

# La polarización de la radiación cósmica de fondo

Alejandro Gangui

Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE), CONICET

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA

*‘Los acontecimientos borran a los acontecimientos;  
inscripciones grabadas sobre otras inscripciones,  
hacen las páginas de la historia de los palimpsestos.’*

–François Auguste René, Vizconde de Chateaubriand,  
*Memorias de Ultratumba*,  
Libro I, Cap. 4 (1812)–.

La radiación cósmica de fondo nos llega como un vestigio del universo primordial. Fue descubierta por azar en 1964 y es hoy considerada una de las evidencias más sólidas del modelo del Big Bang. En 1992, el descubrimiento de ‘anisotropías’ en su temperatura efectiva (variaciones dependientes de la dirección de observación), nos mostró las tan ansiadas pequeñas perturbaciones cosmológicas germinales en el plasma primordial, que luego de eones de evolución devendrían en las grandes estructuras galácticas que vemos hoy. Más tarde, otras observaciones con mayor resolución angular permitieron a los científicos deducir la geometría a gran escala de nuestro universo. Los resultados mostraron que, de todas las geometrías permitidas por la relatividad general, los fotones de la radiación de fondo habían viajado por un espacio físico que los matemáticos llaman *euclídeo*, esto es, exento de curvatura espacial (o sea, un universo ‘plano’). En el mes de septiembre del año 2002, miembros de la colaboración DASI (por *Degree Angular Scale Interferometer*, o Interferómetro de escala angular de un grado) anuncia-

ron un nuevo descubrimiento mayor: la radiación de fondo posee una pequeña ‘orientación’, o sea está polarizada. Este es un efecto de suma importancia y se venía buscando desde 1968, año en el que el astrofísico inglés Martin Rees predijera su existencia.

Pero la radiación cósmica de fondo deviene polarizada solo si existe una ‘dinámica’ particular en estas diminutas semillas primordiales a la base de la formación de las galaxias. Es por ello que su importancia mayor radica en que no solo es una muestra de las pequeñas inhomogeneidades presentes cuando el universo contaba, digamos, con unos 100.000 años de vida, sino que, además, nos informa sobre la manera en que dichos grumos primordiales ‘se movían’ durante esas épocas remotas. Este es un nuevo hallazgo que reafirma el marco teórico donde se sustenta la cosmología actual.

La mayor parte de la luz que nos rodea es *no polarizada*. Este tipo de radiación está constituido por trenes de ondas electromagnéticas que oscilan en planos perpendiculares al de propagación y donde cada plano está distribuido al azar. Sin embargo, la luz no polarizada puede adquirir una orientación de oscilación privilegiada cuando se transmite o refleja en un medio, como cuando atraviesa la lente de un par de anteojos de sol o se refleja en la superficie de un lago. En estos casos, la radiación incidente es reemitida mayoritariamente en forma de ondas que oscilan todas en un mismo plano. Designamos a este tipo de radiación con el nombre de *luz linealmente polarizada*.

Con la expansión y enfriamiento del universo, la radiación se desacopla de la materia neutra y es

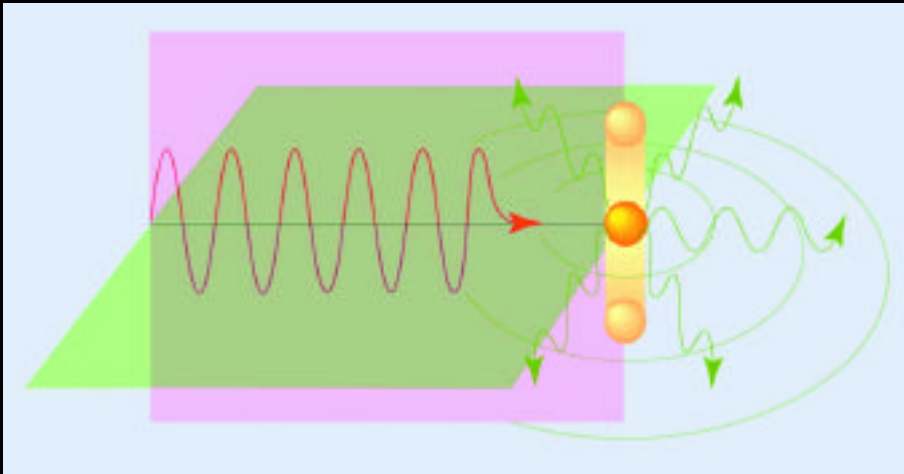


Figura 1. Una onda electromagnética (en rojo) polarizada linealmente oscila en un plano dado (en rosa). Cuando alcanza a un electrón (representado como una esfera naranja) la onda le imprime un movimiento oscilatorio que provoca la emisión de la onda difundida (en verde). Esta onda resultante se concentra esencialmente en el plano perpendicular al movimiento del electrón (plano verde) y está polarizada como la onda incidente.

en ese preciso momento que, según las predicciones del Big Bang, la radiación de fondo debió adquirir un pequeño nivel de polarización. Pese al optimismo inicial de los cosmólogos, debieron pasar más de treinta años para lograr detectar esta nueva señal. Y no es extraño que esto fuese así, ya que el nivel de la polarización es de apenas un 10 por ciento del de las ya pequeñas anisotropías en la temperatura. Esto es, la polarización de la radiación de fondo tiene una amplitud no mayor que unos pocos microkelvins, un verdadero desafío experimental.

¿Cuáles son los mecanismos responsables de la polarización? En primer lugar, debemos saber que cuando una onda electromagnética incide sobre una partícula cargada eléctricamente –un electrón libre en el caso que nos interesa ahora, por ejemplo–, el campo eléctrico de la onda incidente imprime a la partícula un movimiento oscilante en la misma dirección. Esta carga en movimiento emite entonces un tipo de radiación llamada *radiación dipolar*. Esta radiación dipolar se concentra, esencialmente, en el plano ortogonal a la dirección de oscilación. Segundo punto importante, el campo de radiación resultante de la interacción con el electrón, estará polarizado de idéntica manera que la onda electromagnética incidente (figura 1).

Bien, estas dos reglas simples nos permitirán comprender el origen de la polarización impresa en la radiación de fondo en el momento de su última difusión contra la materia, cuando en esta comenzaban a formarse los primeros átomos neutros, y estos últimos se hicieron ‘transparentes’ a la radiación.

Este momento tan especial en la historia de nuestro universo, es conocido en la jerga como el

período de ‘la recombinación’ de la materia neutra, a pesar de ser la primera vez que los iones positivos (esencialmente protones) y los electrones se ‘combinan’ para formar átomos neutros. Antes de la recombinación, la radiación de fondo no estaba polarizada.

Una onda no polarizada puede describirse como la suma de dos ondas polarizadas en direcciones perpendiculares entre sí (figura 2). Considere-

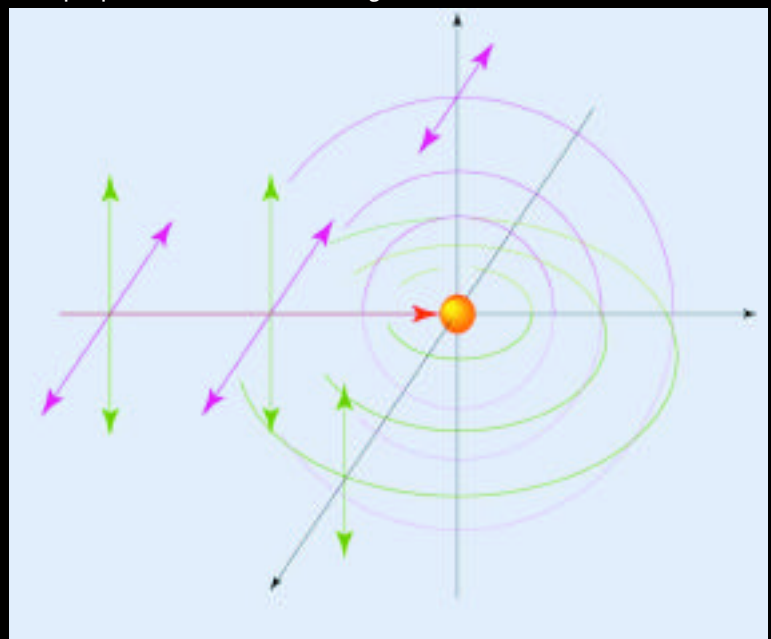


Figura 2. Si la onda electromagnética incidente es no polarizada, puede de todas maneras ser representada como la suma de dos ondas linealmente polarizadas, una a lo largo de la línea de visión (en rosa), la otra a lo largo de la dirección perpendicular (en verde). La radiación difundida inducida por la primera componente está contenida en el plano perpendicular a la línea de visión y no puede ser detectada. Solo llegará al observador la segunda componente (en verde) de la radiación incidente, y polarizada como esta.

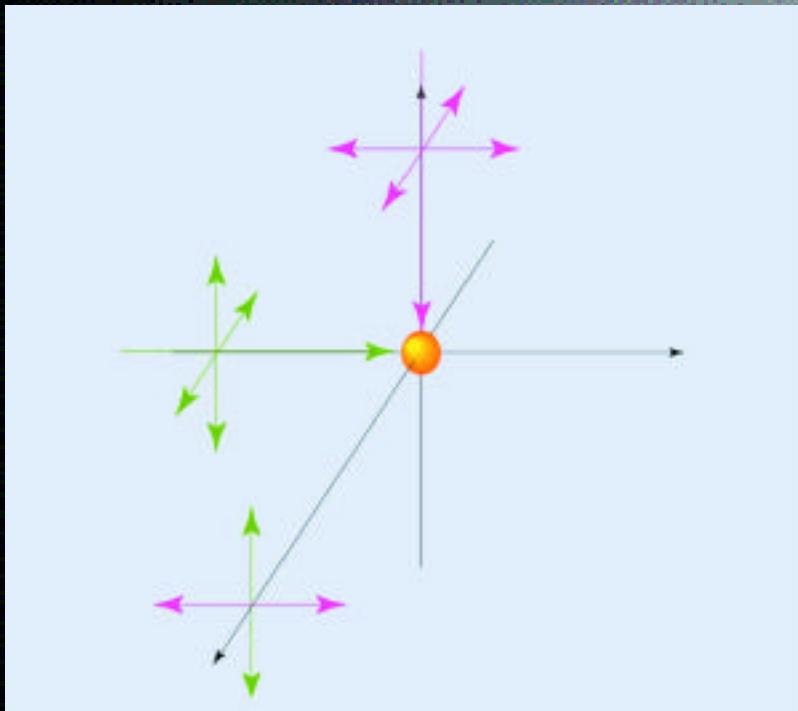


Figura 3. Cuando la partícula cargada recibe ondas no polarizadas procedentes de distintas direcciones (en verde y rosa), ella misma reemite hacia el observador ondas polarizadas en diferentes direcciones. Si la radiación incidente no es isótropa, una de estas emisiones polarizadas será levemente más intensa que las otras y podremos observar un ligero excedente de polarización resultante.

mos la llegada de dicha onda sobre un electrón, descomponiéndola en una primera onda polarizada según nuestra línea de visión hacia el electrón (flechas rosas) y en una segunda onda en dirección perpendicular (flechas verdes). La componente polarizada a lo largo de la línea de visión del observador (flechas rosas) generará una oscilación del electrón a lo largo de esta misma línea de visión. Como lo explicamos más arriba, la radiación dipolar difundida por este movimiento estará casi totalmente contenida en el plano perpendicular a la línea de visión, y en consecuencia no será detectada por el observador.

Solo será observable la componente resultan-

## Primer año de observaciones con el satélite WMAP

El observatorio norteamericano *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP o Sonda de Anisotropías de Microondas Wilkinson) fue lanzado al espacio en junio de 2001. Luego de unos meses de tránsito, WMAP se ubicó en una región gravitatoria semiestable alineada con el Sol y la Tierra, que sigue a la Tierra en su órbita, y que está alejada de esta en unas cuatro veces la distancia que nos separa de la Luna (denominada punto de Lagrange  $L_2$  y alineada en la forma Sol-Tierra- $L_2$ ). Allí, WMAP comenzó a recoger datos de la radiación de fondo en cinco frecuencias

distintas, algo necesario para la efectiva sustracción de las señales espurias inherentes a las mediciones del fondo de microondas, y con una resolución angular treinta veces superior a la de su antecesor, el satélite COBE (ver figura 1).

El pasado mes de febrero, miembros de la colaboración WMAP anunciaron los resultados del análisis del primer año de observaciones de anisotropías en la temperatura y en la polarización de la radiación de fondo, confirmando y mejorando la precisión de varias otras experiencias previas, incluyendo a DASI,

el primer experimento que detectara la polarización del fondo cósmico (ver nota central).

Pero WMAP fue aún más lejos, pues logró una cobertura total del cielo (solo posible mediante el empleo de satélites) y midió la polarización en un rango muy amplio de escalas angulares sobre el cielo de microondas. Esto último le permitió 'cruzar datos' entre las anisotropías en la temperatura y aquellas en la polarización, lo que condujo a descubrir un exceso notable en la intensidad de la radiación presente en escalas angulares muy grandes.

Este exceso a grandes escalas en la 'correlación cruzada' (como se llama en la jerga a esta señal) era en cierta forma algo que los cosmólogos esperaban encontrar. Y su explicación teórica más simple es adjudicarla a la existencia de una etapa de 'reionización' global del universo en épocas posteriores a la recombinación. Ahora bien, ¿qué mecanismo astrofísico habría podido inyectar la cantidad suficiente de energía como para volver a ionizar a la mayoría de la materia neutra (esencialmente hidrógeno) de nuestro universo?

te de la radiación inducida por la otra componente de la onda incidente (flechas verdes), puesto que esta imprime al electrón un movimiento perpendicular a la línea de visión. Así, para el observador, todo sucede *como si* él recibiese de parte del electrón una luz difundida inducida *solo* por la componente polarizada perpendicularmente a la línea de visión (las flechas verdes). En virtud de la segunda regla que mencionamos más arriba, la radiación resultante debe poseer la misma dirección de polarización. En conclusión, el observador solo recibe una parte de la radiación incidente sobre la partícula cargada (las flechas verdes) y esta fracción está linealmente polarizada.

Hasta ahora nuestro razonamiento deja de lado el hecho de que un electrón recibirá radiación procedente de todas las direcciones imaginables, y en forma independiente (figura 3). Cada una de estas ondas, como la que consideramos más arriba, será difundida hacia el observador en forma de radiación polarizada, pero cada una en una dirección independiente. Por ello, si el campo de radiación incidente sobre el electrón fuera exactamente isotró-

po, la radiación difundida estaría compuesta por trenes de ondas polarizadas con idéntica intensidad en todas las direcciones, y la suma de todas estas contribuciones terminaría por no dejar aparecer ninguna dirección privilegiada...

¡Pero la radiación cósmica de fondo *no* es perfectamente isotrópica!

Como ya lo señalamos, existen pequeñas fluctuaciones que deben su origen a que el plasma primordial no era perfectamente homogéneo en la época de la recombinación. Estas ínfimas inhomogeneidades aseguran que las direcciones de polarización de los trenes de onda difundidos no podrán compensarse exactamente. Quedará entonces un ligero excedente de polarización en cada punto del cielo observado, como en efecto lo detectan las antenas de microondas.

En fin, esta es entonces la base teórica subyacente al reciente descubrimiento de la polarización en la radiación cósmica de fondo por parte de la colaboración DASI.

Nos queda un último punto a enfatizar. Antes de la recombinación, las altas energías en juego

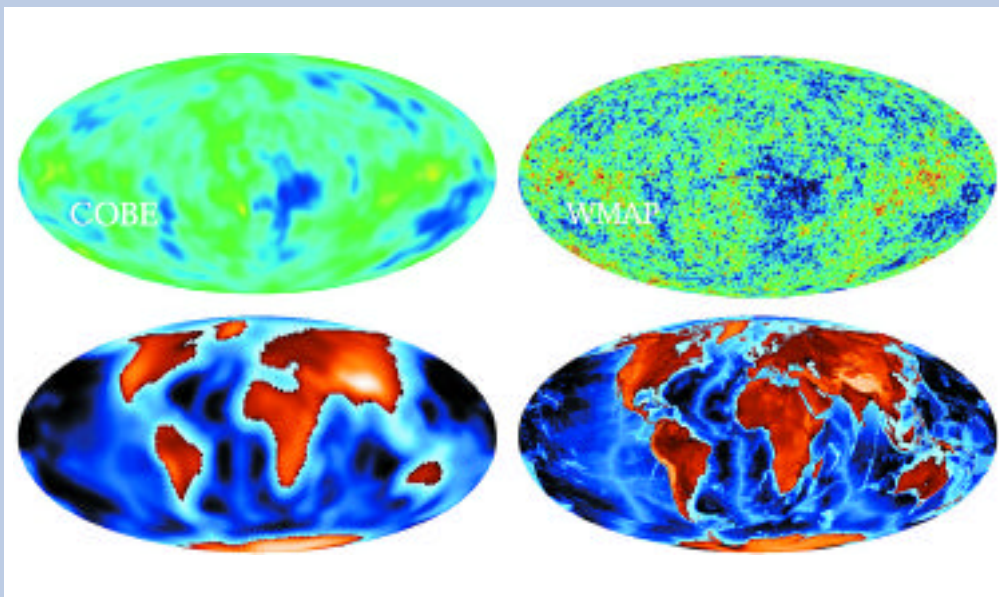


Figura 1. La Tierra vista por COBE y por WMAP. Los mapas superiores muestran el cielo de microondas en decenas de microkelvins de temperatura efectiva, como fuera detectado por el satélite COBE en 1992, el primero en descubrir las anisotropías primordiales a la base de las grandes estructuras de nuestro universo (imagen izquierda), y por el satélite WMAP, más de 10 años más tarde (imagen derecha). La resolución angular de los detectores de COBE es de unos 7 grados y la imagen inferior izquierda nos muestra cómo se vería la Tierra con esa resolución (recuérdese que el diámetro aparente de la Luna llena es de medio grado, o sea unas 14 veces más allá de la capacidad de COBE). Los 'ojos' de WMAP, por el contrario, 'miran' con una resolución de unas 20 centésimas de grado angular y son por ello más de 30 veces más agudos que los de su antecesor. La imagen inferior derecha nos muestra la superficie de la Tierra vista con estos nuevos ojos. El futuro proyecto de satélite Planck Surveyor, de la Agencia Espacial Europea, prevé una resolución angular incluso varias veces mejor . (Imágenes cortesía de COBE, WMAP, E Hivon y K Gorski).

La explicación más plausible es que hayan sido las primeras estrellas que se 'encendieron' en nuestro universo. De ser así, estos nuevos datos nos permiten deducir la época de su formación, y los miembros de la colaboración WMAP obtuvieron un tiempo de aproximadamente 200 millones de años luego del Big Bang. Este sería, entonces, 'el comienzo del fin' de las llamadas 'eras de oscuridad' de nuestro universo.

## Polarización para menores de 35 (en 2003)

Diego Harari

Departamento de Física, FCEyN, UBA

Hace 35 años el astrofísico inglés Martin Rees predijo que si la radiación cósmica de fondo –descubierta tres años antes– fuese verdaderamente un vestigio fósil del Big Bang, debería presentar entonces un diminuto grado de polarización (ver nota central). Esta muy leve preferencia del campo eléctrico por oscilar en una dirección debió haberse estampado en la radiación cósmica de fondo durante sus últimas colisiones con los electrones, justo antes de que estos se combinaran con los protones de la sopa cósmica primordial para formar átomos. El Universo llevaba por entonces unos pocos cientos de miles de años de expansión, casi nada comparados con los 15.000 millones actuales.

Desde 1968, cuando Rees lo predijo, el tema motivó muchos trabajos de investigación, particularmente durante la última década, cuando empezó a parecer viable la posibilidad de medir tan diminuto efecto. Desde el lado de la teoría el empuje motivante lo dio un grupo de brillantes jóvenes astrofísicos nacidos después de que Martin Rees formulara su predicción hace 35 años. Uno de ellos es un argentino, Matías Zaldarriaga, actualmente

profesor en la Universidad de Harvard. El trabajo que informa el descubrimiento de polarización en la radiación cósmica de fondo cita en su bibliografía siete diferentes publicaciones en las que él es uno de los autores. Sus contribuciones aportaron poderosos métodos que permitirán aprovechar al máximo las mediciones de polarización para aprender cada vez más sobre cómo era el Universo primitivo, mucho antes de que se formaran los primeros átomos.

Licenciado en Física en la Universidad de Buenos Aires en 1994, Zaldarriaga desarrolló un método analítico que hace explícita la relación entre la polarización de la radiación cósmica de fondo y la dinámica de la materia en el momento en que se formaban los primeros átomos en el Universo. En 1996, como alumno del doctorado del MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), Zaldarriaga desarrolló un método numérico para el cálculo de las propiedades de la radiación cósmica de fondo cuya rapidez y eficiencia dejaron obsoletos a los existentes hasta ese momento. Este desarrollo original resultó crucial en una etapa en que la cosmología empezaba a transitar el paso hacia una

ciencia cada vez más cuantitativa, con un balance entre teoría y experimento similar al de otras áreas de la física, y que requería el ajuste de datos cada vez más numerosos y precisos. Varios cientos de trabajos publicados desde entonces, en particular los relacionados con los recientes y exitosos experimentos, utilizaron el método de Zaldarriaga para inferir, a partir de las mediciones, los valores de parámetros fundamentales del modelo del Big Bang como la cantidad de materia tanto brillante como oscura, la curvatura del Universo y la velocidad y aceleración de su expansión. Zaldarriaga fue investigador postdoctoral en la Universidad de Princeton, profesor en la Universidad de Nueva York y desde este año (2003) profesor en la Universidad de Harvard. En todas sus estadias realizó importantes contribuciones al tema de la radiación cósmica de fondo. Por ejemplo, propuso una manera alternativa de analizar las propiedades de polarización renegando de los ‘parámetros de Stokes’ que desde hace un siglo son la norma en el tema. Sugirió una descripción alternativa, que tiene la particularidad de relevar la dinámica de la materia que generó la polarización, detectando si

su movimiento tiene o no ‘remolinos’. Ello podría servir, cuando las mediciones de polarización sean más precisas, para poner a prueba especulaciones sobre una expansión acelerada del universo primitivo, llamada etapa inflacionaria, que predice un patrón específico de polarización. También mostró que las mediciones de polarización podrían inclusive aportar datos sobre la distribución de materia actual en el universo, debido a las modificaciones que esta provoca en la radiación cósmica de fondo por el efecto de lente gravitatoria, que distorsiona la luz que llega desde lejos en forma parecida a como lo hace un vidrio irregular.

En suma, un efecto predicho hace 35 años fue finalmente medido. El resultado apuntala la idea de que el universo evoluciona desde un inicio ‘explosivo’, y aporta claves sobre sus propiedades cuando todo lo que existía era una sopa cósmica de partículas elementales. A la comprensión y caracterización del efecto contribuyeron en forma protagonista científicos que, paradójicamente, hoy son menores de 35. Entre ellos, un egresado de la Universidad de Buenos Aires, Matías Zaldarriaga.

hacían que los fotones no se pudiesen propagar libremente a través de la materia ionizada circundante. Las continuas interacciones nos permiten describir con alta precisión a este plasma primordial mixto como un único fluido, con características intermedias entre la materia ionizada y la radiación. En este fluido, la tendencia a colapsar gravitatoriamente (la inercia) estaba determinada por la masa de los bariones (protones y neutrones), mientras que la ‘fuerza de oposición al colapso’ estaba dada por la presión de radiación de los fotones. Con la tendencia del fluido a aglutinarse, equilibrada dinámicamente por la presión restauradora de la radiación, no debe sorprendernos que aparecieran ‘oscilaciones acústicas’, tanto en la densidad de materia como en la velocidad del fluido.

Y fueron estas oscilaciones acústicas en el plasma primordial, la clave para comprender las características de las anisotropías en la temperatura de la radiación de fondo. Estas características que permitieron a los cosmólogos incluso dar un veredicto sobre el difícil ejercicio de calcular la curvatura a gran escala de nuestro universo. ¿Qué nueva información nos proporciona el conocer la polarización de la radiación de fondo?

Pues bien, si las anisotropías nos indicaban el tamaño de las semillas primordiales que formaron las galaxias actuales, la polarización nos indica las variaciones de intensidad intrínsecas en la radiación en el momento preciso de la recombinación. Y estas variaciones de intensidad no son producidas solo por el tamaño de las semillas sino, sobre todo, por la dinámica de estas. En suma, si las anisotropías nos proporcionaban una clara imagen de nuestro joven universo al momento de cumplir 100.000 años de vida, el campo de la polarización le ‘agrega movimiento’ a dicha imagen y nos permite observar la forma en que los grumos primordiales de la formación de estructuras ‘se movían’ en aquella época tan remota.

El descubrimiento de la polarización nos brinda una nueva ventana para observar el cosmos primordial. Como una imagen perdida de nuestro universo, y ocultada por procesos físicos posteriores, durante quince mil millones de años, la radiación de fondo nos revela ahora este palimpsesto cósmico. Su estudio permitirá a los cosmólogos descifrar la información que temíamos haberse perdido para siempre: el mecanismo dinámico de la formación de estructuras de nuestro universo.

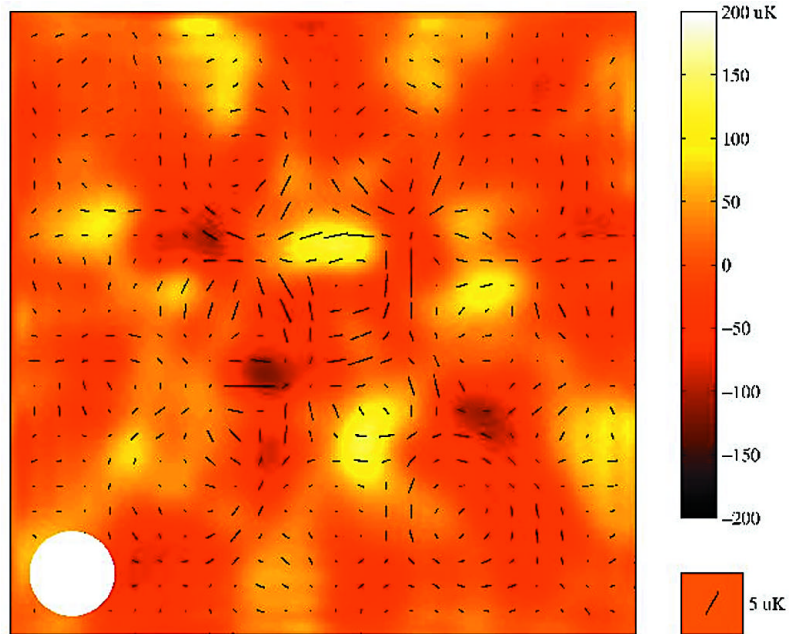


Figura 4. Imagen de la intensidad y polarización de la radiación cósmica de fondo obtenida por DASI en una zona del cielo de unos pocos grados de lado. Las diminutas variaciones (o anisotropías) de la temperatura de la radiación de fondo se muestran en colores artificiales, donde el amarillo corresponde a zonas más calientes y el rojo a zonas más frías que la temperatura media. La polarización detectada, a un nivel del 10 por ciento de las anisotropías, se evidencia con líneas negras. La longitud de cada una de estas muestra su amplitud, mientras que la orientación indica la dirección en la cual la radiación está linealmente polarizada. El círculo blanco de la esquina indica la resolución angular del experimento. (Cortesía de la colaboración DASI.)

### Agradecimientos

El autor agradece a Diego Harari y a los demás participantes del club de lectura ‘CMB’ por discusiones en estos temas, y a la Fundación Antorchas por el apoyo financiero.

Alejandro Gangui: Doctor en Astrofísica, International School for Advanced Studies, Trieste, Italia. Investigador Adjunto del CONICET y Jefe de Trabajos Prácticos con dedicación exclusiva de Cosmología y otras materias de grado de la FCEyN-UBA. Miembro del IAFE - Instituto de



Astronomía y Física del Espacio.

gangui@df.uba.ar y [www.iafe.uba.ar/gangui.html](http://www.iafe.uba.ar/gangui.html)