

DEFECTOS DEL UNIVERSO

La radiación electromagnética más antigua que recibimos nos proporciona información clave acerca del universo. El posible descubrimiento de un defecto cósmico abriría una nueva perspectiva en estos campos de la física

MARCOS CRUZ

Hasta la Tierra llega todo tipo de radiaciones electromagnéticas provenientes del espacio, desde las poco energéticas ondas de radio hasta los poderosos rayos X o rayos gamma, pasando por la luz visible.

En el rango de frecuencias de las microondas, se puede observar una débil señal que llega de todas las direcciones del espacio con la misma intensidad: la radiación cósmica del fondo de microondas (RFCM). Esta radiación es una fuente de información única para estudiar el origen del universo, pues se emitió hace unos 13.700 millones de años. La RFCM constituye, por tanto, una instantánea de un universo primitivo donde aún no había estrellas ni galaxias, ni, por supuesto, vida.

La gran explosión

La RFCM es uno de los pilares básicos de la teoría de la gran explosión, formulada en 1948 por el ruso George Gamow, de la Universidad de Washington D.C., y sus colaboradores. Según dicha teoría, el universo se originó hace miles de millones de años, partiendo de una temperatura y densidad increíblemente elevadas. A medida que se retrocede por el pasado, la temperatura y la densidad aumentan hasta alcanzar temperaturas y densidades infinitas hace unos 14.000 millones de años. A esa singularidad inicial se le llama *Big Bang* o gran explosión.

Hasta 10^{-43} segundos después de la gran explosión, dominaban los efectos cuánticos de la gravedad, que aún nos son desconocidos. No podemos aplicar a ese período las leyes actuales de la física. A partir de un segundo después de la gran explosión, resultan ya operativas las

leyes de la física, que nos capacitan para entender y describir lo ocurrido entonces. La gran explosión no ocurrió en un solo punto, como erróneamente se suele oír, sino en todos los puntos del espacio a la vez. Y no se conocen los confines del universo: podría ser infinito.

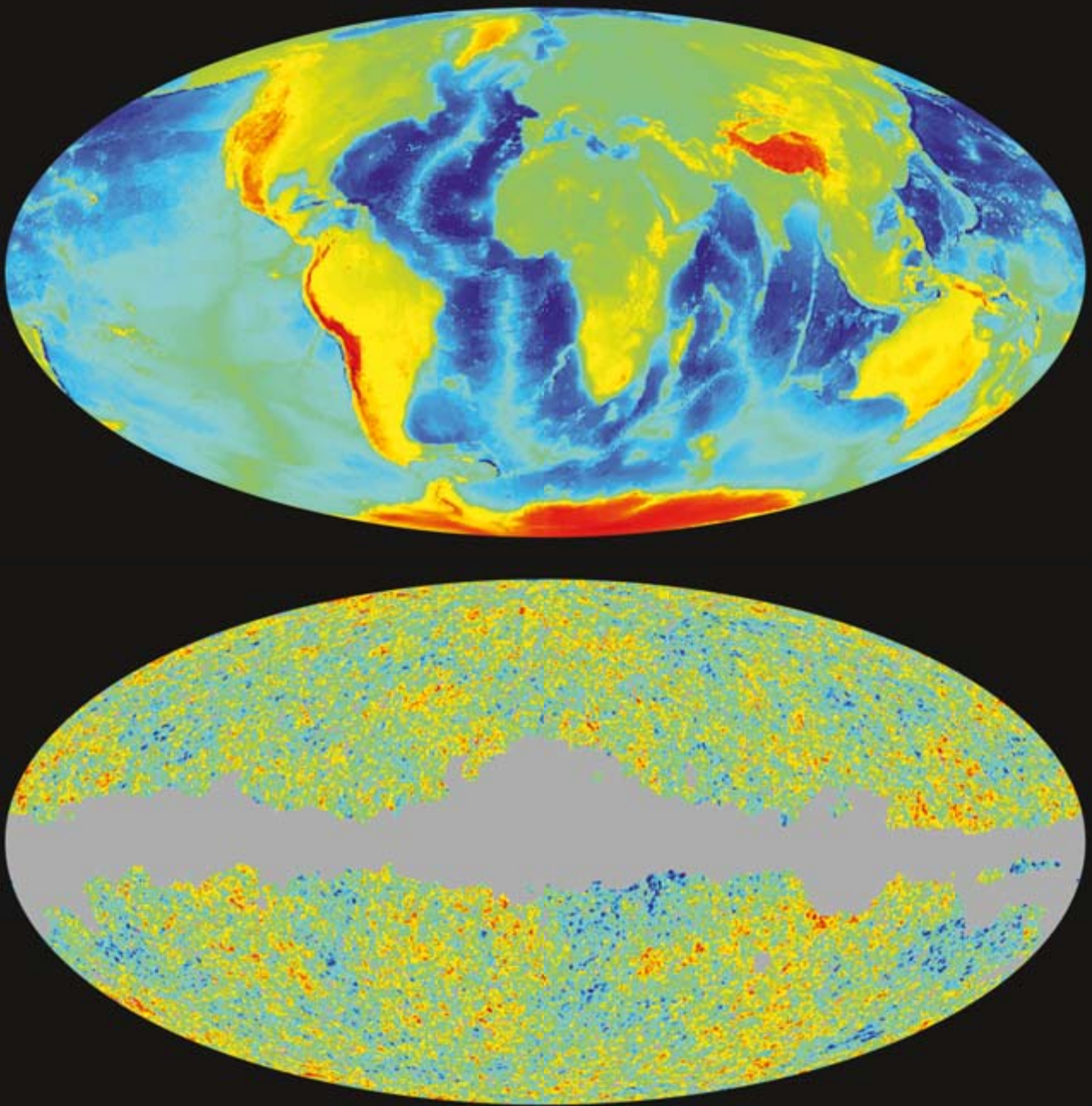
En sus primeros momentos, el universo estaba formado por una “sopa cósmica” muy homogénea de partículas elementales —quarks, gluones—, a una temperatura de billones de grados kelvin. Los quarks y los gluones son las partículas que componen las partículas nucleares (los neutrones y los protones). A temperaturas tan altas, incluso las partículas nucleares se encontraban disgregadas.

Según la teoría de la gran explosión, el universo se expandía, en concordancia con las observaciones de Edwin Hubble, del Observatorio del Monte Wilson, en Pasadena, quien había demostrado en 1929 que, en promedio, las galaxias tienden a separarse unas de otras. Más adelante se vería que ese alejamiento se debe a la propia expansión del universo, a la manera de la masa de pan con levadura. Si el universo es infinito, y de momento no tenemos constancia de que no lo sea, en nuestro ejemplo tendremos que imaginar también una masa de pan infinita, no una pequeña masa expandiéndose hacia el vacío.

La expansión iba enfriando el universo. La “sopa cósmica” o plasma fue experimentando una serie de cambios de fase análogos a la condensación del vapor de agua o la congelación del agua, en las que el agua pasa de la fase gaseosa a la líquida o de la fase líquida a la sólida. De este modo, se fueron formando, en los primeros minutos después de la gran explosión, protones, neutrones, electrones y

CONCEPTOS BÁSICOS

- A medida que se enfriaba, la “sopa caliente” que llenaba el universo en sus primeros instantes fue sufriendo cambios de fase o estado, como un gas que se licúa o un líquido que se congela.
- En esos cambios de fase pudieron aparecer defectos cósmicos, burbujas que permanecen atrapadas en el estado anterior.
- Hay diversos tipos de defectos cósmicos: paredes de dominio, cuerdas, monopolos y texturas.
- Los defectos dejarían su huella en la radiación cósmica de microondas. No se ha observado todavía ninguno. Sin embargo, una mancha grande y fría en el hemisferio sur galáctico podría deberse a una textura.



núcleos de deuterio y de helio. La teoría explicaba así la formación de núcleos ligeros y calculaba su abundancia relativa en el presente. La concordancia con las observaciones era grande.

La radiación más antigua

Los átomos neutros, es decir, aquellos que tienen igual número de protones y electrones, no se formaron hasta miles de años después. Mientras, la radiación electromagnética permanecía atrapada en el plasma, donde, por la alta temperatura, interactuaba constantemente con las partículas elementales. Las interacciones impedían que protones y electrones se juntaran para formar átomos.

Trescientos ochenta mil años después de la gran explosión, la expansión del universo había provocado que la temperatura del

universo descendiese hasta unos 3000 grados kelvin. A esa temperatura, la tasa de interacción era suficientemente baja para permitir que los electrones y protones del plasma se unieran y formasen átomos de hidrógeno. Así, la radiación ya no quedaba atrapada de rebote en rebote en las partículas del plasma. Se desacopló de la materia y escapó desde todos los puntos del universo de forma isotropa, es decir, en todas las direcciones.

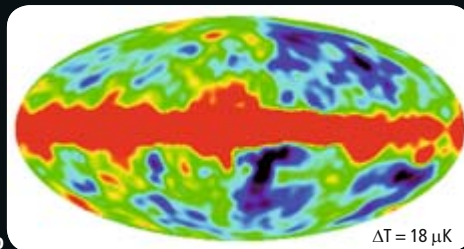
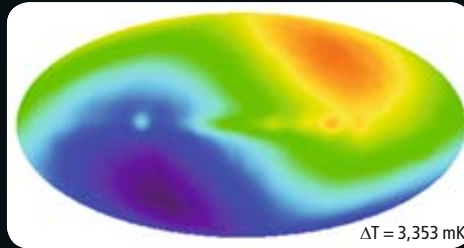
Unos 13.700 millones de años más tarde, hoy, esa radiación, que no es otra que la RFCM, sigue viajando por el espacio. Midiéndola, podemos obtener una valiosa información sobre el universo temprano.

Gamow predijo la existencia de esa radiación isotropa procedente del universo caliente y primordial, enfriada hasta sus actuales 270 grados centígrados bajo cero (unos 2,7 grados kelvin)

1. EN EL PANEL SUPERIOR se ofrece una proyección cartográfica de tipo Mollweide de la Tierra en coordenadas ecuatoriales. La gradación de colores muestra las alturas de las distintas regiones. Abajo, el tipo de proyección es el mismo pero se representa la esfera celeste en coordenadas galácticas. El eje central no es el ecuador terrestre como arriba, sino que corresponde a nuestra galaxia. La escala de colores representa las diferencias de temperatura respecto a la media de la radiación cósmica del fondo de microondas. El plano de nuestra galaxia aparece en color gris: está enmascarado porque emite radiación de microondas que contamina la señal cosmológica.

MAPAS DE LA RADIACION DE MICROONDAS DEL CIELO

MAPAS DE LA RADIACION DE MICROONDAS DEL CIELO, en proyección de Mollweide, observados por el satélite COBE de la NASA a distintas escalas. En el panel superior se representan los datos en un rango de 0 a 4 grados kelvin, se aprecia la uniformidad de la radiación cósmica del fondo de microondas, ya que la señal recibida es prácticamente idéntica en todas las direcciones del espacio. Restando la media y reduciendo la escala unas 1000 veces, vemos la radiación del panel central, que es del orden de milésimas de grado kelvin. Se trata de una señal en forma de dipolo causada por nuestro movimiento local con respecto a la radiación de fondo. Cuando nos movemos en coche hacia una ambulancia en reposo, con la sirena encendida, oímos una señal más aguda que cuando nos alejamos de ella. Del mismo modo, vemos una frecuencia más alta de la RFCM en el sentido en el que nos movemos y una frecuencia más baja en el sentido contrario. Eliminando la señal del panel central y reduciendo la escala otras 100 veces, se observan pequeñas fluctuaciones, o anisotropías, del orden de las decenas de microkelvin (*panel inferior*). La banda roja del centro del mapa coincide con el plano de nuestra galaxia, que emite radiación de microondas contaminante. La resolución angular efectiva es de unos 10 grados.



por la expansión del universo. Sin embargo, tuvieron que pasar casi veinte años para que la RFCM se observara, de manera fortuita, en 1965, cuando Arno Penzias y Robert Wilson, de los Laboratorios Bell de Crawford Hill (Nueva Jersey), detectaron un exceso de radiación de microondas en una antena que pretendían utilizar para la comunicación con satélites.

Para Penzias y Wilson, aquella radiación no era más que un ruido molesto, de origen desconocido. Robert Dicke, Jim Peebles, Peter Roll y David Wilkinson, de la Universidad de Princeton, que estaban construyendo un instrumento exclusivamente para medir la RFCM, supieron interpretar de inmediato que ese ruido era la radiación predicha por Gamow. Es curioso que fueran Penzias y Wilson los que recibieron el premio Nobel en 1978 por su descubrimiento casual.

El hallazgo supuso un enorme éxito para la teoría de la gran explosión. No sólo había conseguido explicar la expansión del universo,

así como la formación y las proporciones relativas de los átomos ligeros, sino que, además, había predicho la existencia de una radiación de unas determinadas características, antes de que fuera observada.

En años posteriores, la teoría seguiría prediciendo con éxito características de la RFCM que recibirían luego confirmación observacional. Así, predijo que la variación de la intensidad de la RFCM en función de su frecuencia debía coincidir con la de un emisor perfecto (es decir, un cuerpo negro), ya que el universo era muy homogéneo y se encontraba en equilibrio térmico. En los años setenta, varios trabajos teóricos sostuvieron que, en el momento de emitirse la RFCM, tenía que haber en aquel universo primitivo pequeñas inhomogeneidades, del orden de una parte en 100.000. Tales pequeñas diferencias de densidad, o anisotropías, derivarían de fluctuaciones cuánticas y serían las semillas de la formación de la estructura a gran escala que observamos hoy en día en los cielos, con sus galaxias y vacíos. Las anisotropías deberían estar impresas en la RFCM y podrían observarse con un detector dotado de sensibilidad suficiente.

La misión COBE (Explorador del Fondo Cósmico) de la NASA, primera nave espacial dedicada a medir la RFCM, observó lo predicho. El satélite COBE se lanzó en 1989. Dos de sus investigadores principales, George Smoot, de la Universidad de California en Berkeley, y John Mather, de la Universidad de Maryland, fueron galardonados con el premio Nobel de física en 2006. Los datos de COBE demostraron que la variación de intensidad de la RFCM respecto a la frecuencia concuerda con la hipótesis de que hubiera sido emitida por un emisor perfecto a una temperatura de 2,725 K.

Esa temperatura era la misma independientemente del punto del cielo en el que se midiera la radiación. Tan sólo reduciendo la escala a las milésimas de grado kelvin se aprecia una señal que se desvía ligeramente de la media y que tiene forma de dipolo. La señal en cuestión deriva de nuestro movimiento local respecto a la RFCM, ya que el efecto Doppler hace que veamos frecuencias más altas en el sentido de nuestro movimiento y más bajas en sentido opuesto. Restando a los datos esta componente con forma de dipolo, y reduciendo la escala otras 100 veces más hasta el rango de las decenas de microkelvin, COBE detectó unas pequeñas diferencias de temperatura respecto a la media. Dichas anisotropías en la RFCM, del orden de una parte en 100.000, se mostraban en perfecto acuerdo con las predicciones teóricas.

A través de ciertos experimentos terrestres o en globos aerostáticos se midieron en los años noventa las anisotropías, con precisión creciente. Los experimentos determinaron que la mayor potencia de las fluctuaciones se aprecia a escalas angulares de aproximadamente un grado. A principios del decenio de 2000 se detectó la polarización de las anisotropías.

En 2003 se publicaron los resultados del primer año de observación del satélite *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) de la NASA. Este satélite midió las anisotropías de la RFCM en todo el cielo con notable precisión y resolución.

Los modelos del universo

En el marco de la teoría de la gran explosión, coexisten numerosos modelos cosmológicos en los que puede variar la geometría o evolución del universo. Los hay que predicen algún tipo de efecto en la RFCM; así acontece con los modelos anisótropos, en los que el universo, al girar sobre sí mismo, produce un patrón espiral en la RFCM. Los modelos suelen caracterizarse por distintos valores de los parámetros cosmológicos que determinan la edad, geometría y composición del universo.

Un análisis detallado de las anisotropías de la RFCM permite estimar los parámetros cosmológicos y discriminar entre los distintos modelos. El modelo que mejor se ajusta a los datos actuales es el modelo estándar con constante cosmológica y materia oscura fría. En él se supone un universo sin curvatura —es decir, un espacio euclídeo— y con una expansión acelerada causada por la constante cosmológica, también denominada energía oscura, por su origen desconocido.

Según las observaciones de supernovas y RFCM, la energía oscura representa aproximadamente el 74 % de la densidad de energía del universo. La mayor parte de la energía restante se encuentra en forma de materia oscura fría, que es materia de composición desconocida, no relativista y no bariónica, es decir, no compuesta por protones, neutrones o electrones. La materia oscura no emite ni refleja radiación; ni se ha observado directamente, aunque su existencia ha sido demostrada por sus efectos gravitatorios. La comunidad científica tiene esperanzas de que el nuevo acelerador de partículas construido cerca de Ginebra ayude a encontrar alguna partícula hasta ahora desconocida que resuelva ese misterio.

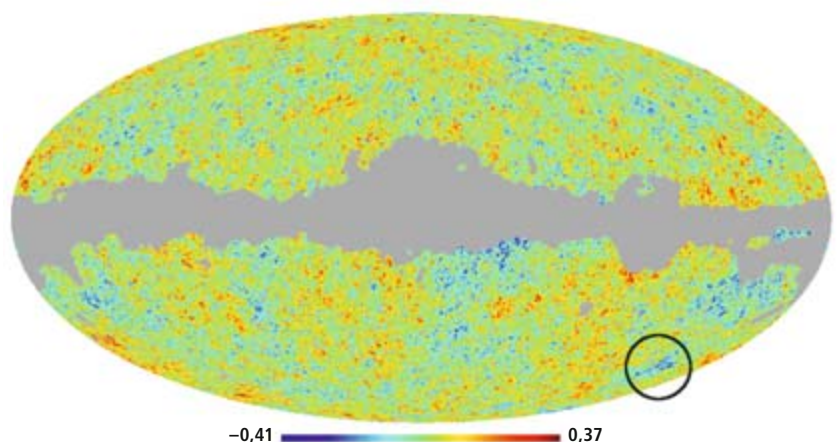
Sólo el 4 % de la energía del universo corresponde a la materia ordinaria. Las observaciones de macroestructura y las supernovas concuerdan también con el modelo en cuestión. Se le llama por eso “modelo concordante”.

Algunos modelos complementan o sustituyen alguna de las premisas del modelo concordante. Los modelos inflacionarios, por ejemplo, parecen complementar perfectamente al modelo estándar. Afirman que 10^{-35} segundos después de la gran explosión, el universo pasó por un cambio de estado, o transición de fase, que provocó una expansión exponencial del universo. El proceso, o “inflación”, sería el causante de que el universo adquiriera curvatura nula y fuera homogéneo e isótropo a gran escala. Los modelos inflacionarios más simples predicen que las anisotropías de la RFCM representan un campo gaussiano e isótropo en la esfera celeste.

Entre la temperatura de emisión correspondiente a la intensidad de la RFCM en un punto de la esfera celeste y la temperatura media de la RFCM habrá cierta diferencia. Según la hipótesis de que la RFCM es un campo gaussiano, o de la gaussianidad de la RFCM, el valor concreto de esa diferencia con mayor probabilidad de ocurrir será el nulo, y a medida que el valor sea mayor, la probabilidad irá disminuyendo conforme a la forma acampanada —o de joroba con colas a cada lado— de la distribución de Gauss o normal, la que más a menudo aparece en los fenómenos reales de todo tipo. Como la campana es simétrica, ese descenso será igual para una diferencia positiva (cuando el punto está más caliente que la media) o negativa (más frío) pero de la misma magnitud.

La gaussianidad de la RFCM se puede comprobar mediante estudios estadísticos de los datos de alta resolución de los satélites modernos, en especial de WMAP. En los modelos inflacionarios simples puede haber pequeñas desviaciones de la gaussianidad, es decir, las temperaturas observadas en el cielo podrían no encajar perfectamente con la hipótesis de que se atienen a distribuciones gaussianas multidimensionales, pero las desviaciones no serían muy grandes. En el modelo estándar

2. LA RADIACION COSMICA DEL FONDO DE MICROONDAS, medida por el satélite WMAP de la NASA. Para obtener este mapa se han combinado los datos de los detectores a 41, 61 y 94 gigahertz y se han eliminado las emisiones contaminantes de nuestra galaxia. En las zonas donde no es posible eliminar dichas señales de una manera satisfactoria se aplica una máscara de exclusión, que aparece en color gris. La resolución angular es de 13,7 minutos de arco y las unidades de la barra de colores aparecen en milésimas de kelvin. En el hemisferio sur galáctico se distingue una mancha de unos 5 grados de radio que podría deberse a un defecto cósmico.



El autor

Marcos Cruz se doctoró en el Instituto de Física de Cantabria bajo la dirección de Enrique Martínez González y Patricio Vielva, donde realizó el trabajo que se describe aquí. Actualmente es profesor del departamento de matemáticas, estadística y computación de la Universidad de Cantabria.

resultarían incluso despreciables, mientras que en modelos alternativos, como la inflación no-estándar o modelos con defectos cósmicos, la no-gaussianidad es apreciable.

Defectos en el universo

Los defectos cósmicos son imperfecciones, como las burbujas o grietas en un cristal, surgidas en los cambios de estado que sufrió la “sopa cósmica” que llenaba el universo poco después de la gran explosión. El enfriamiento debido a la expansión del universo provocaba esas transiciones de fase entre distintos estados del plasma.

En cualquier transición de fase conocida se producen defectos. Pensemos, por ejemplo, en la transición de fase por la que el agua líquida se convierte en hielo. Al observar con detalle el hielo, veremos pequeñas imperfecciones en forma de burbujas, regiones del espacio que permanecen atrapadas en el estado inicial, la fase líquida, imperfecciones que reciben el nombre de “defectos”. De manera análoga, podemos imaginar los defectos cósmicos como burbujas de plasma muy energético que no consiguen pasar al nuevo estado del plasma y permanecen atrapadas en el estado anterior. Las “burbujas” sobreviven un tiempo en dicho estado, hasta que colapsan y liberan

la enorme cantidad de energía que habían acumulado.

Veamos otra analogía que nos permita entender mejor el proceso. Imaginemos que una muchedumbre corre en distintas direcciones por una habitación de dimensiones reducidas. En un momento dado, la temperatura aumenta, por lo que espontáneamente todos deciden tumbarse, sin perder un instante. En ese “cambio de fase” algunas personas verán que el suelo a su alrededor se halla ocupado por otras personas tumbadas, sin dejarles sitio; han de permanecer de pie. Por tanto, siguen atrapadas en la “fase” anterior y se las puede considerar “defectos”. Pasado un tiempo, se agotarán y caerán al suelo sin fuerzas.

Los defectos cósmicos vienen predichos por las teorías de Gran Unificación. Según éstas, los cambios de fase con ruptura de simetría que acontecieron en el universo temprano provocaron el desacople sucesivo de las cuatro fuerzas fundamentales (interacción nuclear fuerte, interacción nuclear débil, interacción electromagnética e interacción gravitatoria), hasta entonces unificadas. La producción de defectos cósmicos en el universo primordial tendría lugar durante tales transiciones de fase con ruptura de simetría.

Dependiendo del orden de la simetría que se rompe, pueden aparecer distintos tipos de defectos, llamados en conjunto “defectos topológicos”. En cosmología, las paredes de dominio son las membranas de dos dimensiones que aparecen al romperse una simetría discreta, de orden 1; si la simetría que se rompe es de orden 2, cilíndrica, aparecen cuerdas cósmicas unidimensionales; en el caso de una ruptura de simetría esférica (orden 3) se forman monopolos; las texturas se crean después de romperse una simetría de orden 4.

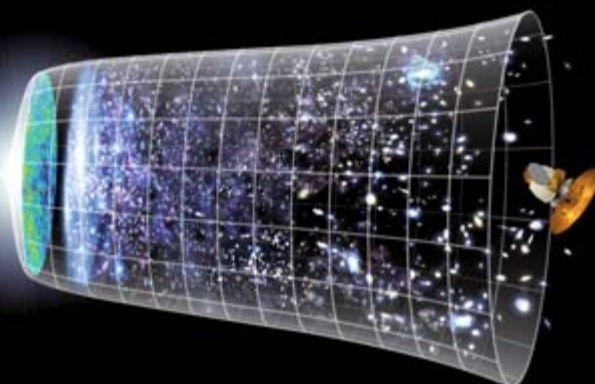
Los defectos topológicos son fenómenos de altísima energía. Sobrevivirían un tiempo finito hasta colapsar y liberar toda la energía acumulada. Nos es imposible observar directamente uno de esos estallidos, pero sí podríamos ver la huella que dejaron impresa en RFCM que pasara cerca.

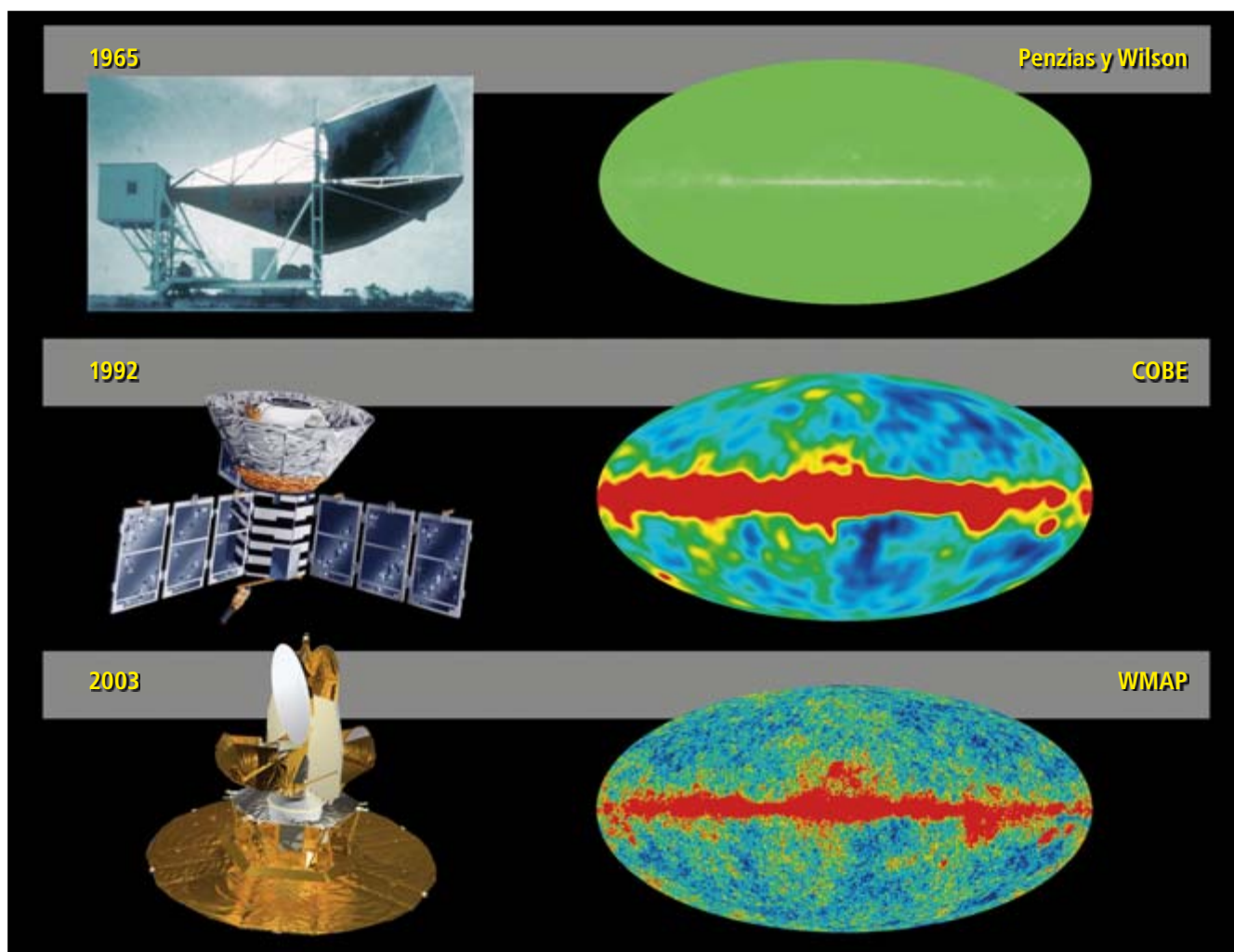
Cada defecto produce un tipo concreto de anisotropía. Por ejemplo, las texturas producen manchas calientes y frías en la RFCM que no se corresponden con la gaussianidad predicha por la inflación.

Hasta ahora, no se ha observado ninguna huella de los defectos mencionados. Su detección supondría un avance significativo en la comprensión de la evolución del universo temprano y del comportamiento de la materia a energías muy superiores a las que se pueden alcanzar en un experimento terrestre.

EVOLUCION DEL UNIVERSO

Representación de la evolución del universo durante 13.700 millones de años. El tamaño del universo observable se representa por el tamaño de la retícula en vertical; el tiempo aumenta de izquierda a derecha. En el extremo izquierdo de la imagen se representa la gran explosión, seguida del período de expansión exponencial llamado inflación. Tras este período, el universo, dominado por la materia, veía frenada su expansión por la gravedad. Recientemente la materia ha dejado de ser la energía dominante en el universo; ahora lo es una energía repulsiva de origen desconocido, la energía oscura, que provoca una expansión acelerada del universo. El satélite WMAP, representado en el extremo derecho de la imagen, mide la radiación emitida 380.000 años después de la gran explosión. Las condiciones del universo primitivo quedan impresas en esta radiación, que ha viajado a través del universo en expansión y llegado a nosotros enfriada hasta el rango de las microondas.





La gaussianidad de la RFCM

El estudio de la gaussianidad de la RFCM permite discriminar entre distintos modelos cosmológicos. En los últimos años, con la llegada de las medidas de precisión de la RFCM, se han realizado numerosos análisis de gaussianidad con infinidad de herramientas matemáticas. Dependiendo del tipo de rasgo no gaussiano que se quiera detectar, utilizaremos una u otra herramienta matemática, como los funcionales de Minkowski, las funciones de correlación, el bispectro, el trispectro, las correlaciones de fase o las ondículas (*wavelets*).

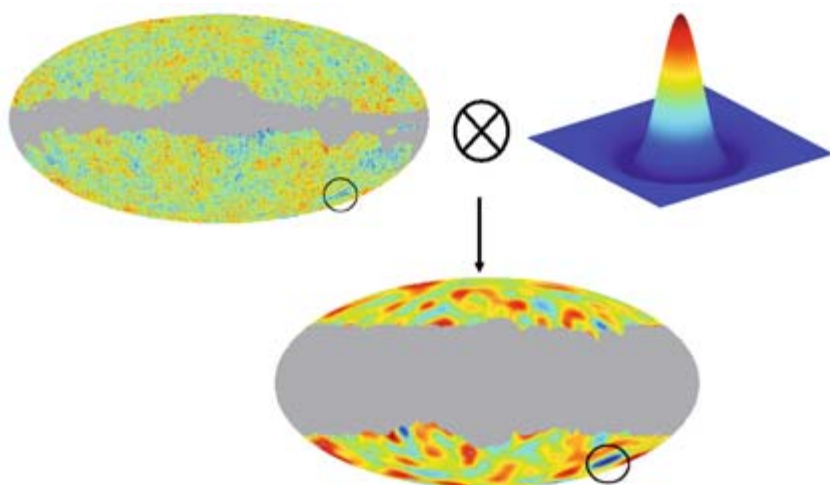
La mayoría de los estudios de gaussianidad son *ciegos*, es decir, no asumen un modelo no-gaussiano concreto. Se limitan a comprobar si los datos son compatibles o no con la gaussianidad. Hay, pues, que realizar un gran esfuerzo para identificar el origen de una posible desviación de la gaussianidad, ya que contamos con muchas causas posibles. Para entender tal situación se suele recurrir al siguiente ejemplo: imaginemos que tenemos un animal y queremos saber si es o no un gato. En el caso de que sea un gato, no ten-

dremos ningún problema con el resultado del análisis, pero si es un “no gato” hay que investigar, entre la infinidad de alternativas, cuál se ajusta mejor.

Entre las “no-gaussianidades” existen, por una parte, las predichas en los modelos alternativos a la inflación estándar (por ejemplo, los defectos cósmicos). Pero el ruido instrumental y las emisiones contaminantes de nuestra propia galaxia o de otras galaxias más lejanas son también altamente no-gaussianos. Por tanto, una buena sustracción de tales emisiones resulta decisiva para poder sacar conclusiones cosmológicas de un análisis de gaussianidad. Por otra parte, algunos fotones de la RFCM pueden interaccionar con gas caliente o con potenciales gravitatorios en el largo recorrido desde su emisión hasta que los detectan los satélites.

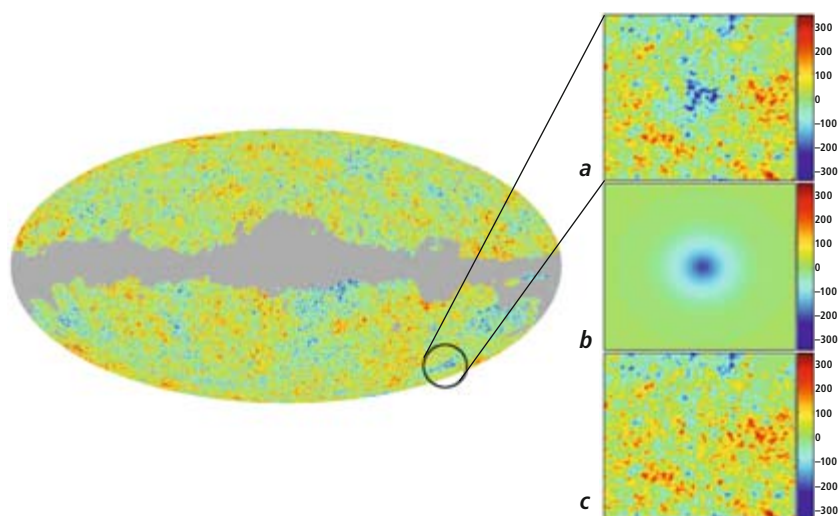
Los primeros análisis de gaussianidad se realizaron sobre los datos de COBE. No se encontraron desviaciones de origen cosmológico de la gaussianidad. Tampoco el equipo de WMAP halló ninguna desviación significativa en su primer análisis de gaussianidad. Sin

3. BREVE HISTORIA DE LA DETECCIÓN de la radiación cósmica del fondo de microondas (RFCM), descubierta en 1965 por Penzias y Wilson, hallazgo que les valió el premio Nobel. En el panel superior izquierdo vemos una fotografía de la antena que pretendían utilizar para comunicarse con satélites y que les sirvió para detectar fortuitamente la RFCM. Arriba a la derecha vemos una simulación del cielo tal y como lo habría observado su antena terrestre. El satélite COBE (*panel central, izquierda*) midió por primera vez las anisotropías de la RFCM (*panel central, derecha*). El satélite WMAP (*abajo izquierda*) ha medido dichas anisotropías con gran resolución y precisión (*abajo derecha*).



4. LOS DATOS DE LA RADIACION DEL FONDO DE MICROONDAS, obtenidos por el satélite WMAP de la NASA (arriba), se convolucionan (operación matemática aquí representada por el símbolo \otimes) con la ondícula de sombrero mexicano a una escala angular de 5 grados (derecha) para reducir el ruido y otras señales contaminantes, además de para amplificar la señal a la escala seleccionada. El mapa convolucionado (abajo) es menos ruidoso. En él se observa una mancha fría en el hemisferio sur galáctico, la más prominente de todas las manchas. Podría deberse a un defecto cósmico.

embargo, posteriormente, otros grupos fueron descubriendo rasgos no-gaussianos o anomalías en los datos: alineamientos y simetrías en multipolos bajos; asimetrías en la potencia de las fluctuaciones entre los hemisferios eclípticos; alineamiento de manchas de la RFCM, y una mancha extraordinariamente fría y grande en el hemisferio sur galáctico.



5. EN ESTE ESQUEMA SE REPRESENTAN LOS DATOS de la radiación del fondo de microondas medidos por el satélite WMAP de la NASA (izquierda) y una proyección acimutal de un parche de unos 43 grados de lado (a), centrados en una mancha fría prominente, detectada mediante un análisis con la técnica de las ondículas esféricas. Con la aplicación de un análisis estadístico bayesiano, en el que se tiene en cuenta toda la información del modelo acerca de la forma, amplitud y tamaño de la mancha, demostramos que la hipótesis más probable para explicar la mancha es una suma de dos señales: una, debida a un defecto cósmico, llamado textura (b); otra, gaussiana, debida a las fluctuaciones de densidad del universo primitivo (c).

La mancha no gaussiana

Esa mancha fría tiene unos 10 grados de diámetro angular en el cielo (unas 20 veces el tamaño angular de la Luna). La descubrimos en nuestro instituto aplicando transformadas de ondículas a los datos de WMAP.

Las transformadas de ondículas son una herramienta matemática parecida a las transformadas de Fourier. Estas últimas descomponen los datos en sumas de funciones seno y coseno. Las ondículas dividen la señal en sumas de paquetes de onda; es decir, las ondículas sirven para dividir una señal en distintas componentes de modo que se pueda seleccionar la escala angular que interese. Actualmente se usan las ondículas en campos muy diversos: la reducción de datos, el análisis de imágenes, la geofísica, la óptica, la acústica y, claro está, la astrofísica. Las ondículas incrementan el cociente señal-ruido permitiendo la detección de señales no-gaussianas débiles. Además, nos facultan para localizar una señal no-gaussiana y conocer su escala angular.

En nuestro caso, la ondícula utilizada fue la ondícula esférica de sombrero mexicano (Spherical Mexican Hat Wavelet, *SMHW*), que amplifica los rasgos no-gaussianos en la esfera. Primero analizamos los coeficientes de asimetría y de apuntamiento (o “curtosis”) de los datos convolucionados (combinados matemáticamente de manera oportuna) con la SMHW en 15 escalas angulares distintas. El coeficiente de curtosis mide si la distribución de los datos es más o menos picuda que la gaussiana, que tiene curtosis nula.

Se realizó un análisis ciego, ya que se quería contrastar la gaussianidad de los datos, pero sin comparar con una hipótesis alternativa. Comparando los valores de los coeficientes de asimetría y de curtosis obtenidos para los datos con los de 10.000 simulaciones gaussianas, se detectó un exceso de curtosis en los datos a escalas angulares cercanas a los 5 grados. Aparecía, pues, una intrigante incompatibilidad de los datos con el modelo estándar, que sólo se daba en un 1 % de las simulaciones. Un análisis de manchas, aplicando distintos umbrales a los datos, determinó que una gran mancha fría situada en el hemisferio sur galáctico era la principal causante de la anomalía.

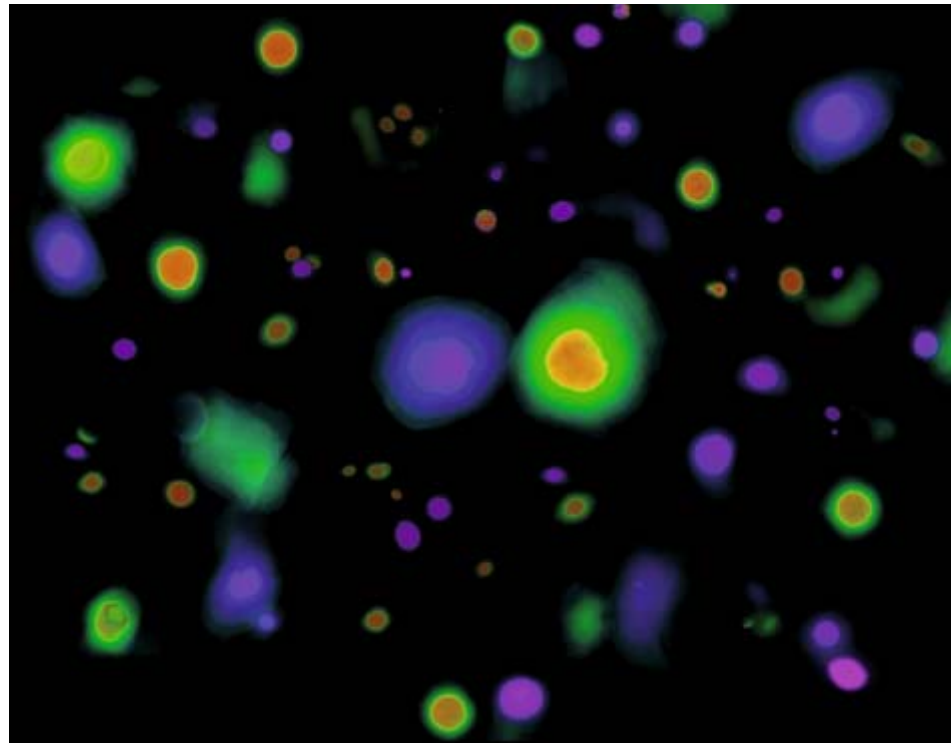
Al ser ciego el análisis, hubo que realizar un gran esfuerzo para identificar el posible origen de dicha mancha. En primer lugar hubo que analizar las contribuciones del ruido instrumental y de la antena a la señal detectada, que resultaron ser casi despreciables. Se comprobó también que los distintos detectores del satélite medían una señal parecida en la región de la mancha independientemente de la frecuencia. Esta observación obligó a descartar que

6. IMAGEN DE LA DENSIDAD DE ENERGÍA DE TEXTURAS tomada de una simulación a alta resolución realizada con un superordenador. Las texturas son defectos cósmicos, a los que podemos imaginar como burbujas de energía. Al colapsar emiten esa energía, que deja una huella en la radiación cósmica del fondo de microondas. En la imagen se observa que las texturas son aproximadamente esféricas y que su número aumenta cuando disminuye su tamaño.

la mancha la generasen señales contaminantes de nuestra propia galaxia, ya que éstas varían mucho con la frecuencia.

Una vez confirmado que la mancha no se debía sólo a ruido instrumental o a emisiones contaminantes, se sucedieron los artículos que proponían explicaciones de su origen. Por ejemplo, si los fotones de la RFCM se hubieran encontrado en su camino hacia nosotros un gran vacío en la distribución de galaxias, el efecto gravitatorio habría causado un decremento en la señal de la RFCM. Sin embargo, aunque se sabe que existen vacíos, su tamaño medio es unas 10 veces inferior al necesario para crear una mancha de las características observadas; la hipótesis se nos muestra, pues, muy improbable. También los electrones calientes atrapados en cúmulos de galaxias podrían interaccionar con los fotones de la RFCM y promoverlos a frecuencias superiores a las observadas por WMAP, lo que provocaría una mancha fría. Sin embargo, necesitaríamos un cúmulo poderoso y cercano a nosotros para crear la mancha en cuestión, mientras que las observaciones sólo detectan en dicha dirección un grupo de galaxias demasiado pequeño.

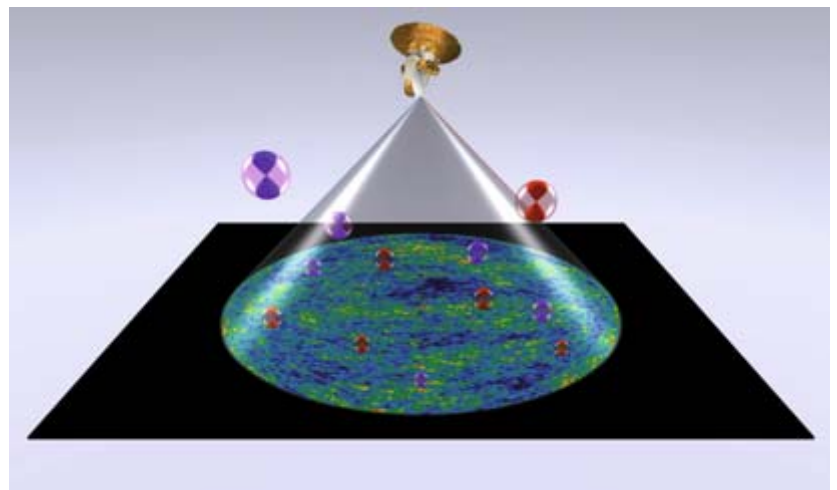
Otra posibilidad es la investigada por nuestro grupo, a saber, que la mancha hubiese sido provocada por un defecto cósmico; una textura, por ejemplo. Pese a que las texturas, al igual que cualquier otro defecto cósmico, aún no han sido detectadas, la teoría predice que generan



manchas calientes y frías aproximadamente circulares en la RFCM. Estudiamos la morfología de la mancha con ondículas elípticas; llegamos a la conclusión de que su forma es cercana a la circular. La teoría de los defectos cósmicos permite conocer de manera aproximada la forma y número de dichas manchas. Además, la amplitud de las manchas guarda relación con las escalas de energía de la gran unificación; por consiguiente, la detección de estas manchas revestiría un interés máximo en la física de altas energías. Las simulaciones de texturas sugirieron que el número de manchas calientes o frías del tamaño de la observada (5 grados de radio) estaría cerca de uno; por tanto, la teoría y la observación concuerdan en este aspecto.

Para tratar de identificar la hipótesis más verosímil del origen de la mancha utilizamos

7. EL SATELITE WMAP de la NASA (arriba) recibe la radiación emitida por el universo primitivo. En la figura, el tiempo se representa verticalmente y el espacio horizontalmente. Las texturas se representan con esferas; son regiones del espacio en las que se produce una gran concentración de energía. Si nuestro cono de luz del pasado se cruza con una textura, la radiación de microondas se ve afectada por el potencial gravitatorio del defecto cósmico y presentará una mancha fría o caliente según la textura se encuentra en el exterior o en el interior del cono de luz. (El cono de luz del pasado es un cono formado por las trayectorias *espaciotemporales* de todos los fotones, reales o posibles, que nos llegan desde cualquier parte del espacio.)



COSMOLOGIA

INVESTIGACION Y CIENCIA

ha publicado sobre el tema, entre otros, los siguientes artículos:

Pérdidas en las atmósferas planetarias,

de D. C. Catling y K. J. Zahnle
Julio 2009

Planetas ectópicos,

de M. W. Werner y M. A. Jura
Agosto 2009

De la Luna a Marte,

de Harrison H. Schmitt
Septiembre 2009

Agujeros negros supermasivos,

de J. L. Gomez Fernández
y W. Steffen
Septiembre 2009

El origen del universo,

de Michael S. Turner
Noviembre 2009

Estrellas negras,

de Carlos Barceló, Stefano Liberati,
Sebastiano Sonego y Matt Visser
Diciembre 2009

Las hermanas del Sol,

de Simon F. Portegies Zwart
Enero 2010

Retrato de un agujero negro,

de A. E. Broderick y A. Loeb
Febrero 2010

El telescopio Spitzer,

de Michael Werner
Febrero 2010



Prensa Científica, S.A.

Bibliografía complementaria

MICROWAVE ANISOTROPIES FROM COSMIC DEFECTS. D. Coulson, P. Ferreira, P. Graham y N. Turok en *Nature*, vol. 368, n.º 6466, pág. 27; 3 de marzo de 1994.

COSMOLOGY FROM TOPOLOGICAL DEFECTS. A. Gangui en *Cosmology and Gravitation: Xth Brazilian School of Cosmology and Gravitation; 25th Anniversary (1977-2002)*. AIP Conference Proceedings, vol. 668, págs. 226-262; 2003.

THE NON-GAUSSIAN COLD SPOT IN THE 3 YEAR WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE DATA. M. Cruz, L. Cayón, E. Martínez González, P. Vielva y J. Jin en *The Astrophysical Journal*, vol. 655, n.º 1, págs. 11-20; 2007.

A COSMIC MICROWAVE BACKGROUND FEATURE CONSISTENT WITH A COSMIC TEXTURE. M. Cruz, N. Turok, P. Vielva, E. Martínez González y M. Hobson en *Science*, vol. 318, n.º 5856, pág. 1612; 2007.

un ajuste bayesiano en una región del cielo de 20 grados de radio, centrada en la mancha. Ajustes de ese tenor determinan la hipótesis más probable para explicar los datos, a partir de la información que nos proporcionan las observaciones previas y el modelo teórico, como la forma de la mancha y el tamaño y amplitud esperados en cada caso. El ajuste concluyó que la forma, tamaño y amplitud de la mancha concordaban con que hubiese sido generada por una textura. Las hipótesis del vacío y del cúmulo de galaxias quedaron descartadas por el ajuste bayesiano.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que en nuestra hipótesis los defectos cósmicos no sustituyen a las manchas gaussianas, sino que se suman a ellas. Por tal razón, no podemos descartar la posibilidad de que se produzca una confusión entre una mancha gaussiana y otra generada por una textura. Mediante simulaciones, calculamos la probabilidad de que una mancha gaussiana encajara tan bien como la mancha observada con la hipótesis de la textura, o mejor; dicha probabilidad resultó ser del 5 %. Por tanto, el resultado de nuestro trabajo sugiere una posible detección de un defecto cósmico que, no obstante, debería ser confirmada en estudios posteriores.

Según la teoría de los defectos cósmicos, el número esperado de manchas debidas a texturas debería aumentar conforme disminuye el tamaño. Sin embargo, aumenta, y aún en mayor medida, el número de manchas gaussianas, por lo que detectar las texturas resulta más complicado a escalas menores. A pesar de ello, un análisis bayesiano aplicado a todo el cielo podría detectar alguna textura más. Nos estamos ocupando de ese ajuste con el fin de confirmar la detección del defecto cósmico.

Para confirmar la detección de texturas, los análisis de datos de gran resolución que se acometan en el futuro podrían comprobar si se observa un efecto lente debido a una textura, o bien estudiar la polarización de la radiación en la región de la mancha. De existir una textura que generase la mancha, su gran campo gravitatorio asociado desviaría los fotones; ése sería el efecto lente. Por otra parte, en caso de que la mancha proceda de una fluctuación gaussiana, la señal polarizada debería mostrar un patrón parcialmente correlacionado con la mancha, mientras que en caso de deberse a una textura no se observaría tal efecto.

Se espera que, en los próximos años, los datos sobre temperatura y polarización alcancen la precisión deseada para poder desarrollar las ideas aquí avanzadas y confirmar si hemos descubierto un defecto cósmico en el universo.