

Ensayo sobre el impacto de la emisión sincrotrón galáctica en las mediciones de anisotropía del fondo cósmico de microondas

I. Análisis del espectro angular de potencia en observaciones completas del cielo en intensidad total

Andrea A. Hidalgo V.

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), Sta. María Tonantzintla, Puebla, México
e-mail: andrea@inaoep.mx

Enviado: Noviembre 21, 2015

ABSTRACT

Context. Ensayo realizado para la materia de procesos radiativos, para evaluar el capítulo 4. El tema seleccionado es el mecanismo de radiación no-térmica, sincrotrón.

Aims. Desarrollar el artículo *The impact of Galactic synchrotron emission on CMB anisotropy measurements* explicando cada sección de forma crítica e informada y dar una opinión crítica con una conclusión personal sobre el contenido y la estructura del mismo.

Methods. Se realizó una lectura a fondo del artículo y se llevó a cabo una investigación de conceptos, metodología, software y artículos relacionados para una mejor comprensión, así como también se discutió el contenido con compañeros y profesores para aclarar dudas y pedir consejos.

Results. Se aprendió sobre la emisión sincrotrón galáctica y su implicación en las mediciones de anisotropía utilizando el espectro angular de potencia (APS) y la herramienta HEALPIX. Se encontró que es necesario hacer sustracciones de fuentes emisoras en radio en los mapas y hacer un corte del plano galáctico. Así como también, las mediciones, del hemisferio norte y sur, confirman la existencia del *North Polar Spur (NPS)*, que se logra remover de forma relativamente exitosa.

Conclusions. Se concluye que el artículo hace una contribución importante con sus resultados, porque predice fluctuaciones en las emisiones galácticas sincrotrón por encima de 20 GHz. Al hacer el análisis se encuentra que las componentes sincrotrón consideradas no explican en su totalidad la potencia de la componente sincrotrón de las mediciones de anisotropía del CMB; sugiriendo otro mecanismo de radiación como responsable de la contribución. También se deduce la forma de disminuir las fluctuaciones del fondo cercano a la mitad para estudiar mejor la señal cosmológica, y por lo tanto, mejorar el análisis cosmológico de las anisotropías del CMB.

Key words. Galaxia: general – mecanismos de radiación: no térmica – métodos: estadísticos – fondo cósmico de microondas

1. Motivación

La idea inicial para elegir este artículo está relacionada con el título, contiene las palabras *sincrotrón* y *fondo cósmico de microondas* (CMB). El interés sobre la primera palabra está directamente relacionado con los temas del curso de procesos radiativos, como un mecanismo de radiación no térmica. La segunda palabra representa un interés propio sobre el tema del fondo cósmico de microondas, específicamente con la curiosidad para aprender más sobre éste. Particularmente, este artículo se diferenció de los demás que contenían las palabras antes mencionadas porque era el más citado de acuerdo al sistema ADS además de ser de reciente publicación, en Noviembre 2007. Otro punto que se consideró en la selección fue que en el primer vistazo del contenido, se puede observar que el artículo está estructurado, la explicación en el abstract es clara y termina con una sección de resumen y conclusiones amplias y concretas.

El artículo contiene conceptos importantes que se aprendieron en este primer semestre de maestría que están relacionados con varios cursos. Primeramente, los conceptos relacionados con la materia de procesos radiativos son los mecanismos de radiación como la radiación sincrotrón y libre-libre, campos electromagnéticos, intensidad, flujo, espectro

electromagnético y cuerpo negro. Más adelante, se utilizarán estos términos para explicar el contenido astrofísico del artículo en cuestión. También cabe mencionar que la metodología de este artículo tiene un enfoque estocástico y es un análisis del ruido, que en este caso es debido al impacto de la emisión sincrotrón en las mediciones de anisotropía en el fondo cósmico de microondas. Este enfoque se relaciona directamente con el curso de instrumentación que actualmente se está cursando.

2. Conceptos

Para una mejor comprensión del artículo, se hizo una investigación previa de los conceptos, palabras, acrónimos, software, exploraciones y proyectos desconocidos o que generaban dudas, estos se enuncian a continuación con palabras propias:

- Anisotropía: Lo contrario a isotropía, que presenta diferentes características de acuerdo a la dirección. En la figura 1, se observa el comportamiento anisotrópico del CMB.
- Radiación del fondo cósmico de microondas (CMB, Cosmic Microwave Background): Es una ventana al universo temprano. Es un campo de radiación residual del Big Bang casi isotrópica y casi uniforme que exhibe un espectro de cuerpo

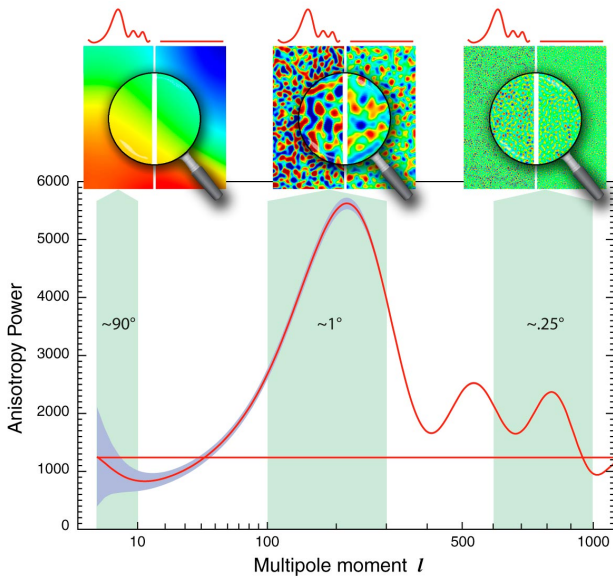


Fig. 1. Esta gráfica muestra la temperatura del cielo cuando es medida a diferentes escalas angulares a través del cielo. La línea curvada es la temperatura medida. La línea recta es la misma medición pero en energía del cielo. Las imágenes del cielo en la parte de arriba muestran tres porciones de la gráfica que muestran la apariencia bajo esos escenarios.

negro perfecto a una temperatura de 2.72 K. Este campo de radiación primordial es una predicción de un universo Big Bang- si en los estados iniciales, el universo estaba a suficiente temperatura para estar ionizado entonces los procesos como la dispersión de Thomson y radiación Bremsstrahlung termalizarían el campo de radiación de forma muy eficiente. Suponiendo una expansión adiabática del universo, uno esperaría observar un campo de radiación que hubiera conservado el espectro de cuerpo negro, pero a mucha más baja temperatura.

Como observadores podemos medir su espectro en frecuencia (ver Fig.2), su temperatura y su estado de polarización. Cada una de estas mediciones contiene información acerca de la creación y evolución del campo conteniendo información cosmológica muy relevante.

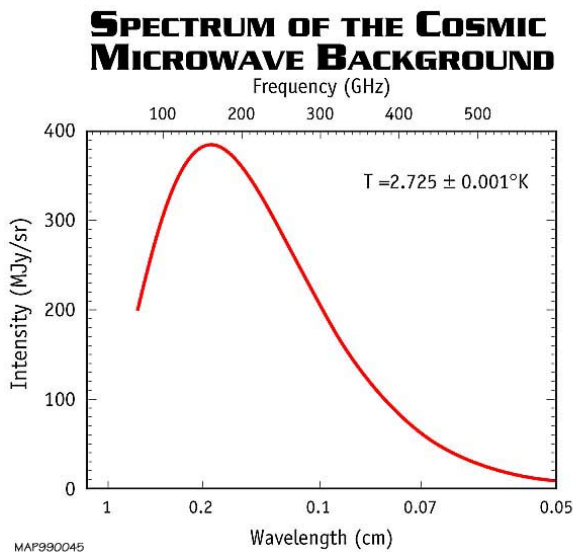


Fig. 2. Espectro del fondo cósmico de microondas.

- Espectro angular de potencia (APS): Herramienta matemática que nos permite conocer y analizar el comportamiento de las anisotropías del CMB. Su gráfica muestra cómo varía la temperatura con el tamaño angular de las secciones del cielo, revelando la energía emitida por ondas de sonido de diferentes tamaños viajando a través del universo temprano.

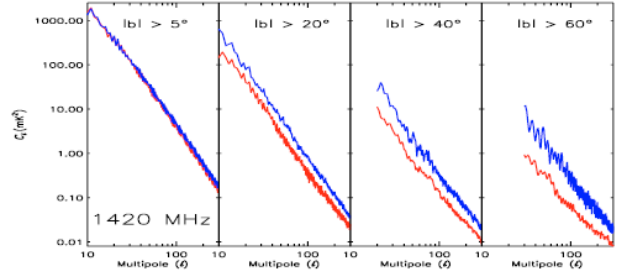


Fig. 3. Ejemplo de una gráfica del espectro angular de potencias. Este se grafica en multipolos o en ángulo para el eje X, y temperatura en el eje Y. La Figura 2 también es un APS. Particularmente, en esta gráfica podemos observar una comparación entre el espectro angular de potencia de cortes en el hemisferio norte ($b_{gal} > b_{cut} \rightarrow$ azul, líneas superiores) y el sur ($b_{gal} < -b_{cut} \rightarrow$ rojo, líneas inferiores) para los mapas con sustracciones de fuentes discretas a 1420 MHz.

- WMAP: La Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, es una misión de la NASA Explorer que se lanzó en junio de 2001 para realizar mediciones fundamentales de la cosmología - el estudio de las propiedades de nuestro universo como un todo.
- HEALPIX: Es un acrónimo para Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelization de una esfera. Esta pixelización produce una subdivisión de una superficie esférica donde cada pixel abarca la misma área de superficie que cualquier otro pixel. Es una herramienta de software para hacer análisis del CMB.
- North Polar Spur (NPS): Traducido como espuela del polo norte. Es una contribución muy brillante y grande en radio. Se cree que es un viejo remanente de supernova en la vecindad del sistema solar. Este se puede observar en la Figura 4.

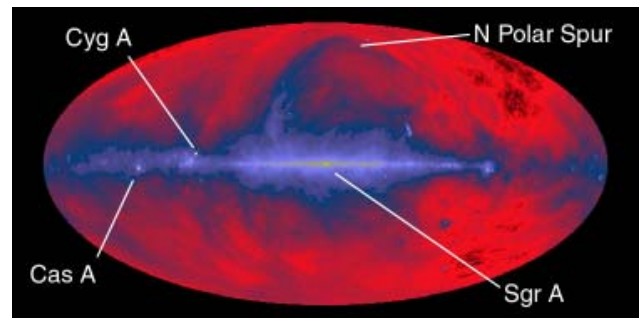


Fig. 4. North Polar Spur, se observa en el hemisferio norte como un arco cerca del centro galáctico.

Esta sección se podría extender de forma indefinida, debido a que personalmente aún desconozco una gran cantidad de conceptos. Para efectos prácticos, sólo se consideran los antes mencionados como básicos para el entendimiento de este artículo.

3. Introducción

La posibilidad de estudiar las fases primordiales del universo y sus propiedades a través de las anisotropías del fondo cósmico de microondas depende de nuestra capacidad de extraer con precisión la señal cosmológica de las observaciones. Lo que implica que los mapas de observaciones en microondas que realizamos para detectar la señal cosmológica están llenos de contaminación. Lo que se detecta no sólo proviene de la señal cosmológica, sino de todo lo que se encuentra en medio de nosotros y la radiación remanente del *big bang*, en otras palabras, todo el universo. Por la tanto, para realmente estudiar las anisotropías del fondo cósmico de microondas, se debe eliminar todo ese ruido proveniente de objetos astrofísicos galácticos y extragalácticos. Actualmente, es posible remover las contribuciones de varios objetos dado que son conocidos y es posible hacer una aproximación de las anisotropías del CMB. Sin embargo, después de que se hiciera el análisis de las observaciones hechas por el WMAP, se encontraron inconsistencias y se requirió hacer una comprensión más profunda del primer plano.¹

La emisión sincrotrón galáctica es la mayor fuente de contaminación en frecuencias menores a 50 GHz ($\lambda > 0.6\text{cm}$) para escalas angulares medias y grandes. La radiación sincrotrón surge a partir de electrones de rayos cósmicos girando en el campo magnético de nuestra galaxia (Ver Figura 5). El espectro de energía y la densidad de los electrones de rayos cósmicos, así como también, la intensidad del campo magnético varían por toda la galaxia, y por lo tanto, la emisión sincrotrón observada dependerá de la frecuencia y de la región del cielo.

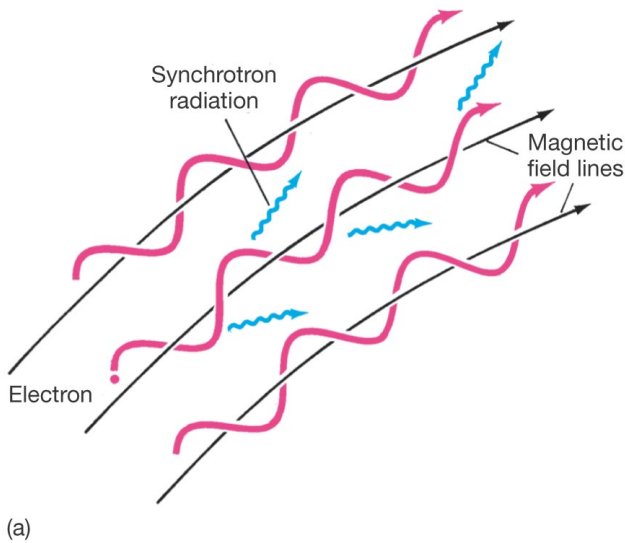


Fig. 5. Diagrama de la emisión sincrotrón.

Las observaciones en radio en $\nu < 5\text{GHz}$ ($\lambda > 6\text{cm}$) proveen una imagen más clara de la morfología de las emisiones sincrotrón galácticas, dado que a estas frecuencias la radiación difusa no térmica domina sobre otras emisiones fuera del plano galáctico. Anteriormente, se han hecho trabajos para comprender esta morfología, pero aún no se había logrado de forma satisfactoria. El objetivo de este artículo es precisamente, mejorar las estimaciones actuales de la influencia de la emisión sin-

¹ El primer plano es una traducción de la palabra *foreground*. En este caso se refiere a un plano más cercano que el CMB.

crotrón galáctica para analizar mejor las anisotropías del CMB. El método fue realizar el espectro angular de potencia del mapa del cielo de intensidad total en 408 MHz y 1420 MHz, que se encuentran dominados por emisiones sincrotrón fuera del plano galáctico. Se sustraen las fuentes más brillantes de los mapas y se estudian sus APS de dos formas, como función de la latitud galáctica por secciones y en función de su posición en el cielo. El cielo se divide en sectores de tamaño $\sim 15^\circ \times 15^\circ$.

El artículo está organizado de la siguiente forma. En la sección 4 se describen las características de la exploración a 408 MHz y a 1420 MHz. Así como también su proyección en mapas HEALPIX y se toman en cuenta las consideraciones de ruido. En la sección 5, el APS de la emisión galáctica en radio sobre grandes áreas es analizada y revela la necesidad de una sustracción de fuentes discretas para hacer una evaluación correcta de la APS de sincrotrón difuso. El mapa del cielo es separado en dos mapas, uno de las componentes difusas y otro de fuentes discretas. También, su espectro angular de potencia es calculado y discutido. Los resultados obtenidos al ajustar el APS de la componente difusa son presentados. En la sección 6, el espectro de potencia angular de una exploración en radio es extrapolado al rango microondas para una comparación con los resultados de 3 años WMAP. La sección 7 es dedicada al análisis local de la APS para los mapas en radio. Al final, se resumen los resultados y se concluye en la sección 8.

4. Los datos

4.1. La exploración a 408 MHz y a 1420 MHz.

Los datos utilizados para el mapa a 408 MHz provienen de los telescopios reflectores parabólicos: Jodrell Bank 76 m, Effelsberg 100 m y Parkes 64m. Los mapas tienen una resolución angular de $\theta_{HPBW} \sim 0.85^\circ$ y un ruido-rms de $20'$ alrededor de 670mK .

El mapa de intensidad total en 1420 MHz fue hecho combinando una exploración del cielo norte y sur. La exploración norte fue realizada con el telescopio Stockert 25m y abarca las declinaciones de -19° a 90° . Para la exploración sur se empleó el telescopio Villa Elsa de 30m que abarca desde -90° a -10° . Ambas exploraciones tienen una resolución angular de $\theta_{HPBW} \sim 36'$ y tienen una superposición entre -19° y -10° . El mapa resultante tiene $15'$ de ruido-rms por pixel con $\sim 17\text{mK}$.

Cuando se preparan los datos con el software HEALPIX, los mapas producidos tienen un tamaño de pixel de $\sim 7'$. (Y el número total de pixeles de un mapa completo es de $N_{pix} = 12n^2$, donde $n = 512$).

4.2. Estimación del ruido

Se hace la transformación de los datos desde mapas cilíndricamente equidistantes al formato adecuado para el análisis en HEALPIX. El ruido-rms a considerar por pixel también cambia decrementando cuando se incrementa la latitud y varía entre $\sim 10\text{mK}$ y $\sim 18.7\text{mK}$ para 1420 MHz; y $\sim 0.5\text{K}$ y $\sim 0.7\text{K}$ para 408 MHz. Debido a que los tiempos de integración varían, el ruido también varía, pero se espera que disminuya hacia los polos. De esta forma se aproxima el ruido de la APS como:

$$C_l^{noise} \sim c_l^{noise} \sim \frac{4\pi\sigma^2}{N_{pix}} \quad (1)$$

Donde σ es el valor promedio del ruido-rms en el área considerada y N_{pix} es el número total de pixeles en el mapa HEALPIX.

4.3. Rango multipolar estadísticamente significativo

Los mapas HEALPIX producidos en 408 MHz y 1420 MHz contienen información estadística sólo para escalas angulares que son:

- Más grandes que el haz, i.e. para $\theta \gtrsim \theta_{HPBW}$, el multipolo máximo relevante en el análisis APS para estas exploraciones es $l_{max} \sim \frac{180^\circ}{\theta_{HPBW}}$.
- Más pequeños que el grado máximo angular del área considerada, θ_{cov} , dando como resultado el conjunto de cobertura del multipolo mínimo. La decisión por lo tanto es $l_{min} \sim 5 \times \frac{180^\circ}{\theta_{cov}}$.

5. La APS para grandes áreas: Análisis de varias secciones

Para investigar la dependencia de la emisión sincrotrón en los parámetros de la APS en latitud, el plano galáctico se cortó a diferentes latitudes. Se consideraron cortes simétricos entre los hemisferios y cortes asimétricos, dado que se tiene una contribución importante en el hemisferio norte debido el NPS. El cálculo correspondiente a la APS, se hizo con la herramienta ANAFast del paquete HEALPIX y fue renormalizado tomando en cuenta una cobertura incompleta del cielo. El espectro angular de potencia derivado para $|b_{gal}| \geq b_{cut}$ con un $b_{cut} \geq 40^\circ$ es mostrado en la Figura 6, como ejemplo representativo. El espectro angular de potencia recuperado se alisa hacia altos multipolos. Este comportamiento de la APS es debido al ruido causado por efectos sistemáticos, fuentes discretas o podría ser una característica intrínseca de las fluctuaciones de la emisión sincrotrón. (Ver Figura 7) El ruido blanco instrumental se descarta porque en su APS es constante.

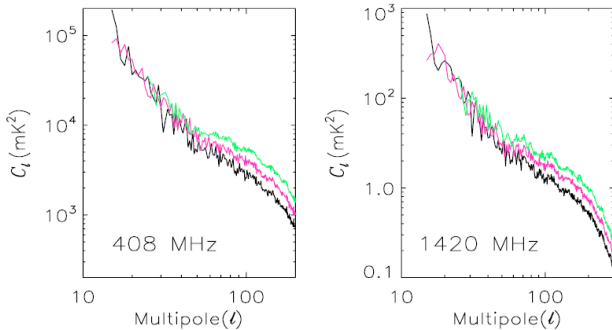


Fig. 6. Espectro de potencia angular que considera los cortes del plano galáctico. Cada línea se refiere a un b_{cut} . (Desde abajo: Negro \rightarrow 40° , fuchsia \rightarrow 50° , verde \rightarrow 60°)

5.1. Sustracción de fuente discreta

Además de las emisiones difusas, un gran número de fuentes discretas (DSs) son visibles en los mapas de radio. Una sustracción de estas fuentes se realizó haciendo una estimación del fondo difuso. Esta misma aproximación también se utilizó para llenar los huecos de las sustracciones. Esto es, para $|b| \geq 45^\circ$ todas las fuentes con flujos pico por encima de ~ 0.8 Jy fueron sustraídas del mapa de 1420 MHz, mientras tanto para $|b| \leq 45^\circ$ el umbral de detección de flujo es ~ 4.6 Jy. Todas las fuentes que pudieron ser razonablemente ajustadas por un perfil gaussiano fueron eliminadas, y se generaron dos nuevos mapas en 408 MHz y 1420 MHz. (Ver Figura 8). Las sustracciones DS

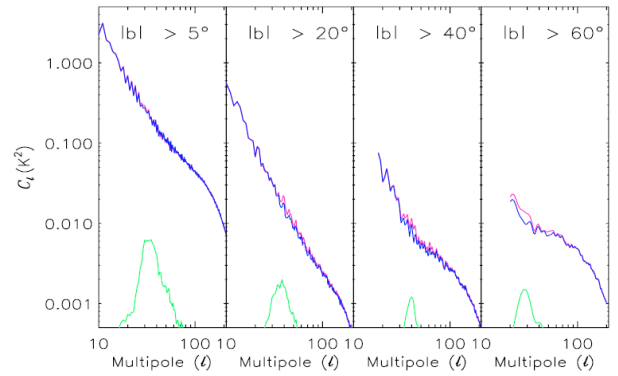


Fig. 7. Comparación entre el corte del espectro angular de potencia original (fiusha) y el corregido de efectos sistemáticos (azul) para la versión del mapa de 408 MHz. El corte del espectro de potencia angular del mapa de diferencias también es mostrado en verde.

mayormente son fuentes puntuales, pero también los objetos extendidos como la radio galaxia Centauro A que se encuentra en los mapas originales de radio a la derecha del centro galáctico a $b_{gal} \sim 20^\circ$. La mayoría de los objetos que se sustrajeron a medias y altas latitudes son fuentes extragalácticas.

Los mapas de algunos cortes galácticos a 1420 MHz y 408 MHz después de la sustracción DS son mostrados en la Figura 9. Los mapas son mostrados a diferentes escalas para enfatizar la importancia relativa de los diferentes componentes.

Al analizar el APS de los mapas con sustracción DS y compararlos con la literatura se encuentra que, los DSs identifican la razón del alisamiento de la APS original y también confirman que la mayor contribución de fuentes de contaminación ha sido eliminada en los mapas. Esto se puede observar en la Figura 9. Así como también se puede ver este comportamiento en la Figura 10 donde se hace una comparación entre el corte del plano galáctico original, después de la sustracción DS y las sustracciones de otro autor. A una alta latitud, el APS del campo de fluctuaciones galácticas es dominado por la contribución DS para $l \gtrsim 100$, que se debe a la contribución relativa mejorada del DSs con respecto a la emisión débil difusa del fondo.

La Figura 11, muestra el APS de varios cortes del mapa DS a 1420 MHz. Se nota que para todos los cortes del hemisferio sur y norte con $b_{cut} \geq 30^\circ$, el APS del DS está alisado para $l \sim 100$ y luego disminuye de forma suavizada. Al contrario, para el hemisferio norte con un corte entre $5^\circ - 20^\circ$, el APS del DS presenta un comportamiento que se asimila a una ley de potencia en multipolos bajos, implicando la existencia de fluctuaciones significativas de gran escala, como se espera en presencia de estructuras discretas relativamente amplias. La diferencia entre el APS de los cortes en el norte entre 20° y 30° es entonces debida a DSs localizadas en la porción del cielo caracterizada por $20^\circ \leq b_{gal} \leq 30^\circ$, que incluye a Centauro A explicando el comportamiento de la APS como ley de potencia en multipolos bajos.

5.2. Ajuste de la APS después de la sustracción fuente

Los mapas en radio después de la sustracción de fuentes incluyen dos componentes astrofísicas: la emisión galáctica difusa y principalmente la contribución de las fuentes extragalácticas, que están convolucionadas con el rayo del telescopio y contaminadas por el ruido instrumental, que puede ser tratado de forma aproximada

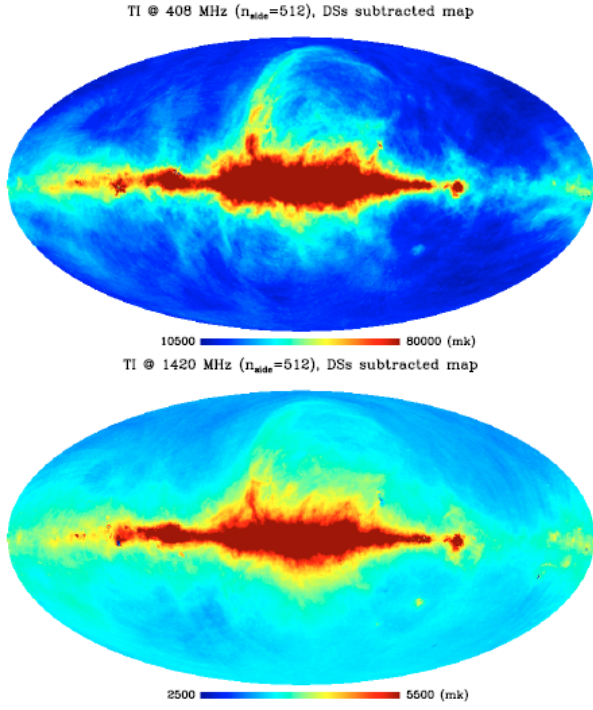


Fig. 8. Proyección Mollweide de los mapas HEALPIX producidos en 408 MHz (arriba) y en 1420 MHz (abajo) al sustraer las fuentes discretas. Los mapas están en coordenadas galácticas. El centro de los mapas es $l = 0$, $b = 0$. La longitud galáctica se incrementa hacia la izquierda hasta 180° .

imada como ruido blanco. Por lo tanto, se expresa el APS como,

$$C_l^{map} \sim (C_l^{synch} + C_l^{src})W_l + e^{noise} \quad (2)$$

donde $W_l = e^{-l(l+1)\sigma_b^2}$ es la función ventana para el rayo gaussiano asimétrico, con $\sigma_b = \theta_{HPBW}[rad]/\sqrt{8Ln(2)}$. La emisión sincrotrón es modelada de forma empírica como $C_l^{synch} = kl^\alpha$. Esta expresión se puede explicar por los argumentos de turbulencia magnetohidrodinámica. Para derivar el rango de variabilidad de la emisión sincrotrón en magnitud y pendiente, dos casos extremos fueron considerados. Las incertidumbres en los parámetros que mejor se ajustaron son derivados de la diferencia entre ambos casos. Estos parámetros se pueden ver en las Figuras 5.2 y 5.2 de las tablas. Para el término de sincrotrón, se cita el valor de amplitud normalizada $k_{100} = k \times 100^\alpha$ que corresponde a la cantidad física. De hecho, $k_{100} = C_{l=100}$, que implica que la amplitud normalizada da las fluctuaciones de la temperatura promedio a una escala angular de $\sim 2^\circ$. La incertidumbre es más grande para cortes a altas latitudes debido al rango multipolar reducido adecuado para el proceso de ajuste. La pendiente de sincrotrón en el APS para cortes en el norte varía en un intervalo de $\sim [-3.0, -2.8]$ a 408 MHz y $\sim [-3.0, -2.7]$ a 1420 MHz, mientras que para cortes al sur $\alpha \sim [-2.9, -2.6]$ y $\alpha \sim [-3 - 0, -2.7]$ respectivamente. Los errores en el promedio de α son $\sim (5 - 7)\%$ para cortes $|b_{cut}| < 30^\circ - 40^\circ$ y típicamente incrementan a $\sim 18\%$ cuando los cortes se hacen a latitudes más altas. En ambas frecuencias hay evidencia de una dependencia sistemática de la pendiente por emisión sincrotrón APS en latitud. Esto se puede observar en la Figura 14.

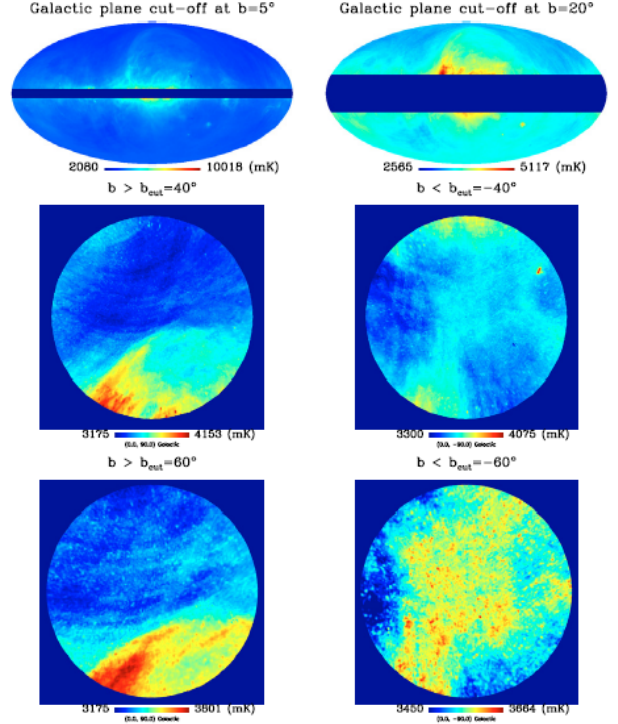


Fig. 9. Mapas HEALPIX de los cortes del plano galáctico extraídos de la observación a 1420 MHz después de la sustracción DS. La proyección Mollweide es mostrada por los cortes con $|b_{cut}| \leq 20^\circ$ y una vista gnomónica (centrada en el polo galáctico) para los que tienen $|b_{cut}| \geq 40^\circ$. Una figura similar fue generada a 408 MHz.

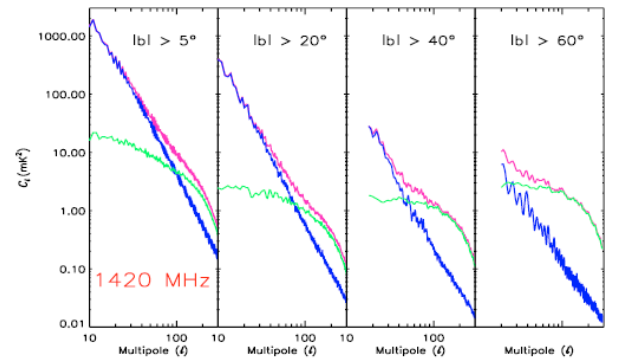


Fig. 10. Espectro angular de potencia de algunos cortes del plano galáctico para el mapa a 1420 MHz: (desde arriba en cada panel) original (\rightarrow frusha), después de una sustracción de las fuentes discretas (\rightarrow azul) y sólo de DSs (\rightarrow verde). Una figura similar fue generada a 408 MHz.

6. Extrapolación al rango microondas

En esta sección se extrapolan los resultados obtenidos del análisis de las exploraciones 408 MHz y 1420 MHz para grandes áreas del rango microondas, con el objeto de hacer una comparación con los resultados de 3 años de WMAP. Los productos de esta misión son mapas del fondo cercano que contaminan la señal cosmológica en cinco frecuencias observadas por el satélite. ($\nu \sim 23, 33, 41, 61, 94$ GHz). Dentro de esta contaminación se consideran las emisiones en microondas de la galaxia caracterizada por componentes difusas (polvo, libre-libre, sincrotrón) y discretas (Regiones HII, SNRs) y también considerando fuentes extragalácticas.

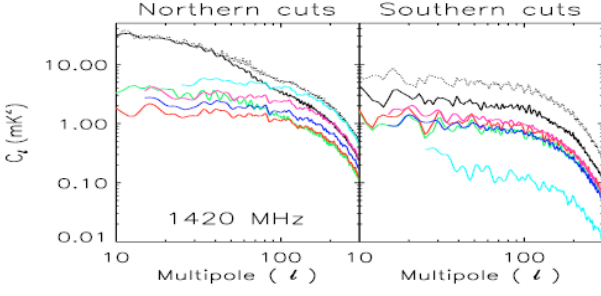


Fig. 11. Espectro angular de potencia de vario cortes del mapa en el hemisferio norte ($b_{gal} \geq -b_{cut} \rightarrow$ panel izquierdo) y en el sur ($b_{gal} \leq -b_{cut} \rightarrow$ panel derecho) de fuentes discretas a 1420 MHz. El código de color: negro (punteado) $\rightarrow |b_{cut}| = 5^\circ$, negro $\rightarrow |b_{cut}| = 10^\circ$, verde $\rightarrow |b_{cut}| = 20^\circ$, rojo $\rightarrow |b_{cut}| = 30^\circ$, azul oscuro $\rightarrow |b_{cut}| = 40^\circ$, fusha $\rightarrow |b_{cut}| = 50^\circ$, azul claro $\rightarrow |b_{cut}| = 60^\circ$.

Coverage	Best fit parameters @ 1420 MHz			
	k_{100} (mK ²)	α	c^{src} (mK ²)	c^{noise} (mK ²)
$b_{gal} \geq 5^\circ$	$4.57^{+0.95}_{-0.13}$	$-2.75^{+0.16}_{-0.03}$	$0.621^{+0.621}_{+0.079}$	$0.0164^{+0.1222}_{-0.0164}$
$b_{gal} \leq -5^\circ$	$4.00^{+0.78}_{-0.09}$	$-2.79^{+0.15}_{-0.02}$	$0.522^{+0.522}_{+0.069}$	$0.0164^{+0.1003}_{-0.0164}$
$b_{gal} \geq 10^\circ$	$1.61^{+0.38}_{-0.10}$	$-2.88^{+0.21}_{-0.12}$	$0.227^{+0.227}_{+0.061}$	$0.0151^{+0.0425}_{-0.0151}$
$b_{gal} \leq -10^\circ$	$1.41^{+0.13}_{-0.27}$	$-2.74^{+0.06}_{-0.28}$	$0.128^{+0.128}_{+0.107}$	$0.0158^{+0.0279}_{-0.0158}$
$b_{gal} \geq 20^\circ$	$0.78^{+0.22}_{-0.07}$	$-2.88^{+0.21}_{-0.16}$	$0.128^{+0.128}_{+0.042}$	$0.0077^{+0.0242}_{-0.0077}$
$b_{gal} \leq -20^\circ$	$0.41^{+0.10}_{-0.09}$	$-2.83^{+0.13}_{-0.20}$	$0.030^{+0.030}_{+0.067}$	$0.0146^{+0.0047}_{-0.0146}$
$b_{gal} \geq 30^\circ$	$0.43^{+0.17}_{-0.05}$	$-3.02^{+0.39}_{-0.02}$	$0.128^{+0.128}_{+0.004}$	$0.0008^{+0.0251}_{-0.0008}$
$b_{gal} \leq -30^\circ$	$0.22^{+0.02}_{-0.06}$	$-2.77^{+0.12}_{-0.28}$	$0.030^{+0.030}_{+0.034}$	$0.0065^{+0.0051}_{-0.0065}$
$b_{gal} \geq 40^\circ$	$0.40^{+0.01}_{-0.13}$	$-2.66^{+0.25}_{-0.34}$	$0.030^{+0.030}_{+0.065}$	$0.0113^{+0.0071}_{-0.0113}$
$b_{gal} \leq -40^\circ$	$0.11^{+0.05}_{-0.02}$	$-2.77^{+0.25}_{-0.34}$	$0.030^{+0.030}_{+0.022}$	$0.0049^{+0.0050}_{-0.0049}$
$b_{gal} \geq 50^\circ$	$0.21^{+0.09}_{-0.02}$	$-2.86^{+0.46}_{-0.26}$	$0.056^{+0.056}_{+0.027}$	$0.0063^{+0.0086}_{-0.0063}$
$b_{gal} \leq -50^\circ$	$0.05^{+0.04}_{-0.00}$	$-3.00^{+0.63}_{-0.07}$	$0.030^{+0.030}_{+0.007}$	$0.0026^{+0.0066}_{-0.0026}$
$b_{gal} \geq 60^\circ$	$0.23^{+0.06}_{-0.05}$	$-2.81^{+0.40}_{-0.33}$	$0.056^{+0.056}_{+0.030}$	$0.0062^{+0.0103}_{-0.0062}$
$b_{gal} \leq -60^\circ$	$0.03^{+0.03}_{-0.00}$	$-3.02^{+0.81}_{-0.15}$	$0.030^{+0.030}_{+0.006}$	$0.0021^{+0.0067}_{-0.0021}$

Fig. 12. Parámetros mejor ajustados obtenidos modelando el corte del espectro de potencia angular del hemisferio norte y sur a 1420 MHz de acuerdo a la ecuación 2.

6.1. Contaminación sincrotrón de las anisotropías del fondo cósmico de microondas

Es una práctica estándar estimar la contaminación del fondo cercano para las anisotropías del CMB por medios de la correspondiente APS, que es usualmente extrapolada desde un rango de frecuencias donde la componente del fondo cercano es mejor observada. Para la emisión sincrotrón galáctico, el índice espectral es constante y comúnmente adoptado como $\sim [-2.5, -3.0]$ ya que sugiere un comportamiento espectral de la emisión en radio difusa de la galaxia. En el artículo, esta convención no se utiliza, al contrario se trabaja con un APS del mapa con fuentes sustraídas en vez de utilizar la ley de potencia derivada al ajustar la emisión sincrotrón.

El fondo cercano domina sobre el CMB a 30 GHz para un rango amplio de multipolos si no se aplica una máscara al plano galáctico. La frecuencia espectral de una emisión libre-libre, relevante a latitudes bajas, está más alisada que la emisión sincrotrón. De esta forma, el APS extrapolado provee un límite in-

Coverage	Best fit parameters @ 408 MHz			
	k_{100} (mK ²)	α	c^{src} (mK ²)	c^{noise} (mK ²)
$b_{gal} \geq 5^\circ$	6527^{+1306}_{-1349}	$-2.78^{+0.14}_{-0.22}$	1797^{+1797}_{-1223}	$187.09^{+377.84}_{-187.09}$
$b_{gal} \leq -5^\circ$	6734^{+743}_{-789}	$-2.68^{+0.06}_{-0.11}$	882^{+882}_{-1244}	$291.87^{+143.62}_{-291.87}$
$b_{gal} \geq 10^\circ$	2700^{+467}_{-444}	$-2.80^{+0.12}_{-0.21}$	530^{+530}_{-520}	$95.16^{+106.22}_{-95.16}$
$b_{gal} \leq -10^\circ$	1919^{+111}_{-227}	$-2.70^{+0.04}_{-0.10}$	211^{+211}_{-438}	$103.99^{+53.09}_{-103.99}$
$b_{gal} \geq 20^\circ$	1147^{+215}_{-200}	$-2.83^{+0.16}_{-0.19}$	236^{+236}_{-231}	$48.98^{+39.85}_{-48.98}$
$b_{gal} \leq -20^\circ$	493^{+103}_{-86}	$-2.87^{+0.13}_{-0.19}$	158^{+158}_{-129}	$31.71^{+37.20}_{-31.71}$
$b_{gal} \geq 30^\circ$	700^{+135}_{-104}	$-2.91^{+0.17}_{-0.16}$	181^{+181}_{-148}	$32.95^{+38.54}_{-32.95}$
$b_{gal} \leq -30^\circ$	305^{+112}_{-52}	$-2.88^{+0.26}_{-0.14}$	155^{+155}_{-87}	$21.81^{+32.50}_{-21.81}$
$b_{gal} \geq 40^\circ$	572^{+205}_{-111}	$-2.86^{+0.34}_{-0.18}$	230^{+230}_{-106}	$19.56^{+41.28}_{-19.56}$
$b_{gal} \leq -40^\circ$	234^{+97}_{-66}	$-2.77^{+0.35}_{-0.29}$	105^{+105}_{-123}	$32.47^{+15.08}_{-32.47}$
$b_{gal} \geq 50^\circ$	488^{+246}_{-73}	$-3.01^{+0.46}_{-0.11}$	208^{+208}_{-117}	$27.07^{+23.67}_{-27.07}$
$b_{gal} \leq -50^\circ$	146^{+122}_{-34}	$-2.82^{+0.66}_{-0.22}$	137^{+137}_{-77}	$19.95^{+22.47}_{-19.95}$
$b_{gal} \geq 60^\circ$	509^{+226}_{-80}	$-3.04^{+0.39}_{-0.26}$	246^{+246}_{-91}	$19.11^{+45.89}_{-19.11}$
$b_{gal} \leq -60^\circ$	138^{+71}_{-76}	$-2.59^{+0.53}_{-0.80}$	77^{+77}_{-131}	$32.67^{+11.66}_{-32.67}$

Fig. 13. Como en la Figura 5.2, pero a 408 MHz.

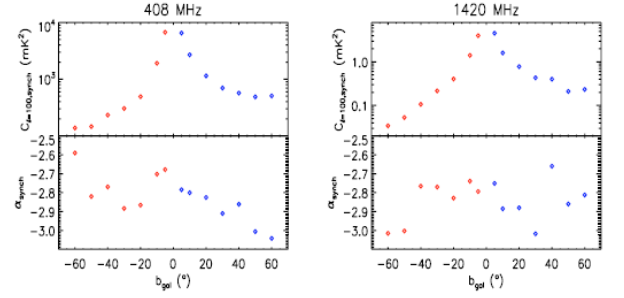


Fig. 14. Parámetros mejor ajustados obtenidos para el APS de emisión radio galáctico sincrotrón contra latitud galáctica.

ferior del fondo galáctico, incluso sin considerar la emisión del polvo.

El análisis de los mapas en baja frecuencia muestra que la amplitud APS del hemisferio norte galáctico está fuertemente influenciada por la presencia del NPS. Consecuentemente, los resultados que se obtuvieron a 1420 MHz para los cortes al norte constituyen un límite superior conservativo para la emisión sincrotrón galáctica difusa y pueden ser utilizados para los cortes al sur para las APS sincrotrón en frecuencias microondas.

En 30 GHz, una severa contaminación es esperada por la emisión sincrotrón hasta $l \sim 50$ para una cobertura del cielo casi completa ($b_{cut} = 5^\circ$). Una máscara excluyendo la región con $|b_{gal}| \leq 20^\circ$ reduce la señal sincrotrón esperada a alrededor de la mitad de las anisotropías del CMB para $l \geq 10$.

A 70 GHz, el canal más prometedor para mediciones de anisotropía del CMB dado que en general las emisiones del fondo cercano alcanzan su mínimo para $\nu \sim [60, 80]$ GHz, la contribución de la emisión galáctica sincrotrón al campo de fluctuaciones del cielo microondas es pequeña sobre el rango multipolar explorado en el análisis del artículo ($l \gtrsim 10$). Las anisotropías del CMB son más grandes que las fluctuaciones previstas del fondo cercano por un factor de $\gtrsim 10$ para un corte a 5° . Para $b_{cut} \sim 20^\circ$ para la señal del fondo cercano aún decrece

más por un factor de ~ 2 . La extrapolación de los resultados para $l \lesssim 10$ indica que la señal cosmológica debería ser en un factor de $\gtrsim 2$ más grande que el fondo cercano en las escalas angulares grandes.

7. Dependencia de la APS con respecto a la posición en el cielo: Análisis Local

También se llevó a cabo un análisis de la APS por secciones de aproximadamente $14.7^\circ \times 14.7^\circ$, con el objeto de describir las variaciones locales de la emisión galáctica a 408 MHz y 1420 MHz. Cambios significativos en la amplitud de las APS sincrotrón con la porción del cielo considerada se esperaban, dado que la radiación difusa de fondo gradualmente se incrementa hacia el plano galáctico donde alcanza su máxima intensidad.

Cada sección corresponde a un pixel en el mapa del programa HEALPIX con $n_{side} = 4$ y permite estudiar el espectro angular de potencia en el rango multipolar de $\sim [60, 200 - 300]$. El tamaño angular $\theta_{patch} \sim 14.7^\circ$ está bien comprometido con el deseo de dividir el cielo en una gran número de áreas y la necesidad de preservar un intervalo relativamente amplio de los multipolos estadísticamente relevantes ($l \sim 180^\circ/\theta$).

Se utilizó la función ANAFAST del paquete de HEALPIX para hacer los cálculos y obtener la APS considerando lo antes mencionado y se obtiene que el APS presenta más oscilaciones y tiende a ser más alisado que la función de correlación del APS a $l \gtrsim 200$. No obstante, los resultados de la función de correlación son menos confiables para multipolos altos, donde la decisión de una función ventana podría tener una influencia no despreciable. Por consiguiente, se utilizaron los APS producidos por la herramienta ANAFAST. (Ver Figura 15)

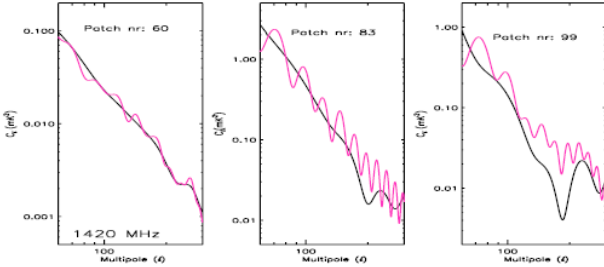


Fig. 15. Comparación entre el espectro angular de potencia obtenido utilizando ANAFAST (fiusha) y por integración de la función de correlación. Algunos ejemplos de buena (*panel izquierdo*), razonable y pobre (*derecha*) concordancia son mostrados para los mapas a 1420 MHz después de la sustracción de DSs.

7.1. Resultados

Las secciones del espectro angular de potencia para los mapas después de aplicar la sustracción de DSs son ajustados de la misma forma en el caso de los cortes galácticos. Los mapas obtenidos se muestran en las Figuras 18 y 19. Los resultados de los mismos también se resumen en la tablas de las Figuras 16 y 17. Los estimados del error relativo de la pendiente del APS sincrotrón promediados sobre el ensemble de secciones es $|\Delta\alpha/\alpha| \sim 25\%$ a 408 MHz y 22% a 1420 MHz. El promedio del error relativo de la amplitud normalizada k_{100} , es $\sim 25\%$ a 408 MHz y $\sim 20\%$ a 1420 MHz.

El resultado más notable es que para cada frecuencia los mapas de los parámetros correspondientes, derivados adoptando

Parameter, x	x_{min}	x_{max}	$\langle x \rangle$	σ_x	$\% (x \in \langle x \rangle \pm \sigma_x)$
α	-3.50	-0.70	-2.70	0.60	54
$\log(k_{100}^1/mK^2)$	2.90	5.90	3.80	0.81	70
$\log(k_{100}^2/mK^2)$	1.00	2.90	2.40	0.36	69

Fig. 16. Características del mejor ajuste del APS sincrotrón derivados con el método de análisis local del mapa a 408 MHz. k_{100}^1 se refiere a las secciones cubriendo las mitad más brillante del cielo, que incluye el plano galáctico y el NPS. k_{100}^2 corresponde a la otra mitad del cielo con emisión débil a altas latitudes.

Parameter, x	x_{min}	x_{max}	$\langle x \rangle$	σ_x	$\% (x \in \langle x \rangle \pm \sigma_x)$
α	-4.00	-1.00	-2.80	0.60	70
$\log(k_{100}^1/mK^2)$	-0.30	3.00	0.66	0.91	78
$\log(k_{100}^2/mK^2)$	-1.90	-0.31	-0.85	0.38	67

Fig. 17. Como en la Figura 16, pero a 1420 MHz.

los tres diferentes modelos, muestran una morfología muy similar. Tal parecido prueba que el patrón de parámetros revelados por el análisis local es confiable, a pesar de las incertidumbres obtenidas en los valores de los parámetros.

La pendiente del APS sincrotrón no muestra una dependencia sistemática en latitud galáctica, de la misma forma que el comportamiento que se encontró en el método anterior. La amplitud normalizada del APS sincrotrón, k_{100} , llega a su máximo cerca del plano galáctico, lo que refleja la morfología observada. Una buena correlación es encontrada entre la amplitud normalizada del APS sincrotrón a 408 MHz y a 1420 MHz, que es definida como $\log(k_{100}^{408}/mK^2) \sim A + B \log(k_{100}^{1420})$, donde $A = 3.15 \pm 0.02$ y $B = 0.88 \pm 0.02$. Que muestra que los resultados son consistentes.

La contribución de las fuentes alcanza su máximo en la vecindad del plano galáctico, principalmente porque una sustracción más incompleta de las fuentes fue posible para $|b_{gal}| \lesssim 45^\circ$ que para altas latitudes.

8. Resumen y conclusiones

8.1. Conclusiones del contenido

El objetivo del trabajo realizado en el artículo fue mejorar el entendimiento de la emisión sincrotrón galáctica como un fondo cercano que no pertenece a la radiación de fondo cósmico. La motivación de los autores para realizar este trabajo es debido a que existe el requerimiento de hacer análisis más precisos para poder tratar los datos del satélite PLANCK.

1. Las fuentes brillantes discretas en los mapas fueron eliminadas con un ajuste gaussiano. Este método es flexible y también permite remover estructuras extendidas.
2. Se hicieron varias APS para áreas grandes y para secciones pequeñas comprobando su consistencia y confiabilidad en los casos donde se consideró una cobertura del cielo limitada.
3. Los mapas de k_{100} y α resultantes del análisis local representan el punto de partida para la simulación en pequeña escala de los campos de fluctuaciones para ser añadidos a los mapas donde se hizo la sustracción de fuentes discretas para construir modelos fenomenológicos de la emisión sincrotrón galáctica. Actualmente, un enfoque empírico es el modo más confiable para crear modelos del fondo cercano porque hay conocimiento insuficiente del campo magnético galáctico y

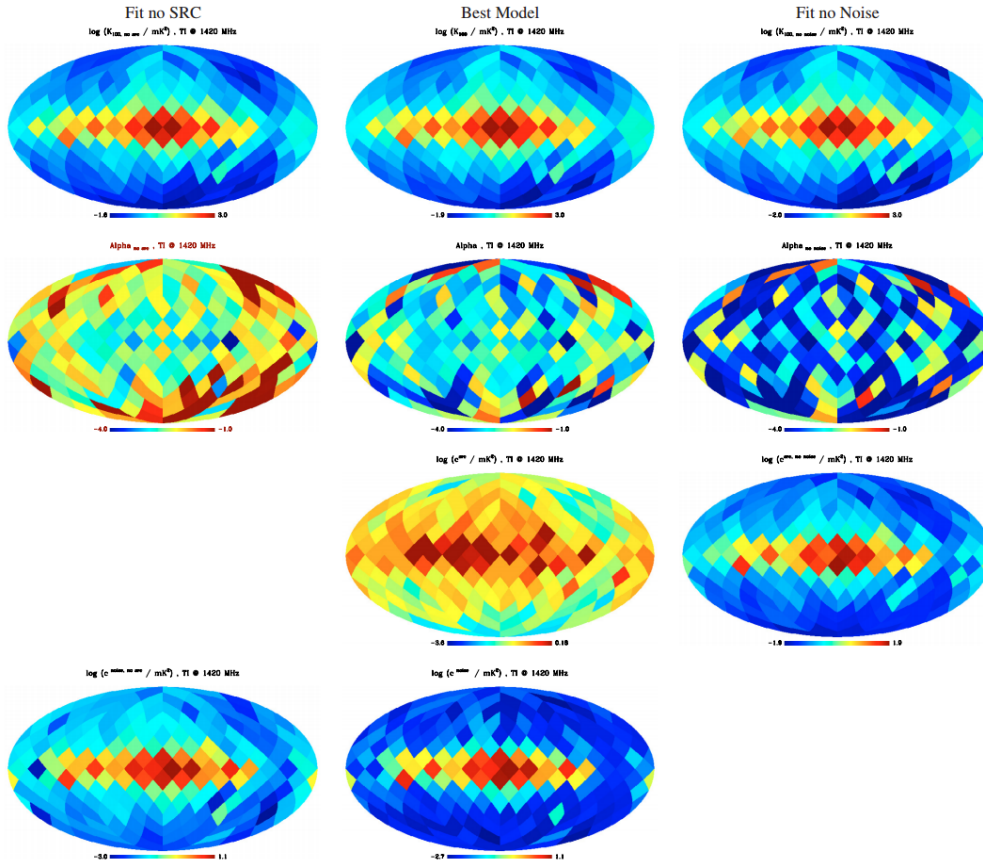


Fig. 18. Mapas de los parámetros mejor ajustados obtenidos con el método de análisis local de secciones y ajuste del espectro angular de potencias a 1420 MHz. Los mapas alineados en la misma fila se refieren al mismo parámetro. Desde arriba, $\log(k_{100}^{synch})/mK^2$, α^{synch} , $\log(c^{src}/mK^2)$ y $\log(c^{noise}/mK^2)$. La primera y tercera columna corresponden a los casos extremos, suponiendo respectivamente que la contribución fuente o el ruido causado por contaminación es despreciable.

de la distribución de densidad de electrones de rayos cósmicos necesario para crear un modelado físico tridimensional.

4. Un importante, aunque no inesperado, resultado del análisis de cortes es que la amplitud del APS para cortes del hemisferio norte por encima de $\sim 20^\circ$ se eleva por la presencia del NPS.
5. La extrapolación a 30 GHz del APS sincrotrón a 1420 MHz llevó a una señal que tiene buena concordancia con el límite superior fijo de COME-DMR, de esta forma apoyando la confiabilidad de los resultados del artículo. A ésta frecuencia, la emisión sincrotrón constituye una severa contaminación de las anisotropías del CMB a escalas angulares grandes ($l \lesssim 40$). Sin embargo, un corte a $\sim 20^\circ$ puede reducir las fluctuaciones sincrotrón alrededor de la mitad de las cosmológicas. Lo mismo se mantiene a $\nu \sim 70$ GHz para cortes a $\sim 5^\circ$, la situación aún mejora más cuando se excluyen las porciones grandes del cielo alrededor del plano galáctico. Esto implica que aunque el tratamiento actual de los planos cercanos no permite una eliminación precisa de la emisión sincrotrón, esto no evita la recuperación de la información cosmológica codificada en el comportamiento de la temperatura en la APS del CMB.

8.2. Crítica sobre gramática y estructura

1. Se encontró un error de escritura en la sección 2.3 en el primer inciso, al final hay un punto y coma en vez de un punto al final de la oración.

2. No se preservó la uniformidad en las unidades, algunas veces el texto se refería a 1.4 GHz y otras veces a 1420 MHz. En mi opinión es preferible conservar el mismo formato, sin redondear. Esto puede confundir al lector haciéndole pensar que podrían estarse refiriendo a otra observación hecha a una frecuencia diferente.
3. El artículo se refiere al telescopio Lovell como Jodrell Bank, que considero incorrecto dado que el observatorio de Jodrell Bank abarca varios telescopios y no sólo el Lovell.
4. En la Figura 8 del artículo, hay inconsistencias con las leyendas en el pie de figura.
5. Considero que hay un exceso de imágenes, es innecesario mostrar tantos cortes en ambas exploraciones. Por otro lado, reconozco que la calidad de las imágenes producidas por HEALPIX es buena y muestra de forma amigable los parámetros de mejor ajuste.

8.3. Crítica sobre el método

En la sección 2.1 del artículo donde se calcula la resolución angular de las exploraciones provenientes de varios telescopios se citan 8 diferentes artículos para obtener estos datos, no queda claro cuál es el procedimiento para hacer este cálculo, sería conveniente revisar más a profundidad cada uno de los artículos citados, en particular este tipo de tratamiento de datos es necesario dejarlo en claro. También en la sección 2.2 cuando se hace la estimación de ruido-rms con un procedimiento confuso de transformación del ruido desde los mapas ECP a las coordenadas

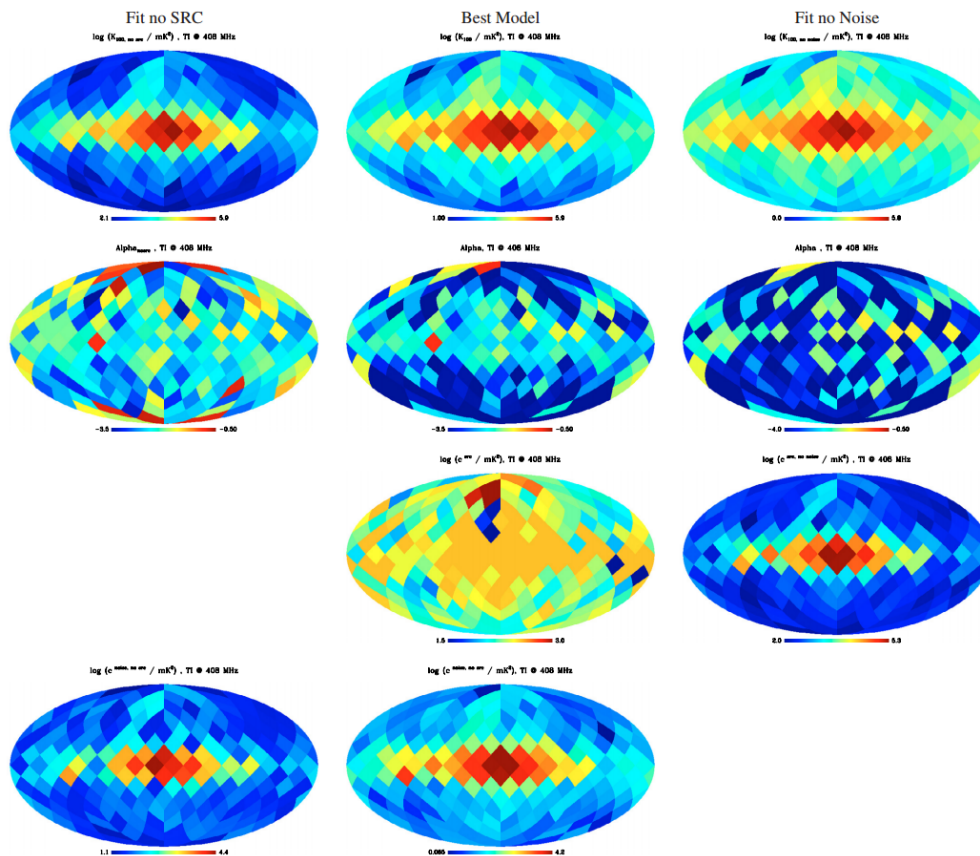


Fig. 19. Como en la Figura 18, pero a 408 MHz.

cartesianas utilizadas en el programa HEALPIX. ¿Qué tan válido es hacer todas esas suposiciones? De cierta forma, al desconocer los algoritmos y el funcionamiento de HEALPIX, cuestiono la validez del uso de ANAFast. Personalmente si alguna vez utilizo alguna herramienta, primeramente me gustaría informarme sobre ella y hacer pruebas para estimar su veracidad. Estoy segura que los autores de este artículo ya lo han hecho y por lo tanto confían en los resultados obtenidos.

8.4. Conclusiones propias y opinión

Mi opinión sobre el artículo es positiva, esta lectura es mucho más de lo que esperaba. Me ha dado la oportunidad de vislumbrar la ciencia detrás del estudio de la radiación del fondo cósmico a través de sus anisotropías. Al inicio de la lectura, no me imaginaba que la emisión sincrotrón galáctica tuviera un papel importante en la contaminación de las mediciones de anisotropía del CMB. También me parece una genialidad utilizar un análisis APS para determinar las anisotropías. Graficar multipolos contra potencia para conocer el grado de anisotropía es brillante y muy útil.

Después de terminar de analizar este artículo, definitivamente me he quedado con mucha más curiosidad de conocer más sobre el origen del universo y sus teorías. Así como también aprender a utilizar el software HEALPIX que por ahora parece maravilloso y gráficamente atractivo. Otro punto que me dejó muy satisfecha fue que lo que aprendí en mi clase de instrumentación sobre ruido, es más que un concepto teórico, es algo aplicable a datos reales y saber aplicar la metodología correctamente te permite hacer un análisis sobre una señal, verídico.

Otro punto que fue de particular interés, fueron los telescopios utilizados para hacer las observaciones, en específico el telescopio Effelsberg de 100 m y Lovell de 76 m. Como ingeniera mecatrónica, me detengo a admirar la obra de arte ingenieril que son estas construcciones y su importancia clave en la toma de datos para la ciencia.

Para finalizar, si la sustracción de componentes en el fondo cercano tiene contaminación residual en la intensidad total de las anisotropías del CMB habrá una afectación en los análisis finos basados en los estimados de correlación de una APS. Por esta razón, si se desea estudiar la señal cosmológica se debe asegurar que se minimizen o sean nulas las contaminaciones residuales.

References

- [1] L. La Porta, C. Burigana, W. Reich, and P. Reich. *The impact of Galactic synchrotron emission on CMB anisotropy measurements*, A&A 479, 641–654 (2008) DOI: 10.1051/0004-6361:20078435
- [2] Rita Tojeiro, *Understanding the Cosmic Microwave Background Temperature Power Spectrum*, March 16, 2006. Online material http://www.roe.ac.uk/ifa/postgrad/pedagogy/2006_tojeiro.pdf
- [3] Wayne Hu and Scott Dodelson *Cosmic Microwave Background Anisotropies*, Annu. Rev. Astron. and Astrophys. 2002. Online material <http://background.uchicago.edu/~whu/Papers/araa.pdf>
- [4] K. M. Gorski, E. Hivon, A. J. Banday, B. D. Wandelt, F. K. Hansen, M. Reinecke, M. Bartelman, *HEALPix — a Framework for High Resolution Discretization, and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere*, Astrophys.J.622:759-771,2005, Online material <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0409513>
- [5] WMAP Science Team, *Cosmology: The Study of the Universe*, NASA's Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, last modified June 6, 2011, http://map.gsfc.nasa.gov/universe/WMAP_Universe.pdf or <http://map.gsfc.nasa.gov/universe/>