

micamente. Pueden haber tenido diferentes valores en diferentes épocas cosmológicas o en remotas regiones del espacio. Incluso hoy en día las "constantes" físicas podrían variar un poco. La observación de cualquier variación proporcionaría un enorme impulso a la teoría de cuerdas.

Uno de esos campos, el dilatón, es la llave maestra de la teoría de cuerdas; determina la intensidad global de todas las interacciones. El dilatón fascina por su valor: se puede reinterpretar como el tamaño de una dimensión extra del espacio, dando un total de 11 dimensiones al espaciotiempo.

Atar los cabos sueltos

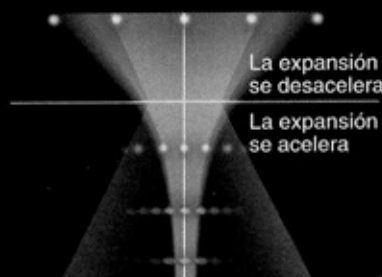
Finalmente, las cuerdas cuánticas han presentado algunas nuevas y sorprendentes simetrías de la naturaleza, las dualidades, que alteran nuestra intuición de qué sucede cuando los objetos se hacen pequesísimos. Ya he aludido a una forma de dualidad: por lo normal, una cuerda corta es más ligera que una larga, pero si intentamos reducir su tamaño por debajo de la longitud fundamental l_s , se volverá de nuevo pesada.

Otra forma de la simetría, la dualidad T, mantiene que las dimensiones extra pequeñas y grandes son equivalentes. Esta simetría se debe a que las cuerdas pueden moverse de maneras más complicadas que las partículas puntuales. Consideremos una cuerda cerrada (como una sortija) localizada sobre un espacio en forma de cilindro, cuya sección transversal circular represente una dimensión extra finita. Aparte de vibrar, la cuerda puede desplazarse como un todo alrededor del cilindro o enrollarse a su alrededor una o varias veces, como una goma que diese varias vueltas a un tubo (véase el recuadro "Teoría elemental de cuerdas").

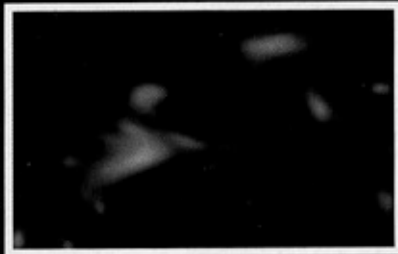
El coste energético de estos dos estados de la cuerda depende del tamaño del cilindro. La energía del enrollamiento es directamente proporcional al radio del cilindro: los cilindros mayores requieren que la cuerda se estire más para enrollarse a su alrededor; por tanto, el enrollamiento contendrá más energía que la que contendría en un cilin-

LA HIPOTESIS DE LA EPOCA PREVIA A LA GRAN EXPLOSION

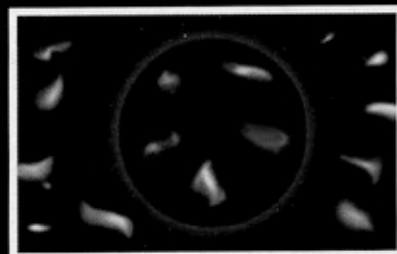
UN INTENTO PRIMERO de aplicar la teoría de cuerdas a la cosmología fue la hipótesis de la pre-gran explosión, según la cual la explosión no es el origen último del universo, sino una transición. Antes, la expansión se aceleraba; después se desaceleró (por lo menos en un principio). La trayectoria de una galaxia por el espaciotiempo (*derecha*) tendría la forma de una copa de vino.



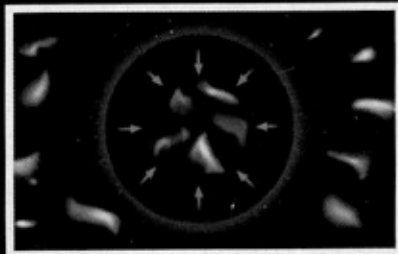
El universo ha existido desde siempre. En el pasado remoto, estaba casi vacío. Las fuerzas, como la gravitación, eran débiles de por sí.



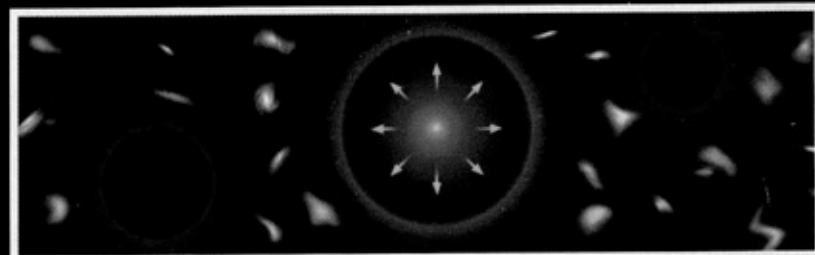
Las fuerzas se fueron intensificando; la materia empezó a acumularse. En algunas regiones se hizo tan densa, que se formó un agujero negro.



Dentro del agujero, el espacio se expandió a un ritmo acelerado. La materia del interior se desconectó de la materia exterior.



Dentro del agujero la materia cayó hacia el centro y aumentó su densidad hasta que alcanzó el límite impuesto por la teoría de cuerdas.

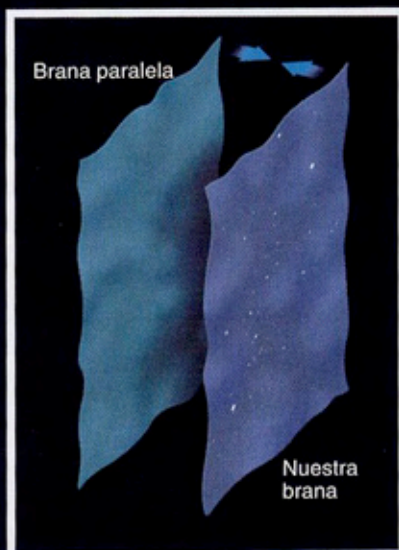


Cuando la materia alcanzó la densidad máxima permitida, los efectos cuánticos provocaron que rebotara en una gran explosión. Fuera, se empezaron a formar otros agujeros, cada uno de ellos un universo distinto.

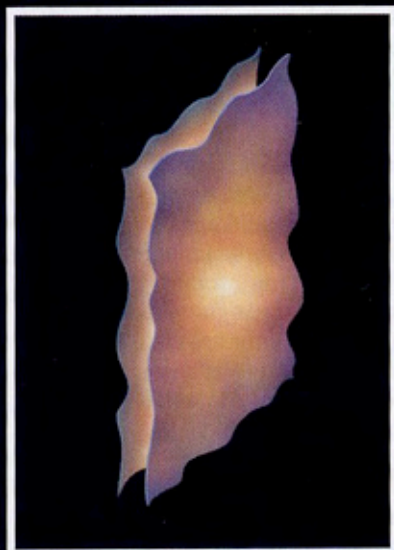
dro más pequeño. La energía asociada con el movimiento en torno al círculo, por otro lado, es inversamente proporcional al radio: los cilindros mayores permiten longitudes de onda más largas (menores frecuencias), lo que representa me-

nos energía que las longitudes de onda cortas. Si se sustituye el cilindro grande por otro pequeño, los dos estados de movimiento pueden permutar sus papeles. Las energías que había producido el movimiento circular, se producirán ahora por los

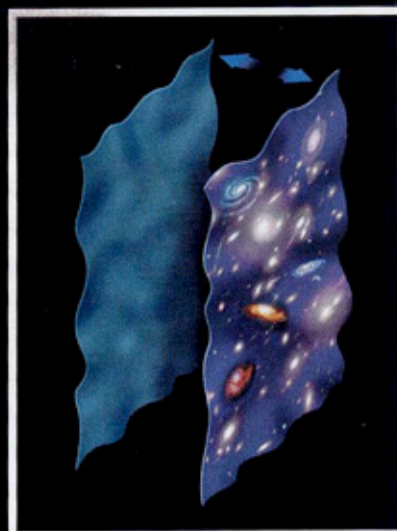
Si nuestro universo es una membrana multidimensional, o simplemente una "brana", moviéndose por un espacio de más dimensiones, la gran explosión podría haber sido la colisión de nuestra brana con una brana paralela. Las colisiones podrían ocurrir cíclicamente. Cada galaxia sigue una trayectoria con forma de reloj de arena a través del espacio-tiempo (*abajo*).



Dos branas casi vacías se atraen entre sí. Cada una se está contrayendo en una dirección perpendicular a su movimiento.



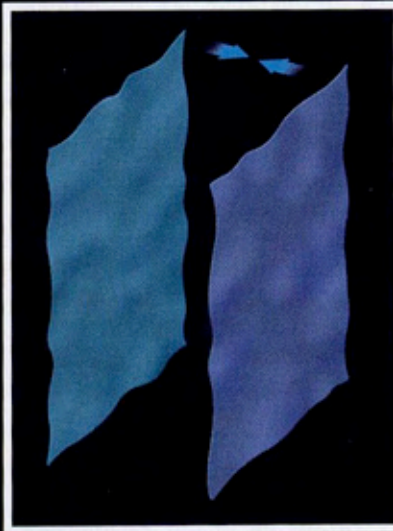
Las branas chocan, convirtiendo sus energías cinéticas en materia y radiación. Esta colisión es la gran explosión.



Las branas rebotan. Empiezan a expandirse a un ritmo desacelerado. La materia se agrupa en estructuras tales como los cúmulos de galaxias.



En el modelo cíclico, a medida que las branas se separan, la fuerza atractiva entre ellas las frena. La materia se reduce.



Las branas acaban de separarse y empiezan a acercarse. Durante la inversión, cada brana se expande a un ritmo acelerado.

enrollamientos, y viceversa. Un observador exterior sólo nota los niveles de energía, no el origen de dichos niveles. Para tal observador, los radios grandes y los pequeños son físicamente equivalentes.

Aunque la dualidad T se suele formular para espacios cilíndricos, en los que una dimensión (la circunferencia) es finita, hay una variante

que se aplica a nuestras tres dimensiones corrientes, que nos parece que cabe estirar indefinidamente. Se debe ser cuidadoso al hablar de la expansión de un espacio infinito. Su tamaño global no puede cambiar; sigue siendo infinito. Pero sí se puede expandir en el sentido de que los cuerpos de su interior —las galaxias— se alejen

unos de otros. La variable crucial no es el tamaño del espacio como un todo, sino su factor de escala, el factor por el que la distancia entre galaxias cambia; se manifiesta en el desplazamiento hacia el rojo de la luz galáctica que los astrónomos observan. Según la dualidad T, universos con pequeños factores de escala son equivalentes a los de

factores de escala grandes. Una tal simetría no aparece en las ecuaciones de Einstein. Surge de la unificación, implícita en la teoría de cuerdas; al dilatón le toca ahí un papel central.

Durante años, los teóricos de las cuerdas pensaron que la dualidad T se aplicaba sólo a las cuerdas cerradas y no a las cuerdas abiertas, que tienen cabos sueltos y, por tanto, no se pueden enrollar. En 1995 Joseph Polchinski, de la Universidad de California en Santa Barbara, observó que la dualidad T se aplica también a las cuerdas abiertas, siempre que el cambio entre radios grandes y pequeños se acompañe de un cambio en las condiciones en los puntos finales de la cuerda. Hasta entonces, se habían dictado condiciones de contorno en las que ninguna fuerza actuaba en los extremos de las cuerdas, dejándolos libres para moverse. Bajo la dualidad T, estas condiciones se convierten en las llamadas condiciones de contorno de Dirichlet y los extremos quedan fijos.

Cualquier cuerda dada puede mezclar ambos tipos de condiciones de contorno. Por ejemplo, los electrones pueden ser cuerdas cuyos extremos se mueven libremente en tres de las 10 dimensiones espaciales, pero están fijos en las otras siete. Aquellas tres dimensiones forman un subespacio conocido como membrana de Dirichlet, o D-brana. En 1996 Petr Horava, de la Universidad de California en Berkeley, y Edward Witten, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, propusieron que nuestro universo reside en una tal brana. La movilidad parcial de los electrones y de otras partículas explica por qué somos incapaces de percibir las diez dimensiones del espacio en todo su esplendor.

Domesticar el infinito

Las mágicas propiedades de las cuerdas cuánticas apuntan a una misma conclusión: las cuerdas aborrecen el infinito. Como no pueden contraerse hasta convertirse en un punto infinitesimal, evitan las paradojas que un colapso así entraña. Su tamaño no nulo y nuevas simetrías establecen límites superiores a las magnitudes físicas que aumentan

ilimitadamente en las teorías ordinarias, e imponen cotas inferiores a las que decrecen. Los teóricos de cuerdas piensan que cuando se proyecta la historia del universo hacia atrás en el tiempo, la curvatura del espaciotiempo va aumentando. Pero en vez de ir creciendo hasta el infinito (hasta la tradicional singularidad de la gran explosión), acaba por alcanzar un máximo y se reduce otra vez. Antes de la teoría de cuerdas, difícil era imaginar mecanismos que eliminasen tan limpiamente la singularidad.

Las condiciones cerca del tiempo cero de la gran explosión eran tan extremas, que aún no se sabe cómo resolver las ecuaciones. Sin embargo, los teóricos de cuerdas han aventurado hipótesis acerca del universo anterior a la gran explosión. Están tomando en consideración dos modelos sobre todo.

El primero, que establece la existencia de una época previa a la gran explosión —mis compañeros y yo empezamos a desarrollarlo en 1991—, combina la dualidad T con la simetría, más conocida por todos, de la inversión temporal, según la cual las ecuaciones de la física valen tanto cuando se las aplica hacia atrás en el tiempo como cuando se las aplica hacia delante. La combinación da lugar a nuevas cosmologías posibles en las que el universo se expande, digamos que cinco segundos antes de la gran explosión, a la misma velocidad que cinco segundos después. Pero el cambio de la expansión era opuesto en los dos instantes; si se estaba desacelerando después, antes se aceleraba. En pocas palabras: la gran explosión podría no haber sido el origen del universo, sino sólo una violenta transición desde la aceleración a la desaceleración.

La belleza de este modelo es que incorpora de manera automática la gran intuición de la teoría inflacionaria estándar: que el universo debió sufrir un período de aceleración a fin de quedar tan homogéneo e isótropo. En la teoría estándar, la aceleración ocurre después de la gran explosión debido a un campo, el inflatón, *ad hoc*. En el modelo de la pre-gran explosión, ocurre antes de la explosión, como un resultado natural de las nuevas simetrías de la teoría de cuerdas.

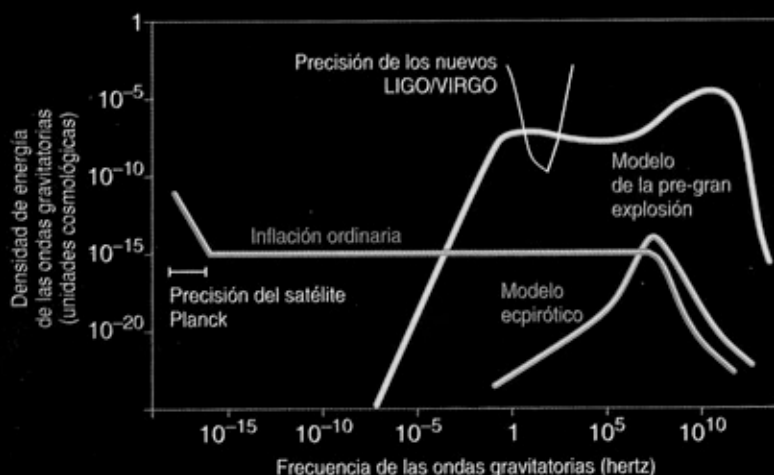
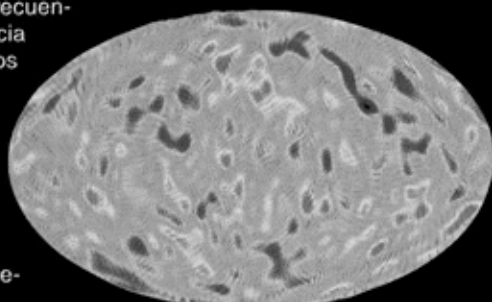
Según esa hipótesis, el universo pre-explosivo era casi una imagen especular perfecta del que siguió a la explosión (véase el recuadro "La hipótesis de la época previa a la gran explosión"). Si el universo es eterno hacia el futuro, con su contenido enrareciéndose hasta convertirse en un caldo diluido, también será eterno hacia el pasado. Infinitamente antes, estaba casi vacío; sólo contenía un gas tenue, muy disperso y caótico, de radiación y materia. Las fuerzas de la naturaleza, controladas por el campo del dilatón, eran tan débiles que las partículas del gas, apenas si interaccionaban.

A medida que transcurrió el tiempo, las fuerzas ganaron intensidad y tendieron a agrupar la materia. Aleatoriamente, algunas regiones acumularon materia a expensas de sus entornos. Por último, la densidad en estas regiones se hizo tan alta, que empezaron a formarse agujeros negros. La materia del interior de esas regiones se desconectó entonces del exterior. El universo se partió en fragmentos disconexos.

Dentro de un agujero negro, el espacio y el tiempo intercambian papeles. El centro del agujero negro no es un punto del espacio sino un instante de tiempo. A medida que la materia se precipitaba hacia el centro, alcanzaba densidades más y más altas. Pero cuando la densidad, la temperatura y la curvatura adquirieron los valores máximos permitidos por la teoría de cuerdas, rebotaron y empezaron a decrecer. El momento de esta inversión es lo que llamamos gran explosión. El interior de uno de esos agujeros negros se convirtió en nuestro universo.

No es sorprendente que un esquema tan poco corriente haya provocado controversias. Andrei Linde, de la Universidad de Stanford, ha argumentado que para que concordase con las observaciones, el agujero negro del que surgió nuestro universo tendría que haberse formado con un tamaño inusualmente grande, mucho mayor que la escala de longitud de la teoría de cuerdas. Una respuesta a esta objeción es que las ecuaciones predicen agujeros negros de todos los tamaños posibles. Resulta que nuestro universo

LA OBSERVACION del universo anterior a la gran explosión parecerá una tarea imposible, pero puede que sobreviva de esa época una forma de radiación: la radiación gravitatoria. Estas variaciones periódicas del campo gravitatorio se detectarían indirectamente por sus efectos sobre la polarización del fondo cósmico de microondas (*vista simulada inferior*) o bien directamente en observatorios terrestres. Tanto la hipótesis de la época pre-gran explosión como la eciprótica predicen más ondas gravitatorias de alta frecuencia y menos de baja frecuencia que los modelos inflacionarios ordinarios (*abajo*). Las medidas existentes de varios fenómenos astronómicos no permiten distinguir entre estos modelos, pero las futuras observaciones del satélite Planck y de los observatorios LIGO y VIRGO deberían poder hacerlo.



se formó dentro de uno suficientemente grande.

Una objeción más seria, planteada por Thibault Damour, del Instituto de Altos Estudios Científicos, de Bures-sur-Yvette, y Marc Henneaux, de la Universidad Libre de Bruselas, es que la materia y el espaciotiempo se habrían comportado caóticamente cerca del momento de la explosión, en posible contradicción con la observada regularidad del universo primitivo. Hace poco he propuesto que un estado caótico produciría un denso gas de "agujeros de cuerda" en miniatura, unas cuerdas tan pequeñas y con tanta masa, que estarían al borde de convertirse en agujeros negros. El comportamiento de estos agujeros podría resolver el problema planteado por Damour y Henneaux. Tom Banks, de la Universidad de

Rutgers, y Willy Fischler, de la de Texas en Austin, han ofrecido una solución semejante. También existen otras críticas; está por determinar si han descubierto un fallo fatal de la hipótesis.

Choques de branas

El otro modelo importante de un universo anterior a la explosión es el eciprótico. [O "a partir del fuego"; se refiere a la creencia de la filosofía estoica en el final y reconstrucción cíclicos del mundo por el fuego.] Lo concibió hace tres años un equipo de cosmólogos y teóricos de cuerdas —Justin Khoury, de la Universidad de Columbia, Paul Steinhardt, de Princeton, Burt A. Ovrut, de la de Pennsylvania, Nathan Seiberg, del Instituto de Estudios Avanzados, y Neil Turok, de la Uni-

versidad de Cambridge—. Se basa en la hipótesis de que nuestro universo es una de muchas D-branas que flotan en un espacio de más dimensiones. Las branas ejercen fuerzas atractivas entre ellas y, ocasionalmente, chocan. La gran explosión consistiría en el impacto de otra brana sobre la nuestra (*véase el recuadro "El modelo eciprótico"*).

En una variante de este modelo, las colisiones ocurren cíclicamente. Dos branas chocan, rebotan, se separan, se atraen mutuamente, chocan de nuevo, y así sucesivamente. Entre colisiones, las branas son plásticas: se expanden a medida que se alejan y se contraen algo a medida que se vuelven a acercar. Durante la transición, el ritmo de expansión se acelera; la actual expansión acelerada del universo quizás augure una nueva colisión.

Los modelos de la pre-gran explosión y eciprótico poseen algunas características comunes. Ambos empiezan con un universo grande, frío y casi vacío, y ambos comparten el difícil (y no resuelto) problema de la transición entre la fase previa a la explosión y lo que viene después. Matemáticamente, la principal diferencia entre ambas hipótesis se encuentra en el comportamiento del campo del dilatón. En la pre-gran explosión, el dilatón empieza con un valor pequeño —de manera que las fuerzas de la naturaleza son débiles— y paulatinamente gana intensidad. Lo opuesto sucede en el modelo eciprótico, donde la colisión ocurre cuando las fuerzas más débiles son.

Los creadores de la teoría eciprótica esperaban que la debilidad de las fuerzas permitiría analizar el rebote con más facilidad, pero hubieron de enfrentarse de todas formas a las dificultades de las curvaturas grandes. Está por ver si su modelo realmente evita una singularidad. Además, requiere unas muy especiales condiciones para resolver las usuales paradojas cosmológicas. Por ejemplo, las branas a punto de chocar debieron haber sido casi exactamente paralelas entre sí, pues de lo contrario la colisión no podría haber dado lugar a una explosión suficientemente homogénea. La versión cíclica podría resolver este problema, ya que las sucesivas coli-

siones permitirían que las branas se rectificaran por sí mismas.

Dejando aparte la difícil tarea de justificar plenamente estos dos modelos desde el aspecto matemático, hay que preguntarse si tienen algunas consecuencias físicas observables. A primera vista, ambos podrían parecer un ejercicio, no de física, sino de metafísica, ideas interesantes de las que los observadores nunca podrán probar si son ciertas o no. Tal actitud es demasiado pesimista. Como sucede con los detalles de la fase inflacionaria, los de una posible época pre-explosiva podrían tener consecuencias observables, inscritas sobre todo en las pequeñas variaciones observadas en la temperatura del fondo cósmico de microondas.

En primer lugar, las observaciones muestran que las fluctuaciones de temperatura fueron moldeadas por ondas acústicas durante varios cientos de miles de años. La regularidad de las fluctuaciones indica que las ondas estuvieron sincronizadas. Se han descartado muchos modelos cosmológicos a lo largo de los años porque no podían explicar esta sincronía. Los modelos inflacionario, de la pre-gran explosión y eciprótico superan esta primera prueba. En los tres, las ondas fueron generadas por procesos cuánticos amplificados durante el período de expansión cósmica acelerada. Las fases de las ondas estaban alineadas.

En segundo lugar, cada modelo predice una diferente distribución de las fluctuaciones de la temperatura con respecto al tamaño angular. La observación ha encontrado que las fluctuaciones de todos los tamaños tienen aproximadamente la misma amplitud. (Las desviaciones discernibles tienen lugar sólo a escalas muy pequeñas, donde las fluctuaciones primordiales han sido alteradas por procesos subsiguientes.) Los modelos inflacionarios reproducen muy bien esta distribución. Durante la inflación, la curvatura del espacio cambió de un modo paulatino; se generaron, pues, fluctuaciones de diferentes tamaños bajo condiciones muy parecidas. En los dos modelos basados en la teoría de cuerdas, la curvatura evolucionó rápidamente, con lo que creció la amplitud de las fluctuaciones de pequeña escala, pero otros procesos

potenciaron las de escalas grandes: todas las fluctuaciones quedaron con la misma intensidad. En el modelo eciprótico, entre esos otros procesos se incluye la dimensión extra del espacio, la que separa las branas que chocan; en el de la pre-gran explosión, un campo cuántico relacionado con el dilatón, el axión. En resumidas cuentas, los tres modelos se ajustan a los datos.

En tercer lugar, las variaciones de temperatura pueden deberse a dos procesos distintos del universo primitivo: las fluctuaciones de la densidad de materia y las ondulaciones causadas por las ondas gravitatorias. En la inflación intervienen ambos procesos, mientras que en la pre-gran explosión y el modelo eciprótico predominan las variaciones de densidad. Las ondas gravitatorias de ciertos tamaños dejarían una señal distintiva en la polarización del fondo de microondas [véase "Ecos de la Gran Explosión", por Robert R. Caldwell y Marc Kamionkowski; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo 2001]. Futuros observatorios, como el satélite Planck de la Agencia Europea del Espacio, captarán esa señal, si existe; se tratará de una contrastación casi definitiva.

Un cuarto examen se refiere a la estadística de las fluctuaciones. En la inflación, las fluctuaciones siguen

una curva con forma de campana, o gaussiana. Lo mismo puede suceder en el caso eciprótico, mientras que la pre-gran explosión permite apreciables desviaciones de la curva de Gauss.

Los análisis del fondo de microondas no son la única manera de comprobar estas teorías. Con pre-gran explosión debería haber también un fondo aleatorio de ondas gravitatorias en un intervalo de frecuencias que, aunque irrelevante para el fondo de microondas, sería detectable por los futuros observatorios de ondas gravitatorias. Además, debido a que los modelos de la pre-gran explosión y eciprótico implican cambios en el campo del dilatón, que va acoplado al campo electromagnético, ambos llevarían a fluctuaciones a gran escala del campo magnético; podrían manifestarse vestigios suyos en los campos magnéticos galácticos e intergalácticos.

¿Cuándo empezó el tiempo? Aún no tenemos una respuesta concluyente, pero por lo menos dos teorías potencialmente comprobables mantienen con verosimilitud que el universo —y por tanto el tiempo— existía antes de la gran explosión. Si una u otra son ciertas, el cosmos habría existido siempre, y aunque un día vuelva a derrumbarse sobre sí mismo, no acabará nunca.

El autor

Gabriele Veneziano, físico teórico del CERN, fue el padre de la teoría de cuerdas a finales de los años sesenta; por eso ha recibido este año el premio Heineman, de la Sociedad Americana de Física y del Instituto de Física. En aquel tiempo, se consideró que la teoría fallaba. No lograba su objetivo de explicar el núcleo atómico; Veneziano pronto desvió su atención a la cromodinámica cuántica, a la que hizo importantes contribuciones. Después de que la teoría de cuerdas reapareciese como una teoría de la gravedad en los años ochenta, sería uno de los primeros que la aplicaron a los agujeros negros y la cosmología.

Bibliografía complementaria

- SUPERSTRING COSMOLOGY.** James E. Lidsey, David Wands y Edmund J. Copeland en *Physics Reports*, vol. 337, n.º 4-5, págs. 343-492; octubre 2000.
- FROM BIG CRUNCH TO BIG BANG.** Justin Khoury, Burt A. Ovrut, Nathan Seiberg, Paul J. Steinhardt y Neil Turok en *Physical Review D*, vol. 65, n.º 8, Trabajo no.086007; 15 de abril, 2002.
- A CYCLIC MODEL OF THE UNIVERSE.** Paul J. Steinhardt y Neil Turok en *Science*, vol. 296, n.º 5572, páginas 1436-1439; 24 de mayo, 2002.
- EL UNIVERSO ELEGANTE.** Brian Greene. Ed. Crítica; Barcelona, 2003.
- THE PRE-BIG BANG SCENARIO IN STRING COSMOLOGY.** Maurizio Gasperini y Gabriele Veneziano en *Physics Reports*, vol. 373, n.º 1-2, páginas 1-212; enero 2003.