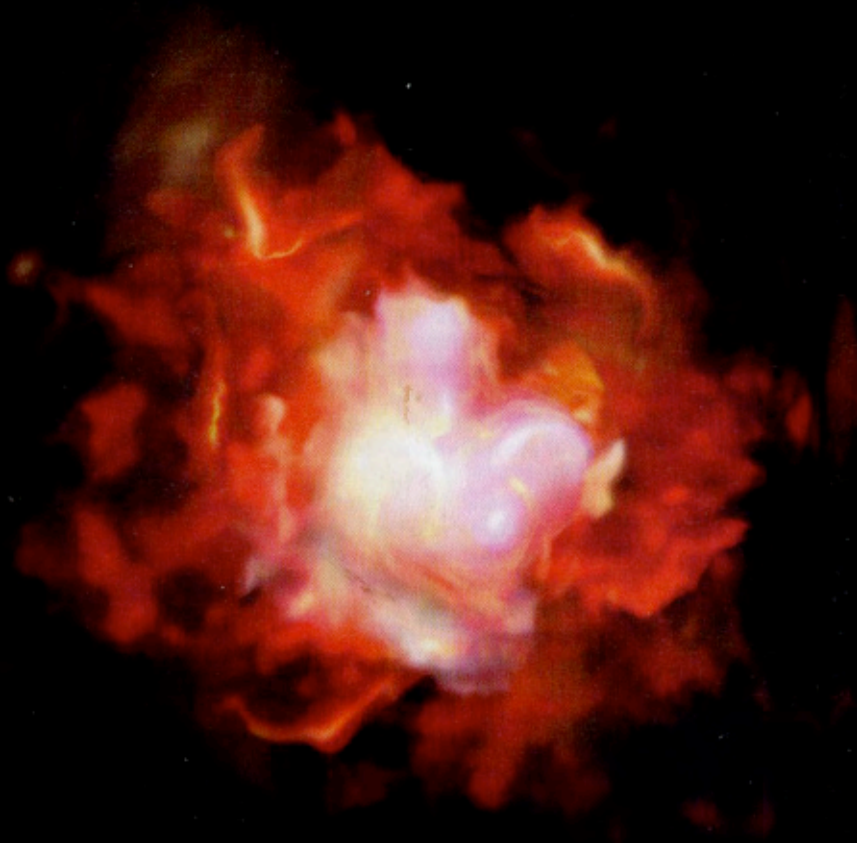


El universo antes de la gran explosión

Gabriele Veneziano



La teoría de cuerdas da a entender

que la gran explosión no fue el origen del universo, sino sólo la evolución de un estado preexistente

¿Fue realmente la gran explosión el inicio del tiempo? ¿O el universo existía desde antes? Semejante pregunta parecía casi una blasfemia hace sólo una década. La mayoría de los cosmólogos sostenía que carecía de sentido, que contemplar un tiempo anterior a la gran explosión era como preguntarse por los lugares al norte del polo norte. Pero los desarrollos de la física teórica, especialmente la aparición de la teoría de cuerdas, han cambiado la perspectiva. El universo de antes de la explosión se ha convertido en la última frontera de la cosmología.

El nuevo afán de considerar lo que podría haber sucedido antes de la explosión es la última oscilación de un péndulo intelectual que ha ido y venido durante milenios. En una u otra forma, el problema del inicio ha atraído a filósofos y teólogos de casi todas las culturas. Está relacionado con un gran conjunto de interrogantes, uno de ellos famosamente resumido en un cuadro pintado en 1897 por Paul Gauguin: *D'où venons-nous? Que sommes-nous? Où allons-nous?* ¿De dónde venimos? ¿Qué somos? ¿Adónde vamos? La obra representa el ciclo del nacimiento, vida y muerte—origen, identidad y destino de cada individuo—; estos interrogantes personales conectan directamente con los cósmicos. Podemos remontarnos por nuestro linaje más allá de las generaciones, más allá de nuestros ancestros animales, más allá de las primitivas formas de vida y de protovida, más allá de los elementos sintetizados en el universo primordial, más allá de la energía amorfa que aún antes ocupaba el espacio. ¿Se extiende nuestro árbol genealógico indefinidamente hacia atrás? ¿O bien sus raíces acaban? ¿Es el cosmos pasajero, como nosotros?

Los antiguos griegos debatieron con ardor sobre el origen del tiempo. Aristóteles, de parte de quienes no pensaban que hubiera habido un inicio, invocó el principio de que de la nada, nada puede salir. Si el universo no pudo pasar de la nada a algo, es que había existido siempre. Por esta y otras razones, el tiempo debía extenderse

eternamente en el pasado y en el futuro. Los teólogos cristianos mantenían el punto de vista opuesto. San Agustín afirmaba que Dios existe fuera del espacio y el tiempo, y puede llevarlos a la existencia de la misma manera que podía forjar otros aspectos de nuestro mundo. Cuando se le preguntaba qué hacía Dios *antes* de crear el mundo, Agustín respondía que, como el propio tiempo pertenece a la creación de Dios, no había un *antes*.

La teoría de la relatividad general de Einstein condujo a los cosmólogos modernos casi a la misma conclusión. La teoría mantiene que espacio y tiempo son “blandos”, maleables. A las mayores escalas, el espacio es dinámico por naturaleza; se expande o se contrae con el tiempo, arrastrando la materia como la marea arrastra un tronco. Los astrónomos hallaron en el decenio de 1920 que nuestro universo se está, ahora, expandiendo: las galaxias distantes se separan unas de otras. Una consecuencia, como Steven Hawking y Roger Penrose probaron en los años sesenta, es que el tiempo no se puede extender indefinidamente hacia atrás. Si se proyecta la historia cósmica hacia atrás en el tiempo, todas las galaxias se juntan en un único punto infinitesimal, una “singularidad”, casi como si estuvieran descendiendo en un agujero negro. Cada galaxia, o sus precursores, se comprime hasta un tamaño nulo. La densidad, la temperatura y la curvatura del espaciotiempo se hacen infinitas. La singularidad es el cataclismo primero, más allá del cual nuestra genealogía cósmica no se puede extender.

Extraña coincidencia

La singularidad inevitable pone en serios problemas a los cosmólogos. En particular, no encaja bien con el elevado grado de homogeneidad e isotropía que exhibe el universo a escalas grandes. Para que el cosmos parezca aproximadamente el mismo en todas partes, alguna clase de comunicación debe haber entre regiones distantes del espacio, para que se coordinen sus propiedades. Pero tal comunicación contradice el viejo paradigma cosmológico.

Para concretar, consideremos lo que ha sucedido durante los 13.700 millones de años transcurridos desde que se liberó la radiación del fondo cósmico de microondas. La distancia entre galaxias ha crecido en un factor de aproximadamente 1000 (a causa de la expansión), mientras que el radio del universo observable ha crecido en un factor mucho mayor, de alrededor de 100.000 (porque la luz es más veloz que la expansión). Hoy día vemos partes del universo que no podríamos haber visto hace 13.700 millones de años. En realidad, éste es el primer momento de la historia cósmica en que la luz de las galaxias más distantes ha llegado a la Vía Láctea.

Sin embargo, las propiedades de la Vía Láctea son básicamente las mismas que las de las galaxias distantes. Es como si se fuera a una fiesta y se comprobara que se lleva exactamente el mismo vestido que una docena de amigos. Si sólo dos estuvieran vestidos igual, se podría explicar como una coincidencia, pero una docena sugiere que los asistentes se han puesto de acuerdo. En cosmología, el número no es una docena, sino decenas de miles: el número de fragmentos de cielo independientes, aunque estadísticamente idénticos, del fondo de microondas.

Una posibilidad es que todas estas regiones del espacio estuvieran dotadas desde el inicio con idénticas propiedades; en otras palabras,

que la homogeneidad sea mera coincidencia. Sin embargo, se han concebido un par de circunstancias más naturales que nos librarían de ese callejón sin salida: o el universo primitivo era mucho menor de lo supuesto en la cosmología ordinaria, o mucho más viejo. Una u otra (o ambas, actuando juntas) habrían posibilitado la intercomunicación.

La preferida sigue siendo la primera. El universo habría pasado por un período de expansión acelerada, o de "inflación", al comienzo de su historia. Antes de esta fase, las galaxias, o sus precursores, estaban tan juntas, que fácilmente podían coordinar sus propiedades. Durante la inflación, perdieron el contacto debido a que la luz no podía seguir el paso de la frenética expansión. Cuando la inflación acabó, la expansión empezó a desacelerarse, de manera que las galaxias, gradualmente, volvieron a verse unas a otras.

Se atribuye el empuje inflacionario a la energía potencial almacenada en un nuevo campo, el inflatón, unos 10^{-35} segundos después de la gran explosión. La energía potencial, al contrario que la masa en reposo o la energía cinética, conduce a la repulsión gravitatoria. En vez de ralentizar la expansión, como haría la gravitación de la materia ordinaria, el inflatón la acelera. Propuesta en 1981, la inflación ha explicado con precisión una amplia variedad de observaciones [véase "El universo inflacionario", por Alan

H. Guth y Paul J. Steinhardt; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1984]. Sin embargo, todavía quedan algunos problemas teóricos, empezando por el de qué es exactamente el inflatón y qué le dio una energía potencial inicial tan grande.

La segunda y menos conocida solución del problema prescinde de la singularidad. Si el tiempo no empezó en la explosión, si una larga era precedió al inicio de la presente expansión cósmica, la materia podría haber tenido todo el tiempo necesario para distribuirse homogéneamente por sí misma. De ahí que se haya reexaminado el razonamiento que llevó a inferir la existencia de una singularidad.

Una de sus hipótesis, que la teoría de la relatividad es válida siempre, resulta cuestionable. Cerca de la presunta singularidad, los efectos cuánticos deberían haber sido grandes, incluso dominantes. La relatividad ordinaria no tiene en cuenta tales efectos, de manera que aceptar la inevitabilidad de la singularidad equivale a fiarse de la teoría más allá de lo razonable. Para saber lo que realmente sucedió, hay que subsumir la relatividad en una teoría cuántica de la gravedad. La tarea ha venido ocupando a los teóricos desde la época de Einstein, pero el progreso fue casi nulo hasta mediados los años ochenta.

Evolución de una revolución

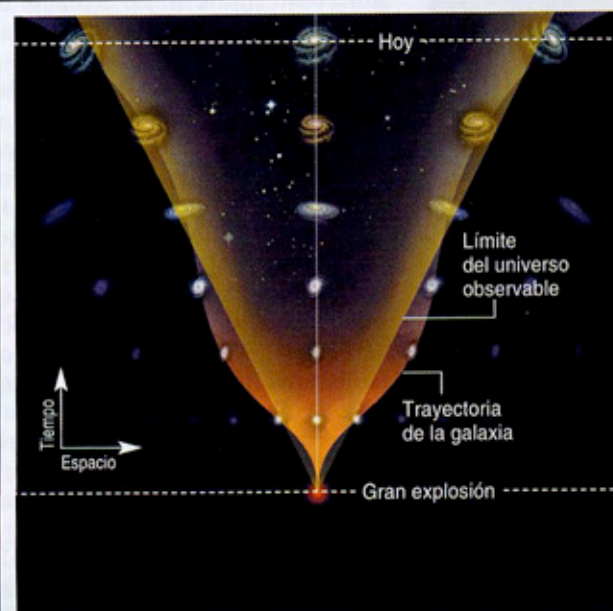
Hoy en día quedan dos enfoques: uno, la gravedad cuántica de bucles, mantiene la teoría de Einstein esencialmente intacta; pero cambia el procedimiento de llevarla a cabo en la mecánica cuántica [véase "Átomos del espacio y del tiempo", por Lee Smolin; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo 2004]. Los seguidores de la gravedad cuántica de bucles han dado grandes pasos en los últimos años. A pesar de ello, su método podría no ser tan revolucionario como para resolver los problemas fundamentales de la cuantización de la gravedad. Un problema parecido afrontaron los teóricos de partículas después de que Enrico Fermi introdujera su teoría efectiva de la fuerza nuclear débil en 1934. Todos los esfuerzos por dar sentido a una versión cuántica de la teoría de Fermi fallaron. No se ne-

Resumen/Cosmología de cuerdas

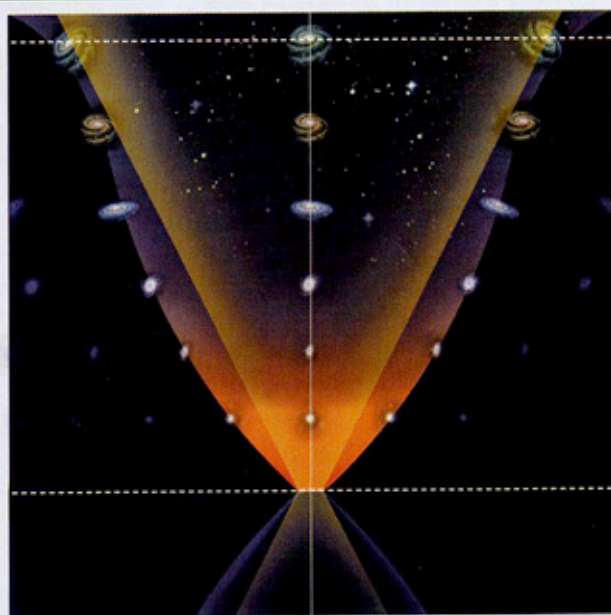
- Filósofos, teólogos y científicos siempre han debatido si el tiempo es eterno o finito; es decir, si el universo ha existido siempre o ha tenido en cambio una génesis definida. La teoría de la relatividad general de Einstein implica finitud. Un universo en expansión tiene que haber empezado en la gran explosión.
- Sin embargo, la relatividad general pierde su validez en la vecindad de la explosión, momento en que interviene la mecánica cuántica. El principal candidato actual a una teoría cuántica de la gravedad completa, la teoría de cuerdas, introduce un cuanto de longitud mínimo como una nueva constante fundamental de la naturaleza y convierte con ello en insostenible que la gran explosión fuera una verdadera génesis.
- La explosión tuvo lugar, pero no correspondió a un momento de infinita densidad. El universo podría ser anterior a ella. Las simetrías de la teoría de cuerdas sugieren que el tiempo no tuvo un inicio y no tendrá un final. Podría haber empezado casi vacío y haberse ido concentrando hasta la explosión, o incluso podría haber pasado por un ciclo de muerte y renacimiento. En cualquier caso, la época anterior a la explosión habría formado el cosmos actual.

Dos concepciones del inicio

EN NUESTRO UNIVERSO EN EXPANSION, las galaxias se alejan unas de otras. Cualquier par de galaxias se separa a una velocidad proporcional a la distancia que media entre ambas: si distan 500 millones de años-luz entre sí, se separarán el doble de deprisa que si distan 250. Por tanto, las galaxias deben haber partido del mismo lugar al mismo tiempo: la gran explosión. La conclusión vale incluso cuando la expansión cósmica ha pasado por períodos de aceleración y desaceleración; en los diagramas del espaciotiempo (abajo) las galaxias siguen trayectorias serpenteantes que entran y salen de la región observable del espacio (cono amarillo). Sin embargo, la situación deviene incierta en el preciso momento en que las galaxias (o sus antecesores) empezaron a separarse.



En la cosmología estándar de la gran explosión, que se basa en la teoría general de la relatividad de Einstein, la distancia entre dos galaxias cualesquiera era nula hace un tiempo finito. Antes de dicho momento, el tiempo pierde sentido.



En modelos más complejos que incluyen efectos cuánticos, dos galaxias cualesquiera deben haber partido a una cierta distancia mínima una de otra. Estos modelos abren la posibilidad de un universo anterior a la explosión.

cesitaban nuevas técnicas de cálculo, sino las profundas modificaciones aportadas por la teoría electrodébil de Sheldon Glashow, Steven Weinberg y Abdus Salam a finales de los años sesenta.

La segunda posibilidad, que considero más prometedora, es la teoría de cuerdas, una modificación verdaderamente revolucionaria de la teoría de Einstein. Este artículo se referirá a ella, aunque los proponentes de la gravedad cuántica de bucles afirman que están alcanzando muchas de las mismas conclusiones.

La teoría de cuerdas surgió a partir de un modelo que planteé en 1968 para describir el mundo de las partículas nucleares (protones y neutrones) y sus interacciones. Aunque apasionó en un principio, el modelo fracasó. Sería abandonado años después en favor de la cromodinámica

cuántica, que describe las partículas nucleares en términos de constituyentes más elementales, los quarks. Los quarks quedan confinados dentro de los protones o neutrones como si estuvieran ligados entre sí por cuerdas elásticas. Mirando hacia atrás, se comprende que la teoría de cuerdas original captó ese aspecto del mundo nuclear. Sólo más tarde reviviría en el empeño por combinar la relatividad general y la teoría cuántica.

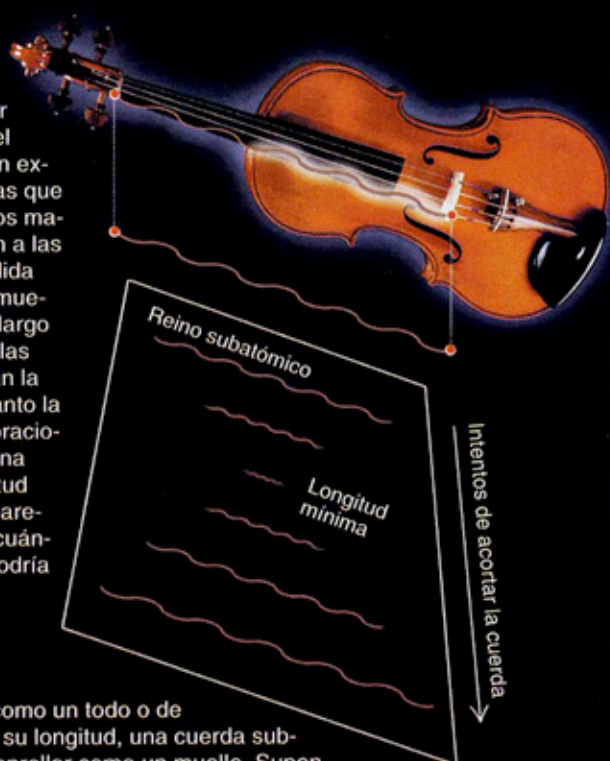
La idea básica es que las partículas elementales no son puntos, sino objetos unidimensionales infinitamente delgados, las cuerdas. El gran zoo de las partículas elementales, cada una con sus propiedades características, refleja los muchos posibles modos de vibración de una cuerda. ¿Cómo puede una teoría tan simple describir el complicado mun-

do de las partículas y sus interacciones? La respuesta puede encontrarse en lo que cabe llamar magia de la cuerda cuántica. Una vez que las reglas de la mecánica cuántica se aplican a una cuerda vibrante —como si fuera una cuerda de violín en miniatura, excepto que las vibraciones se propagan por ella a la velocidad de la luz—, aparecen nuevas propiedades. Todas tienen hondas consecuencias para la física de partículas y la cosmología.

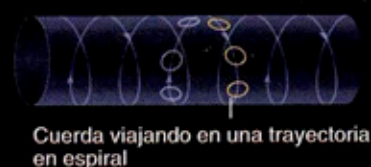
En primer lugar, las cuerdas cuánticas tienen un tamaño finito. Si no fuera por los efectos cuánticos, se podría cortar una cuerda de violín por la mitad, cortarla de nuevo y así sucesivamente, hasta convertirla en una partícula puntual, sin masa. Pero el principio de incertidumbre de Heisenberg finalmente hace su aparición y evita que las

Teoría elemental de cuerdas

La teoría de cuerdas es la principal (aunque no la única) teoría que se propone explicar lo que sucedió en el momento de la gran explosión. Las cuerdas que describe son objetos materiales. Recuerdan a las de un violín. A medida que los violinistas mueven los dedos a lo largo del mástil, acortan las cuerdas y aumentan la frecuencia (y por tanto la energía) de sus vibraciones. Si redujeran una cuerda a una longitud sub-subatómica aparecerían los efectos cuánticos; ya no se la podría acortar más.

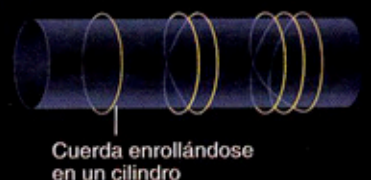


Además de viajar como un todo o de vibrar a lo largo de su longitud, una cuerda subatómica se puede enrollar como un muelle. Supongamos que el espacio tiene una forma cilíndrica. Si la circunferencia es mayor que la longitud mínima permitida de la cuerda, cada aumento en la velocidad de propagación requiere un pequeño incremento de energía, mientras que cada enrollamiento extra exige un incremento grande. Pero si la circunferencia es menor que la longitud mínima, un enrollamiento extra será menos costoso que una cantidad extra de velocidad. La energía neta —lo que en verdad importa— es la misma tanto para circunferencias pequeñas como para las grandes. En realidad, la cuerda no se encoge. Esta propiedad evita que la materia alcance una densidad infinita.



CILINDRO GRANDE

Pequeña cantidad de energía necesaria para aumentar la velocidad



Gran cantidad de energía necesaria para añadir una vuelta



CILINDRO PEQUEÑO

Gran cantidad de energía necesaria para aumentar la velocidad



Pequeña cantidad de energía necesaria para añadir una vuelta

cuerdas más ligeras se corten en trozos menores que unos 10^{-34} metros. Este irreducible cuanto de longitud, l_s , es una nueva constante de la naturaleza introducida por la teoría de cuerdas, paralelamente a la velocidad de la luz, c , y la constante de Planck, h . Desempeña un papel crucial en casi todos los aspectos de la teoría de cuerdas; establece un límite finito a magnitudes que, de otra manera, podrían hacerse cero o infinito.

En segundo lugar, las cuerdas cuánticas pueden tener momento angular incluso aunque carezcan de masa. En la física clásica, el momento angular es una propiedad de un objeto que gira respecto a un eje. La fórmula del momento angular multiplica entre sí velocidad, masa y distancia al eje; por tanto, un objeto sin masa no puede tener momento angular. Pero las fluctuaciones cuánticas cambian la situación. Una pequeña cuerda puede adquirir hasta dos unidades de h de momento angular sin ganar masa. Esta característica es muy bienvenida, ya que se ajusta a las propiedades de los mediadores de todas las fuerzas fundamentales conocidas, así el fotón (para el electromagnetismo) y el gravitón (para la gravedad). Históricamente, fue el momento angular lo que puso sobre la pista de las implicaciones cuántico-gravitatorias de la teoría de cuerdas.

En tercer lugar, las cuerdas cuánticas exigen la existencia de dimensiones extra del espacio, además de las tres usuales. Una cuerda clásica de violín vibrará con independencia de cuáles sean las propiedades del espacio y el tiempo. Una cuerda cuántica es más exigente. Las ecuaciones que describen la vibración se vuelven incoherentes a menos que el espaciotiempo, o bien esté muy curvado (en contradicción con las observaciones), o contenga seis dimensiones espaciales extra.

Y cuarto, las constantes físicas —las de Newton o de Coulomb, por ejemplo—, que aparecen en las ecuaciones de la física y determinan las propiedades de la naturaleza, ya no tienen valores arbitrarios y fijos. Aparecen en la teoría de cuerdas como campos, bastante parecidos al campo electromagnético, que ajustan sus valores diná-