

EL EXPERIMENTO QUIJOTE: DIEZ AÑOS OBSERVANDO

Tras una década desde que se iniciaran sus observaciones, la colaboración QUIJOTE ha presentado en una serie de artículos la descripción más precisa hasta la fecha de la polarización de la emisión en microondas de la Vía Láctea. Los nuevos mapas proporcionan imágenes de nuestra Galaxia en el rango espectral de 10-20 GHz, complementando así los resultados de misiones espaciales previas (Planck y WMAP) dedicadas al estudio del fondo cósmico de microondas (FCM). Estos mapas proporcionan información de la estructura del campo magnético galáctico y ayudarán a comprender los procesos energéticos que tuvieron lugar en el nacimiento del Universo.



Ricardo Tanausú Génova Santos
rgs@iac.es



José Alberto Rubiño Martín
jalberto@iac.es

Instituto de Astrofísica de Canarias

En representación de
la Colaboración QUIJOTE

Algunas de las predicciones de la *teoría general de la relatividad*, como la curvatura de los rayos de luz por el efecto de interacción con un campo gravitatorio, fueron confirmadas poco después de su publicación en 1915. Otra importante predicción de esta teoría, la existencia de ondas gravitacionales, tuvo que esperar exactamente un siglo para ser confirmada. Concretamente hasta la detección del experimento LIGO en 2015. Una onda gravitacional es la propagación de una deformación del espacio-tiempo creada por masas en movimiento. Eventos muy energéticos en el Universo, como la colisión de agujeros negros, generan ondas gravitacionales con amplitudes que, aun siendo pequeñas, son lo suficientemente grandes para ser detectadas por experimentos ultra-precisos como LIGO. El mismo origen del Universo, y en particular una etapa de expansión extremadamente rápida que de acuerdo con modelos teóricos desarrollados en los años ochenta debió producirse justo después del *Big Bang*, conocida como *inflación*, debió también generar ondas gravitacionales. Debido a que las propiedades (amplitud y periodo) de estas ondas son diferentes a las de origen "local" que detecta LIGO, no es posible su detección directa. Sin embargo, gracias a desarrollos realizados a finales de los años noventa, se sabe que estas ondas gravitacionales del *Big Bang* deben haber dejado una huella o patrón específico (conocido como *modo B*) en la polarización del *Fondo Cósmico de Microondas* (FCM), que es precisamente la radiación remanente del *Big Bang*, originada cuando el universo tenía "sólo" unos 400 mil años. La detección de esta señal no sólo supondría un espaldarazo al modelo inflacionario, sino que daría pie a estudiar procesos físicos generados en un dominio de energía no explorado hasta ahora.

La radiación del FCM, y en particular sus anisotropías (fluctuaciones de intensidad en función de la dirección de observación), ha sido ampliamente escudriñada durante los últimos 30 años por una multiplicidad de experimentos, algunos de ellos situados en el Observatorio del Teide, y también por tres misiones espaciales, la más reciente de ellas el satélite Planck de la ESA, en el que España tuvo una importante contribución instrumental y científica. Estos estudios han dado lugar a grandes avances en nuestro conocimiento de la estructura, composición y evolución del Universo, y también han confirmado que la energía oscura y la materia oscura son sus

LA POLARIZACIÓN DEL CIELO EN MICROONDAS

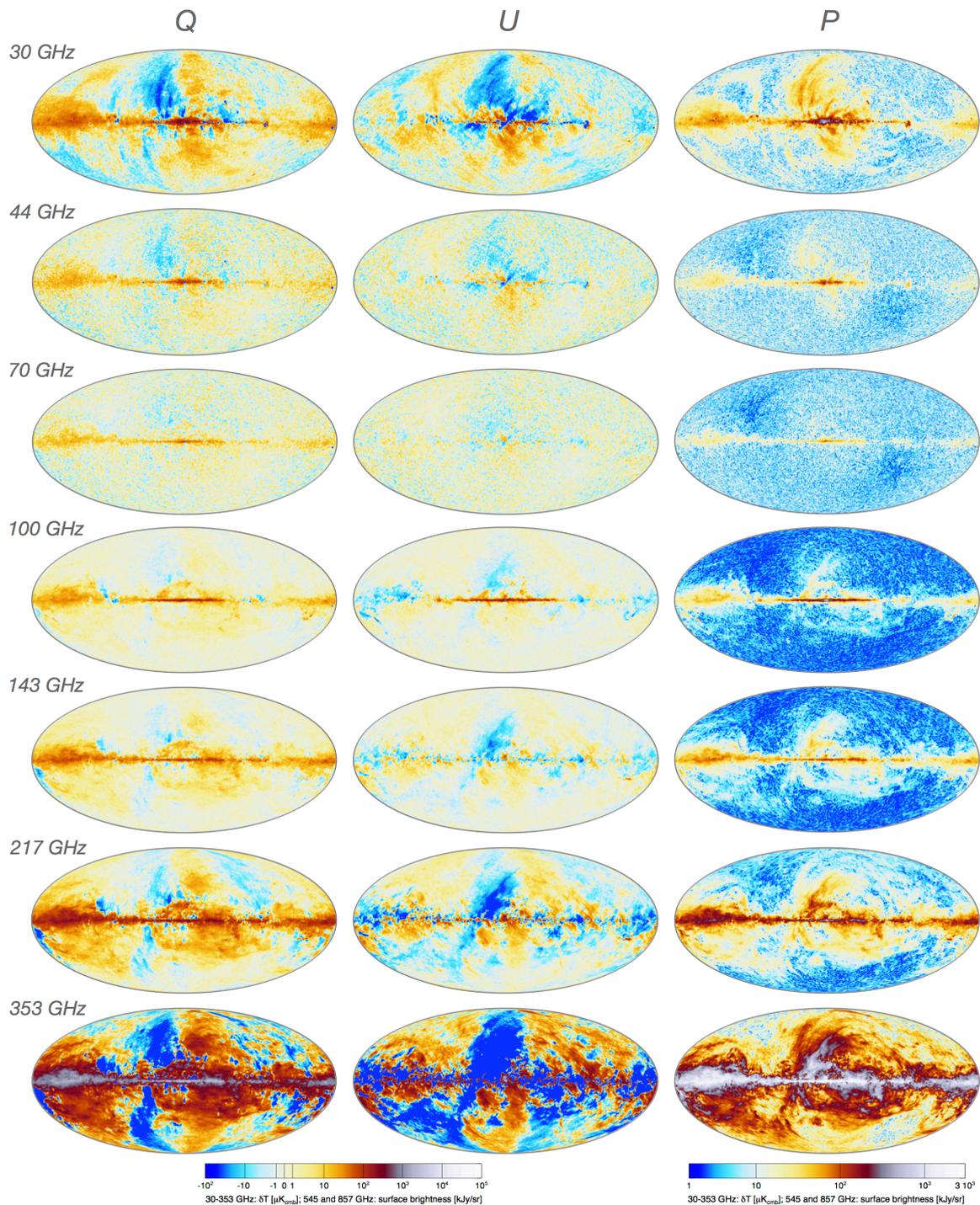


Figura 1. Mapas de intensidad y de polarización lineal (parámetros de Stokes Q y U, e intensidad polarizada P) de todo el cielo obtenidos por el satélite Planck entre 30 y 353 GHz. La emisión sincrotrón es claramente visible en bajas frecuencias, particularmente a 30 GHz. A frecuencias por encima de 100 GHz, la emisión térmica (vibracional) de granos de polvo empieza a ser importante, dominando por completo los mapas de 353 GHz. El mínimo de la emisión combinada de estos dos contaminantes galácticos se produce a una frecuencia cercana a 70 GHz. Crédito: Colaboración Planck (<https://www.cosmos.esa.int/web/planck/picture-gallery>).

dos componentes principales, a pesar de que aún no sabemos muy bien qué son. Sin embargo, debido a su muy baja intensidad, la detección de los modos B en la polarización del Fondo Cósmico de Microondas es mucho más complicada. Por ello, de manera similar a como ocurrió con el experimento LIGO, se ha tenido que esperar a poder desarrollar tecnologías específicas y con el nivel de precisión y calidad suficientes para poder ser implementadas en experimentos que permitan abordar estos estudios. Además de los fotones del FCM, estos experimentos, como es el caso de QUIJOTE, reciben radiación originada en nuestra propia Galaxia, que se superpone y contamina la radiación primordial (ver Figura 1). Esto añade un desafío adicional a los de carácter instrumental que hay que superar. Pero, como en el caso de LIGO y las ondas gravitacionales de origen cercano, los grandes descubrimientos y la confirmación de grandes teorías suelen suponer enfrentarse a esfuerzos experimentales y observacionales de envergadura.

EL EXPERIMENTO QUIJOTE

Desde principios de los años 80, tras la instalación del experimento Tenerife, el Observatorio del Teide ha desempeñado un importante papel en las investigaciones del Fondo Cósmico de Microondas. A este experimento, fruto de una colaboración entre el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) y las Universidades de Manchester y Cambridge, le sucedieron varios otros dedicados a la medida de las anisotropías del FCM con gradualmente mayor sensibilidad. El último de esta serie de proyectos es el experimento QUIJOTE, el primero diseñado específicamente para la medida de la polarización del FCM. Este experimento cubre un rango de la ventana de microondas entre 10 y 40 GHz, siendo así complementario a los que observan desde Tierra normalmente en frecuencias más altas, donde la contaminación atmosférica es más importante, y también a las misiones espaciales WMAP y Planck, que observaron en frecuencias por encima de 23 y 30 GHz respectivamente. Esta característica hace que los datos de QUIJOTE sean sensibles no sólo a la radiación primigenia del FCM, sino a la radiación sincrotrón, un tipo de emisión generada por la aceleración de los rayos cósmicos en el campo magnético de nuestra Galaxia. Esta radiación, junto con la emisión producida por granos de polvo del medio interestelar, son los dos mecanismos de emisión galáctica que presentan polarización, y por lo

tanto introducen una contaminación sobre la señal de modos B en la polarización del FCM (ver Figura 1). Es por ello que su estudio, la precisa caracterización observacional de sus propiedades espectrales, es una tarea ineludible para poder desmascarar la señal de los modos B en los mapas producidos por QUIJOTE y otros experimentos. QUIJOTE es el único experimento multifrecuencia que ha observado la polarización de grandes áreas de cielo en frecuencias por debajo de 20 GHz, y por lo tanto el que ha proporcionado la información más precisa de la polarización de la emisión sincrotrón, cuya amplitud aumenta a medida que disminuye la frecuencia dentro del rango de radio.

QUIJOTE es una colaboración liderada por el IAC y tiene la participación del Instituto de Física de Cantabria y de las universidades de Cantabria, Cambridge y Manchester. Una lista actualizada de los miembros de la colaboración QUIJOTE puede verse en <https://research.iac.es/proyecto/quijote/pages/en/group-members.php>. El proyecto consiste en dos telescopios de 2.3 m de diámetro denominados QT1 y QT2 (ver Figura 2), y tres instrumentos: el experimento multi-frecuencia (MFI), que cubre cuatro bandas de frecuencia centradas en 11, 13, 17 y 19 GHz, otro que observa a 30 GHz (TGI) y un tercero a 40 GHz (FGI). Con esta combinación de tamaño de la óptica y rango de frecuencias se consiguen resoluciones angulares de un grado y algo menores, que son idóneas para el estudio del FCM en las escalas angulares en las que se espera la señal de modos B primordiales. La latitud geográfica de Tenerife permite acceder a una gran parte de la esfera celeste, en concreto a aproximadamente el 75% de todo el cielo (declinaciones por encima de -32 grados) cuando se realizan observaciones a una elevación sobre el horizonte de 30 grados (no es conveniente realizar observaciones a elevaciones más bajas porque aumenta mucho la contaminación atmosférica). Como se explica debajo, con el MFI se cubrió toda esta área de cielo para producir los mapas que se muestran en la Figura 3. También se realizaron observaciones sobre regiones más pequeñas pero con una mayor sensibilidad gracias al mayor tiempo de integración por unidad de área. Desde el año 2018, el TGI y el FGI han realizado observaciones también sobre regiones de interés de pequeño tamaño y en los próximos meses empezarán una nueva campaña de observación en una configuración mejorada (con un mayor número de detectores).



Figura 2. Telescopios QUIJOTE (QT1 y QT2) en el Observatorio del Teide. El MFI (10-20 GHz) estuvo instalado en el QT1 (en segundo plano), mientras que el instrumento TFGI (30 y 40 GHz) opera en el QT2 (en primer plano). Créditos: Daniel López/IAC.

“MFI WIDE SURVEY”: UN CARTOGRAFIADO DEL CIELO NORTE CON MFI

Desde la concepción del proyecto QUIJOTE, uno de los principales objetivos científicos del instrumento MFI era la obtención de mapas en intensidad y polarización de todo el hemisferio norte en el rango de frecuencias de 10 a 20 GHz. El denominado “MFI wide survey” es un conjunto de 4 mapas que trazan la emisión en intensidad y polarización lineal del cielo en las frecuencias de 11, 13, 17 y 19 GHz, y que cubren unos 29,000 grados cuadrados que incluyen todo el hemisferio norte (Rubíño-Martin et al. 2023). Estos mapas son el resultado de unas 10,000 horas de observación con el MFI distribuidas durante el periodo de Mayo de 2013 a Junio de 2018. Los mapas obtenidos tienen una resolución angular de aproximadamente un grado,

y sensibilidades típicas en polarización lineal de unos 40 microK por grado cuadrado. La Figura 3 muestra el mapa obtenido para 11GHz.

El conjunto de los cuatro mapas de frecuencia, junto con otros productos asociados (incluyendo por ejemplo los catálogos de radiofuentes presentes en los mapas) fueron liberados a la comunidad científica en enero de 2023 (<https://research.iac.es/proyecto/quijote/>), junto con una serie inicial de 6 artículos. Esta serie se está completando en estos momentos con otras publicaciones, dos de las cuales ya se han enviado a publicar.

Los mapas de polarización obtenidos proporcionan una descripción de la emisión galáctica de calidad comparable a la obtenida por los satélites WMAP

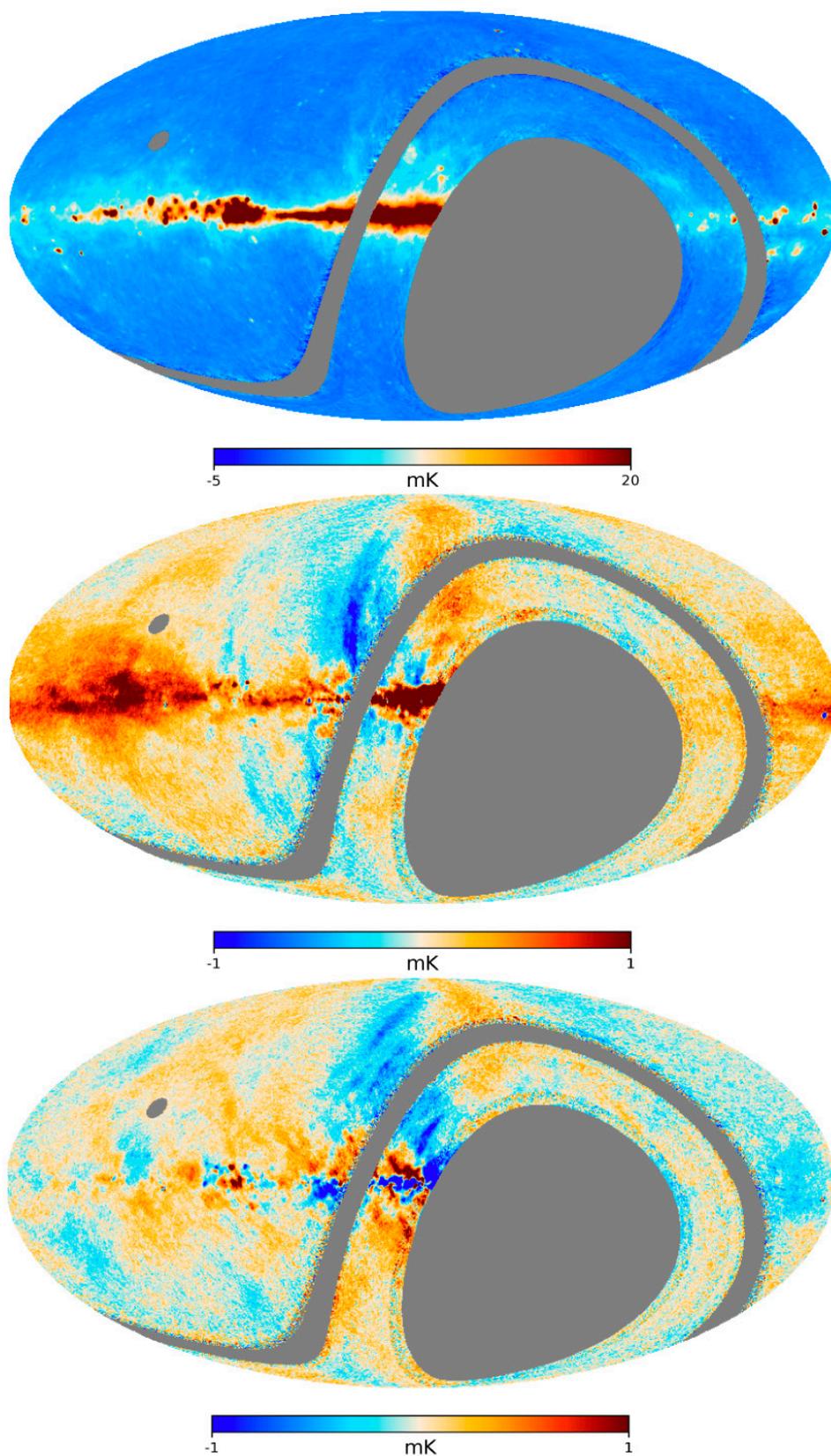


Figura 3. Mapas obtenidos por QUIJOTE MFI a 11GHz. Se representan la intensidad (arriba), y los parámetros de Stokes Q y U (centro y abajo respectivamente) en coordenadas galácticas. Adaptado de Rubiño-Martín et al. (2023). Créditos: Colaboración QUIJOTE.

(NASA) y Planck (ESA), abriendo la posibilidad de estudiar por primera vez la dependencia espectral de la emisión de cielo en frecuencias de microondas. Los datos de QUIJOTE-MFI permiten reconstruir incluso las grandes escalas angulares en el cielo, que habitualmente no son accesibles con experimentos desde Tierra. Esto proporciona una constatación de la estabilidad y transparencia de la atmósfera en los Observatorios de Canarias para este tipo de estudios.

Uno de los rasgos que llama la atención de estos mapas es la franja que queda sin observar alrededor de la línea de declinación cero grados. Esta zona corresponde a la localización de los satélites geoestacionarios (principalmente de comunicaciones), que emiten en este rango de las microondas, y que debemos evitar con nuestro instrumento. Volveremos sobre este punto más abajo.

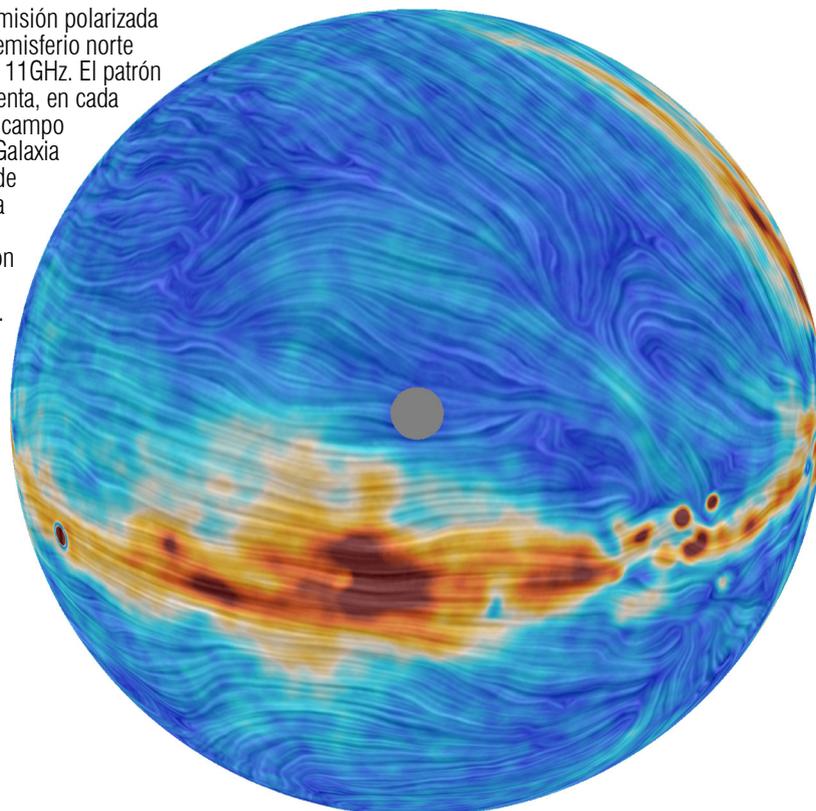
EMISIÓN POLARIZADA DE NUESTRA GALAXIA: LA RADIACIÓN SINCROTRÓN Y EL CAMPO MAGNÉTICO

Nuestra Galaxia es brillante en microondas y radio. El proceso físico de emisión más importante en estas frecuencias es la radiación sincrotrón, debida a las aceleraciones que sufren los rayos cósmicos (principalmente electrones) en presencia del campo magnético

galáctico. La caracterización de su distribución espectral de energía proporciona por tanto información sobre las energías relativistas de los electrones, que son principalmente originados y acelerados en las grandes explosiones de supernovas en nuestra Galaxia.

El sincrotrón es una emisión con un alto grado de polarización, y se encuentra íntimamente ligada a la distribución de las líneas de campo magnético galáctico. El grado de uniformidad espacial de estas líneas de campo magnético está directamente relacionado con la coherencia en la dirección de polarización de la emisión radiada por electrones individuales, de forma que cuanto más uniforme y regular sea el campo magnético, mayor será el nivel de polarización de la emisión producida por un conjunto de electrones en una determinada línea de visión. Los mapas de QUIJOTE proporcionan por tanto una visión de la estructura de la componente regular del campo magnético, tal como se muestra en la Figura 4. Las líneas de campo están más ordenadas a lo largo del plano galáctico, donde siguen la estructura espiral de nuestra Galaxia. Por encima y por debajo de este plano la estructura del campo magnético se vuelve menos regular.

Figura 4. Mapa de la emisión polarizada en microondas en el hemisferio norte medido por QUIJOTE a 11GHz. El patrón difuso de trazos representa, en cada punto, la dirección del campo magnético de nuestra Galaxia (a 90° de la dirección de polarización). La escala de color representa la intensidad de la emisión polarizada. Crédito: Colaboración QUIJOTE.



El estudio detallado de los mapas de QUIJOTE, en combinación con los de Planck y WMAP, ha permitido extraer por primera vez información de la dependencia espectral del sincrotrón galáctico polarizado en escalas angulares mayores que un par de grados (de la Hoz et al. 2023). Uno de los resultados más sorprendentes e importantes de este análisis es que la emisión sincrotrón polarizada de nuestra Galaxia es mucho más variable espacialmente de lo que se pensaba. Los modelos previos a los datos de QUIJOTE muestran una variabilidad espacial en el índice espectral de la emisión que resulta ser un factor 2.5 veces menor que la variabilidad real encontrada. Y más aún, los datos de QUIJOTE empiezan a sugerir la presencia de curvatura en la distribución espectral del sincrotrón. Estos resultados son de enorme importancia para la búsqueda de modos B inflacionarios. La emisión polarizada de nuestra Galaxia es más brillante que la posible señal primordial de modos B en cualquier rango de frecuencias. Ya sabíamos, tras el reanálisis de los datos del experimento BICEP en combinación con los de Planck, que la emisión de los granos de polvo en polarización supone un velo importante a la señal cosmológica que es necesario corregir. Pues bien, los mapas de QUIJOTE proporcionan una información única para corregir la parte de ese velo debida al sincrotrón galáctico. Podríamos decir que para comprender los procesos energéticos que tuvieron lugar en el nacimiento del Universo, antes debemos comprender el magnetismo en nuestra Galaxia.

EMISIÓN ANÓMALA DE MICROONDAS

Se ha dicho anteriormente que los dos mecanismos de emisión galáctica que presentan un alto grado de polarización son la emisión sincrotrón y la emisión producida en granos de polvo del medio interestelar, que también son alineados por el campo magnético galáctico. La primera es estudiada por experimentos que como QUIJOTE observan en frecuencias bajas, mientras que la segunda se manifiesta en frecuencias más altas y es por ello que es estudiada por experimentos que operan típicamente por encima de 100 GHz, en el infrarrojo lejano. En intensidad total, además de estos dos mecanismos, en el rango de microondas y radio se manifiestan la emisión libre-libre, y también la conocida como “Emisión Anómala de Microondas” (EAM). Mientras que la emisión libre-libre producida en plasmas ionizados es uno de los mecanismos clásicos de emisión en radio, la EAM es un mecanismo descubierto hace relativamente poco tiempo, a finales de los años 90 en datos del satélite COBE. Desde los

primeros estudios observacionales se sabía que esta emisión presentaba un alto grado de correlación espacial con la emisión de polvo térmico, y de ahí se derivaron las primeras ideas de que debía ser originada por algún mecanismo físico asociado a los mismos granos de polvo del medio interestelar. Observaciones posteriores en regiones compactas, incluyendo medidas realizadas con el experimento COSMOSOMAS (Observatorio del Teide) en la nube molecular de Perseo, permitieron caracterizar con precisión su espectro, concluyendo que presenta un máximo entre 20 y 30 GHz, con una caída pronunciada en frecuencias inferiores y superiores (véase Figura 5). Esta forma espectral es reproducida con bastante exactitud por modelos teóricos basados en emisión de tipo dipolo eléctrico por granos de polvo en rotación. Su origen estaría entonces en granos de polvo en el medio interestelar que presentan un momento dipolar eléctrico y que se encuentran en rotación con altas velocidades angulares como consecuencia de algún mecanismo de excitación. Gracias al éxito de este modelo habitualmente a la EAM se la conoce también como “emisión de polvo rotante”. Sin embargo, hay modelos alternativos que no pueden ser descartados, y además existen varias otras incertidumbres importantes como la composición de los granos de polvo que la originan, el mecanismo de alineamiento de los granos con el campo magnético, o cuál es el nivel de polarización de la EAM. Esto último es particularmente importante en lo relativo a la detección de los modos B primordiales.

La cobertura espectral de QUIJOTE resulta particularmente útil y relevante a la hora de trazar no sólo el pico de la EAM, alrededor de 20-30 GHz, sino también su caída en brillo a frecuencias inferiores. Por ello los datos de QUIJOTE han sido cruciales a la hora de mejorar la separación entre la EAM y las otras componentes de emisión en intensidad, el libre-libre y la radiación sincrotrón, en este rango de frecuencias. Esto queda ilustrado en la Figura 5, donde se muestra la distribución espectral de energía de la nube molecular de Perseo, que proporciona uno de los ejemplos más claros y limpios de EAM. Esta figura ha sido extraída de uno de los artículos asociados al *wide survey*, en el que presentamos un amplio estudio de las propiedades de la EAM en un conjunto de 52 regiones individuales (Poidevin et al. 2023). Este estudio permitió confirmar algunas de las propiedades más importantes de la EAM, como por ejemplo su correlación con la emisión del polvo térmico, su relación con la intensidad del campo de radiación

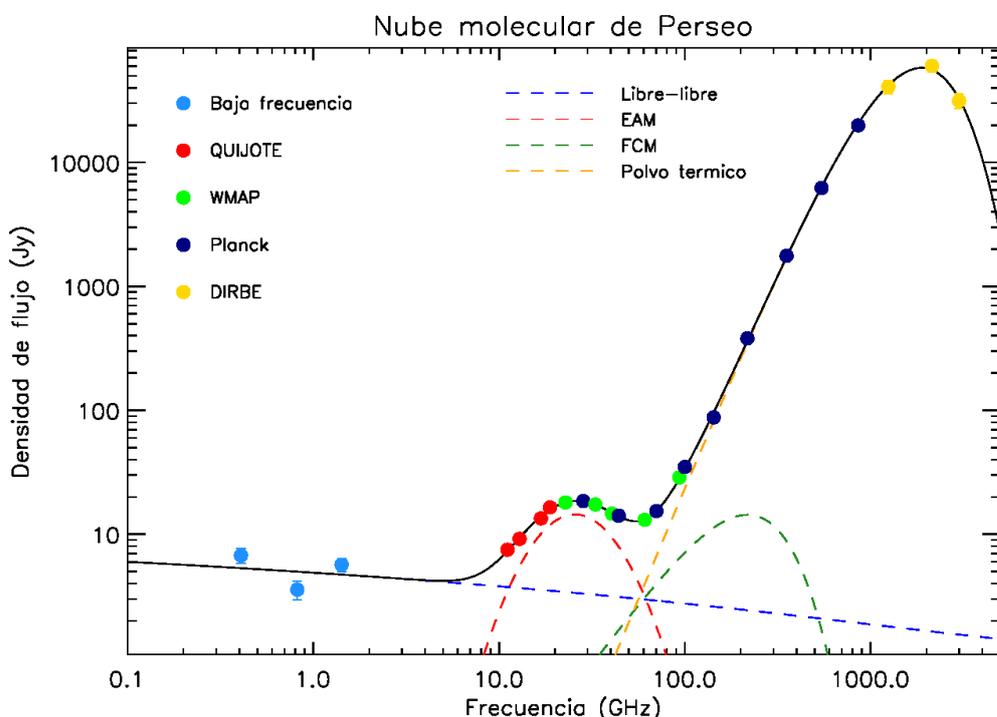


Figura 5. Distribución espectral de energía en la nube molecular de Perseo, mostrando los puntos observados (QUIJOTE en rojo) y el modelo teórico ajustado a los datos (línea continua negra - las líneas de colores a trazos representan por separado los modelos correspondientes a los distintos mecanismos de emisión). Figura adaptada de Poidevin et al. (2023).

o la variación de la frecuencia donde se produce su máximo de emisión. Los datos de QUIJOTE también han permitido obtener las cotas más precisas sobre el nivel de polarización de la EAM, y en concreto utilizando datos en la región molecular W43 se ha establecido que su fracción de polarización es inferior a 0.2% (Génova-Santos et al. 2017), mejorando en un factor 5 las mejores cotas obtenidas anteriormente. Además de ayudar a restringir algunos parámetros o modelos de EAM, este resultado es importante a la hora de determinar el nivel de contaminación que esta emisión podría introducir sobre la señal primordial de modos B. Aunque obtener una cota tan baja es de por sí importante, que implicaría que la EAM podría ser ignorada en la búsqueda de estos modos B, hay que tener presente que ésta y otras cotas provienen de regiones específicas, con condiciones físicas particulares, y es complicado o al menos arriesgado extraer conclusiones generales firmes, por lo que sigue siendo necesario profundizar en este tipo de estudios.

PERSPECTIVA FUTURA PARA ESTA DÉCADA: EL LABORATORIO DE FONDO DE MICROONDAS EN EL OBSERVATORIO DEL TEIDE (CMBLAB)

Desde 2018, el segundo telescopio del experimento QUIJOTE ha estado tomando datos de cielo en las frecuencias de 30 y 40 GHz con los detectores de los instrumentos TGI y FGI, aunque las observaciones no han tenido una continuidad en el tiempo hasta hace poco debido a diversas razones (principalmente la pandemia, y la resolución de un problema en el nivel de vacío del criostato). Desde hace pocos años, un instrumento híbrido que combina detectores de TGI y FGI en un mismo criostato, y que denominamos TFGI (Thirty and Forty GHz Instrument), continuará sus observaciones con el objetivo de completar (entre otras) observaciones profundas en tres regiones de cielo de 1000 grados cuadrados cada una y de baja contaminación galáctica (los denominados campos cosmológicos), y varias regiones específicas del plano galáctico con emisión intensa de EAM.

En relación al QT1 (primer telescopio QUIJOTE), el instrumento MFI finalizó sus observaciones en 2018. Desde entonces, el grupo del IAC ha estado fabricando un nuevo instrumento de baja frecuencia mejorado, denominado MFI2. El nuevo instrumento ya está fabricado, integrado y probado en laboratorio, e iniciará su fase de comisionado en la segunda mitad de 2023. La motivación científica del MFI2 es evidente: QUIJOTE es el único experimento de FCM en el mundo que proporciona medidas en ese rango de 10-20 GHz, que se ha mostrado crítico para la comprensión de las propiedades de polarización del sincrotrón y la EAM al nivel requerido para poder corregir estas emisiones en experimentos o misiones espaciales futuras. La sensibilidad de MFI2 será entre dos y tres veces mejor que la del anterior MFI, pero el salto novedoso en el diseño del instrumento proviene del uso de un sistema de adquisición completamente digital basado en SoC FPGAs (System-on-Chip Field Programmable Gate Array). Estos sistemas, con la posibilidad de muestrear la señal espectral de entrada con resoluciones de 1 MHz, proporcionan una herramienta muy poderosa para eliminar la contaminación en radio de satélites geoestacionarios (haciendo así accesible la franja alrededor de declinación cero grados en la Figura 3) y de otras fuentes de contaminación en microondas, como las nuevas mega-constelaciones de satélites (Starlink, OneWeb, etc). Estas últimas constituyen un serio problema para la astronomía desde la Tierra, de manera que sin estos sistemas y estrategias de mitigación, el cielo en las frecuencias de MFI2 no sería observable con los anchos de banda necesarios para obtener alta señal a ruido.

Más allá de esta instrumentación para QUIJOTE ya existente, la perspectiva de observaciones de FCM desde el Observatorio del Teide viene definida por el denominado Laboratorio de FCM (CMBLab). Junto a QUIJOTE, en los próximos años se observará el cielo en microondas y submilimétrico con GroundBIRD (liderado por RIKEN en Japón y ya instalado desde 2019) con detectores a 145 y 220 GHz; LSPE-STRIP (liderado desde la Universidad de Milán, a instalar en 2024) con detectores a 43 y 90 GHz; y TMS (liderado por el IAC), un espectrómetro de microondas en el rango 10-20 GHz que complementará a QUIJOTE, extendiendo sus objetivos científicos al estudio de las distorsiones espectrales. En su conjunto, el CMBLab será uno de los observatorios de FCM con mayor cobertura de frecuencia del mundo, y actualmente, el único en funcionamiento en el hemisferio norte.

PERSPECTIVA FUTURA PARA PRÓXIMA DÉCADA: LiteBIRD

Además de los retos observacionales que se mencionaron anteriormente (requisito sobre altos niveles de sensibilidad y corrección de contaminantes galácticos), las observaciones desde Tierra se ven fuertemente afectadas por la contaminación de la atmósfera, que no sólo produce extinción de los fotones de FCM sino también emisión en los rangos de radio y microondas. Este efecto aumenta gradualmente con la frecuencia debido al vapor de agua. Además existen bandas alrededor de 60, 120 y 180 GHz donde se producen transiciones de las moléculas de agua y del oxígeno donde la opacidad atmosférica es tan alta que es imposible realizar observaciones incluso desde los lugares más altos y secos de la Tierra. La mayoría de los experimentos que han observado el FCM desde Tierra se han centrado en la medida de las anisotropías en escalas angulares relativamente pequeñas, cubriendo regiones de cielo de algunas decenas de grados cuadrados como mucho. Estas observaciones han medido el espectro de potencias del FCM por encima del primer pico acústico, que corresponde a escalas de aproximadamente un grado, donde las fluctuaciones del FCM tienen mayor amplitud. El cubrimiento de regiones de cielo mayores desde Tierra, especialmente en frecuencias altas (por encima de 100 GHz, donde la contaminación debida al vapor de agua aumenta significativamente), supone un reto importante debido al efecto nocivo introducido por las inhomogeneidades en la distribución espacial del vapor de agua atmosférico. Por ello, la medida del espectro de potencias del FCM en todo el rango de escalas angulares (desde las escalas más grandes) requiere normalmente recurrir a misiones espaciales. El satélite COBE (1989-1993) fue el primero en medir las anisotropías en temperatura del FCM. Posteriormente las misiones WMAP (2001-2009) y Planck (2009-2014) refinaron estas medidas, alcanzando mayor sensibilidad y resolución angular.

En el caso de la detección de los modos B, poder medir de forma fidedigna escalas de mayor tamaño es incluso más importante. Una ventaja en este caso es que se sabe que la atmósfera emite emisión no polarizada (o con una polarización muy baja). Sin embargo, diferentes efectos sistemáticos de carácter instrumental, si no son bien controlados, pueden inducir polarización sobre una señal intrínsecamente no polarizada dando lugar a una

contaminación en las medidas. En este caso además observaciones desde el espacio tienen la ventaja añadida de poder medir un amplio rango de frecuencias, incluso en las bandas donde es imposible realizar observaciones desde Tierra, lo que es importante en este caso para poder medir internamente el espectro de los contaminantes galácticos (emisión sincrotrón y emisión del polvo térmico) con mayor precisión. Actualmente la única misión aceptada y en desarrollo para la medida del FCM en polarización es LiteBIRD (*Lite satellite for the study of B-mode polarization and inflation from cosmic background radiation detection*), liderada por JAXA (agencia espacial de Japón) y apoyada por un consorcio internacional donde también participan Europa, Canadá y EEUU. En particular el Consorcio Europeo, en el que España participa, es el responsable de la construcción de los dos telescopios de media y alta frecuencia, que junto con el telescopio de baja frecuencia que construye Japón conforman los tres telescopios de la misión. La misión actualmente se encuentra en fase A y tiene fecha prevista de lanzamiento a final de esta década.

LiteBIRD tiene como objetivo alcanzar una sensibilidad suficiente para mejorar las cotas actuales sobre la señal de modos B en un factor 50, logrando una medida o de lo contrario descartando diversos modelos inflacionarios que predicen una señal con amplitud dentro de este rango. Para ello realizará observaciones durante 3 años desde el segundo punto de Lagrange, con un total de 4500 detectores enfriados hasta una temperatura de 100 mK, y operando en 15 bandas de frecuencia entre 40 y 400 GHz. Este amplio rango espectral debería permitir caracterizar con el nivel de precisión necesario la polarización de la emisión de polvo térmico. Para la medida del sincrotrón se combinarán los datos de LiteBIRD con medidas a menor frecuencia desde Tierra con QUIJOTE y otros experimentos. Alcanzar el nivel de sensibilidad necesario para cumplir los objetivos científicos de la misión, además de un gran número de detectores, requiere un control de los diferentes efectos sistemáticos hasta un nivel nunca antes alcanzado. Entre ellos se encuentra el control de las fluctuaciones de ganancia en las etapas criogénicas, lo cual requiere tener un control sobre las inestabilidades de temperatura en el plano focal a un nivel inferior del micro-kelvin. Precisamente España, dentro del consorcio europeo, lidera el diseño y desarrollo de un sistema de medida y control de la temperatura que logre este objetivo.

En resumen, en los próximos años veremos un avance espectacular en nuestra comprensión de la emisión del cielo en microondas, con el objetivo último de comprender los procesos físicos que tuvieron lugar durante la inflación. En esta década, experimentos desde Tierra como los descritos en el CMBLab, o misiones espaciales como LiteBIRD en la próxima década, nos permitirán poner a prueba nuestra comprensión última de nuestro paradigma cosmológico, proporcionando la posibilidad de verificar nuestras teorías de física fundamental en escalas de energía que no son accesibles por otros medios.