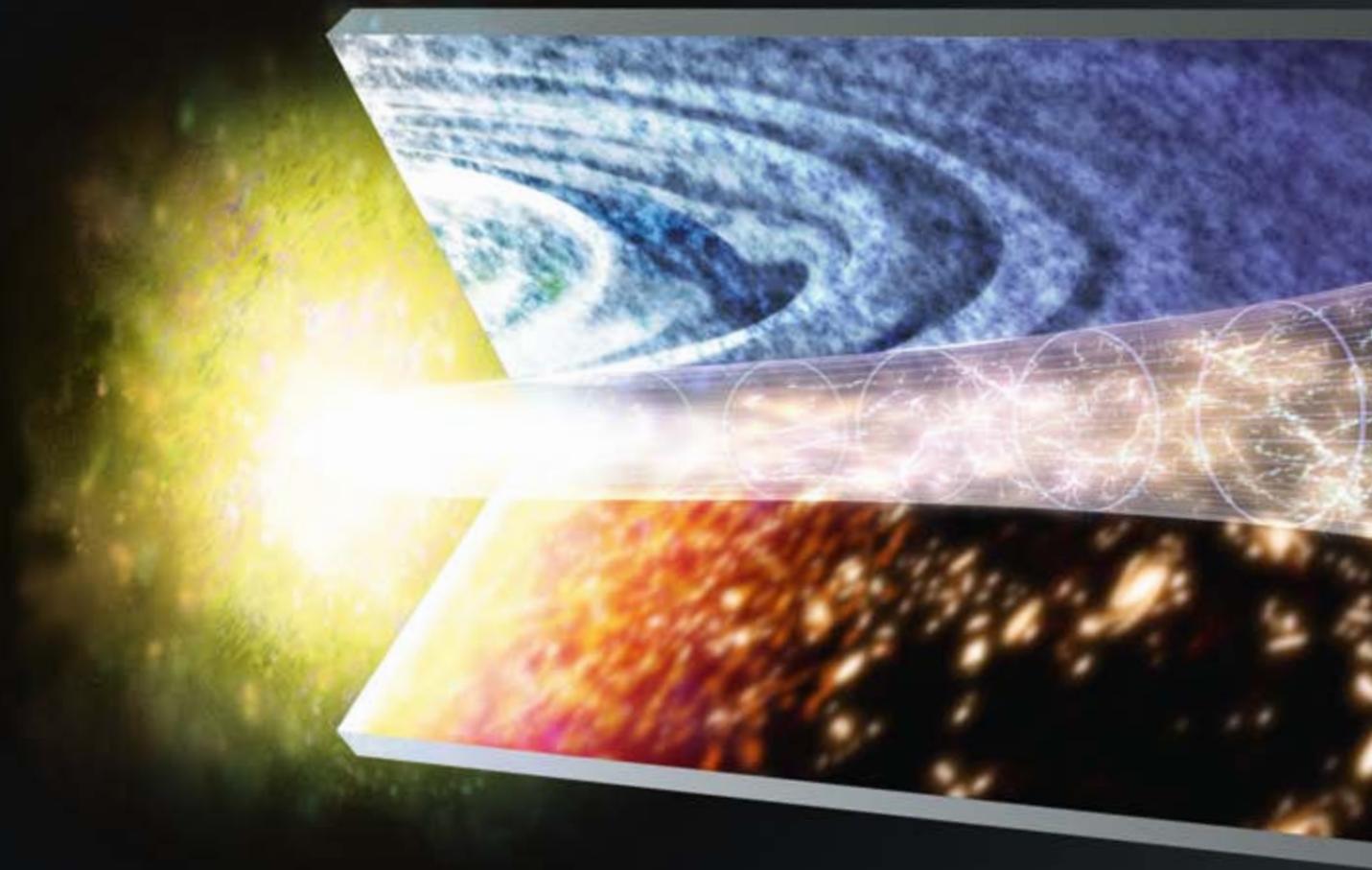


UNA VENTANA AL PRIMER INSTANTE DEL UNIVERSO



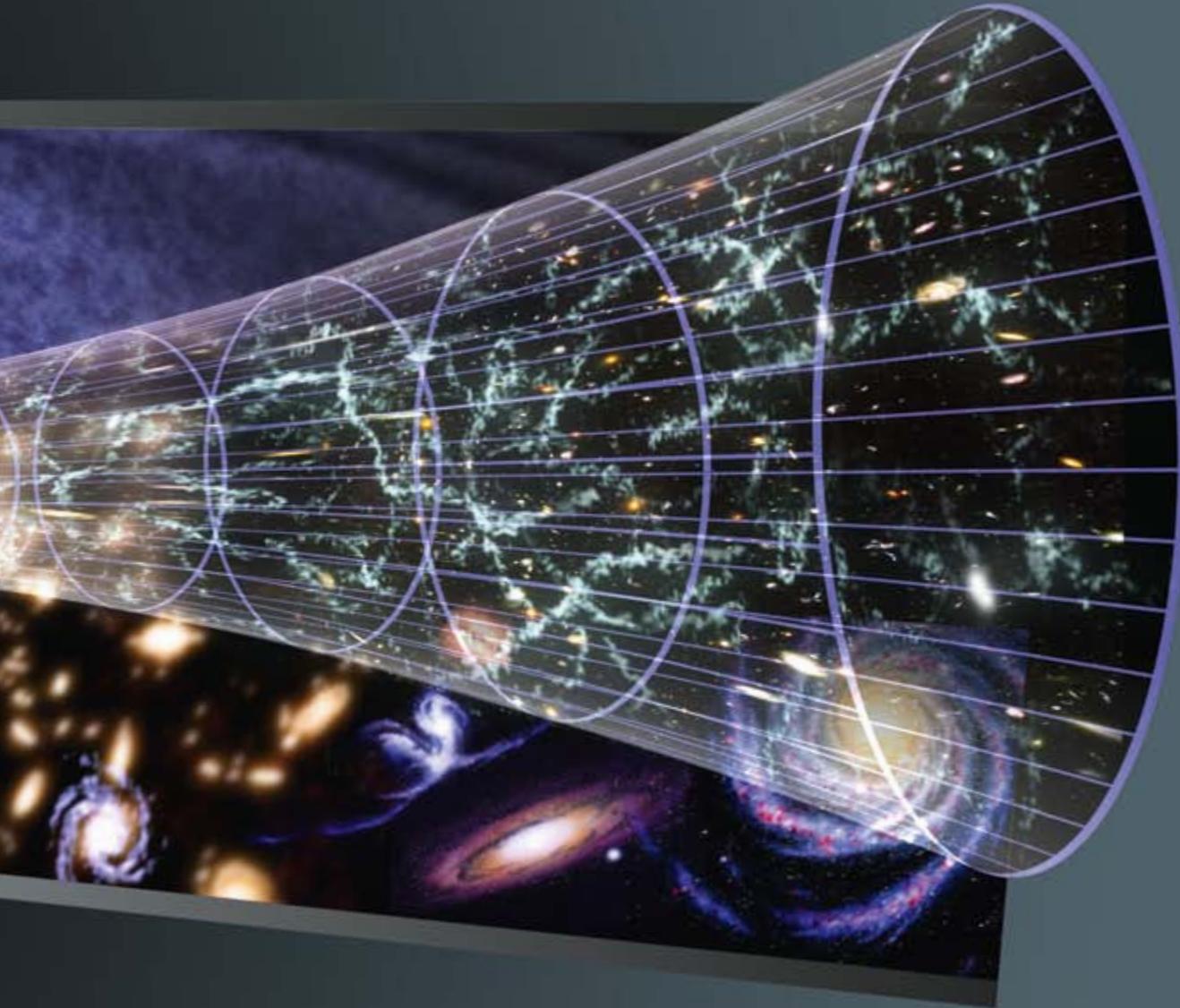
Poco después de la gran explosión se generó un fondo de ondas gravitacionales que aún hoy permea el universo. Su detección permitiría observar cómo era el cosmos una fracción de segundo después de su origen

Daniel G. Figueroa y Juan García-Bellido

Juan García-Bellido es investigador en el Instituto de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Sus intereses se centran en la cosmología teórica, la formación de galaxias y la naturaleza de la materia y la energía oscura. Ha destacado por sus aportaciones al campo de la cosmología inflacionaria.



Daniel G. Figueroa se doctoró en cosmología teórica en el Instituto de Física Teórica de Madrid en 2010. Tras dos años en la Universidad de Helsinki, actualmente trabaja en el departamento de física teórica de la Universidad de Ginebra. Investiga la conexión entre física de partículas y cosmología.



EN SÍNTESIS

Según la teoría de la inflación cósmica, durante la primera fracción de segundo el universo habría sufrido una fase de expansión exponencial.

Justo después, la energía responsable de ese estiramiento primigenio se habría transformado en toda la materia y radiación que hoy llenan el cosmos.

Dicho proceso de creación de materia y radiación tuvo que emitir una ingente cantidad de ondas gravitacionales.

Esas ondas podrían ser detectadas en un futuro próximo. Su descubrimiento permitiría descifrar la física de los primeros instantes del universo.

NUESTRO CONOCIMIENTO ACTUAL DEL UNIVERSO SE basa en la teoría de la gran explosión. Esta explica la evolución del cosmos desde la primera fracción de segundo después de su nacimiento hasta nuestros días, unos 13.700 millones de años más tarde. Ese primer instante, sin embargo, continúa planteando grandes retos teóricos. ¿Sería posible acceder experimentalmente a él? Por extraordinario que parezca, la respuesta bien podría ser afirmativa.

Hoy sabemos que el origen de nuestro universo se caracterizó por procesos físicos de energías extraordinariamente elevadas. Uno de ellos fue la creación de toda la materia y radiación que contiene el cosmos actual. De acuerdo con la teoría cosmológica más aceptada, la materia no se creó en el mismo instante en que nació el universo, sino una minúscula fracción de segundo después. Ese proceso tuvo lugar de manera tan violenta que debió provocar una ingente emisión de ondas gravitacionales. Desde entonces, esas ondas habrían estado propagándose libremente por el cosmos, portando consigo la información de lo que sucedió en aquel instante.

En una serie de trabajos publicados a lo largo de los últimos años, hemos analizado en detalle varias formas en las que pudo transcurrir la producción primigenia de materia y energía en el universo. Nuestro trabajo nos ha permitido predecir las características de las ondas gravitacionales que se emitieron entonces. Bajo ciertos supuestos, su amplitud y frecuencia se hallarían al alcance de la próxima generación de detectores de ondas gravitacionales. De ser así, ese fondo fósil de radiación gravitatoria nos abriría las puertas a una vía de investigación nunca antes explorada. Los primeros instantes del universo nos serían revelados.

Cabe subrayar que, hasta ahora, la señal cósmica más antigua que hemos sido capaces de detectar es la radiación electromagnética del fondo cósmico de microondas (CMB, por sus siglas en inglés), la cual fue emitida cuando el universo tenía 380.000 años. Se trata sin duda de una fuente de incalculable valor en la investigación del universo primitivo, pues data de cuando el cosmos apenas tenía el 0,003 por ciento de su edad actual. Sin embargo, palidece en comparación con la posibilidad de observar cómo era el universo justo después de su origen.

LA VERDADERA GRAN EXPLOSIÓN

La teoría de la gran explosión fue propuesta durante el primer tercio del siglo xx. Según su versión moderna, el universo nació hace 13.700 millones de años. En sus inicios, ocupaba un volumen ínfimo y se encontraba en un estado extremadamente denso y caliente. Desde entonces ha venido expandiéndose y enfriándose, en un proceso que, a lo largo de miles de millones de años, ha dado lugar a los átomos, las estrellas y las galaxias que conforman el universo actual.

Dicho modelo de evolución cósmica se apoya en la relatividad general (la teoría moderna de la gravedad, formulada por Albert Einstein en 1915) y en tres hechos empíricos muy robustos: la recesión observada de las galaxias lejanas; la abundancia relativa de elementos químicos ligeros (hidrógeno, helio y litio, creados pocos minutos después de la gran explosión) y la existencia de un fondo cósmico de radiación de microondas.

Esa radiación fue emitida en todos los puntos del espacio unos 380.000 años después de la gran explosión. En ese momento, el universo se enfrió lo suficiente como para que electrones y protones pudieran combinarse y formar los primeros átomos neutros. Dado que la radiación electromagnética no interacciona con la materia neutra, a partir de entonces los fotones quedaron libres para propagarse por el espacio y atravesar largas distancias. Dicha radiación, que aún hoy continúa llegando hacia nosotros,

constituye la luz más antigua que podemos ver: antes de ser emitida, el universo se encontraba lleno de un plasma de partículas cargadas que, como una niebla impenetrable, dispersaba continuamente la luz. Por tanto, ninguna señal electromagnética anterior a aquella época ha podido sobrevivir hasta nuestros días.

Sin embargo, a pesar de sus éxitos predictivos, la teoría de la gran explosión no explica la extraordinaria homogeneidad, isotropía y planitud (ausencia de curvatura espacial) que exhibe el cosmos actual a gran escala. Todas las observaciones modernas confirman que el universo presenta el mismo aspecto en todo lugar y en toda dirección hacia la que miremos. Para acabar adquiriendo esa tremenda uniformidad, el cosmos primigenio tendría que haber comenzado en un estado sumamente regular y plano desde el principio: unas condiciones muy improbables para las que la teoría no encuentra ninguna justificación. Además, el modelo de la gran explosión tampoco aclara el origen de las fluctuaciones iniciales en la densidad de materia, los «grumos» en la sopa primigenia que hoy sabemos que fueron necesarios para que, miles de millones de años después, se formasen por atracción gravitatoria las galaxias, los cúmulos y los supercúmulos de galaxias. Por último, tampoco sabemos qué mecanismos detonaron la gran explosión.

La teoría de la inflación cósmica fue propuesta hace unos treinta años para resolver esas dificultades. Por inflación entendemos un período muy breve al comienzo del universo en el que una densidad de energía aproximadamente constante habría provocado que el espacio se expandiese a un ritmo exponencial. Se cree que dicha energía se hallaba asociada a cierto campo físico, el inflatón, el cual solo habría existido durante aquellos primeros instantes. Los diferentes modelos estiman que el período inflacionario duró muy poco, entre 10^{-35} y 10^{-10} segundos. Con todo, ese brevísimo lapso de tiempo bastó para que cada dirección del espacio aumentase su tamaño en el increíble factor de 10^{26} , si no más. Las proporciones de aquel estiramiento primigenio fueron tan colosales que toda irregularidad inicial habría quedado «diluida» desde el principio. Así pues, la inflación constituye una hipótesis elegante que, sin necesidad de imponer condiciones iniciales *ad hoc*, explica la casi perfecta homogeneidad, isotropía y planitud del cosmos actual.

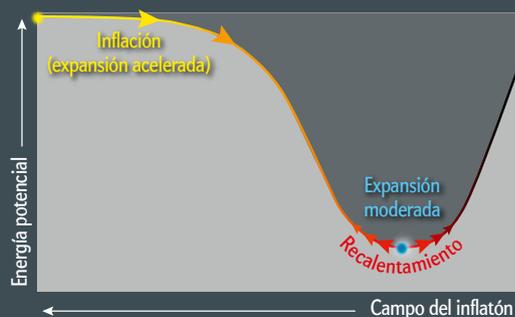
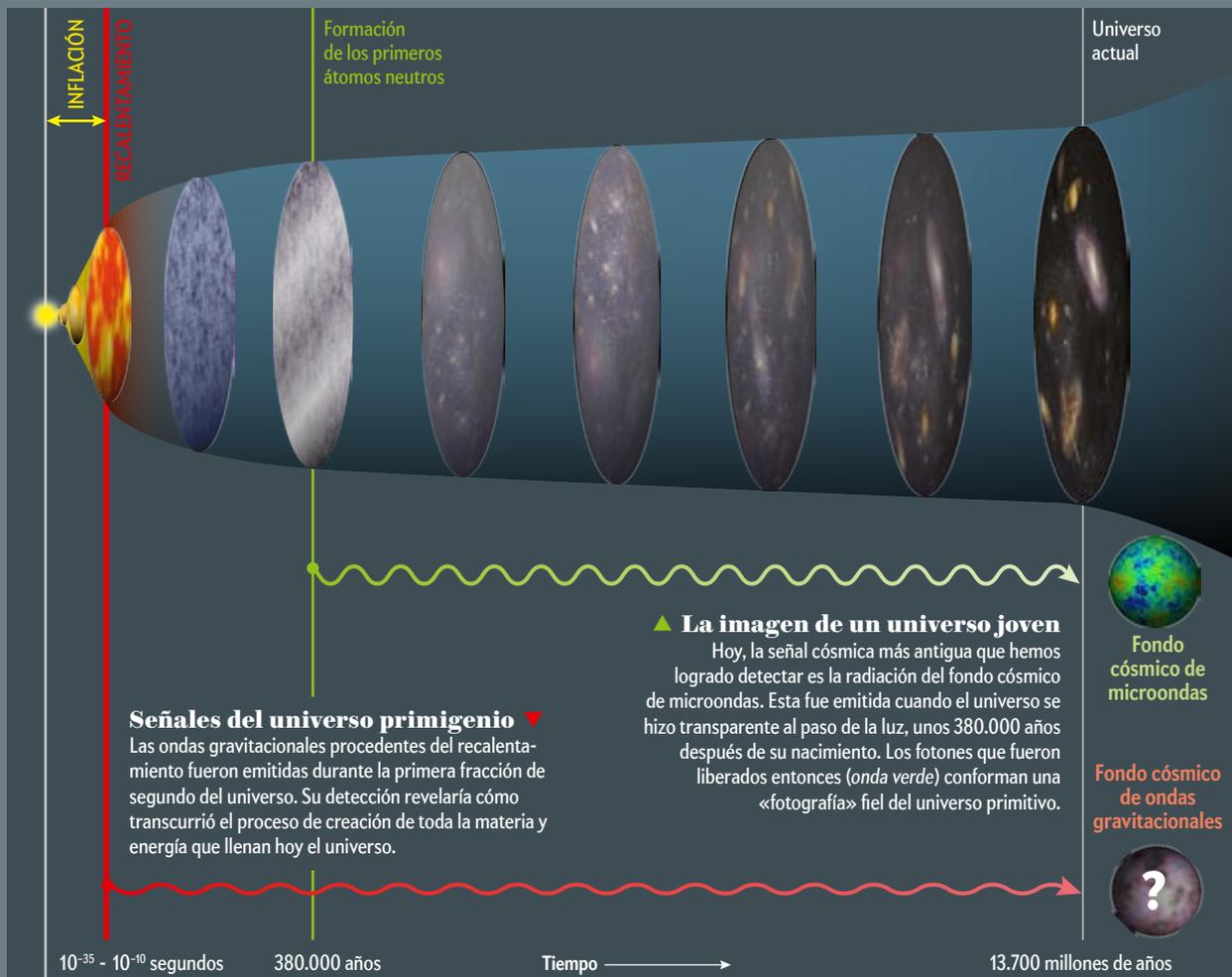
Además, según las leyes de la mecánica cuántica, el campo del inflatón no pudo haber sido completamente uniforme. Como todo campo cuántico, debió experimentar pequeñas fluctuaciones aleatorias. Según la teoría de la relatividad general, aquellas fluctuaciones tuvieron que provocar leves distorsiones en la geometría del espaciotiempo, las cuales, dilatadas por la gran expansión, acabaron generando los grumos iniciales en la distribución de materia.

Las huellas de la (verdadera) gran explosión

La teoría de la inflación cósmica postula que, durante su primera fracción de segundo, el universo experimentó una expansión de proporciones descomunales (amarillo). Esta fue provocada por la densidad de energía asociada al inflatón, un campo físico de efectos repulsivos que habría llenado el universo primigenio. Durante la inflación, el universo se encontraba frío y «vacío»; después, la misma energía que estiró el espacio se convirtió en toda la materia y la radiación que contiene el cosmos actual. Ese proceso, conocido como recalentamiento (rojo), se interpreta

hoy como la verdadera gran explosión de la teoría. Tras el recalentamiento, la expansión cósmica continuó a una tasa mucho más moderada (azul).

El recalentamiento del universo tuvo lugar de manera tan violenta que debió generar una enorme cantidad de ondas gravitacionales; distorsiones del espaciotiempo que se propagan a la velocidad de la luz. Esas ondas viajan aún por el cosmos. Si pudiéramos detectarlas, estaríamos observando cómo era el universo en aquellos instantes.



Conversión de la energía inflacionaria en materia

El agente responsable de la rápida expansión inicial del universo fue el inflatón, un campo físico de efectos repulsivos. Su energía potencial puede representarse en una gráfica en función del valor del campo. La región de energía elevada (meseta amarilla) se corresponde con el período inflacionario. Después, el inflatón «se deslizó» por la pendiente (naranja) para alcanzar su estado de mínima energía (azul).

En el proceso, su energía potencial se transformó en materia y radiación. Las oscilaciones en torno al mínimo (rojo) se corresponden con el recalentamiento del universo. Al desaparecer la energía inflacionaria inicial, la expansión del universo continuó, pero a un ritmo mucho más lento.

La teoría inflacionaria no solo explica de manera cualitativa el origen de esas irregularidades en el espaciotiempo; también predice sus propiedades. En particular, dichas fluctuaciones deberían ser invariantes de escala; es decir, al descomponerlas en sus longitudes de onda características, todas ellas deberían mostrar aproximadamente la misma amplitud. Este patrón, que constituye una predicción muy distintiva de un período de inflación, coincide con el observado en la radiación del fondo cósmico de microondas. Aunque esperaríamos que el CMB fuese uniforme, hoy sabemos que la temperatura de los fotones que lo componen presenta pequeñas anisotropías, del orden de unas pocas partes por cien mil. Dichas variaciones fueron descubiertas en los años noventa por el satélite COBE, de la NASA; un hallazgo que merecería el premio Nobel de Física en 2006. Análisis subsiguientes realizados a comienzos del presente siglo por su sucesor, el satélite WMAP, permitieron confirmar que el espectro de las anisotropías del fondo cósmico de microondas es aproximadamente invariante de escala. Por otro lado, también la distribución cósmica de galaxias obedece al mismo patrón. Las observaciones confirman, por tanto, que el espectro de perturbaciones del espaciotiempo a gran escala se corresponde con el predicho por la teoría inflacionaria.

Por último, si nos preguntamos acerca del origen de la materia y la radiación que hoy existen en el universo, la teoría inflacionaria nos da también una respuesta: procederían de la misma densidad de energía que causó la expansión primordial. Durante la inflación el universo estaba vacío y extremadamente frío, con el inflatón como el único grado de libertad activo. Cuando la expansión exponencial tocó a su fin, la energía potencial del inflatón se convirtió en materia y energía cinética. Dicho proceso se conoce con el nombre de recalentamiento —llamado así por razones históricas, si bien hoy no nos consta que el universo hubiera estado caliente con anterioridad—. Esa violenta conversión de la energía inflacionaria en materia dio lugar a violentas ondas de choque: literalmente, como en una gran colisión. De ahí que el recalentamiento se interprete hoy como la verdadera gran explosión de la teoría original. De hecho, fue du-

rante el recalentamiento del universo cuando se generó la enorme entropía —entendida como grados de libertad independientes— que caracteriza al cosmos actual.

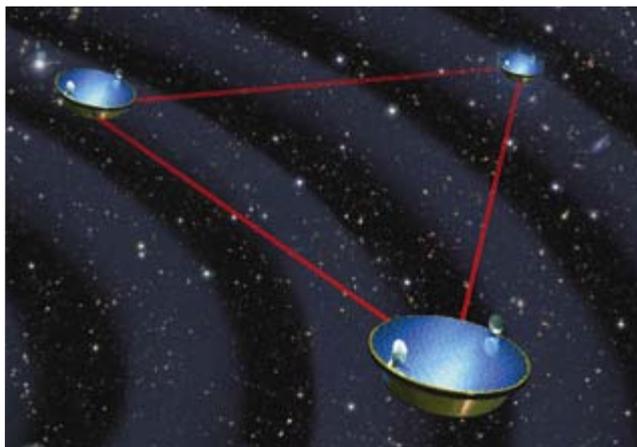
MENSAJEROS SIDERALES

La materia que se creó durante el recalentamiento poseía densidades extremas, se propagaba a velocidades muy cercanas a la de la luz y colisionaba constantemente entre sí. Por tanto, según la teoría de la relatividad general, una fracción considerable de su energía tuvo que convertirse en ondas gravitacionales. Debido a que la interacción gravitatoria es muy débil, dichas ondas se desacoplaron inmediatamente del plasma, por lo que desde entonces habrían estado viajando sin impedimento hacia nosotros. Dado que aquello sucedió a la vez en todos los puntos del espacio, esa radiación gravitatoria debería formar hoy un fondo fósil: un remanente de aquellos primeros instantes que, procedente de todas las direcciones, inundaría todo el universo (de modo análogo a como ocurre con la radiación electromagnética del CMB, pero con la diferencia de que este fue generado cientos de miles de años más tarde).

Las ondas gravitacionales son «arrugas» del espaciotiempo que se propagan a la velocidad de la luz. Constituyen una de las predicciones más firmes de la teoría de la relatividad general de Einstein, según la cual se emiten cuando objetos de gran masa alcanzan velocidades cercanas a la de la luz. Así ocurre en los sistemas binarios de agujeros negros, en las explosiones de supernova y en otros fenómenos astrofísicos violentos. De la misma manera que la electrodinámica nos permite calcular el ritmo al que una carga eléctrica oscilante emite radiación electromagnética, la teoría de la relatividad general nos permite calcular la tasa a la que un sistema estelar binario radia energía en forma de ondas gravitacionales. El primer púlsar binario (sistemas formados por dos estrellas de neutrones en rápida rotación) fue descubierto en 1974 por Russell A. Hulse y Joseph H. Taylor, quienes en 1993 recibirían por ello el premio Nobel. Dicho hallazgo y otros posteriores han permitido confirmar de manera indirecta la existencia de ondas gravitacionales, pues en tales sistemas se observa una pérdida paulatina de energía que coincide, en unas pocas partes por mil, con las predicciones de la relatividad general.

Sin embargo, hasta ahora ningún dispositivo ha logrado detectar ondas gravitacionales de forma directa. La interacción gravitatoria es tan débil que el objetivo plantea enormes dificultades técnicas. A tal fin existen en la actualidad varios proyectos en marcha o en fase de desarrollo. El Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO), en EE.UU., consta de dos interferómetros láser situados a 3000 kilómetros de distancia y cuyo intervalo de detección cubre desde las decenas de hercio hasta varios kilohercios. De cara al futuro se ha considerado el diseño de interferómetros espaciales, como la Antena Espacial de Interferometría Láser (LISA, un sistema de satélites proyectado originalmente por la NASA y la ESA) o el Observatorio de la Gran Explosión (BBO, con un diseño más futurista), con los que se espera detectar frecuencias más bajas y amplitudes mucho menores. Tales experimentos podrían observar ondas gravitacionales procedentes de fenómenos astrofísicos violentos en un futuro próximo; tal vez a lo largo de la presente década.

Como ocurre en todo proceso ondulatorio, la frecuencia de las ondas gravitacionales depende del sistema físico que las generó. La emisión de ondas gravitacionales durante el recalentamiento del universo fue analizada en 1997 por S. Khlebnikov,



Antenas cósmicas: Las ondas gravitacionales son perturbaciones en el espaciotiempo que se propagan a la velocidad de la luz. Los métodos propuestos para detectarlas se basan en sistemas de espejos con interferómetros láser. El paso de radiación gravitatoria provoca ligeras variaciones en la posición de los espejos, las cuales son amplificadas por los interferómetros. La imagen ilustra el diseño de LISA, un sistema de tres satélites en caída libre proyectado originalmente por la NASA y la ESA.

Recalentamiento y ondas gravitacionales

El recalentamiento del universo (la conversión de la energía inflacionaria en materia) fue un fenómeno tan explosivo que debió generar una gran cantidad de ondas gravitacionales. Estas formarían hoy un fondo cósmico «fósil» remanente de aquellos instantes. Sin embargo, desconocemos la naturaleza física del inflatón, por lo que ignoramos en qué clase de campos de materia (escalares, vectoriales o fermiónicos) pudo acabar convirtiéndose.

Mediante cálculos analíticos y simulaciones informáticas, los autores han analizado los principales escenarios posibles y han

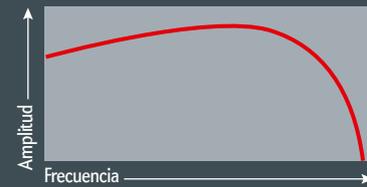
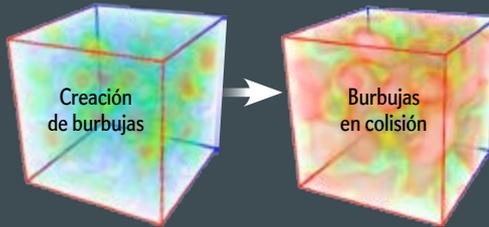
calculado la impronta que cada uno de ellos debería haber dejado en el fondo cósmico de ondas gravitacionales. Cada escenario produce una señal fácilmente reconocible, por lo que la detección de dicho fondo permitiría descartar familias enteras de modelos inflacionarios y descifrar numerosas incógnitas acerca de la física del cosmos primigenio. A continuación se reproducen dos ejemplos simplificados de modelos de recalentamiento (*izquierda*), así como el espectro de ondas gravitacionales asociado a cada uno (*derecha*).

Modelos de recalentamiento

Espectro de ondas gravitacionales

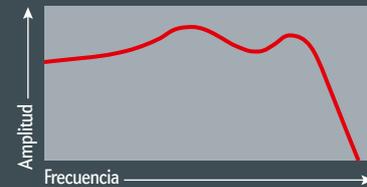
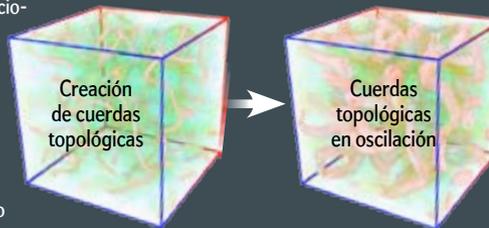
Campos escalares

La producción de campos escalares (partículas de espín cero, como el bosón de Higgs) procede mediante la formación de burbujas de materia. Estas se expanden y acaban colisionando entre sí, tras lo cual se fragmentan y generan un flujo turbulento.



Campos escalares y vectoriales

Al añadir al modelo campos vectoriales (partículas de espín uno, como el fotón), las concentraciones iniciales de energía adoptan la forma de cuerdas topológicas, configuraciones especiales de estructura longitudinal. A medida que transcurre el tiempo, la geometría de dichas cuerdas se va definiendo mejor. La generación y dinámica de estas estructuras genera más ondas gravitacionales, lo que produce un espectro distinto al del caso anterior.



DE: «GRAVITATIONAL WAVES FROM ABELIAN GAUGE FIELDS AND COSMIC STRINGS AT PREHEATING», JEAN-FRANÇOIS DUFAUX, DANIEL G. FIGUEROA Y JUAN GARCÍA-BELLIDO EN PHYSICAL REVIEW D 82, 083518, OCTUBRE DE 2010 (simulaciones y espectros)

de la Universidad Purdue, y I. Tkachev, de la Universidad estatal de Ohio y el Instituto para la Investigación Nuclear ruso; y, un año después y de manera independiente, por uno de nosotros (García-Bellido). Aquellos trabajos demostraron que las ondas gravitacionales procedentes del recalentamiento del universo podrían estar llegando hoy hasta nosotros con un espectro cuyo pico de frecuencias podría hallarse entre el hercio y el gigahercio.

En caso de detectarlo en un futuro, la forma de reconocer dicho fondo sería a partir de sus características espectrales; es decir, mediante el estudio de la intensidad de cada una de las frecuencias simples que lo componen. En general, el perfil de un espectro ondulatorio codifica los detalles del proceso de emisión de las ondas. Si consideramos el caso del fondo cósmico de microondas, por ejemplo, veremos que su espectro coincide con el de un cuerpo negro (un emisor perfecto) a una temperatura de 2,73 grados Kelvin. Ello se debe a que, en el momento en que fueron liberados, los fotones del CMB se encontraban en equilibrio térmico con el plasma (si bien su temperatura en aquel entonces era unas mil veces superior a la que observamos hoy). Por el contrario, la emisión de ondas gravitacionales durante el recalentamiento tuvo lugar cuando se estaba creando toda la materia y la radiación, en una situación muy alejada del equilibrio térmico. De hecho, su espectro debería asemejarse a uno de tipo turbulento, lo cual debería permitirnos extraer gran can-

tidad de información sobre aquellos primeros instantes del universo. Sus detalles podrían aportar la clave para entender fenómenos hoy tan misteriosos como la generación de la asimetría entre materia y antimateria, el origen de los campos magnéticos primordiales o incluso el origen de la materia oscura.

MODELOS DE RECALENTAMIENTO

Ignoramos la naturaleza física del inflatón y los pormenores del proceso de recalentamiento. En particular, desconocemos cómo interactuaba el inflatón con otras especies de materia, por lo que no sabemos a qué clase de campos dio lugar. En principio, la energía inflacionaria pudo haber generado materia de tipo escalar (sin momento angular intrínseco, como el bosón de Higgs), campos vectoriales (como el asociado al fotón o a los bosones W y Z) o materia fermiónica (del mismo tipo que los electrones o los quarks). Pudo incluso haber generado especies que aún no hemos descubierto, las cuales, más tarde, habrían dado lugar a la materia que conocemos. Ignoramos también la escala típica de energías de los fenómenos de física de partículas implicados: por lo que sabemos, la energía característica de aquellos procesos pudo hallarse entre 100 y 10^{15} gigaelectronvoltios.

Sin embargo, sí podemos aventurar ciertas propiedades genéricas del recalentamiento. Cuando terminó la inflación, el campo del inflatón debía constituir un condensado de Bose-Einstein; una configuración caracterizada por que todos los

cuantos que la conforman poseen la misma energía. Ello implica que la conversión de la energía del inflatón en otras especies de materia pudo proceder mediante efectos no perturbativos, fenómenos colectivos muy especiales que permiten que una especie dada pueda transformarse en otras de masa incluso más elevada. Además, dichos procesos ocurren a un ritmo mucho más rápido que los ordinarios, por lo que el inflatón se habría transformado en otras formas de materia a un ritmo exponencial, mediante un proceso explosivo muy violento.

A partir de aquí, podemos calcular las huellas que cada tipo de escenario debería haber dejado en el espectro del fondo cósmico de ondas gravitacionales. La hipótesis más sencilla de desarrollar —no por ello más o menos realista que otras— procede de suponer que el condensado del inflatón interactuaba solo con materia de tipo escalar. Bajo esta suposición, en un artículo publicado en 2007 consideramos la producción de ondas gravitacionales en varios modelos inflacionarios. Todos ellos comparten la propiedad de que, mediante efectos no perturbativos, el recalentamiento transcurre mediante la formación de grandes burbujas de energía en determinadas regiones del espacio. Dichas burbujas vendrían a ser ondas de materia muy localizadas y dotadas de una gran energía cinética, las cuales se expanden a velocidades próximas a la de la luz y acaban colisionando entre sí. Esos choques las fragmentan y crean nuevas ondas de materia de longitud de onda menor. Al cabo de cierto tiempo, las ondas originales se han esparcido por todo el espacio y se comportan como un fluido turbulento. Todo ello ocurre

en una pequeñísima fracción de segundo. Al final, el sistema alcanza el equilibrio térmico; es decir, una temperatura común.

El aspecto de mayor relevancia reside en que los primeros estadíos se corresponden con un flujo de materia tan violento que las ondas gravitacionales emitidas poseen una gran amplitud. En un buen número de modelos inflacionarios esa amplitud es de hecho enorme, correspondiente a una millonésima parte de toda la energía disponible; pero, por desgracia, su espectro se encuentra centrado en frecuencias muy superiores a aquellas a las que serán sensibles los detectores de ondas gravitacionales actualmente en construcción. Sin embargo, en nuestro trabajo de 2007 predecimos por primera vez la existencia de un fondo de ondas gravitacionales que podría ser detectado por los próximos sistemas de satélites (en concreto, por BBO y DECIGO, el observatorio de ondas gravitacionales propuesto por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial). Dicho fondo sería observable si el recalentamiento hubiese tenido lugar de acuerdo con cierto modelo inflacionario de baja energía. Poco después, varios grupos confirmaron nuestra predicción teórica y se propusieron nuevos experimentos para detectarlo.

Una pega de la que adolecen los modelos que solo incluyen campos escalares radica en que, a menudo, estos suelen acoplarse a campos vectoriales. Así pues, hace dos años, en colaboración con Jean-François Dufaux, del CNRS francés, extendimos nuestro trabajo a escenarios en los que el inflatón interactúa también con este tipo de campos. Hallamos que, en tales casos, la creación de campos vectoriales procede mediante la aparición

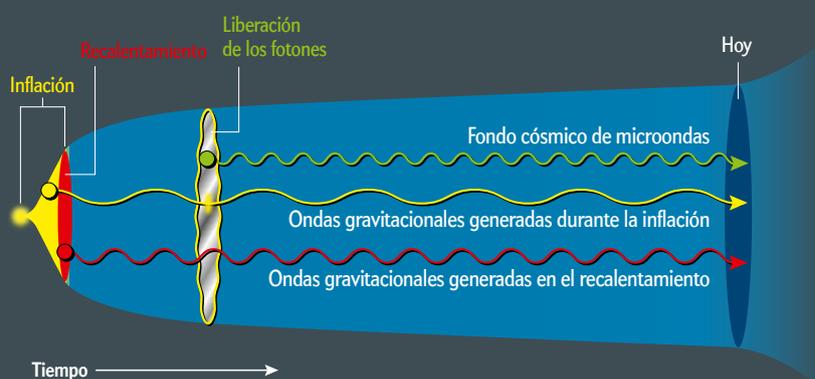
de defectos topológicos de tipo cuerda, ciertas configuraciones de energía dotadas de estructura longitudinal. Estas actúan como una nueva fuente de radiación gravitatoria que se suma a la creada por los campos escalares.

El espectro creado por las cuerdas topológicas posee una frecuencia característica determinada por la masa efectiva de los campos vectoriales (la cual, a su vez, establece el grosor de las cuerdas topológicas). Tales escenarios no solo proporcionan modelos más completos, sino que predicen una signatura observacional única: un espectro de ondas gravitacionales con dos máximos locales bien diferenciados, uno debido a la dinámica de los campos escalares y otro originado por las cuerdas topológicas. Desde el punto de vista empírico, esta característica constituye una rúbrica idónea para distinguir dicho modelo de otros. Además, las configuraciones de campos vectoriales son un candidato ideal para dar cuenta de los campos magnéticos primordiales que, más tarde, serían amplificados por mecanismos de tipo dinamo en las galaxias y cúmulos de galaxias hasta generar los campos magnéticos que hoy permean el universo a casi todas las escalas [véase «Campos magnéticos cósmicos», por Klaus G. Strassmeier; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2010].

FONDOS CÓSMICOS

Otras signaturas del proceso inflacionario

El paradigma inflacionario predice dos fondos de ondas gravitacionales: uno emitido durante el período inflacionario (generado por la rápida expansión del espacio, *amarillo*) y otro posterior, procedente del recalentamiento (debido a la violenta conversión de la energía inflacionaria en materia, *rojo*).

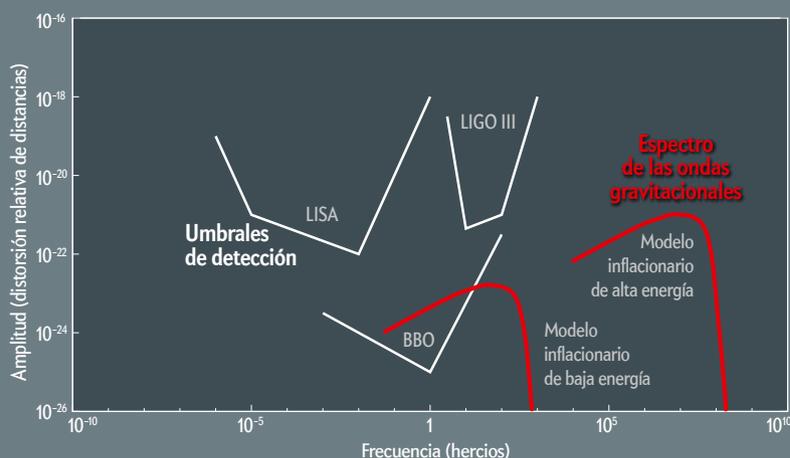


El primero habría dejado su impronta en la polarización de los fotones que componen el fondo cósmico de microondas (*verde*). Con suerte, esta señal podría ser detectada en breve por el satélite Planck, de la ESA. El análisis completo de sus datos se espera para principios de 2013.

Por su parte, las ondas gravitacionales generadas durante el recalentamiento podrían ser detectadas por antenas gravitacionales basadas en interferometría láser. Ambos fondos se diferencian en la amplitud, el intervalo de frecuencias y los detalles de su espectro, lo que permitiría reconocerlos con facilidad.

¿Detección futura?

El fondo de ondas gravitacionales generado durante el recalentamiento tal vez sea observado por la próxima generación de detectores de ondas gravitacionales. Esta gráfica muestra, en función de la frecuencia y la amplitud de las ondas (medida en términos de la distorsión relativa de distancias que provocan), los umbrales de detección de los proyectos LISA, LIGO III y BBO. Ciertos modelos inflacionarios de baja energía predicen una señal que cae dentro del umbral de detección de los futuros observatorios.



Por último, cabe considerar modelos de recalentamiento en los que la energía inflacionaria da lugar a materia fermiónica. Desde un punto de vista matemático, sin embargo, los fermiones resultan mucho más difíciles de tratar que los campos escalares o vectoriales, motivo por el que hasta la fecha los estudios han sido escasos. Con todo, en un trabajo publicado hace unos meses por uno de nosotros (Figuroa) junto con Kari Enqvist y Tuukka Meriniemi, de la Universidad de Helsinki, calculamos por primera vez la producción de radiación gravitatoria en un modelo de recalentamiento fermiónico. Como consecuencia del principio de exclusión de Pauli, que establece que dos fermiones idénticos nunca pueden ocupar el mismo estado cuántico a la vez, los fermiones son creados por efectos no perturbativos en una configuración energética que crece de manera gradual, denominada esfera de Fermi. La amplitud del fondo de ondas gravitacionales asociado podría tener una amplitud enorme, muy superior a la mínima requerida por los observatorios futuros. Al igual que en los modelos que solo incluyen campos escalares, en la mayoría de los escenarios su espectro se hallaría centrado en frecuencias demasiado elevadas para ser detectadas. Sin embargo, en ciertos modelos inflacionarios de baja energía, las ondas generadas se podrían encontrar dentro de los umbrales de detección de los futuros sistemas BBO y DECIGO.

UNA NUEVA TÉCNICA OBSERVACIONAL

La idea de que el universo experimentó una fase de expansión exponencial durante sus primeros instantes constituye, desde hace treinta años, la hipótesis más robusta para despejar las incógnitas que encierra la teoría de la gran explosión. Todas las observaciones recientes, tanto las referentes a la distribución de materia en el universo a gran escala como las relativas a la radiación del fondo cósmico de microondas, no han hecho sino confirmar las predicciones de la teoría inflacionaria. No obstante, todavía no disponemos de una prueba irrefutable del período de inflación. De hecho, a pesar de su amplia aceptación entre la comunidad científica, algunos reconocidos cosmólogos muestran también su escepticismo [véase «La inflación a debate», por Paul J. Steinhardt; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2011].

La búsqueda de ondas gravitacionales procedentes del recalentamiento del universo podría cubrir ese hueco. Si algún proceso de tipo inflacionario tuvo efectivamente lugar, buena parte de sus características habrían quedado codificadas en el espectro energético de dicha radiación gravitatoria. Su detec-

ción nos permitiría descartar familias enteras de modelos inflacionarios e incluso inferir numerosas características sobre el modelo de física de altas energías que regía en aquellos primeros instantes del universo. Sin duda, merece la pena investigar con mayor detalle la información contenida en las propiedades espectrales de esta reliquia cósmica.

Nuestras posibilidades de éxito dependerán de la capacidad de los futuros detectores. Estos se basan en grandes espejos en suspensión (en caída libre en el caso de LISA), cuya distancia mutua experimenta una modulación periódica como consecuencia de las distorsiones provocadas por el paso de una onda gravitacional. Gracias a interferómetros láser, el efecto es amplificado y detectado como una señal sobre un fondo de ruido. Los detectores actuales más sensibles, como los de LIGO, pueden distinguir distorsiones de una parte en 10^{21} ; es decir, son sensibles a diferencias de distancias mil veces menores que un núcleo atómico. En un futuro próximo se espera lograr una capacidad de detección mil veces mayor. Ello podría bastar para observar las ondas gravitacionales generadas durante el recalentamiento.

La detección directa de ondas gravitacionales constituye uno de los mayores retos a los que se enfrenta la comunidad científica en estos momentos. Su logro supondría un avance comparable a la revolución que experimentó la astronomía con la apertura de las sucesivas ventanas observacionales a las ondas de radio, la radiación infrarroja o ultravioleta, o a los rayos X y gamma. Creemos que no debemos perder esta oportunidad para mirar atrás en el tiempo y descifrar la física que caracterizó los orígenes de nuestro universo.

PARA SABER MÁS

El universo inflacionario. Alan H. Guth y Paul J. Steinhardt en *Investigación y Ciencia* n.º 94, julio de 1984.

El universo inflacionario autorregenerante. Andrei Linde en *Investigación y Ciencia* n.º 220, enero de 1995.

La detección de las ondas gravitatorias. Peter S. Shawhan en *Investigación y Ciencia* n.º 349, octubre de 2005.

A stochastic background of gravitational waves from hybrid preheating. Juan García-Bellido y Daniel G. Figuroa en *Physical Review Letters*, vol. 98, 061302, febrero de 2007. Disponible en arxiv.org/astro-ph/0701014.

Gravitational waves from abelian gauge fields and cosmic strings at preheating. Jean-François Dufaux, Daniel G. Figuroa y Juan García-Bellido en *Physical Review D* 82, 083518, octubre de 2010. Disponible en arxiv.org/abs/1006.0217.

Stochastic background of gravitational waves from fermions. Kari Enqvist, Daniel G. Figuroa y Tuukka Meriniemi en *Physical Review D* 86, 061301, septiembre de 2012. Disponible en arxiv.org/abs/1203.4943.