

Polarización del fondo cósmico de microondas

Se buscan los secretos de la dinámica del universo primitivo en el brillo ancestral de la gran explosión

Matthew Hedman

En el verano de 2002, un equipo de astrónomos, que trabajaba con un instrumento instalado en el polo Sur, el Interferómetro de Escala Angular en Grados (DASI), anunciaba el descubrimiento de que el rescoldo de la gran explosión, la radiación del fondo cósmico de microondas (FCM), está ligeramente polarizado; es decir, que los campos eléctricos de las microondas cósmicas presentan una orientación preferencial. En otras palabras, la señal procedente del espacio profundo tiene asociada una determinada dirección, como las direcciones de las señales de las estaciones de radio que afectan a la recepción por una antena que posea una orientación particular. Desde cinco años antes venía yo trabajando en la medición de esa esquiva señal.

Queda mucho por investigar antes de que la parte polarizada del FCM desvele todos sus secretos. La componente polarizada es, en el mejor de los casos, cien mil veces menor que la porción no polarizada del FCM, por lo que medirla resulta muy difícil y requiere paciencia y atención. No obstante, hay tanto que ganar, que varios equipos están empeñados en conocerla mejor.

Orígenes

Durante los primeros cientos de miles de años tras la gran explosión, el universo contenía un plasma caliente, un mar gaseoso de partículas dotadas de carga. En la mezcla coexistían también partículas de luz, o fotones. Los fotones no llegaban muy lejos dentro del plasma primordial; los dispersaban los electrones, que, sometidos a un calor abrasador, no se ligaban a los protones. Esta dispersión fotónica hacía que el universo no fuese transparente a la luz.

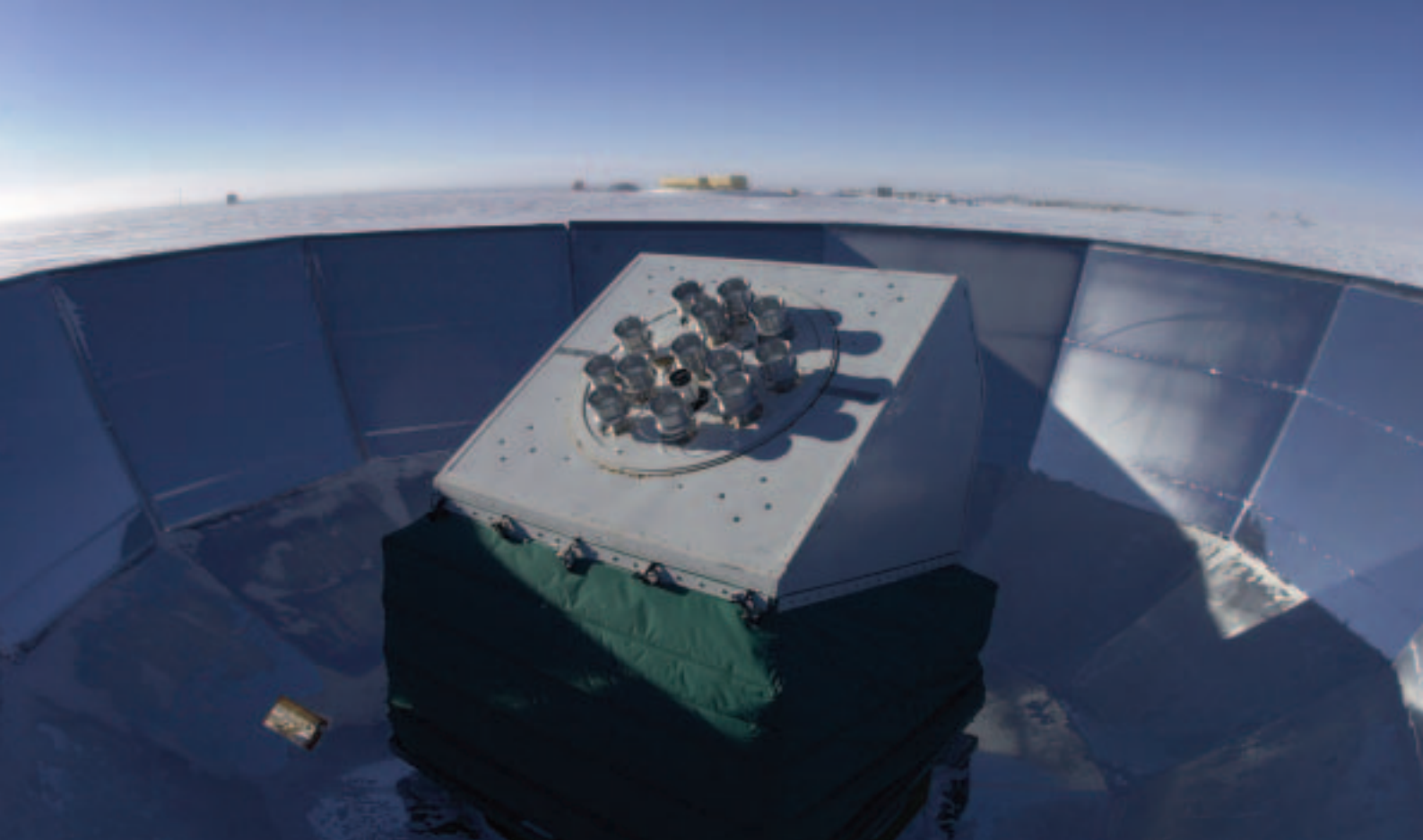
Al irse expandiendo el universo, el plasma ocupó un volumen cada vez mayor y, por lo tanto, se enfrió. Cuando

la temperatura del universo se desplomó hasta quedar en varios miles de kelvin, los protones y los electrones se recombinaron y formaron átomos de hidrógeno neutro; los fotones quedaron libres para viajar por el cosmos. Este “desacoplamiento” (de la materia y la radiación) ocurrió cuando el universo contaba apenas con una edad de 300.000 años.

Ahora, unos 13.700 millones de años más tarde, esos fotones continúan viajando a través del universo. Sin embargo, su longitud de onda ha seguido aumentando a medida que se expandía el universo: hoy día, el cosmos está sumergido en un débil baño de fotones de microondas, la radiación del FCM. El FCM está presente por todo el cielo, pero no se puede sentir ni ver porque es muy débil, casi mil millones de veces más tenue que las microondas de un horno. Pese a su sutileza, estas microondas ancestrales contienen información crucial sobre el universo primitivo.

Por fortuna, existen dispositivos especializados capaces de rastrear ese fondo de microondas. El FCM aparece sin cambios, isotrópico, allá donde se mire. Pero los instrumentos más sensibles, como DASI, pueden medir diferencias muy pequeñas, o anisotropías, tanto en el brillo como en la polarización de la radiación procedente de distintos puntos del cielo (*véase la figura 1*). Que existan estas anisotropías revela que el plasma del universo primitivo no era perfectamente uniforme.

Las anisotropías del brillo y de la polarización fueron causadas en el plasma primordial por fenómenos diferentes, proporcionan, pues, informaciones distintas sobre la naturaleza del universo primitivo. Las variaciones de brillo observadas en el FCM reflejan las diferencias de densidad en el plasma primordial: el plasma comprimido tiene una mayor temperatura y brilla con mayor intensidad. Las mediciones de las anisotropías del brillo,



como las realizadas en 2003 por la sonda Wilkinson para el Estudio de la Anisotropía de las Microondas (WMAP), aportan información sobre la estructura y la composición del universo primitivo (véase la figura 2). Por otra parte, la anisotropía de la polarización del FCM podría desvelar la dinámica del universo primitivo: el movimiento del material en el plasma primordial y el número de ondas gravitatorias.

La polarización

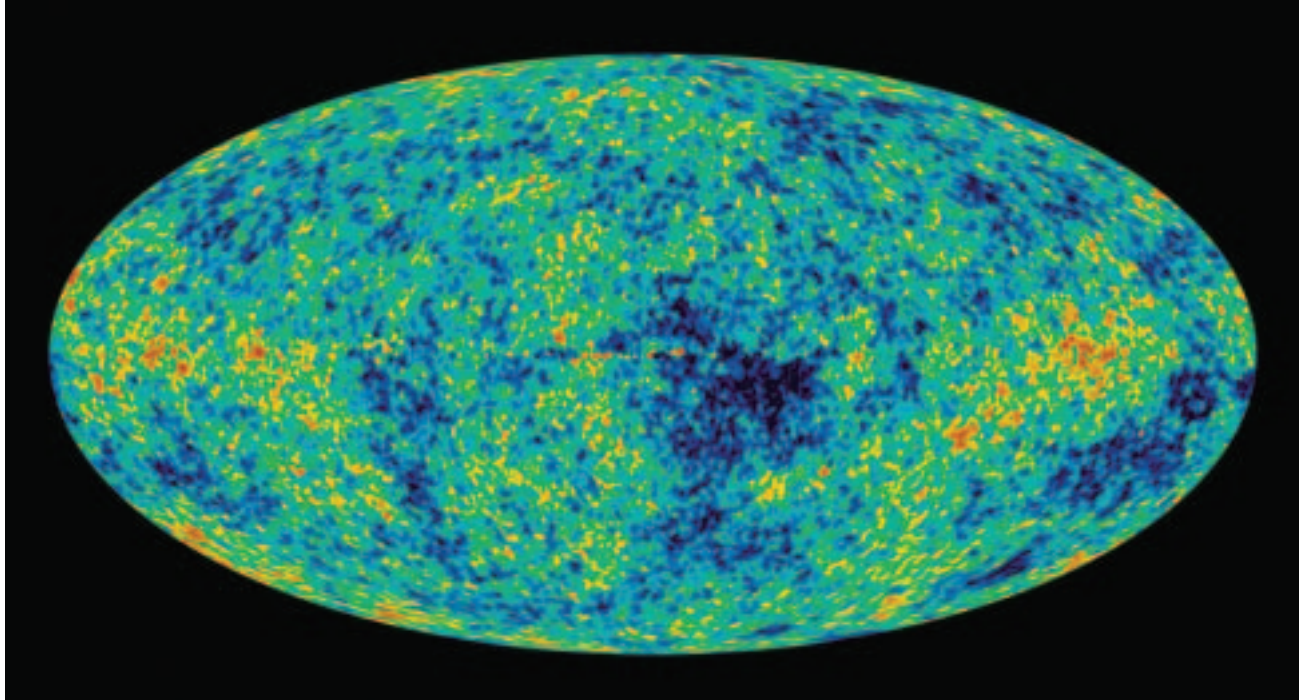
La polarización del FCM se originó en el plasma primordial como consecuencia de la interacción entre los fotones y los electrones libres, fenómeno llamado “dispersión Thomson” (véase la figura 5). Cuando la luz (que, debe recordarse, es una onda electromagnética) incide sobre un electrón, el campo eléctrico oscilante de la onda hace que la partícula dotada de carga vibre en el plano perpendicular a la dirección del movimiento del fotón. A su vez, el electrón vibrante genera una nueva onda electromagnética: emite luz. Esta luz está polarizada a lo largo de la dirección de la aceleración del electrón y, en consecuencia, se hallará polarizada en el plano de su movimiento. Por tanto, aun cuando

1. EL INTERFEROMETRO DE ESCALA ANGULAR DE GRADOS (DASI), instalado en la Antártida, fue el primer instrumento que detectó la polarización de la radiación del fondo cósmico de microondas; fue en 2002. Muchos otros instrumentos intentan ahora refinar las primeras mediciones. Se espera que esta información aporte luz sobre propiedades fundamentales del universo primitivo, como la dinámica y la composición del plasma primordial y la presencia de ondas gravitatorias. Los edificios principales de la estación Amundsen-Scott del polo Sur se aprecian en el horizonte.

la luz incidente no esté polarizada, la luz dispersada podrá tener una componente polarizada.

Sobre los electrones de un plasma inciden fotones desde todas las direcciones. Si la luz incidente (no polarizada) brilla por igual en cada una de ellas, la partícula se verá empujada con idéntica intensidad en todos los ejes posibles. Puesto que el electrón se movería de la misma forma por todos los planos, la luz dispersada no presentaría ninguna polarización promedio. Sin embargo, si la luz incidente brilla más a lo largo de un eje que de otro, el electrón se desplazará más en un plano que en otro, y la radiación emitida estará linealmente polarizada (véase la figura 6). De la luz incidente cuyo brillo varía de esta manera se dice que tiene un momento cuadrupolar. Por lo tanto, un momento cuadrupolar en la luz incidente genera una componente polarizada en la radiación dispersada.

Existen dos mecanismos capaces de provocar momentos cuadrupolares locales: los flujos masivos de plasma y las ondas gravitatorias. Para representar el proceso a través del cual el movimiento masivo del plasma crea una señal polarizada, imaginemos que fluye radialmente hacia algún punto y que en ese flujo hay un gradiente de velocidad (véase la figura 7). Si cambiamos nuestro sistema de referencia por el de un electrón aislado, nos parecerá que el plasma entorno se mueve hacia nosotros en todas las direcciones. Puesto que el plasma se desplaza a altas velocidades, aparecen efectos relativistas: la porción de plasma que avance hacia nosotros nos parecerá más brillante que una porción inmóvil. Cuanto más rápido se mueva el plasma, más brillante lo veremos. Puesto que el material que se desplaza hacia nosotros por delante y por detrás se aproxima a una velocidad mayor que el mate-



rial de los lados, habrá un momento cuadrupolar en la intensidad de la radiación incidente sobre el electrón. En consecuencia, la luz dispersada por el electrón tendrá una componente polarizada. De esta forma, los cambios de la velocidad del plasma conducen a emisiones polarizadas.

Los movimientos masivos de plasma pueden estudiarse en un laboratorio. Las ondas gravitatorias constituyen un mecanismo más singular de generar momentos cuadrupolares. Consisten en distorsiones que se propagan libremente por el espacio y el tiempo, predichas por la Teoría General de la Relatividad de Einstein. Cuando pasa una onda gravitatoria, el espacio se estira y se achata alternativamente a lo largo de dos ejes ortogonales (véase la figura 8). Los fotones que se propagaran por una dirección vertical se aproximarían entre sí, mientras que los que se propagasen horizontalmente se separarían. En

2. EL MAPA DEL FIRMAMENTO levantado por la sonda Wilkinson para el Estudio de la Anisotropía de las Microondas (WMAP) pone de manifiesto las variaciones de brillo (o temperatura) de la radiación del fondo cósmico de microondas (rojo, más caliente; azul, más frío). El brillo cambia en una parte en diez mil. Las diferencias de polarización son de un orden de magnitud menos; cuesta más medirlas. La radiación del fondo cósmico apareció 300.000 años después de la gran explosión, cuando el universo se hizo transparente a la luz. Las variaciones de brillo y polarización de esta radiación guardan los secretos de la densidad y del comportamiento de la materia durante la infancia del universo. La sonda WMAP ya ha facilitado datos de la polarización; pronto se anunciarán mediciones más precisas.

consecuencia, la luz que se desplaza en las dos direcciones ortogonales presentará brillos diferentes y un momento cuadrupolar. Cuando esta luz incida sobre un electrón, se emitirá una onda de luz polarizada.

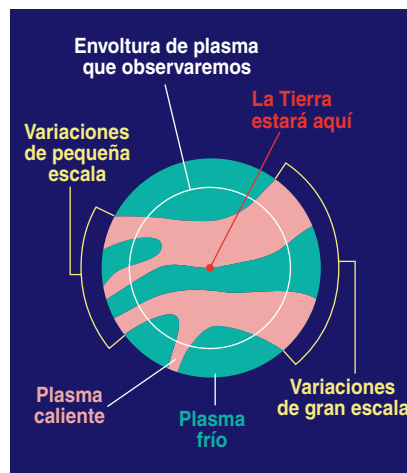
Los flujos frente a las ondas

El movimiento masivo del material en el universo primitivo guardó estrecha relación con las anisotropías de densidad del plasma primordial por

la sencilla razón de que el modo en que se desplaza el material determina su destino. En cambio, la presencia o ausencia de ondas gravitatorias en el universo primitivo depende de unos sucesos de los que se sabe poco, acontecidos durante una pequeña fracción de nanosegundo tras la gran explosión. Por tanto, una de las señales polarizadas (la procedente de los flujos de plasma) debe ser compatible con el brillo observado

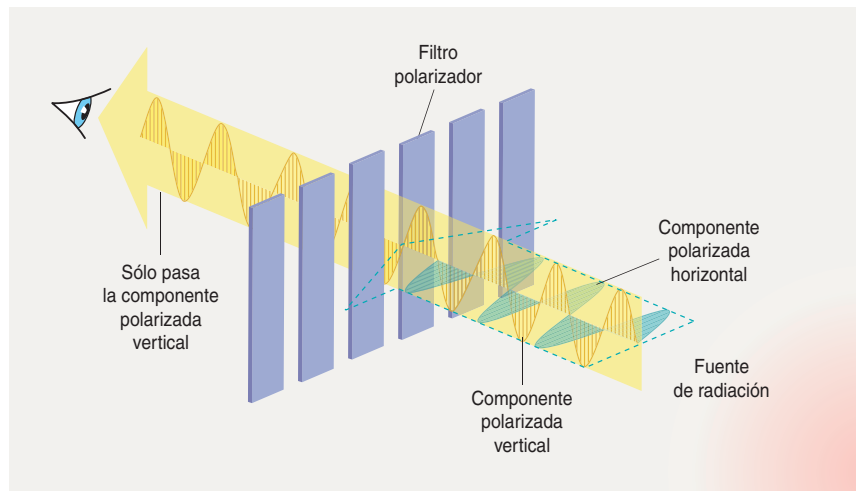
3. LAS ALTERACIONES DEL PLASMA PRIMORDIAL (izquierda)

imprimieron variaciones en la radiación liberada durante el desacoplamiento, cuando el universo se hizo transparente. Los fotones de la radiación que detectamos se han estado dirigiendo hacia la Tierra desde el desacoplamiento, de ahí que parezca que se originaron en una envoltura esférica centrada en la Tierra (derecha). Las estructuras y los rasgos de diferentes escalas de longitud del universo primitivo se corresponden con distintas escalas angulares en el cielo.



(que refleja las variaciones de densidad), mientras que la otra señal (la de las ondas gravitatorias) debe todavía medirse, para comprobar si quiera que existe en realidad. Pero podemos estudiar las dos señales por separado porque los flujos masivos y las ondas de gravedad producen en el cielo luz polarizada con características diferentes.

En principio, podrían observarse varios patrones diferentes de señales polarizadas. Los patrones que no cambian en una reflexión especular se llaman modos E, mientras que los que sí cambian se denominan modos B (véase la figura 9). Los flujos masivos de plasma no pueden generar los modos B; su generación requiere complejos flujos circulares que no pudo haber en el plasma primordial. Por el contrario, las ondas gravitatorias crean modelos E y B con pareja eficiencia. De ahí que quepa distinguir entre las dos fuentes mediante la cuantificación de las señales de los modos E y B. Puesto que la polarización debida a los flujos masivos es más intensa que la debida a las ondas gravitatorias, los patrones de modo E miden eficazmente el flujo y el reflujo del plasma primordial, mientras que los patrones de modo B informan sobre el estiramiento y achatamiento del espacio-tiempo.

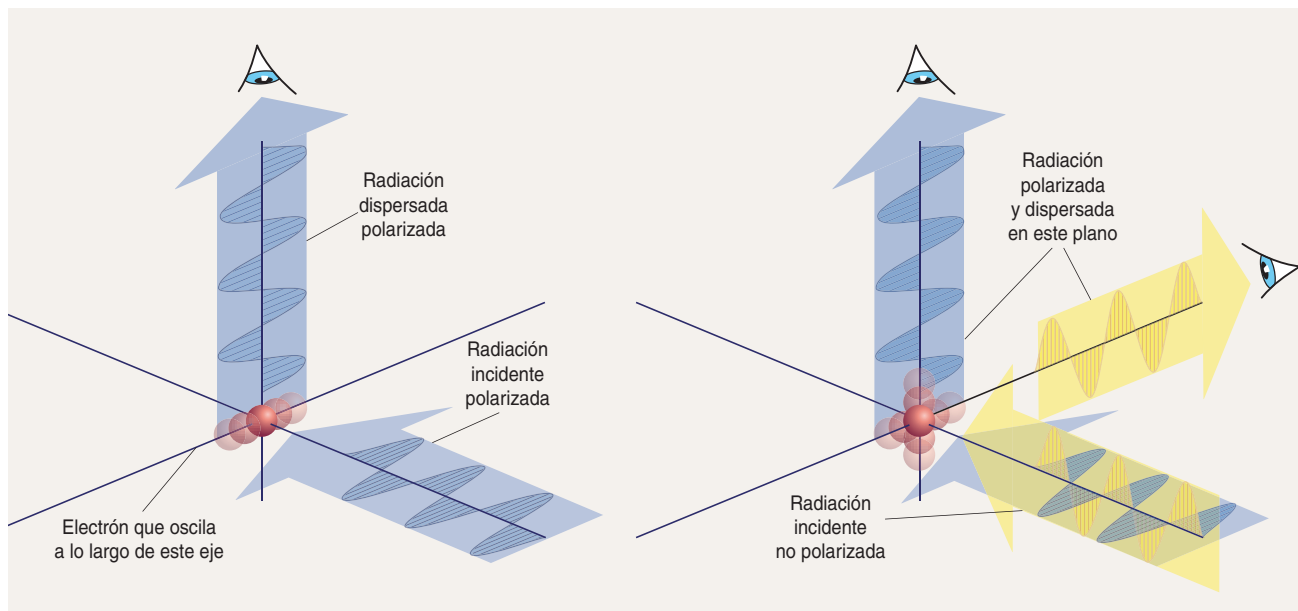


4. LA RADIACION ELECTROMAGNETICA NO POLARIZADA consiste en la oscilación de campos eléctricos perpendiculares a la dirección de propagación, pero, por lo demás, con una orientación aleatoria. El paso de esta radiación a través de un filtro especial polariza la luz, de forma que los campos eléctricos se orientan en una única dirección preferencial.

En la práctica, no resulta tan sencillo separar las señales debidas a los flujos masivos de las señales causadas por las ondas gravitatorias. Los fotones han estado viajando por el universo durante 13.700 millones de años; han pasado por distintos avatares, que podrían haber contaminado los datos. No sabemos si tales fenómenos impedirán la detección de las ondas de gravedad.

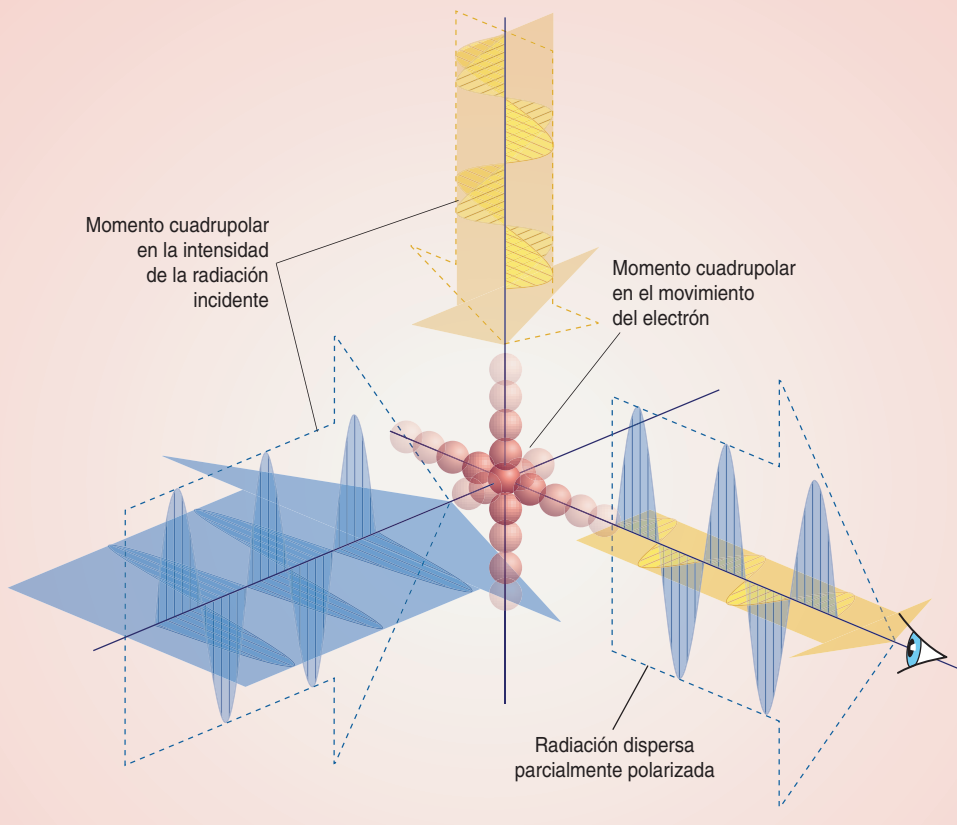
Extracción de la información

El fondo cósmico de microondas es una poderosa herramienta para el estudio del universo primitivo no sólo porque las variaciones en el brillo y en la polarización guarden una relación directa con la densidad, el movimiento y el contenido de ondas de gravedad del plasma primordial, sino también porque las propiedades y la dinámica del universo a la



5. LA DISPERSION THOMSON entre los electrones libres y los fotones generó, en el plasma primordial, radiación polarizada. Cuando la radiación incide sobre un electrón (bola roja), la onda electromagnética provoca la oscilación del electrón en un plano

perpendicular a la dirección del fotón incidente. El electrón oscilante emitirá luz polarizada en el plano en que se mueve. De este modo se crea radiación polarizada, se halle polarizada la radiación incidente (derecha) o no (izquierda).



6. DE UNA RADIACION INCIDENTE que brille más a lo largo de un eje (*izquierda*) que a lo largo de otro (*arriba*) se dice que presenta un momento cuadrupolar. Cuando esta luz incide sobre un electrón (*bola roja*), la partícula dotada de carga oscila más en un plano que en el otro y, por tanto, dispersa una radiación parcialmente polarizada. Los momentos cuadrupolares de la radiación del plasma primordial produjeron radiación polarizada (véanse las figuras 7 y 8).

edad de 300.000 años fueron menos complejas que las de otros sistemas astrofísicos; por ejemplo, menos que las de una galaxia espiral. Esta simplicidad se aprecia en el mapa de las anisotropías de brillo del FCM producido por WMAP, que muestra manchas calientes y frías de tamaños y formas diversos, pero donde no existe ninguna estructura clara, como arcos o brazos espirales.

No cuesta demasiado cuantificar y analizar las anisotropías porque, pese a que existen manchas calientes y frías en un amplio rango de escalas, las amplitudes de las variaciones son pequeñas. El brillo cambia en una parte en diez mil; la polarización, en un orden de magnitud menos. Lo que quiere decir que las variaciones en la densidad y el movimiento del plasma fueron, en ambos casos, mínimas. La debilidad de las variaciones dificulta su detección, pero permite simplificar las ecuaciones que describen el movimiento del plasma primordial. En concreto, las variaciones en una escala no afectaron a las otras escalas. Por tanto, podemos considerar las

variaciones en una escala determinada de manera independiente, como si las otras variaciones no hubieran ocurrido.

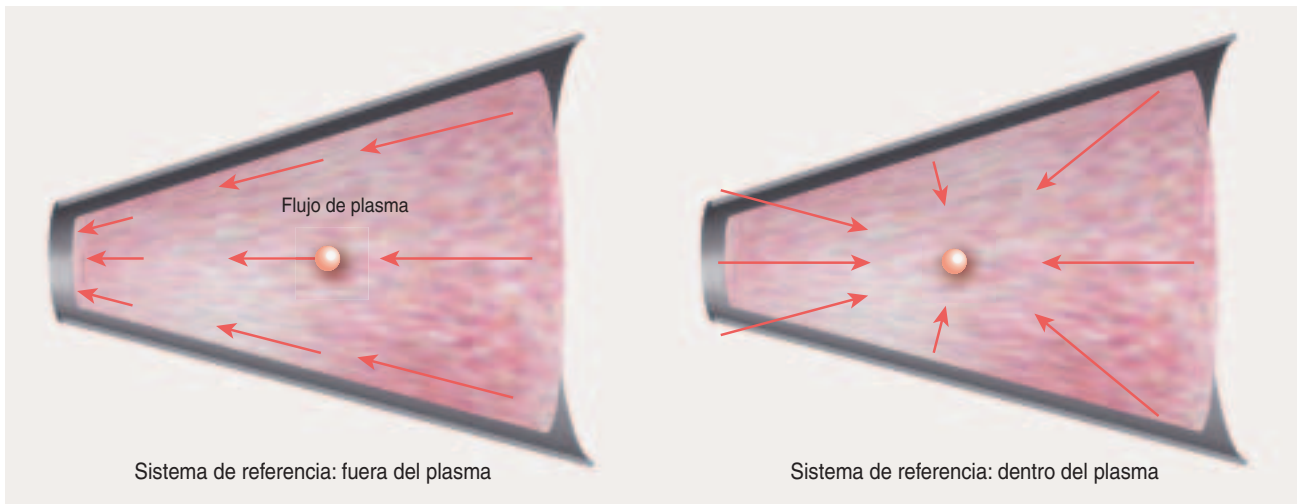
Las anisotropías del FCM acostumbran representarse por medio de un espectro de potencias, una gráfica que muestra la amplitud de las variaciones en función de la escala (véase la figura 10). Las predicciones de los modelos cosmológicos y los datos procedentes de los experimentos revelan varias estructuras, cada una de las cuales fue causada por procesos físicos distintos. Para hacernos una idea de tales procesos, imaginemos una variación en una escala única, en la cual la densidad del plasma primordial cambie con la posición de manera sinusoidal. La amplitud de la fluctuación —la diferencia de densidad entre las regiones más y menos densas— cambiará con el tiempo bajo la influencia de dos fuerzas: la presión y la gravedad. La gravedad tiende a arrastrar el material hacia las regiones más densas, aumentando la magnitud de la variación de densidad. La presión actúa en sentido

opuesto, llevando el material fuera de las regiones densas y reduciendo la diferencia de densidad.

Los efectos de estas dos fuerzas dependerán notablemente de la escala de la fluctuación, ya que el universo en cualquier instante de su historia presenta una longitud intrínseca llamada horizonte, la distancia que la luz ha viajado en el tiempo desde la gran explosión. Si la longitud de onda de la fluctuación es mucho mayor que el horizonte, a cualquier electrón del plasma el universo le parecerá prácticamente homogéneo, y el plasma no tenderá a moverse. Pero si la longitud de onda de la fluctuación es mucho menor que el horizonte, los electrones “verán” regiones de distinta densidad; quedarán, pues, sujetos a las fuerzas que los empujarán hacia las regiones más densas (gravedad) o hacia las menos densas (presión). Por tanto, las variaciones de escala mayores que el horizonte no cambiarán apenas con el tiempo, mientras que las variaciones menores evolucionarán a medida que el plasma se mueva en respuesta a las fuerzas de gravedad y presión.

El horizonte crece con la expansión del universo; en el momento del desacoplamiento —cuando los fotones del FCM se liberaron del plasma primordial— el universo era más pequeño que ahora. Por tanto, el FCM contiene información sobre las variaciones mayores y menores que el horizonte. Puesto que las variaciones mayores apenas han cambiado con respecto a su estado inicial, revisten particular interés en la investigación de las propiedades del universo primitivo. Sin duda, la polarización debida a las ondas de gravedad es más detectable a escalas grandes. Sin embargo, puesto que el plasma apenas se movía a dichas escalas, la polarización debida a los flujos masivos es muy pequeña.

Las variaciones a escalas más cortas que la escala del horizonte en el desacoplamiento cambiaron su estado inicial cuando el horizonte creció más que la longitud de onda de la fluctuación. En este momento, las regiones de densidad distinta se hallaban en contacto, y el plasma se movía en respuesta a la gravedad y a la presión antes de que los fotones se desacoplaran. Estas escalas proporcionan información sobre las propiedades dinámicas del plasma,



7. LAS DIFERENTES VELOCIDADES DEL FLUJO DEL PLASMA PRIMORDIAL (*flechas rojas*) actuaron como polarizadores de la radiación del fondo cósmico. Imaginemos un plasma que fluyera a través de un embudo y fuera frenándose a medida que se acerca a su destino (*izquierda*). Un electrón del interior del plasma "ve" que el plasma que le rodea se desplaza hacia él a velocidades diferentes: más rápido desde la izquierda y la derecha, más despacio desde arriba y abajo; es decir, las

velocidades relativas tienen un momento cuadrupolar (*derecha*). Puesto que el plasma primordial se movía a velocidades altas, aparecen ciertos fenómenos relativistas: cuanto más rápido se aproxime el plasma, más brillante parecerá. En consecuencia, existe un momento cuadrupolar en la intensidad de la radiación que incide sobre el electrón; la radiación dispersada por la partícula cargada presentará una componente polarizada (*véase la figura 6*).

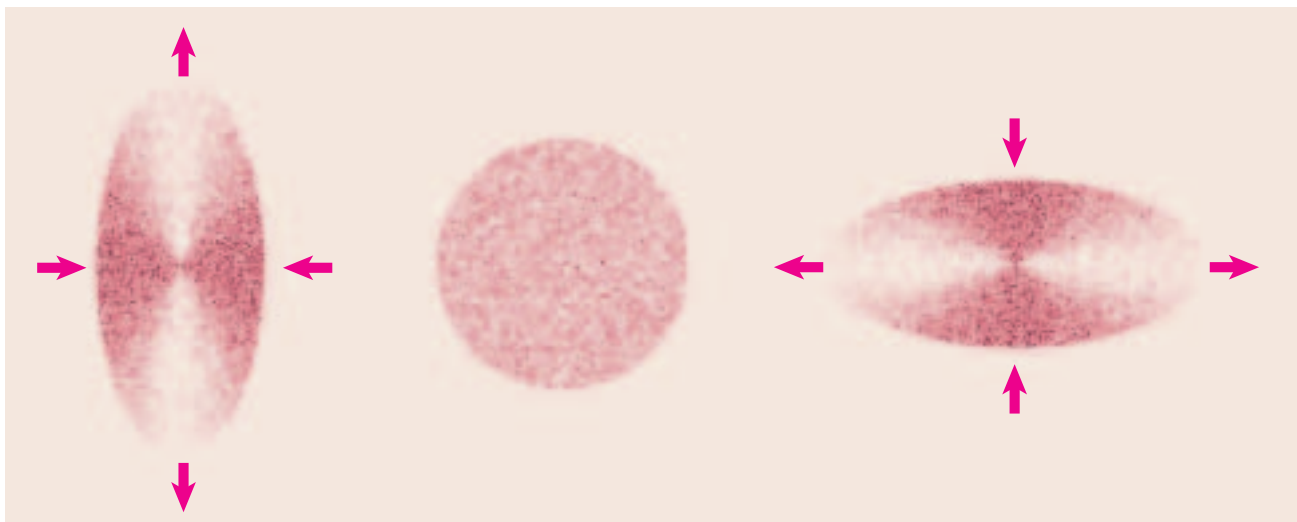
tales como la densidad de masa y la velocidad del sonido, que dependen, en buena medida, de la composición del universo primitivo.

La pugna entre las fuerzas de gravedad y la presión provoca la oscilación del plasma hacia fuera y hacia el interior de las regiones densas. Estas oscilaciones modifican las variaciones de brillo y generan una considerable

polarización por medio de los movimientos masivos del plasma; en el espectro de potencias aparece una serie de picos y valles. Hay una relación simple y directa entre las variaciones de la velocidad y la densidad de un plasma oscilante, análoga a la relación entre la posición y la velocidad de una masa en un resorte. En consecuencia, a esas escalas las variaciones

de la polarización y del brillo del FCM se encuentran estrechamente acopladas.

Las variaciones del FCM experimentaron más cambios durante el desacoplamiento y posteriormente al mismo; no se trató de un proceso instantáneo. Mientras se producía, los fotones viajaron distancias finitas entre dispersiones, y por tanto cancel-



8. LAS ONDAS DE GRAVEDAD del universo primitivo debieron de estirar y aplanar el plasma primordial a lo largo de dos ejes ortogonales. Cuando la forma de una región se distorsiona, la densidad y las longitudes de onda de los fotones que se desplazan a lo largo de los

ejes se modifican también. Esta distorsión pudo producir un momento cuadrupolar en el brillo (*sombreado*) de la radiación del plasma y polarizar, pues, la radiación del fondo cósmico (*véase la figura 6*). No se han detectado ondas gravitatorias en la señal polarizada.

laron cualquier variación acontecida a menor escala. Tras el desacoplamiento, algunos fotones fueron dispersados por el plasma tenue producido por las estrellas y otros objetos luminosos, y otros se desviaron al pasar cerca de objetos de gran masa. Estos fenómenos alteraron de forma particular las señales de la polarización, a gran y a pequeña escala, de ahí que las observaciones del FCM perfilen ciertas características del universo tras el desacoplamiento.

Aunque la física que determina las estructuras y las propiedades del plasma primordial depende de la escala de la longitud de las variaciones, éstas se miden en la práctica por su escala angular sobre el cielo. Desde el desacoplamiento, los fotones se han venido dirigiendo hacia nosotros; parecen, pues, originarse en una envoltura esférica centrada en la Tierra (véase la figura 3). Las escalas angulares del cielo, pues, son

esencialmente proporcionales a las escalas de longitud del universo temprano. Si el universo no estuviera en expansión y se atuviera a una simple geometría euclídea, la constante de proporcionalidad vendría fijada por el radio de la esfera. Sin embargo, el universo se ha expandido desde que se liberaron los fotones, y la geometría del universo podría no ser exactamente euclidiana. En consecuencia, la escala angular de los rasgos en el FCM depende también de la geometría y de la historia de la expansión del universo.

A pesar de que WMAP y otros experimentos observan ahora y miden muchos rasgos del espectro de potencias de las anisotropías del brillo, sólo se acaba de empezar a abordar la polarización del FCM. Los datos polarimétricos carecen de la precisión suficiente para mostrar con claridad los patrones predichos o demostrar con contundencia que los datos de

brillo concuerdan con la polarización esperada. Es más, ni siquiera se ha detectado la esquiva señal de las ondas de gravedad.

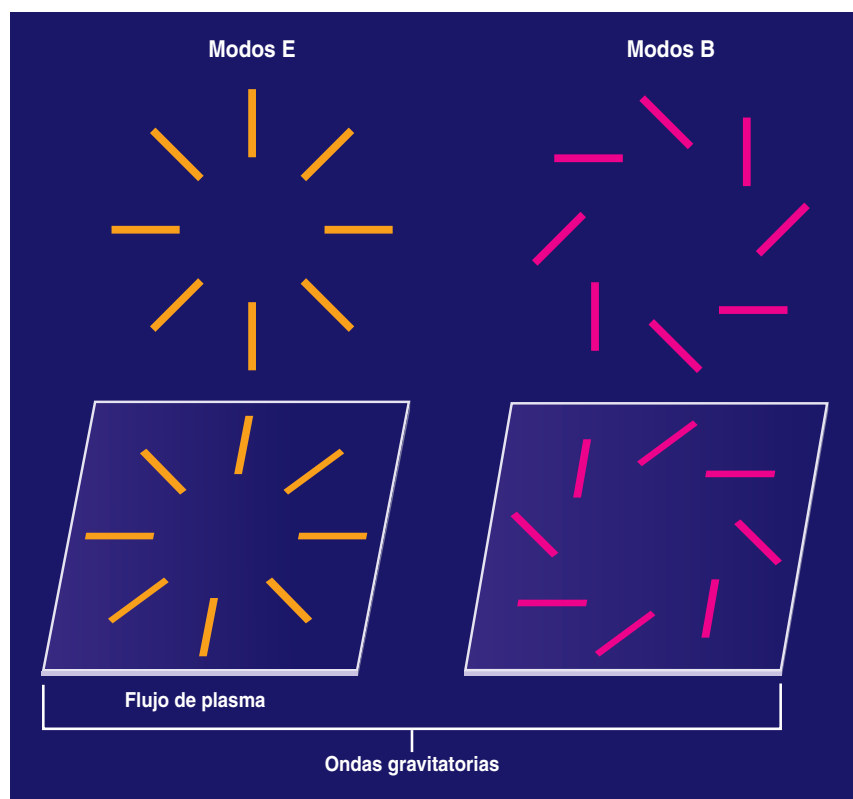
Medición de la polarización

Se emplean varios procedimientos para extraer la débil señal de la polarización de la más intensa radiación no polarizada. Cada método presenta sus propios puntos fuertes y sus propias dificultades, pero todos comparten ciertas características básicas.

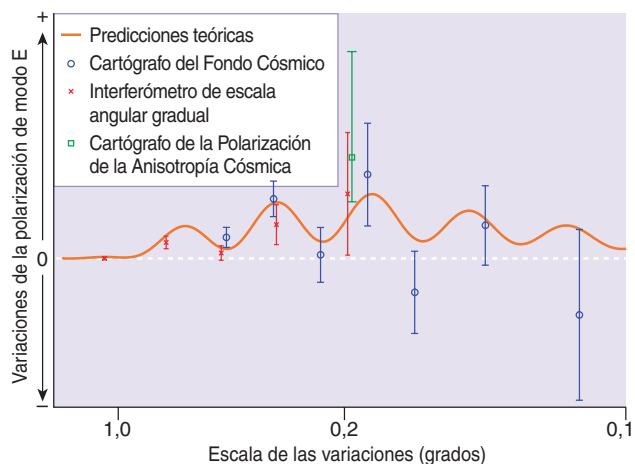
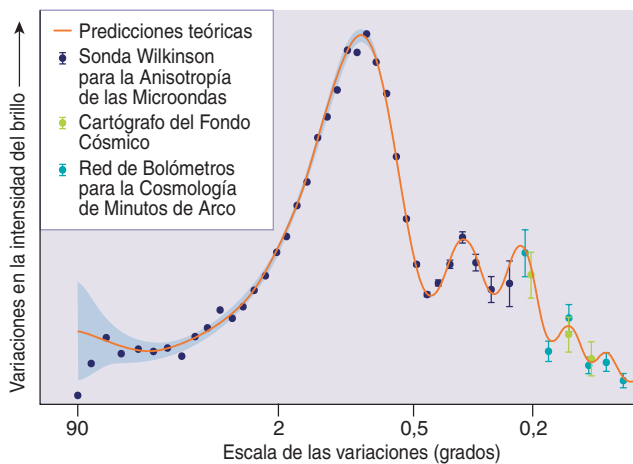
Todas las técnicas miden la diferencia en la intensidad del campo eléctrico a lo largo de dos ejes ortogonales. Las medidas diferenciales son comunes en polarimetría, y particularmente útiles en este contexto porque la resta de dos señales ortogonales cancela, en principio, la componente no polarizada. Sin embargo, puesto que la señal polarizada es muy pequeña, no podemos estar seguros de que la diferencia medida con el instrumento no venga causada por alguna asimetría del equipo. La rotación periódica del equipo permitiría eliminar de la señal real del cielo la contribución instrumental, pero en la práctica la rotación completa del instrumento es complicada, por lo que se emplean técnicas inteligentes para modular la radiación polarizada entrante y separar la señal real de los artefactos instrumentales.

Hay que tener además mucha paciencia, porque la señal es demasiado pequeña para medirla con rapidez. Sólo se puede recoger un número finito de fotones por segundo; la señal está con frecuencia dominada por fluctuaciones aleatorias. Por tanto, se debe repetir la medición durante muchos segundos para que las variaciones aleatorias se anulen y quede sólo la señal real de la polarización. Incluso con los mejores instrumentos se requieren horas para detectar la señal dominante procedente del movimiento masivo del plasma primordial. Caracterizar polarización y detectar las ondas gravitatorias primordiales requieren años de observación.

Varios equipos de investigación construyen hoy grandes redes de polarímetros con el fin de acelerar las observaciones. Puesto que cien polarímetros pueden ver en un día lo que un detector recogería en cien días, estas redes se convertirán en



9. DOS PATRONES DE SEÑALES POLARIZADAS puede haber en el fondo cósmico de microondas. El patrón de modos E presenta simetría especular, tal y como se aprecia en las reflexiones de abajo, mientras que los modos B cambian cuando se reflejan en un espejo. Los flujos masivos del plasma primordial generaron sólo modos E; las ondas de gravedad habrían producido los dos patrones. Cada barra representa la señal polarizada en un punto del cielo. La longitud de la barra corresponde al tamaño de la señal y su orientación indica la dirección de polarización.



10. LAS ANISOTROPIAS DEL BRILLO (*izquierda*) y de la polarización de modo E (*derecha*) del fondo cósmico de microondas se pueden cuantificar con un espectro de potencias, que muestra la amplitud de las variaciones a diferentes escalas angulares. Aquí se comparan las predicciones teóricas con los resultados de varios instrumentos. En el universo primitivo, cada proceso tenía su importancia a una determinada escala; los rasgos correspondientes a diferentes escalas angulares remiten, pues, a fenómenos diversos acontecidos en el plasma primordial. A grandes escalas angulares (mayores que 2 grados), las variaciones reflejan las condiciones de los primeros momentos del universo. La polarización de modo E es pequeña, lo que indica que el plasma

flúa poco, pero si las ondas de gravedad existieron, deberían manifestarse a esta escala. A escalas intermedias (de 2 grados a 0,2 grados), una serie de picos y valles reflejan las oscilaciones del plasma primordial. Los picos de las variaciones de brillo se identifican con grandes variaciones de densidad en el momento del desacoplamiento, mientras que los picos en la polarización indican que el material se desplazaba rápidamente. Las variaciones de las escalas angulares más pequeñas (menos de 0,2 grados) disminuyen porque durante el desacoplamiento los fotones recorrieron distancias finitas entre una dispersión y la siguiente, borrando las variaciones de pequeña escala. Las dos gráficas se han realizado a distinta escala.

poderosas herramientas para el estudio de la polarización primordial en cuanto comiencen a funcionar a lo largo de los próximos años.

El fondo cósmico de microondas no es la única fuente de microondas polarizadas. Los electrones y el polvo del interior de nuestra galaxia y de los objetos extragalácticos polarizan también la radiación a las longitudes de onda del FCM. Aunque estas señales polarizadas pudieran ser débiles, no está claro si deben despreciarse, en particular cuando se trata de detectar la tenue señal de las ondas gravitatorias. Afortunadamente, los espectros de frecuencia de estas otras fuentes difieren del espectro del FCM; por eso, se está planeando medir la polarización cosmológica en varias longitudes de onda. Estas observaciones deberían identificar dicho ruido y aislarlo de las señales de origen cosmológico.

Queda mucho camino por recorrer en el estudio de la polarización del FCM. Aun así, se ha progresado bastante. En septiembre de 2004, varios grupos experimentales —los de DASI, el Cartógrafo de la Polarización de la Anisotropía Cósmica (CAPMAP) y el Creador de Imáge-

nes del Fondo Cósmico (CBI)— hicieron públicas las nuevas medidas de la polarización del FCM. Los científicos del WMAP anunciarán pronto sus resultados. Durante los últimos meses, varios grandes proyectos nuevos, como el Experimento

Creador de Imágenes Q/U (QUIET) y QUEST de DASI (QuaD), han incrementado sus esfuerzos. Estos y otros experimentos proporcionarán nuevos resultados, interesantes y quizá sorprendentes, sobre la dinámica del universo primitivo.

El autor

Matthew Hedman es investigador asociado del departamento de astronomía de la Universidad Cornell. Participó en la detección de la polarización del fondo cósmico de microondas en sus años de doctorando de la Universidad de Princeton y, luego, siendo ya investigador del Centro de Física Cosmológica (hoy Instituto Kavli de Física Cosmológica) de la Universidad de Chicago. Actualmente se ocupa del análisis de los datos enviados por la nave Cassini desde Saturno.
©American Scientist Magazine.

Bibliografía complementaria

- FIRST-YEAR WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE (WMAP) OBSERVATIONS: PRELIMINARY MAPS AND BASIC RESULTS. C. L. Bennett et al. en *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 148, págs. 1-27; 2003.
- POLARIZATION OBSERVATIONS WITH THE COSMIC BACKGROUND IMAGER. A. C. S. Redhead et al. en *Science*, vol. 306, págs. 836-844; 2004.
- FIRST MEASUREMENTS OF THE POLARIZATION OF THE COSMIC MICRO-WAVE BACKGROUND AT SMALL ANGULAR SCALES FROM CAPMAP. D. Barkats et al. en *Astrophysical Journal Letters*, vol. 619, pág. L127; 2005.
- DASI THREE-YEAR COSMIC MICROWAVE BACKGROUND POLARIZATION RESULTS. E. M. Leitch, J. M. Kovac, N. W. Halverson, J. E. Carlstrom, C. Pryke y M. W. E. Smith en *The Astrophysical Journal*, vol. 624, págs. 10-20; 2005.