

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA E MATEMÁTICA APLICADA

**DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE ESPECTRAL DA
EMISSÃO SÍNCROTRON DA GALÁXIA ENTRE
408 MHz E 23 GHz**

Márcia Regina Guimarães Guedes

Orientador: Prof. Newton de Figueiredo Filho

ITAJUBÁ – MG
FEVEREIRO DE 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA E MATEMÁTICA APLICADA

**DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE ESPECTRAL DA
EMISSÃO SÍNCROTRON DA GALÁXIA ENTRE
408 MHz E 23 GHz**

Márcia Regina Guimarães Guedes

Orientador: Prof. Newton de Figueiredo Filho

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Física e Matemática
Aplicada como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em
Física e Matemática Aplicada

ITAJUBÁ – MG
FEVEREIRO DE 2009

'But I still haven't found what I'm looking for...'

Aos meus pais

Pedro Márcio Guedes (in memoria)

e Maria Regina Guimarães Guedes.

Meus irmãos Márcio e Leandro.

E aos meus quatro amores Pedro Henrique, João Pedro, Ana Beatriz e Letícia.

Agradecimentos

Ao Newton, meu orientador, principal responsável por essa conquista, obrigada pela paciência, pelos incentivos e principalmente pela amizade construída ao longo de todos esses anos.

À minha família pelo apoio, meus irmãos queridos e em especial à minha mãe que esteve sempre ao meu lado.

Aos amigos e colegas do mestrado, Cris, Grasi, Dexter, Diogo, Guilherme, Keeyne, Ana Paula, Sinval, Sebastião, Elcio, Miriam, Elaine, Baltazar, Miralvo, Vítor, Dante, Felipe, Carlos, Fernando, Roberto, Juarez, Ana Lúcia, Thiago, Dayvidson, Zaqueu e a Ju. Obrigada pelo bons e maus momentos ‘pessoas’. E em especial aos amigos do microondas Adhimar e Vanessa, só nós sabemos o que passamos, obrigada por tudo gente e ‘tio Flávius’ obrigada por todos os galhos quebrados.

A todos os professores do mestrado em Física e Matemática Aplicada em especial aos professores Baeta, Renato, Wilton, Newton e Agenor que muito contribuíram para essa conquista.

Ao pessoal do INPE, Thyrsó, Ivan e Alex, pela grande contribuição para o desenvolvimento desse trabalho.

À CAPES pelo suporte financeiro durante dois anos do curso.

Aos funcionários do ICE, pelas impressões e os cafezinhos na cozinha.

À república do quadrado, meninas vocês foram muito importantes nessa conquista.

A todos os que torceram por mim, que me apoiaram que de alguma forma contribuíram para essa realização.

E principalmente ao meu Bom Deus, que não me abandona nunca. Obrigada Senhor.

Resumo

Entender a variação espectral e espacial da emissão rádio da Galáxia é essencial não só para se compreender a astrofísica do meio interestelar, como também para permitir separar o sinal galáctico do sinal da radiação cósmica de fundo em microondas (RCFM), uma vez que a emissão galáctica é a principal fonte de contaminação nas medidas da RCFM. Em frequências inferiores a 30 GHz a emissão galáctica é dominada pela emissão síncrotron devida à interação de elétrons relativísticos com o campo magnético da Galáxia. Neste trabalho analisamos os dados obtidos com o radiotelescópio GEM (Galactic Emission Mapping), na frequência de 2300 MHz entre as declinações $\delta = -53^\circ$ e $\delta = +35^\circ$, o que corresponde a uma cobertura de 69% do céu. A partir dos dados do GEM em 2300 MHz, juntamente com os mapas de emissão galáctica de Haslam em 408 MHz e WMAP em 23 GHz, determinamos o índice espectral pixel a pixel. Entre as frequências de 408 MHz e 2300 MHz obtivemos um índice espectral médio $\bar{\beta} = -2,97 \pm 0,16$, compatível com os valores encontrados na literatura para frequências similares, e entre 2300 MHz e 23 GHz encontramos $\bar{\beta} = -3,45 \pm 0,38$. A análise feita nos mapas de índice espectral produzidos nos permitiu concluir que no Plano Galáctico o índice espectral médio é menos inclinado do que fora dele, tanto para o índice calculado entre os mapas de Haslam e GEM como para os mapas do GEM e WMAP, indicando que na região do Plano Galáctico os elétrons devem escapar da Galáxia antes de perder parte da sua energia, enquanto que fora do Plano Galáctico os elétrons perdem energia em uma taxa muito alta, permanecendo no halo da Galáxia. A partir dos mapas de índice espectral foi possível calcular a intensidade da emissão síncrotron pixel a pixel numa frequência qualquer, o que nos permitiu produzir *templates* da emissão galáctica nas frequências de 1465 MHz, 5 GHz e 10 GHz.

Abstract

It is important to understand the spectral variation of the galactic radio emission to better understand the Astrophysics of the interstellar medium. It is also important to know how to separate the galactic signal from the signal of the Cosmic Microwave Background radiation (CMB), since the galactic emission is the main source of contamination of CMB measurements. In frequencies below 30 GHz, the galactic emission is dominated by synchrotron emission due to the interaction of relativistic electrons with the magnetic field of the Galaxy. The objective of this work is to analyze data from the radiotelescope GEM (Galactic Emission Mapping) at 2300 MHz between $\delta = -53^\circ$ and $\delta = +35^\circ$, which correspond to 69% of sky coverage. From these data and the maps of Haslam at 408 MHz and WMAP at 23 GHz, we found the spectral index of the synchrotron emission pixel to pixel. We have found an average spectral index $\bar{\beta} = -2,97 \pm 0,16$ between 408 MHz and 2300 MHz, which is compatible with the results found in the literature, while for frequencies between 2300 MHz and 23 GHz we have found $\bar{\beta} = -3,45 \pm 0,38$. The analysis of the spectral index maps allowed us to conclude that in the Galactic Plane the spectral index is less inclined than outside the plane, which shows that on the Galactic Plane the electrons escape from the Galaxy before losing energy, while outside the plane the electrons lose energy at a high rate, thus being unable to escape the Galaxy. The spectral index maps also allowed us to calculate the intensity of the synchrotron emission pixel to pixel at any frequency, from which we have produced templates of the galactic emission at 1465 MHz, 5 GHz and 10 GHz.

Conteúdo

Resumo	IV
Lista de Figuras	VII
Lista de Tabelas	XII
1 Introdução	1
2 Emissão Galáctica	2
2.1 Emissão Síncrotron	3
2.2 Emissão Livre-Livre	8
2.3 Emissão Térmica de Poeira	9
2.4 Mapeamento da Emissão Galáctica	11
3 Projeto GEM	16
4 Determinação do índice espectral	22
4.1 HEALPix	22
4.2 Máscaras de Foreground	24
4.3 Cálculo do Índice Espectral	27
4.4 Índice espectral em múltiplas frequências	35
5 Resultados	39
5.1 Haslam 408 MHz e GEM 2300 MHz	39
5.2 GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz	47
5.3 Múltiplas frequências	55

6	Conclusão	66
	Referências Bibliográficas	69

Lista de Figuras

2.1	Espectro da emissão galáctica e da radiação cósmica de fundo em microondas.	2
2.2	Movimento helicoidal de uma partícula carregada em um campo magnético uniforme.	4
2.3	Distribuição angular da radiação emitida por uma partícula com aceleração perpendicular à velocidade.	5
2.4	Cones de emissão em dois pontos da trajetória da partícula acelerada. . . .	6
2.5	Perfil do pulso da radiação síncrotron.	7
2.6	Espectro de emissão térmica da poeira para $T \approx 29K$	10
2.7	Mapa da Galáxia em 408 MHz.	12
3.1	Fotografia do radiotelescópio GEM instalado no sítio de Cachoeira Paulista.	17
3.2	Técnica de varredura empregada no projeto GEM.	18
3.3	Mapa de emissão total em 408 MHz	19
3.4	Mapa de emissão total em 1465 MHz	20
3.5	Mapa de emissão total em 2300 MHz	20
3.6	Mapa de intensidade linearmente polarizada em 5 GHz.	21
3.7	Mapa do GEM 2300 MHz em coordenadas equatoriais.	21
4.1	Divisão da esfera em <i>pixels</i> no formato <i>HEALpix</i>	23
4.2	Esquema RING de <i>pixelização</i> para $N_{side} = 2$ em projeção cilíndrica.	24
4.3	Esquema NESTED de <i>pixelização</i> para $N_{side} = 2$ em projeção cilíndrica. . . .	24
4.4	Histograma da distribuição de brilho dos <i>pixels</i> em relação ao valor médio.	26
4.5	Máscara Kp0.	27
4.6	Máscaras produzidas a partir dos cortes realizados no histograma.	27
4.7	Mapa GEM em 2300 MHz em coordenadas galácticas.	29

4.8	Mapa de Haslam em 408 MHz em coordenadas galácticas.	29
4.9	Mapa WMAP 23 GHz em coordenadas galácticas.	30
4.10	Máscara elaborada a partir do mapa de 2300 MHz, para garantir que sejam utilizados somente valores das regiões observadas pelo GEM.	30
4.11	Mapa de Haslam em 408 MHz com aplicação da máscara elaborada a partir do Mapa do GEM em 2300 MHz.	31
4.12	Mapa do WMAP em 23 GHz com aplicação da máscara elaborada a partir do Mapa do GEM em 2300 MHz.	31
4.13	Fluxograma da rotina desenvolvida.	34
4.14	Mapa de temperatura simulado na frequência de 1465 MHz.	37
4.15	Mapa de temperatura simulado na frequência de 5 GHz.	37
4.16	Mapa de temperatura simulado na frequência de 10 GHz.	38
5.1	Mapa do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz.	41
5.2	Mapa de incerteza do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz.	41
5.3	Histograma do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz.	42
5.4	Mapa do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.	43
5.5	Mapa do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.	43
5.6	Mapa do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.	44
5.7	Mapa do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.	44

5.8	Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.	45
5.9	Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.	45
5.10	Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.	46
5.11	Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.	46
5.12	Mapa do índice espectral calculado com os dados do GEM em 2300 MHz e WMAP 23 GHz.	48
5.13	Mapa de incerteza do índice espectral calculado com os dados do GEM em 2300 MHz e WMAP 23 GHz.	49
5.14	Histograma do índice espectral calculado com os dados do GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz.	49
5.15	Mapa do índice espectral calculado com os dados do GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.	50
5.16	Mapa do índice espectral calculado com os dados do GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.	50
5.17	Mapa do índice espectral calculado com os dados do GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.	51
5.18	Mapa do índice espectral calculado com os dados do GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.	51

5.19	Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados do GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.	52
5.20	Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados do GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.	52
5.21	Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados do GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.	53
5.22	Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.	53
5.23	Comportamento do índice espectral calculado com os dados de Haslam 408 MHz e GEM 2300 MHz e GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz.	54
5.24	Mapa do índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados.	55
5.25	Mapa de incerteza do índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados.	56
5.26	Histograma do índice espectral dos mapas simulados.	56
5.27	Mapa do índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.	57
5.28	Mapa do índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.	57
5.29	Mapa do índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.	58
5.30	Mapa do índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.	58
5.31	Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.	59

5.32	Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.	59
5.33	Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.	60
5.34	Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.	60
5.35	Índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados.	63
5.36	Índice espectral para $b = 45^\circ$	63
5.37	Índice espectral para $b = 0^\circ$	64
5.38	Índice espectral para $b = -45^\circ$	64
5.39	GEM em 2300 MHz sem o plano da Galáxia.	65
5.40	Temperatura do GEM em 2300 MHz para $b = 45^\circ$ e $b = -45^\circ$	65

Lista de Tabelas

3.1	Campanhas de observações da emissão Galáctica com os receptores de intensidade total do projeto GEM	19
4.1	Porcentagem de <i>pixels</i> cortados.	26
5.1	Índice espectral médio calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz.	40
5.2	Índice espectral médio calculado com os dados do GEM em 2300 MHz e WMAP em 23 GHz.	47
5.3	Índice espectral médio calculado com os dados dos mapas simulados.	61
5.4	Índice espectral das regiões analisadas.	62

Capítulo 1

Introdução

A emissão galáctica é a principal fonte de contaminação da Radiação Cósmica de Fundo em Microondas (RCFM). Entender a variação espacial e espectral da emissão galáctica é essencial não só para a compreensão da astrofísica do meio interestelar como também para permitir a separação do sinal galáctico do sinal da RCFM.

Esta dissertação tem por objetivo estudar o índice espectral da emissão difusa da Galáxia nas frequências de operação do radiotelescópio GEM (*Galactic Emission Mapping*) e produzir *templates* do índice espectral da emissão síncrotron galáctica na forma de mapas em coordenadas galácticas, a partir de mapas de emissão total que já foram e também que ainda serão produzidos pelas observações do radiotelescópio GEM.

No Capítulo 2 fazemos uma descrição teórica dos constituintes da emissão galáctica, sendo eles emissão síncrotron, emissão livre-livre e emissão térmica de poeira; bem como uma descrição de estudos que têm sido feitos com relação ao mapeamento da emissão galáctica. No Capítulo 3 descrevemos o projeto GEM, seus objetivos e estratégia de varredura.

No Capítulo 4 apresentamos a descrição das rotinas elaboradas para a produção dos *templates* do índice espectral calculado a partir de dados nas frequências de 408 MHz, 2300 MHz e 23 GHz e, posteriormente, uma rotina elaborada para calcular o índice espectral nas cinco frequências de operação do projeto GEM.

Os resultados obtidos juntamente com as análises são apresentados no Capítulo 5. E as conclusões obtidas se encontram no Capítulo 6.

Capítulo 2

Emissão Galáctica

A emissão difusa da Galáxia é devida a três processos principais: emissão síncrotron, emissão livre-livre e emissão térmica da poeira, sendo dominada pela emissão síncrotron em baixas frequências ($\nu < 30$ GHz) e pela emissão da poeira em altas frequências ($\nu > 60$ GHz), como mostra a Figura 2.1 (Smoot 1999).

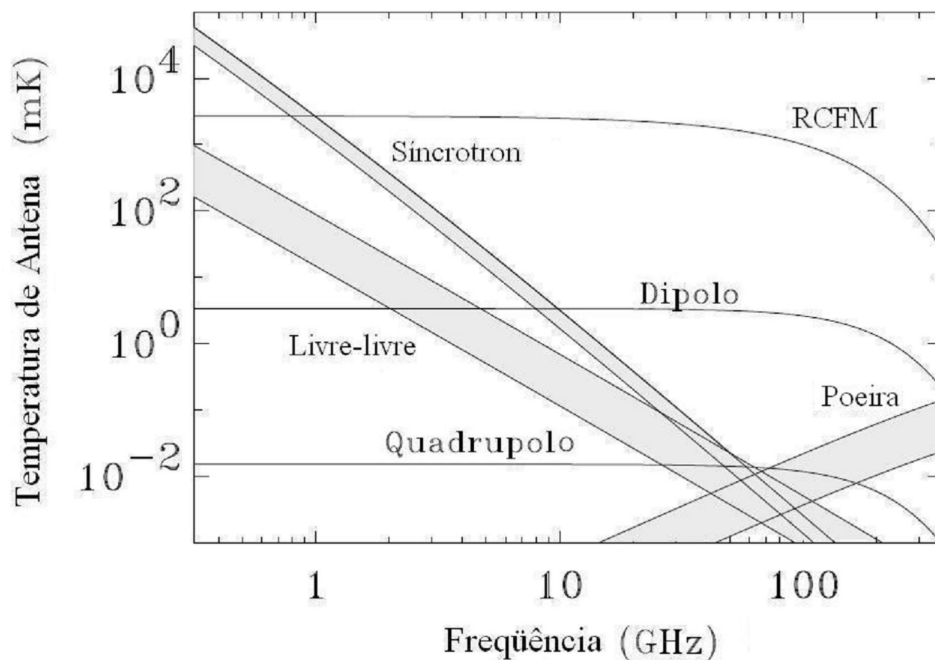


Figura 2.1: Espectro da emissão galáctica (síncrotron, livre-livre e poeira) e da radiação cósmica de fundo em microondas (RCFM, Dipolo e Quadrupolo).

Fonte:Adaptado de Smoot (1999)

2.1 Emissão Síncrotron

Partículas aceleradas por um campo magnético B emitem radiação eletromagnética. Para velocidades não relativísticas a descrição da radiação, chamada radiação cíclotron, é bastante simples, pois a frequência de emissão é igual à frequência de rotação da partícula no campo magnético. Entretanto, para partículas extremamente relativísticas, o espectro é muito mais complexo e pode se estender a muitas vezes a frequência de rotação. Essa radiação é conhecida como emissão síncrotron (Rybicki e Lightman, 1979).

O movimento de uma partícula de massa m e carga q em um campo magnético para o caso relativístico é dado por:

$$\frac{d}{dt}(\gamma m \mathbf{v}) = \frac{q}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2.1)$$

$$\frac{d}{dt}(\gamma m c^2) = q \mathbf{v} \cdot \mathbf{E} = 0. \quad (2.2)$$

Nessas equações t é o tempo, γ é o fator de Lorentz, $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, \mathbf{v} é a velocidade, \mathbf{B} é o vetor campo magnético e \mathbf{E} o vetor campo elétrico.

A Equação 2.2 implica que $\gamma = \text{constante}$ e, conseqüentemente, $|\mathbf{v}| = \text{constante}$. Portanto, a Equação 2.1 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$m\gamma \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{q}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2.3)$$

Separando a velocidade em suas componentes paralela ao campo magnético, \mathbf{v}_{\parallel} , e perpendicular a ele, \mathbf{v}_{\perp} , temos:

$$\frac{d\mathbf{v}_{\parallel}}{dt} = 0, \quad (2.4)$$

$$\frac{d\mathbf{v}_{\perp}}{dt} = \frac{q}{\gamma m c} \mathbf{v}_{\perp} \times \mathbf{B}. \quad (2.5)$$

A Equação 2.4 implica que $\mathbf{v}_{\parallel} = \text{constante}$. Como $|\mathbf{v}| = \text{constante}$, então $|\mathbf{v}_{\perp}| = \text{constante}$. A solução da Equação 2.5 descreve o movimento circular uniforme da partícula projetado no plano normal ao campo magnético, uma vez que a aceleração no plano é

perpendicular à velocidade e tem magnitude constante. A combinação desse movimento circular com o movimento uniforme ao longo do campo é um movimento helicoidal da partícula (Figura 2.2).

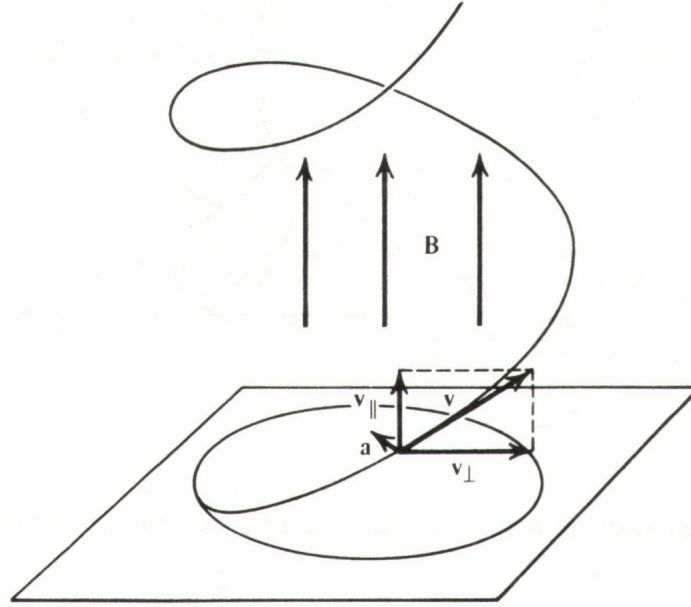


Figura 2.2: Movimento helicoidal de uma partícula carregada em um campo magnético uniforme.

Fonte: Rybicki e Lightman (1979).

A frequência de rotação é dada por:

$$\omega_B = \frac{qB}{\gamma mc}, \quad (2.6)$$

em que q é a carga da partícula, B a intensidade do campo magnético, m a massa da partícula, c a velocidade da luz e γ é o fator de Lorentz. Rybicki e Lightman (1979) mostram que a potência emitida P é dada por:

$$P = \frac{2q^2}{3c^3} \gamma^4 \frac{q^2 B^2}{\gamma^2 m^2 c^2} v_{\perp}^2. \quad (2.7)$$

No caso de muitas partículas, considerando uma distribuição isotrópica de velocidades, é necessário tomar a média dessa expressão sobre todos os ângulos para uma dada velocidade v . Se α é o ângulo entre o campo magnético e a velocidade, obtemos:

$$\langle v_{\perp}^2 \rangle = \frac{v_{\perp}^2}{4\pi} \int \sin^2 \alpha d\Omega = \frac{2v_{\perp}^2}{3}, \quad (2.8)$$

resultando em

$$P = \frac{4}{3} \sigma_T c \left(\frac{v}{c} \right)^2 \gamma^2 U_B, \quad (2.9)$$

em que $\sigma_T = 8\pi r_0^2/3$ é a seção de choque de Thomson, e $U_B = B^2/8\pi$ é a densidade da energia magnética.

Uma característica fundamental da radiação de partículas relativísticas é o fato de que a radiação é emitida na direção do movimento da partícula (Figura 2.3).

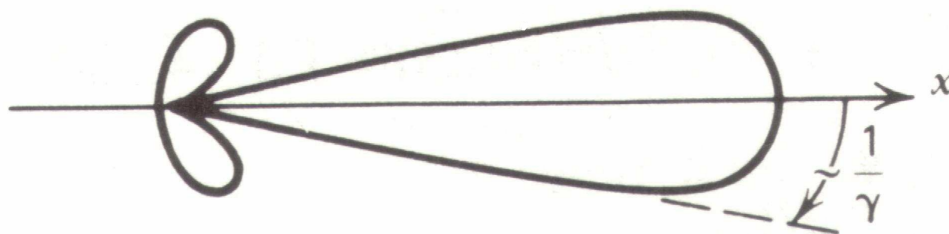


Figura 2.3: Distribuição angular da radiação emitida por uma partícula com aceleração perpendicular à velocidade.

Fonte: Rybicki e Lightman (1979).

A Figura 2.4 mostra o pulso visto pelo observador entre dois pontos (1 e 2) ao longo da trajetória da partícula. Esses pontos são tais que o cone de emissão com uma abertura angular $\sim 1/\gamma$ inclui a direção de observação. A distância ΔS percorrida entre os pontos 1 e 2 pode ser calculada a partir do raio de curvatura da trajetória, $r = \Delta S/\Delta\theta$.

Da geometria temos $\Delta\theta = 2/\gamma$, assim $\Delta S = 2r/\gamma$. Mas o raio de curvatura da trajetória pode ser deduzido a partir da equação de movimento (Equação 2.3), que pode ser reescrita como

$$\gamma m \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{q}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad (2.10)$$

Uma vez que $|\Delta \mathbf{v}| = v \Delta\theta$ e $\Delta S = v \Delta t$, temos

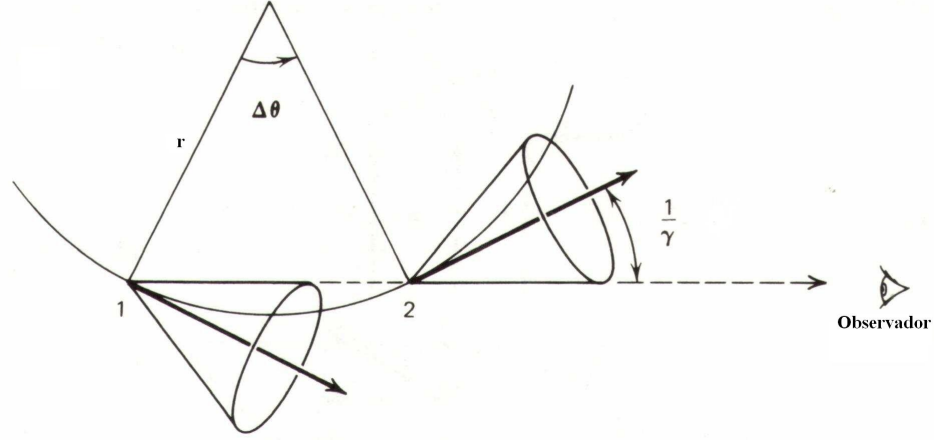


Figura 2.4: Cones de emissão em dois pontos da trajetória da partícula acelerada.

Fonte: Rybicki e Lightman (1979)

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta S} = \frac{qB\text{sen}\alpha}{\gamma mcv}, \quad (2.11)$$

$$r = \frac{v}{\omega_B \text{sen}\alpha}. \quad (2.12)$$

Assim ΔS é dado por:

$$\Delta S \approx \frac{2v}{\gamma\omega_B \text{sen}\alpha}. \quad (2.13)$$

Os instantes t_1 e t_2 nos quais a partícula passa pelos pontos 1 e 2 (Figura 2.4) são tais que $\Delta S = v(t_2 - t_1)$ e então

$$t_2 - t_1 \approx \frac{2}{\gamma\omega_B \text{sen}\alpha}. \quad (2.14)$$

Sejam t_1^A e t_2^A os tempos de chegada da radiação dos pontos 1 e 2 no ponto de observação. A diferença $t_2^A - t_1^A$ é menor que $t_2 - t_1$ pela quantidade $\Delta S/c$, que é o tempo para a radiação percorrer a distância ΔS . Assim,

$$\Delta t^A = t_2^A - t_1^A = \frac{2}{\gamma\omega_B \text{sen}\alpha} \left(1 - \frac{v}{c}\right). \quad (2.15)$$

Para $\gamma \gg 1$, tem-se que

$$1 - \frac{v}{c} \approx \frac{1}{2\gamma^2},$$

e

$$\Delta t^A \approx (\gamma^3 \omega_B \text{sen} \alpha)^{-1}. \quad (2.16)$$

Portanto, a largura do pulso observado é menor que o período de rotação por um fator γ^3 . O pulso é mostrado na Figura 2.5.

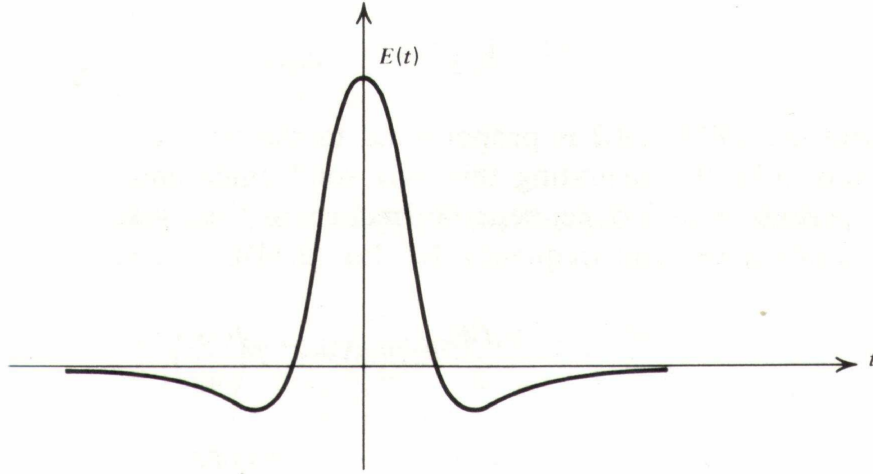


Figura 2.5: Perfil do pulso da radiação síncrotron.

Fonte: Rybicki e Lightman (1979)

Para tais pulsos espera-se que o espectro seja não muito amplo, limitado por uma frequência igual a $1/\Delta t^A$. A frequência crítica é definida por

$$\omega_c = \frac{3}{2} \gamma^3 \omega_B \text{sen} \alpha \quad (2.17)$$

ou

$$\nu_c = \frac{3}{4\pi} \gamma^3 \omega_B \text{sen} \alpha, \quad (2.18)$$

então espera-se que o espectro se estenda até frequências da ordem de ω_c .

Para os casos altamente relativísticos ($v \approx c$), a potência por unidade de frequência emitida por cada elétron é (Rybicki e Lightman 1979):

$$P(\omega) = \frac{\sqrt{3} q^3 B \sin \alpha}{2\pi m c^2} F\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right), \quad (2.19)$$

em que $F(\omega/\omega_c)$ é uma função adimensional.

Da Equação 2.19, fica claro que o fator γ não aparece explicitamente, exceto o que está contido em ω_c . Somente por esse fato é possível derivar um resultado extremamente importante no que diz respeito ao espectro síncrotron: o espectro pode ser aproximado por uma lei de potência ao longo de um intervalo de frequências. Assim, pode-se definir um índice espectral dado pela constante β na expressão

$$P(\omega) \propto \omega^\beta. \quad (2.20)$$

Para o espectro de emissão síncrotron a constante β é uma constante negativa ($\beta < 0$), o que faz com que em um gráfico $\log P(\omega)$ versus $\log \omega$ a emissão síncrotron seja caracterizada por uma reta com inclinação negativa, como mostra a Figura 2.1.

2.2 Emissão Livre-Livre

A radiação *Bremsstrahlung* ou emissão livre-livre está associada com a aceleração de elétrons em campos eletrostáticos gerados por íons e por núcleos de átomos. O espectro de radiação de um elétron com velocidade v que colide com um núcleo carregado é dado por (Longair 1992):

$$I(\omega) = \frac{Z^2 e^6}{24\pi^4 \epsilon_0^3 c^3 m_e^2} \frac{\omega^2}{\gamma^2 v^2} \left[\frac{1}{\gamma^2} K_0^2\left(\frac{\omega b}{\gamma v}\right) + K_1^2\left(\frac{\omega b}{\gamma v}\right) \right] \quad (2.21)$$

em que Ze é a carga do núcleo, ϵ_0 é a permissividade do vácuo, m_e a massa do elétron, b o parâmetro de colisão e K_0 e K_1 funções de Bessel modificadas de ordem zero e um. Essa é a intensidade do espectro que resulta de uma única colisão entre um elétron e um núcleo com parâmetro de colisão b .

Para estudar o comportamento da função $I(\omega)$ em altas e baixas frequências definimos $y = \omega b/\gamma v$. Assim para

$$y \ll 1 \text{ temos } K_0(y) = \ln y; \quad K_1(y) = 1/y$$

e para

$y \gg 1$ temos $K_0(y) = K_1(y) = (\pi/2y)^{1/2} \exp(-y)$

Assim, em altas frequências o espectro de radiação é dado por (Longair 1992):

$$I(\omega) = \frac{Z^2 e^6}{48\pi^3 \epsilon_0^3 c^3 m_e^2 \gamma v^3} \left[\frac{1}{\gamma^2} + 1 \right] \exp\left(-\frac{2\omega b}{\gamma v}\right). \quad (2.22)$$

E em baixas frequências o espectro tem a forma

$$I(\omega) = \frac{Z^2 e^6}{24\pi^4 \epsilon_0^3 c^3 m_e^2 b^2 v^2} \left[1 - \frac{1}{\gamma^2} \left(\frac{\omega b}{\gamma v}\right)^2 \ln^2 \left(\frac{\omega b}{\gamma v}\right) \right]. \quad (2.23)$$

A intensidade da radiação de um único elétron de energia $E = \frac{1}{2}m_e v^2$ no limite não relativístico é:

$$I(\omega) = \frac{8}{3} Z^2 \alpha r_e \frac{m_e c^2}{E} v N \ln \left[\frac{1 + (1 - \epsilon/E)^{1/2}}{1 - (1 - \epsilon/E)^{1/2}} \right], \quad (2.24)$$

sendo $\alpha = e^2/4\pi\hbar\epsilon_0 c$ a constante de estrutura fina, $r_e = e^2/4\pi\epsilon_0 m_e c^2$ o raio clássico do elétron e N é a densidade de núcleos que interagem com os elétrons.

A emissão livre-livre de um a gás à temperatura T e com densidade N_e no limite de baixas frequências é dada por:

$$I(\omega) \approx \frac{Z^2 e^6 N N_e}{12\sqrt{3}\pi^3 \epsilon_0^3 c^3 m_e^2} \left(\frac{m_e}{kT}\right)^{1/2} g(\omega, T), \quad (2.25)$$

em que k é a constante de Boltzmann, e $g(\omega, T)$ é o fator de *Gaunt*. Em altas frequências o espectro térmico livre-livre é limitado exponencialmente por $\exp(-\hbar\omega/kT)$.

Para o caso relativístico a emissividade é dada por:

$$I(\omega) = \frac{Z^2 e^6 N}{12\pi^3 \epsilon_0^3 c^3 m_e^2 v} \ln \left(\frac{192v}{Z^{1/3}c} \right). \quad (2.26)$$

O comportamento da emissão livre-livre pode ser observado na Figura 2.1.

2.3 Emissão Térmica de Poeira

Os grãos de poeira presentes na Galáxia são pequenas partículas sólidas com raios entre 1 e 100 nm (Longair, 1994). O mecanismo de emissão contínua dos grãos de poeira ocorre pelo processo de radiação térmica ou por fluorescência. A radiação tem origem nas

variações térmicas na distribuição de carga no grão, sendo responsável pela maior parte da emissão observada no infravermelho, o que permite determinar a temperatura dos grãos interestelares. O pico de emissão da poeira ocorre em $\lambda \approx 100\mu m$, correspondendo ao infravermelho distante e uma temperatura de $T \approx 29K$ (Figura 2.6).

Para frequências menores que 3000 GHz o espectro da poeira é caracterizado por um espectro de corpo cinza com intensidade:

$$I(\nu) = B_\nu(T) \int \alpha(\nu, \mathbf{l}) dl, \quad (2.27)$$

em que B_ν é a função de Planck e a integral do coeficiente de absorção $\alpha(\nu, \mathbf{l})$ caracteriza a opacidade do meio.

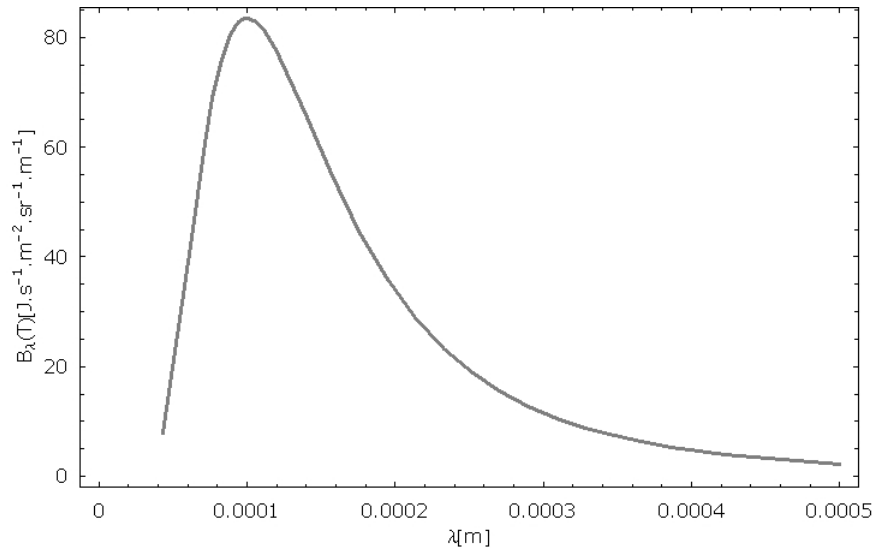


Figura 2.6: Espectro de emissão térmica da poeira para $T \approx 29K$.

2.4 Mapeamento da Emissão Galáctica

A emissão contínua da Galáxia em rádio foi a primeira descoberta da radioastronomia e foi detectada nas observações pioneiras de Karl Jansky em 1933. Os mapas da Galáxia em rádio apresentam um disco similar ao disco das observações no óptico, além de vários laços que saem do Plano Galáctico, sendo o mais evidente conhecido como Espora Polar Norte, que se origina em $l = 30^\circ$ (em que l é a longitude galáctica) e se estende na direção do Polo Norte galáctico (Longair, 1994). Um mapa em rádio com essas características é mostrado na Figura 2.7. No começo da década de 1940 já estava claro que o espectro da emissão rádio da Galáxia não poderia ser descrito por um espectro de corpo negro ou por um espectro de emissão *bremstrahlung*. Nos anos 50 foi produzido o primeiro mapa detalhado da emissão rádio e descoberto que a emissão era altamente polarizada, daí precebeu-se que essas propriedades de emissão não térmica eram características da emissão síncrotron.

A determinação do espectro da Galáxia em rádio é um problema observacional particularmente difícil porque a emissão se estende por todo o céu e, portanto, mesmo em direções muito distantes da direção para a qual o telescópio está apontando, alguma radiação penetra no receptor através dos lóbulos laterais do feixe do telescópio (Longair, 1994).

A produção de mapas de emissão Galáctica com cobertura total do céu requer um conjunto de dados bastante homogêneo, cuja obtenção na prática se vê afetada por uma série de limitações. Os primeiros mapas da emissão Galáctica foram produzidos com dados cuja coleta era feita utilizando o radiotelescópio como instrumento de trânsito meridiano. Para algumas coletas as observações consistiam em varreduras em ascensão reta (α) a intervalos fixos de declinação (δ), e para outras eram efetuadas varreduras em declinação com velocidades típicas de alguns graus por minuto. Com relação à varredura utilizada, a técnica mais aprimorada foi a de Haslam e colaboradores que utilizaram a técnica de varredura em declinação com velocidades de alguns graus por minuto para construir uma grade de pontos no céu a partir da intersecção das varreduras com declinação crescente e decrescente. Desta forma, foi possível reduzir ao mínimo as variações do nível de base, uma das fontes de erro mais graves em observações desta natureza. ((e.g Tello, 1997,)).

Estudos detalhados da emissão galáctica em comprimentos de onda centimétricos e

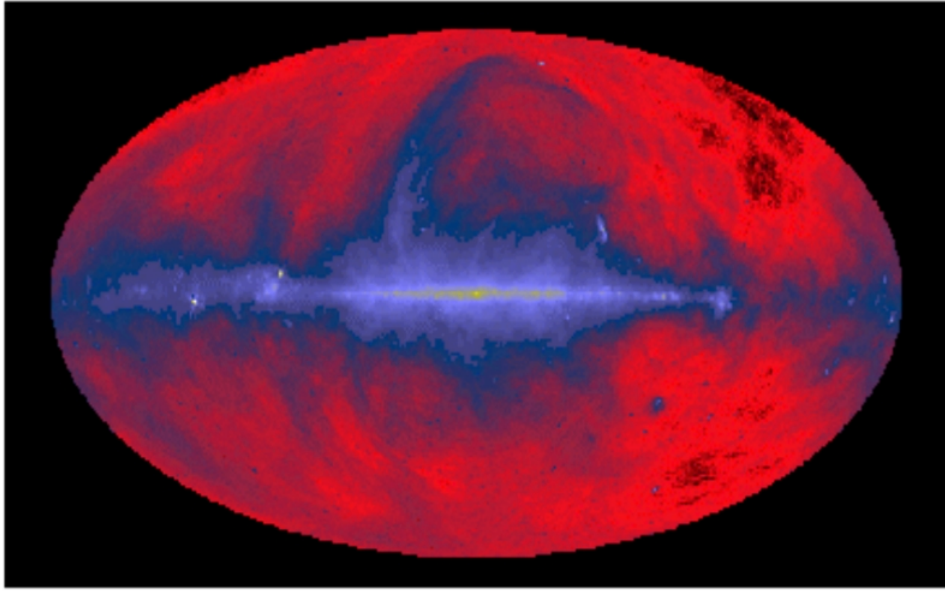


Figura 2.7: Mapa da Galáxia em 408 MHz.

Fonte: Longair (1994).

decimétricos, nos quais a emissão síncrotron é dominante, têm sido realizados e têm apresentado como resultado a produção de *templates* do índice espectral da emissão síncrotron.

A emissão síncrotron galáctica é produzida por elétrons relativísticos espiralando no campo magnético galáctico. As velocidades relativísticas atingidas pelos elétrons são devidas às ondas de choque das supernovas, sendo acelerados e expulsos violentamente das regiões de formação estelar do Plano Galáctico. No processo de interação dos elétrons com o campo magnético, os elétrons são freados e emitem radiação eletromagnética. Quanto mais energéticos são os elétrons, mais sofrem interações e mais energia perdem. Assim, a emissão esperada para esses elétrons está relacionada com o tempo de permanência na Galáxia: quanto mais tempo permanecem na galáxia, menos energia eles têm. Isso se reflete no espectro, que tem inclinação negativa (Figura 2.1).

A dependência da emissão síncrotron com a distribuição de elétrons e com o campo magnético galáctico indica que a morfologia dos mapas síncrotron varia com a frequência e com a direção de observação. Bennett et al. (2003) mostram que no halo galáctico o índice espectral é mais inclinado ($\beta \approx -3$) do que nas regiões de formação estelar no plano galáctico, onde $\beta \approx -2,5$.

Um dos estudos recentes da emissão galáctica difusa em todo o céu foi realizado por

Platania et al. (2003), a partir da análise detalhada da combinação de mapas de *surveys* em 408 MHz (Haslam et al., 1982), 1420 MHz (Reich, 1982; Reich & Reich, 1986) e 2326 MHz (Jonas et al., 1998). Utilizando a técnica aplicada por Schlegel et al. (1998) para os dados do IRAS, foram produzidas versões dos mapas nas frequências acima sem as estruturas artificiais em forma de listras (*stripes*) que aparecem nos mapas originais, devidas à combinação da técnica observacional utilizada e das flutuações de ganho do amplificador. Após o processo de remoção das estruturas artificiais, foi produzido um mapa de índice espectral de quase todo o céu.

O mapa em 408 MHz (Haslam et al., 1982) foi produzido a partir de quatro experimentos diferentes, sendo o primeiro mapa com cobertura total do céu, com resolução angular de $0,85^\circ$ e sensibilidade de 2 K, com erro de calibração e de nível zero de 10% e 3 K respectivamente. O mapa em 1420 MHz (Reich, 1982; Reich & Reich, 1986) cobre o céu em $-19^\circ < \delta < 90^\circ$, com resolução angular de $0,59^\circ$ e sensibilidade de 50 mK, com erros estimados de 5% em calibração e 0,5 K no nível zero. O mapa de 2326 MHz (Jonas et al., 1998) cobre o céu em $-83^\circ < \delta < 32^\circ$ para $12 \text{ h} < \alpha < 24 \text{ h}$ possuindo uma resolução angular de $19'$ e sensibilidade de 25 mK, com erros de calibração de 5% e de 80 mK para o nível zero (Platania et al., 2003).

Antes de calcular o índice espectral foram subtraídos o fundo extragaláctico não resolvido e a temperatura absoluta da radiação cósmica de fundo dos mapas de 408 MHz e 1420 MHz seguindo o método de Reich & Reich (1988); para a remoção do fundo extragaláctico não resolvido, no mapa de 2326 MHz foi utilizado o método de Lawson et al. (1987) e uma compensação na linha de base de -0.13 K foi considerada para o mapa de 1420 MHz. Por fim, os mapas de 1420 MHz e 2326 MHz foram convoluídos para a mesma resolução do mapa de Haslam. Os erros sistemáticos e estatísticos de cada *survey* foram considerados para o cálculo do erro total. Feito isso, o índice espectral foi calculado levando-se em conta que a relação entre temperatura e frequência na emissão síncrotron obedece a uma lei de potência.

Para a região onde os mapas de 1420 MHz e 2326 MHz coincidem, foi feito um ajuste de mínimos quadrados para calcular o índice espectral, o fator de normalização e seus respectivos erros, considerando β constante entre 408 MHz e 2326 MHz.

Para avaliar a variação do índice espectral com a frequência, foi testada a suposição de

que o índice espectral entre 408 e 2326 MHz não muda significativamente quando calculado a partir de diferentes combinações dos *surveys* utilizados. Assim, na região onde os dados nas três frequências estão disponíveis, foi feita a comparação do índice calculado entre 408 e 1420 MHz e entre 1420 e 2326 MHz. Comparando pixel a pixel a distribuição da diferença nota-se que somente 5% dos pixels das diferenças entre os índices são maiores que o erro estimado. Repetindo a mesma análise considerando somente os erros estatísticos foi encontrado que 25% dos pixels da diferença eram maiores que o erro estimado, o que os levou a concluir que em geral o erro estimado era maior que a variação do índice espectral para as frequências entre 1420 MHz e 2326 MHz, que foi motivo para juntar os três *surveys*, nas regiões onde isso fosse possível, para produzir um único mapa de índice espectral e fator de normalização no intervalo de 408 MHz a 2326 MHz.

Os mapas do índice espectral e do fator de normalização produzidos apresentam duas linhas horizontais de descontinuidade correspondendo às bordas do mapas de 1420 MHz e 2326 MHz, as quais tinham origem nas medidas e nos erros de calibração, não tendo nenhum significado astrofísico. Após aplicar o procedimento de minimização, as descontinuidades não desapareceram, porém foram reduzidas. Calculado o índice espectral médio antes e depois do processo de minimização das descontinuidades percebeu-se então que não havia uma significativa mudança nos valores obtidos. Antes da minimização o valor do índice médio era $\bar{\beta} = 2,734 \pm 0,124$ e depois $\bar{\beta} = 2,695 \pm 0,120$.

Outro estudo foi realizado por Giardino et al. (2002), no qual o índice espectral para o Hemisfério Norte foi calculado utilizando os mapas de Haslam em 408 MHz e 1420 MHz de Reich & Reich e para o Hemisfério Sul utilizando o mesmo mapa de Haslam em 408 MHz e 2326 MHz (Jonas et al.,1998), encontrando para a região norte um índice espectral médio de $\bar{\beta}_{408/1420} = 2,78 \pm 0,17$ e para a região sul $\bar{\beta}_{408/2326} = 2,75 \pm 0,12$. Para construir um mapa de céu inteiro do índice espectral, eles utilizaram os valores de $\beta_{408/1420}$ para o Hemisfério Norte e $\beta_{408/2326}$ para o Hemisfério Sul e para a região onde os *surveys* de 1420 MHz e 2326 MHz se sobrepõem ($-20^\circ \leq \delta \leq 13^\circ$), o índice foi calculado por $\beta = g\beta_{408/1420} + h\beta_{408/2326}$ onde $g = \exp[-0,5(\delta - 13^\circ)^2/(10^\circ)^2]$ e $h = 1 - g$. Essa escolha de pesos foi feita para que os mapas se combinem de uma maneira suave.

Além dos *surveys* utilizados para os estudos realizados até agora, outros projetos de mapeamento da emissão galáctica têm sido desenvolvidos com o propósito de produzir

mapas da emissão total e também mapas da emissão polarizada da Galáxia. Entre eles está o C-BASS (*C- Band All-Sky Survey*), que pretende mapear todo o céu em 5 GHz com uma resolução de $0,85^\circ$, sendo otimizado para medir intensidade total I e os parâmetros de Stokes Q e U de emissão linearmente polarizada. Está previsto para entrar em operação em 2009 nos E.U.A., e em 2010 na África do Sul (Pearson et al., 2007). Outro projeto de mapeamento da emissão galáctica é o projeto GEM (*Galactic Emission Mapping*), em operação desde 1992. Trata-se de uma colaboração internacional com objetivo de produzir mapas de intensidade total e de polarização da emissão galáctica utilizando um único radiotelescópio portátil possibilitando que o mesmo seja utilizado em vários sítios de observação. Maiores detalhes sobre o projeto GEM são expostos no Capítulo 3.

Capítulo 3

Projeto GEM

O projeto GEM (*Galactic Emission Mapping*) começou a ser elaborado em 1992, com o objetivo de se obter novos mapas de emissão total do céu em comprimentos de onda decimétricos e centimétricos, motivado pelas observações das anisotropias da RCFM (Smoot et al., 1992), a partir do que percebeu-se a necessidade de separar os contaminantes de origem galáctica do sinal de origem cosmológica. Os mapas até então existentes possuíam graves efeitos sistemáticos, tais como a falta de consistência no nível da linha de base, variações de ganho dos receptores utilizados e também contaminação da emissão do solo, que geravam listras (ou *stripes*) nos mapas, além de serem obtidos a partir da observação de diferentes regiões do céu com diferentes instrumentos implicando assim em diferentes resoluções e sensibilidades, o que dificultava a produção de mapas com boa precisão.

Com o intuito de suprir tais deficiências na produção de mapas de emissão total da Galáxia, o projeto GEM utiliza um radiotelescópio portátil com uma antena de 5,5 m de diâmetro, o que facilita sua locomoção para diferentes locais de observação. Para evitar a contaminação devida à emissão do solo são montados na antena painéis que aumentam seu diâmetro em 4,0 m e é colocada a sua volta uma cerca com 5,0 m de altura. Uma fotografia do radiotelescópio é apresentada na Figura 3.1.



Figura 3.1: Fotografia do radiotelescópio GEM instalado no sítio de Cachoeira Paulista.

Fonte: Ferreira, 2008.

A técnica de varredura utilizada mantém a antena com uma distância zenital fixa, variando o azimute de 0° a 360° , com velocidade angular constante. A escolha da distância zenital resulta do compromisso entre maximizar o número de pontos estatisticamente independentes na esfera celeste e a necessidade de minimizar a radiação do solo captada pelos lóbulos laterais. Na atual montagem do radiotelescópio, a distância zenital é de 30° . A combinação do movimento do radiotelescópio com o movimento da Terra produz um conjunto de círculos levemente espaçados em ascensão reta que efetivamente cobrem uma faixa de declinação equivalente ao ângulo do cone zenital (Tello, 1997). O esquema de varredura é ilustrado na Figura 3.2.

O projeto é uma colaboração internacional que conta com a participação do Lawrence Berkeley National Laboratory, da Universidade da Califórnia em Berkeley, EUA; do Centro Internacional de Física, Colômbia; da Universidade de Milão e do Laboratório de Física Cósmica, Itália; do Instituto Astrofísica Canárias, Espanha; do Instituto de Telecomunicações e do Centro Multidisciplinar em Astrofísica, Portugal; do Instituto Nacional

Tabela 3.1: Campanhas de observações da emissão Galáctica com os receptores de intensidade total do projeto GEM

Frequência (MHz)	HPBW	Cobertura do Céu	Duração	Sítio	Referência
408	10, 5°	+07° < δ < +67°	70 h	Bishop	a
408	11, 3°	-24° < δ < +36°	447 h	Villa de Leyva	b
2300	3, 7°	-24° < δ < +36°	231 h	Villa de Leyva	c
1465	4, 2°	-52° < δ < +08°	709 h	C. Paulista	d
2300	2, 9° × 1, 8°	-52° < δ < +08°	532 h	C. Paulista	e
1465	4, 2°	-52° < δ < +08°	510 h	C. Paulista	f

(a) Tello (1997); (b) Torres et al. (1996); (c) Torres (1995); (d) Tello et al. (2005); (e) Tello et al. (2007); (f) Tello et al. (2008)

Fonte: Ferreira (2008).

O mapa da emissão total em 1465 MHz produzido ainda necessita de alguns ajustes. O mapa de intensidade total em 2300 MHz é uma combinação das observações realizadas em Villa de Leyva, Colômbia e em Cachoeira Paulista, Brasil. A combinação das observações dos dois sítios pode ser observada no mapa projetado em coordenadas equatoriais (Figura 3.7) no qual é possível perceber claramente as áreas do céu não cobertas pelas observações, que correspondem às calotas polares norte e sul.

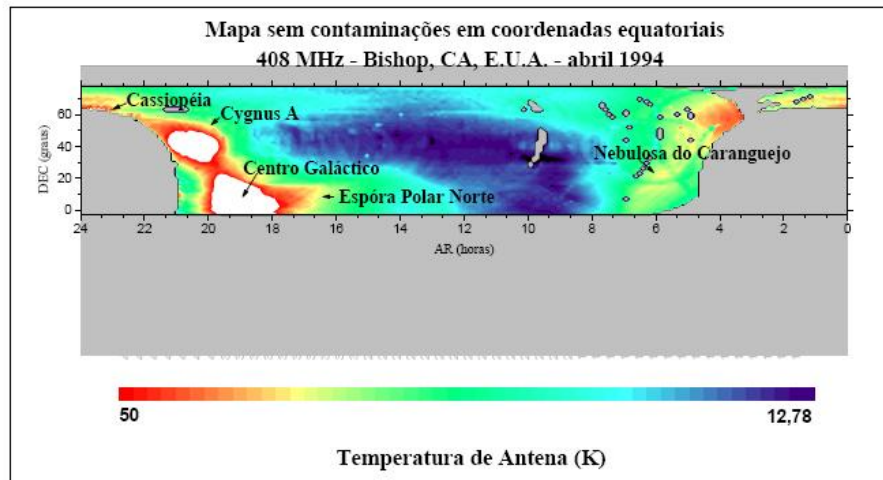


Figura 3.3: Mapa de emissão total em 408 MHz

Fonte: Souza (2000)

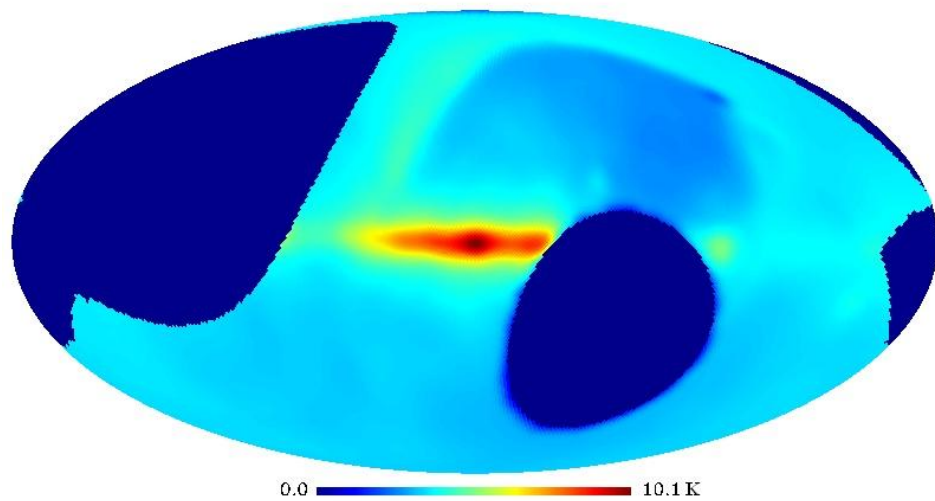


Figura 3.4: Mapa de emissão total em 1465 MHz

Fonte: Tello (1997)

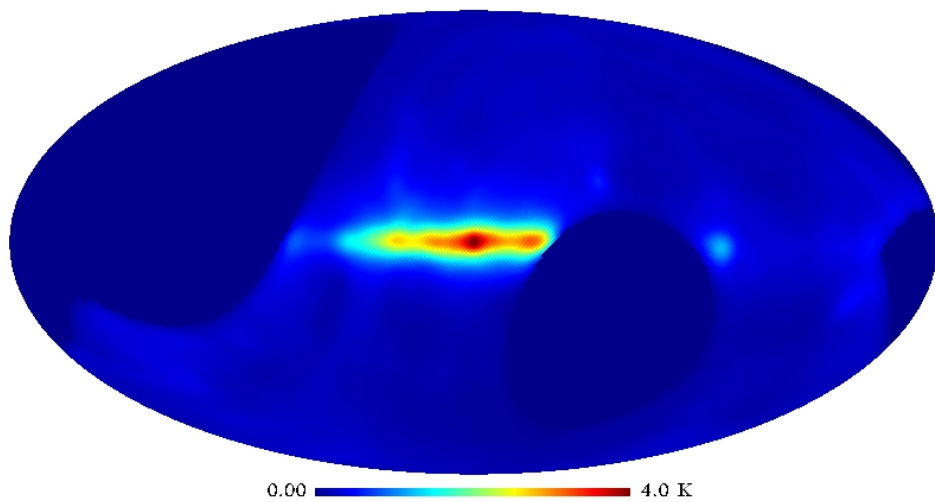


Figura 3.5: Mapa de emissão total em 2300 MHz

Fonte: Tello (2007)

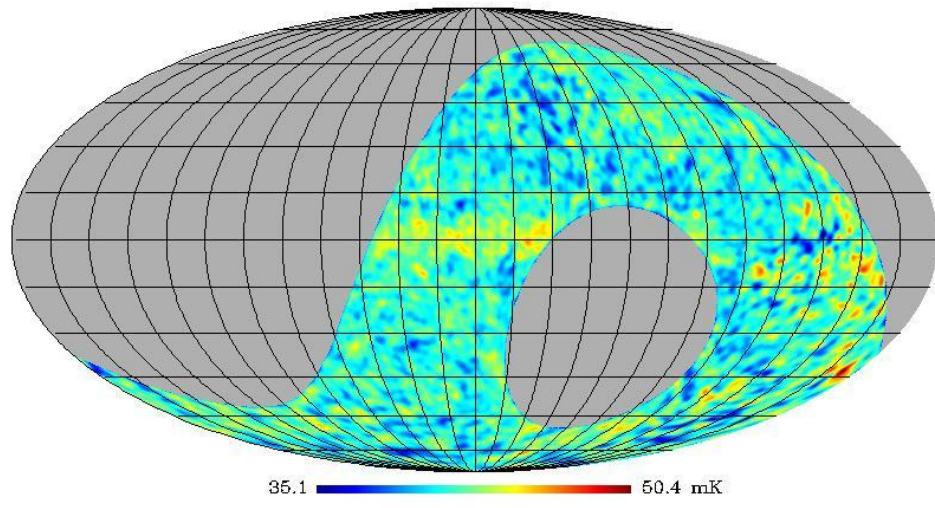


Figura 3.6: Mapa de intensidade linearmente polarizada em 5 GHz.

Fonte: Oliveira (2009)

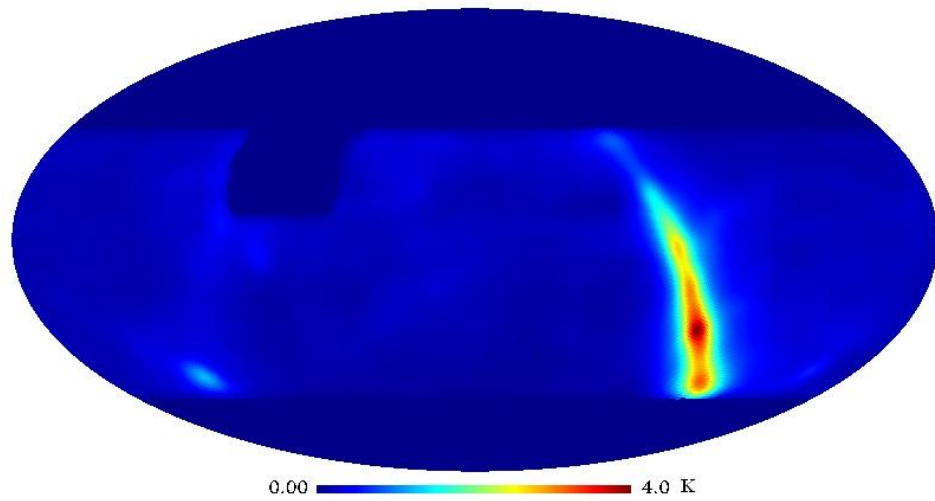


Figura 3.7: Mapa do GEM 2300 MHz em coordenadas equatoriais.

Capítulo 4

Determinação do índice espectral

4.1 HEALPix

O HEALPix (*Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelization*) é um *software* com uma estrutura versátil para proporcionar a *pixelização* de dados na esfera celeste, com uma biblioteca de algoritmos computacionais associada e um *software* de visualização, que suporta aplicações científicas executadas diretamente em mapas esféricos gerados a partir de um grande volume de dados astronômicos (Górski et al., 2005).

O HEALPix produz uma partição curvilinear da esfera em quadriláteros de áreas iguais com formas variadas, constando em sua resolução de base doze *pixels* em três anéis em torno dos pólos e ao longo do equador. A resolução de grade é expressa pelo parâmetro N_{side} que define o número de divisões ao longo do lado de um *pixel* da base que são necessárias para se obter a resolução desejada na partição. Os centros de todos os *pixels* estão localizados em $4 \times N_{side} - 1$ anéis de latitude constante e são equidistantes em azimute em cada anel. Todos os anéis com a mesma latitude localizados entre o limite superior e inferior da zona equatorial são divididos no mesmo número de *pixels*: $N_{eq} = 4 \times N_{side}$, enquanto os outros, localizados nas calotas polares, contêm um número de *pixels* variável, que aumenta de anel para anel conforme o aumento da distância do *pixel* aos pólos (Figura 4.1).

As propriedades geométricas do HEALPix permitem que haja dois esquemas diferentes para a distribuição dos *pixels* na esfera. No primeiro deles, o esquema *RING*, os *pixels* são dispostos movendo-se do pólo norte para o pólo sul ao longo de cada anel de mesma latitude. No segundo, esquema *NESTED*, os *pixels* são arranjados em doze estruturas de

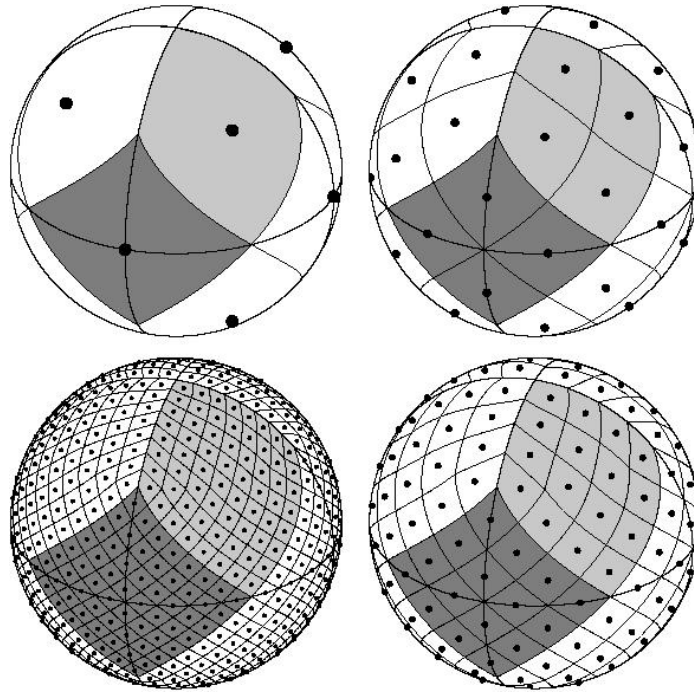


Figura 4.1: Divisão da esfera em *pixels* de acordo com o padrão *HEALPix*. No sentido horário, a grade é hierarquicamente subdividida com o parâmetro de resolução da grade igual a $N_{side} = 1, 2, 4, 8$ e o número total de *pixels* correspondente é igual a $N_{pix} = 12 \times N_{side}^2 = 12, 48, 192, 768$. Os centros de todos os *pixels* estão localizados em $4 \times N_{side} - 1$ anéis de latitude constante. A região em cinza escuro representa um *pixel* de base da região equatorial e a região em cinza claro representa um *pixel* de base da região polar. Em cada esfera as áreas de todos os *pixels* são idênticas.

Fonte: Górski et al. (2005).

árvores, conforme seu índice. Os esquemas se encontram nas Figuras 4.2 e 4.3.

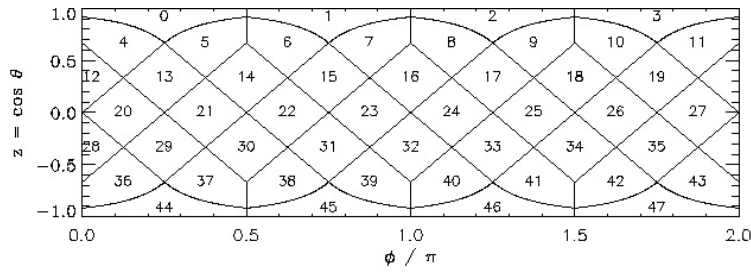


Figura 4.2: Esquema RING de *pixelização* para $N_{side} = 2$ em projeção cilíndrica.

Fonte: Górski et al. (2005).

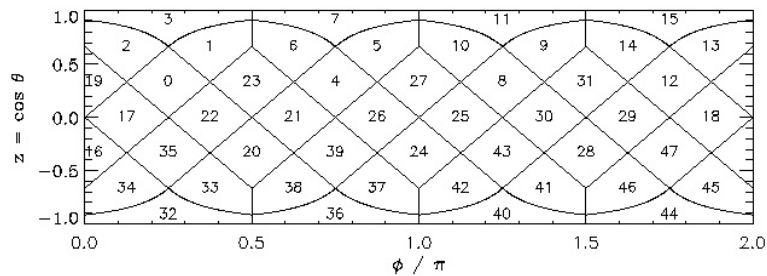


Figura 4.3: Esquema NESTED de *pixelização* para $N_{side} = 2$ em projeção cilíndrica.

Fonte: Górski et al. (2005).

4.2 Máscaras de Foreground

O *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) é uma missão de exploração da NASA, projetada para fazer medidas precisas do céu em microondas para permitir a extração de informações cosmológicas da radiação cósmica de fundo. O uso da radiação cósmica de fundo em cosmologia é limitado pela contaminação de *foreground* da nossa galáxia e de fontes extragalácticas. Assim, com o propósito de excluir dos mapas que são utilizados na análise da radiação cósmica de fundo *pixels* que contenham muito sinal de *foreground*, foram elaboradas pela equipe do WMAP máscaras de *foreground*. Alguns *pixels* necessitam ser mascarados mesmo após ser aplicada a técnica de redução de *foreground*. O termo 'muito sinal' depende de uma análise particular para cada mapa, entretanto é usual ter máscaras disponíveis com cortes em diferentes níveis de fluxo. Por exemplo, essas máscaras

podem ser utilizadas para demonstrar a sensibilidade ou insensibilidade dos resultados científicos nos níveis de corte de *foreground* do céu.

O nível de corte das máscaras é sempre um compromisso entre eliminar *foregrounds* e preservar áreas do céu para serem utilizadas na análise. Na maioria das áreas do céu excluídas em qualquer máscara está a região do plano galáctico. Os *pixels* das máscaras têm o mesmo formato dos *pixels* dos mapas, o que facilita o corte quando a máscara é aplicada.

Uma máscara bem sucedida deveria excluir as áreas que são dominadas por *foregrounds*, enquanto deixaria preservadas as áreas do céu dominadas pela radiação cósmica de fundo. A equipe do WMAP adotou um pequeno conjunto de máscaras com variação da severidade do corte que obedecem a um mesmo padrão. Todas as máscaras são baseadas no mapa da banda K, uma vez que a contaminação de *foreground* é mais severa nas bandas de frequência mais baixa.

O corte das máscaras é definido a partir do histograma da distribuição de brilho de todos os *pixels* no mapa da banda K (Figura 4.4). Por se tratar da distribuição de brilho dos *pixels* em relação ao valor médio, o histograma é constituído por uma parte negativa e outra positiva. Para definir o corte das máscaras, a parte negativa do histograma é refletida sobre a parte positiva; essa reflexão é representada pela linha pontilhada no histograma. Após a reflexão da parte negativa, subtrai-se a parte refletida (linha pontilhada) da parte positiva (linha sólida) e o resultado obtido (linha tracejada) é atribuído ao excesso de emissão de *foreground*.

A curva tracejada define então o limite da temperatura do céu na banda K para a máscara com um desejado corte. O intervalo dos cortes foi calculado a partir da raiz quadrática média da largura a meia altura da curva tracejada. O pico da curva tracejada define o limite da temperatura do céu na banda K para a máscara chamada Kp0 (Figura 4.5), que é o corte mais severo, ou seja aquele que corta um maior número de *pixels* nos mapas. As demais máscaras têm cortes definidos por múltiplos do intervalo do corte subtraídos ou somados ao valor da Kp0. A máscara com um corte de temperatura dois intervalos menores chamada “Km2”, é calculada subtraindo dois intervalos de corte do valor da Kp0 e a letra “m” significa “menos”, o número 2 dois intervalos de corte e K a banda a que se refere. Para um corte menos severo, por exemplo para a máscara chamada

“Kp2”, dois intervalos de corte são somados ao valor da Kp0 e “p” significa “mais”. A porcentagem dos *pixels* cortados em algumas máscaras é apresentado na Tabela 4.1 A Figura 4.6 mostra máscaras selecionadas baseadas na definição da Figura 4.4.

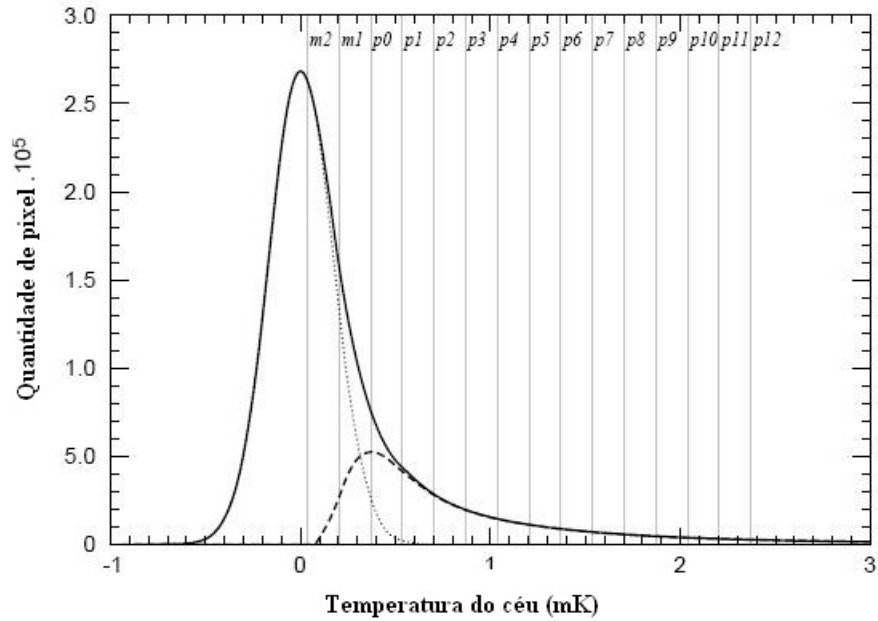


Figura 4.4: Histograma da distribuição de brilho dos *pixels* em relação ao valor médio.

Fonte: Adaptado de Bennett et al. (2003)

Tabela 4.1: Porcentagem de *pixels* cortados.

Máscara	% Pixels cortados
Kp0	21,4
Kp2	13,1
Kp4	9,3
kp12	3,8

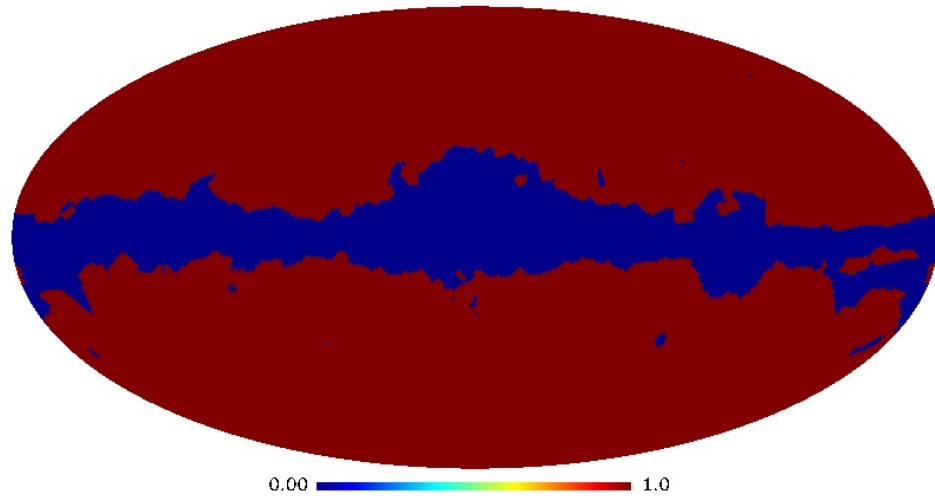


Figura 4.5: Máscara Kp0.

Fonte: Bennett et al. (2003)

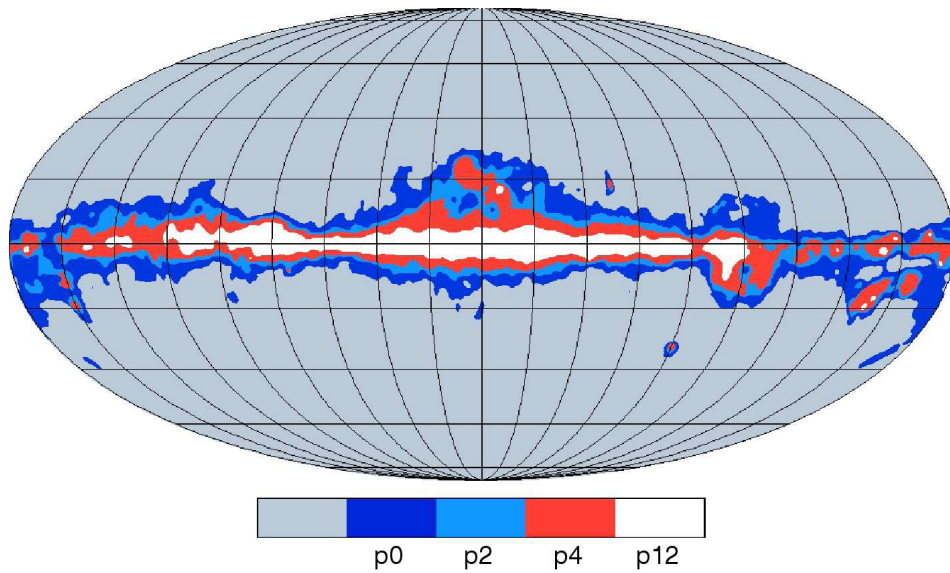


Figura 4.6: Máscaras produzidas a partir dos cortes realizados no histograma.

Fonte: Bennett et al. (2003)

4.3 Cálculo do Índice Espectral

O principal objetivo deste trabalho é produzir *templates* do índice espectral da emissão difusa da galáxia nas frequências de operação do radiotelescópio do projeto GEM. Como

visto anteriormente, a emissão galáctica em rádio é dominada pela emissão síncrotron para frequências menores que 30 GHz e, portanto, nosso estudo se concentra no estudo do índice espectral da emissão síncrotron. Uma vez que seu espectro é descrito por uma lei de potência, a relação entre temperatura e frequência para a emissão síncrotron é dada por:

$$T_\nu = a\nu^\beta \quad (4.1)$$

e, portanto,

$$\log T_\nu = \alpha + \beta \log \nu, \quad (4.2)$$

em que $\log a = \alpha$ é uma constante e o índice espectral β é dado por:

$$\beta_{\nu_1/\nu_2} = \frac{\log(T_1/T_2)}{\log(\nu_1/\nu_2)}. \quad (4.3)$$

Na equação acima os índices 1 e 2 referem-se a duas frequências quaisquer. A incerteza $\Delta\beta$ é dada por:

$$\Delta\beta = \left[\left(\frac{\partial\beta}{\partial T_1} \right)^2 (\Delta T_1)^2 + \left(\frac{\partial\beta}{\partial T_2} \right)^2 (\Delta T_2)^2 + \left(\frac{\partial\beta}{\partial \nu_1} \right)^2 (\Delta \nu_1)^2 + \left(\frac{\partial\beta}{\partial \nu_2} \right)^2 (\Delta \nu_2)^2 \right]^{1/2}. \quad (4.4)$$

O estudo foi feito com mapas de índice espectral produzidos a partir de mapas de temperatura em diferentes frequências, sendo um deles o mapa produzido pelas observações do radiotelescópio do GEM na frequência de 2300 MHz (Figura 4.7). Os outros mapas disponíveis para o cálculo do índice espectral são o mapa de Haslam (Haslam et al. (1982)) em 408 MHz, apresentado na Figura 4.8 e WMAP 23 GHz (Bennett et al. (2003)) mostrado na Figura 4.9. Os mapas de Haslam e do WMAP são mapas de cobertura total do céu, já o mapa do GEM em 2300 MHz cobre uma área de 69% do céu (Tello et al., 2007).

Para calcular o índice espectral e produzir o mapa correspondente, foi desenvolvida uma rotina no software IDL (*Interactive Data Language*), na qual a partir de dois dos mapas acima é calculado o índice espectral e produzido um mapa em coordenadas galácticas, com $N_{side} = 64$, em que cada *pixel* do mapa corresponde a um determinado valor do índice

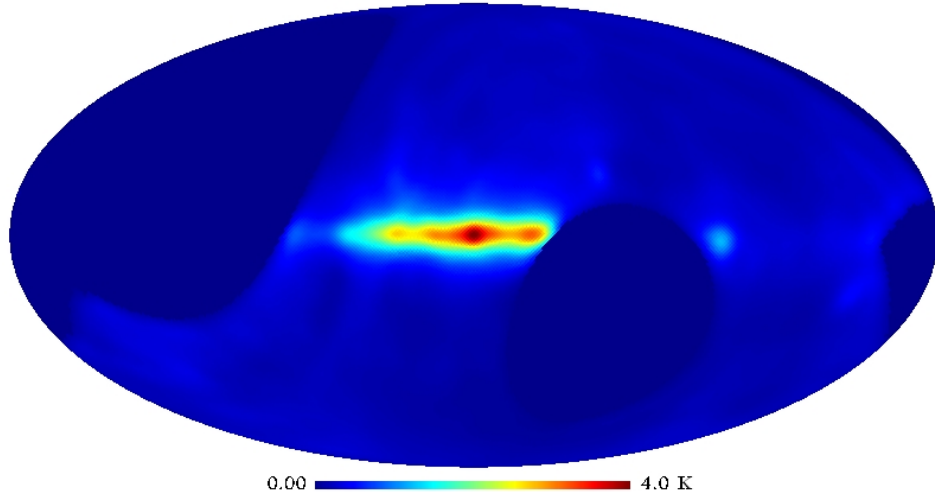


Figura 4.7: Mapa GEM em 2300 MHz em coordenadas galácticas.

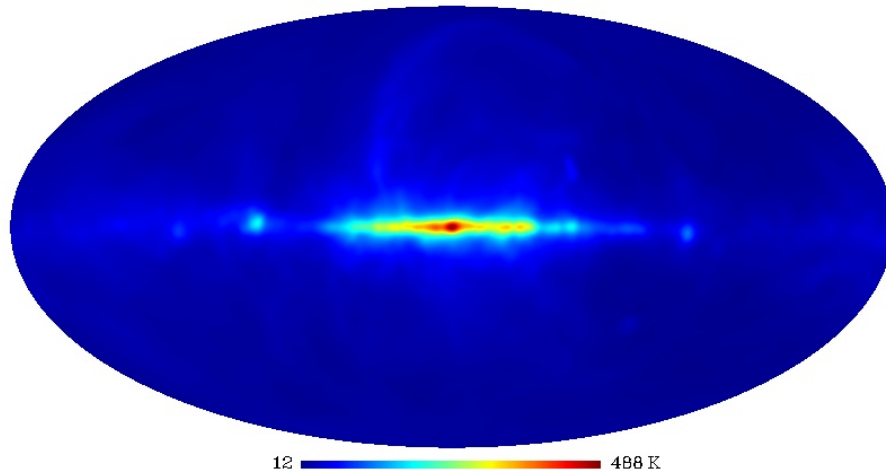


Figura 4.8: Mapa de Haslam em 408 MHz em coordenadas galácticas.

espectral. Os mapas de Haslam e do WMAP utilizados na rotina foram suavizados para $2^{\circ}9$, que é a resolução do mapa do GEM em 2300 MHz. A cada um dos mapas de temperatura foi aplicada uma máscara, elaborada a partir do mapa de 2300 MHz, para garantir que fossem utilizados somente valores das regiões observadas pelo GEM (Figura 4.10). As Figuras 4.11 e 4.12 mostram essa máscara superposta aos mapas de Haslam em 408 MHz e WMAP em 23 GHz, respectivamente.

No início da rotina, são declaradas as variáveis que serão utilizadas. Essas variáveis são

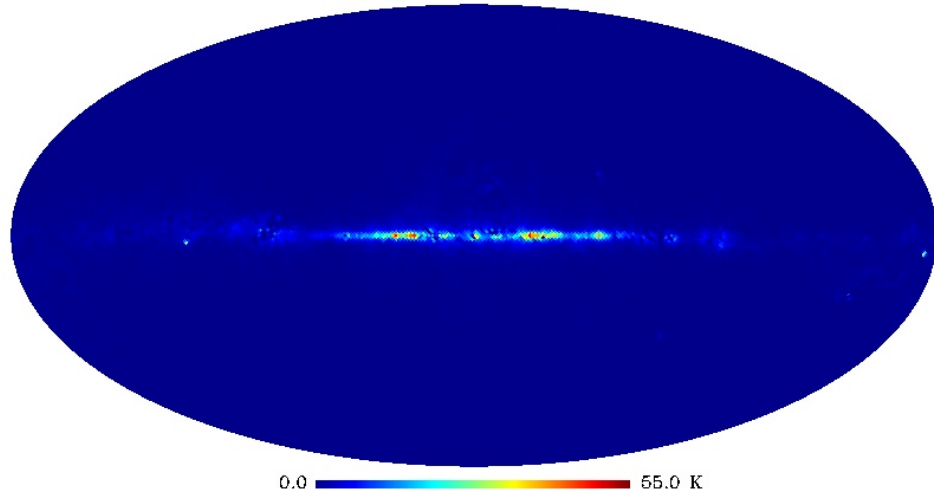


Figura 4.9: Mapa WMAP 23 GHz em coordenadas galácticas.

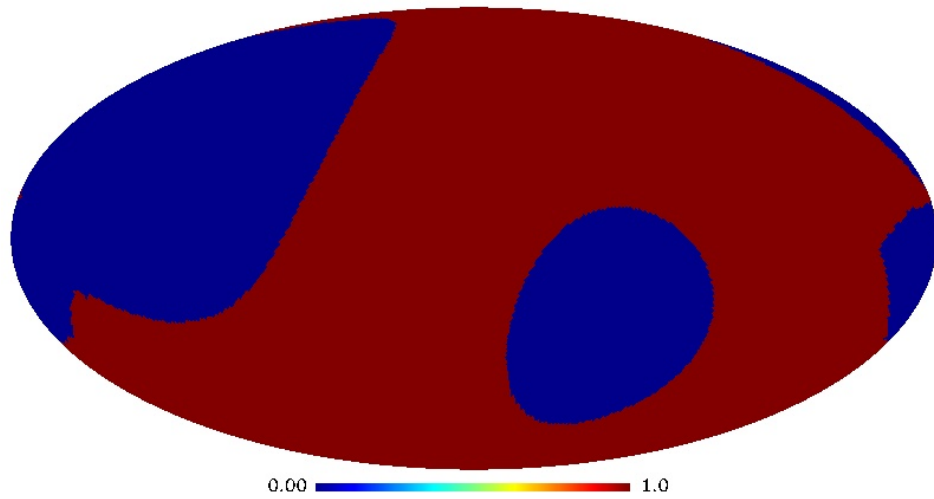


Figura 4.10: Máscara elaborada a partir do mapa de 2300 MHz, para garantir que sejam utilizados somente valores das regiões observadas pelo GEM.

o arquivo de entrada (*file_in*), que é um arquivo de texto; o número de pontos do arquivo de entrada (*npoints*); uma matriz (*tmp*) de dimensão $n \times npoints$, em que n é o número de linhas do arquivo de entrada e *npoints* o número de pontos do arquivo de entrada; o parâmetro de resolução do mapa (*nside*); o número de *pixels* (*npix*), que é calculado pela rotina *nside2npix* do *HEALPix*; e as variáveis *senal 1*, *senal 2*, *senal 3*, *senal 4*, que são vetores com *npoints* elementos.

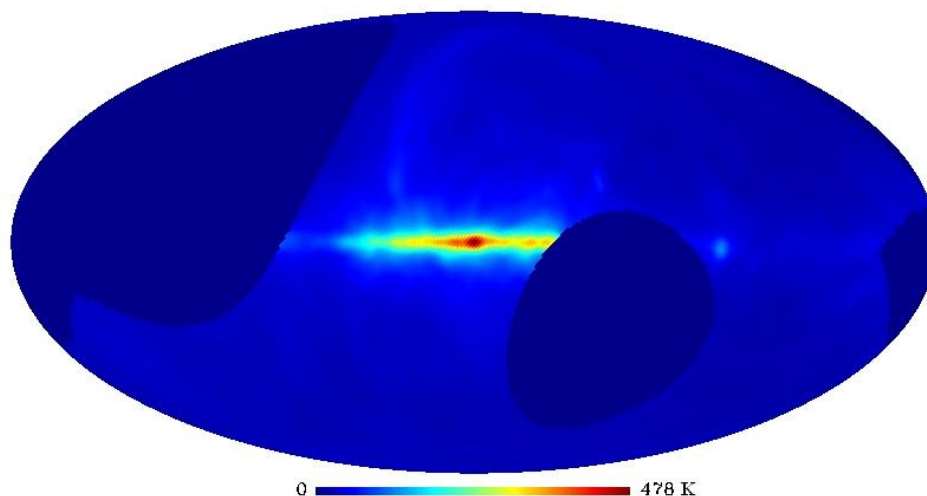


Figura 4.11: Mapa de Haslam em 408 MHz com aplicação da máscara elaborada a partir do Mapa do GEM em 2300 MHz.

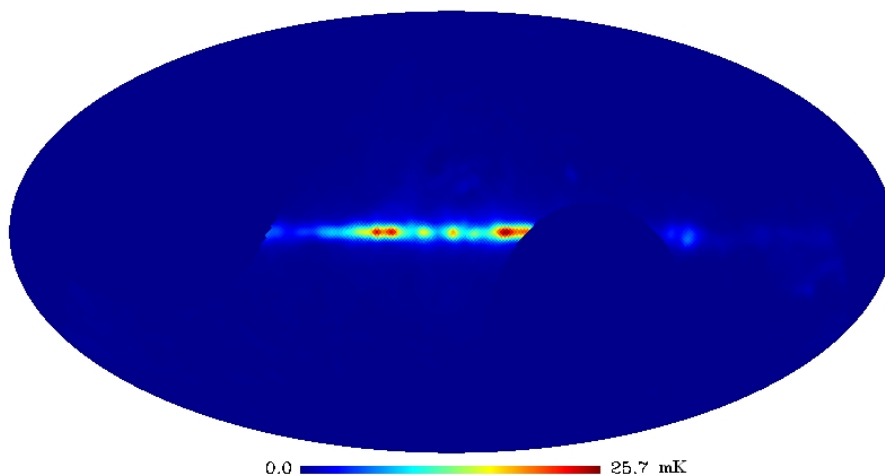


Figura 4.12: Mapa do WMAP em 23 GHz com aplicação da máscara elaborada a partir do Mapa do GEM em 2300 MHz.

Declaradas as variáveis, o arquivo de texto é então aberto e lido. O arquivo contém as coordenadas θ (colatitude em graus, medida a partir do pólo norte em direção ao sul $\{0, 180^\circ\}$) e ϕ (longitude em graus, medida na direção leste $\{0, 360^\circ\}$), que foram geradas através da rotina `pix2ang_ring`, do `HEALPix`, a partir do parâmetro de resolução do mapa (`nside`) e do número de identificação do `pixel` (`ipring`). Após a leitura do arquivo as coordenadas θ e ϕ são convertidas de graus para radianos e então é gerado um

vetor, *vec_gal*, em coordenadas esféricas, que através da rotina *vec2pix_ring* dá origem a um novo vetor *ipring* que contém o número de identificação de cada *pixel* que será utilizado na construção do mapa de índice espectral.

Construído o vetor *ipring* são lidos então os mapas de temperatura. Esse procedimento é utilizado para a determinação do índice espectral nas seguintes combinações: Haslam 408 MHz e GEM 2300 MHz, GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz. Na rotina os mapas são lidos separadamente utilizando a função *read_fits_map*, do *Healpix*, atribuindo para o primeiro o nome de *temperatura 1* e para o segundo de *temperatura 2*. Para *temperatura 1* é então estabelecida uma comparação entre o vetor *ipring* e o número do *pixel* lido do mapa. Existindo igualdade é criado o vetor *senal 1*, o qual assume para aquele valor de *ipring* o valor de *temperatura 1*. O mesmo é feito para *temperatura 2*, dando origem ao vetor *senal 2*. Tal procedimento é adotado para garantir que a mesma região dos dois mapas de temperatura seja utilizada no cálculo do índice espectral.

De posse dos vetores *senal 1* e *senal 2*, é criado o vetor *senal 3* que é dado pela razão entre *senal 2* e *senal 1* para cada valor do *ipring*. Assim, para se calcular o índice espectral (vetor *senal 4*) conforme a Equação 4.3, foi utilizada a relação

$$senal\ 4 = \frac{\log(senal\ 3)}{\log(\nu_2/\nu_1)}, \quad (4.5)$$

em que (ν_2/ν_1) é a razão entre as frequências dos mapas utilizados.

Com os valores do índice espectral são então construídos os mapas utilizando a função *write_fits4_map* do *Healpix* assim como os respectivos histogramas. Os mapas foram construídos com $N_{side} = 64$ e projetados na projeção *mollweide*. O fluxograma da rotina é apresentado na Figura 4.13.

A incerteza associada a cada *pixel* foi calculada dentro da mesma rotina a partir da Equação 4.4 e como resultado foi produzido um mapa em que cada *pixel* corresponde ao valor da incerteza associada ao valor do *pixel* no mapa de índice espectral.

Para possibilitar uma melhor análise do comportamento do índice espectral foram aplicadas em todos os mapas as máscaras Kp0 e Kp12 do WMAP, uma vez que máscara Kp0 corta um número maior de *pixels* (21,4 %) e a máscara Kp12 corta um número menor 3,8 % do *pixels*. As máscaras foram utilizadas em duas situações que se caracterizam por permitir que ora passe somente o sinal do plano da Galáxia, ora o sinal fora deste.

As máscaras foram escolhidas para permitir um estudo mais detalhado do sinal no Plano Galáctico, o corte Kp0 foi escolhido por ser a máscara com maior corte de *it pixels* enquanto a Kp12 possui o corte do menor número de *pixels*. Assim, para cada combinação de frequências, foram criados cinco mapas, um com sinal total, dois permitindo passar somente o sinal do plano da Galáxia, com os respectivos cortes das máscaras Kp0 e Kp12 e os outros dois também com a aplicação das duas máscaras permitindo somente a passagem do sinal fora do plano galáctico. Para todos os mapas produzidos foram feitos histogramas, utilizando o *software* IDL. Por meio dos histogramas foi possível obter o valor médio para cada um dos mapas de índice espectral e, com o ajuste gaussiano, sua incerteza.

Os mapas do índice espectral produzidos a partir dos mapas de Haslam em 408 MHz e GEM 2300 MHz e dos mapas do GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz, os respectivos mapas de incerteza e os histogramas se encontram no Capítulo 5.

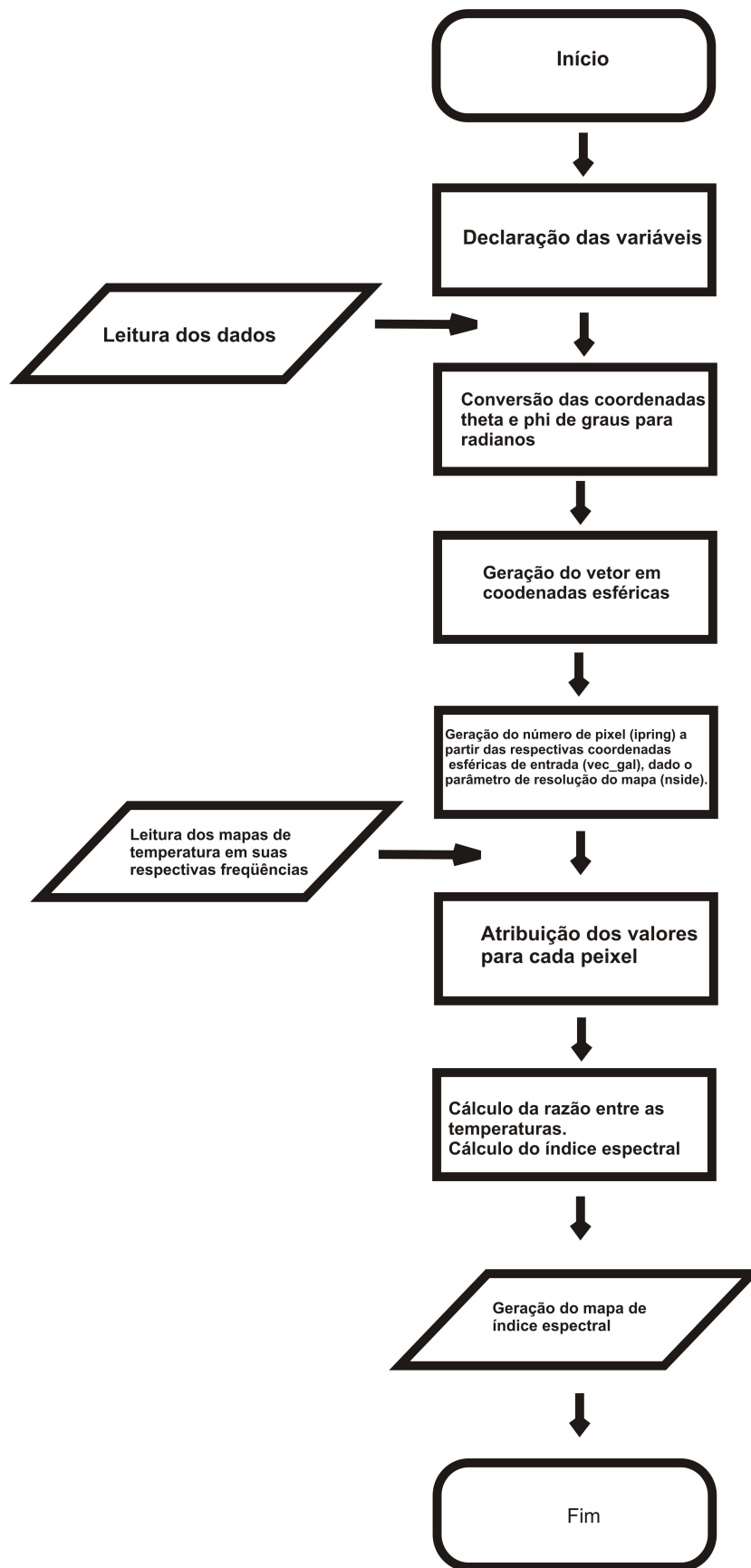


Figura 4.13: Fluxograma da rotina desenvolvida.

4.4 Índice espectral em múltiplas frequências

Para um estudo mais geral do comportamento do índice espectral para frequências entre 408 MHz e 10 GHz foram elaborados mapas de intensidade total simulados nas frequências de operação do GEM em 1465 MHz, 5 GHz e 10 GHz, uma vez que os mapas nessas frequências ainda não se encontram disponíveis ou não foram produzidos. Conforme visto no Capítulo 3, o mapa de intensidade total na frequência de 1465 MHz ainda necessita de alguns ajustes, o mapa produzido em 5 GHz é um mapa de intensidade linearmente polarizada e nenhuma medida foi ainda realizada em 10 GHz. No entanto foi desenvolvida uma rotina com os mapas simulados para serem substituídos pelos mapas reais tão logo estes se encontrem disponíveis.

Os mapas simulados foram gerados a partir do mapa de intensidade total em 2300 MHz do GEM e do mapa de índice espectral calculado com os mapas de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz. No cálculo da temperatura dos mapas simulados, em cada *pixel* foi somada uma flutuação aleatória compreendida entre -5% e $+5\%$ do valor da temperatura do *pixel*, cuja amplitude foi escolhida de forma arbitrária, correspondente lido no mapa de intensidade total do GEM 2300 MHz. Tal flutuação foi adicionada para produzir mapas mais próximos dos valores que serão obtidos quando forem feitas observações reais. Assim a temperatura no mapa simulado é dada por

$$T_{i,j} = T_{2300,j} \left(\frac{\nu_i}{2300} \right)^{\beta_j} + \xi_{ij}, \quad (4.6)$$

em que i corresponde ao valor da frequência para a qual está se calculando a temperatura, j corresponde ao número do *pixel* e ξ_{ij} corresponde à flutuação somada a cada *pixel* ($-0,05T_{2300,j} \leq \xi_{ij} \leq 0,05T_{2300,j}$).

Para produzir os mapas simulados foi então desenvolvida uma rotina no *IDL* na qual os mapas de intensidade total são lidos utilizando a função *read_fits_map* do *Healpix*. Após a leitura os valores do índice espectral e da temperatura são substituídos na Equação 4.3 bem como o valor da frequência do mapa lido e da frequência desejada, e em cada *pixel* é somada a flutuação de 5%. Feito isso os valores de temperatura para a nova frequência são calculados. Com os valores de temperatura calculados é então gerado o mapa em coordenadas galácticas utilizando a função *write_fits_map* do *Healpix*. Os mapas

produzidos se encontram nas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16. Os mapas simulados possuem a mesma área de cobertura do céu que o mapa de intensidade total do GEM em 2300 MHz, uma vez que foram simulados a partir deste.

A partir dos mapas simulados, calculamos o índice espectral utilizando mais de duas frequências. Para isso uma nova rotina foi desenvolvida, na qual o índice espectral foi calculado para as cinco frequências de operação do GEM. Essa rotina foi desenvolvida com o intuito de que, tão logo sejam produzidos os mapas nessas frequências, os mapas simulados sejam substituídos para que assim possamos calcular o índice espectral em todas as frequências de operação do GEM.

Na rotina para se calcular o índice espectral para um número qualquer de frequências, os mapas de intensidade total são lidos utilizando a função *read_fits_map* do *Healpix*, na qual para cada mapa é atribuído o nome *senal(n)*, onde *n* varia de 1 ao número de frequências utilizadas. Para o caso do GEM, por exemplo, *n* varia de 1 a 5. No início da rotina são declaradas todas as variáveis que serão utilizadas da mesma maneira que foi feito para o cálculo do índice espectral para duas frequências.

Para o cálculo do índice espectral para o caso de múltiplas frequências foi utilizada uma regressão linear para mais de dois pontos e o cálculo do índice espectral agora é dado por:

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^n y_{ij} x_{ij} - \frac{(\sum_{i=1}^n y_{ij})(\sum_{i=1}^n x_{ij})}{n}}{(\sum_{i=1}^n x_{ij}^2) - \frac{(\sum_{i=1}^n x_{ij})^2}{n}} \quad (4.7)$$

em que $x_{ij} = \log \nu_{ij}$ e $y_{ij} = \log T_{ij}$ e os índices correspondem à *i-ésima* frequência utilizada e ao *j-ésimo pixel* do mapa.

Após o cálculo do índice espectral é gerado o mapa de índice espectral em coordenadas galácticas a partir dos *n* mapas de intensidade total em *n* frequências diferentes, utilizando a função *write_fits_map* do *Healpix*. O mapa da incerteza também é gerado dentro da rotina com os valores obtidos através da Equação 4.4.

Como para os mapas produzidos a partir de duas frequências, para a análise do comportamento do índice espectral calculado a partir das cinco frequências também foram aplicadas as máscaras Kp0 e Kp12 nas duas situações, ora permitindo somente a passagem do sinal do Plano Galáctico, ora o sinal fora dele. Também foram produzidos histogra-

mas de todos os mapas, dos quais foram obtidos os valores médios juntamente com sua incerteza calculada através de um ajuste gaussiano. Os mapas de índice espectral produzidos se encontram no Capítulo 5.

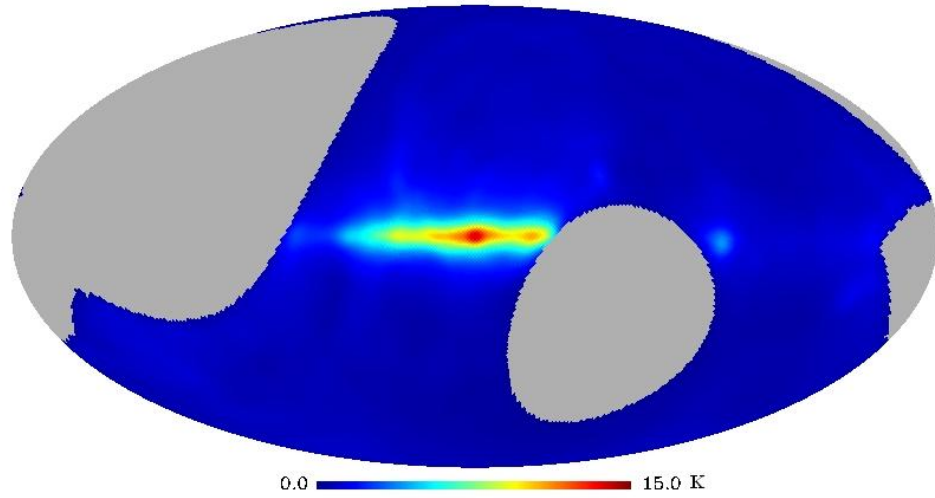


Figura 4.14: Mapa de temperatura simulado na frequência de 1465 MHz.

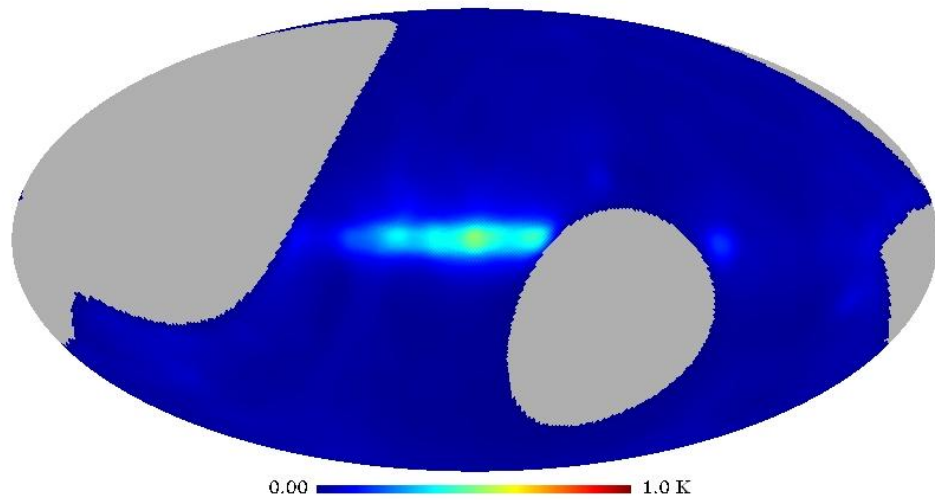


Figura 4.15: Mapa de temperatura simulado na frequência de 5 GHz.

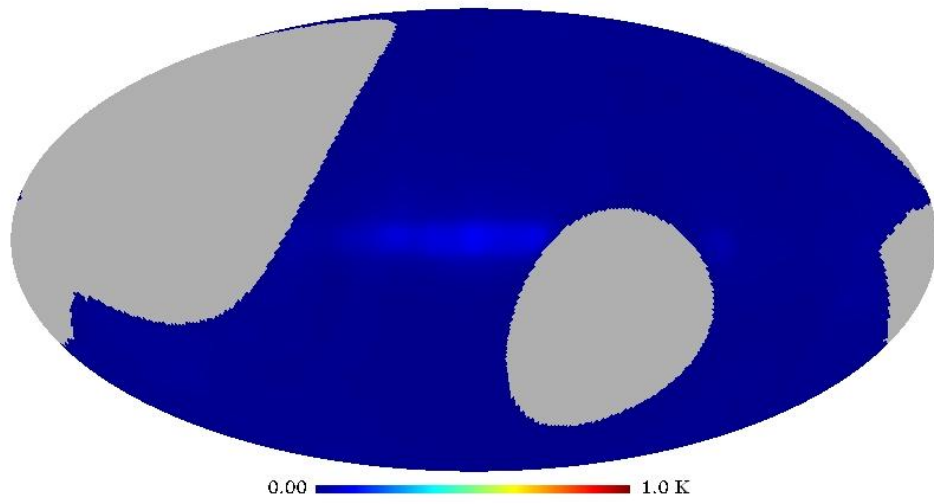


Figura 4.16: Mapa de temperatura simulado na frequência de 10 GHz.

Capítulo 5

Resultados

5.1 Haslam 408 MHz e GEM 2300 MHz

O mapa do índice espectral calculado a partir dos mapas de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz e seu mapa de incertezas se encontram nas Figuras 5.1 e 5.2. O histograma construído a partir do mapa de índice espectral nas frequências de 408 MHz e 2300 MHz se encontra na Figura 5.3. Os mapas do índice espectral com a aplicação da máscara Kp0 do WMAP permitindo ora, a passagem somente do sinal do Plano Galáctico, ora do sinal fora dele se encontram nas Figuras 5.4 e 5.5, respectivamente. Já os mapas com a aplicação da máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico e fora dele se encontram nas Figuras 5.6 e 5.7. Os histogramas dos mapas com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico e do sinal fora dele se encontram nas Figuras 5.8 e 5.9 e os histogramas dos mapas de índice espectral com a máscara Kp12 com o sinal do Plano Galáctico e o sinal fora dele estão nas Figuras 5.10 e 5.11.

Os histogramas apresentam no eixo horizontal o valor do índice espectral e no eixo vertical a frequência com que os valores do índice espectral aparecem no mapa. O comportamento do índice espectral para a região do Plano Galáctico e para a região fora dele pode ser diretamente observado nos histogramas feitos a partir dos mapas com aplicação das máscaras do WMAP. Tanto para a máscara Kp0 como para a máscara Kp12 o comportamento observado é o mesmo, o pico do histograma se encontra mais deslocado para esquerda na região fora do Plano Galáctico do que na região do Plano Galáctico, correspondendo a um índice mais suave no Plano Galáctico e mais inclinado fora dele, uma vez

que o índice espectral possui valores negativos.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos para o valor médio do índice espectral a partir dos histogramas para o mapa sem a aplicação das máscaras do WMAP e para os mapas com aplicação destas. O índice espectral médio foi obtido a partir do valor médio de uma função gaussiana ajustada sobre o histograma para cada um dos mapas com a incerteza igual a um desvio padrão.

Tabela 5.1: Índice espectral médio calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz.

Mapa	$\bar{\beta}$
Sem máscara	$-2,79 \pm 0,16$
Máscara Kp0 no Plano Galáctico	$-2,72 \pm 0,10$
Máscara Kp0 fora do Plano Galáctico	$-2,82 \pm 0,18$
Máscara Kp12 no Plano Galáctico	$-2,69 \pm 0,10$
Máscara Kp12 fora do Plano Galáctico	$-2,79 \pm 0,16$

O valor médio do índice espectral nas frequências de 408 MHz e 2300 MHz obtido do mapa sem máscara, que contém toda a região observada pelo GEM (Figura 5.1), foi $\bar{\beta} = -2,79 \pm 0,16$, estando de acordo com o valor encontrado por Giardino et al. (2002) para o Hemisfério Sul ($\bar{\beta} = -2,75 \pm 0,12$) que foi calculado para as frequências de 408 MHz (mapa de Haslam) e 2326 MHz (mapa do Rhodes/HartRAO) similares às utilizadas neste trabalho.

Segundo Bennet et al. (2003), o espectro da emissão síncrotron é bastante afetado pela propagação dos raios cósmicos, perda de energia e grau de confinamento do elétrons. Os elétrons dos raios cósmicos podem estar confinados em suas galáxias hospedeiras, ou podem deixar seus halos livremente. Os elétrons dos raios cósmicos mais confinados perdem sua energia antes de escapar do halo da Galáxia, enquanto os elétrons menos confinados escapam da Galáxia antes de perder parte de sua energia. Assim, um índice espectral mais inclinado ($\beta < -2,9$) indica uma taxa de perda de energia alta e uma taxa de escape baixa. Um índice espectral menos inclinado ($\beta > -2,9$) indica que os elétrons podem escapar da Galáxia antes de perder uma fração significativa de sua energia. Portanto, dos resultados obtidos observamos que na região do Plano Galáctico, em que $\beta = -2,72 \pm 0,10$, os elétrons devem escapar da Galáxia antes de perder parte de sua energia. Porém, nas regiões fora do Plano Galáctico (Figuras 5.5 e 5.7), em que o índice espectral é mais inclinado

($\beta = -2,82 \pm 0,18$), os elétrons perdem energia em uma taxa muito alta, permanecendo no halo da Galáxia.

Os resultados obtidos também estão de acordo com os resultados encontrados por Platania et al. (2003), que obtiveram um valor de $\beta = -2,695 \pm 0,120$ a partir dos três *surveys* nas frequências de 408 MHz, 1420 MHz e 2326 MHz.

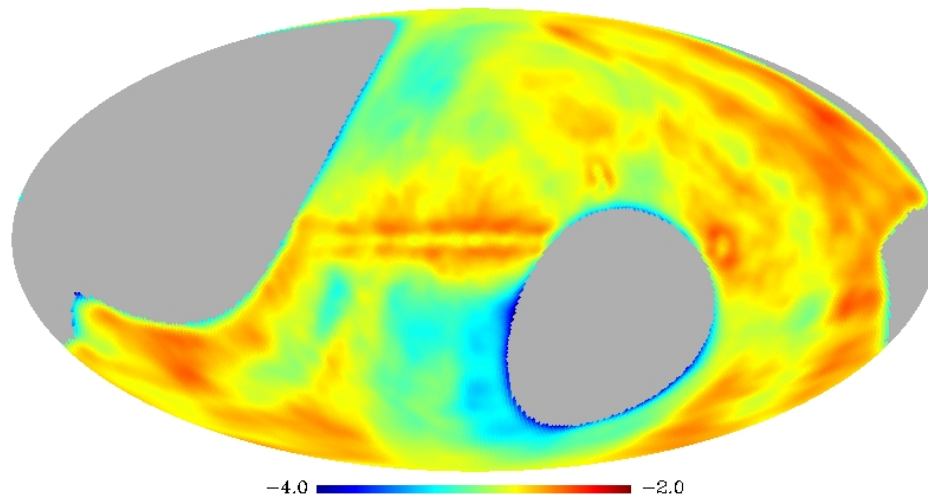


Figura 5.1: Mapa do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz.

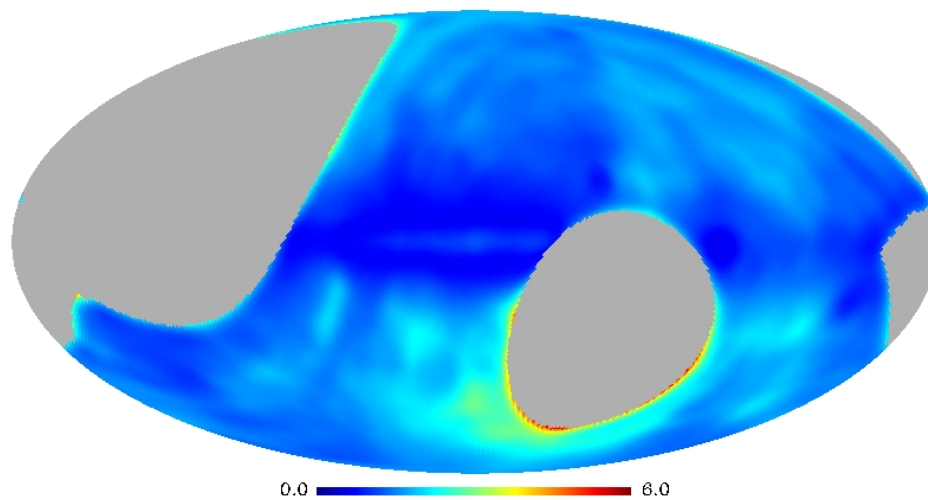


Figura 5.2: Mapa de incerteza do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz.

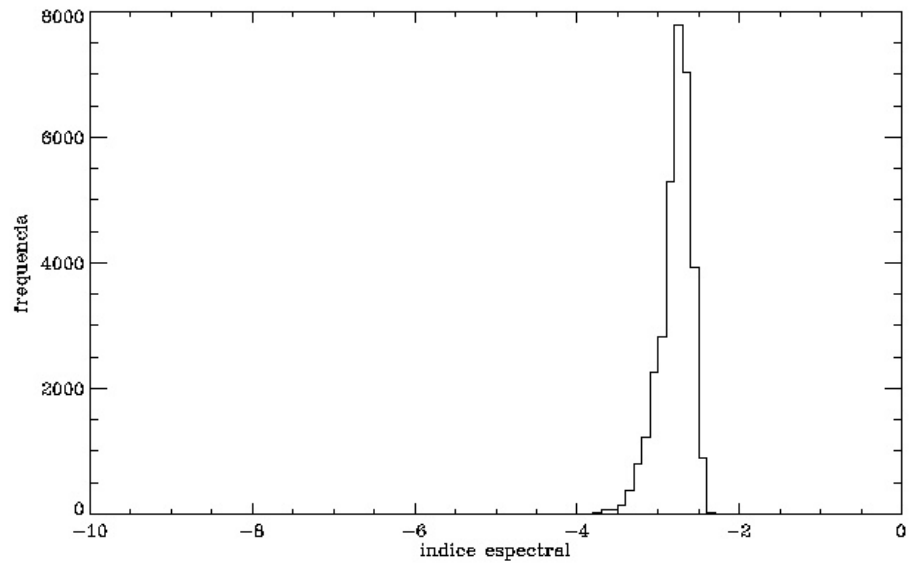


Figura 5.3: Histograma do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz.

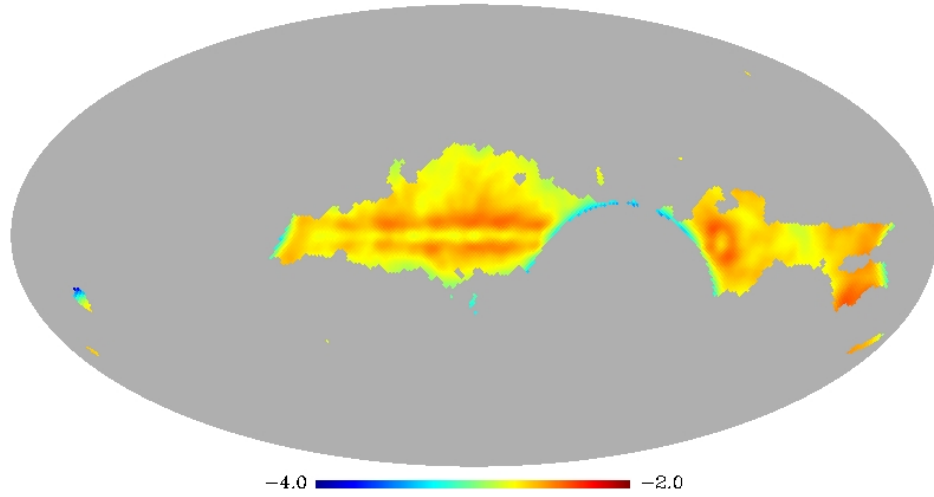


Figura 5.4: Mapa do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.

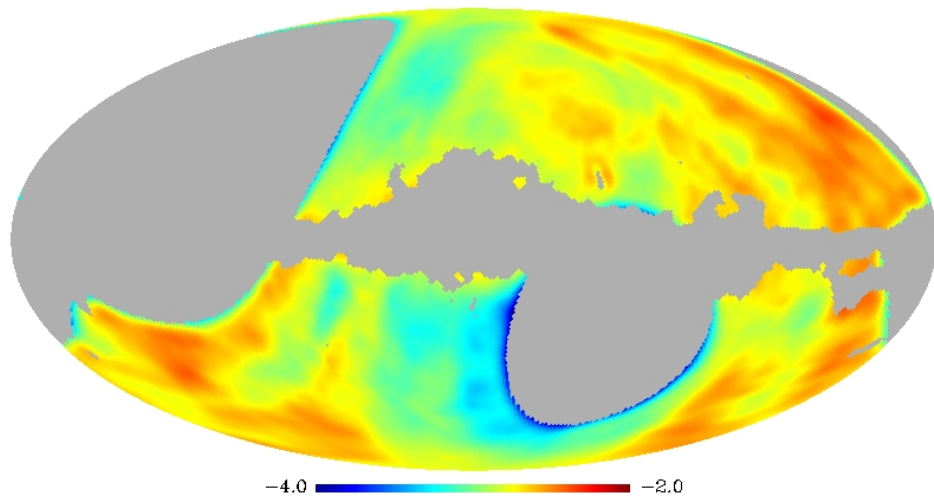


Figura 5.5: Mapa do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.

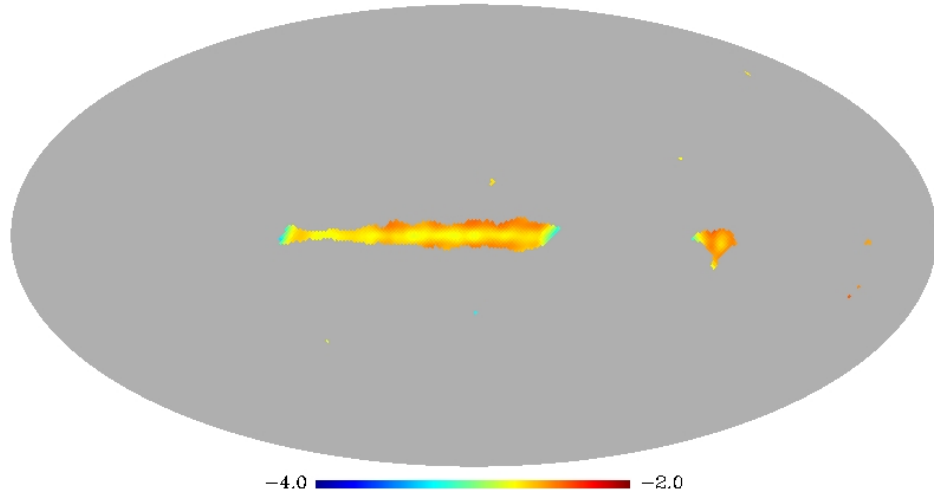


Figura 5.6: Mapa do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.

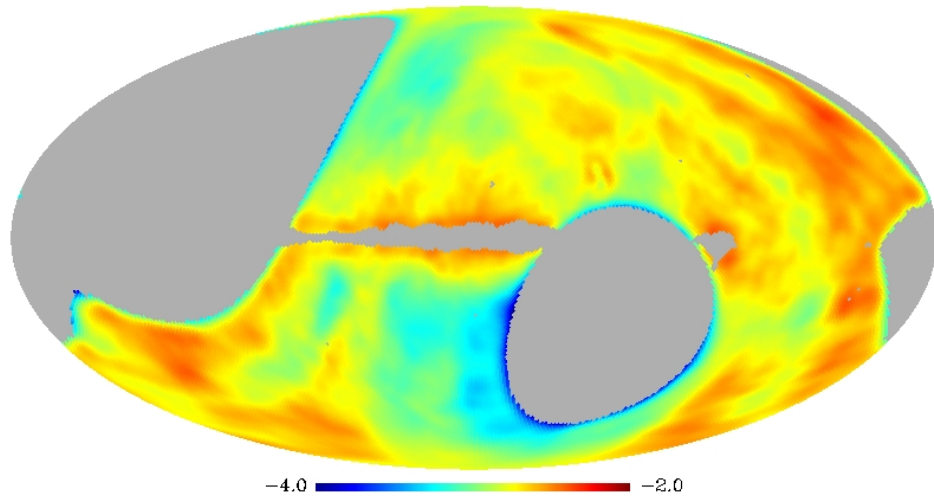


Figura 5.7: Mapa do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.

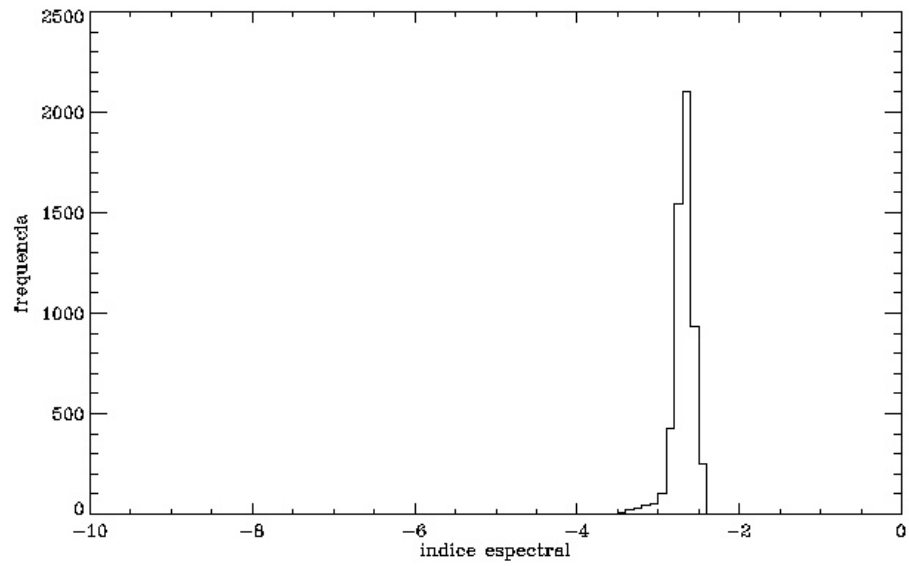


Figura 5.8: Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.

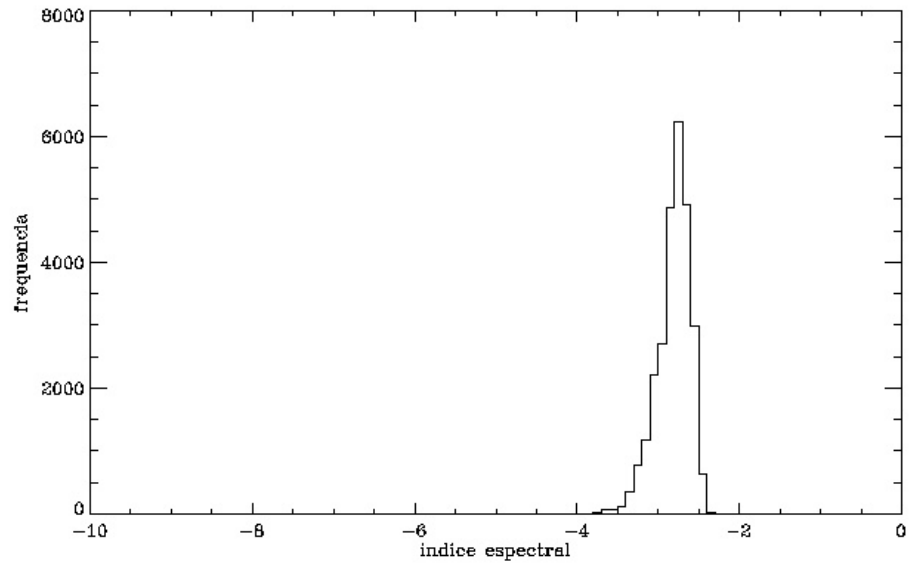


Figura 5.9: Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.

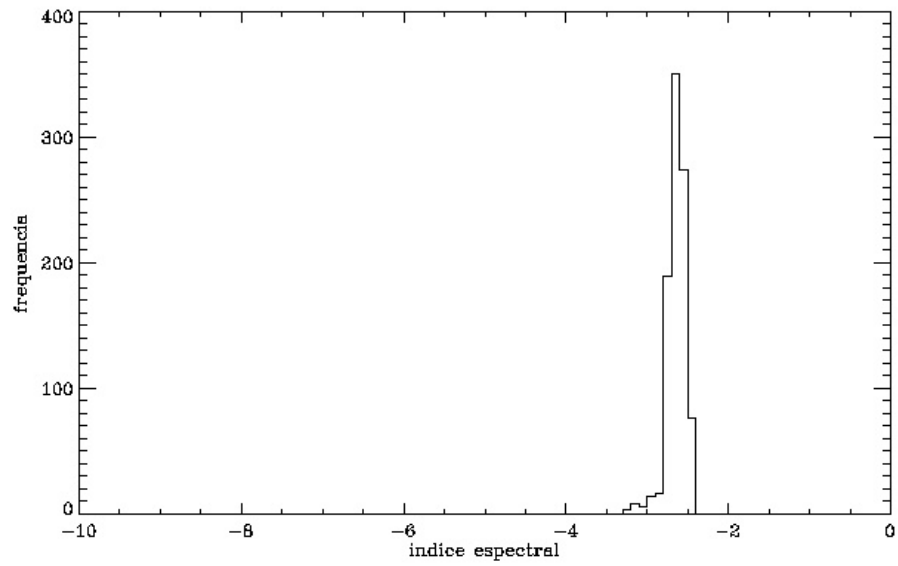


Figura 5.10: Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.

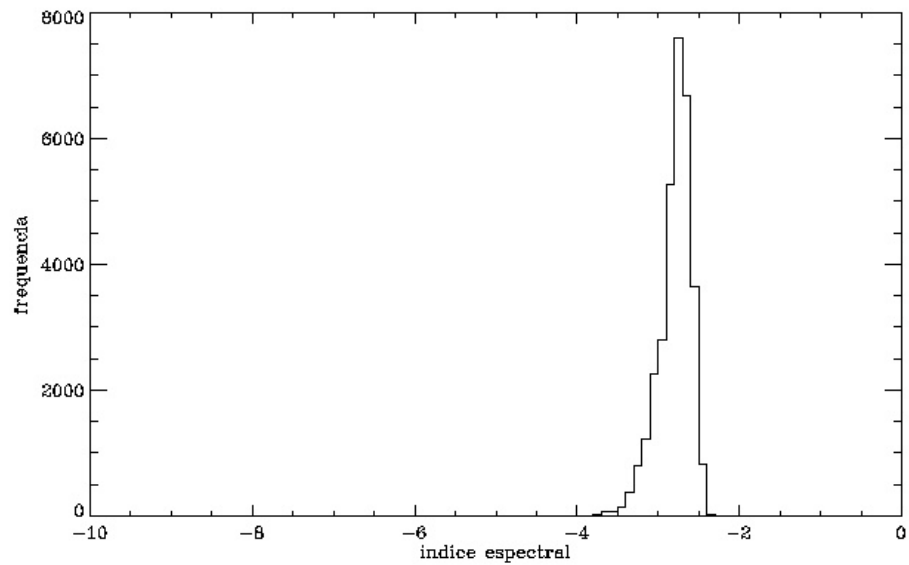


Figura 5.11: Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.

5.2 GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz

O mapa do índice espectral calculado a partir do mapas do GEM em 2300 MHz e WMAP em 23 GHz se encontra na Figura 5.12 e seu respectivo mapa de incertezas na Figura 5.13. O histograma referente ao mapa de índice espectral se encontra na Figura 5.14. Os mapas com a aplicação da máscara Kp0 do WMAP somente com o sinal do Plano Galáctico e com o sinal fora do Plano Galáctico estão nas Figuras 5.15 e 5.16, respectivamente, e os mapas com a aplicação da máscara Kp12 do WMAP se encontram nas Figuras 5.17 e 5.18. Os respectivos histogramas são apresentados nas Figuras de 5.19 a 5.22. Os valores médios do índice espectral obtidos desses mapas se encontram resumidos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Índice espectral médio calculado com os dados do GEM em 2300 MHz e WMAP em 23 GHz.

Mapa	$\bar{\beta}$
Sem máscara	$-3,45 \pm 0,38$
Máscara Kp0 no Plano Galáctico	$-2,98 \pm 0,22$
Máscara Kp0 fora do Plano Galáctico	$-3,51 \pm 0,32$
Máscara Kp12 no Plano Galáctico	$-2,50 \pm 0,25$
Máscara Kp12 fora do Plano Galáctico	$-3,46 \pm 0,37$

O mesmo comportamento do índice espectral observado na Seção 5.1, com menor inclinação para a região do Plano Galáctico, também pode ser observado nos mapas do índice espectral calculado com os dados do GEM em 2300 MHz e WMAP em 23 GHz (Figuras 5.15 e 5.17) e nos seus respectivos histogramas, nos quais fica claro que o índice espectral é mais suave no Plano Galáctico e mais inclinado fora dele. Comparando os histogramas é possível perceber que o índice espectral nessa faixa, tanto no Plano Galáctico como fora dele, é mais inclinado do que o índice espectral calculado para as frequências de 408 MHz e 2300 MHz.

O valor médio obtido para o índice espectral calculado a partir dos dados do GEM em 2300 MHz e WMAP em 23 GHz foi $\bar{\beta} = -3,45 \pm 0,38$, o que mostra uma maior inclinação em relação ao valor obtido com os dados do Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz ($\bar{\beta} = -2,79 \pm 0,16$). A diferença observada entre os dois valores é de $\Delta\beta \approx 0,6$. Segundo Bennett et al. (2003) para baixas frequências (< 10 GHz) estudos da emissão síncrotron indicam que $\beta = -2,7$, embora substanciais variações ocorram ao longo do

céu. Algumas vezes uma ‘quebra’ é vista no espectro da emissão síncrotron, a qual é útil para se determinar a idade da fonte. Em frequências acima da quebra, o índice se inclina devido a perda síncrotron, que é uma das formas de perda de energia pelos elétrons que constituem os raios cósmicos. Isso corresponde a uma variação do índice espectral de $\Delta\beta = 0,5$. Voelk (1989) prediz uma quebra no espectro de emissão síncrotron da Galáxia em 22 GHz. Portanto, o aumento da inclinação do índice espectral obtido neste trabalho para as frequências de 2300 MHz e 23 GHz pode indicar a quebra prevista para frequência acima de 22 GHz.

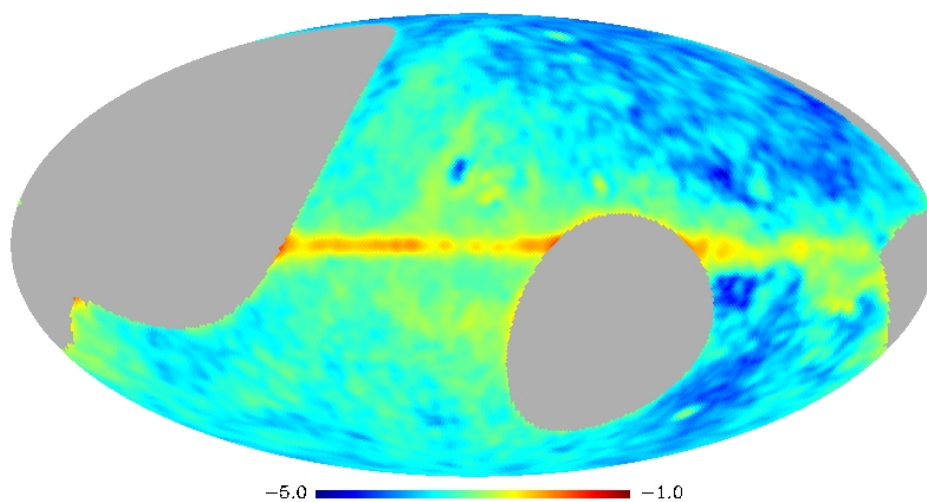


Figura 5.12: Mapa do índice espectral calculado com os dados do GEM em 2300 MHz e WMAP 23 GHz.

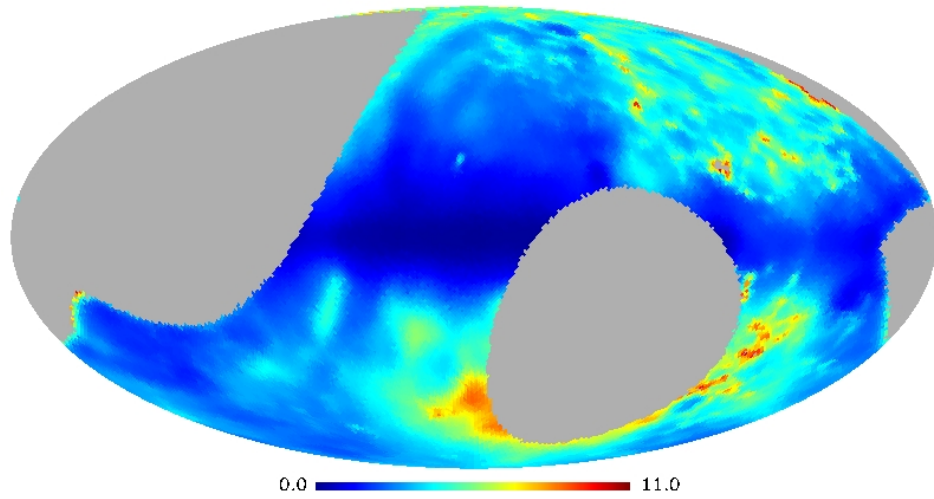


Figura 5.13: Mapa de incerteza do índice espectral calculado com os dados do GEM em 2300 MHz e WMAP 23 GHz.

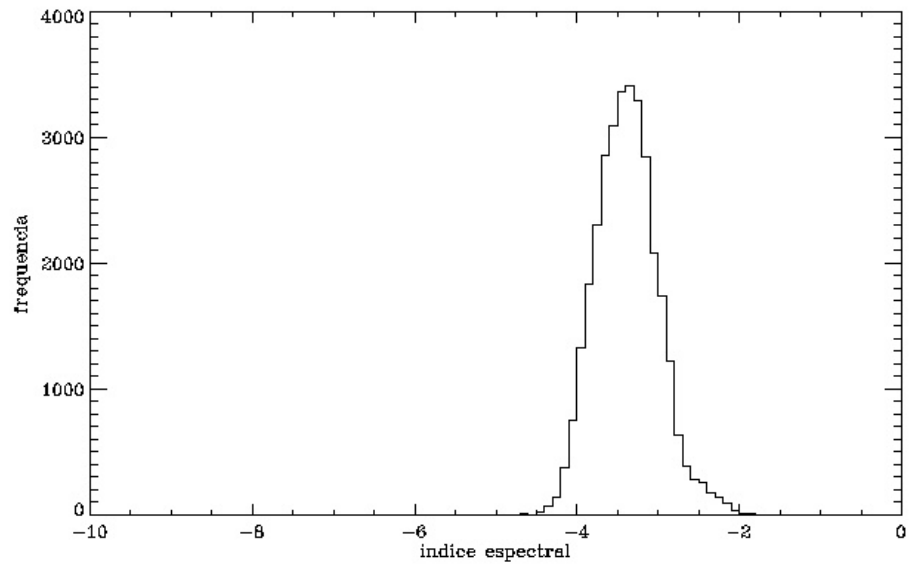


Figura 5.14: Histograma do índice espectral calculado com os dados do GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz.

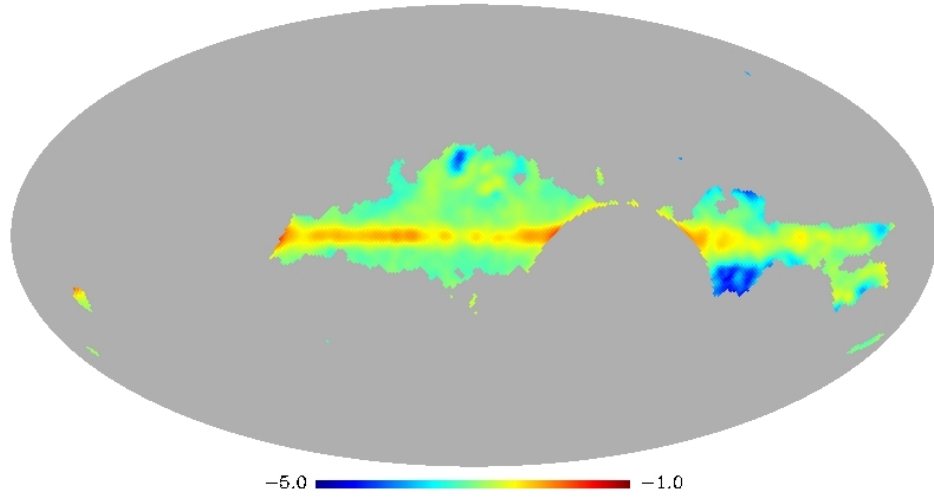


Figura 5.15: Mapa do índice espectral calculado com os dados do GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.

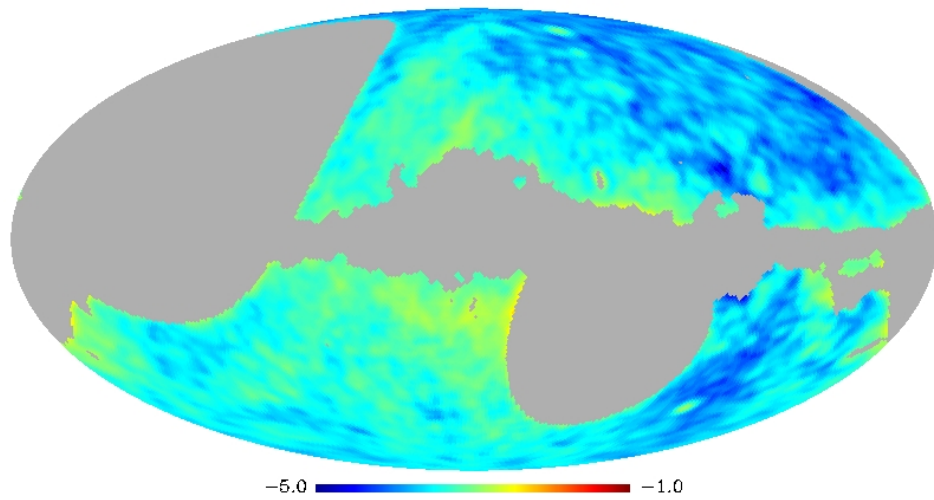


Figura 5.16: Mapa do índice espectral calculado com os dados do GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.

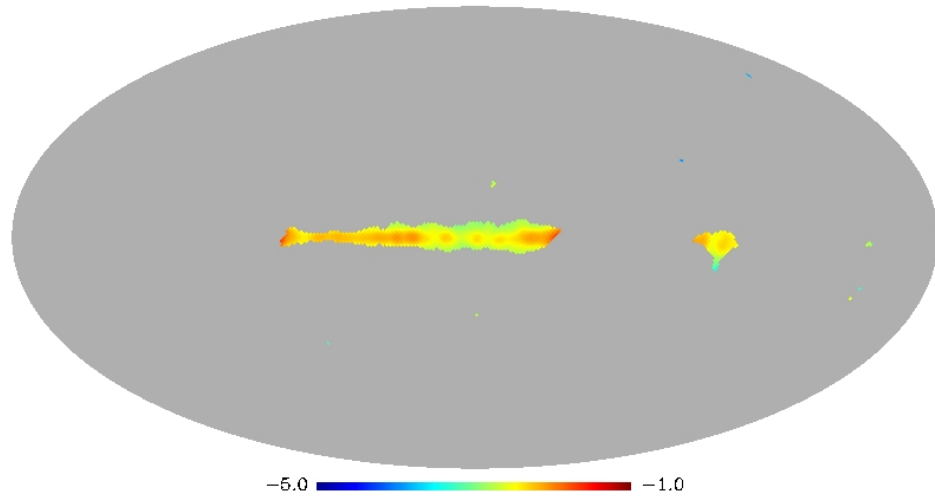


Figura 5.17: Mapa do índice espectral calculado com os dados do GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.

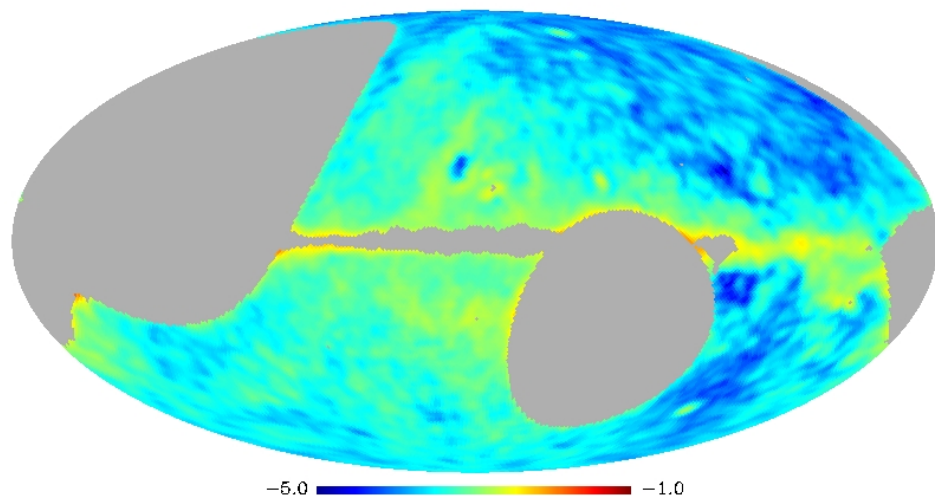


Figura 5.18: Mapa do índice espectral calculado com os dados do GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.

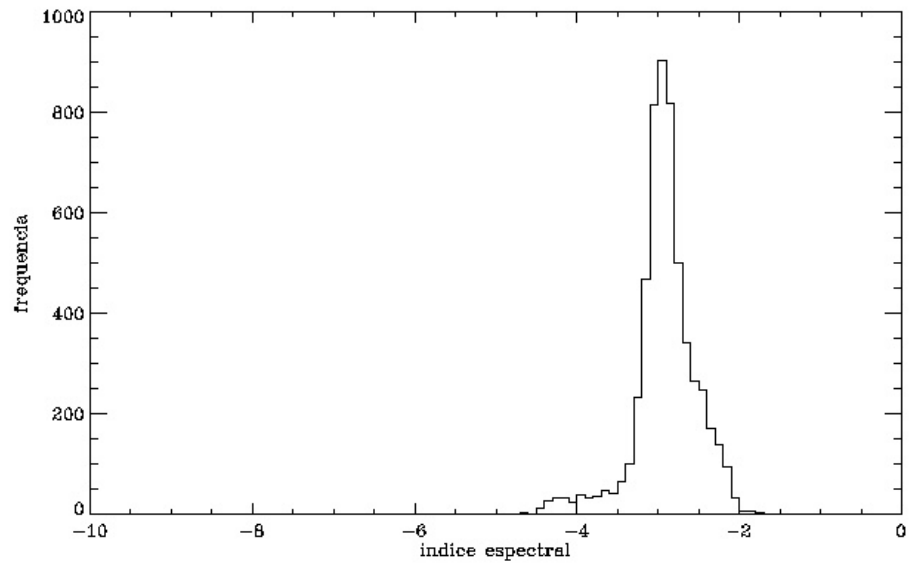


Figura 5.19: Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados do GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.

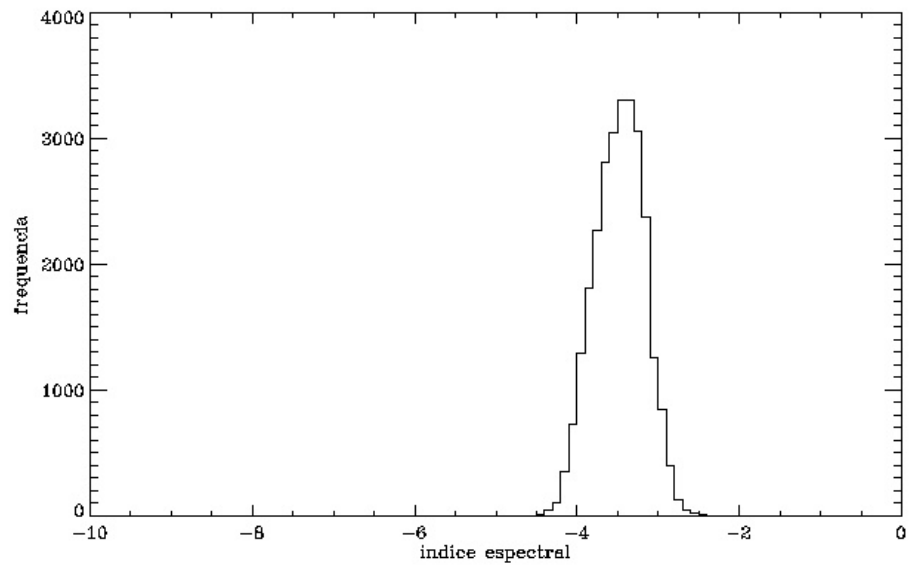


Figura 5.20: Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados do GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.

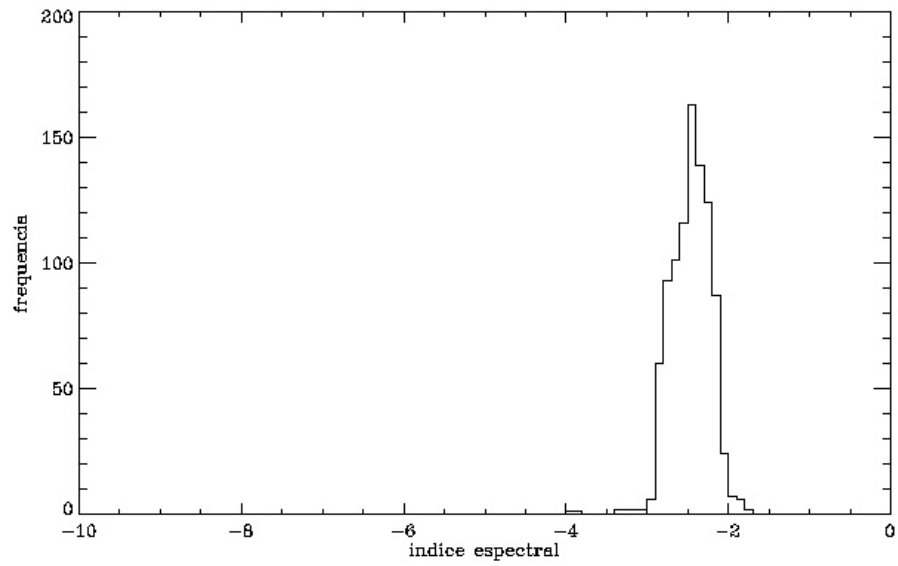


Figura 5.21: Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados do GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.

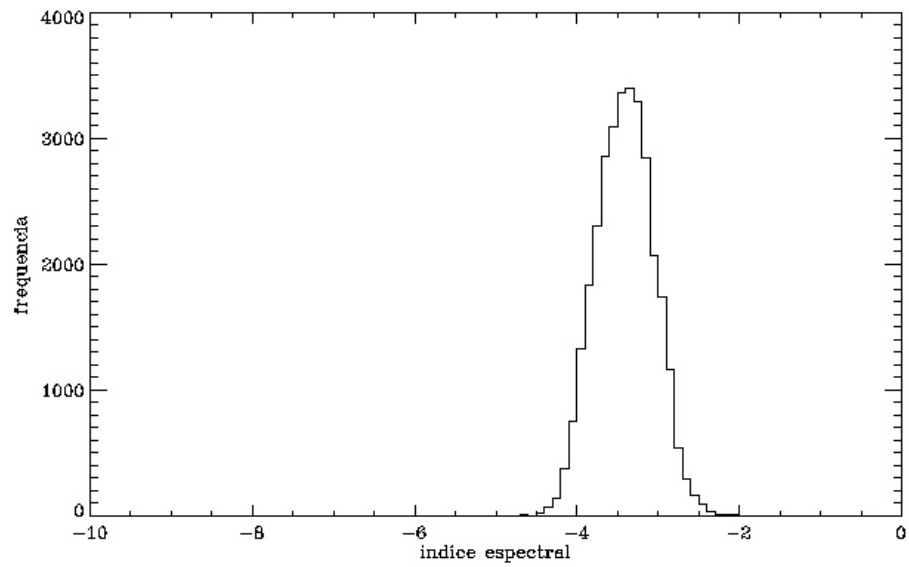


Figura 5.22: Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.

A variação no comportamento do índice espectral pode ser observada na Figura 5.23, que consiste em um gráfico do logaritmo da frequência pelo logaritmo da temperatura. O gráfico foi construído a partir de valores da temperatura extraídos dos mapas de intensidade total de Haslam em 408 MHz, GEM em 2300 MHz e WMAP em 23 GHz para um mesmo *pixel*. Entre os pontos que correspondem às temperaturas nas frequências de 408 MHz e 2300 MHz foi traçada uma reta com inclinação igual ao valor médio do índice espectral para estas duas frequências ($\beta = -2,79$) e entre os pontos cujos valores correspondem às temperaturas nas frequências de 2300 MHz e 23 GHz foi traçada uma reta com inclinação igual ao valor médio do índice espectral para estas frequências ($\beta = -3,45$). Com isso é possível perceber a variação no comportamento do índice espectral, mais inclinado entre as frequências de 2300 MHz e 23 GHz em relação às frequências de 408 MHz e 2300 MHz, o que pode ser devido à quebra prevista para frequências acima de 22 GHz.

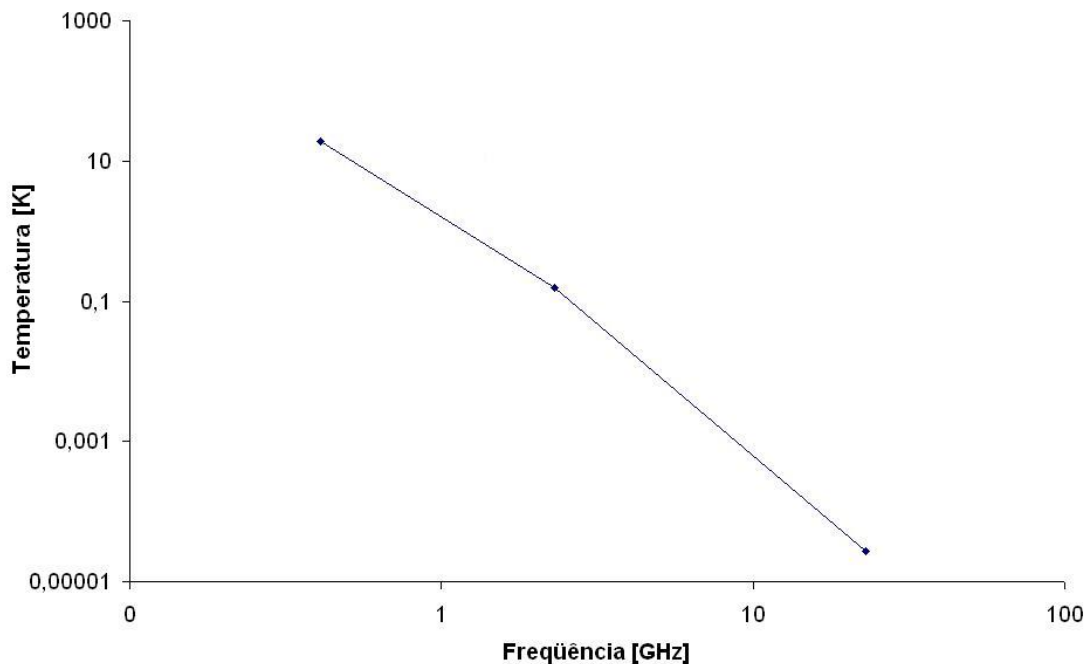


Figura 5.23: Comportamento do índice espectral calculado com os dados de Haslam 408 MHz e GEM 2300 MHz e GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz.

5.3 Múltiplas frequências

O mapa do índice espectral das frequências simuladas com seu respectivo mapa de incerteza se encontram nas Figuras 5.24 e 5.25 seu histograma na Figura 5.26. Os mapas com a máscara Kp0 com o sinal do Plano Galáctico e fora dele nas Figuras 5.27 e 5.28 os mapas com a máscara Kp12 com a passagem e sem a passagem do sinal galáctico nas Figuras 5.29 e 5.30. Os histogramas dos mapas com a máscara Kp0 que contêm somente o sinal galáctico e o sinal fora do Plano Galáctico estão nas Figuras 5.31 e 5.32 respectivamente, e para os mapas com a máscara Kp12 com o sinal no Plano Galáctico e fora dele nas Figuras 5.33 e 5.34. Os valores médios se encontram na Tabela 5.3.

A semelhança entre o mapa do índice espectral calculado a partir dos mapas de Haslam 408 MHz e GEM 2300 MHz (Figura 5.1) com o mapa do índice calculado a partir dos mapas (Figura 5.24) vem do fato de que os mapas simulados foram construídos a partir do índice espectral do primeiro, ou seja os pontos foram ajustados sobre uma curva com inclinação igual ao valor do índice (Equação 4.6).

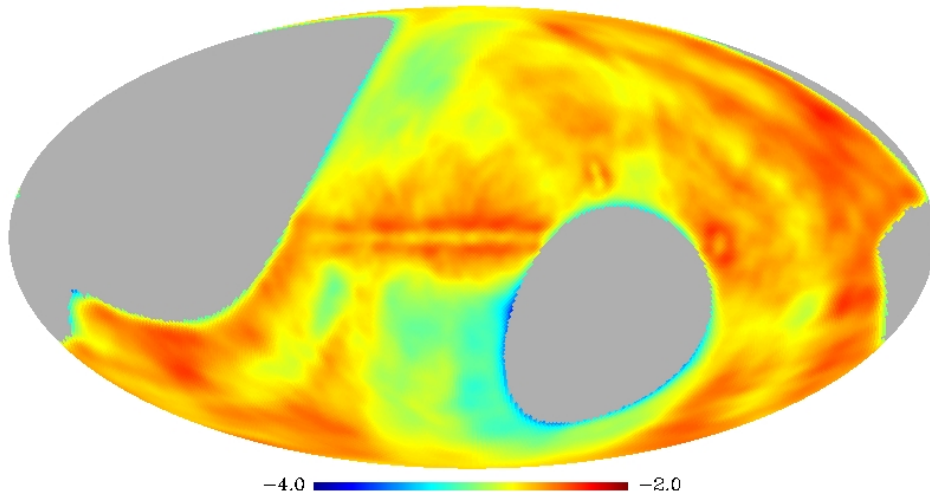


Figura 5.24: Mapa do índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados.

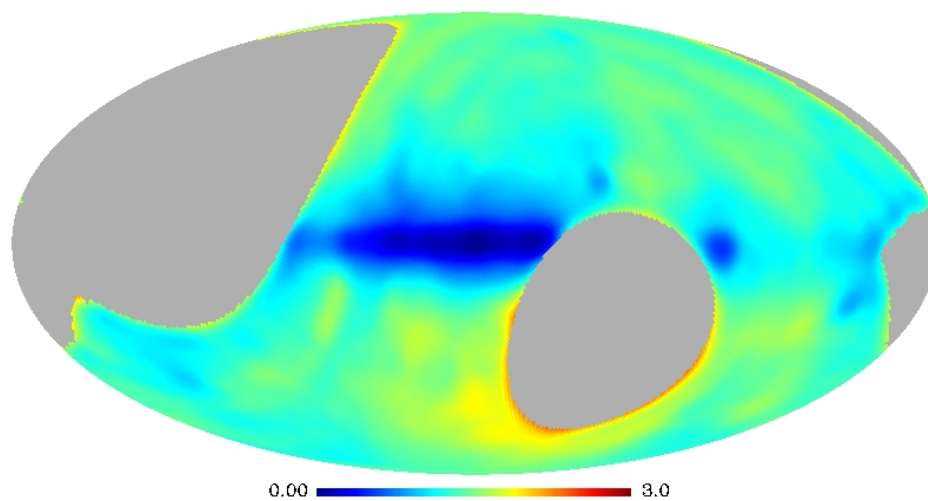


Figura 5.25: Mapa de incerteza do índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados.

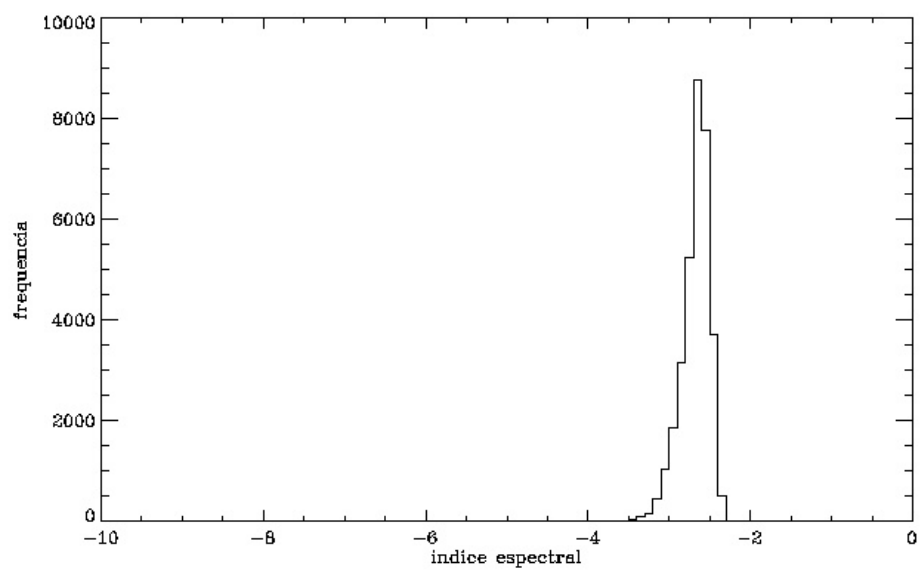


Figura 5.26: Histograma do índice espectral dos mapas simulados.

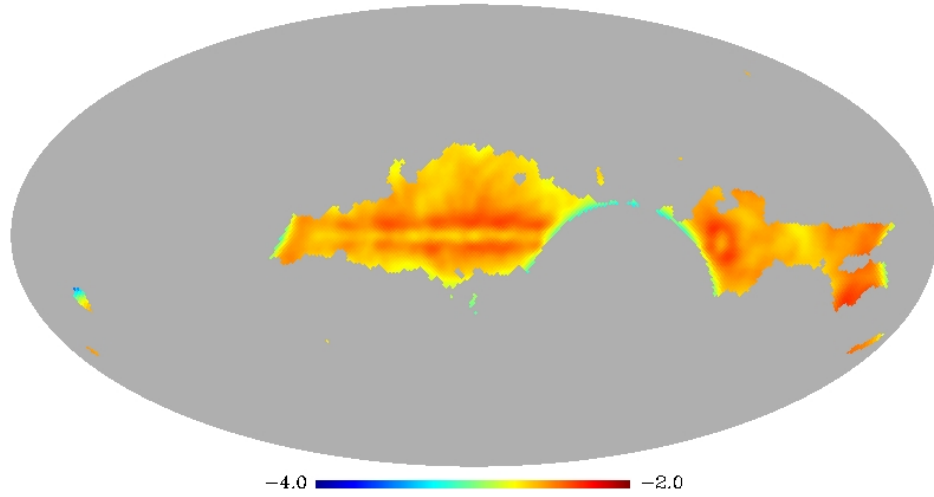


Figura 5.27: Mapa do índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.

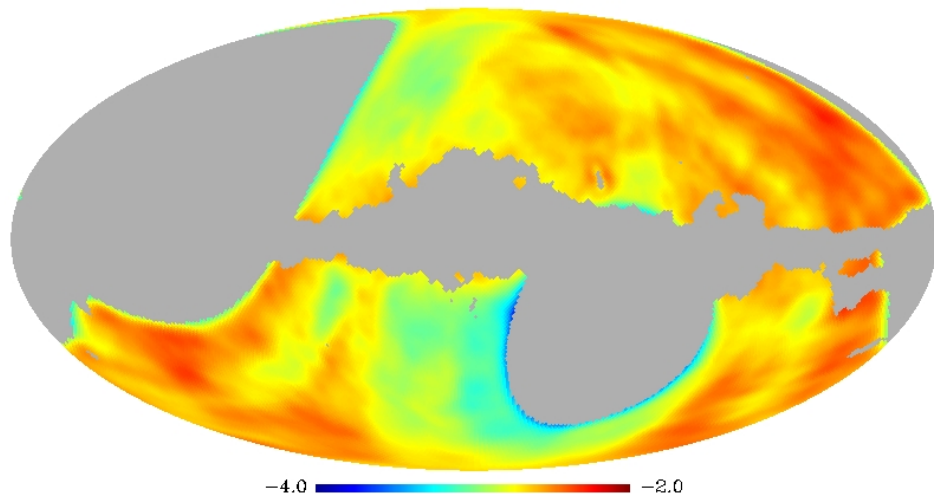


Figura 5.28: Mapa do índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.

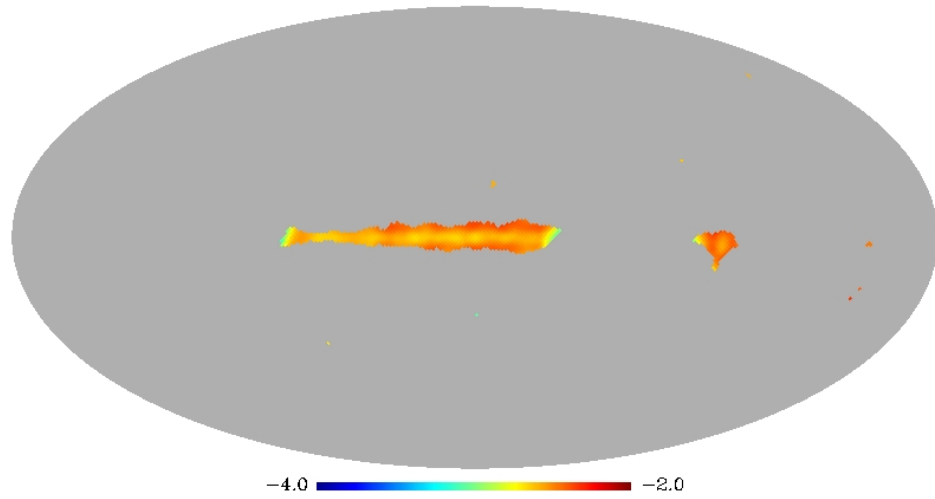


Figura 5.29: Mapa do índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.

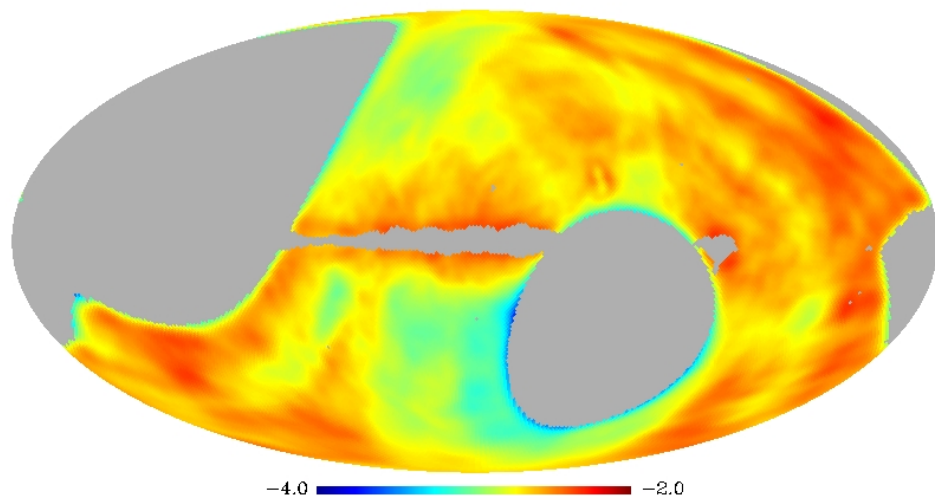


Figura 5.30: Mapa do índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.

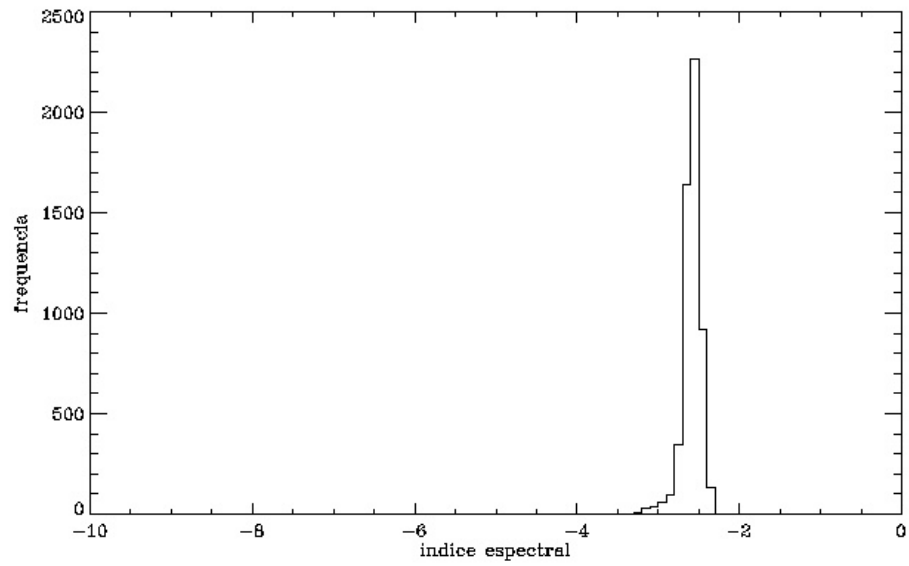


Figura 5.31: Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.

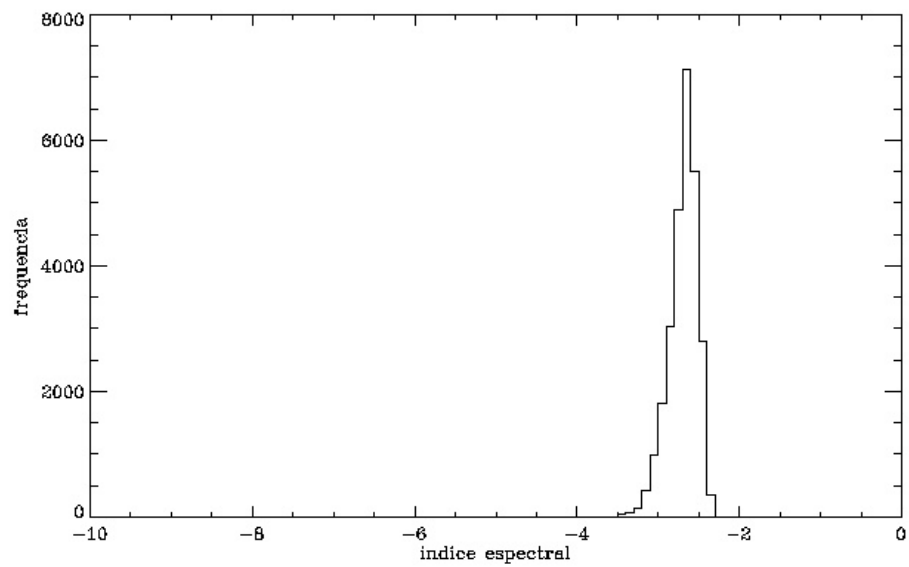


Figura 5.32: Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados com máscara Kp0 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.

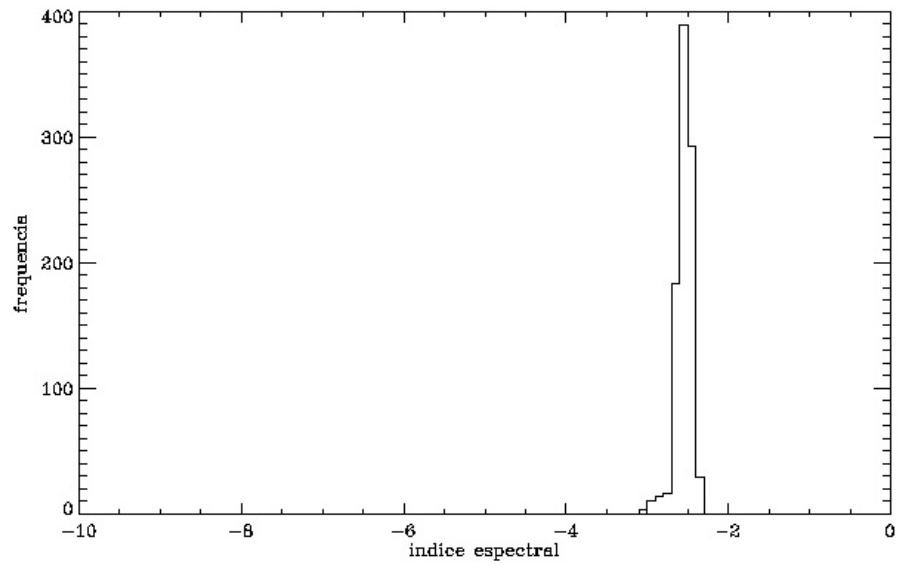


Figura 5.33: Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal do Plano Galáctico.

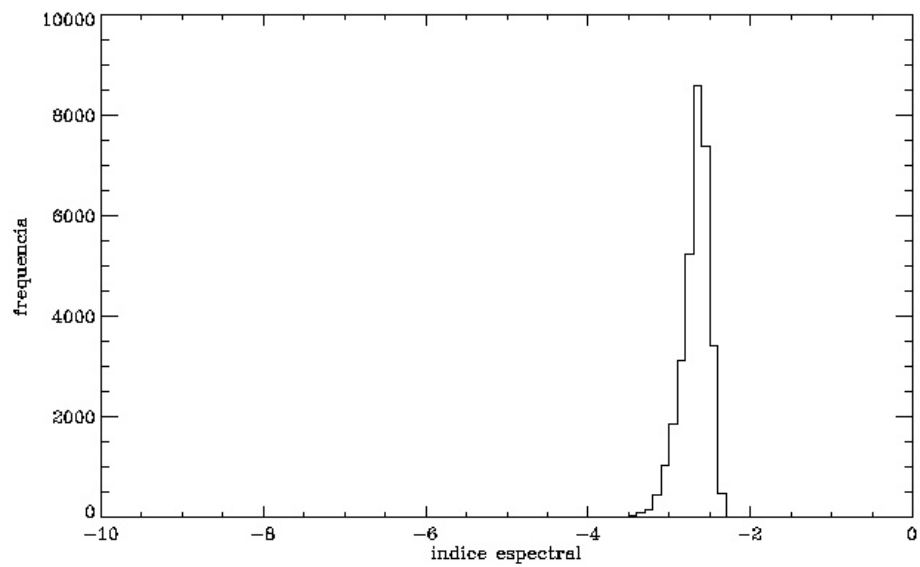


Figura 5.34: Histograma do mapa do índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados com máscara Kp12 permitindo a passagem do sinal fora do Plano Galáctico.

Tabela 5.3: Índice espectral médio calculado com os dados dos mapas simulados.

Mapa	$\bar{\beta}$
Sem máscara	$-2,68 \pm 0,14$
Máscara Kp0 no Plano Galáctico	$-2,62 \pm 0,09$
Máscara Kp0 fora do Plano Galáctico	$-2,71 \pm 0,16$
Máscara Kp12 no Plano Galáctico	$-2,60 \pm 0,09$
Máscara Kp12 fora do Plano Galáctico	$-2,70 \pm 0,15$

O comportamento do índice espectral calculado a partir dos dados simulados foi avaliado para diversas regiões da Galáxia. Para isso tomamos o valor da temperatura para cada uma das frequências utilizadas em alguns *pixels* específicos para latitudes galácticas constantes percorrendo a Galáxia em longitude em intervalos de 45° , conforme a Figura 5.35. As latitudes constantes selecionadas foram $b = 45^\circ$, $b = 0^\circ$ e $b = -45^\circ$, as quais permitem um estudo fora do plano em $b = 45^\circ$ e $b = -45^\circ$ e no plano em $b = 0^\circ$.

Para a determinação dos *pixels* nas coordenadas desejadas foi utilizada a rotina *ang2pix* do *HEALPix* que converte as coordenadas de latitude e longitude no número do *pixel*. Obtido o valor do *pixel* para cada combinação das coordenadas foram tomados os valores de temperatura em cada um desses *pixels* nos mapas de intensidade total nas frequências de 408 MHz, 1465 MHz, 2300 MHz, 5 GHz e 10 GHz. Assim, por exemplo, para o *pixel* $b = 45^\circ$, $l = 0^\circ$ foi obtido um conjunto de cinco pontos que correspondem ao valor da temperatura no *pixel* correspondente a essas coordenadas em cada uma das cinco frequências. Do mapa do índice espectral dos mapas simulados (Figura 5.24) foi selecionado o valor do índice espectral no *pixel* correspondente a cada uma das combinações de latitude e longitude.

De posse dos valores da temperatura nas cinco frequências para cada uma das combinações de latitude e longitude, os cinco pontos de cada combinação foram dispostos em um gráfico do logaritmo da frequência versus o logaritmo da temperatura e sobre cada conjunto de pontos foi traçada uma reta com inclinação igual ao valor do índice espectral obtido para aquela combinação de latitude e longitude (Figuras de 5.36 a 5.38). Dessa maneira foi possível observar o comportamento do índice espectral ao longo da Galáxia. As combinações $b = 45^\circ$ e $l = 90^\circ$, 135° e 180° ; $b = 0^\circ$ e $l = 90^\circ$, 135° , 180° e -45° e $b = -45^\circ$ e $l = -90^\circ$, e -45° se encontram nas regiões não observadas do mapa e portanto não constam nos gráficos. As regiões observadas bem como os valores do índice espectral

encontrado para cada uma delas se encontram na Tabela 5.4

Para a região ao longo de $b = 45^\circ$ pode-se observar uma superposição das retas (Figura 5.36), o que indica que não há uma variação significativa no índice espectral com a variação da longitude galáctica.

Ao longo do plano Galático ($b = 0^\circ$) percebe-se que não há uma superposição das retas e nem uma variação acentuada na inclinação destas (Figura 5.37), significando que o índice espectral não varia de maneira significativa. A separação das retas é devida à variação de temperatura na região no Plano Galático.

A Figura 5.38 mostra uma variação significativa do índice espectral ao longo da latitude galáctica $b = -45^\circ$ que é devida a um decréscimo na temperatura de antena observada na região próxima à longitude $l = 0^\circ$. Esse comportamento pode ser observado no mapa de intensidade total do GEM em 2300 MHz sem o plano da Galáxia, na região próxima à região não observada em $b = -45^\circ$ e $l = 0^\circ$ (Figura 5.39), que se apresenta mais escura que as demais regiões do mapa. Para investigar esse comportamento, geramos um gráfico das temperaturas do mapa de intensidade total do GEM em 2300 MHz nas latitudes galácticas de $b = 45^\circ$ e $b = -45^\circ$ em função da longitude galáctica. O decréscimo pode ser observado na região de longitude entre $l = 0^\circ$ e $l = 30^\circ$ (Figura 5.40), uma vez que para as demais longitudes os valores estão muito próximos, praticamente sobrepostos, exceto para as regiões que fazem parte da região não observada pelo GEM. Esse decréscimo pode ser devido a erros sistemáticos que não tenham sido devidamente corrigidos no processo de redução de dados e que, portanto, merece uma análise mais aprofundada.

Tabela 5.4: Índice espectral das regiões analisadas.

l	$b = 45^\circ$	$b = 0^\circ$	$b = -45^\circ$
0°	$-2,74 \pm 1,34$	$-2,65 \pm 0,03$	$-3,07 \pm 1,77$
45°	$-2,88 \pm 1,49$	$-2,60 \pm 0,41$	$-2,53 \pm 1,33$
90°	—	—	$-2,80 \pm 1,49$
135°	—	—	$-2,38 \pm 1,04$
180°	—	—	$-2,97 \pm 1,34$
-135°	$-2,67 \pm 1,47$	$-2,50 \pm 1,17$	$-2,55 \pm 1,42$
-90°	$-2,64 \pm 1,49$	$-2,59 \pm 1,12$	—
-45°	$-2,57 \pm 1,26$	—	—

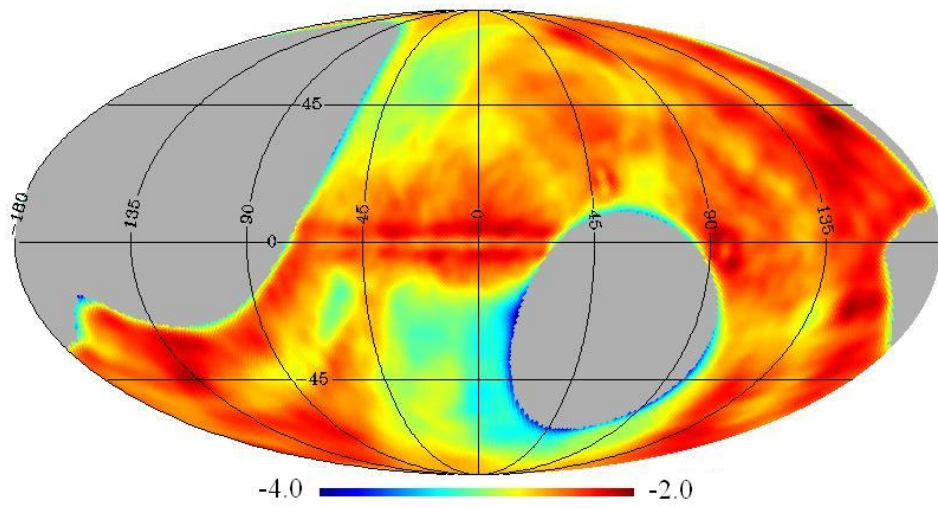


Figura 5.35: Índice espectral calculado com os dados dos mapas simulados.

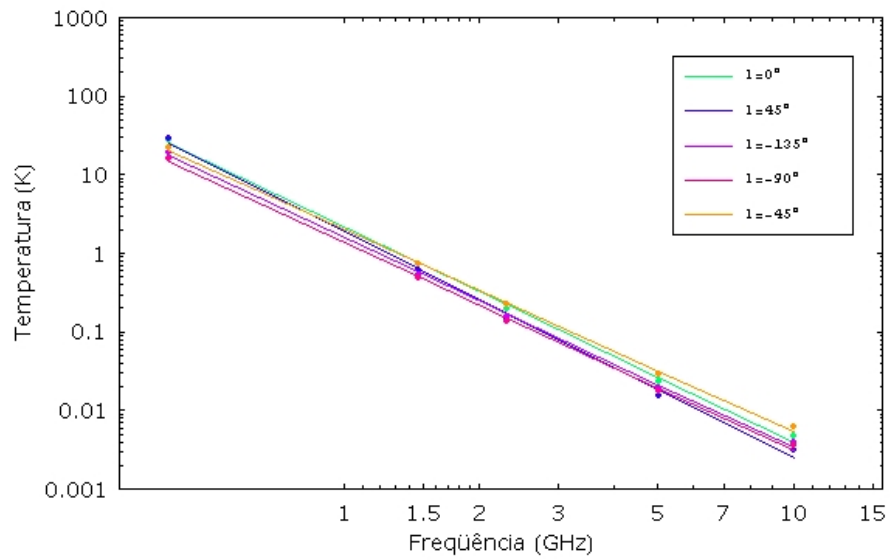


Figura 5.36: Índice espectral para $b = 45^\circ$.

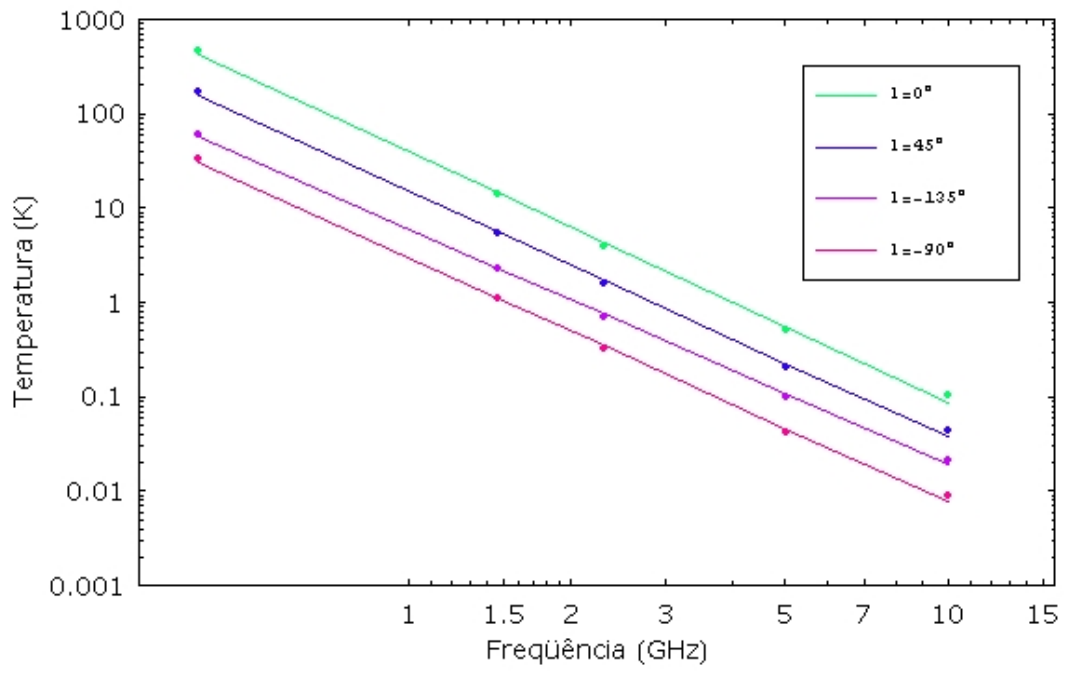


Figura 5.37: Índice espectral para $b = 0^\circ$.

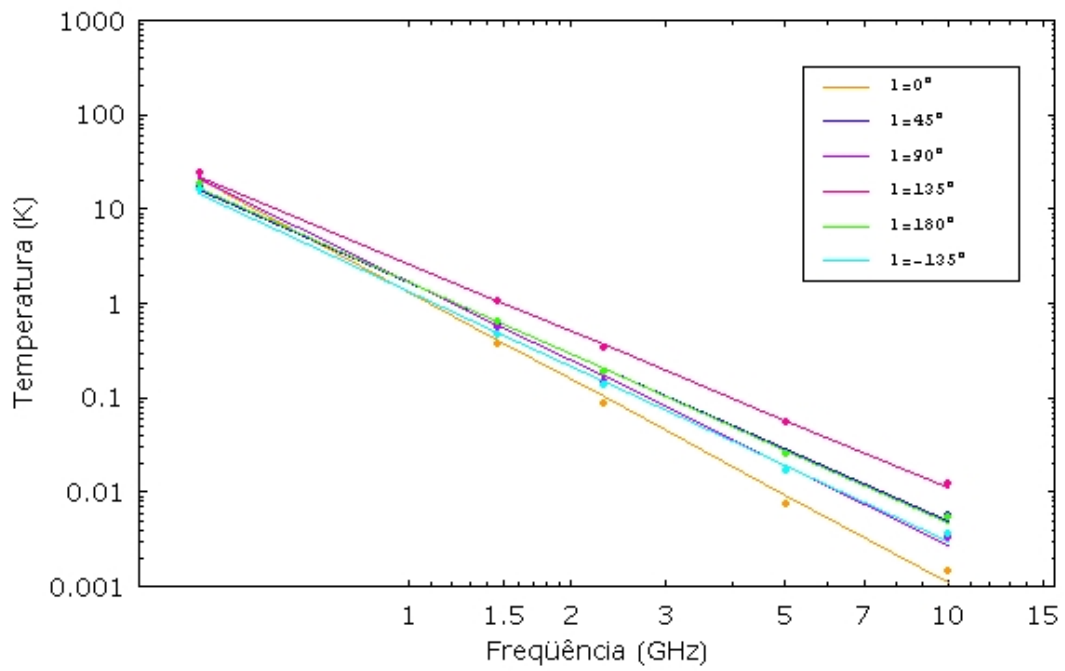


Figura 5.38: Índice espectral para $b = -45^\circ$.

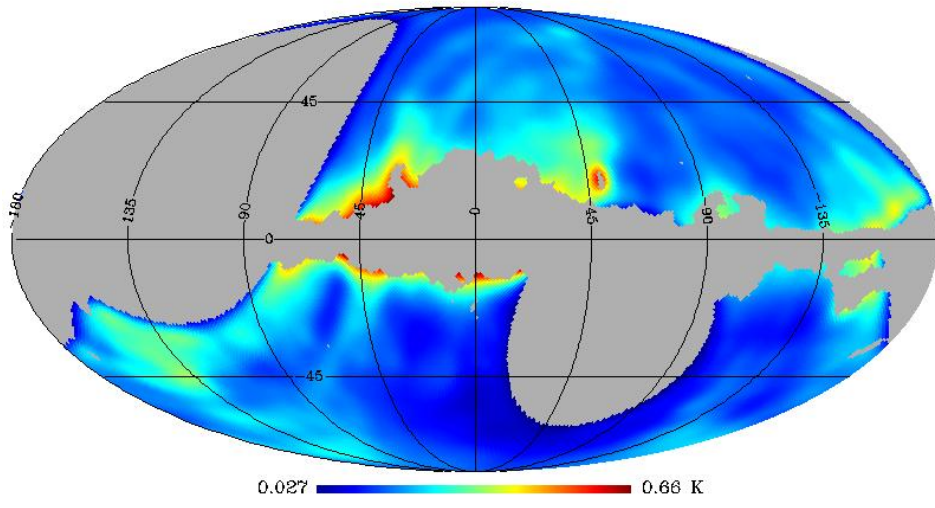


Figura 5.39: GEM em 2300 MHz sem o plano da Galáxia.

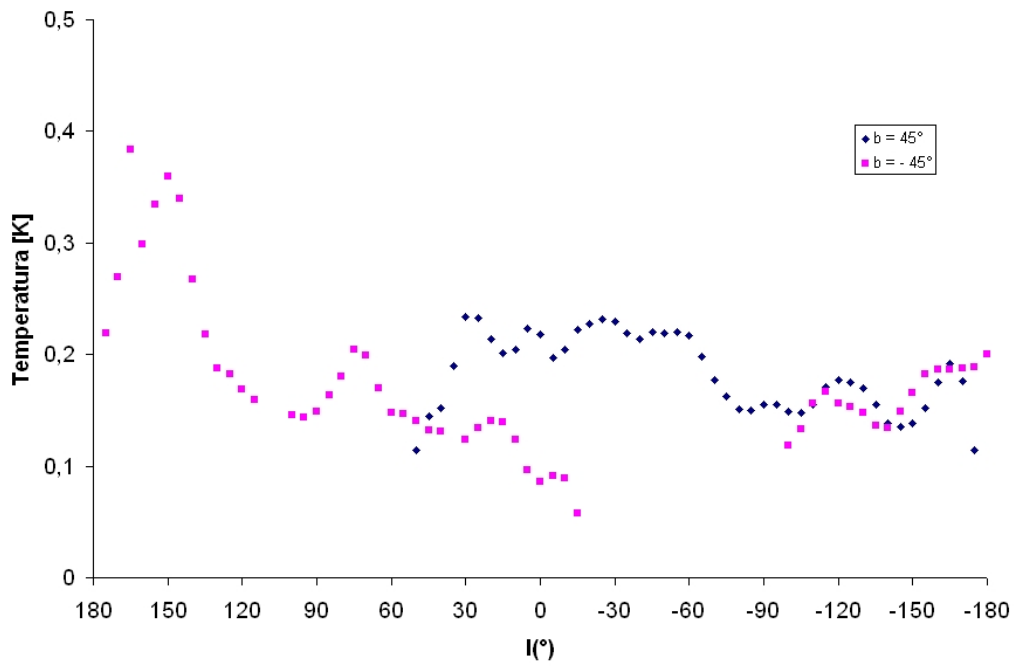


Figura 5.40: Temperatura do GEM em 2300 MHz para $b = 45^\circ$ e $b = -45^\circ$.

Capítulo 6

Conclusão

O projeto GEM utiliza um radiotelescópio portátil com uma antena de 5,5 m de diâmetro, o que facilita sua locomoção para diferentes locais de observação. A técnica de varredura utilizada mantém a antena com uma inclinação fixa em relação ao zênite, variando o azimute de 0° e 360° . O radiotelescópio é acionado a uma velocidade constante, de modo que a projeção do feixe no céu e o movimento da Terra acabam produzindo um conjunto de círculos levemente espaçados em ascensão reta que efetivamente cobrem uma faixa de declinação equivalente ao ângulo do cone zenital. O projeto produziu até agora três mapas de intensidade total nas frequências de 408 MHz, 1465 MHz e 2300 MHz e um mapa de intensidade linearmente polarizada em 5 GHz. O mapa de emissão total em 2300 MHz produzido pelas observações do projeto GEM foi utilizado nesse trabalho para a produção de *templates* do índice espectral da emissão síncrotron da Galáxia em forma de mapas em coordenadas galácticas na projeção *Mollweide*.

Para produzir os *templates* do índice espectral da emissão síncrotron foi desenvolvida uma rotina no *software* IDL (*Interactive Data Language*). Nessa rotina, o índice espectral foi calculado a partir de mapas de intensidade total nas frequências de 408 MHz e 2300 MHz e nas frequências de 2300 MHz e 23 GHz. O índice espectral foi calculado a partir da lei de potência que caracteriza a emissão síncrotron relacionando temperatura e frequência. A partir dessa relação, do valor da temperatura em cada *pixel* lido nos respectivos mapas de intensidade total e de suas frequências foi possível determinar o valor do índice espectral *pixel a pixel* e então gerar os *templates*.

Os mapas de intensidade total utilizados foram os mapas de Haslam em 408 MHz,

GEM em 2300 MHz e WMAP em 23 GHz. Uma vez que o mapa do GEM em 2300 MHz cobre somente uma área de 69% do céu e os demais mapas (Haslam 408 MHz e WMAP 23 GHz) são mapas de cobertura total do céu, uma máscara com a mesma área coberta pelo GEM foi produzida e *pixel* sobre os outros dois mapas para que o índice espectral fosse calculado na região de observação do GEM. Os mapas de Haslam em 408 MHz e WMAP 23 GHz também foram convoluídos para a resolução do GEM em 2300 MHz, 2°9.

O valor médio obtido para o índice espectral calculado com os dados de Haslam em 408 MHz e GEM em 2300 MHz foi $\bar{\beta} = -2,79 \pm 0,16$, que está de acordo com os valores encontrados por Giardino et al. (2002) que, utilizando frequências similares, obtiveram para o Hemisfério Sul um valor de $\bar{\beta} = -2,75 \pm 0,12$. O mapa também apresenta as características propostas por Bennet et al. (2003), segundo as quais um índice espectral mais inclinado ($\beta < -2,9$) indica uma taxa de perda de energia alta e uma taxa de escape baixa, enquanto que um índice espectral menos inclinado ($\beta > -2,9$) indica que os elétrons podem escapar da Galáxia antes de perder uma fração significativa de sua energia. Portanto, dos resultados obtidos temos que na região do Plano Galáctico, $\beta \approx -2,4$, os elétrons devem escapar da galáxia antes de perder parte de sua energia e nas regiões fora do Plano Galáctico com um índice espectral mais inclinado $\beta \approx -3,0$ os elétrons perdem energia em uma taxa muito alta permanecendo no halo da Galáxia. Os resultados obtidos também estão de acordo com os obtidos por Platania et al. (2003), que para as frequências de 408 MHz, 1420 MHz e 2326 obtiveram um índice espectral médio de $\beta = -2,695 \pm 0,120$.

Para o índice espectral calculado com os dados do GEM 2300 MHz e WMAP 23 GHz, o comportamento observado no mapa do índice espectral calculado entre 408 MHz e 2300 MHz se repete, ou seja, o índice espectral é mais inclinado na região fora do Plano Galáctico e menos inclinado no Plano. Porém a região do Plano Galáctico apresenta um valor médio com inclinação maior ($\bar{\beta} = -3,45 \pm 0,38$) em relação ao valor do índice espectral entre 408 MHz e 2300 MHz ($\bar{\beta} = -2,79 \pm 0,16$), o que pode ser devido a uma quebra no espectro da emissão síncrotron prevista para frequências acima de 22 GHz (Voelk, 1989).

Para produzir *templates* do índice espectral da emissão síncrotron nas cinco frequências de operação do GEM uma outra rotina foi desenvolvida no *software* IDL. A rotina foi desenvolvida para que o índice espectral fosse calculado a partir dos mapas de intensidade total nas frequências de 408 MHz, 1465 MHz, 2300 MHz, 5 GHz e 10 GHz, que são

as frequências de operação do GEM. Na rotina o índice espectral é novamente calculado através da lei de potência que relaciona temperatura e frequência característica da emissão síncrotron, porém por se tratar de mais de duas frequências foi utilizada uma regressão linear. Uma vez que nem todos os mapas nas frequências de operação do GEM já foram produzidos, e que alguns dos mapas produzidos ainda necessitam de alguns ajustes, simulamos esses mapas a partir do mapa de intensidade total em 2300 MHz e do mapa de índice espectral nas frequências de 408 MHz e 2300 MHz, acrescentando uma flutuação arbitrária de 5% no valor da temperatura em cada *pixel*. Dessa maneira foram produzidos mapas simulados nas frequências de 1465 MHz, 5 GHz e 10 GHz, que serão substituídos pelos mapas reais tão logo estes se encontrem prontos.

Uma análise do comportamento do índice espectral calculado a partir dos dados dos mapas simulados foi feita percorrendo o mapa em longitude galáctica para as latitudes $b = 45^\circ$, $b = 0^\circ$ e $b = -45^\circ$. Dessa análise foi possível perceber que para o Hemisfério Norte galáctico o índice espectral não varia de maneira significativa, o mesmo acontecendo para o Plano Galáctico. Porém, para o hemisfério sul, uma variação no valor do índice espectral foi percebida, ocorrendo em uma região em que existe um decréscimo na temperatura de antena observada na região próxima à longitude $l = 0^\circ$ no mapa de emissão total do GEM em 2300 MHz. Tal decréscimo pode ser devido a erros sistemáticos que não tenham sido devidamente corrigidos no processo de redução de dados e que, portanto, merece uma análise mais aprofundada.

Bibliografia

- Bennett, C.; Hill, R.; Hinshaw, G.; Nolta, M.; Odegard, N.; Page, L.; Spergel, D.; Weiland, J.; Wright, E.; Halpern, M.; Jarosik, N.; Kogut, A.; Limon, M.; Meyer, S.; Tucker, G.; Wollack, E. First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Foreground Emission. *ApJS.*, **148**: 97, 2003.
- Ferreira, I.S. Polarização da radiação galáctica em 5 GHz: Instrumentação, medidas e mapas, tese de doutoramento, INPE, São José dos Campos, 2008.
- Giardino, G.; Banday, A.; Górski, K.; Bennett, K.; Jonas J.; Tauber J. Towards a model of full-sky Galactic synchrotron intensity and linear polarisation: a re-analysis of the Parkes *A & A*, **387**: 82, 2002.
- Górski, K.; Hivon, E.; Banday, A.; Wandelt, B.; Hansen, F.; Reinecke, M.; Bartelmann, M. HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere, *ApJS.*, **622**: 759, 2005.
- Haslam, C. G. T.; Stoffel, C. J.; Wilson, W. E. A 408 MHz all-sky continuum survey. II. The atlas of contour maps. *A & AS*, **47**: 1, 1982.
- Jonas, J; Baart, E. E.; Nicolson, G. D. The Rhodes/HartRAO 2326-MHz radio continuum survey MNRAS, **297**: 997, 1998.
- Longair, M. *High Energy Astrophysics*, Cambridge, v1 1992.
- Longair, M. *High Energy Astrophysics*, Cambridge, v2 1994.
- Lawson, K. D.; Mayer, C. J.; Osborne, J. L.; Parkinson, M. L. Variations in the Spectral Index of the Galactic Radio Continuum Emission in the Northern Hemisphere MNRAS, **255**: 307, 1987.

- Pearson, T. e C-BASS collaboration, C-Bass: C- Band All-Sky Survey. American Astronomical Society Meeting Abstracts., **211**: 90, 2007.
- Platania, P.; Burigana, C.; Maino, D.; Caserini, E.; Bersanelli, M.; Cappellini, B.; Mennella, A. Full sky study of diffuse Galactic emission at decimeter wavelengths, *A & A*, **410**: 847, 2003.
- Reich W. A radio continuum survey of the northern sky at 1420 MHz. I. *A & AS*, **48**: 219, 1982.
- Reich, P. & Reich W. A radio continuum survey of the northern sky at 1420 MHz. II. *A & AS*, **63**: 205, 1986.
- Reich, P. & Reich, W. A map of spectral indices of the Galactic radio continuum emission between 408 MHz and 1420 MHz for the entire northern sky. *A & AS*, **74**: 7, 1988.
- Rybicki, G.; Lightman, A. *Radiative Processes in Astrophysics*, Wiley, 1985.
- Schlegel, David J.; Finkbeiner, Douglas P.; Davis, Marc. Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds. *ApJS*, **500**: 525, 1998.
- Smoot, G. F.; Bennett, C. L.; Kogut, A.; Wright, E. L.; Aymon, J.; Boggess, N. W.; Cheng, E. S.; de Amici, G.; Gulkis, S.; Hauser, M. G.; Hinshaw, G.; Jackson, P. D.; Janssen, M.; Kaita, E.; Kelsall, T.; Keegstra, P.; Lineweaver, C.; Loewenstein, K.; Lubin, P.; Mather, J.; Meyer, S. S.; Moseley, S. H.; Murdock, T.; Rokke, L.; Silverberg, R. F.; Tenorio, L.; Weiss, R.; Wilkinson, D. T. Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps. *ApJL*, **396**: 1, 1992.
- Smoot, G. F. CMB Synchrotron Foreground. arxiv: 9902201v1, 1999.
- Souza, R., Um mapa da emissão galáctica em 408 MHz. Dissertação de mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos Brasil, 2000.
- Oliveira, A. F. Determinação da polarização da emissão galáctica em 5 GHz. Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá, 2009.

- Tello, C. Um experimento para medir o brilho total do céu em baixas frequências. Tese de doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, 1997.
- Tello, C.; Villela, T.; Smoot, G. F.; Torres, S.; Bersanelli, M. A New Radio Continuum Survey of the Sky at 1465 MHz between declinations -52° and $+68^\circ$. *IAUS.*, **201**: 138, 2005.
- Tello, C.; Villela, T.; Torres, S.; Bersanelli, M.; Smoot, G.; Ferreira, I.; Cingoz, A.; Lamb, J.; Barbosa, D.; Perez-Becker, D.; Ricciardi, S.; Currivan, J.; Platania, P.; Maino, D. The 2.3 GHz continuum survey of the GEM project. *A&A.* (submetido), arxiv:0712.3141, 2007.
- Tello, C.; Villela, T.; Ferreira, I.; Smoot, G. The 1465 GHz continuum survey of the GEM project, in preparation, 2008.
- Torres S., Comunicação Pessoal, 1995.
- Torres, S.; Cañon, V.; Casas, R.; Umaña, A.; Tello, C.; Villela, T.; Bersanelli, M.; Bensadoun, M.; de Amici, G.; Limon, M.; Smoot, G.; Witebsky, C. The GEM project: An international collaboration to survey galactic radiation emission. *ApJSS.*, **240**: 225, 234, 1996.
- Voelk, H. J. The correlation between radio and far-infrared emission for disk galaxies - A calorimeter theory *A&A.*, **218**, 67, 1989.