

# **Campos Magnéticos Cósmicos**

**Aluno: Rafael Alves Batista**

**Orientador: Prof. Dr. Ernesto Kemp**

INSTITUTO DE FÍSICA “GLEB WATAGHIN”  
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS



UNICAMP

## Questões Fundamentais

[Introdução](#)[Métodos de  
Medição](#)[Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias](#)[Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias](#)[Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias](#)[Campo Magnético  
Galáctico](#)[Magnetogênese  
Cosmológica](#)[Considerações  
Finais](#)

## ORIGEM

- [Como e quando surgiram os campos magnéticos cósmicos](#)
- [Influência sobre a CMB](#)

## EVOLUÇÃO

- [Amplificação de campos primordiais](#)
- [Manutenção dos campos](#)
- [Evolução das estruturas e do campo](#)

## ESTRUTURA

- [Intensidade do campo nos meios intergaláctico e interestelar](#)
- [Estrutura do campo nos meios intergaláctico e interestelar](#)
- Campo magnético e [distribuição de gás](#)

## Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

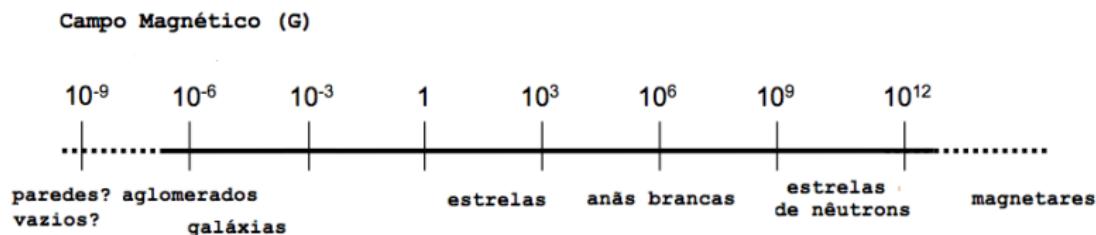
Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais





# Estrutura da Exposição

## Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

- ① Métodos de Medição
- ② Campos Magnéticos Além de Aglomerados de Galáxias
- ③ Campos Magnéticos em Aglomerados de Galáxias
- ④ Campos Magnéticos em Outras Galáxias
- ⑤ Campo Magnético Galáctico
- ⑥ Magnetogênese Cosmológica
- ⑦ Considerações Finais



UNICAMP

# Métodos de Medição

Introdução

Métodos de  
Medição

Polarização da  
Luz Estelar  
Efeito Zeeman

Emissão  
Síncrotron  
Rotação de  
Faraday

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

## Métodos de Medição

- polarização da luz estelar
- efeito Zeeman
- polarização da luz síncrotron
- rotação de Faraday

# Polarização da Luz Estelar

Introdução

Métodos de  
Medição

Polarização da  
Luz Estelar

Efeito Zeeman

Emissão

Síncrotron

Rotação de  
Faraday

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

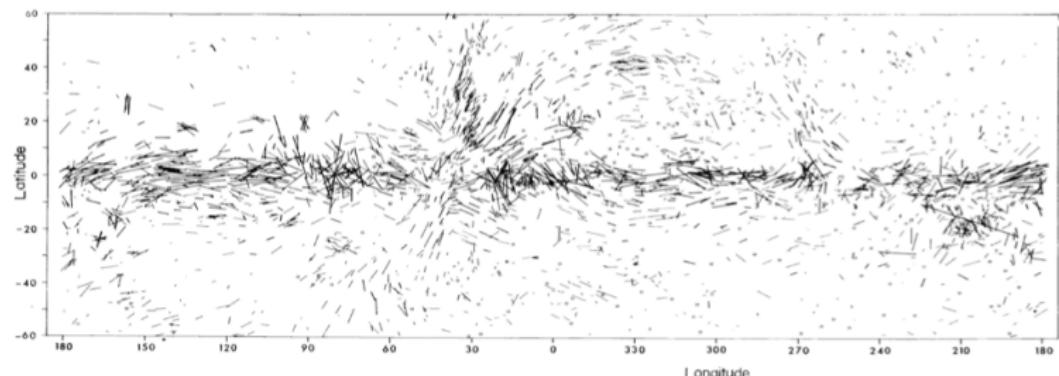


Figura: Resultados da observação da polarização da luz de 1800 estrelas,  
segundo Ford & Matthewson (1970).

Introdução

Métodos de  
Medição

Polarização da  
Luz Estelar

Efeito Zeeman

Emissão  
Síncrotron  
Rotação de  
Faraday

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

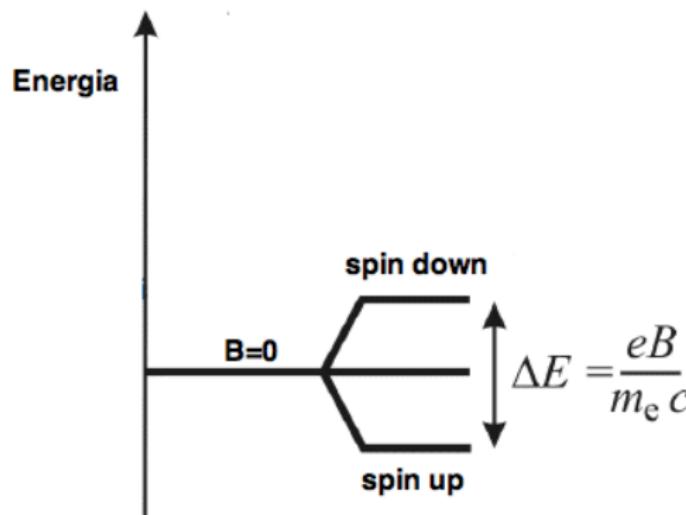
Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais



**Figura:** Representação esquemática do desdobramento das linhas espectrais no efeito Zeeman.

# Polarização da Luz Síncrotron

Introdução

Métodos de  
Medição

Polarização da  
Luz Estelar  
Efeito Zeeman

Emissão  
Síncrotron

Rotação de  
Faraday

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

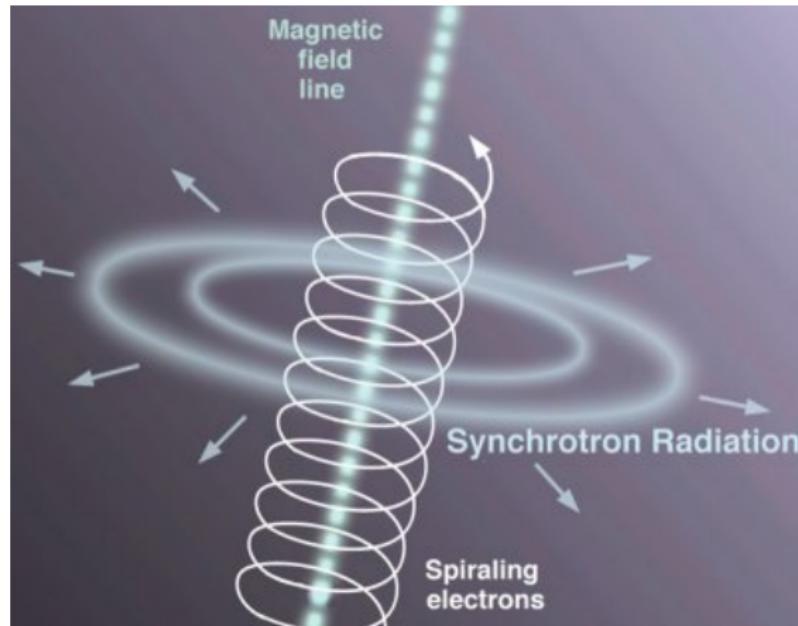


Figura: Figura extraída de  
<http://astronomyonline.org/Stars/SupernovaRemnant.asp>.

# Polarização da Luz Síncrotron

Introdução

Métodos de  
Medição

Polarização da  
Luz Estelar  
Efeito Zeeman

Emissão  
Síncrotron

Rotação de  
Faraday

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

- A emissividade síncrotron é

$$j_\nu \propto n_e(E_0) \nu^{\frac{1-\gamma}{2}} B_{\perp}^{\frac{1+\gamma}{2}},$$

onde  $n_e$  é a densidade eletrônica de uma determinada fonte, cuja distribuição é

$$n_e(E)dE = n_e(E_0) \left( \frac{E}{E_0} \right)^{-\gamma} dE,$$

com índice espectral  $\gamma$ .

- Para  $\gamma = 3$  e um campo magnético regular, a distribuição de densidade eletrônica indica que cerca de 75% da radiação síncrotron emitida é polarizada.
- Na prática o grau de polarização é baixo devido a efeitos de depolarização e à presença de campos turbulentos.

# Rotação de Faraday

Introdução

Métodos de  
Medição

Polarização da  
Luz Estelar  
Efeito Zeeman  
Emissão  
Síncrotron

Rotação de  
Faraday

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

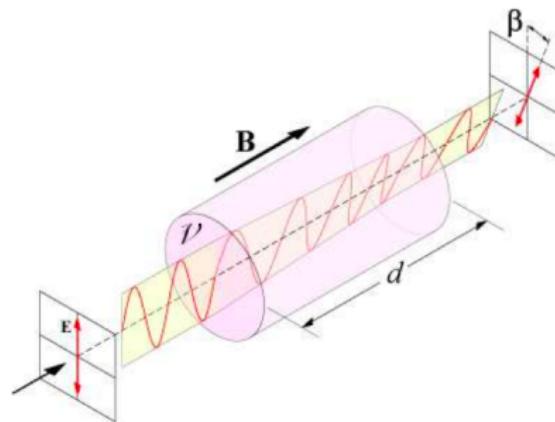
Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

$$\varphi = \varphi_0 + RM\lambda^2$$

$$\frac{B_{\parallel}}{\mu G} = 1,232 \frac{RM}{DM}$$



**Figura:** Figura extraída de <http://lofi.forum.physorg.com/relection-of-light-and-speed-of-light11525.html>.

# Campos Magnéticos em Aglomerados de Galáxias

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

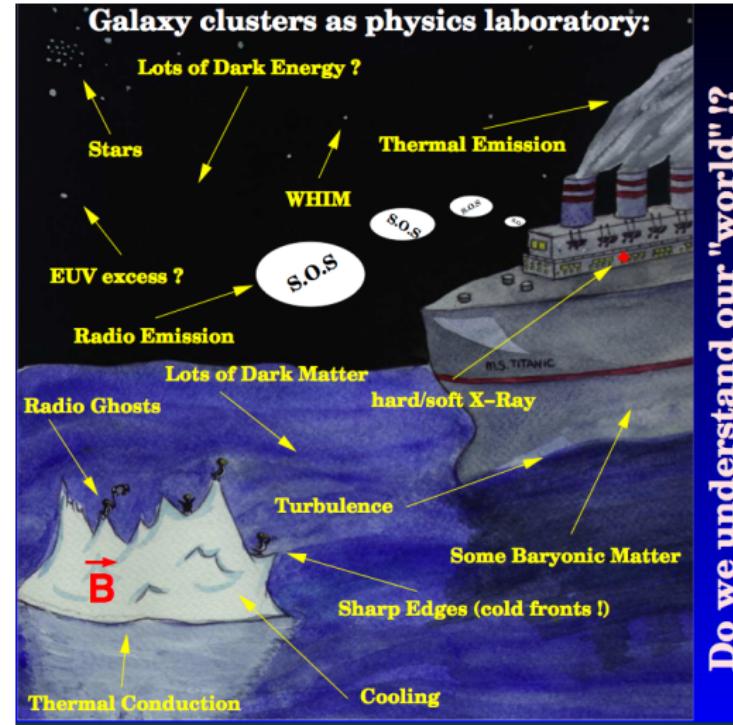


Figura: Figura extraída da apresentação de Dolag, Ringberg, 2009.



UNICAMP

# Campos Magnéticos em Aglomerados de Galáxias

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

## Evidências Diretas

- Rotação de Faraday
- Emissão síncrotron
  - rádio-halos
  - radiorrelíquias
  - emissão de rádio via choques

## Evidências Indiretas

- Escala de tempo (longa) dos gradientes de temperatura

# Campos Magnéticos em Aglomerados de Galáxias

Introdução

Métodos de  
Medição

**Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias**

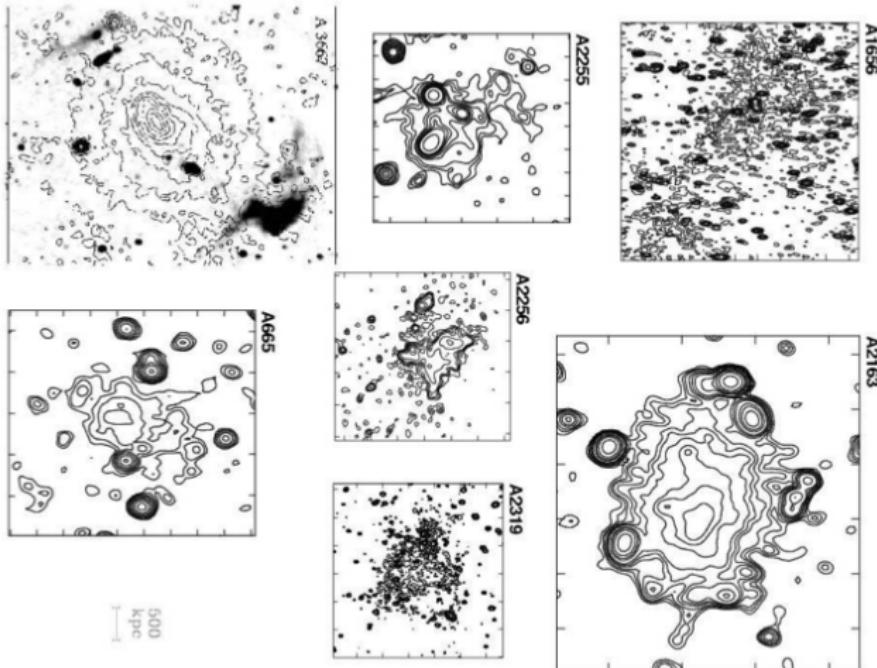
Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais



**Figura:** Figura extraída da apresentação de Dolag, Ringberg, 2009.



# Campos Magnéticos em Aglomerados de Galáxias

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

- Campos magnéticos permeiam todo o aglomerado, incluindo região intra-aglomerado.
- A **intensidade** do campo magnético nestes objetos é  $\approx 1\text{-}30 \text{ mG}$ .
- O **comprimento de coerência** dos campos nos aglomerados de galáxias é  $\approx 1\text{-}40 \text{ kpc}$ .

# Campos Magnéticos Além dos Aglomerados de Galáxias

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

- Kim *et al.* (1990) encontraram indícios da existência de campos magnéticos  $\approx 0,2 - 0,6 \mu\text{G}$  na região entre os aglomerados de Coma e Abell 1367.
- Enßlin *et al.* (2001) encontraram peculiaridades na rádio-galáxia NGC 315 que poderiam ser explicadas por um campo magnético de larga escala associado a emissões polarizadas de rádio.
- Apesar de diversas medidas indicarem a existência de campos magnéticos além de aglomerados de galáxias, tais campos não foram detectados no “vazio” de Boieiro, sendo o limite superior do campo nesta região  $0,1 \mu\text{G}$ .



UNICAMP

# Campos Magnéticos Além dos Aglomerados de Galáxias

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

## Campos Magnéticos nos “Vazios” Cósmicos

- difusão em paredes e filamentos?
- campo originado antes do período da recombinação?
- medidas deste campo realizadas somente em *gedanken experiments*
- medidas envolveriam propagação de partículas de alta energia e fótons

# Campos Magnéticos Além dos Aglomerados de Galáxias

Introdução

Métodos de Medição

Campos Magnéticos em Aglomerados de Galáxias

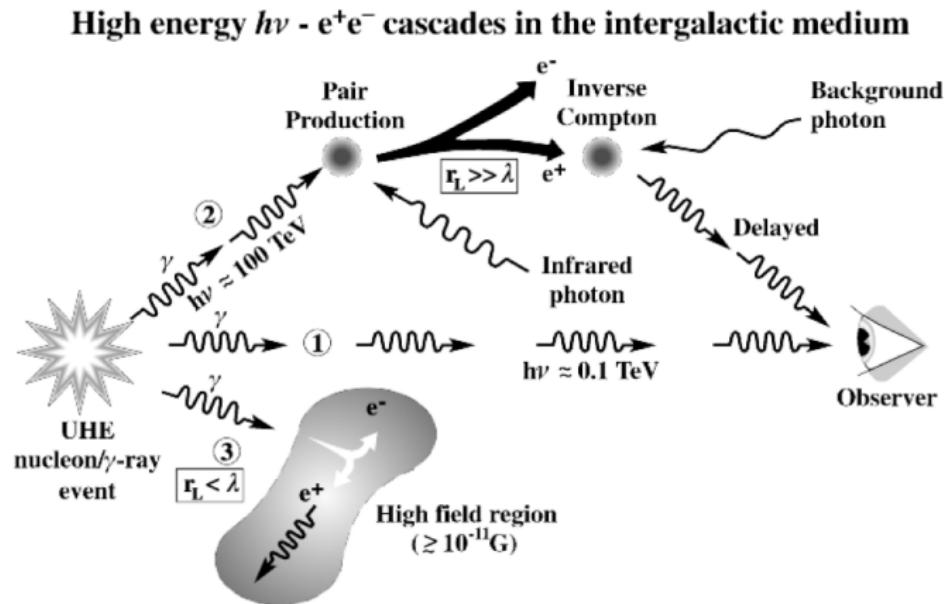
Campos Magnéticos Além dos Aglomerados de Galáxias

Campos Magnéticos em Outras Galáxias

Campo Magnético Galáctico

Magnetogênese Cosmológica

Considerações Finais



**Figura:** Figura extraída da apresentação de P. Kronberg, Ringberg, 2009; disponível em  
<http://www.mpa-garching.mpg.de/~jprachen/B-shop/index.html>.



# NGC 4414

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

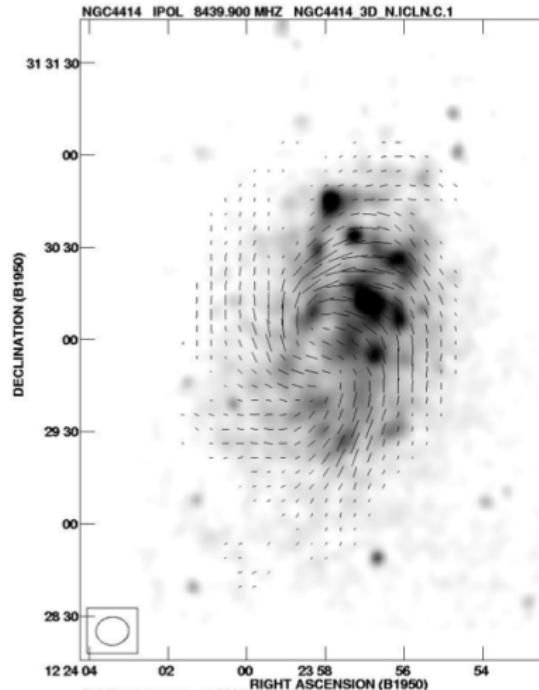


Imagen: VLA (3 cm, H- $\alpha$ ), Soida *et al.* (2002)

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

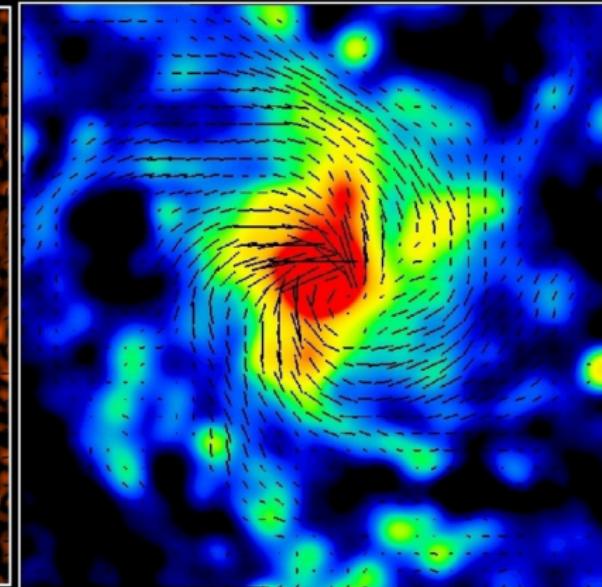
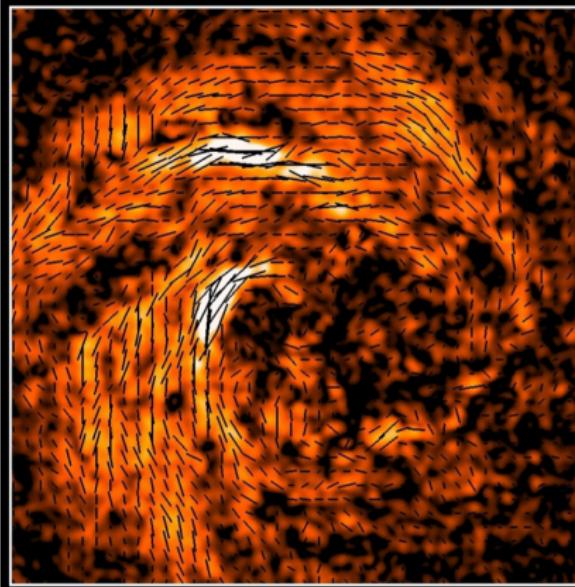
Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais



Imagens: VLA (3,6 cm e 6 cm), Beck *et al.* (2005)



# M51

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

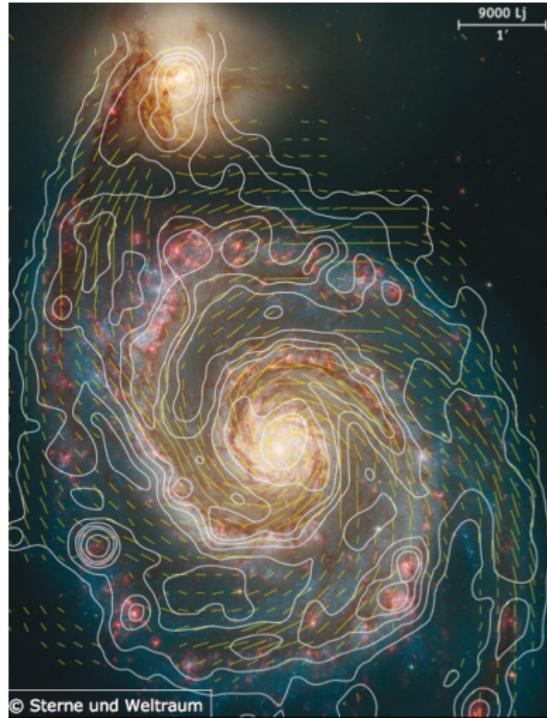
Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais



Imagens: VLA (6 cm) + Effelsberg, Fletcher *et al.* (2009)

Rafael Alves Batista

Campos Magnéticos Cósmicos

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

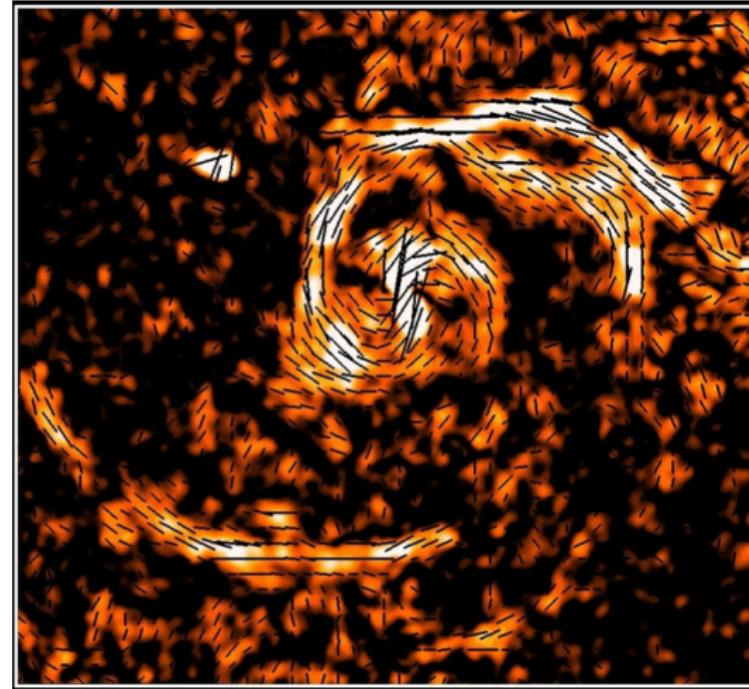


Imagen: VLA (6 cm), Beck (2008)



# NGC4736

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

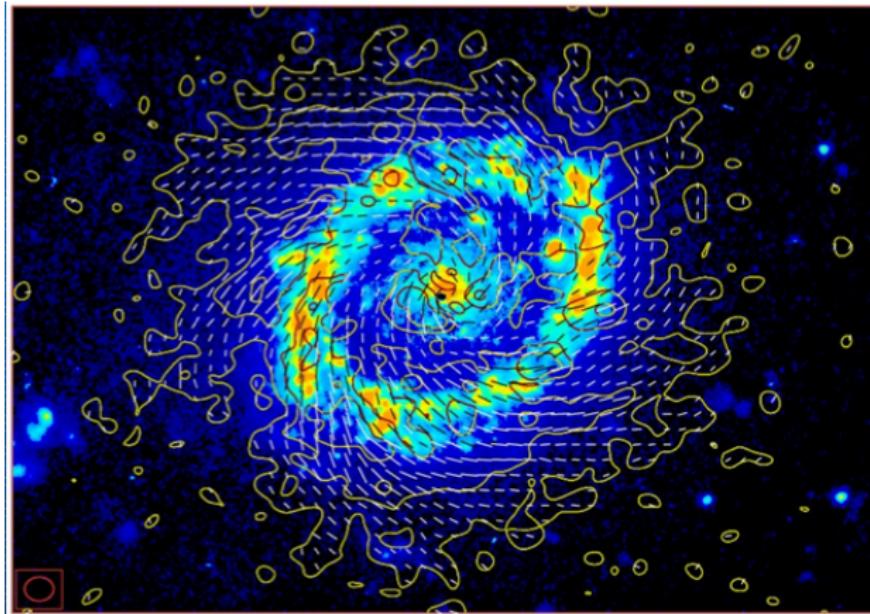


Imagen: VLA (3 cm), Chyzy e Buta (2007)



UNICAMP

# Campos Magnéticos em Outras Galáxias

[Introdução](#)[Métodos de  
Medição](#)[Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias](#)[Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias](#)[Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias](#)[Campo Magnético  
Galáctico](#)[Magnetogênese  
Cosmológica](#)[Considerações  
Finais](#)

- As linhas de campo tendem a formar padrões espirais (mesmo em galáxias flocculentas, anulares e totalmente irregulares ).
- Nota-se duas populações de campos magnéticos regulares:
  - ① “braços magnéticos” na região entre os braços espirais de algumas galáxias espirais (M51, M81, NGC6946...)
  - ② dentro dos braços espirais em alguns tipos de galáxias espirais (M51)
- Existem linhas de campo acompanhando as barras (no caso de espirais barradas).



UNICAMP

# Campo Magnético Galáctico

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

**Campo Magnético  
Galáctico**

Modelos do  
Campo Magnético  
Regular

Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais





# Campo Magnético Galáctico

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Modelos do  
Campo Magnético  
Regular  
Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

- Duas componentes:
  - 1 regular;
  - 2 turbulenta.
- Concentra-se no disco galático.
- Sentido do campo local: horário (Manchester, 1972)
- Sentido do campo no braço de Sagitário: anti-horário (Thomson & Nelson, 1980 e Simard-Normandin & Kronberg, 1980).
- Há reversões no sentido do campo.



# Componente Turbulenta

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Modelos do  
Campo Magnético  
Regular  
Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

- Mecanismos que produzem flutuações nos campos magnéticos interestelares:
  - ① turbulência;
  - ② interação de ondas de choque com campos magnéticos ambientes;
  - ③ auto-geração de campos aleatórios via turbulência (dínamo de pequena escala).
- Estimativa do campo → equipartição entre energia cinética e energia magnética na turbulência.
- Os campos magnéticos turbulentos na Via Láctea são tipicamente  $\sim 4\text{-}6 \mu\text{G}$  (Ohno e Shibata, 1993), com comprimentos de coerência  $\sim 100$  pc.

# Campo Magnético Galáctico

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

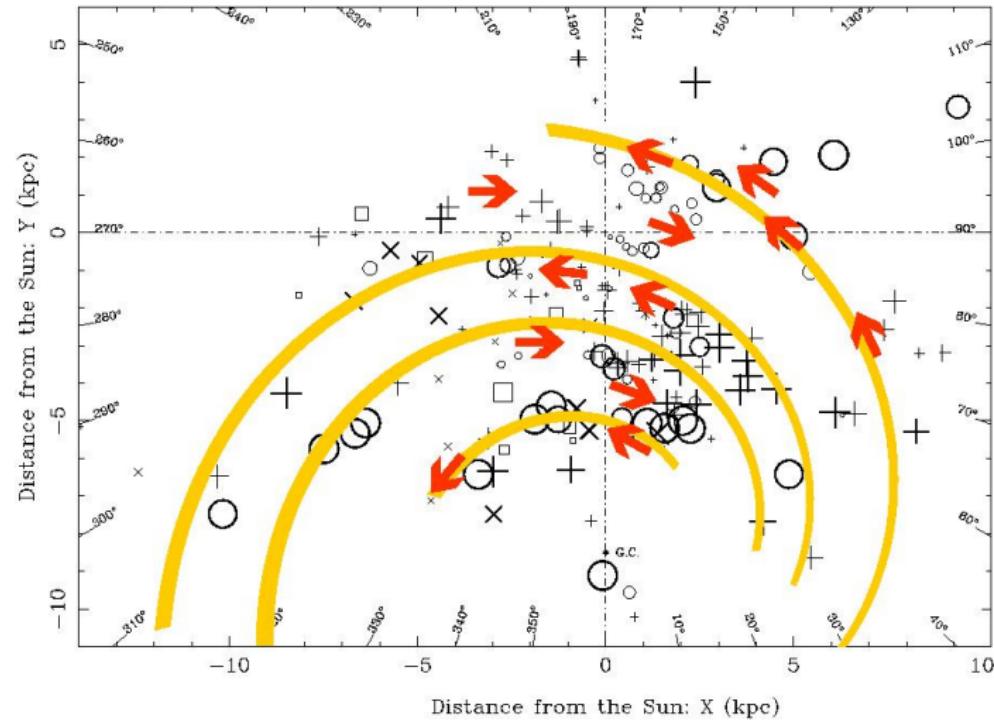
Campo Magnético  
Galáctico

Modelos do  
Campo Magnético  
Regular

Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais



Han et al. (2001).



UNICAMP

# Modelos do Campo Magnético Regular

[Introdução](#)[Métodos de  
Medição](#)[Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias](#)[Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias](#)[Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias](#)[Campo Magnético  
Galáctico](#)[Modelos do  
Campo Magnético  
Regular](#)[Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico](#)[Magnetogênese  
Cosmológica](#)[Considerações  
Finais](#)

- A galáxia pode ser modelada por uma espiral da forma

$$R_{\text{espiral}} = R_0 \exp(\tan(p)\theta),$$

onde  $R$  é o raio da espiral logarítmica,  $R_0$  é uma distância característica e  $p$  é o grau.

- O campo na região do halo pode ser modelado como

$$B_{\text{halo}} = f(z)B_{\text{disco}}$$

- O campo do disco pode ser escrito como

$$\vec{B}(r, \theta) = B(r, \theta) \cos p\hat{\theta} + B(r, \theta) \sin p\hat{r}.$$

# Algumas Simetrias do Campo Magnético Galáctico

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

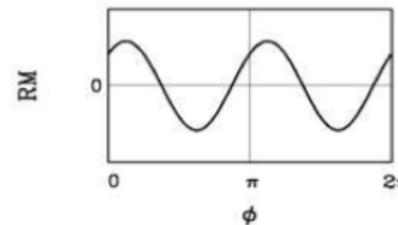
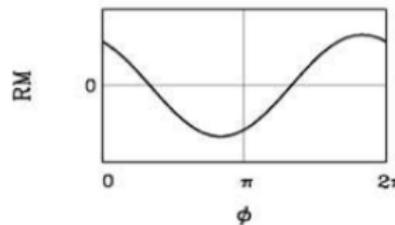
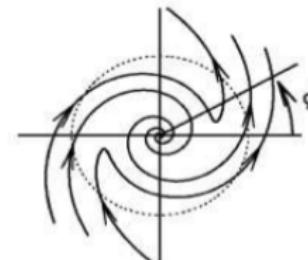
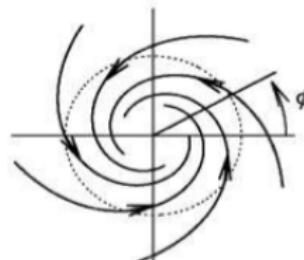
Campo Magnético  
Galáctico

Modelos do  
Campo Magnético  
Regular

Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais



ASS (à esquerda) e BSS (à direita). Widrow, 2002.

# Algumas Simetrias do Campo Magnético Galáctico

**Introdução**

**Métodos de Medição**

**Campos Magnéticos em Aglomerados de Galáxias**

**Campos Magnéticos Além dos Aglomerados de Galáxias**

**Campos Magnéticos em Outras Galáxias**

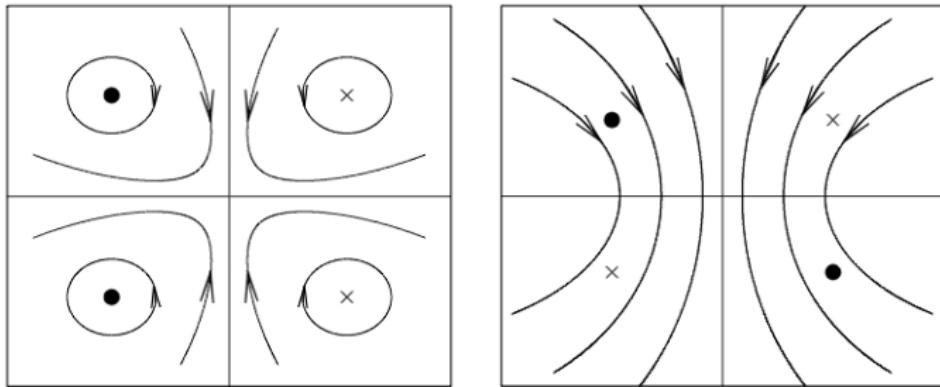
**Campo Magnético Galáctico**

**Modelos do Campo Magnético Regular**

**Origem e Evolução do Campo Magnético Galáctico**

**Magnetogênese Cosmológica**

**Considerações Finais**



Linhas de campo para as configurações par ou **simétrica** (à esquerda) e ímpar ou **antissimétrica** (à direita). São mostradas as seções retas perpendiculares ao plano equatorial e contendo o eixo de simetria da galáxia. Figura extraída de Widrow, 2002.



UNICAMP

# Modelos do Campo Magnético Regular

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Modelos do  
Campo Magnético  
Regular

Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

## Modelos do Campo Magnético Galáctico

- Modelo de Stanev
- Modelo de Harari, Mollerach e Roulet
- Modelo de Tinyakov e Tkachev
- Modelo de Prouza e Šmíd
- Modelo de Kalcherieß, Serpico e Teshima



UNICAMP

## Modelo de Stanev

[Introdução](#)[Métodos de  
Medição](#)[Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias](#)[Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias](#)[Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias](#)[Campo Magnético  
Galáctico](#)[Modelos do  
Campo Magnético  
Regular](#)[Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico](#)[Magnetogênese  
Cosmológica](#)[Considerações  
Finais](#)

- Dois modelos: ASS-S e BSS-A.
- No caso de um modelo ASS-S, tem-se que

$$B(r, \theta) = B_0(r, \theta) \left| \cos \left( \theta - \frac{1}{\tan p} \ln \frac{r}{r_0} \right) \right|.$$

- Para um modelo BSS-A, a expressão é semelhante:
- No caso de um modelo ASS-S, tem-se que

$$B(r, \theta) = B_0(r, \theta) \cos \left( \theta - \frac{1}{\tan p} \ln \frac{r}{r_0} \right).$$

- No halo  $f(z)$  é uma exponencial da forma  $f(z) = \exp(z/z_0)$ .
- A dependência radial do campo é

$$B_0(r) = \frac{3R}{r} \mu G$$

- No trabalho de Stanev adota-se os seguintes parâmetros:  $r_0=10,55$  kpc,  $R=8,5$  kpc,  $p=-10^\circ$ ,  $z_0=1$  kpc para  $|z| < 0,5$  kpc e 4 kpc para  $|z| > 0,5$  kpc.

## Modelo de Harari, Mollerach e Roulet

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Modelos do  
Campo Magnético  
Regular

Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

- No modelo BSS o campo no disco é dado por

$$B(r, \theta) = \frac{3R}{r} \tanh^3\left(\frac{r}{r_1}\right) \cos\left(\theta - \frac{1}{\tan p} \ln \frac{r}{r_0}\right) \mu G.$$

- Para o modelo ASS, tem-se que:

$$B(r, \theta) = \frac{3R}{r} \tanh^3\left(\frac{r}{r_1}\right) \cos^2\left(\theta - \frac{1}{\tan p} \ln \frac{r}{r_0}\right) \mu G.$$

- Em modelos simétricos tem-se que

$$\vec{B}(r, \theta, z) = \frac{1}{2} \vec{B}(r, \theta) \left[ \operatorname{sech}\left(\frac{z}{z_0}\right) + \operatorname{sech}\left(\frac{z}{z_1}\right) \right],$$

- e em modelos antissimétricos

$$\vec{B}(r, \theta, z) = \frac{1}{2} \vec{B}(r, \theta) \left[ \operatorname{sech}\left(\frac{z}{z_0}\right) + \operatorname{sech}\left(\frac{z}{z_1}\right) \right] \tanh\left(\frac{z}{z_2}\right).$$

- No trabalho de Harari, Mollerach e Roulet adota-se  $R=8,5$  kpc,  $r_0=10,55$  kpc,  $p=-10^\circ$ ,  $r_1=2$  kpc,  $z_0=4$  kpc,  $z_1=0,3$  kpc e  $z_2=20$  pc.

# Modelo de Harari, Mollerach, Roulet

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

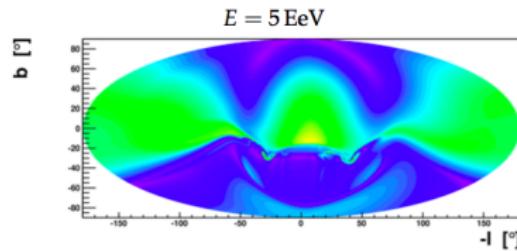
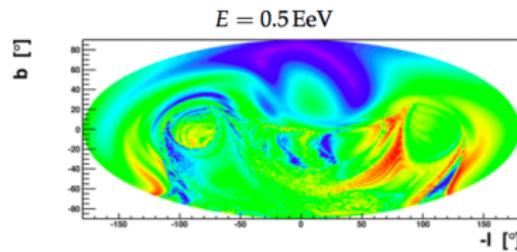
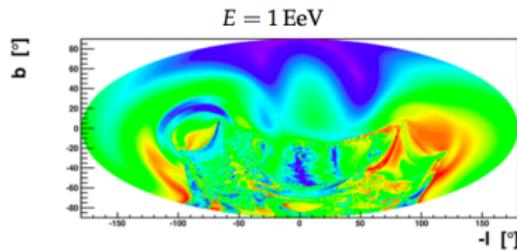
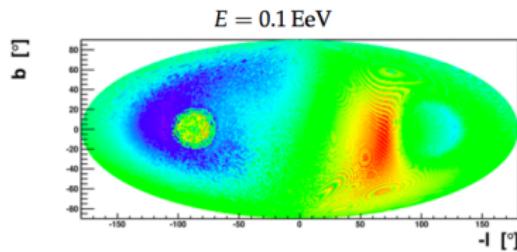
Campo Magnético  
Galáctico

Modelos do  
Campo Magnético  
Regular

Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais



# Modelo de Harari, Mollerach, Roulet

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Modelos do  
Campo Magnético  
Regular

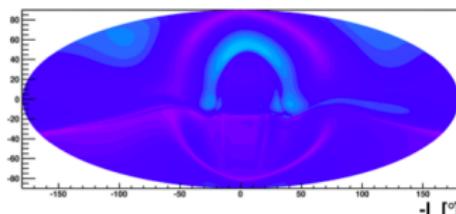
Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

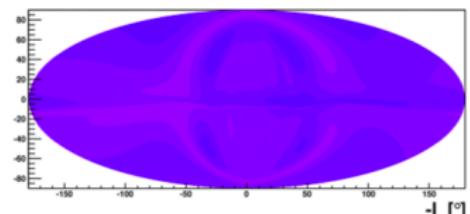
b [°]

$E = 10 \text{ EeV}$



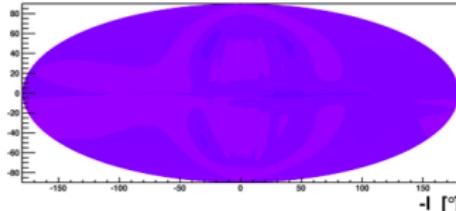
b [°]

$E = 30 \text{ EeV}$



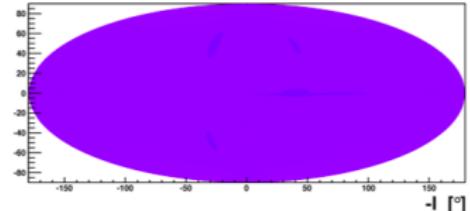
$E = 50 \text{ EeV}$

b [°]



$E = 100 \text{ EeV}$

b [°]





UNICAMP

## Modelo de Tinyakov e Tkachev

[Introdução](#)[Métodos de  
Medição](#)[Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias](#)[Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias](#)[Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias](#)[Campo Magnético  
Galáctico](#)[Modelos do  
Campo Magnético  
Regular](#)[Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico](#)[Magnetogênese  
Cosmológica](#)[Considerações  
Finais](#)

No modelo de Tinyakov e Tkachev o campo é dado por

$$B(r, \theta) = \frac{R}{r \cos \left[ \frac{1}{\tan p} \ln \left( 1 + \frac{d}{R} \right) - \frac{\pi}{2} \right]} \cos \left( \theta - \frac{1}{\tan p} \ln \frac{r}{r_0} \right)$$

O campo magnético do halo é

$$B(r, \theta, z) = B(r, \theta) \exp \left( -\frac{|z|}{z_0} \right),$$

em um modelo simétrico e, no caso de um modelo antissimétrico:

$$B(r, \theta, z) = \text{sign}(z) B(r, \theta) \exp \left( -\frac{|z|}{z_0} \right).$$

No trabalho de Tinyakov e Tkachev,  $B_0=1,4 \mu\text{G}$ ,  $p=-8^\circ$ ,  $z_0=1,5 \text{ kpc}$  e  $d=-0,5 \text{ kpc}$ .



# Modelo de Tinyakov-Tkachev

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

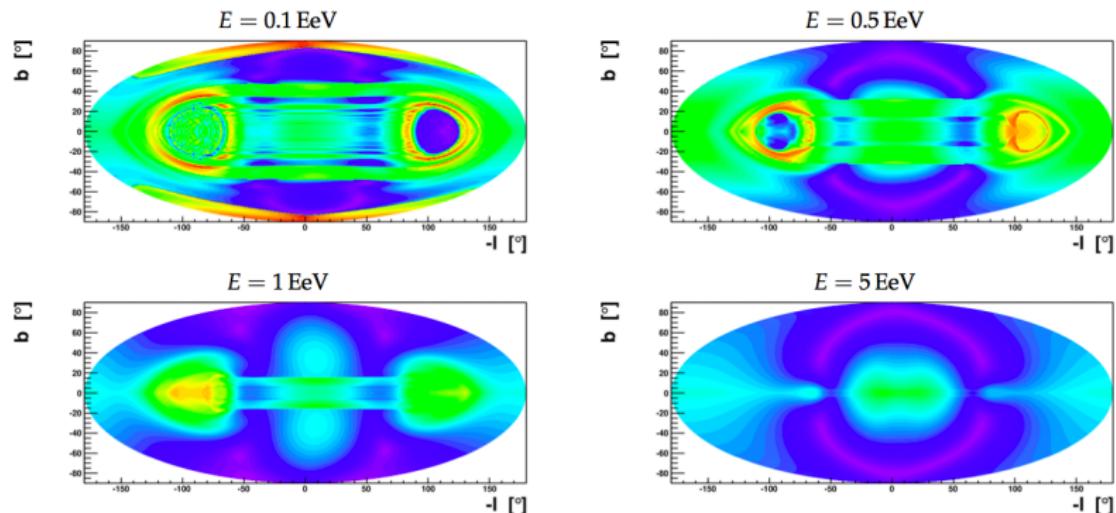
Campo Magnético  
Galáctico

Modelos do  
Campo Magnético  
Regular

Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais





# Modelo de Tinyakov-Tkachev

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

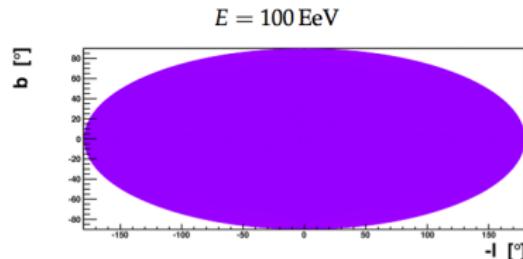
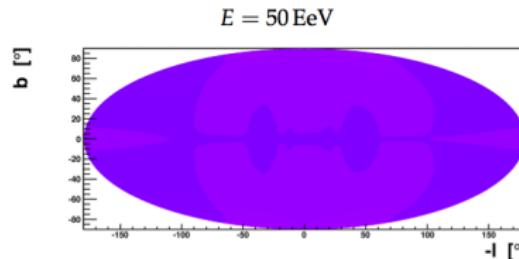
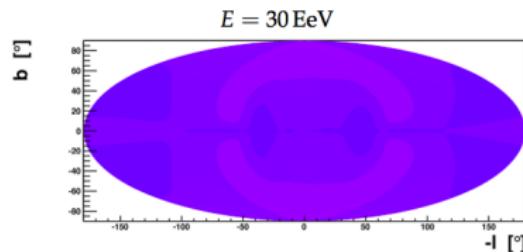
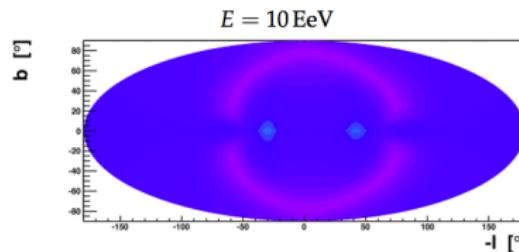
Campo Magnético  
Galáctico

Modelos do  
Campo Magnético  
Regular

Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais





UNICAMP

## Modelo de Prouza e Šmída

Introdução

Métodos de  
MediçãoCampos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
GaláxiasCampos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de GaláxiasCampos  
Magnéticos em  
Outras GaláxiasCampo Magnético  
GalácticoModelos do  
Campo Magnético  
RegularOrigem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
GalácticoMagnetogênese  
CosmológicaConsiderações  
Finais

- No modelo de Proza e Šmída o campo no disco é dado por

$$B(r, \theta) = \frac{3R}{r} \cos\left(\theta - \frac{1}{\tan p} \ln \frac{r}{r_0}\right).$$

- No halo o campo é dado por

$$|B(r, \theta, z)| = |B(r, \theta)| \exp\left(-\frac{z}{z_0}\right).$$

- Ao campo inicial são adicionados campos toroidais, dados por

$$\vec{B}_{tor} = -B_T \sin \phi \hat{x} + B_T \cos \phi \hat{y},$$

com  $B_T$  dado por

$$B_T = \begin{cases} B_{max} \frac{1}{1 + \left(\frac{z-H}{P}\right)^2} & x^2 + y^2 < R_g^2 \\ B_{max} \frac{1}{1 + \left(\frac{z-H}{P}\right)^2} \exp\left(-\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{R}\right) & \text{se } x^2 + y^2 \geq R_g^2 \end{cases}$$



UNICAMP

# Modelo de Prouza e Šmída

[Introdução](#)[Métodos de  
Medição](#)[Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias](#)[Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias](#)[Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias](#)[Campo Magnético  
Galáctico](#)[Modelos do  
Campo Magnético  
Regular](#)[Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico](#)[Magnetogênese  
Cosmológica](#)[Considerações  
Finais](#)

- O campo poloidal é da forma:

$$\vec{B}_P = \frac{-3K}{4R^3} \sin 2\phi \sin \theta \hat{x} + \frac{-3K}{4R^3} \sin 2\phi \cos \theta \hat{y} + \frac{-K}{R^3} (1 - 3 \cos^2 \phi) \hat{z}.$$

- Na região central, o campo tem a forma de um cilindro de raio 50 pc e altura 300 pc, com uma intensidade (constante) de 2 mG.
- Os parâmetros utilizados no modelo BSS-A de Modelo de Prouza e Šmída são:  $p=-10^\circ$ ,  $H=1,5$  kpc,  $B_{max}=1 \mu G$ ,  $P=0,3$  kpc,  $K=10^2 \mu G \cdot kpc^3$  para  $R>5$ ,  $K=0,2 \mu G \cdot kpc^3$  para  $R<2$  e na região intermediária  $K$  é tal que o campo é constante ( $\sim \mu G$ ),  $B_{max}=1 \mu G$  e  $R_g=15$  kpc.

# Modelo de Prouza e Šmídá

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

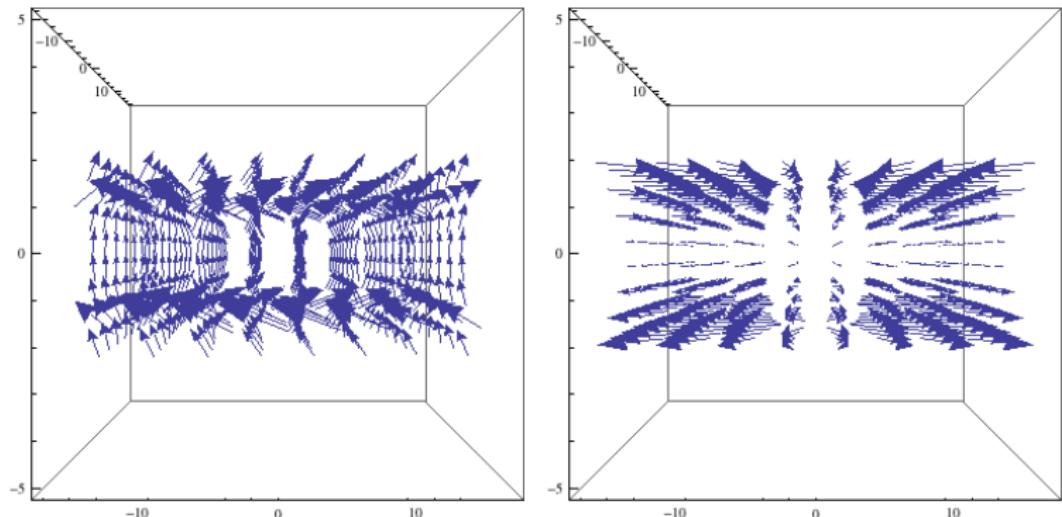
Campo Magnético  
Galáctico

Modelos do  
Campo Magnético  
Regular

Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais



**Figura:** Campo toroidal (à esquerda) e campo poloidal (à direita).

# Modelo de Kalcherieß, Serpico e Teshima

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Modelos do  
Campo Magnético  
Regular

Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

- O modelo de Kalcherieß, Serpico e Teshima é uma modificação do modelo BSS-A de Prouza e Šmída.
- Adiciona-se uma contribuição toroidal da forma

$$\vec{B}_T = -B_T \text{sign}(z) \cos \theta \hat{x} + B_T \text{sign}(z) \sin \theta \hat{y},$$

onde

$$B_T = \frac{B_T(r)}{1 + \left(\frac{|z|-H}{P}\right)^2}.$$

- A dependência radial do campo é

$$B_T(r) = \frac{3}{2} \left[ \Theta(R-r) + \Theta(r-R) e^{\frac{R-r}{R}} \right] \mu G,$$

onde  $\Theta$  é a função de Heaviside.

- Adiciona-se uma contribuição poloidal igual à de Prouza-Šmída.
- Para eliminar a singularidade no centro, adiciona-se uma esfera de raio 500 pc com um campo  $B_z = -100 \mu G$ .
- Os parâmetros do modelo valem:  $p = -10^\circ$ ,  $H = 1,5 \text{ kpc}$ ,  $P = 0,3 \text{ kpc}$ ,  $R = -8,5 \text{ kpc}$ .

# Modelo de Kalcherieß, Serpico e Teshima

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

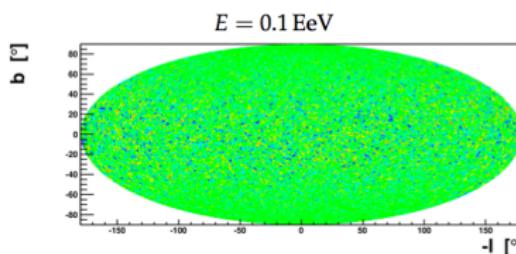
Campo Magnético  
Galáctico

Modelos do  
Campo Magnético  
Regular

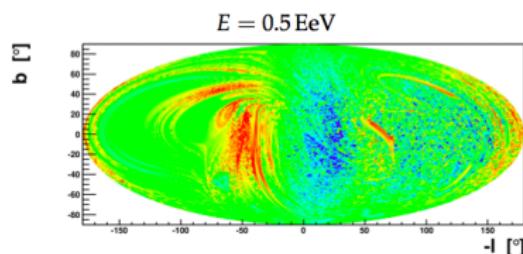
Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

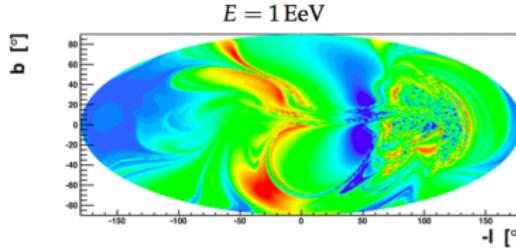
Considerações  
Finais



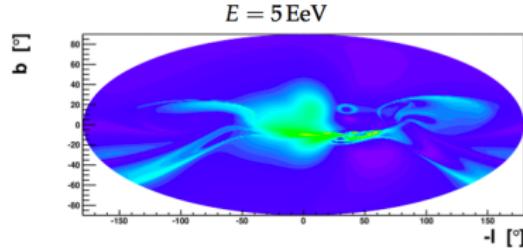
$E = 0.1 \text{ EeV}$



$E = 0.5 \text{ EeV}$



$E = 1 \text{ EeV}$



$E = 5 \text{ EeV}$

# Modelo de Kalcherieß, Serpico e Teshima

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

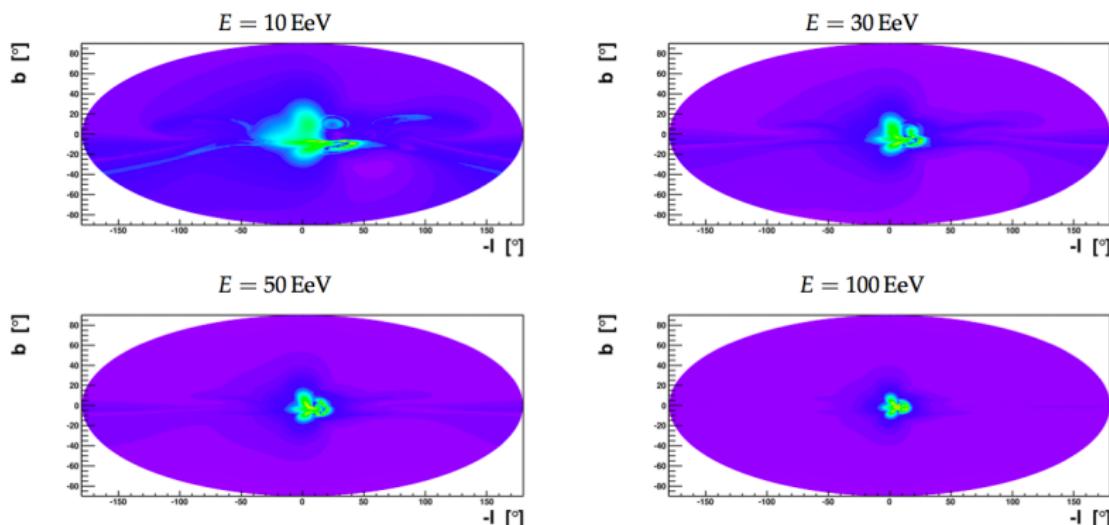
Campo Magnético  
Galáctico

Modelos do  
Campo Magnético  
Regular

Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais





UNICAMP

## Bateria de Biermann

[Introdução](#)[Métodos de  
Medição](#)[Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias](#)[Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias](#)[Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias](#)[Campo Magnético  
Galáctico](#)[Modelos do  
Campo Magnético  
Regular](#)[Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico](#)[Magnetogênese  
Cosmológica](#)[Considerações  
Finais](#)

- Em um plasma com flutuações na pressão eletrônica  $P_e$ , elétrons movem-se para regiões de baixa pressão, criando um campo elétrico:

$$\vec{E} = -\frac{\vec{\nabla}P_e}{n_e e}.$$

Aplicando a lei de Faraday, tem-se que

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -c\vec{\nabla} \times \vec{E} = \frac{c}{e}\vec{\nabla} \times \left(\frac{\vec{\nabla}P_e}{n_e}\right).$$

- Assumindo uma equação de estado ideal para elétrons, da forma  $P_e = n_e k_B T$ , obtém-se a expressão

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{ck_B}{n_e e}\vec{\nabla}n_e \times \vec{\nabla}T_e.$$

- Campos magnéticos podem ter sido formados através deste mecanismo no período de formação de grandes estruturas.

# Modelo de Dínamo $\alpha - \Omega$

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Modelos do  
Campo Magnético  
Regular

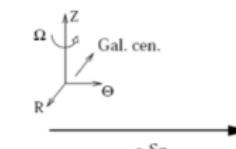
Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

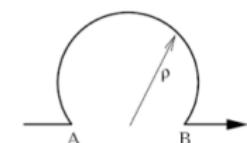
Considerações  
Finais

Kulsrud e Zweibel, 2008

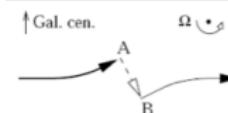
Os painéis (a) e (b) mostram uma supernova criando uma "bolha" no ISM, alongando as linhas de campo magnético, formando um *loop*. Em (c) pode-se ver o campo (linha tracejada) e a força de Coriolis torcendo o *loop* em um plano poloidal. A rotação diferencial age esticando as linhas de campo, aumentando o fluxo magnético no disco (d). Eventualmente as linhas de campo são expelidas do disco ((e) e (f)).



(a) Side view



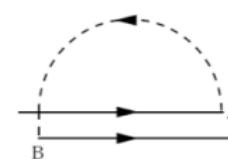
(b) Side view



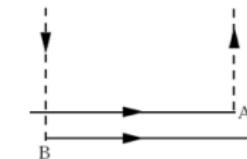
(c) Top view



(d) Top view



(e) Side view



(f) Side view

# Campo Magnético Galáctico<sup>1</sup>

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Modelos do  
Campo Magnético  
Regular

Origem e  
Evolução do  
Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

- $\vec{B}$  está orientado no sentido horário na parte externa do disco galáctico e anti-horário em algumas partes internas do disco (Brown *et al.*, 2007; Noutsos *et al.*, 2008).
- Segundo Men *et al.* (2008), é possível que um único modelo simples possa não ser capaz de descrever o campo magnético galáctico em larga escala.
- $\vec{B} = B\hat{z}$  foi detectado, mas não se pode inferir antissimetria ou uma geometria dipolar para o campo;  $B_{halo}^{regular} \sim 1 \mu G$  e  $B_{halo}^{total} \sim 2 \mu G$  (Sun *et al.*, 2008; Mao *et al.*, 2009).
- A componente turbulenta tem intensidade e comprimento de coerência dependente da localização na galáxia (Haverkorn *et al.*, 2008).
- Perspectivas:
  - GALFACTS, GMIMS, ATA, LOFAR, MWA, ASKAP, SKA
  - informações complementares: Fermi, Planck, Auger

<sup>1</sup>Slide adaptado da apresentação de Gaensler, Ringberg, 2009.



# Magnetogênese Cosmológica

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

## Origem dos Campos

- **origem cosmológica:** geração do campo antes do período da recombinação
- **origem associada à formação de grandes estruturas:** geração do campo após a recombinação, durante o período de formação de estruturas



# Magnetogênese Cosmológica

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

## Origem Primordial

- vórtices primitivos
- transição de fase quark-hadron
- transição de fase eletrofraca
- helicidade magnética e bariogênese eletrofraca
- origem inflacionária
- cordas cósmicas



## Perguntas em Aberto

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

- O campo magnético regular afeta o fluxo de gás?
- Os campos magnéticos contribuem para a forma espiral de algumas galáxias?
- Os dínamos são capazes de explicar campos coerentes?



UNICAMP

# Dínamos São Capazes de Explicar o GMF? Sim<sup>2</sup>

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

- Campos espirais ocorrem por toda parte, até mesmo em galáxias irregulares.
- O grau das espirais logarítmicas são previstos pelo modelo e coincidem observacionalmente.
- Campos magnéticos coerentes em larga são observados.
- Há pelo menos um exemplo de uma galáxia predominante ASS (M31).

<sup>2</sup>Slide adaptado da apresentação de Beck, Ringberg, 2009.



UNICAMP

# Dínamos São Capazes de Explicar o GMF? Não<sup>3</sup>

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

- Modos dominantes por uma única configuração são raros → dínamos não lineares?
- Os campos magnéticos espirais se estendem até o centro
- Dínamos não podem explicar a direção preferencial (apontando para o centro) observada em diversas galáxias.
- Os campos são intensos em outras galáxias (MRI).

<sup>3</sup>Slide adaptado da apresentação de Beck, Ringberg, 2009.

# Origem e Geometria do Campo

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

- A maioria das **teorias de dínamo** prevêem simetrias pares com relação à reflexão sobre o plano galáctico.
- A maioria das **teorias primordiais** prevêem simetrias ímpares com relação à reflexão sobre o plano galáctico.
- São conhecidas reversões de campo entre os braços espirais em M81 e na Via Láctea.
- M31 e IC342 não apresentam reversão do campo entre os braços espirais.



UNICAMP

## Conclusões

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

- Campos magnéticos estão presentes no universo, em diversas escalas.
- Não se conhece a origem dos campos magnéticos cósmicos
- Possíveis campos magnéticos primordiais podem ter contribuído de alguma forma na evolução do universo, mas não existem evidências para isto.
- Campos magnéticos cósmicos são a chave para a aceleração e transporte de partículas carregadas.

## Referências Bibliográficas

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

- Kim *et al.* ApJ, 355:29-37 (1990).
- T. A. Enßlin, M. Brueggen. astro-ph/0104119, (2001).
- M. Soida, A & A, 394:47-57 (2002).
- R. N. Manchester, ApJ, 172:43 (1972).
- M. Simard-Normandin, P. P. Kronberg. ApJ, 242:74-94 (1980).
- R. C. Thomson, A. H. Nelson. MNRAS, 191:863-870 (1980).
- H. Ohno, S. Shibata. MNRAS, 262(4):953-962 (1993).
- L. M. Widrow. Rev. Mod. Physics. 74(3):775-823 (2002).
- T. Stanev. ApJ. 479:290 (1997).
- E. Roulet, D. Harari, S. Mollerach. JHEP. 8:22 (1999).
- I. I Tkachev, P. G. Tinyakov. Astro. Phys. 18:165-172 (2002).
- R. Šmídá, M. Prouza. A & A. 410:1-10 (2003).
- M. Teshima, M. Kalcherieß, P. D. Serpico. Astro. Phys. 26:378-386 (2007).
- R. M. Kulsrud, E. G. Zweibel. Rep. Prog. Phys. 71(4) (2008).



# Agradecimentos

Introdução

Métodos de  
Medição

Campos  
Magnéticos em  
Aglomerados de  
Galáxias

Campos  
Magnéticos Além  
dos Aglomerados  
de Galáxias

Campos  
Magnéticos em  
Outras Galáxias

Campo Magnético  
Galáctico

Magnetogênese  
Cosmológica

Considerações  
Finais

