

Campo Magnético Galáctico

Pedro Gonçalves Queiruga

Sumário

- 1 Introdução
- 2 Modelo ASS e BSS
- 3 CRPropa
- 4 Modelo de Campo Magnético de Jansson & Farrar

Introdução

- O campo magnético galáctico (GMC¹) preenche o meio interestelar (ISM²) exercendo um papel significativo em diversos processos astrofísicos e na física de partículas.
- Acredita-se que o GMC é gerado e mantido pelo efeito dínamo no ISM. [<https://news.mit.edu/2022/how-universe-got-its-magnetic-field-0525>]

¹Galactic Magnetic Field

²Interstellar Medium

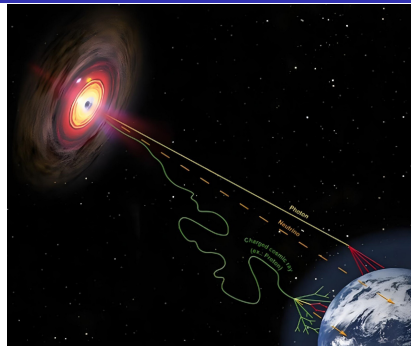


Figure 1: Propagação de diferentes partículas no ISM, saindo de uma fonte arbitrária no espaço.

Métodos de observação

Os métodos utilizados para examinar e estimar o GMC são:

- **Medidas do espalhamento Zeeman;**
- **Estudos de polarização infravermelha;**
- **Estudos da emissão síncrotron polarizada;**
- **Estudo da polarização da luz das estrelas**
- **Observação das medidas de rotação de Faraday de diferentes fontes de rádio galáctica (pulsares) ou extragalácticas.**

Componentes do GMC

- **Campo regular de larga escala:** É esperado que possua um fator dominante sobre deflexões de partículas de ultra alta energia;
- **Campo aleatório de pequena escala:** Vem de diversos fenômenos como supernovas e turbulência hidrodinâmica. Esse tipo de campo tem escalas menores que 2 kpc e possuem flutuações de campos em escalas 10 vezes menores que a escala geral;
- **Campo estriado aleatório:** Temos a orientação dele alinhada em uma grande escala, mas sua força e sinal varia em uma escala menor. Podem ser produzidos por rotação diferencial de um meio que contem campos aleatórios de pequena escala.

Componentes do GMC

Outras duas divisões que podemos fazer ao falar do GMC são:

- **Disco;**
- **Halo.**

O campo do halo não é uma versão mais fraca do campo presente no disco, muito pelo contrário. Ao estudar a estrutura do campo é possível ver que o halo possui uma forma diferente.

Modelo de campo magnético galáctico ASS e BSS

A construção desse modelo se dá baseada nas medidas de rotação de Faraday.

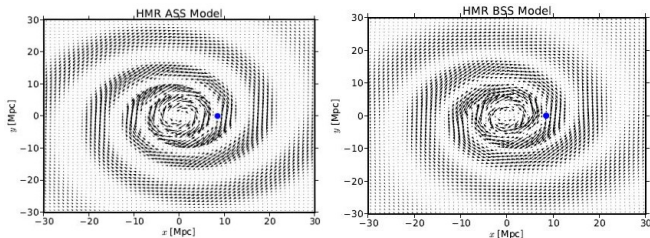


Figure 2: Modelos de campo magnético galáctico, a esquerda temos o ASS e a direita temos o modelo BSS.

Descrição Matemática

Esse modelo é descrito em coordenadas cilíndricas galactocêntricas. A forma do campo magnético é descrita por:

$$B_{sp} = B_0(\rho) \cos \left(\theta - \beta \ln \left(\frac{\rho}{\xi_0} \right) \right), \quad (1)$$

$$B_{sp} = B_0(\rho) \cos^2 \left(\theta - \beta \ln \left(\frac{\rho}{\xi_0} \right) \right), \quad (2)$$

onde $\beta = 1/\tan p$. A amplitude $B_0(\rho)$ é descrita por:

$$B_0(\rho) = \frac{3r_0}{\rho} \tanh^3(\rho/\rho_1) \mu\text{G} = \frac{3r_0}{\rho} \tanh^3(\rho/\rho_1) \cdot 10^{-10}\text{T}, \quad (3)$$

Descrição Matemática

As componentes radial e azimutal do campo magnético são então:

$$B_{\rho} = B_{sp} \sin \rho, \quad (4)$$

$$B_{\theta} = B_{sp} \cos \rho. \quad (5)$$

A dependência em z possui uma queda exponencial onde assumimos duas escalas de comprimento diferentes, que correspondem a contribuição do disco e do halo. Dessa forma, o campo magnético é

$$B(\rho, \theta, z) = B(\rho, \theta, z = 0) \left(\frac{1}{2 \cosh(z/z_1)} + \frac{1}{2 \cosh(z/z_2)} \right). \quad (6)$$

Constantes do modelo

Definição	Constante
Distância galactocêntrica do máximo do campo na espiral do braço	$\xi_0 = 10,55 \text{ kpc}$
Ângulo entre as direções ρ e θ	$\rho = -10^\circ = -0,1745$
Distância do Sol para o centro galáctico	$r_0 = 8,5 \text{ kpc}$
Fator de escala	$\rho_1 = 2 \text{ kpc}$
Contribuição do disco	$z_1 = 0,3 \text{ kpc}$
Contribuição do Halo	$z_2 = 4 \text{ kpc}$

Table 1: Tabela com os valores das constantes utilizadas no cálculo do campo magnético galáctico.

CRPropa: Propagação de partículas

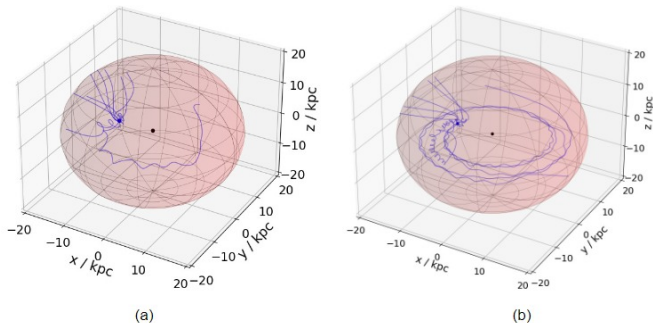


Figure 3: Nas duas imagens temos a propagação de partículas no GMC. A esquerda temos um próton e a direita uma partícula de hélio. As duas possuem uma energia de 10^{18} eV

Partícula de ferro e hidrogênio em altas energias

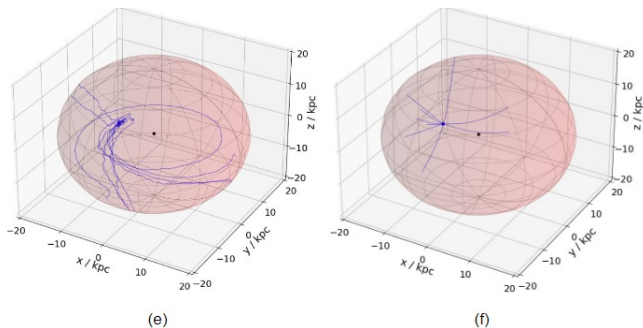


Figure 4: A esquerda temos uma partícula de ferro se propagando a 10^{18} eV, enquanto na direita temos um próton a 10^{20} eV.

Construção dos gráficos

Para construir os gráficos do CRPropa, é necessário se utilizar de alguns módulos que fazem a propagação ocorrer como observada:

- **PropagaçãoCK;**
- **Campo Magnético de Jansson & Farrar;**
- **Limites esféricos;**
- **Emissão isotrópica;**
- **Energia de 1 EeV e 100 EeV.**

Características do Modelo de 2012 (JF12)

- O primeiro modelo de Jansson & Farrar foi feito em 2012, utilizando os mapas galácticos WMAP7 (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe com medidas de 7 anos) de emissão síncrotron e mais de 40000 medidas de rotação extragaláctica para limitar os parâmetros do modelo galáctico.
- Esse modelo inicial trabalhava com 22 parâmetros do campo de larga escala, além de uma componente fora do plano e a existência de um campo estriado aleatório.

Características do Modelo de 2018

- A rotação de faraday é integrada na componente B da linha de visão com peso dado pela densidade térmica de elétrons.
- A polarização e intensidade total síncrotron também são integradas na linha de visão, mas são sensíveis a componente transversal do GMC e possuem peso associado a densidade relativística de elétrons (raios cósmicos), n_{cre} .
- Diferente do anterior esse modelo conta com 13 parâmetros de variação espacial da força do campo magnético galáctico aleatório.
- Esse modelo se encaixa de forma adequada com a componente de larga escala da emissão síncrotron total (I).
- Uma aplicação importante é prever o padrão de deflexão dos raios cósmicos de ultra alta energia.

Medidas da Rotação de Faraday

As medidas de rotação (RM da sigla e inglês rotation measures) são descritas em $rad\ m^{-2}$, dadas por

$$RM \approx 0,81 \int_0^L \left(\frac{n_e(l)}{cm^{-3}} \right) \left(\frac{B_{\parallel}(l)}{\mu G} \right) \left(\frac{dl}{pc} \right) \quad (7)$$

onde $n_e(l)$ é a densidade total de elétrons ionizados, $B_{\parallel}(l)$ é o campo magnético.

As RM são estimadas a partir da relação do ângulo de polarização da fonte e o comprimento de onda observado, de modo que:

$$\theta = \theta_0 + RM\lambda^2 \quad (8)$$

Medidas da Rotação de Faraday

Foram utilizados 40.403 conjuntos de dados de rotações de Faraday extragalácticas. Vindas de diversas pesquisas diferentes, como de dados do disco, do sul do plano galáctico, dentre outros.

As medidas de rotação foram combinadas em pixels no espaço que contém diferentes fontes. Onde as medidas são divididas em três grupos de dados com confiabilidade crescente: Taylor (2009), Broten (1988) e por fim as amostras com pouco espaço no comprimento de onda. Quando um pixel possui diferentes medidas de rotação, somente é usada aquelas do grupo mais confiável.

Medidas de rotação de Faraday

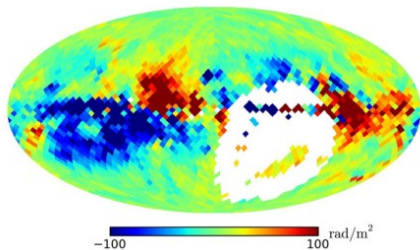


Figure 5: Medidas de rotação no céu depois da remoção dos valores discrepantes e usando em média $13,4 \text{ deg}^2$ pixels

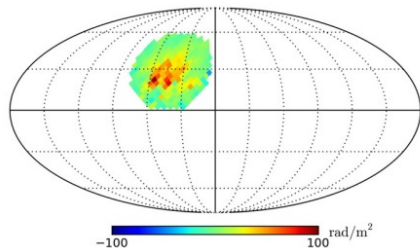


Figure 6: Bolha próxima H I vista na RM de Wolleben et al.(2010)

Emissão Síncrotron Polarizada

A radiação polarizada (Polarized synchrotron radiation - PI) na faixa de 22GHz é dominada pela emissão síncrotron polarizada. Usando o índice espectral s , temos a emissividade síncrotron:

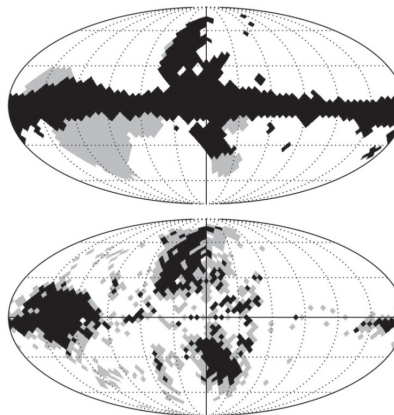
$$j_\nu \propto n_{cre} B_\perp^{\frac{1+s}{2}} \nu^{\frac{1-s}{2}}, \quad (9)$$

onde n_{cre} é a distribuição relativística de elétrons e ν é a frequência.

Para um campo magnético regular temos $s = 3$, assim a emissão síncrotron polarizada linearmente corresponde a 75%, porém devido a efeitos depolarizantes, o valor que atingimos acaba sendo muito menor.

Emissão Síncrotron Polarizada

- Na figura ao lado, temos as máscaras de polarização síncrotron. No topo em preto temos a região de Gold et al.(2011) cobrindo 27% do céu. A região em cinza mostra a máscara expandida utilizada na análise.
- Na parte de baixo, vemos diferentes máscaras vindas do "puxão" da intensidade de polarização. Em preto, temos a região $p > 3$ e em cinza a região $p > 2$. Mascaram regiões com p maior esconde estruturas proeminentes.
- As máscaras são utilizadas para limpar alguns fenômenos e facilitar a observação de outros. A de cima limpa fenômenos como remanescentes de supernova de estruturas próximas.



Densidades de Elétrons

A RM e a emissão síncrotron são ponderadas pela densidade de elétrons térmica e relativística, também conhecida como *raios cósmicos*, n_e e n_{cre} .

Na análise, foram considerados dois modelos distintos:

- 1 GALPROP (Strong et al. 2009): Modelo baseado na distribuição de remanescentes de supernova na Galáxia e simulação numérica.
- 2 WMAP (Page et al. 2007): Modelo de parametrização fenomenológica.

Para todos os modelos a densidade de número para outras energias, é calculada assumindo uma distribuição em lei de potência, com índice espectral $p = -3$.

Estrutura

Estrutura de Campo	Observáveis que atua
Campo regular de larga escala	I^3, PI^4, RM^5
Campo de pequena escala aleatório	I
Campo estriado aleatório	I, PI

Neste modelo é adotado a forma utilizada no JF12, onde são consideradas duas formas de n_{cre} , usando o modelo de GALPROP ao fazer uma reescala por um fator α , fazendo com que surja uma componente de difusão anisotrópica fora do plano.

³Emissão síncrotron total

⁴Radiação síncrotron polarizada

⁵Medidas de rotação

Componente regular de larga escala do campo magnético

É necessário a inclusão de uma componente de fora do plano, por causa disso, a nossa componente de larga escala deve ser separada em outras três partes, de modo que seus parâmetros podem ser especificados de forma independente.

As condições de definição do programa são:

- 1 Coordenadas cartesianas e cilíndricas com o centro galáctico na origem.
- 2 Sol localizado em $x = -8,5$ kpc
- 3 O campo magnético é zero caso $r > 20$ kpc, ou em uma esfera de 1 kpc centrada no centro galáctico.

Componente regular de larga escala do campo magnético

A componente do disco é adotada seguindo a forma generalizada de Brown et al. (2007), que se dá baseada na distribuição térmica da densidade de elétrons. Porém ele foi aprimorado ao ajustar os parâmetros de força do campo e a dependência em Z .

O disco é separado em seções:

- Entre 3 kpc e 5 kpc o campo é puramente azimuthal, com uma força descrita por b_{ring} ;
- Entre 5 kpc e 20 kpc, existem oito regiões de logaritmo espiral, cujo campo magnético é descrito por $\hat{b} = \sin(i)\hat{r} + \cos(i)\hat{\phi}$, onde $i = 11,5$ é o ângulo de abertura entre as linhas da espiral. A força do campo (b_i) é definida em $r = 5$ kpc, porém cai com r^{-1} .

Componente regular de larga escala do campo magnético

O halo possui uma componente puramente toroidal e uma separação das amplitudes de campo no norte e sul dele. Essa componente é descrita como:

$$B_{\phi}^{\text{tor}}(r, z) = e^{-|z|/z_0} L(z, h_{\text{disk}}, w_{\text{disk}}), \quad (10)$$

onde $L(z, h, w) = (1 + e^{-2(|z|-h)/w})^{-1}$ é a função logística que descreve a transição entre a parte de cima e baixo do disco e w_{disk} descreve a largura da transição.

A componente fora do plano galáctico é chamada de componente de "Campo-X", que possui esse nome devido ao formato em X das estruturas de campo vistas em observações de rádio. Essa componente é assimétrica e poloidal

Componente regular de larga escala do campo magnético

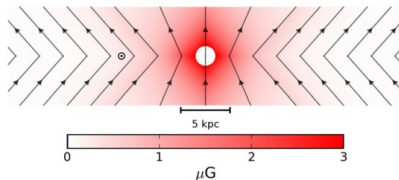


Figure 7: Fatia do eixo x-z da galáxia, mostrando a componente fora do plano "X". As linhas cruzando o plano em $\pm 4,8$ kpc definem o limite entre a região exterior com ângulo de elevação constante e a região interior com variação no ângulo de inclinação. As setas mostram a direção do campo magnético.

Vemos que na figura que o campo fora do raio galactocêntrico possui um ângulo de elevação constante com respeito ao meio do plano.

Componente regular de larga escala do campo magnético

A força magnética no plano do meio é definido pela função:

$$b_X(r_p) = B_X e^{-r_p/r_x}, \quad (11)$$

onde B_X é a amplitude geral do campo- X e r_p é o raio do meio do plano da linha de campo que passa.

Com isso, se tomarmos $\nabla \cdot B = 0$ podemos caracterizar completamente o campo. A linha onde $r_p = r_X^c$ marca a fronteira entre a região com elevação constante e a região interior.

Componente regular de larga escala do campo magnético

Na região com elevação constante, a força do campo é descrita por $b_X(r_p)r_p/r$, onde

$$r_p = r - |z|/\tan(\Theta_X^0) \quad (12)$$

Na região onde o ângulo varia, a força do campo é dada por $b_X(r_p)(r_p/r)^2$ e, r_p e o ângulo de elevação são respectivamente:

$$r_p = \frac{rr_X^c}{r_X^c + |z|/\tan(\Theta_X^0)}, \quad (13)$$

$$\Theta_X(r, z) = \tan^{-1} \left(\frac{|z|}{r - r_p} \right) \quad (14)$$

Campo aleatório estriado

O primeiro passo para avaliar a necessidade de uma componente estriada, eles incluíram a possibilidade desse campo adicionar um fator multiplicativo γ , no cálculo do PI, de modo que esse fator é unitário quando o campo é puramente regular.

A parametrização dos campos estriados e puramente aleatórios se deu como $B_{stri}^2 = \beta B_{reg}^2$, onde β é o parâmetro final de otimização para todas as componentes. Ou seja, o campo estriado está em todo lugar alinhado com o campo local de larga escala, e possui a mesma magnitude em toda parte da galáxia.

Estrutura

Podemos escrever o fator multiplicativo como:

$$\gamma = \alpha(1 + \beta), \quad (15)$$

onde α é interpretado como sendo um fator de reescala da densidade relativística de elétrons, com $B_{stri}^2 = \beta B_{reg}^2$.

Estrutura

O modelo que melhor se encaixa ao mapa WMAP7, é obtido ao considerar:

$$B_{rand} = \sqrt{B_{disk}^2 + B_{halo}^2}, \quad (16)$$

onde juntamos então a componente central do halo, com o disco e os braços galácticos. A componente do disco é modelada como um produto de um fator radial por um perfil vertical, de largura z_0^{disk} .

A componente do halo estendido aleatório, é o produto de uma exponencial no raio e uma gaussiana na vertical:

$$B_{halo} = B_0 e^{-r/r_0} e^{-z^2/2z_0^2}. \quad (17)$$

Metodologia

As observáveis utilizadas na análise são os valores médios de I em 13 graus quadrados de *HEALpix cells* e podemos minimizar como função dos parâmetros do campo galáctico aleatório:

$$\chi_I^2 = \sum_i (I_{data,i} - I_{model,i})^2 / \sigma_{I,i}^2, \quad (18)$$

onde soma sobre todos os pixels individuais.

Nesse sistema, é importante notar que σ_i são por si só observáveis mensuráveis. A variância nas observáveis primárias não se dá somente devido a incertezas observacionais, mas também pois incluem e são dominadas por fenômenos astrofísicos causada por campos magnéticos turbulentos, inomogeneidades no meio interestelar e fontes de contribuição de RM.

Metodologia

Ao assumir o índice espectral de 3 para os elétrons relativísticos, a emissividade síncrotron de um elemento de volume em um campo \vec{B} é $\propto n_{cre} B^2 \sin^2 \theta$, onde θ é o ângulo entre a linha de visão e a direção de \vec{B} .

Adicionando campos aleatórios com intensidade B_{rand} a \vec{B}_{reg} , iremos ter:

$$\langle B_{\perp}^2 \rangle = B_{reg}^2 \sin^2 \theta + \frac{2}{3} B_{rand}^2. \quad (19)$$

Metodologia

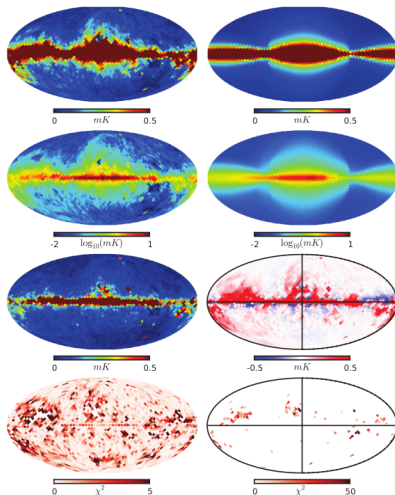
Para simular a emissão síncrotron total da superposição dos campos foi utilizado o *Hammurabi*, com o modelo n_{cre} porém fazendo a troca:

$$B_{reg}^2 \rightarrow \alpha(1+\beta)B_{reg,model}^2 \left(1 + \frac{2}{3} \frac{B_{rand}^2}{(1+\beta)B_{reg,model}^2 \sin^2 \theta} \right). \quad (20)$$

O algoritmo de *Metropolis Markov Chain Monte Carlo* é utilizado para obter os melhores valores para os parâmetros do sistema.

Resultados

- Na parte do topo a esquerda temos WMAP 22 Ghz de radiação síncrotron não polarizada. A direita temos 22 GHz de radiação síncrotron para o modelo otimizado.
- Na segunda linha, temos o mesmo que o de cima porém em escala logarítmica.
- Na terceira linha a esquerda temos a estimativa do σ não polarizado de emissão síncrotron. A direita temos a diferença entre os dados observado e simulados.
- Na quarta linha a esquerda temos o χ^2 com 101 pixels removidos. A direita temos o χ^2 de pixels mascarados.



Resultados

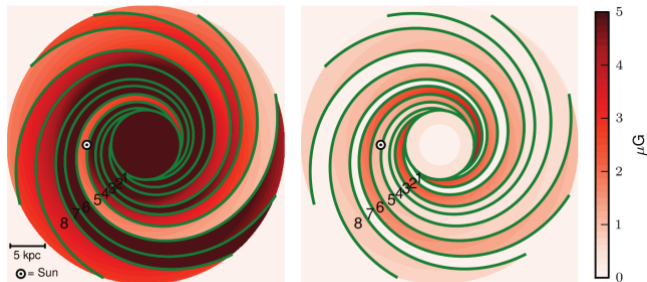


Figure 8: A esquerda temos a componente do disco do campo aleatório, com a magnitude de coerência do disco de JF12 a direita para comparação.

Resultados

Na figura anterior, vemos que a força média da componente do disco do campo aleatório no círculo solar é por volta de $6,6\mu\text{G}$.

Podemos perceber também que devido ao alto valor do campo aleatório e estriado em comparação com o campo coerente, não é possível prever o valor do campo em uma posição particular, visto que a flutuação domina o valor médio.

Ao combinar as componentes coerente, estriada e aleatória, a quadratura da uma estimativa da magnitude do campo magnético local, possuindo um valor de $3 - 5\mu\text{G}$.