

EMISION DE RADIOFRECUENCIAS PROVENIENTE DE UNA REGION DE LA NEBULOSA GUM

RADIO EMISSION COMING FROM A REGION OF THE GUM NEBULAR

E.Reynoso^{2,3}, F.R.Colomb¹, R.D Piacentini² Y J. C. Testori¹

¹ Instituto Argentino de Radioastronomía (CONICET)

² Instituto de Física de Rosario (CONICET-UNRosario) y
Observatorio Astronómico Municipal de Rosario

RESUMEN. Las radiaciones del continuo en 1420 MHz provenientes de la región de la nebulosa Gum centrada alrededor del punto de coordenadas galácticas $l = 263^\circ$, $b = +7^\circ$ y detectadas con el radiotelescopio del IAR, son comparadas con las registradas en 408 MHz por Haslam y colaboradores. Se discriminan las contribuciones provenientes de los fondos galáctico y extragaláctico y para la propia nebulosa, los aportes térmicos y sincrotrónico. Respecto de este último término, se presentan resultados teóricos que permiten determinar el índice espectral correspondiente al espectro energético de los electrones relativistas.

ABSTRACT. The continuum radiations at 1420 MHz, coming from the Gum nebula region centered around the point of galactic coordinates $l = 263^\circ$, $b = +7^\circ$ and detected with the radiotelescope of the IAR, are compared with that registered at 408 MHz by Haslam et al. Contributions coming from the galactic and extragalactic backgrounds, and the thermal and synchrotron components for the nebula, are discriminated. For the latter, theoretical results are presented which allow for the determination of the spectral index corresponding to the energetic spectrum of the relativistic electrons.

1. INTRODUCCION

La radiación cósmica sincrotrónica ha sido investigada por diversos autores, tanto desde el punto de vista teórico como observacional. En particular, la proveniente de la nebulosa Gum en el rango de radiofrecuencias ha sido analizada por Beuermann (1973) empleando un modelo semiempírico con varios parámetros introducidos solamente para lograr un buen ajuste, sin interpretación física asociada a los mismos. Por otra parte, para obtener el comportamiento de la intensidad de radiación en función de la frecuencia, se extrajeron datos de mapas publicados por diferentes grupos. Sin embargo, un estudio detallado de los artículos correspondientes invalida varios puntos incluidos en su trabajo, ya que no están claramente especificados los fondos de radiación correspondientes. Por consiguiente se ha restringido en este primer análisis a los valores dados por Haslam y col.

³ Becaria de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura UNRosario.

(1982) en 408 MHz, corregidos recientemente (Reich, 1988).

En el presente trabajo se parte del formalismo básico dado por Bekefi (1966) y se llega a una expresión final con solamente un parámetro físico que debe ser ajustado: N_0 , la densidad de electrones relativistas; y otros tres cuyos valores han sido tomados de la bibliografía: la energía mínima del espectro energético de los electrones ϵ_{\min} , el campo magnético B y el espesor de la región L . De este modo puede deducirse el índice espectral α de la pendiente de la curva intensidad de radiación versus frecuencia. Se presentan además resultados observacionales de la radiación detectada a 1420 MHz con el radiotelescopio del IAR y se deducen las diferentes contribuciones: extragaláctica, galáctica y de la propia nebulosa. De esta última se logra por primera vez separar las componentes térmicas y no térmicas (sincrotrónica).

2. INTENSIDAD DE RADIOFRECUENCIAS

Si se observa una determinada región del cielo en una frecuencia ν la intensidad de la radiación que llega a la antena puede expresarse como:

$$I(\nu) = I_{fg} + I_r + I_n (1 - e^{-\tau_\nu}) + (I_{bg} + I_x) e^{-\tau_\nu} \quad (1)$$

donde I_{fg} , I_n , I_{bg} e I_x son las intensidades de la emisión no térmica que se origina frente a la región en estudio, dentro de ella y en los fondos galáctico y extragaláctico respectivamente (Beuermann, 1973), y τ es el espesor óptico de la región. El segundo término, I_r , corresponde a la radiación térmica dada por

$$I_r = \frac{2K\nu^2}{c^2} T_e (1 - e^{-\tau_\nu}) \quad (2)$$

donde K representa la constante de Boltzmann, c es la velocidad de la luz en el vacío y T_e es la temperatura cinética de los electrones que componen la región.

En este trabajo nos proponemos aislar la radiación no térmica proveniente de una región de la nebulosa Gum e identificar su índice espectral α . Dado que en éste caso el espesor óptico τ_ν es muy pequeño, la ecuación (1) toma la forma más fácil

$$I(\nu) = I_{fg} + \frac{2K\nu^2}{c^2} T_e \tau_\nu + I_n + I_{bg} + I_x \quad (3)$$

con lo cual nuestro problema se reduce a calcular I_n . De acuerdo a la teoría básica sobre radiación no térmica proveniente de una región de espesor L , la intensidad correspondiente está dada por (Bekefi, 1966)

$$I_n = \frac{\sqrt{3} e^2 (2\pi)^{(1-\beta)/2}}{64\pi^3 \epsilon_0 c} (\beta-1)(3/2)^{\beta-1} N_0 L \left(\frac{\epsilon_{\min}}{m_0 c^2} \right)^{\beta-1} \left(\frac{eB}{m_0} \right)^{\frac{\beta+1}{2}} G(\alpha) \nu^{-\alpha} \quad (4)$$

donde e es la carga del electrón, m_0 es su masa en reposo, ϵ_0 es la permisividad dieléctrica del vacío, B es la intensidad del campo magnético

presente en la región, N_0 es la densidad de los electrones cuyas energías están por encima de la energía mínima ϵ_{min} y α es el índice espectral, relacionado con β por

$$\alpha = (\beta - 1)/2 \quad (5)$$

$G(\alpha)$ es una función relacionada con β a través de

$$G(\alpha) = 2 \frac{\beta-3}{2} \left(\frac{\beta+7/3}{\beta+1} \right) \Gamma\left(\frac{3\beta-1}{12}\right) \Gamma\left(\frac{3\beta+7}{12}\right)$$

En la deducción de la fórmula (4) se ha supuesto que tanto la densidad electrónica como el campo magnético son homogéneos.

Nos concentraremos en una región de $\sim 0,01$ sr en torno al punto $l = 263^\circ$, $b = +7^\circ$. Elegimos esta área para poder establecer una comparación con el espectro obtenido por Beuermann (1973). El índice espectral será calculado a partir de las medidas de la intensidad de brillo a dos frecuencias: 408 MHz y 1420 MHz, obteniéndose la primera del mapa de Haslam (1982). La segunda se tomó en el IAR con una antena parabólica de 30 m. Las observaciones se hicieron poniendo la antena en seguimiento y barriendo el cielo en declinación. La temperatura promedio, de 0,47 K, está referida a una zona fría tomada como nivel cero, cuya temperatura absoluta se desconoce.

3. ANALISIS DE LA RADIACION DE FONDO

Como señalamos anteriormente, la antena recibe la radiación que se origina en la nebulosa Gum mezclada con las radiaciones de fondo galáctica y extragaláctica. La radiación extragaláctica está compuesta por la radiación reliquia del big-bang de 2,73 K y por otra componente no térmica proveniente de quasars y radiogalaxias lejanas no resueltas. Esta última sería de aproximadamente 0,1 K a 1420 MHz (Reich, 1983). De acuerdo con esto, consideramos al espectro dado por Clark y col. (1970) para la región del anticentro galáctico. Este espectro fue tomado a bajas frecuencias, donde la contribución de la radiación reliquia es despreciable. Una extrapolación del mismo a frecuencias mayores nos da que la temperatura de brillo a 1420 MHz es de 0,087 K. A 408 MHz, la componente no térmica de fondo extragaláctico y la radiación reliquia son prácticamente iguales, sumando entre las dos unos 6 K (Phillips, 1981).

En cuanto a la radiación galáctica, debemos considerar tanto la radiación "de fondo" I_{bg} que se origina detrás de la nebulosa, como el "foreground" I_{fg} que es la que proviene de la región situada por delante de ella y que está dada por Beuermann (1973). La determinación de I_{bg} es más complicada, ya que si nos guiamos por Clark y col. (1970), ésta se superpone con el espectro observado (Beuermann, 1973), de manera que la radiación proveniente de la nebulosa sería despreciable y sólo se registraría radiación de fondo. Creemos que esto se debe a la imprecisión de las observaciones graficadas por Beuermann (1973), en las que la zona en estudio se confunde con el nivel cero. Las mediciones tomadas en las dos frecuencias con las que estamos trabajando, al ser más actuales, están bien diferenciadas de la radiación de fondo. Tomaremos como fondo las temperaturas más bajas observadas, y de éstas extraeremos la contribución de la radiación extragaláctica y el "foreground" para aislar a I_{bg} . A 408 MHz, la temperatura más baja que se registra es de 20 K. De ésta, 6 K corresponden

a radiación extragaláctica, y 6 K, a I_{fg} , de manera que sólo 8 K forman parte de I_{bg} . A 1420 MHz, el fondo galáctico es de 0,4 K (Reich, 1983), con 0,21 K pertenecientes a I_{fg} y el resto a I_{bg} .

En la Fig. 1 se muestra la radiación total que capta la antena como suma de las radiaciones galáctica, extragaláctica y la proveniente de la nebulosa Gum. Las figuras 2, 3 y 4 muestran la composición de cada uno de los tipos de emisión anteriores.

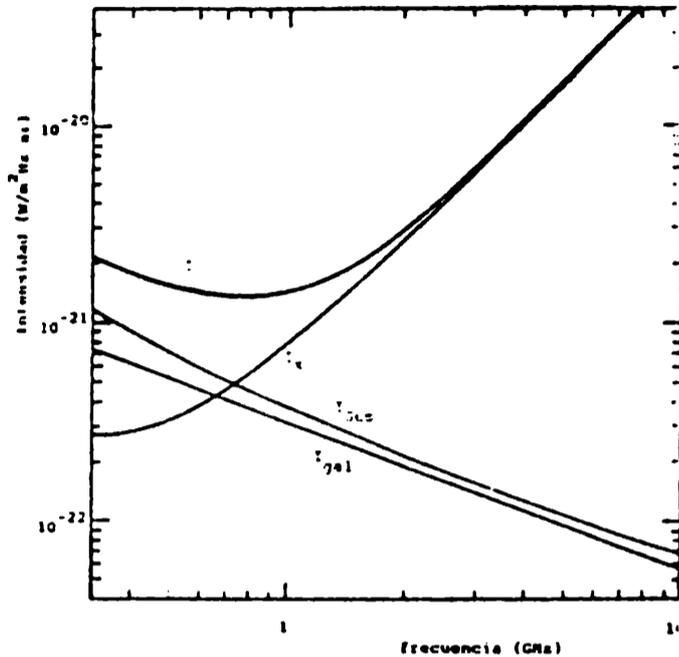


Figura 1: Radiación en el continuo de radiofrecuencias en la dirección de la nebulosa Gum, para una región centrada en el punto de coordenadas galácticas $l = 263^\circ$ y $b = +7^\circ$. Los símbolos corresponden a las radiaciones : I total, I_x extragaláctica, I_{gal} galáctica, e I_{gum} nebulosa Gum.

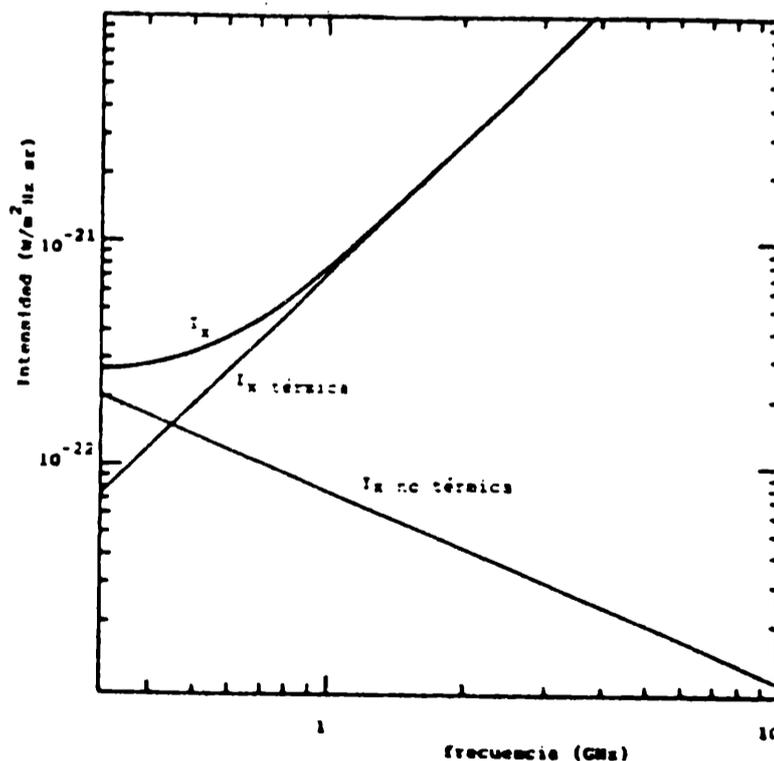


Figura 2: Iden figura 1 para las radiaciones correspondientes a la descomposición de la radiación extragaláctica I_x térmica (radiación reliquia) e I_x no térmica (radiación sincrotrónica).

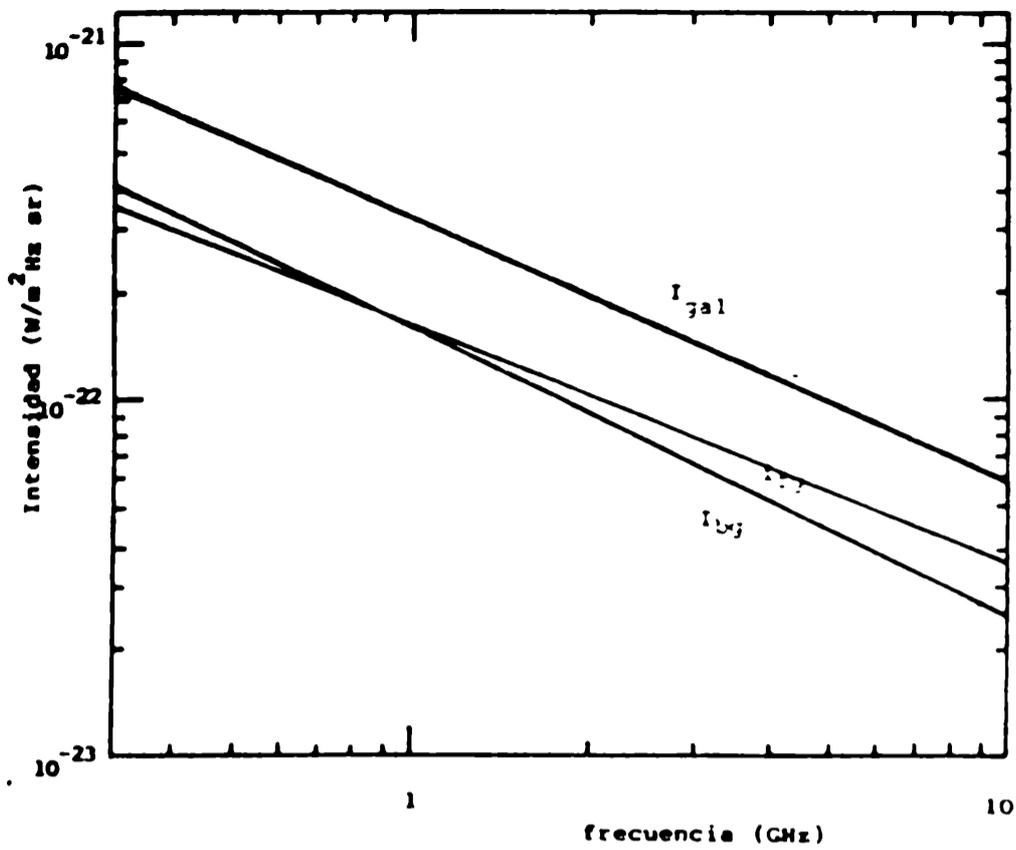


Figura 3: Iden figura 1 para la radiación galáctica I_{gal} y sus componentes: I_{bg} e I_{fg} , background y foreground, respecto de la región en estudio.

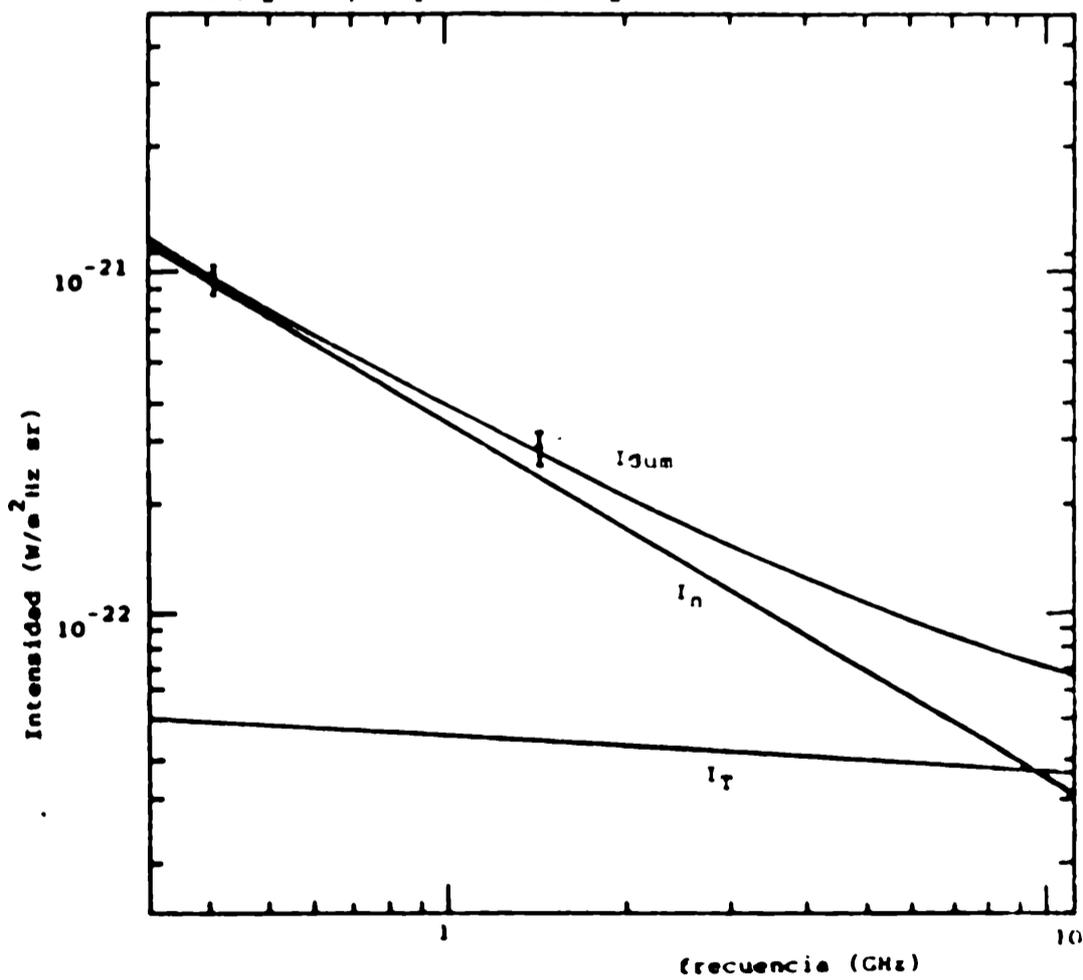


Figura 4: Iden figura 1 para la radiación proveniente de la nebulosa Gum I_{gum} y sus componentes: I_T térmica e la sincrotrónica. Se indican además los puntos observados, con sus barras de error correspondiente, a 400 MHz (Haslam y col.) y a 1420 MHz (nuestros resultados).

4. RADIACION PROVENIENTE DE LA NEBULOSA GUM.

La nebulosa Gum ocupa en el cielo una región circular de $\sim 36^\circ$ de diámetro (aproximadamente 250 pc) y presenta forma aproximadamente anular. Los datos observacionales sugieren que la nebulosa Gum es una capa de gas ionizado en expansión. Reynolds (1976) sugiere un modelo según el cual la explosión de una supernova llevó a la formación de una envoltura gaseosa, como resultado de la expansión del material interestelar circundante. Modelos más recientes proponen, dada la extensión y complejidad de la nebulosa, que en realidad es la superposición de varios eventos desfasados en el tiempo y el espacio.

La radiación que proviene de la nebulosa se origina mediante dos mecanismos distintos. Uno, puramente térmico, se debe a la interacción libre-libre entre los electrones. Designaremos a esta emisión I_r . Si escribimos τ_ν explícitamente (Spitzer, 1968), está dada por

$$I_r = \frac{1.068}{c^2} \frac{10^{18} \text{ K EM}}{\text{Te}^{\frac{1}{2}}} (1 + 0.13 \log_{10} \frac{\text{Te}^{3/2}}{\nu}) \quad (6)$$

donde EM es la medida de la emisión en $\text{cm}^{-6} \text{ pc}$, Te es la temperatura cinética de los electrones y ν es la frecuencia en Hz. La mayoría de los autores afirman que la temperatura cinética de los electrones oscila alrededor de los 10.000 K (ver por ejemplo Reynolds, 1976). El espectro térmico de la nebulosa Gum graficado en la figura 4 se calculó suponiendo una medida de la emisión de $46 \text{ cm}^{-6} \text{ pc}$ (Haslam, 1982).

El otro mecanismo de emisión es el sincrotrónico, que es debido a la aceleración que sufren los electrones ultrarrelativistas en campos magnéticos galácticos. Este tipo de emisión está descrito por la ecuación (4). Para calcular el índice espectral α debemos restar, además de las componentes galáctica y extragaláctica, la contribución de la radiación térmica que se origina dentro de la misma nebulosa. En realidad, a 1420 MHz es esta última la única que debe restarse, ya que las dos anteriores se anularon automáticamente al tomar como nivel cero a una zona fría situada fuera de la nebulosa. El índice espectral característico de la emisión no térmica resulta ser igual a $1.1^{+0.13}$. Si trazáramos una recta entre las intensidades de radiación a 408 MHz y a 1420 MHz incluyendo tanto la radiación no térmica como la térmica, llegaríamos a que el índice espectral combinado sería de $0.88^{+0.14}$, dado que la inclusión de la radiación térmica se traduce en una disminución del índice espectral. Cabe destacarse que el valor arriba indicado es superior a los determinados por Beuermann (1973), que son de 0,45 a 0,85 en la región de radiofrecuencias.

Veremos ahora cómo aplicar la ecuación (4) a la región de la nebulosa Gum que estamos analizando. En primer lugar, dado que la densidad electrónica es un factor multiplicativo, y siendo la densidad de la capa tres órdenes de magnitud superior a la de la cavidad interior (Reynolds, 1976), la intensidad producida en la cavidad será menor que la de la capa en la misma proporción y por lo tanto podemos considerarla despreciable. Recordemos que no representa la densidad de la totalidad de los electrones sino sólo la de aquellos cuyas energías están por encima de la energía mínima que se considere. Admitiremos que esta energía es de $2 \cdot 10^7 \text{ eV}$ (Bekefi, 1966).

Existen discrepancias acerca del espesor de la capa. Mientras

Reynolds (1976) sugiere que debería ser de 25^{+5}_0 pc, según Zealey y col. (1983) sería de 80 pc. o mayor. Tomaremos el valor intermedio de 0,5 radios dado por Beuermann (1973). De ser así, el espesor de la región emisora en el punto en estudio ($l = 263^\circ$, $b = +7^\circ$) resultaría igual a aproximadamente 154 pc. Con respecto al campo magnético, el trabajo más reciente es el realizado por Vallée y Bignell (1983). En el mismo se llega a que el campo magnético en la capa es de aproximadamente 2μ gauss, superior al de $1,5 \mu$ gauss propuesto por Reynolds (1976), para optimizar el ajuste con el modelo de evolución de remanentes de supernovas desarrollado por Chevalier. Consideramos al primero más confiable por ser el resultado de nuevos datos de medidas de la rotación, determinados a partir de observaciones recientes de la polarización lineal.

Con todos estos datos, para que a 1420 MHz la intensidad de radiación calculada mediante (4) coincida con la observada, la densidad de electrones que intervienen en el proceso debe ser de $5,7 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-3}$. Vemos que un ínfimo porcentaje de electrones altamente relativistas es suficiente para explicar las intensidades observadas.

5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

En este trabajo se han logrado discriminar las contribuciones térmica y sincrotrónica de la emisión de radiofrecuencias provenientes de una región determinada de coordenadas $l = 263^\circ$ y $b = +7^\circ$ en el interior de la nebulosa Gum. Para esta región, Beuermann (1973) construyó un espectro pero sin distinguir la radiación proveniente de la nebulosa de la del resto del cielo. El mismo está basado en "surveys" realizados en años anteriores a 1972, en los cuales la resolución no era suficientemente buena como para distinguir la radiación del objeto en estudio de los fondos galáctico y extragaláctico. En particular, a 1440 MHz, donde según el mapa de Mathewson (1965) la temperatura de brillo es de 0 K, Beuermann le atribuye una intensidad que coincide con la suma de las radiaciones de fondo no térmicas galáctica y extragaláctica en la región del anticentro galáctico (Clark, 1970).

Es importante destacar que la separación entre la emisión térmica y la no térmica requiere necesariamente un conocimiento previo de otros parámetros, como la temperatura cinética de los electrones y la medida de emisión. De no contar con esta información podríamos concluir erróneamente, observando el espectro, que la emisión de la fuente en estudio es esencialmente sincrotrónica, pero obtendríamos un índice espectral menor que el verdadero. Por ejemplo, Mahoney (comunicación privada) graficó los espectros de las fuentes IC443 (3C157) y HB21 presuponiendo que la radiación es puramente no térmica. Por lo tanto, es probable que los índices espectrales correctos sean superiores a los publicados, que son de $0,36 \pm 0,02$ y $0,405 \pm 0,03$ respectivamente. A pesar de ésto, el índice espectral de la zona que estudiamos sigue siendo alto en comparación con los antes mencionados. Es necesario agregar nuevas observaciones y en lo posible a frecuencias mayores que 1420 MHz, para decidir la validez del índice espectral obtenido y del análisis de las distintas formas de emisión que contribuyen al total de la radiación observada.

El interés que presenta esta zona del espectro radica en el hecho de que, por un lado, a poco más de 400 MHz se produce el cruce entre los

fondos extragalácticos térmico y no térmico, y más allá de los 1.000 MHz la radiación reliquia llega a dominar los otros tipos de emisión. Por otro lado, en la nebulosa Gum, a 10 GHz, las radiaciones térmica y no térmica llegan a igualarse, de modo que a frecuencias suficientemente superiores a 10 GHz, el espectro observado debería ser netamente térmico. Se proseguirá con el estudio de regiones más amplias con el objeto de trazar un mapa de índices espectrales y poder determinar de ese modo los mecanismos físicos que dieron origen a las radiofrecuencias detectadas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Dr. W. Föppel y a la Dra. G. Dubner por las estimulantes discusiones sobre temas relativos al presente trabajo.

REFERENCIAS

- Bekefi, G. 1966. "Radiation Processes in Plasmas". John Wiley & Sons.
Beuermann, K.P. 1973. *Astrophysics and Space Science* 20, 27-38.
Clark, T.A.; Brown, L.W. y Alexander, J.K. 1970. *Nature* 228, 847.
Haslam, C.G.T, Kein, U.; Salter, C.J.; Stoffel, H.; Wilson, W.E.; Cleary, M.N.; Cooke, D.J. y Thomasson, P. 1982. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 47
Mathewson, D.S.; Kealey, J.R. y Rome, J.M. 1962. *Australian J. Phys* 15. 354.
Phillips, S.; Kearsley, S.; Osborne, J.L.; Haslam, C.G.T. y STOFFEL H. 1981. *Astron. Astrophys.* 98, 286-294.
Reich, W. 1983. *Naturwissenschaften* 70, 1-6.
Reich, P.; Reich W. 1988. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 74, 7-23.
Reynolds, R.J. 1976. *The Astrophysical Journal* 206, 679-684.
Spitzer, L. Jr. 1968. "Diffuse Matter in Space". Interscience Publ., New York
Vallee, J.P. y Bignell R.C. 1983. *The Astrophysical Journal* 272, 131-136.
Zealey, W.J.; Ninkov, Z., Rice, E.; Hartley, M. y Tritton S.B. 1983. *Astrophysical Letters* 23, 119-131.