

## COSMOLOGIA Y MODELOS GALACTICOS CON EL PROYECTO GEM

Sergio Torres Arzayús

Observatorio Astronómico, Universidad Nacional  
y  
Centro Internacional de Física

**Resumen.** La elaboración de mapas de la radiación difusa de la Galaxia a longitudes de onda larga es necesaria para estudiar los rayos cósmicos y el campo magnético en el medio interestelar. La existencia de modelos precisos de la emisión galáctica es también necesaria para sustraer la contaminación galáctica en mapas de radiación cósmica de fondo. Se describe la instrumentación y la estrategia para la medición de la radiación difusa de la galaxia usando el radio telescopio GEM.

### INTRODUCCION

El proyecto GEM (Galactic Emission Maps) consiste en la elaboración de mapas de la radiación difusa emitida por la Vía Láctea a longitudes de onda larga (408 - 5000 MHz). Además de la utilidad para estudios relacionados con procesos físicos en la Galaxia, estos datos permitirán extraer la componente galáctica presente en los mapas de radiación cósmica de fondo (RCF) obtenidos por experimentos como COBE-DMR. La componente galáctica es la mayor fuente de contaminación en los mapas de RCF y por lo tanto la disponibilidad de un modelo galáctico preciso permitirá aplicar las correcciones adecuadas a esos datos. A falta de un modelo preciso de la galaxia a las frecuencias de interés, se hace un corte galáctico ( $|b| > 20^\circ$ ). Sin embargo se sabe que la Galaxia tiene una contribución no despreciable a latitudes altas. Por ser la RCF la señal más remota del universo, una mejora de los datos de RCF tendrá un impacto considerable en cosmología. El experimento DMR - Differential Microwave Radiometer (Bennett et al. 1996) produce mapas de la temperatura total de la bóveda celeste a frecuencias de 31.5, 53 y 90 GHz (9.52, 5.66 y 3.33 mm de longitud de onda), y en ellos aparecen superpuestas diferentes componentes provenientes de muy diversas fuentes como ruido de los instrumentos, corrimiento hacia el rojo inducido por el movimiento relativo del observador con respecto a la RCF, los objetos del sistema solar, la Galaxia, y efectos de origen cosmológico que producen anisotropías intrínsecas.

El proyecto GEM fue originado por G. Smoot y el autor en 1990 y hoy en día se ha convertido en una colaboración internacional formada por el laboratorio Lawrence Berkeley (Estados Unidos), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Brasil), Observatorio Astronómico y Centro Internacional de Física (Colombia) Instituto Astronómico de las Canarias (España) y Consiglio Nazionale di Ricerca (Italia) (De Amici, Torres et al. 1994).

## LA SEÑAL GALACTICA

Las contribuciones más importantes de emisión galáctica a las frecuencias de interés para experimentos de RCF son la componente de sincrotrón, causada por electrones relativistas acelerados por el campo magnético galáctico, la emisión de bremsstrahlung producida por hidrógeno ionizado en el espacio interestelar (emisión 'free-free'), y la emisión de tipo térmico debido a nubes de polvo interestelar calentadas por radiación ultravioleta de estrellas muy calientes. El brillo observado de cada componente presenta un espectro que sigue una ley de potencias  $T(\nu) \propto \nu^{-\beta}$ . donde  $\beta$  es el índice espectral<sup>1</sup>. En general el espectro de la componente de radiación debida a polvo es de tipo plankiano, pero en el rango de frecuencias considerado solo la región de Rayleigh-Jeans es importante y por lo tanto la ley de potencias es una buena representación. Los índices espectrales para la radiación sincrotrón, la emisión 'free-free' y la emisión térmica son  $\beta = 2.75, 2.1$  y  $-1.5$  respectivamente.

La fuente de emisión de la radiación sincrotrón son electrones relativistas acelerados por el campo magnético de la Galaxia. Si consideramos un flujo de electrones de rayos cósmicos con un espectro de energías:

$$N(E) = AE^{-\gamma} dE$$

la intensidad de la radiación emitida cuando éstos son acelerados en un campo magnético H es (Ginzburg & Syrovatskii 1965):

$$I_{\nu} = a(\gamma) \left( \frac{3e}{4\pi m^3 c^5} \right)^{(\gamma-1)/2} H^{(\gamma+1)/2} AL\nu^{-(\gamma-1)/2}$$

L es la profundidad de la nube de electrones,  $a(\gamma)$  un coeficiente que depende del exponente  $\gamma$ . De esta formula se desprende la relación entre los índices espectrales de la radiación y del espectro de energías de los rayos cósmicos:

---

<sup>1</sup> En radioastronomía es común expresar el brillo de una fuente ( $I_{\nu}$ ) como la temperatura equivalente de cuerpo negro. La relación entre esta temperatura y el brillo ( $\text{watts m}^{-2} \text{Hz}^{-1} \text{rad}^{-2}$ ) es:  $B=2kT/\lambda^2$ . Normalmente T se expresa en Kelvin (K).

$$T = \frac{c^2}{2\nu^2 k} I_\nu \propto \nu^{-\beta}, \quad \beta = \frac{\gamma + 3}{2},$$

es decir, haciendo mediciones del índice espectral  $\beta$  de la radiación sincrotrón, es posible estudiar el espectro de energía de los rayos cósmicos en la Galaxia. Los valores promedio que se han podido medir independientemente están de acuerdo con la relación teórica entre ellos:  $\beta \approx 2.75$ ,  $\gamma \approx 2.5$ . Igualmente, se pueden aprovechar las mediciones de la señal sincrotrón de la Galaxia para estudiar el campo magnético galáctico, lo cual es muy útil para estudios de la propagación de los rayos cósmicos de alta energía.

### LA RADIACION COSMICA DE FONDO

Desde la detección de anisotropías por el COBE en la RCF (Bennett 1996), ésta se ha convertido en una herramienta esencial para el estudio del universo temprano y la prueba de modelos cosmológicos. Esto se debe a que desde el momento del desacople ( $z \approx 1000$ ) las perturbaciones en el campo de radiación han continuado evolucionando en su régimen lineal, constituyéndose en una 'radiografía' de la física en la superficie de última dispersión. En Torres 1996x el autor hace una presentación sobre la física de la RCF y un análisis de los datos del COBE para probar modelos cosmológicos abiertos ( $\Omega < 1$ ).

Un problema muy particular que se beneficia de los datos de GEM es el de estimar la componente cuadrupolar de la RCF de origen cosmológico. Debido a la contaminación galáctica este parámetro cosmológico no se ha podido determinar, pero gracias a la posibilidad de estimar la componente galáctica con nuestros datos, se nos abre una ventana de posibilidades de gran impacto científico. El cuadrupolo cosmológico tiene incidencia directa en las teorías de perturbaciones primordiales, ondas gravitacionales, anisotropías intrínsecas en la métrica del espacio-tiempo y en la rotación global del universo.

El cuadrupolo es la componente de orden  $l = 2$  en una expansión de la anisotropía de la RCF en armónicos esféricos:

$$\frac{\Delta T}{T} = \sum_l \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

El cuadrupolo queda especificado con los 5 coeficientes armónicos  $a_{2m}$ .

Collins y Hawking (1973) y Barrow et al. (1985) estudiaron métricas donde se presenta un movimiento global de rotación del universo. En estos universos aparece una distribución cuadrupolar (eg.  $\propto \sin^2\theta$ ) en la RCF:

$$C_l = \left(\frac{\pi}{2}\right) (I_A^2 + I_B^2)^{1/2} \left(\frac{\omega}{H}\right) \frac{6x^2 \Omega_0}{(1+h)^{1/2} (1+9h)^{1/2}}$$

donde

$$C_l \equiv \sum_m |a_{lm}|^2$$

es el espectro angular de la RCF (Bond & Efstathiou 1987),  $\omega$  es la velocidad angular del universo,  $h$  la constante de Hubble normalizada,  $\Omega_0$  el parámetro de densidad del universo,  $I_A$  y  $I_B$  son coeficientes de ligadura entre las perturbaciones de temperatura  $\Delta T/T$  y la matriz de vorticidad,  $x$  es el factor de escala que conecta la rata de expansión del universo con la constante de Hubble. La detección de la velocidad angular  $\omega$  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  $\omega=0$ .

Los modelos de formación de estructura en el universo basados en el colapso gravitacional a partir de perturbaciones en la densidad predicen la existencia de un fondo de ondas gravitacionales de longitud de onda larga, las perturbaciones producidas por estas ondas sobre la métrica inducirían corrimientos hacia el rojo en los fotones de la RCF. Burke (1975) demostró que la densidad de energía,  $\Omega_{GW}$ , en este fondo de ondas gravitacionales está conectado con las anisotropías de la siguiente manera:

$$\Omega_{GW} = 1.6 \times 10^{-3} \frac{[(\Delta T/T)/(3.7 \times 10^{-5})]^2}{(\lambda/10 \text{ Mpc})^2 h^2}$$

con una distribución espacial  $\propto (1 - \cos\theta) \cos(2\theta)$  que exhibe las características de un cuadrípolo.

Mientras que los efectos de rotación global y de ondas gravitacionales continúan a la espera de una confirmación experimental, la presencia de perturbaciones primordiales en la densidad de masa es un hecho muy claramente establecido. Inclusive antes de la medición por COBE de la forma del espectro primordial  $P(k)$  la medición de correlaciones a gran escala en los catálogos de galaxias ya indicaban la necesidad de una 'semillas' (eg. perturbaciones primordiales) que permitieran la formación de dichas estructuras por colapso gravitacional. El efecto Sachs-Wolfe (Sachs & Wolfe 1967) (eg. corrimientos de frecuencia en los fotones de la RCF que escapan de perturbaciones gravitacionales) permite hacer una conexión directa entre la función de potencia angular de la RCF,  $C_l$ , y el espectro primordial:

$$C_\ell = \left(\frac{4\pi}{5}\right)^2 \int_0^\infty P(k) \left(\frac{j_\ell(k)}{k}\right)^2 dk$$

Bautista y Torres (1996) encontraron un método para la inversión de esta ecuación, es decir conociendo el término de cuadrupolo,  $C_2$ , uno puede inmediatamente investigar el espectro primordial a escalas superiores al horizonte a la época de desacople ( $\lambda \approx 4 \pi c / 3 H_0 = 1.3 \times 10^3 \text{ Mpc}/h$ ). El problema más difícil al momento de estudiar la forma del espectro  $P(k)$  a gran escala es el de la 'variancia cósmica' (Abbot 1984), es decir la incertidumbre intrínseca en los coeficientes  $a_{lm}$  debido a la naturaleza estocástica y a la no ergodicidad del campo de fluctuaciones de temperatura. En efecto, cuando se tiene en cuenta la variancia cósmica y el ruido instrumental presente en los datos del COBE Gould (Gould 1993) demostró mediante un análisis estadístico que los datos del primer año del COBE son consistentes con la hipótesis de un cuadrupolo nulo. Una expansión anisotrópica ('shear') también dejaría una huella clara en la RCF. En un universo con una 'constante' de Hubble que cambia espacialmente (eg.  $\Delta H_0/H_0 \neq 0$ ) aparecería una modulación de tipo cuadrupolar en la distribución espacial de la RCF:  $\Delta T/T \propto \sin^2\theta$ . La intensidad de 'shear' se puede relacionar con en nivel de anisotropía:

$$\frac{\Delta H_0}{H_0} \approx 3 \times 10^{-2} \frac{\Delta T}{T}.$$

Otro efecto que se beneficia de mediciones de la RCF es el de la posibilidad de un corte en el infrarrojo ('infrared cutoff') que evitaría divergencias en las teorías cuánticas de campos. Fang (1994) indica, con base en un análisis preliminar de los datos del COBE que hay evidencia de un corte infrarrojo no nulo en el universo, de orden  $\lambda_{\text{max}} \sim 1.25 c H_0^{-1}$ .

El problema de la formación de estructura a gran escala (eg. cúmulos, supercúmulos y grandes vacíos) en el Universo era antes de COBE una área poco entendida en cosmología. La detección de anisotropías a un nivel  $\Delta T/T = 10^{-5}$  por el radiómetro diferencial de microondas (DMR) a bordo del satélite COBE dejó el panorama mucho más claro en el sentido de dar validez al mecanismo de colapso gravitacional y en la medición de la normalización del espectro primordial de fluctuaciones en la densidad  $P(k)$ . Una evaluación de las consecuencias de éste descubrimiento para la cosmología se puede encontrar en Torres (1994) y Torres et. al. (1997).

Los resultados originales obtenidos por COBE sobre la amplitud del espectro primordial fueron corroborados por el autor usando diferentes técnicas de análisis que se basan en las propiedades de los descriptores topológicos (como género, picos, área de excursión, etc) de campos aleatorios (Torres 1994; Torres 1995b; Torres et al. 1995; Fabbri & Torres 1995; Fabbri & Torres 1996).

Los corrimientos al rojo de los fotones de la RCF inducidos por fluctuaciones en el campo gravitacional durante las épocas cercanas al desacople ( $z = 1000$ ) hacen de la RCF una herramienta ideal para probar modelos cosmológicos. Esta tarea se complica al considerar la naturaleza estocástica de las teorías, sin embargo, los mecanismos de fluctuaciones primordiales hacen predicciones concretas sobre su espectro  $P(k)$  para cada valor de los parámetros  $\Omega$  (parámetro de densidad del universo),  $h$  (constante de Hubble normalizada a  $100 \text{ Km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ) y  $\Omega_b$  (cantidad de materia bariónica). Usando un análisis de la función de correlación Cayón, Torres et al. (1996) demostraron la compatibilidad de modelos abiertos ( $\Omega < 1$ ) con los resultados de anisotropías vistos por COBE; y haciendo un análisis completamente independiente Gurzadyan y Torres (1977) presentaron evidencia a favor de modelos abiertos con base en efectos estadísticos en el transporte de geodésicas.

Con respecto al análisis de los datos del COBE tendientes a aclarar el problema del cuadrupolo cosmológico, De Greiff y Torres (1995) hicieron un cálculo de errores instrumentales y límites de sensibilidad instrumental para evaluar la posibilidad de detección del cuadrupolo. Torres (1995b) propuso un método para evaluar el grado de contaminación galáctica mediante la aplicación de descriptores topológicos. En esa misma publicación, Torres introduce una nueva técnica de análisis de la componente cuadrupolar de distribuciones de una función escalar en la superficie 2D de la esfera unitaria. Este método se basa en el cálculo de los momentos de simetría de un cuerpo rígido.

En el análisis de los datos del COBE realizado por los miembros del grupo COBE (Bennett et al. 1992, 1993, 1994) el problema de la contaminación galáctica es atacado usando una de las frecuencias con mayor presencia de la galaxia (eg. 31 GHz) para construir un modelo galáctico. Este método resulta en una sobre estimación de la radiación galáctica. Un método alternativo también usado por COBE es el de hacer un corte galáctico excluyendo la banda ecuatorial  $|b| < 20^\circ$  ( $b$  es latitud galáctica). Esta estrategia sin embargo, introduce efectos sistemáticos al momento de calcular el espectro angular de potencias ya que los armónicos esféricos no son ortonormales en la esfera cortada (Wright et al. 1994, Gorski et al. 1994). Tenorio et al. (1993) estudiaron los efectos al cuadrupolo producidos por ruido instrumental.

Para resolver el problema de la no ortonormalidad de los armónicos esféricos en la esfera cortada, el momento de cuadrupolo cosmológico se puede estimar usando los eigen-valores de la matriz de inercia (Torres 1995b). Esta representación tiene la ventaja de reducir el número de coeficientes de 5 a 4 y de proporcionar una interpretación muy directa de los 4 coeficientes restantes (eg. como en la mecánica de los cuerpos rígidos: las coordenadas del eje de simetría y el ángulo de rotación sobre ese eje).

## EL RADIO TELESCOPIO GEM

La meta científica del proyecto GEM se puede resumir en profundizar el conocimiento de la emisión galáctica en el rango de frecuencias de interés para estudios de la RCF. Para poder separar las diferentes componentes de emisión galáctica es necesario realizar mediciones a diferentes frecuencias y con la mayor cobertura posible. El radiotelescopio GEM viene equipado con radiómetros que cubren 4 bandas (408, 1465, 2300 y 5000 MHz). La atmósfera es un emisor de microondas (primordialmente H<sub>2</sub>O y O<sub>2</sub>) que impide hacer mediciones desde Tierra o las limita a direcciones cercanas al cenit. El efecto es despreciable a bajas frecuencias (< 800 MHz), pero hace casi imposible mediciones a frecuencias superiores a 10 GHz. Al aumentar la separación de la dirección de observación con respecto al cenit aumenta la columna de aire que la señal tiene que atravesar para llegar desde el espacio hasta el radiotelescopio. La estrategia adoptada en este proyecto es la de mantener el ángulo de elevación de la antena cercano al cenit. Las observaciones se limitan a la región permitida por un ángulo de 30° con respecto al cenit. Con estas restricciones de visibilidad se hacen necesarias observaciones desde distintas latitudes para poder lograr un máximo cubrimiento de la esfera celeste. Para mantener una calibración consistente de los datos se sobrelapan las zonas de cobertura y se usa el mismo instrumento en los diferentes sitios de observación.

Además de la cobertura total de la esfera celeste y la calibración consistente de los datos, para el diseño del radio telescopio GEM se siguieron otros criterios básicos para garantizar una calibración absoluta del nivel cero mejor que  $(\nu/408)^{2.75}$  Kelvin donde  $\nu$  es la frecuencia observada en MHz, errores en el nivel de ganancia no mayores al 3% de la señal total, resolución angular  $\sigma \leq 5^\circ$ , y sensibilidad a la señal galáctica circularmente polarizada.

El sistema de antena consiste de un reflector parabólico de aluminio de 5.5 metros de diámetro, montado sobre una base giratoria 'alt-azimut', y antenas alimentadoras tipo espiral en el foco principal (a 408, 1465 y 2300 MHz) y de tipo cónico en configuración Cassegrain para el canal de 5000 MHz. La superficie reflectora principal es extendida hasta un radio de 9.5 mt por un halo de aluminio que actúa como un escudo para atenuar la emisión difractada emitida por la Tierra. El ajuste del ángulo de elevación se hace por medio de un brazo de extensión mecánico que permite inclinar el reflector hasta un ángulo de 45° con respecto al cenit. El registro de la dirección de la antena se hace con codificadores de ángulo, elevación y acimut separadamente. Durante sesiones de toma de datos normales, se mantiene la elevación fija a 60° mientras que la base gira a 1 rpm. En esta configuración, cada día de toma de datos resulta en un muestreo cubre una banda celeste de 60° (vista desde Villa de Leyva).

Para la antena alimentadora (en las bandas de baja frecuencia) se eligió un diseño helicoidal de tipo “backfire”, que tiene como ventajas el ser circularmente polarizada, de fácil fabricación y tener un lóbulo principal angosto y casi gaussiano. Sus mayores desventajas son los grandes lóbulos traseros y un ancho de haz principal no muy bien definido a frecuencias altas. El diámetro de la hélice, la circunferencia, el espaciamiento entre vueltas, la longitud de la vuelta y el ángulo de paso determinan la frecuencia a la cual es sensible y el ancho del haz (o resolución angular). La resolución angular efectiva (eg. teniendo en cuenta la antena alimentadora y la superficie reflectora) es de  $11.3^\circ$  FWHM para el sistema a 408 MHz y  $3.7^\circ$  a 2300 MHz. La polarización circular es muy deseable porque no es necesario tener en cuenta cambios de dirección de polarización al modificar la posición del instrumento. La potencia interceptada por estas antenas se pasa por una guía de ondas a radiómetros de potencia total. Para el sistema de alta frecuencia (5000 MHz) se usaron dos antenas cónicas que alimentan un radiómetro diferencial

La calibración de la señal (eg. la conversión de voltios a Kelvin) es fundamental en este proyecto. El valor absoluto de la calibración se obtiene usando emisores de referencia de cuerpo negro a temperaturas conocidas, y los cambios de calibración debidos a la susceptibilidad térmica de los componentes se corrigen mediante el monitoreo de pulsos de referencia que se inyectan periódicamente a la señal en las etapas de pre-detección. Como fuentes de referencia para la calibración se usó un terminador acoplado de  $50 \Omega$  a temperatura ambiente y el mismo terminador sumergido en un baño de nitrógeno líquido (77 K).

El diseño de los receptores de baja frecuencia (408, 1450 y 2300 MHz) es el de radiómetros de potencia total. Aquí, la señal pasa por un filtro definidor del ancho de banda, dos etapas de amplificación de RF, un diodo detector, y finalmente un amplificador DC y un integrador. Este último integra la señal dentro de una ventana de 0.56 segundos después de la cual el acumulado del integrador es convertido análogo a digital y se hace disponible al sistema de adquisición de datos. El radiómetro diferencial recibe la señal de dos antenas cónicas, y por medio de un switch se produce una nueva señal igual a la diferencia de las dos entradas. El resto de la electrónica es similar a la de los receptores de potencia total.

El computador que controla la adquisición de datos recibe cada 0.56 segundos un bloque de datos mediante el puerto serial. El bloque de datos incluye la temperatura de antena, los voltajes de los codificadores de acimut y elevación, el voltaje de los pulsos de calibración y los termopares y reguladores de temperatura. El radiómetro de 408 MHz viene además equipado con un circuito detector de señales de interferencia de radio (RFI). En la cabecera del bloque se inserta el tiempo universal (UTC) asociado al momento de la medición. El UTC se obtiene de forma digital de una estación receptora de la señal WWV emitida desde Fort Collins, Colorado.

## TOMA DE DATOS EN COLOMBIA

La disponibilidad de un sitio para observaciones radioastronómicas en latitudes ecuatoriales abre una ventana de posibilidades de gran potencial científico. En el caso concreto del proyecto GEM, mediciones realizadas en cercanía al ecuador terrestre permiten conectar observaciones realizadas separadamente en los hemisferios norte y sur. Además, es justamente sobre el ecuador donde se logra el cubrimiento más eficiente del área del sondeo. Estudios preliminares de sitios realizados por nuestro grupo en Colombia (Hoeneissen et al. 1992; Torres et al. 1993) indican que existen por lo menos cinco regiones del país con condiciones favorables para observaciones astronómicas. La zona de Villa de Leyva (Boyacá) se escogió como el sitio que reúne las mejores condiciones logísticas, climatológicas y de baja radio-interferencia.

Las coordenadas del sitio determinadas GPS son  $5^{\circ} 37' 7.84''$  N latitud,  $73^{\circ} 35' 0.53''$  W longitud y 2.173 m de altura sobre nivel del mar.

La toma de datos en Colombia cubre el período enero-junio 1995, durante el cual se completaron 1.618 horas de observación. El 70% de los datos fueron tomados con el sistema de 408 MHz. A la frecuencia de 1465 MHz no fue posible adquirir datos útiles debido a la presencia de una intensa fuente de RFI probablemente debida a un satélite en órbita geoestacionaria. El resto del tiempo corresponde a las frecuencias altas. Estas observaciones representan una base de datos de más de 2 Gbytes de radiación galáctica en la banda celeste  $-30^{\circ} < \delta < +35^{\circ}$ ,  $0^h < \alpha < +360^h$  ( $\delta$ ,  $\alpha$  son declinación y ascensión recta respectivamente). El resultado del análisis de los datos a 408 y 2300 MHz se puede apreciar en las figuras 1 y 2 donde aparecen las curvas de iso-temperatura (Kelvin).

Fuera de Colombia, hasta el presente existe sólo un mapa con cobertura celeste completa a 408 MHz (Haslam et al. 1982). También existen mediciones parciales a frecuencias menores que 5 GHz. Una hecha por Reich et al (1986) a 1420 MHz que incluye únicamente el hemisferio norte celeste a partir de  $-19^{\circ}$  en declinación. Existen otros mapas con coberturas similares a 38, 178 y 820 MHz. La utilidad de estos últimos, sin embargo, es gravemente limitada no solo por la cobertura parcial sino también por errores sistemáticos en la calibración, no homogeneidad de la cobertura, y diferencias en las características geométricas y eléctricas de las antenas y receptores. El grupo de J. Jonas (1992) de la Universidad de Rhodes (Sur Africa) que actualmente realizan un muestreo a 2.3 GHz. Este viene operando desde 1987 con el radiotelescopio del observatorio de Hartebeesthoek en Johannesburg que cubre únicamente una fracción del hemisferio sur celeste.

## Referencias

- Abbott, L. F. & Wise, M. B. 1984, ApJ, 282, L47  
Bautista R., & Torres, S. 1996, ApJ,  
Barrow, J. D., et al. 1985, Mon. Not. R. astr. Soc., 213, 917  
Bennett, C. L., et al. 1992, ApJ, 396, L7  
Bennett, C. L., et al., ApJ, 414, L77  
Bennett, C. L., et al., ApJ, 436, 423  
Bond, J.R. & Efstathiou, G., 1987, Mon. Not. R. astr. Soc., 226, 655  
Burke, W. L. 1975, ApJ, 196, 329  
Cayón, L., Torres, S., et al. 1996, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **279**, 1095-1100  
Collins, C. B. & Hawking, S. W. 1973, Mon. Not. R. astr. Soc., 162, 307  
De Amici, G., Torres, S., et al. 1994, *Astrophys. Space Science*, 214, 151  
De Greiff, A. & Torres, S. 1992, in *VIII Escuela Nacional de Física Teórica*, ed. C. Uribe et al. (Cali: Uni-Valle), 303  
Fabbri, R. & Torres, S. 1996, *Astronomy and Astrophysics*, **307**, 703  
Fabbri, R., & Torres, S. 1995, *Il Nuovo Cimento*, **110B**, N.7, 865  
Fang, L-Z. 1994, in *The Seven Marcel Grossmann Meeting on General Relativity*, Eds. R. Ruffini, et al.  
Górski, K. M., et al. 1994, ApJ, 430, L89  
Gould, A. 1993, ApJ, 403, L51  
Gurzadyan, V. & Torres, S. 1997, *Astronomy and Astrophysics*, **321**, 19-23  
Haslam, C.G.T, Salter C.J, Stoffel H., & Wilson W. E. 1982, *Astr. Astroph. Suppl. Ser.*, 47,1  
Hoeneissen, B., Torres S., Violini G. 1992, *Nuclear Physics. B. (proc suppl.)* 28B, 191  
Jonas, J. 1992, in *Back to the Galaxy*, ed. S. S. Holt & F. Verter, (AIP Conference Proceedings 278) 283  
Reich, P. et al. 1986, *Astron. Astrophys. Suppl.*, 63, 205  
Sachs, K. & Wolfe, A. M., 1967, ApJ, 147, 73  
Smoot, G. F., et al. 1992, ApJ, 396, L1  
Tenorio, L., et al. 1993, in *Present and Future of the Cosmic Microwave Background*, ed. J.L. Sanz, et al. (Heidelberg: Springer-Verlag), 115  
Torres, S. 1995a, *Astrophysics & Space Science*, **228**, pp. 313-325  
Torres, S. 1995b, *Astro. Letters and Communications*, 32, 95  
Torres, S. 1995c, *Astrophysics & Space Science*, **228**, pp. 309  
Torres, S. 1994, *The Astrophysical Journal*, **423**, L9-L12.  
Torres, et al. 1997, *Il Nuovo Cimento*,  
Torres, S., et al. 1995, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 274, 853  
Torres, et al. 1993, *Revista Col. de Física*, 25, 23  
Torres, S., et al. 1989, in *Data Analysis in Astronomy III*, ed. V. di Gesu, L. Scarsi, and M.C. Maccarone (New York: Plenum) 319  
White, M., Scott, D. & Silk, J. 1994, *Ann. Rev. Astron & Astrophys*, 32, 319  
Wright, E. L., et al., ApJ, 436, 443