misterios fundamentales reseñados más arriba. Por ejemplo, el trabajo desarrollado en nucleosíntesis sugirió que la abundancia de deuterio y helio observada coincidiría mejor con las previsiones del modelo si hubiera en el universo sólo tres familias de neutrinos. Los astrofísicos predijeron que existían sólo tres familias de partículas elementales con neutrinos ligeros, y experimentos recientes con aceleradores de partículas han corroborado esta predicción. Debe tenerse en cuenta que muchos de los cálculos en astrofísica tienen una precisión que, cuando mucho, entra en un factor de diez, de modo que la física de partículas tenía buenas razones para mostrarse inicialmente escéptica.

El avance decisivo en el conocimiento cosmológico ocurrió en diciembre de 1979, cuando Alan Guth, que era por ese tiempo un inquieto postdoctorando, inventó lo que se conoce como el modelo inflacionario del universo en expansión. Su intención original no tenía nada que ver con la cosmología; Guth es un teórico de partículas que se hallaba trabajando en un problema relativo a las teorías de la gran unificación. Éstas reúnen tres o cuatro fuerzas físicas naturales, pero su unificación puede ocurrir sólo a grados altísimos de energía —es decir, muy temprano en la edad del universo. Una de las deducciones de esas teorías era la existencia de una partícula muy pesada con carga magnética, un monopolio magnético, cuya abundancia sería semejante a la del hidrógeno. Desde el punto de vista experimental, eso es imposible; a lo largo de numerosísimos experimentos, jamás se ha dado convincentemente con monopolos, y una abundancia de monopolos como la que se plantea desembocaría en un universo con sólo unos cuantos miles de años de vida. La cuestión era, pues, hallar un mecanismo que eliminara los monopolos de la teoría. Este enigma es tan fundamental como los cuatro enlistados más arriba.

Hemos dicho que la desaceleración del universo en expansión se debe a su propia gravitación después de un tiempo  $t = 1$  segundo. La gran unificación ocurriría mucho antes, aproximadamente a  $t = 10^{-35}$  segundos. Guth se preguntó qué ocurriría si, durante la transición entre el momento de la gran unificación y la separación actual de las fuerzas físicas, el universo se acelerara durante sólo un instante. Demostró que esto podría ocurrir si la densidad de masa del universo fuera momentáneamente dominada por un "falso vacío". ¿Cuál es la diferencia entre un vacío falso y uno verdadero? Los físicos definen el vacío como algo que no cambia cuando se le expande o comprime. Imaginemos una caja vacía, llena de vacío. Suponemos que este estado de vacío contiene una densidad de energía igual a cero, de modo que cuando nuestra imaginaria caja se expande o contrae, la densidad de energía no cambia. Cuando hablamos de un falso vacío, nos referimos a una densidad de energía que no es igual a cero. ¿Cómo puede una densidad de energía diferente de cero permanecer sin cambio y al mismo tiempo conservar el total de energía? La respuesta es que el falso vacío tiene una

presión negativa, equivalente a la tensión, mientras que un verdadero vacío no tiene presión. Con la presión negativa, es como si el espacio estuviera lleno de ligas de hule tirantes; para expandir el falso vacío es necesario ponerse a desmontar las partes de la caja. La energía de este esfuerzo se traduce en mayor vacío. La energía se conserva íntegra. Se supone que estados semejantes de falso vacío se producirían durante transiciones entre fases en el universo temprano. Este extraño estado de la materia equivale matemáticamente a la desacreditada constante cosmológica de Einstein, pero ahora con fundamento dinámico.

Las consecuencias de un falso vacío son muy profundas para la cosmología. En vez de desacelerar la expansión del universo, el falso vacío causará su rápida aceleración. El resultado es una "inflación" del universo (nótese que este término se inventó a fines de los setenta, cuando a nivel mundial la inflación monetaria era cuantiosa). En  $10^{-35}$  segundos el universo se expande por un factor de al menos  $10^{60}$ ; podría haberse expandido incluso a  $10^{100}$ . El primer factor es el mínimo necesario para eliminar los monopolos, pero si esta teoría funciona del todo, el segundo factor, verdaderamente enorme, es más propio de una inflación. ¿Por qué es esto tan trascendente?

La razón de la importancia de este nuevo concepto es que traslada los cuatro enigmas cosmológicos fundamentales del terreno de la metafísica al de la física. En particular, los enigmas 2, 3 y 4 son otras tantas consecuencias de la inflación. El universo se hace espacialmente plano porque se expande tanto que el espacio curvo se aplanará en gran medida. El problema del horizonte se resuelve porque dos regiones que se hallan en lados opuestos del cielo *habrían estado* en contacto durante la inflación, al contrario de lo que pensábamos al calcular la evolución de los horizontes sin considerar ese factor. Las regiones que se hallan en lados opuestos de nuestro universo aparente se crearon a partir de la misma fluctuación de vacío; todo nuestro universo observable estaba causalmente conectado antes de sobrellevar la inflación.

La cuestión fundamental es que el factor inflacionario ha suministrado explicaciones dinámicas para esos complejos acertijos cosmológicos. En mi opinión, esto tiene una significación semejante a la solución newtoniana del movimiento planetario, que dio una explicación dinámica de las órbitas elípticas. Poseemos ahora una explicación dinámica de por qué el universo es plano, por qué es homogéneo e isotrópico. Esto es algo realmente revolucionario. Ahora bien, es verdad que la inflación no equivale a la mecánica de Newton, pues no es una teoría sino una idea. No tenemos aún una teoría física que genere la inflación y al mismo tiempo tenga sentido desde la perspectiva de la física de partículas. Pero se trata de una idea muy atractiva que ha revolucionado completamente a la cosmología. La mayor parte de los cosmólogos tienen la esperanza puesta en que algún día, de algún modo, se halla una teoría consistente que incluya a la inflación.

Esto nos lleva a la década pasada. Conforme los instrumentos de computación fueron mejorando, los estudios del corrimiento al rojo avanzaron más y más, detallando con mayor precisión la estructura que tiene la distribución de galaxias a gran escala. Otro de los adelantos de la inflación es que resuelve igualmente el misterio cosmológico número cuatro; predice el espectro de las fluctuaciones que más adelante dan

origen a todas las galaxias y aglomeraciones de galaxias que observamos en torno nuestro. La índole de las fluctuaciones depende de la constitución de la ubicua materia oscura, a la que no me he referido pero cuyos indicios son muy considerables. Aparentemente, la mayor parte de la masa del universo se halla bajo la forma de materia oscura que probablemente constituye algún tipo de partícula elemental de características inciertas. Por cierto, en este momento los físicos están planeando importantes experimentos de laboratorio para detectar las partículas de materia oscura que ocasionalmente interactúan con sus instrumentos.

A lo largo de los últimos diez años he estudiado con G. Efstathiou, S. White y C. Frenk las implicaciones de la inflación en la evolución de estructuras a gran escala. Hemos usado simulaciones por computadora para resolver ecuaciones que describen el crecimiento fluctuante del universo, con condiciones iniciales apropiadas para diversos tipos de materia oscura. Estas simulaciones muestran que, dada la inestabilidad de la materia autogravitante, es de esperarse que se formen estructuras semejantes a las que nos hacen ver los datos. Podemos probar las consecuencias que tienen formas alternas de materia oscura comparando los detalles estadísticos tomados de las aglomeraciones de galaxias con los obtenidos por medio de simulaciones. Por ejemplo, se ha demostrado que un universo dominado por neutrinos ligeros (materia oscura caliente) es incompatible con las observaciones, siempre que se considere que sólo la inflación genera las fluctuaciones iniciales. Es mucho más factible un universo ocupado por partículas más pesadas (materia oscura fría). Los cotejos entre las simulaciones y las observaciones rinden pruebas semejantes de aglomeraciones jerárquicas, largas cadenas filamentosas y anchas distribuciones de pequeños grupos en aglomeraciones mayores. La naturaleza específica de semejantes partículas nos es totalmente desconocida, pero sus implicaciones cosmológicas han sido estudiadas con considerable detalle. Un universo dominado por materia oscura fría puede clarificar caudales de información que describen galaxias y estructuras de gran escala en el universo. El modelo que contempla esa materia oscura fría fracasa al explicar ciertos datos; aun así, se le considera el modelo de estructura estándar en el universo porque es sencillo, predictivo y concuerda con la mayor parte de la información. Quizá con el tiempo tengamos que desechar esta teoría por su incapacidad para explicar determinadas observaciones, o quizá se llegue a comprobar que dichas observaciones eran erróneas. Independientemente de lo que el futuro nos depare, la década pasada contribuyó con enormes avances en la interpretación del significado del altísimo grado de aglomeración en la distribución galáctica. En la actualidad el tema se mantiene pujante gracias a la nueva información que se genera a cada momento. El progreso real se mide a un ritmo de año con año.

Hay proyectos en marcha para ampliar los estudios del corrimiento al rojo por medio de telescopios especialmente diseñados; dichos estudios se multiplicarán por cien en la década que comienza. Además, el telescopio Keck de 10 metros de diámetro hará posible estudiar la evolución de las aglomeraciones desde el pasado distante; de nuevo, el telescopio se revela como una máquina del tiempo. Con un telescopio de semejantes dimensiones podremos estudiar en detalle las galaxias en momentos diferentes de su pasado, y

conoceremos más acerca de la evolución de sus estructuras internas y sus propiedades de aglomeración. Éste será un trabajo interesantísimo en la década de los noventa. Por otra parte, los experimentos para estudiar la isotropía de la radiación de fondo de microondas avanzan firmemente. Independientemente del patrón bipolar que nuestro movimiento configura, la radiación de fondo de microondas aparece como muy leve en todas las escalas hasta llegar a un nivel próximo a uno en  $10^5$ . Al arribar a otro nivel habremos de percibir ondulaciones en la brillantez de la radiación. Éstas se relacionan con las fluctuaciones de materia que han dado origen a las galaxias y aglomeraciones de galaxias que actualmente son visibles. Estas fluctuaciones deben haber dejado huellas en el fondo de radiación, que se calcula entren dentro de un factor de dos fuera de los límites de observación ordinarios. El momento actual es extraordinariamente interesante porque dentro de unos cuantos años los experimentos tendrán la suficiente precisión como para detectar las fluctuaciones predichas y posibilitar una nueva confrontación entre la teoría y el experimento.

Si se presupone la inflación en el universo temprano, se pueden calcular mecánicamente sus consecuencias para la época actual, si bien dentro de diversas incertidumbres físicas. Todas las interrogantes metafísicas previas hallan su respuesta en la inflación. No obstante, son reemplazadas por dos nuevos acertijos metafísicos. En primer lugar: ¿qué precedió a la inflación y al comienzo del tiempo (si es que esta pregunta tiene algún sentido)? Y en segundo lugar: ¿son las leyes de la física necesariamente las mismas en todas partes?

Hasta donde podemos establecerlo, las leyes físicas son las mismas en todo lugar observado. La inflación predice que las leyes de la física deben ser las mismas en un dominio inimaginablemente extenso, mayor del que podemos observar, pero no garantiza que sean las mismas para todo el universo. Sostienen comúnmente dos ideas los teóricos de este campo metafísico (metafísico en el sentido de que no hay prueba experimental concebible para esas ideas). La primera, inventada por Hawking y Hartle, es un truco para trabajar en un tiempo imaginario de modo que se elimine  $t \neq 0$ . Einstein nos enseñó cómo vivir en un universo espacialmente finito sin orillas. Los legos preguntan siempre qué es lo que hay fuera del universo; pero esto no es problema, si se está considerando espacios curvos no hay afuera. De cualquier modo, el problema del tiempo es más complejo. El tiempo marcha inexorablemente hacia adelante, aunque Einstein demostró en su teoría especial de la relatividad que el espacio y el tiempo pueden intercambiarse en cierto nivel. Así como no hay orilla espacial en un espacio curvo, puede ser que no haya comienzo en un espacio-tiempo curvo. De este modo, como respuesta a la pregunta de qué hubo antes del comienzo del universo, Hawking y Hartle dirían que no hubo tiempo antes del comienzo.

Una hipótesis alternativa, completamente diferente, nos llega de la fértil mente de Andre Linde. Hoy en día, una buena parte de los teóricos de física de partículas trabajan en la así llamada teoría de todo [*theory of everything*] (!). A lo largo de generaciones, los teóricos de partículas han considerado a una simple partícula fundamental como un punto en el espacio-tiempo. Esto conduce a numerosas y serias complicaciones matemáticas, relacionadas con la energía propia de

esas partículas-puntos. A principios de los ochenta, Schwarz y Green fueron pioneros en una imagen alterna de las partículas elementales, que fue llamada la teoría de las supercuerdas. Concibieron a las partículas elementales fundamentales del universo no como puntos en el espacio-tiempo sino como cuerdas o rizos unidimensionales en una superficie. En esta teoría, las contrariedades matemáticas quedan eliminadas y todo es finito. Sin embargo, hay un problema básico: que esta teoría sólo funciona en diez dimensiones. Y resulta que vivimos en un universo de  $3 + 1$  dimensiones; ¿qué pasó con las otras seis? ¿Están ocultas? No estoy bromeando; se trata de una interrogante real que mantiene ocupadas a muchas mentes brillantes día con día. Se supone que las otras dimensiones están enrolladas a cierta escala de la longitud de Planck ( $10^{-33}$  cm) —tan pequeñas que, por más que tratemos, nunca seremos capaces de examinarlas con nuestros microscopios o nuestros aceleradores de partículas. La siguiente interrogante es si un espacio de diez dimensiones, al comprimirse en varias dimensiones, producirá siempre el mismo subespacio de  $3 + 1$  dimensiones. La respuesta de los matemáticos a esta pregunta matemática en la línea de fuego es: no, diez dimensiones no se enrollarán necesariamente en  $3 + 1$ . Se pueden imaginar muchas otras alternativas, como  $5 + 2$ ,  $2 + 2$  o  $6 + 0$ . Un espacio de más dimensiones podría compactarse de cualquier manera, en números siempre diferentes. Es difícil suponer que la física de nuestro universo fuera la misma si el universo tuviera otro número de dimensiones, o si la compresión en  $3 + 1$  hubiera seguido rumbos diferentes. De este modo se produjo la idea de que las características de una física de baja energía, que experimentamos en nuestro entorno, son el resultado de una forma particular de colapso del espacio fundamental de diez dimensiones, cuya simetría halló expresión sólo durante los primeros instantes del universo. Por lo mismo, la física que nos controla puede no ser única. Uno puede imaginarse un universo diferente con una física de baja energía diferente. Por ejemplo, ¿por qué es la masa de protones 1 800 veces mayor que la de electrones? Alguna ulterior teoría deberá explicar esto y todos los otros números no dimensionales de la física. Es concebible que en otro universo con una pauta de compresión diferente estos números sean completamente distintos.

Linde, un teórico moscovita de partículas que actualmente reside en Stanford, asimiló de inmediato estas consideraciones fantásticas para construir un modelo llamado de la inflación eterna. Linde desarrolla la idea de que un espacio dimensional superior, quizá el espacio original de las supercuerdas en diez dimensiones, ha estado inflándose perpetuamente. Cada cierto tiempo, las fluctuaciones de ese espacio causan que un pequeño segmento de él salga de la inflación. En este proceso, algunas de las dimensiones podrían comprimirse, separando a ese segmento del espacio-tiempo mayor. Cada desprendimiento de la inflación indicaría el nacimiento de un universo separado de menor dimensionalidad; pero diferentes segmentos, nacidos de diferentes fluctuaciones azarosas, podrían compactarse de diferentes modos, dando por resultado universos de físicas un tanto diferentes. Nosotros sólo podemos observar una mancha minúscula dentro de un universo gigantesco, que a su vez se ha desconectado de un superespacio de diez dimensiones que se halla eternamente en inflación.

¿Es esto cierto? Quién sabe. ¿Puede ponerse a prueba experimentalmente? ¡De ningún modo! Es pura metafísica, pero muy divertida. Aunque una idea así no puede probarse experimentalmente, quizá algún día, cuando los pormenores matemáticos estén más ampliamente desarrollados, podrá considerarse, una de dos, viable o lógicamente inconsistente.

Terminaré estas divagaciones con un resumen de los avances en las ideas cosmológicas durante los últimos cuatrocientos años:

- La Tierra no es el centro del universo.
- El Sol no es el centro del universo.
- Nuestra galaxia no es el centro del universo.
- Nuestro tipo de materia no es el constituyente predominante del universo (la materia oscura predomina).
- Nuestro universo (visible e invisible) no es el único.
- Nuestra física no es la única. Puede ser que existan universos separados con físicas completamente diferentes.

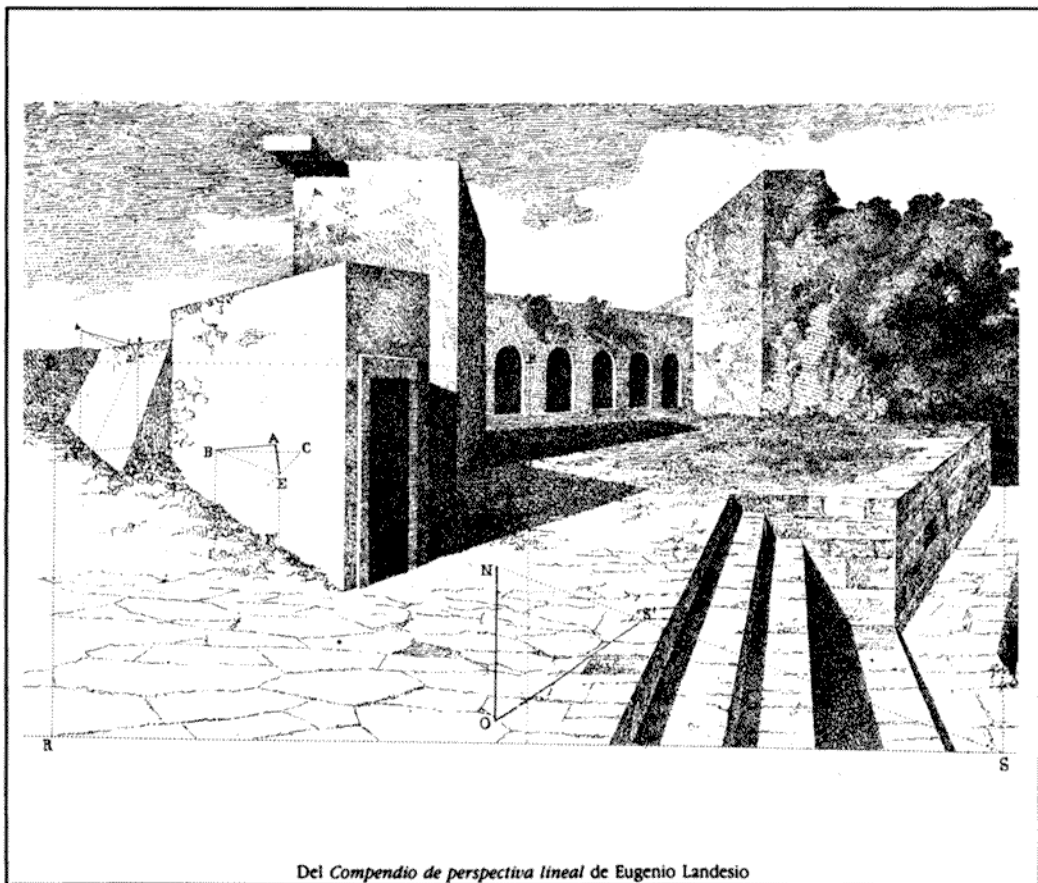
Por último, acerca de la noción de tiempo en diferentes modelos cosmológicos.

*La teoría del estado estacionario:* El universo es de edad infinita; la materia se crea continuamente desde siempre. (En su forma original, esta teoría no es aceptable.)

*El Big Bang:* El universo es de edad finita; la materia y la energía se conservan mientras el universo se expande. (Aceptable después de  $t = 10^{-35}$  segundos, ¿pero antes?)

*El Big Bang en eterna inflación:* Nuestro universo es de edad finita. La creación de toda la materia-energía ocurrió al final de la fase inflacionaria, cuando la enorme densidad de energía del falso vacío se transformó en materia ordinaria y radiación.

Este es nuestro moderno mito de la creación. Nuestra concepción actual es que el universo que podemos observar, y todo lo que queda más allá, fue creado por una pequeña fluctuación de vacío con un contenido de energía igual a cero en un momento increíblemente temprano. Es decir que todo nuestro universo se creó casi literalmente de la nada. Esta concepción es aceptada seriamente por los cosmólogos profesionales. Hay un dicho que reza "nadie come gratis"; pero como dice Alan Guth, "el universo es la esencial comida de gorra". □



Del *Compendio de perspectiva lineal* de Eugenio Landeso