

**CORRECCION DE MAPAS DE RCF
POR CONTAMINACION GALACTICA
Y ESTIMACION DEL CUADRIPOLO COSMOLOGICO**

R. Casas

*Max-Planck-Institut für Astrophysik
Munich, Alemania*

y

S. Torres

*Centro Internacional de Física
Bogotá, Colombia*

Resumen

Se presenta el mapa de la radiación de la galaxia a 2300 MHz, producido con los datos obtenidos durante la estadía del radiotelescopio GEM en Colombia. Se halla la dependencia del índice espectral de la radiación de la galaxia con la latitud galáctica en la banda observable desde Villa de Leyva (Boyacá). Se construye un mapa de la radiación de la galaxia a 53 GHz a través de un escalamiento del mapa de Haslam a 408 MHz utilizando la forma del índice espectral hallada. Se estima el valor del cuadripolo cosmológico a partir del cuadripolo en los mapas, a 53 GHz, de COBE y de la radiación de la galaxia. Con el cuadripolo cosmológico hallado se calcula una cota observacional a la velocidad angular de rotación global del universo y la orientación del eje de dicha rotación.

Abstract

We present the galactic radiation map at 2300 MHz, produced with the data taken during the Colombian expedition of the GEM

radiotelescope. The dependence of the galactic radiation spectral index with the galactic latitude is found over the sky band observable from Villa de Leyva (Boyacá) and is used to build a galactic radiation map at 53 GHz by scaling the Haslam 408 MHz map. This 53 GHz map along with the COBE one at the same frequency are used to estimate the cosmic quadrupole as well as the galactic one. Finally we obtain an observational upper limit to a possible angular rotation velocity of the universe and the orientation of the rotation axis.

1. Introducción

La Radiación Cómica de Fondo (RCF) es una señal electromagnética proveniente del universo en sus épocas más remotas, por tanto es portadora de información sobre los procesos y la física del universo primitivo. La información contenida en la RCF tiene incidencia directa en los problemas más importantes de la cosmología actual, tales como el problema de la materia oscura, el espectro de fluctuaciones primordiales, la existencia de ondas gravitacionales, la identificación de anisotropías intrínsecas en la métrica y la posible existencia de una rotación global del universo, entre otros. Además de estas aplicaciones de la RCF, las cotas observacionales que se logren hallar para el tamaño de las anisotropías presentes en tal radiación serán fundamentales para la calificación o descalificación de una buena parte de los modelos cosmológicos y de formación de estructura existentes, ya que estos imponen cotas inferiores sobre dichas anisotropías. En 1989 la NASA lanzó el satélite COBE, diseñado para producir mapas de la RCF y medir el espectro de la misma. Los mapas obtenidos por COBE están fuertemente contaminados por la radiación proveniente de nuestra galaxia, lo cual no permite extraer de manera confiable la información contenida en estos. Dicho problema se ha intentado solucionar mediante el uso de modelos teóricos para la radiación de la galaxia y a través de la realización de un corte a los mapas en una franja alrededor del ecuador galáctico. El primer método no es confiable debido a

la inexistencia de modelos lo suficientemente precisos y el segundo introduce un efecto sistemático debido a que los armónicos esféricos no son ortonormales en una esfera cortada, por tanto no se puede realizar una expansión multipolar confiable sobre tales mapas y además no elimina la contribución de la galaxia a altas latitudes galácticas.

Con el objetivo de producir mapas bastante precisos de la radiación de la galaxia que puedan ser usados para eliminar la contribución galáctica de los mapas de RCF de COBE fue creado el proyecto GEM (Galactic Emission Mapping) [6]. En este artículo se presenta el mapa de la radiación de la galaxia producido mediante el análisis de los datos tomados con el receptor de 2300 MHz durante la estadía del radiotelescopio GEM en Colombia. Se halla la dependencia del índice espectral de la radiación de la galaxia con la latitud galáctica a partir de los mapas a 2300 y 408 MHz obtenidos por GEM-Colombia.

La variación espacial del índice espectral se usa para construir un mapa de la radiación galáctica a 53 GHz a partir del mapa de Haslam en 1982 [7], el cual cubre totalmente la esfera celeste. La temperatura en el mapa a 53 GHz se ajusta a una expansión en serie de armónicos esféricos y se calcula el valor de la componente cuadrupolar de la radiación galáctica, la cual se usa para corregir el valor del cuadrupolo cosmológico calculado sobre el mapa de COBE-DMR a 53 GHz, el cual es un parámetro de gran importancia al examinar las predicciones que hacen ciertos modelos cosmológicos no estándar, tales como aquellos que contemplan la existencia de ondas gravitacionales [4], cuerdas cosmológicas y fluctuaciones primordiales, entre otras. En particular, se utiliza el valor del cuadrupolo cosmológico hallado para imponer una cota superior a la posible velocidad de rotación global del universo [5, 2], y se calcula la orientación del eje de simetría del cuadrupolo, el cual está alineado con el eje de rotación del universo. La detección de la velocidad angular ω tiene consecuencias importantes para la determinación de la densidad total del universo y para las teorías de partículas elementales. Por ejemplo, los modelos inflacionarios

predicen un valor nulo para dicha velocidad $\omega = 0$.

2. La RCF y la Contaminación Galáctica

De acuerdo con el modelo del Big-Bang, en los primeros instantes después de la *gran explosión* la radiación se encontraba encerrada dentro del plasma barión-fotón que conformaba el universo primigenio. En el instante en que la temperatura del universo ha descendido a $\approx 3000\text{ K}$ se dan las condiciones energéticas que permiten la formación de átomos neutros y por consiguiente la materia se hace transparente a la radiación electromagnética, es decir que la radiación y la materia se separaron y desde entonces se propagan libre e independientemente. A esta época del universo se la designa con el nombre de tiempo del desacople y corresponde a $t_{dec} = 5.6384 \times 10^{12} (\Omega_0 h^2)^{-1/2}$ segundos, donde Ω_0 es el parámetro de densidad para la época actual y h la constante de Hubble normalizada. La radiación emitida al momento del desacople es denominada *Radiación Cósmica de Fondo (RCF)*. La existencia de la RCF fue predicha por Alpher y Hermann en 1948 [1]. En 1965 Penzias y Wilson descubrieron la radiación cósmica de fondo en microondas y pronto se estableció que dicha radiación es uniforme sobre el cielo y que en el rango de longitudes de onda entre 1 metro y 1 centímetro el espectro de intensidad tiene la forma $I_\nu \propto \nu^2$, correspondiente a la región de Rayleigh-Jeans del espectro de un cuerpo negro a una temperatura de radiación de aproximadamente 2.7 K .

El experimento COBE-DMR [15] produjo mapas de la temperatura del universo a frecuencias de 31.5, 53 y 90 GHz. Los resultados de COBE indican que la RCF presenta un espectro planckiano de temperatura $T_0 = 2.73 \pm 0.01\text{ K}$ [12] y presenta anisotropías a un nivel de $\Delta T/T_0 \approx 10^{-5}$ [15], las cuales no resultan inesperadas ya que la materia y la radiación se encuentran en equilibrio térmico, lo cual implica que las perturbaciones en una componente se verán reflejadas en la otra componente. Además de este mecanismo de generación de anisotropías, también se encuentra el efecto

Sachs-Wolfe (1967), el cual consiste en la aparición de anisotropías resultantes de perturbaciones en el potencial gravitacional en la superficie de última dispersión o superficie emisora. Otra fuente de anisotropía en la RCF corresponde al efecto Doppler de frecuencias originado por el movimiento relativo del observador con respecto al sistema de referencia donde se emitió la RCF o al movimiento de la superficie de última dispersión.

En los mapas de COBE se encuentran superpuestas varias contribuciones que son consideradas ruido dentro de los mismos. Las componentes de contaminación más fuertes corresponden al momento dipolar de la RCF, inducido por el movimiento del observador con respecto al sistema de referencia de la RCF y la radiación proveniente de nuestra galaxia: La Vía Láctea. Tal radiación, en la banda de radio y microondas, es principalmente generada por electrones relativistas acelerados por el campo magnético de la galaxia (radiación sincrotrón), por hidrógeno ionizado (free-free) y por nubes de polvo interestelar (radiación térmica). El brillo detectado para estas componentes de emisión galáctica presenta un espectro que obedece a una ley de potencias, la cual se puede escribir de la forma $T(\nu) \propto \nu^{-\beta}$, donde β es el índice espectral y ν es la frecuencia de emisión. Los índices espectrales esperados para la radiación sincrotrón, la emisión "free-free" y la emisión térmica son respectivamente: $\beta = 2.75$, 2.1 y -1.5 .

3. GEM y el Mapa de la Radiación de la Galaxia

Motivado por la necesidad de contar con mapas de la radiación difusa de la Galaxia para realizar correcciones por la contaminación galáctica en los mapas de RCF, se creó el proyecto GEM (*Galactic Emission Mapping*) [19], el cual es una colaboración internacional formada con el objetivo de producir mapas muy precisos de la emisión difusa de la Galaxia en el rango 408 a 5000 MHz [18]. La colaboración GEM está conformada por grupos en Brasil (INPE/CNPq), Colombia (Observatorio Astronómico Nacional y

Centro Internacional de Física), Italia (CNR), USA (Lawrence Berkeley National Lab/UCB) y España (IAC).

Durante el primer semestre de 1995 el grupo de astrofísica del Observatorio Astronómico Nacional y del CIF, dirigido por el Dr. S. Torres, realizó la toma de datos de emisión difusa de la Galaxia en el rango 408–5000 MHz con el radiotelescopio GEM de Berkeley [6], instalado en cercanías de Villa de Leyva (Boyacá). Los datos obtenidos en las diferentes expediciones del radiotelescopio serán usados por los integrantes de GEM para construir mapas precisos de la radiación de la Galaxia en el rango de frecuencias disponible.

3.1. El Receptor de 2300 MHz

El receptor de 2300 MHz consiste básicamente en un radiómetro de potencia total con un filtro tubular de pasa banda ($\Delta\nu = 100$ MHz). El arreglo experimental, el proceso de análisis de datos y producción del mapa de la radiación de la galaxia a 2300 MHz es similar al usado para construir el mapa a 408 MHz, el cual se presenta en [18]. Los parámetros del receptor de 2300 GHz se muestran en la tabla , donde los valores de ganancia y temperatura de sistema han sido obtenidos mediante una calibración relativa entre el mapa en temperatura a 408 MHz y el mapa a 2300 MHz en voltios.

Sobre la base de datos se aplicaron cortes tendientes a eliminar señales de ruido por radiointerferencia, junto con los datos tomados bajo condiciones no estándar de funcionamiento del radiómetro. Se eliminaron los datos sobre el mapa que se encontraban a menos de 25° de la posición del sol, debido a que es una fuente de ruido bastante intensa. Una vez pixelizados los datos, se eliminaron aquellos que se desviaban demasiado alrededor del promedio en cada pixel.

Parámetro	Valor
Longitud de onda	13.043 cm.
Ancho de banda	100 MHz
Sensibilidad	0.001 V
Ancho de haz (beam width)	3.7°
Ganancia	23 ± 10 K/V
Temperatura de sistema (efectiva)	38 ± 16 K
Temperatura de sistema (nominal)	55 K
Susceptibilidad térmica (V_S vs T2)	-0.0023 V/°C
temperatura de regulación de T2	37.16°C

Tabla 1. Receptor de 2300 MHz.

3.2. El Mapa de Radiación Galáctica a 2300 MHz

Una vez realizado el análisis y la reducción de datos se produjo el mapa de emisión difusa de la Galaxia en la frecuencia de 2300 MHz. La pixelización usada corresponde al esquema *Skycube* de COBE [17] y el mapa esta dividido en 6144 pixeles. La calidad del mapa fue evaluada mediante la skewness y kurtosis de cada pixel, las cuales son cantidades que miden la desviación de una distribución con respecto a una normal, obteniéndose que el 90 % de los pixeles en el mapa se pueden considerar normales. Una imagen en curvas de isotermodura del mapa producido se presenta en la figura 1.

4. Variación del Índice Espectral con la Latitud Galáctica

El índice espectral de la radiación galáctica varía con la latitud y longitud galácticas (l, b). El mapa a 408 MHz producido por GEM-Colombia [18] y el mapa a 2300 MHz presentado en este artículo se usan para calcular la dependencia del índice espectral (β) con la latitud galáctica (b) en la banda celeste observable desde Villa de Leyva.

De acuerdo con la ley de potencias que describe el espectro de la radiación galáctica, el índice espectral (β) se puede calcular mediante la expresión [11]:

$$\beta(\nu_1, \nu_2) = \frac{\log(T_G(\nu_1)/T_G(\nu_2))}{\log(\nu_2/\nu_1)} \quad (1)$$

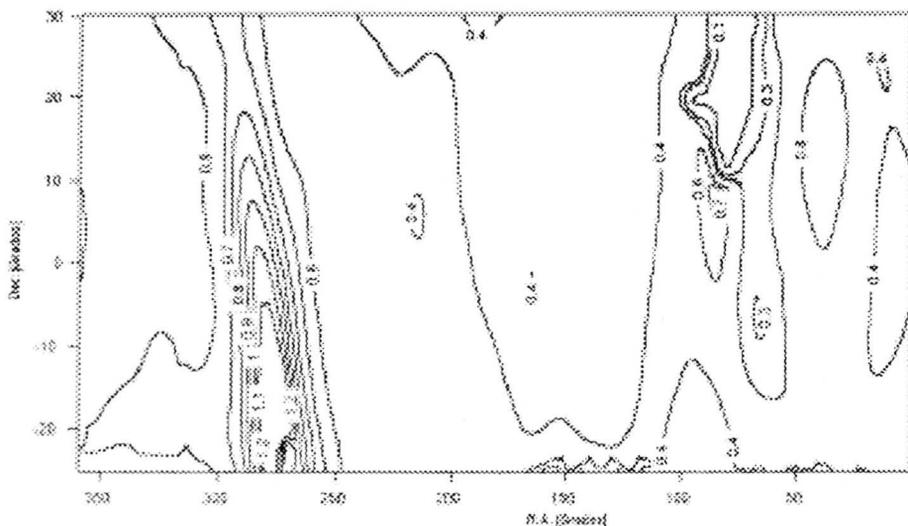


Figura 1. Curvas de nivel del mapa GEM-Colombia a 2300 MHz en coordenadas celestes. Los niveles van desde 0.1 hasta 1.2 K.

donde T_G es la temperatura de la galaxia, que depende de las frecuencias de emisión ν_1 y ν_2 .

Con los dos mapas, a la misma resolución angular, se calculó el valor del índice espectral sobre cada pixel, obteniéndose un mapa del índice espectral. Dicho mapa, en curvas de nivel, se aprecia en la figura 2.

Para hallar la dependencia del índice espectral con b galáctica se halló primero la dependencia de la temperatura con b en los dos mapas de radiación galáctica a 408 y 2300 MHz y con dicha dependencia se halló la forma del índice espectral, usando la expresión:

$$\beta(\nu_1, \nu_2, b) = \frac{\log(T_{\nu_1}(b)/T_{\nu_2}(b))}{\log(\nu_2/\nu_1)} \quad (2)$$

donde $T_\nu(b)$ es una función ajustada a los datos de temperatura en cada mapa.

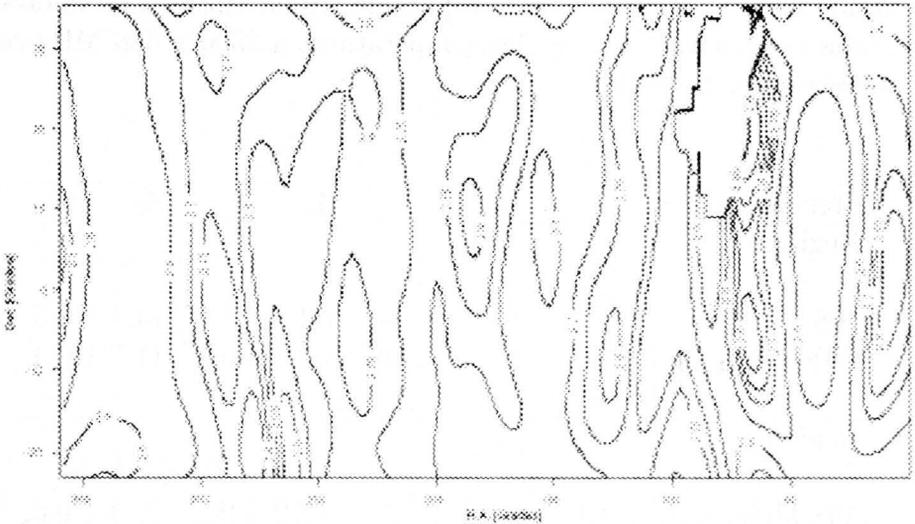


Figura 2. Mapa en curvas de nivel del índice espectral de la radiación de la galaxia en la región observada por GEM-Colombia en coordenadas celestes. Los niveles van desde 2.5 hasta 2.9.

Los mapas de GEM usados en este análisis cubren parcialmente la banda $-40^\circ \leq b \leq 40^\circ$, $0^\circ \leq l \leq 360^\circ$ y en ellos se observan dos huecos y dos zonas en longitud galáctica que cubren completamente la franja $-40^\circ \leq b \leq 40^\circ$, de tal forma que solo resulta posible hallar una dependencia de la radiación galáctica en las zonas con cubrimiento total de la franja disponible en latitud galáctica y luego extender el resultado al resto del cielo por comparación con los datos en las zonas con huecos. La forma de la curva de la temperatura de la galaxia en función de la latitud galáctica hace suponer que la función que mejor se ajusta a la misma es una gaussiana de la forma:

$$T_\nu(b) = A_0 + A_1 e^{-\left(\frac{b-A_2}{A_3}\right)^2}, \quad (3)$$

donde los coeficientes A_i son los parámetros de ajuste. Los valores de los coeficientes A_i para las temperaturas a 2300 y 408 MHz se muestran en la tabla 2.

Frecuencia	A_0	A_1	A_2	A_3
Región 1:				
408 MHz	54.5 ± 1.2	65.7 ± 1.8	1.4 ± 0.3	14.3 ± 0.5
2300 MHz	0.5300 ± 0.008	0.53 ± 0.02	-1.2 ± 0.2	11.7 ± 0.4
Región 2:				
408 MHz	36.7 ± 0.2	13.3 ± 0.3	-3.2 ± 0.2	20.3 ± 0.6
2300 MHz	0.3400 ± 0.004	0.1400 ± 0.008	-3.9 ± 0.7	14.8 ± 1.1

Tabla 2. Parámetros de las Gaussianas ajustadas a la temperatura en los mapas a 408 y 2300 MHz. Región 1: $0^\circ \leq l \leq 120^\circ$ y $310^\circ \leq l \leq 360^\circ$. Región 2: $120^\circ \leq l \leq 310^\circ$.

El valor de β hallado en cada pixel presenta una incertidumbre $\Delta\beta = 0.1$, proveniente del ajuste realizado. La incertidumbre proveniente de la calibración de los mapas de radiación galáctica a 408 y 2300 MHz se supone $\Delta\beta_c = 0.1$, y no es tomada en cuenta ya que lo que interesa es la distribución relativa de β .

5. El Cuadripolo

La RCF y la radiación de la galaxia son funciones definidas sobre la superficie de la esfera unitaria (esfera celeste), por tanto

es natural representarlas en términos de la expansión en armónicos esféricos:

$$T = T_0 \left[1 + \sum_{l=1} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_l^m(\theta, \phi) \right] \quad (4)$$

donde T_0 es la temperatura de monopolo. De esta forma si se toma $\frac{\Delta T}{T} = (T - T_0)/T_0$, se tiene:

$$\frac{\Delta T}{T} = \sum_{l=1} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_l^m(\theta, \phi) \quad (5)$$

Dado que la temperatura observada es una cantidad real, se usa la parte real de esta expresión o bien se puede definir una expansión en armónicos reales. El término de orden $l = 1$ corresponde al dipolo y $l = 2$ corresponde al cuadrupolo. El valor *rms* del cuadrupolo se define como: $Q_{rms}^2 = \frac{(T_0)^2}{4\pi} \sum |a_{2m}|^2$. Otra notación usada para expresar el término cuadrupolar consiste en definir las cinco componentes del cuadrupolo, en unidades de temperatura, por medio de la expresión usada por el grupo de COBE [3]:

$$Q(l, b) = Q_1 (3 \operatorname{sen}^2 b - 1) / 2 + Q_2 \operatorname{sen} 2b \cos l \\ + Q_3 \operatorname{sen} 2b \operatorname{sen} l + Q_4 \cos^2 b \cos 2l + Q_5 \cos^2 b \operatorname{sen} 2l$$

donde l y b son la longitud y latitud galácticas, respectivamente. La amplitud rms del cuadrupolo está dada por:

$$Q_{rms}^2 = \frac{4}{15} \left[\frac{3}{4} Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2 + Q_4^2 + Q_5^2 \right].$$

Sobre el mapa de la radiación de la galaxia a 53 GHz, construido a partir del mapa de Haslam a 408 MHz, se ajusta una expansión en armónicos esféricos hasta orden $l = 2$ por medio del método de mínimos cuadrados, obteniéndose que el valor del cuadrupolo galáctico a 53 GHz es $(21.9 \pm 12.8) \mu K$, donde la incertidumbre ha sido estimada usando fórmulas de propagación de errores.

El cuadripolo cosmológico es el valor del cuadripolo de la radiación cósmica de fondo. Por tanto estimar el valor del cuadripolo cosmológico es equivalente a hallar el valor del momento de cuadripolo en los mapas de COBE y restarle el cuadripolo producido por el ruido del instrumento, el cuadripolo cinemático y el cuadripolo galáctico. El cuadripolo cinemático corresponde al efecto Doppler de segundo orden, producido por el movimiento relativo entre la superficie de última dispersión y el receptor. Dicha contribución tiene un valor de $Q_k^{rms} = 1.2 \mu K$ [3], el cual fue obtenido a partir de la componente dipolar, la cual ha sido eliminada de los mapas de COBE.

El mapa de COBE usado en este estudio es el mapa obtenido con el receptor a 53 GHz, el cual se escogió por ser el de mayor sensibilidad. El cuadripolo en el mapa de COBE a 53 GHz se determinó de igual manera como se hizo para el cuadripolo galáctico, obteniéndose: $Q_{cobe}^{rms} = (77.3 \pm 1.2) \mu K$. El valor del cuadripolo producido por el ruido del instrumento se calculó sobre el mapa resultante de restar los mapas de COBE a 53 GHz generados por cada uno de los dos canales del receptor (A y B) así $T_{noise} = T_{53A} - T_{53B}$, lo cual equivale a eliminar la señal del mapa y dejar solamente el ruido del instrumento. El valor de cuadripolo de ruido hallado es: $Q_{noise}^{rms} = 1.0 \pm 1.3 \mu K$.

De esta manera se tiene que el valor del cuadripolo cosmológico es: $Q_c^{rms} = (59 \pm 30) \mu K$. Este valor es varias veces mayor que el valor obtenido por el grupo del COBE ($Q_c^{rms} = (10 \pm 7) \mu K$) [9]. Debe anotarse que el valor del cuadripolo hallado por tal grupo está dominado por errores sistemáticos muy altos debido a que fue calculado a través de un corte alrededor del ecuador galáctico y no es susceptible de ser mejorado ya que no se puede remover el efecto sistemático producido por tal corte. Una de las grandes ventajas del método pro-puesto y usado en este artículo consiste en que nuestros resultados pueden ser mejorados a medida que se vayan mejorando los datos de mediciones de la radiación de la galaxia. El resultado obtenido para el cuadripolo cosmológico se desvía del valor reportado por el grupo de COBE $(59 - 10.7)/30 = 1.63$, lo cual indica

que, dentro de las incertidumbres que presentan tales resultados, la probabilidad de que el resultado hallado en esta investigación sea el mismo que el reportado por COBE es alta, ya que los dos se encuentran separados por menos de tres veces la desviación estándar. Esto permite afirmar que el resultado del cuadrupolo cosmológico obtenido en este trabajo es compatible con el que halló el grupo del COBE. Sin embargo cuando se aumente la precisión de los resultados obtenidos usando el método aquí propuesto, deberá revisarse la anterior afirmación.

6. Aplicación a la Velocidad de Rotación del Universo

El valor del cuadrupolo cosmológico es una cantidad que llama mucho la atención por sus implicaciones físicas. Collins y Hawking [5] y Barrow *et al.* [2] estudiaron métricas donde se presenta un movimiento global de rotación del universo. Estos modelos se proponen basados en la suposición de que existe una vorticidad en el universo y que dicha vorticidad es espacialmente homogénea, lo cual permite estudiarla por medio de modelos cosmológicos espacialmente homogéneos y anisotrópicos que son generalizaciones de los universos de Friedmann en la aproximación de pequeñas anisotropías. Tales universos se presentan como linearizaciones de los modelos de Friedmann alrededor de los modelos de Bianchi VII_0 , VII_h y IX [2] para universos planos, abiertos y cerrados de Friedmann, respectivamente. Para tales universos aparece una distribución cuadrupolar (*e.g.* $\propto \sin^2 \theta$) en la RCF.

Para los universos planos y abiertos los momentos multipolares se expresan en términos de la vorticidad [2]:

$$C_l = \left(\frac{\pi}{2}\right)^{1/2} (I_{lA}^2 + I_{lB}^2)^{1/2} \left(\frac{\omega}{H_0}\right) \frac{6x^2\Omega_0}{(1+h)^{1/2}(1+9h)^{1/2}} \quad (6)$$

donde $C_l = \sum_m |a_{lm}|^2$ es el espectro angular de la RCF, ω es la velocidad angular de rotación del universo, h la constante de Hubble

normalizada, Ω_0 el parámetro de densidad del universo, I_A e I_B son coeficientes que relacionan las perturbaciones en la temperatura $\Delta T/T$ y la matriz de vorticidad, x es el factor de escala que conecta la velocidad de expansión del universo con la constante de Hubble. Así la velocidad angular de rotación en la época actual se expresa de la forma:

$$\left(\frac{\omega}{H_0}\right) = C_l \frac{(1+h)^{1/2} (1+9h)^{1/2}}{6x^2 \Omega_0 \left(\frac{\pi}{2}\right)^{1/2} (I_{IA}^2 + I_{IB}^2)^{1/2}}, \quad (7)$$

donde la fracción al lado derecho es una constante que depende de los parámetros del modelo. De tal forma que si se conoce el momento cuadrupolar de la RCF ($l = 2$) se puede estimar el valor de la velocidad angular de rotación global del universo. Un tratamiento detallado del problema de la rotación global del universo se encuentra en Barrow *et al.* [2].

La ecuación (??) muestra que la velocidad angular de rotación es directamente proporcional al cuadrupolo, lo cual permite acotar la velocidad de rotación del universo usando la cota para $\frac{\omega}{H_0}$ obtenida por Smoot [16], ya que se conoce el valor del cuadrupolo que usó ($13 \mu K$). El resultado de Smoot es $\frac{\omega}{H_0} < 10^{-6}$, por tanto la cota superior a la velocidad de rotación global del universo con base en el valor del cuadrupolo cosmológico hallado en este trabajo es: $\frac{59}{13} \times 10^{-6}$, es decir: $\frac{\omega}{H_0} < 4.5 \times 10^{-6}$. Este valor es aproximadamente cinco veces el valor hallado por Smoot y tal diferencia probablemente se deba a que aquí no se introduce sesgo alguno como el que domina los errores del cuadrupolo del grupo COBE, ya que no se está cortando la esfera unitaria.

En el transcurso del presente año han aparecido varios preprints en la base de datos de SISSA, en los cuales se trata el tema de la posible rotación global del universo. Uno de estos artículos (Nodland y Ralston, 1997 [13]) ha llamado especialmente la atención, pues en él se reporta la supuesta detección de una anisotropía en el eje de polarización de la luz proveniente de galaxias lejanas y se da la orientación de tal anisotropía ($RA, decl$) = ($315^\circ \pm 30^\circ, 0^\circ \pm 20^\circ$).

Ese efecto es típico en universos en rotación [14] y la orientación de la anisotropía hallada debería coincidir con la orientación del cuadripolo cosmológico si los dos resultados están conectados con la rotación global del universo. Un resultado importante que se presenta en este artículo consiste en la determinación confiable de la orientación del cuadripolo, ya que al estimar el cuadripolo sobre la esfera unitaria completa se conserva dicha información en los mapas de RCF, lo cual no se logra al realizar un corte galáctico como el que hace el grupo de COBE. Así, se obtuvo que la orientación del cuadripolo es:

$$(RA, decl) = (315^\circ \pm 30^\circ, 51^\circ \pm 30^\circ) ,$$

la cual, dentro de las incertidumbres dadas, está de acuerdo con el valor con la orientación reportada por Nodland y con aquella reportada por Kühne (1997) $(RA, decl) = (290^\circ \pm 20^\circ, -20^\circ \pm 10^\circ)$ [10], quien argumenta que el resultado de Nodland y Ralston es apoyado por una observación anterior e independiente sobre el eje de rotación de galaxias en el supercúmulo Perseus-Pisces. La orientación del eje de rotación del universo obtenida en este trabajo es de particular importancia ya que es la primera vez que ésta se calcula haciendo uso del cuadripolo cosmológico y porque de acuerdo con las incertidumbres dadas se puede afirmar que presenta baja significancia estadística con respecto al resultado de Nodland y Ralston, y al de Kühne, es decir que la probabilidad de que se trate del mismo resultado es alta, con lo cual se tiene un argumento a favor de los modelos cosmológicos que contemplan rotación global.

7. Resultados

Se produjo un mapa de la radiación difusa de la galaxia en la frecuencia de 2300 MHz con base en los datos radiométricos obtenidos por el grupo GEM-Colombia, durante la estadía del radiotelescopio GEM en cercanías de Villa de Leyva (Boyacá).

Se halló una dependencia del índice espectral de la radiación de la galaxia con la latitud y longitud galácticas usando los mapas

de la radiación galáctica a 2300 y 408 MHz producidos por GEM-Colombia. Dicha dependencia es de gran utilidad para el desarrollo de modelos de radiación galáctica y para la extrapolación de mapas de radiación galáctica, entre otros. Este resultado es importante ya que hasta ahora no se contaba con una dependencia de esta clase en la zona del cielo observable desde regiones ecuatoriales.

Se produjo un mapa de la radiación galáctica a la frecuencia de 53 GHz, mediante un escalamiento del mapa de radiación galáctica, con cubrimiento total del cielo, producido por Haslam en 1982 a través de la ley de potencias, $T(\nu) \propto \nu^{-\beta}$, que gobierna la radiación difusa de la galaxia en el rango de frecuencias estudiado.

Se estimó el valor del cuadripolo de la radiación galáctica presente en el mapa a 53 GHz producido mediante el escalamiento del mapa de Haslam y en el mapa de COBE-DMR a 53 GHz, se hallaron los valores: $Q_{gal}^{rms} = (22.6 \pm 12.8)$ y $Q_{cobe}^{rms} = (77.3 \pm 1.2) \mu K$. Se realizó la corrección del cuadripolo en el mapa de COBE por la contribución galáctica, cinemática y de ruido instrumental, obteniéndose un valor para el cuadripolo cosmológico de: $Q_c^{rms} = (59 \pm 30) \mu K$, el cual es aproximadamente cinco veces el valor obtenido por el grupo del COBE [9]. La incertidumbre inducida por la variancia cósmica en la estimación de los multipolos de la RCF, para escalas angulares mayores que 1° , es [8]: $\Delta C_l = \sqrt{2/2l + 1} C_l$, ya que las distribuciones de los C_l son χ^2 con $2l + 1$ grados de libertad. La incertidumbre relativa para el cuadripolo ($l = 2$) medido es 63% [20], de donde se tiene que la desviación del cuadripolo cosmológico obtenido en este trabajo con respecto al cuadripolo normalizado del espectro de perturbaciones primordiales ¹ ($Q_{rms-PS} = 15.3 \mu K$) [9] es 1.2 veces la incertidumbre inducida por la variancia cósmica. Por tanto, dentro de las incertidumbres dadas, la probabilidad de que el cuadripolo cosmológico que se halló en esta investigación sea resultado de una perturbación primordial es alta. El valor y precisión del cuadripolo cosmológico obtenidos pueden ser mejorados a medida que se vayan mejorando los datos de mediciones de la

¹La cantidad Q_{rms-PS} corresponde al valor medio del cuadripolo medido en el conjunto de todas las posibles realizaciones de universos que puedan existir.

radiación de la galaxia.

Se halló una cota observacional a la velocidad angular de rotación del universo: $\omega/H_0 < 4.5 \times 10^{-6}$ usando el valor del cuadripolo cosmológico estimado dentro de esta misma investigación. Además se calculó la orientación del eje de rotación del universo: $RA = 315^\circ \pm 30^\circ$, $decl = 51^\circ \pm 30^\circ$, el cual está alineado con el eje de simetría del cuadripolo cosmológico. La orientación hallada para dicho eje está de acuerdo con los recientes resultados publicados a través del servicio de preprints electrónicos de SISSA. Este resultado representa un argumento a favor, dentro de las incertidumbres dadas, de los modelos que predicen una rotación global del universo y va en contravía con algunos modelos inflacionarios actuales.

Los resultados que hasta hoy se han obtenido en el proyecto GEM son de gran utilidad para corregir los resultados obtenidos en los experimentos de COBE y serán aún más importantes a medida que los resultados sean mejorados.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo de COLCIENCIAS, proyecto: 2228-05-103-96 y Programa de Jóvenes Investigadores y de CINDEC (Universidad Nacional de Colombia), proyectos: 803463 y 803553.

Referencias

1. Alpher, R. A. and Herman, R. 1948, *Nature*, **162**, 774.
2. Barrow, J.D., *et al.* 1985, *MNRAS*, **226**, 655.
3. Bennett, C. L. *et al.*, 1992, *Ap. J.*, **396**, L7.
4. Burke, W. L. 1975, *ApJ*, **196**, 329
5. Collins, C. B. and Hawking, S. W. 1973, *MNRAS*, **62**, 307.

6. De Amici, G. *et al.* 1994, *Astrophys. & Space Science*, **214**, 151.
7. Haslam, C.G.T., *et al.* 1982, *Astr. Astrophys. Suppl. Ser.*, **47**, 1
8. Kamionkowski, M. and Loeb, A. 1997, *astro-ph/9703118*
9. Kogut A. *et al.* 1996b, *ApJ*, **464**, L5
10. Kühne, R. W. 1997, *astro-ph/9708109*
11. Lawson, K. D. *et al.* 1987, *MNRAS*, **225**, 307
12. Mather, J. C., *et al.* 1994, *Ap. J.*, **420**, 439.
13. Nodland, B. and Ralston, J. P. 1997, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 3043; *astro-ph/9708114*
14. Obukhov, Y. N. 1997, *astro-ph/9705243*.
15. Smoot, G. F., 1992, *ApJ.*, **396**, L1
16. Smoot, G. F., 1993, in 2nd. course: *Current Topics in Astrofundamental Physics*, Edited by N. Sanchez and A. Zichichi (Singapore, World Scientific), p. 125
17. Torres, S. *et al.*, 1989, "Cosmic Background Explorer (COBE) Anisotropy Experiment Data Analysis Techniques", En *Data Analysis in Astronomy III*, Erice, Italia, Junio 20-27 de 1988. Eds. V. di Gesu, *et al.*, Ed. Plenum Press, New York, pp. 319-333
18. Torres, S. *et al.*, 1996, *Astrophys. & Space Science* **240**, 225
19. Torres, S. 1997, "Cosmología y Modelos Galácticos con el Proyecto GEM", preprint.
20. White, M. *et al.*, 1993, *ApJ*, **418**, 535; *astro-ph/9303009*.