

# Estudo do efeito da gravidade na turbulência e campo magnético nas regiões de formação estelar

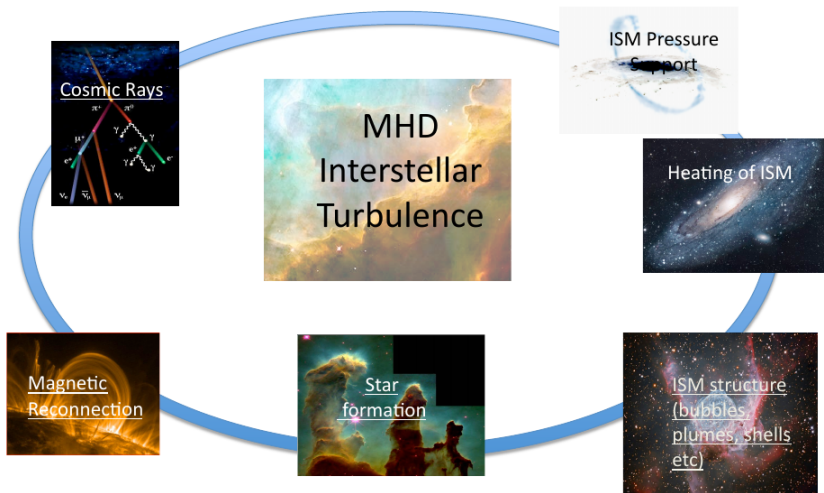
Lorena do Carmo Jesus

Orientadores: Diego Falceta-Gonçalves e Alex Lazarian

DAS-INPE

05/04/2017

- Turbulência interestelar <sup>1</sup>.



<sup>1</sup>(Imagem disponível em: Burkhart, 2012)

- **Teoria de Kolmogorov** incompressibilidade + isotropia + localidade.

$$E(k) = \varepsilon^{-2/3} k^{-5/3} \quad (1)$$

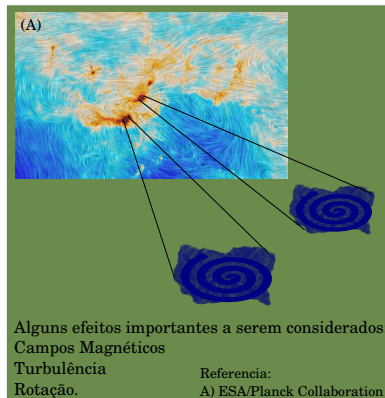
*O MI é magnetizado e compressível*

- **Turbulência MHD:**

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 \vec{u} + \frac{(\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B}}{4\pi\rho} + \frac{\nabla \vec{B}}{\nabla t} + (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} + \eta \nabla^2 \vec{B} \quad (2)$$

## Em específico, em formação estelar

- Análises espectrais de alta resolução indicam que as nuvens moleculares são fluidos turbulentos e magnetizados, apresentando movimentos complexos, difusão de matéria e dissipação de energia cinética de grandes até pequenas escalas.



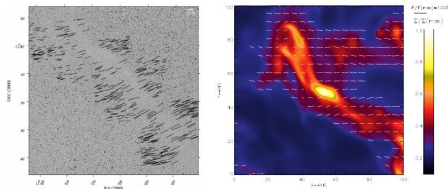


## Estimativa observacional de $B$ :

- Observações espectrais e dos mapas de polarização dos grãos de poeira, com base no método de Chandrasekar-Fermi:

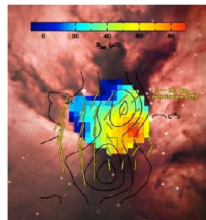
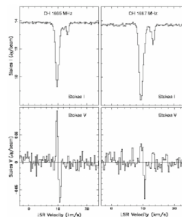
$$B_{POS} = \sqrt{4\pi\rho} \left( \frac{\sigma_v}{\sigma_\phi} \right), \quad (3)$$

$B_{POS}$  é o valor médio do campo magnético projetado no plano do céu,  $\rho$  é a densidade do meio,  $\sigma_v$  é a dispersão de velocidade e  $\sigma_\phi$  é a dispersão do ângulo de polarização.



**Figura:** Lado esquerdo representa o mapeamento espacial dos vetores de polarização nos comprimentos de óptico e infravermelho da nuvem de Musca. O lado direito apresenta uma imagem de um mapa de polarização sintético obtido a partir das simulações magnetohidrodinâmicas, Falceta-Gonçalves (2011).

- A segunda maneira é a determinação da componente de  $B$  projetada na linha de visada ( $B_{LOS}$ ) devido ao efeito de desdobramento das linhas espectrais a partir do Efeito Zeeman.



**Figura:** A imagem representa a medida de  $B_{LOS}$  obtidas a partir de medidas Zeeman das linhas moleculares  $OH$ ,  $H_2O$  e  $CN$ . Nessa imagem, apresenta-se o gráfico de  $B_{LOS}$  em função da densidade colunar, indicando a correlação desses dois parâmetros (Crutcher, 2008).

**Título:** Determinação de mapas polarimétricos de jatos protoestelares gigantes existentes ao longo do processo de formação estelar.

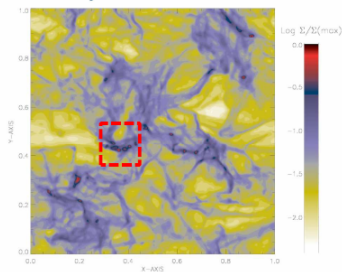
● **Orientado por:** Claudia Vilega Rodrigues-INPE.



Figura: Jato protoestelar gigante HH 46/47. Imagem obtida a partir do telescópio Hubble.

- Realizar um estudo estatístico de mapas de polarização sintéticos criados a partir das simulações de modelos com e sem gravidade, aplicando-se o método de Chandrasekhar-Fermi.
- O segundo objetivo deste trabalho é obter uma estimativa de  $B$  na linha de visada em simulações com gravidade e estudar suas correlações estatísticas com alguns parâmetros, como por exemplo, a densidade colunar.
- Obter a correlação estatística entre o campo magnético e a densidade das regiões de formação estelar, a partir da análise das linhas Zeeman.

- Os trabalhos que tentam realizar uma estimativa de  $B$  usam uma aproximação baseada em um regime onde o meio é turbulento, isotérmico e sem gravidade. Entretanto, existem trabalhos que sugerem a distorção de  $B$  devido ao efeito de gravidade, (Soler et. al, 2013).

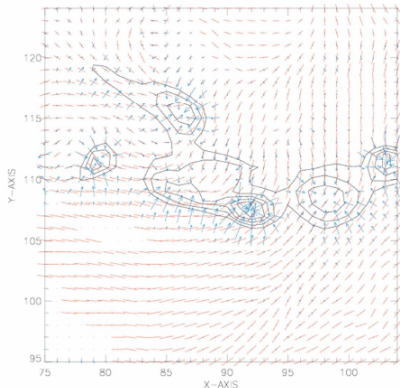


HRO-technique

Soler et al. (2013)

Polarization distortion by gravity?

Koch, Tang & Koh (2012)



- Para que estes objetivos sejam alcançados faremos uso de um conjunto de simulações magnetohidrodinâmicas, realizadas em três dimensões e alta resolução, incluindo os efeitos de autogravidade do gás, e de técnicas de reconstrução parâmetros observáveis sintéticos, já desenvolvidos pelo grupo <sup>2</sup>.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot \left[ \rho \mathbf{v} \mathbf{v} + \left( p + \frac{B^2}{8\pi} \right) \mathbf{I} - \frac{1}{4\pi} \mathbf{B} \mathbf{B} \right] = \mathbf{f}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0, \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (7)$$

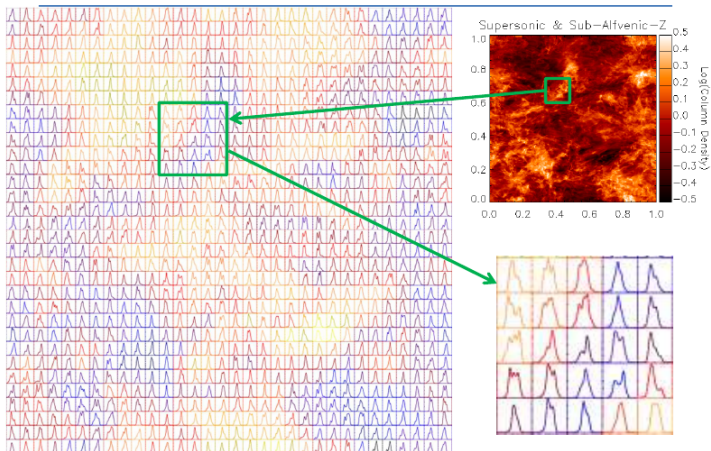
$$p = c_s^2 \rho, \quad (8)$$

em que  $\rho$ ,  $\mathbf{v}$  e  $p$  são a densidade, a velocidade e pressão do plasma, respectivamente, e  $\mathbf{f} = \mathbf{f}_{\text{turb}} + \mathbf{f}_{\text{grav}}$  representa os termos externos de turbulência e auto-gravidade.

---

<sup>2</sup><http://amumcode.org>

- Cubo de dados<sup>3</sup>.

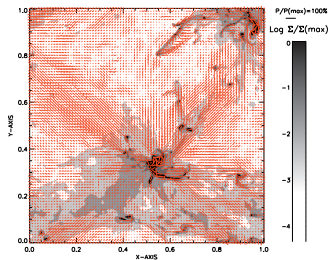


<sup>3</sup>(Falceta-Gonçalves, 2016)

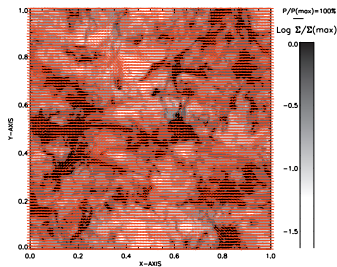
- Exemplo de simulação de nuvem molecular auto-gravitante



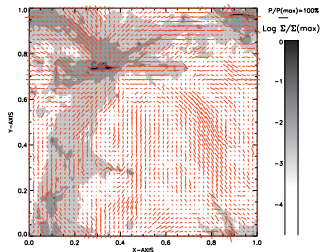
Caso sub-Alfvênico, supersônico com e sem gravidade  $xy$  ( $a$  e  $c$ ) e  $yz$  ( $b$  e  $d$ ), respectivamente:



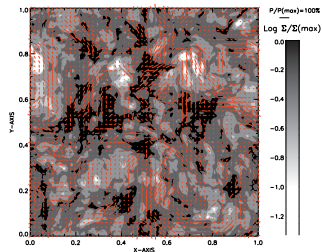
(a)



(b)

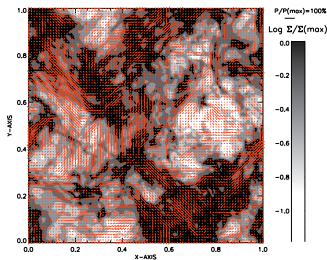


(c)

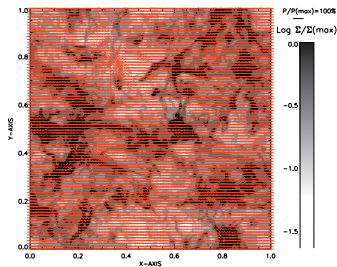


(d)

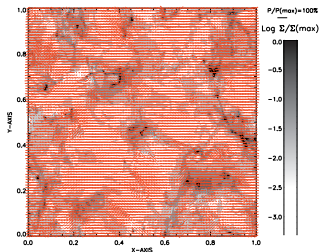
Caso super-Alfvênico, supersônico com e sem gravidade xy (a e c) e yz (b e d), respectivamente:



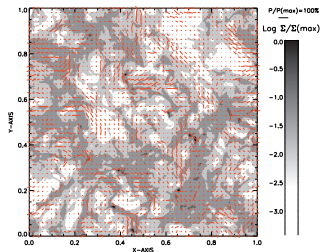
(a)



(b)



(c)



(d)

## As perspectivas são:

- Explorar uma técnica que permita combinar observações e simulações numéricas para a determinação das condições físicas em grande escala das nuvens moleculares. Assim, além de um estudo das correlações entre os parâmetros das simulações, procuraremos explorar as relações entre estes e os observáveis nas regiões de formação estelar.

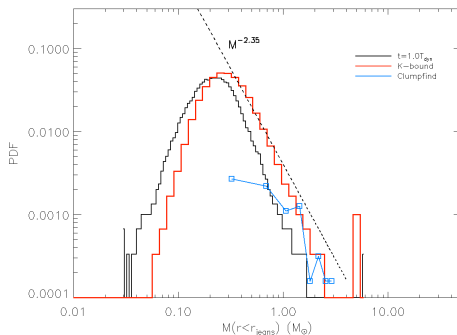


Figura: PDF dos dados obtidos a partir das simulações numéricas para este trabalho