

MEDICION DE LA RADIACION SINCROTRON EN LA GALAXIA

Victor Cañon

*Universität Konstanz, Fakultät für Physik
Fach M678, D-78457 Konstanz, Alemania*

y

Sergio Torres

*Centro Internacional de Física
Bogotá, Colombia*

Resumen

Se presenta el trabajo realizado dentro del proyecto GEM, como parte de una colaboración internacional para construir los mapas más precisos de la radiación difusa de la galaxia a la frecuencia de 408 MHz. Se presenta el proceso de generación del mapa de la región del cielo observada por el radiotelescopio GEM en Colombia a esa frecuencia. Se estudia el mecanismo de producción de esa radiación galáctica en términos de lo que se conoce como Radiación Sincrotrón o Magnetobremstrahlung. Se aplican las ecuaciones que relacionan la temperatura observada por la antena y el campo magnético de la Galaxia al mapa producido por el grupo, con el objetivo de encontrar la dependencia del campo magnético con las coordenadas. Se construye un mapa en el que se representa la distribución del campo magnético dentro de la Galaxia, en coordenadas celestes, y se analizan brevemente algunas posibles aplicaciones de estos resultados al estudio de la Dinámica Galáctica.

Abstract

We report on the work done within the GEM Project, an international collaboration organized to build the most precise maps of diffuse Galactic Radiation at the 408 MHz frequency. We illustrate the process of map generation in the sky band observed by GEM Radiotelescope from Colombia at that frequency. We study the mechanism of production of that galactic radiation, in terms of what is known as Synchrotron Radiation or Bremsstrahlung. We apply the equations relating the temperature observed in the antenna and the magnetic field of the galaxy to the map produced by the group, with the purpose of finding the dependence of the magnetic field with respect to the coordinates. We construct a map displaying the distribution of magnetic field in the galaxy, in celestial coordinates, and briefly analyze some possible applications of these results to the study of Galactic dynamics.

1. Introducción

Un mapa de la radiación difusa de la Galaxia a longitudes de onda larga, es una herramienta que permite estudiar su distribución de materia y de campos magnéticos, que son los que finalmente determinan su dinámica global.

Se encuentra una relación entre la distribución de materia en la Galaxia (plasmas, principalmente electrones), y el campo magnético en ella generado. Las componentes principales de la radiación difusa de la Galaxia a las frecuencias de observación del radiotelescopio GEM son la radiación sincrotrón, producida por electrones relativistas en el campo magnético de la Galaxia, la radiación de frenado de los electrones libres por núcleos de hidrógeno (*free-free*), y la radiación térmica del polvo interestelar. Cada una de estas componentes de emisión de radiación galáctica tiene un espectro característico y depende fuertemente de la frecuencia. A la frecuencia de 408 MHz, el mecanismo dominante es el de la radiación sincrotrón, ya que la temperatura de antena correspondiente a la

radiación producida por el segundo mecanismo en importancia, que es el free-free, es menor al 1.5 %.

De acuerdo con lo anterior, se parte del principio de que la radiación observada por el radiotelescopio GEM se comporta como radiación sincrotrón. Partículas cargadas moviéndose en un campo magnético experimentan una aceleración si su movimiento no es paralelo al campo, y por lo tanto deben emitir radiación electromagnética. En el caso no relativista esta radiación es usualmente dipolar, pero cuando las energías son suficientes como para elevar la velocidad de los electrones hasta límites altamente relativistas, la radiación se concentra en un cono muy estrecho dirigido a lo largo de la velocidad instantánea de la partícula.

El espectro de frecuencias de este mecanismo de emisión de radiación se comporta como una ley de potencias:

$$I(\nu) \propto \nu^{-\alpha}, \quad (1)$$

donde $I(\nu)$ es la intensidad de radiación y α es el índice espectral, cuyo valor observado actualmente es $\alpha \simeq 0.75$ [5]. Para el caso de interés en este trabajo, la radiación sincrotrón es generada por electrones relativistas acelerados en el campo magnético de la Galaxia. Observacionalmente se ha encontrado que electrones que alcanzan energías del orden de $\simeq 10^{12}$ eV, emiten radiación sincrotrón al girar en órbitas circulares o helicoidales en el interior de un campo magnético de intensidad $B \simeq 10^{-4}$ Gauss [8]. Esta radiación se encuentra altamente polarizada en la dirección del movimiento de los electrones relativistas. La medición precisa de la radiación sincrotrón permitirá inferir la intensidad del campo magnético a gran escala de la Galaxia, lo cual es una contribución importante para la solución del interrogante acerca de la formación y dinámica de la Galaxia.

2. El Receptor de 408 MHZ

Con el objetivo de producir los mapas más precisos existentes de la emisión difusa de la Galaxia en el rango de longitudes de onda

larga de 408 a 5000 MHz [3] se creó el Proyecto GEM (Galactic Emission Mapping), que es una colaboración internacional conformada por grupos de Astrofísica en Brasil (INPE/CNPq), Colombia (Observatorio Astronómico y Centro Internacional de Física), Italia (CNR), España (IAC) y Estados Unidos (Lawrence Berkeley National Lab/UCB).

GEM utiliza una antena receptora o reflector parabólico de 5.5 m de diámetro colocado sobre una base rotante con montura Alt-Azimuth. Paneles de aluminio aumentan la superficie receptora hasta un diámetro de 9.5 m y sirven como escudo contra la emisión terrestre difractada. El receptor de 408 MHz utiliza como fuente de enfoque primario una hélice invertida que consiste en 9.5 espiras de cobre de 9.6 mm de diámetro. La longitud de la espira es 0.92λ , y el espacio entre ellas es 15.4 cm, siendo la longitud del eje de 148 cm. La antena es sensible a radiación polarizada circularmente.

El radiómetro de 408 MHz es un receptor de potencia total con 2 etapas de amplificación RF y uno DC después de la detección de la señal. Se usaron filtros de cavidad ($\Delta\nu = 28$ MHz) a la entrada del receptor y uno tubular luego de la amplificación.

Los parámetros del receptor a 408 MHz se pueden resumir en la siguiente tabla:

| Parámetro | Valor |
|---------------------------------|---|
| Longitud de onda | 73.529 cm |
| Temperatura del sistema | 104 ± 6 K |
| Ganancia | 58 ± 1 K V^{-1} |
| Ancho de banda | 28 MHz |
| Sensitividad | 26 mK/tiempo de integ. |
| Ancho del haz | (FWHM) = 11.3° ; $\sigma = 4.8^\circ$ |
| Susceptibilidad de la ganancia | $-2.7 \times 10^{-4} \% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ |
| Suscept. de la base de la señal | -3 K $^\circ\text{C}^{-1}$ |

Tabla 1. Parámetros del receptor a 408 MHz.

Durante la primera mitad de 1995, en las localidades de Sutamarchán y Villa de Leyva, Boyacá, el grupo de Astrofísica del

Observatorio Astronómico Nacional y el CIF realizó la toma de datos correspondiente a la recepción de radiación galáctica por un radiotelescopio sensible a 4 frecuencias distintas: 408, 1500, 2300 y 5000 MHz. Esta primera etapa de toma y análisis de datos, de la cual surgió ya una publicación [15], llevó a un conocimiento detallado del funcionamiento de cada uno de los receptores, así como del equipo instrumental utilizado para recoger y procesar cada uno de los datos obtenidos, y por supuesto, de la manera cómo esos datos nos dan información acerca de la radiación proveniente de la Galaxia.

2.1. Análisis de los Datos

Los datos obtenidos por el radiotelescopio GEM no sólo representan las observaciones de la radiación difusa de la Galaxia, sino que además contienen perturbaciones o "ruido" provenientes de la atmósfera, las condiciones climáticas, las interferencias por emisión de radio por parte de emisoras cercanas, satélites artificiales, emisión planetaria, del Sol y de la Luna, etc. Estos datos fueron electrónicamente almacenados en archivos, los cuales contienen cada uno 14 registros individuales correspondientes a la señal obtenida por la antena, así como los voltajes de los sensores de temperatura, el calentador, los circuitos de detección de Interferencia de Radio (RFI) y los datos de tiempo (UT) asociados a la medición, etc.

Los archivos, en condiciones atmosféricas estables, contienen datos tomados durante 2 a 3 horas, con intervalos de 0.56 seg, que es el tiempo de integración de la señal en el receptor. Para cada archivo se establece el tiempo universal (UT) correspondiente a la iniciación de la recepción de datos [15]. De esta manera se pueden analizar los datos de cada archivo y se pueden confrontar los resultados con fenómenos astronómicos o meteorológicos conocidos, como la posición de cuerpos celestes que puedan afectar las mediciones de radiación galáctica, condiciones atmosféricas o el paso de satélites en instantes de tiempo determinados con precisión. Esto

permite realizar algunas restricciones a los archivos, o cortes a los datos para obtener como resultado final la señal más purificada posible. Para la frecuencia de 408 MHz, se realizaron observaciones en Villa de Leyva en el periodo comprendido entre Febrero y Mayo de 1995, lo que se traduce en 1.116 horas de datos a esta frecuencia. Los cortes a los datos consistieron en restricciones a los rangos de los valores de la señal en Voltios, al valor en su derivada, al voltaje de la línea de base, a la cercanía del Sol al haz principal de la antena, y a los valores y distribución de temperaturas en cada uno de los pixeles que constituyen el mapa de radiación de la Galaxia.

El resumen de los cortes realizados y los rangos de restricción de cada uno de los parámetros mencionados se expone en la siguiente tabla:

| |
|--|
| <p> Angulo al Sol $\geq 25^\circ$ $1.5 \leq \text{Valor de la señal (V)} \leq 9.9$ $5 \leq \text{Temperatura de la señal (K)} \leq 500$ Derivada de la señal $\leq 0.04 \text{ V}/0.56\text{s}$ $29.4 \leq T_1 (^{\circ}\text{C}) \leq 30.6$ $29.5 \leq T_2 (^{\circ}\text{C}) \leq 30.7$ $29.4 \leq T_4 (^{\circ}\text{C}) \leq 30.6$ $\chi^2 \leq 150$ </p> |
|--|

Tabla 2. Parámetros de corte.

El resultado final del análisis de estos datos de la radiación galáctica se utiliza, como ya se explicó, para estudiar la física de nuestra Galaxia, y también para sustraerlos a los datos de Radiación Cósmica de Fondo, y entender la física del Universo temprano.

3. Producción del Mapa Galáctico a 408 MHz

Con los datos depurados a través de los valores de los cortes que finalmente se escogieron por el comportamiento estadístico de

las temperaturas observadas por la antena, se procede a obtener el mapa de la radiación difusa de la Galaxia en la frecuencia de 408 MHz. Todos los datos existentes, así como los valores de corte y los parámetros de la antena se incluyeron en un programa de análisis y producción digital de imágenes (mapas).

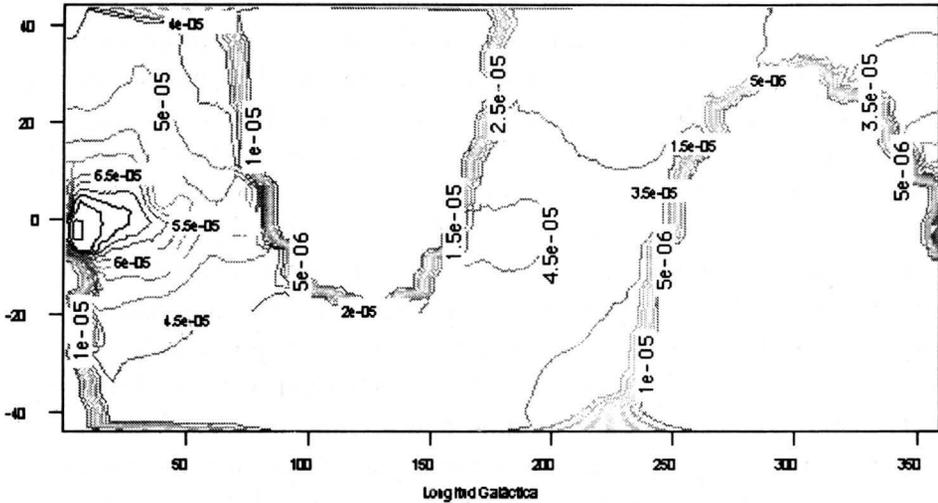


Figura 1. Mapa de contornos de la radiación galáctica a 408 MHz, en coordenadas celestes. Corresponden al mapa nominal obtenido por el grupo.

En la figura 1 se presenta el mapa de la radiación galáctica a 408 MHz, en curvas de nivel, representado en coordenadas celestes (Ascensión Recta y Declinación) obtenido por el grupo.

4. La Radiación Síncrotrón

Es conocido que cargas aceleradas emiten radiación electromagnética. Los ejemplos más sencillos corresponden a radiación debida a densidades de carga macroscópicas y corrientes variables con el tiempo, que son fundamentalmente cargas en movimiento.

Hay, sin embargo, una clase de radiación en la que la fuente consiste en cargas puntuales en movimiento y cuya intensidad y

polarización se puede expresar matemáticamente en términos de las propiedades de la trayectoria y el movimiento de la carga [8].

El origen de las ondas electromagnéticas que se propagan en el espacio proviene de una gran variedad de mecanismos. En la región visible del espectro, los mecanismos dominantes resultan de las transiciones "bound-bound" entre estados discretos atómicos o moleculares, transiciones "free-bound" durante la recombinación, y transiciones "free-free" en el continuo. Si en el último caso, $h\nu \ll kT$, se considera clásico este proceso como Bremsstrahlung generado en la aceleración de electrones viajando alrededor de átomos o iones. De la misma manera se pueden encontrar analogías con las componentes en la región de radio del espectro.

En esta región de radio, hay otros mecanismos de considerable importancia. Cuando un electrón se mueve en el vacío hay un mecanismo que juega un papel extremadamente importante en radioastronomía. Este es el Magnetobremsstrahlung, o radiación sincrotrón. Las partículas cargadas que se mueven en un campo magnético experimentan una aceleración si su movimiento no es paralelo al campo, y por lo tanto, deben emitir radiación electromagnética. Se deduce de la electrodinámica clásica que la radiación sincrotrón debe estar presente bajo esas condiciones.

Cuando la emisión cósmica óptica o de radio tiene las características de la radiación sincrotrón, la determinación de su espectro hace posible calcular la concentración y el espectro de energía de los electrones relativistas en las fuentes de emisión.

Una partícula cargada moviéndose en el vacío emite radiación electromagnética sólo durante una aceleración (si se mueve en un medio, deben tenerse en cuenta también sus propiedades). Si la partícula es no relativista, es decir, $v \ll c$, la radiación es usualmente de naturaleza dipolar. En la presencia de un campo magnético, una partícula no relativista, con carga q y masa m , se mueve a lo largo de una trayectoria helicoidal, siendo la frecuencia circular de su movimiento alrededor del eje de la hélice:

$$\omega_H^{(0)} = \frac{qH}{mc}, \quad (2)$$

donde H es el campo magnético presente. La radiación de este tipo de partículas en movimiento dentro de un campo magnético es llamada "radiación ciclotrón". Si la velocidad de las partículas es cercana a la de la luz, la radiación se concentra en un cono muy estrecho dirigido a lo largo de la línea de movimiento, y la radiación es llamada Sincrotrón.

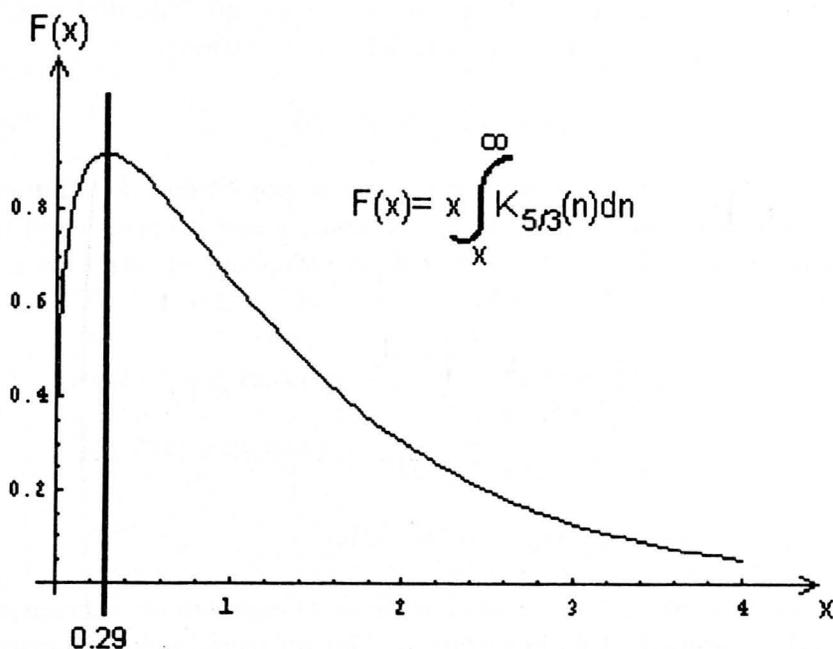


Figura 2. Función matemática de la distribución espectral de la radiación sincrotrón.

La potencia total de la radiación sincrotrón sobre todas las frecuencias en el caso ultrarrelativista es:

$$P(E) = \frac{2e^4 H_{\perp}^2}{3m^2 c^3} \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2. \quad (3)$$

La expresión (3) determina la rata de energía perdida por electrones ultrarrelativistas moviéndose en un campo magnético constante.

La distribución espectral de la radiación total es:

$$p(\nu) = \frac{\sqrt{3}e^3 H_{\perp}}{mc^2} \frac{\nu}{\nu_c} \int_{\nu/\nu_c}^{\infty} K_{5/3}(\eta) d\eta. \quad (4)$$

La gráfica de la función $F(x) = x \int_x^{\infty} K_{5/3}(\eta) d\eta$ se muestra en la Figura 2.

El espectro de energía de los electrones a lo largo de la línea de vista se aproxima, dentro de los límites de un intervalo de energías $E_1 \leq E \leq E_2$, por una ley de potencias de la forma:

$$N(E) dE = K E^{-\gamma} dE, \quad (5)$$

donde $N(E)dE$ es el número de electrones por unidad de volumen, con direcciones de movimiento arbitrarias, y con energías en el intervalo $E, E + dE$. La intensidad de la radiación, en este caso es:

$$\begin{aligned} I_{\nu} &= a(\gamma) \frac{e^3}{mc^2} \left(\frac{3e}{4\pi m^3 c^5} \right)^{(\gamma-1)/2} H^{(\gamma+1/2)} K L \nu^{-(\gamma-1)/2} \\ &= 1.35 \times 10^{-22} a(\gamma) L K H^{(\gamma+1)/2} \left(\frac{6.26 \times 10^{18}}{\nu} \right)^{(\gamma-1)/2} \\ &\quad \times \text{erg seg}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sterad}^{-1} \text{Hz}^{-1}. \end{aligned}$$

En esta expresión, K es el coeficiente en el espectro de la ecuación (5) por unidad de volumen; $H^{(\gamma+1)/2}$ en un cierto valor promedio de esta cantidad en la región radiante; y $a(\gamma)$ es un coeficiente que depende del exponente γ en el espectro de energías, que para $\gamma = 2.5$ es $a(\gamma) = 0.0831$.

De las expresiones anteriores se deduce que para la ley de potencias en el espectro de energías de las partículas radiantes con exponente γ , corresponde una ley de potencias para el espectro de frecuencias de la radiación [5]. Esto es:

$$I_{\nu} \sim \nu^{-\alpha}, \quad (6)$$

con

$$\alpha = \frac{\gamma - 1}{2}.$$

La intensidad de radiación que llega a un observador lejano, debe ser interpretada en términos de las variables y parámetros que se utilicen para medirla. En el caso de un radiotelescopio, la magnitud que realmente se quiere observar de una región en el cielo, y en particular para el radiotelescopio utilizado en el proyecto GEM en una región ocupada por la Galaxia, es su Temperatura. La relación entre la Intensidad de radiación emitida por una fuente galáctica y la Temperatura observada por una antena está dada por:

$$T_b = \frac{c^2}{2k\nu^2} I_\nu, \quad (7)$$

donde c es la velocidad de la luz medida en cm/s, k es la constante de Boltzmann que tiene un valor de $k = 1.38 \times 10^{-16}$ erg/K, y ν es la frecuencia del espectro en que mide la antena, en Hz.

La temperatura observada por la antena viene expresada entonces, en general como:

$$T_b = \frac{1.35 \times 10^{-22} a(\gamma) L K c^2 (6.26 \times 10^{18})^{(\gamma-1)/2} H^{(\gamma+1)/2}}{2k} \nu^{-(\gamma+3)/2}. \quad (8)$$

De acuerdo con las ecuaciones (7) y (8), los parámetros de los que depende la magnitud del campo magnético intergaláctico son: la frecuencia de observación en el espectro electromagnético, la distribución energética y numérica de los electrones en la región emisora de la radiación, y la profundidad del camino óptico a lo largo de la línea de visión desde la fuente hasta el observador, de la siguiente manera:

$$H = \left(\frac{2kT_b\nu^{(\gamma+3)/2}}{1.35 \times 10^{-22} a(\gamma) L K c^2 (6.26 \times 10^{18})^{(\gamma-1)/2}} \right)^{2/(\gamma+1)} \text{ Gauss}. \quad (9)$$

De estas ecuaciones se puede apreciar, al igual que en (6), que las dependencias con la frecuencia de la Temperatura observada y la magnitud del campo magnético tienen la forma de una ley de potencias. Si se define $\beta = (\gamma + 3)/2$, llamado índice espectral de la radiación, la Temperatura tiene una dependencia $T_b \sim \nu^{-\beta}$ con la frecuencia.

De estos parámetros, y con valores conocidos de la Temperatura observada por el radiotelescopio GEM, y expresados en el mapa de temperaturas a 408MHz, mostrado en el capítulo anterior, se obtiene una dependencia del campo magnético galáctico con las coordenadas espaciales galácticas.

5. Medición del Campo Magnético Galáctico

De acuerdo con las ecuaciones obtenidas para la relación entre la Intensidad de radiación, Temperatura observada por un radiotelescopio, frecuencia del espectro de radiación y magnitud del campo magnético galáctico, se obtiene una dependencia de éste último en términos de las coordenadas espaciales observadas en un mapa galáctico.

Es importante recordar en este punto del trabajo, que los datos aquí obtenidos corresponden a las temperaturas observadas por el radiotelescopio del proyecto GEM en Colombia. Que el rango de cobertura de la antena en nuestro país corresponde apenas a una fracción del mapa total del cielo, y como tal debe tenerse en cuenta que los resultados deben compararse con las demás porciones del mapa, y también podrán ser corroborados dentro de un estudio global de la radiación sincrotrón en la Galaxia.

Cada uno de los parámetros necesarios para obtener la magnitud del campo magnético galáctico ha sido medido y observado por métodos diferentes y a partir de teorías distintas. Cada uno de ellos proviene de un estudio independiente de las propiedades y características de la dinámica de la Galaxia. Sin embargo, en este trabajo, y debido principalmente a las dificultades que se presentan al tratar de medir magnitudes en términos de parámetros con

incertidumbres muy grandes, no se intenta poner una cota al valor “promedio” del campo magnético global. En lugar de determinar con precisión la magnitud, es interesante determinar su distribución espacial dentro del disco galáctico, visto desde la Tierra.

5.1. Parámetros Observacionales

El mapa de campo magnético se obtiene directamente a partir del “mapa de temperaturas”, en las que a la temperatura de cada pixel original, se le aplica la ecuación (10), utilizando los siguientes valores para los parámetros que en ella aparecen.

El primer parámetro que se debe definir, por ser el que proviene de las características del receptor, es la frecuencia en la cual se está midiendo la radiación galáctica. La frecuencia utilizada en este trabajo es 408 ± 28 MHz. El error se debe al ancho de banda del haz de la antena a esa frecuencia. El segundo parámetro, proveniente de la relación entre la densidad de electrones y la energía en la fuente emisora de radiación, es el valor K , correspondiente al coeficiente del espectro energético por unidad de volumen. Este es un parámetro observacional para el cual no hay datos muy precisos. Para el propósito de este trabajo, se toma un valor aproximado de $K \simeq 1 \times 10^{-15} \text{ erg}\gamma^{-1} \text{ cm}^{-3}$. Ya que en los artículos en los que se define este valor, sólo se pretende hallar un campo magnético promedio, y por lo tanto no se dan errores en las magnitudes, el error porcentual tomado para este parámetro se tomará como el máximo error porcentual hallado en los demás parámetros.

El valor observado para el coeficiente $a(\gamma)$, que depende del valor de γ , es $a(\gamma) = 0.0831 \pm 0.002$, con base en el valor $\gamma = 2.5 \pm 0.02$, y las discrepancias encontradas entre los valores obtenidos analíticamente y los que se encuentran en las tablas.

El valor más importante en términos de la dependencia espacial del campo magnético, es la profundidad L a lo largo de la línea de vista, o profundidad del “camino óptico”. En los artículos generalmente se da un valor promedio de la longitud de la línea de vista, por lo que no se puede tener una idea precisa de la distribución o

la estructura galáctica [12]. Ese valor es del orden de $L \simeq 10$ Kpc, donde $1 \text{ pc} = 3.084 \times 10^{18} \text{ cm}$. Para determinar la magnitud del campo magnético dentro de un mapa pixelizado, la mayor precisión se tendría al conocer esa profundidad “óptica” para cada pixel. Para ello se debe tener un modelo de la estructura geométrica de la Galaxia. Ya que esos modelos no se han propuesto dentro del estudio del campo magnético galáctico, se formuló uno aproximado de la distribución de materia a lo largo de la línea de vista, en longitud galáctica.

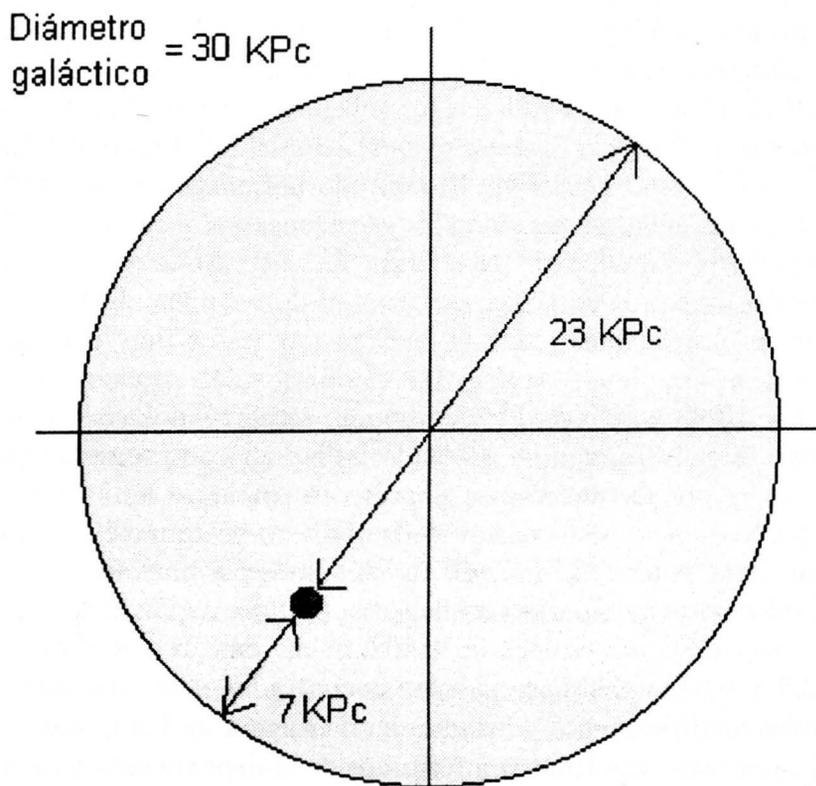


Figura 3. Esquema de distribución de la longitud de camino óptico, a lo largo de la visual, en un sencillo modelo galáctico.

Se propone un modelo en el que la Galaxia está conformada, en longitud galáctica, por un disco de unos 15 kpc de radio, y aproximadamente 1 kpc de espesor [2]. Se ubica al Sistema Solar dentro del disco galáctico, a una distancia aproximada de 8 kpc del centro. La escala de longitud galáctica comienza y termina en el punto en que la distancia al borde, desde la Tierra, es de 23 kpc (15 kpc+8 kpc). El centro galáctico se ubica justamente en esa posición. La línea de vista se dirige hacia el punto más cercano del borde galáctico, es decir a 7 kpc, cuando la longitud galáctica es de 180° (Figura 3).

De esta manera, al tomar valores de L , se tiene una dispersión del mismo orden de magnitud. Se escoge como dato del parámetro $L = (15 \pm 8)$ kpc, aunque está claro que la magnitud utilizada depende del valor de la longitud galáctica, y varía entre 7 kpc y 23 kpc. Sin embargo, a falta de un error observacional, se tiene un error proveniente del modelo formulado. A cada pixel se le asignan tres datos: un valor de campo magnético, y dos de posición, que son los de longitud y latitud galácticas. Este modelo bastante sencillo de la distribución de materia en la Galaxia permite estudiar la dependencia del campo magnético con la latitud galáctica con más confianza que tomando un valor promedio de la longitud de la línea de vista.

Por último, un dato que no aparece directamente en las ecuaciones de Intensidad de radiación, Temperatura y campo magnético, sino que está implícito en el mecanismo de observación es el ángulo sólido a lo largo de la visual. Ya que la intensidad de campo magnético observada no puede depender del nivel de pixelización utilizado al producir el mapa de radiación galáctico, el ángulo sólido que se debe tener en cuenta es el generado por el receptor de la antena al realizar las mediciones de temperatura del cielo. Uno de los parámetros del receptor a 408 MHz tiene que ver con el ángulo sólido que abarca al observar el cielo. Este valor es $d\Omega = 0.039 \pm 0.001$ sterad.

La magnitud promedio del campo magnético obtenida con estos parámetros observacionales a partir del esquema de pixelización uti-

lizado para producir el mapa de radiación difusa de la Galaxia a 408 MHz, es $H = (4.5 \pm 3) \times 10^{-5}$ Gauss. La incertidumbre es bastante grande en términos de magnitudes, pero debe tenerse en cuenta que a partir de los valores observacionales de cada uno de los parámetros no es posible hallar un valor muy preciso del campo magnético galáctico. El valor obtenido se encuentra un orden de magnitud mayor que el valor promedio observado de $H \simeq 3 \sim 6 \mu\text{G}$, en el centro galáctico [2], aunque hay teorías que explican la formación de estructura espiral en la Galaxia, requiriendo campos de intensidades más altas. Incluso se han observado muy altos campos magnéticos en el centro de la Galaxia, del orden de $\sim 0.3 \text{ mG}$, en regiones bien localizadas [17].

Por las razones anteriormente mencionadas, la importancia de este procedimiento para hallar el campo magnético y su distribución dentro de la estructura galáctica radica en obtener la dependencia de su magnitud en términos de la Latitud galáctica. Ver Figura 4.

Si se tiene en cuenta un factor de escala, y luego de completar el mapa de radiación a 408 MHz, con las observaciones realizadas en otras latitudes terrestres, la estructura independiente de la magnitud, se puede ajustar con la curva gaussiana:

$$H = 4.25 \times 10^{-5} + 1.43 \times 10^{-5} \exp \left[- \left(\frac{b - 0.204}{12.62} \right)^2 \right]. \quad (10)$$

Se observa la simetría respecto al centro galáctico, y lo más importante es su intensidad aún lejos del disco galáctico. Esto implica que las componentes de la radiación galáctica no se pueden limitar al disco o a una región cercana a él. La consecuencia más importante que se puede derivar de este resultado es que las observaciones de la Radiación Cósmica de Fondo tienen interferencia aún en puntos alejados del disco galáctico, y por lo tanto no es suficiente emplear el método de cortar una franja del mapa obtenido por experimentos como el COBE, pues además de perder ortogonalidad al tratar de hallar el cuadrupolo cosmológico, se elimina una parte importante de la "contaminación" galáctica, pero no su totalidad.

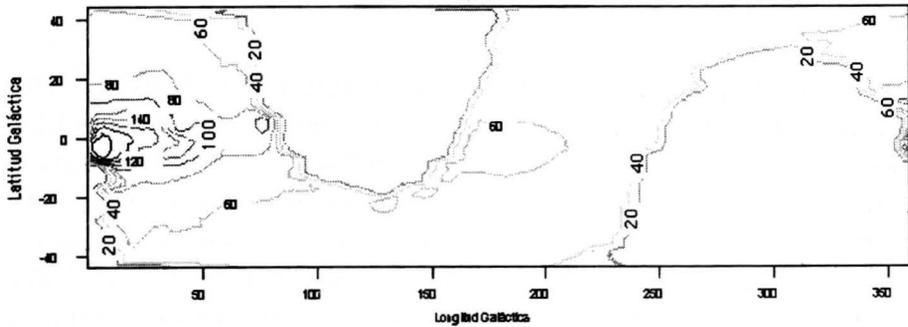


Figura 4. Dependencia de la magnitud del Campo Magnético Galáctico con las coordenadas. En este caso, con la Latitud Galáctica.

La distribución del campo magnético obtenida a través del método de aplicación de las ecuaciones en un esquema de pixelización, puede ser representada también en un mapa de curvas de nivel en los dos tipos de coordenadas utilizados (Figura 5).

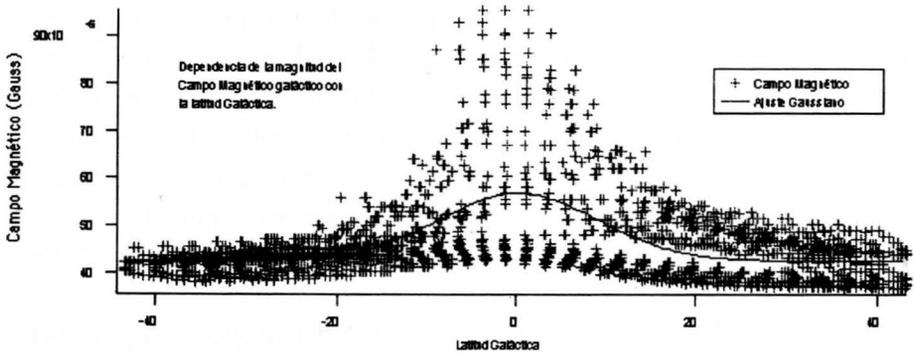


Figura 5. Mapa de contornos de la Intensidad de Campo Magnético Galáctico en coordenadas celestes, a partir de las observaciones a 408 MHz.

6. Resultados

Se produjo un mapa de la radiación difusa de la Galaxia en la frecuencia de 408 MHz, con base en datos radiométricos obtenidos por el grupo GEM en Colombia, liderado por el Dr. Sergio Torres, durante el tiempo que el radiotelescopio se encontró en la zona de Villa de Leyva (Boyacá). El autor de este artículo participó en todas las etapas del proyecto, desde la recolección de datos en Villa de Leyva, su análisis y depuración, hasta la producción del mapa nominal a 408 MHz.

Se formuló un modelo simple de distribución de materia en el disco galáctico, a partir del cual se encontró una dependencia de la Intensidad del Campo Magnético generado en la misma Galaxia con la latitud galáctica. Se encontraron discrepancias entre los valores promedios del campo, teóricos y observacionales, debido en gran medida a la alta incertidumbre proveniente de los parámetros observacionales que deben ser incluidos en las ecuaciones. Sin embargo, si se tiene en cuenta que estos parámetros serán aplicados a una imagen digitalizada de la Temperatura de la Galaxia, y exceptuando la profundidad del camino óptico, afectan prácticamente de manera uniforme a cada uno de los pixeles del mapa, la dependencia con la latitud sólo se relaciona, a través de un factor de escala, con la distribución del campo magnético y no con su magnitud.

Se encontró una distribución del campo magnético en la Galaxia, presentada como mapas en coordenadas celestes y galácticas, que tienen una correlación bastante alta con los mapas de radiación sincrotrón a 408 MHz.

La importancia de este trabajo, dentro del proyecto de investigación del grupo GEM, consiste en la generación del único mapa de cubrimiento total del cielo a diferentes frecuencias de observación, y con el mismo receptor ubicado sobre diferentes latitudes terrestres. De esta manera, los datos aquí obtenidos deben ser complementados con cada una de las "franjas" en coordenadas celestes que conforman el mapa total. Una vez se tengan los datos en otras frecuencias de observación, se puede realizar un estudio de la de-

pendencia del campo magnético con la frecuencia, y cómo se ve afectado por la estimación del índice espectral entre ellas. Así, una posible extrapolación a las frecuencias en que se observó la Radiación Cósmica de Fondo permitirá despejar sus resultados de las interferencias causadas por la radiación galáctica, aun a latitudes altas.

Algunas aplicaciones directas a la dinámica de la Galaxia se pueden realizar a partir de un modelo muy preciso de la radiación y el campo magnético galácticos, tanto en el estudio de la formación de estructuras espirales por efectos magnetohidrodinámicos [2], como en la manera en que el campo magnético puede actuar como un lente que desvía los electrones o núcleos altamente energéticos dentro del disco galáctico, o el estudio de la distribución de campos magnéticos extragalácticos y su incidencia en la posible existencia de campos magnéticos primigenios [11].

Referencias

1. R. A. Alpher and R. Hermann, *Nature*, **162**, 774 (1948).
2. J. J. Binney and S. Tremaine, *Galactic Dynamics* (Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1987).
3. g. De Amici *et al.*, *Astrophys. & Space Science*, **240**, 151 (1994).
4. V. Giamberardino, *Teoría de los errores* (Reverté, Caracas, 1975)
5. V. L. Ginzburg and S. I. Syrovatskii, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **3**, 297 (1965).
6. C. G. T. Haslam *et al.*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **47**, 1 (1982).
7. B. Hoeneissen *et al.*, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **28**, 191 (1992).

8. J. D. Jackson, *Electrodinámica Clásica* (Alhambra, Madrid, 1966).
9. E. W. Kolb and M. S. Turner, *The Early Universe* (Addison-Wesley, Menlo Park, 1990).
10. K. D. Lawson *et al.*, *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* **225**, 307 (1987).
11. S. Lee, A. Olinto and G. Sigl, *Extragalactic magnetic field and the highest energy cosmic rays*, Fermilab preprint (1995).
12. D. Mihalas and J. J. Binney, *Galactic Astronomy*, 2nd ed. (Freeman, San Francisco, 1981).
13. A. A. Penzias and R. W. Wilson, *Ap. J.* **142**, 419 (1965).
14. G. F. Smooth *et al.* *Ap. J.* **396**, L1 (1992).
15. S. Torres *et al.*, *Astrophys & Space Science* **240**, 225 (1996).
16. S. Torres *et al.*, *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.* (Plenum Press, New York, 1989), pp. 319-333.
17. K. Uchida and R. Guesten, *The large-scale magnetic field in the Galactic Center*, *Astron. & Astrophys.* **298**, 473 (1995).