

# Modelo de Formação Estelar Unificado

---

**Carolina Gribel de Vasconcelos Ferreira**

**Orientadores: Dr. Oswaldo Duarte Miranda e Dr. José**

**Williams Vilas-Boas**

# Sumário da seção 1

1. Introdução
2. Taxa Cósmica de Formação Estelar
  - 2.1 Formação de Estrutura
  - 2.2 Modelo Hierárquico
3. Modelo regulado por Turbulência Supersônica
  - 3.1 Função de Distribuição de Probabilidade (PDF)
  - 3.2 Variância-Mach
  - 3.3 Taxa de Formação Estelar
4. Lei de Larson
5. Metodologia
6. Resultados
  - 6.1 Eficiência vs. Mach
  - 6.2 Lei de Larson
7. Conclusão

# Introdução

## *Formação Estelar*

- A teoria da formação estelar (FE) é bastante complexa por envolver diferentes processos físicos.
- **Problema na Taxa de Formação Estelar (TFE):** Modelo teórico não reproduz a TFE observada.
- Modelos teóricos de FE tem abordagens diferentes.
- **Nuvens Moleculares:** Turbulência Supersônica.

# Introdução

## *Objetivo*

### Taxa Cósmica de Formação Estelar (TCFE)

Abordagem cosmológica baseada no formalismo de Press & Schechter (PS74).

### Modelo regulado por turbulência supersônica

A abordagem de nuvens moleculares dominadas por fluxos supersônicos, baseado no modelo de Federrath (2015).

### OBJETIVO DO TRABALHO

Obter parâmetros que controlam a formação estelar em pequenas escalas utilizando um modelo cosmológico teórico.

## Sumário da seção 2

1. Introdução
2. Taxa Cósmica de Formação Estelar
  - 2.1 Formação de Estrutura
  - 2.2 Modelo Hierárquico
3. Modelo regulado por Turbulência Supersônica
  - 3.1 Função de Distribuição de Probabilidade (PDF)
  - 3.2 Variância-Mach
  - 3.3 Taxa de Formação Estelar
4. Lei de Larson
5. Metodologia
6. Resultados
  - 6.1 Eficiência vs. Mach
  - 6.2 Lei de Larson
7. Conclusão

# Taxa C3smica de Forma33o Estelar

## Forma33o de Estrutura

- Perturba33es na densidade da mat33ria escura.
- Essas perturba33es evoluem com o tempo, na mat33ria escura temos duas solu33es:

$$\delta_t = 1,06 \quad (1)$$

$$\delta_c = 1,69 \quad (2)$$

- Espectro de Massa: Formalismo Press & Schechter,

$$\frac{dn}{dM} = \frac{\rho_0}{M} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\nu}{M} \frac{d \log \nu}{d \log M} e^{-\nu^2/2} \quad (3)$$

# Taxa C3smica de Forma33o Estelar

## Modelo Hier3rquico

- O g3s contido dentro desses halo,

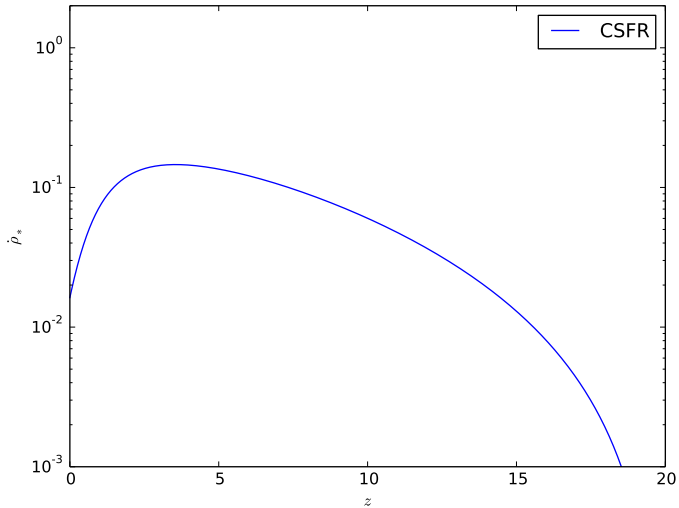
$$\dot{\rho}_g = -\frac{d^2 M_*}{dVdt} + \frac{d^2 M_{ej}}{dVdt} + a_b(t) \quad (4)$$

$$\frac{d^2 M_*}{dVdt} = \Psi(t) = k\rho_g \quad (5)$$

$$\frac{d^2 M_{ej}}{dVdt} = \int_{m(t)}^{140M_\odot} (m - m_r)\Phi(m)\Psi(t - \tau_m)dm \quad (6)$$

$$a_b(t) = \Omega_b \rho_c \left( \frac{dt}{dz} \right)^{-1} \left| \frac{df_b}{dz} \right| \quad (7)$$

# Taxa C3smica de Forma33o Estelar





## Sumário da seção 3

1. Introdução
2. Taxa Cósmica de Formação Estelar
  - 2.1 Formação de Estrutura
  - 2.2 Modelo Hierárquico
3. Modelo regulado por Turbulência Supersônica
  - 3.1 Função de Distribuição de Probabilidade (PDF)
  - 3.2 Variância-Mach
  - 3.3 Taxa de Formação Estelar
4. Lei de Larson
5. Metodologia
6. Resultados
  - 6.1 Eficiência vs. Mach
  - 6.2 Lei de Larson
7. Conclusão

## Modelo regulado por Turbulência Supersônica

### PDF

- Este modelo baseia-se em simulações hidrodinâmicas de turbulência supersônica não-isotérmica

$$p_V(s) = I_1(2\sqrt{\lambda\omega})\exp[-(\lambda + \omega)]\sqrt{\lambda/\theta^2\omega} \quad (8)$$

$$\lambda \equiv \frac{\sigma_{s,V}^2}{2\theta^2}; \quad \omega(s) \equiv \frac{\lambda}{(1 + \theta)} - \frac{s}{\theta} \quad (\omega(s) \geq 0) \quad (9)$$

- e turbulência supersônica isotérmica,

$$p_V(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{s,V}^2}} \exp\left(-\frac{(s - s_0)^2}{2\sigma_{s,V}^2}\right) \quad (10)$$

## Modelo regulado por Turbulência Supersônica

### Variância-Mach

- O contraste de densidade,  $x = \rho/\rho_0$ , é obtido resolvendo a equação,

$$x^\Gamma + \Gamma b^2 \mathcal{M}^2 \left( \frac{1}{x} - 1 \right) - 1 = 0 \quad (11)$$

- A relação entre a variância e o contraste de densidade é dada pelas seguintes equações

$$\sigma_{\rho/\rho_0}^2 = \frac{1}{V} \int_V \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)^2 dV \quad (12)$$

$$\sigma_s^2 = \ln\left(1 + \sigma_{\rho/\rho_0}^2\right) \simeq \ln\left(1 + \frac{\rho}{\rho_0}\right) \quad (13)$$

# Modelo regulado por Turbulência Supersônica

## Taxa de Formação Estelar

- A derivação da TFE utilizando  $\rho$ -PDF é definida pela seguinte equação,

$$SFR \sim \int_{\rho_{crit}}^{\infty} \frac{\rho}{t_{ff}(\rho)} p(\rho) d\rho \quad (14)$$

- Reescrevendo em termos do logaritmo da densidade crítica  $s$ ,

$$SFR \sim \int_{s_{scrit}}^{\infty} \exp\left(\frac{3}{2}s\right) p_V(s) ds \quad (15)$$

# Modelo regulado por Turbulência Supersônica

## Taxa de Formação Estelar

- A Taxa de Formação Estelar para a PDF isotérmica tem solução analítica,

$$SFR \sim \frac{1}{2} \exp\left(\frac{3}{8} \sigma_{s,V}^2\right) \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\sigma_{s,V}^2 - S_{crit}}{(2\sigma_{s,V}^2)^{1/2}}\right) \right] \quad (16)$$

- onde,

$$\sigma_{s,V}^2 = \ln(1 + b^2 \mathcal{M}^2) \quad (17)$$

# Modelo regulado por Turbulência Supersônica

## Taxa de Formação Estelar

- Para o caso da PDF não-isotérmica essa integração não tem solução analítica.

$$\theta = 0.035b \mathcal{M} \Gamma^2 \quad (18)$$

- A TFE obtida através da integral numérica, é dada por

$$SFR(\Gamma, \mathcal{M}, b) \sim \int_{s_{crit}}^{\infty} e^{3s/2} p_V(s, \sigma_{s,V}^2(\Gamma, \mathcal{M}, b), \theta(\Gamma, \mathcal{M}, b)) ds \quad (19)$$

## Sumário da seção 4

1. Introdução
2. Taxa Cósmica de Formação Estelar
  - 2.1 Formação de Estrutura
  - 2.2 Modelo Hierárquico
3. Modelo regulado por Turbulência Supersônica
  - 3.1 Função de Distribuição de Probabilidade (PDF)
  - 3.2 Variância-Mach
  - 3.3 Taxa de Formação Estelar
- 4. Lei de Larson**
5. Metodologia
6. Resultados
  - 6.1 Eficiência vs. Mach
  - 6.2 Lei de Larson
7. Conclusão

## Lei de Larson

- A partir de observações de nuvens moleculares alguns parâmetros, como o tamanho da nuvem, dispersão de velocidade, densidade e massa, apresentam correlações. Estas relações são bem conhecidas como *leis de Larson*.

$$\langle V_{rms}^2 \rangle = \mathcal{M}^2 c_s^2 \quad (20)$$

- A velocidade do som no meio e isto é feito considerando um gás politrópico

$$c_s = \sqrt{\kappa \gamma \rho^{(1-\gamma)/2}}, \quad \kappa = \frac{k_b}{\mu m_H} \rho_0^{1-\gamma} T_0 \quad (21)$$



## Sumário da seção 5

1. Introdução
2. Taxa Cósmica de Formação Estelar
  - 2.1 Formação de Estrutura
  - 2.2 Modelo Hierárquico
3. Modelo regulado por Turbulência Supersônica
  - 3.1 Função de Distribuição de Probabilidade (PDF)
  - 3.2 Variância-Mach
  - 3.3 Taxa de Formação Estelar
4. Lei de Larson
- 5. Metodologia**
6. Resultados
  - 6.1 Eficiência vs. Mach
  - 6.2 Lei de Larson
7. Conclusão

# Metodologia

## *Unificando os modelos*

### OBJETIVO DO TRABALHO

Obter parâmetros que controlam a formação estelar em pequenas escalas utilizando um modelo cosmológico teórico.

- Utilizamos o código em FORTAN para calcular a TCFE e o modelo de FE regulado por turbulência.
- Qual é a combinação entre  $s_{crit}$ ,  $\Gamma$  e  $\mathcal{M}$  que reproduz a Taxa Cósmica de Formação estelar.

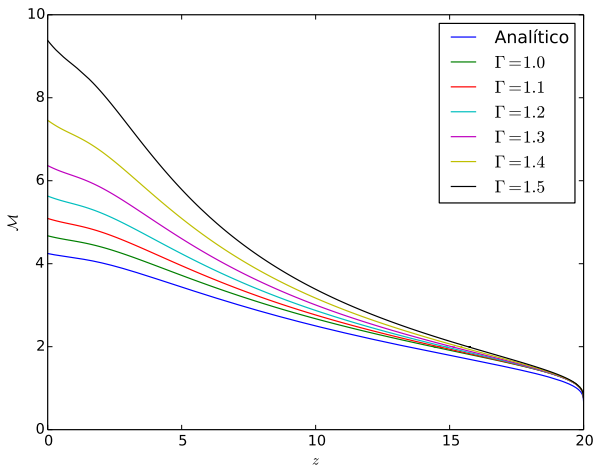
$$Err = \frac{\dot{\rho}_* - TFE(b, \mathcal{M}, \Gamma)}{\dot{\rho}_*} \quad (22)$$

## Sumário da seção 6

1. Introdução
2. Taxa Cósmica de Formação Estelar
  - 2.1 Formação de Estrutura
  - 2.2 Modelo Hierárquico
3. Modelo regulado por Turbulência Supersônica
  - 3.1 Função de Distribuição de Probabilidade (PDF)
  - 3.2 Variância-Mach
  - 3.3 Taxa de Formação Estelar
4. Lei de Larson
5. Metodologia
6. Resultados
  - 6.1 Eficiência vs. Mach
  - 6.2 Lei de Larson
7. Conclusão

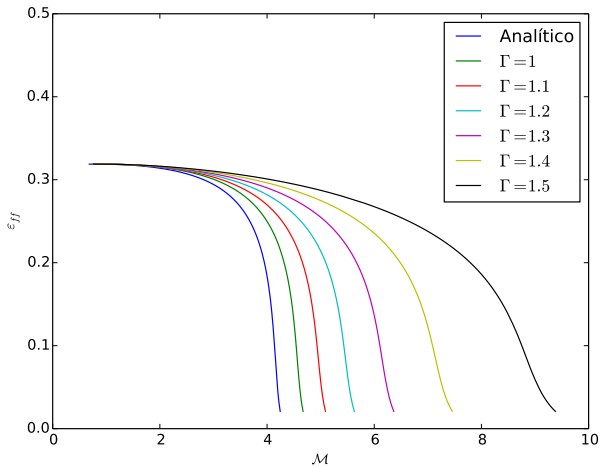
# Resultados

## *Eficiência vs. Mach*



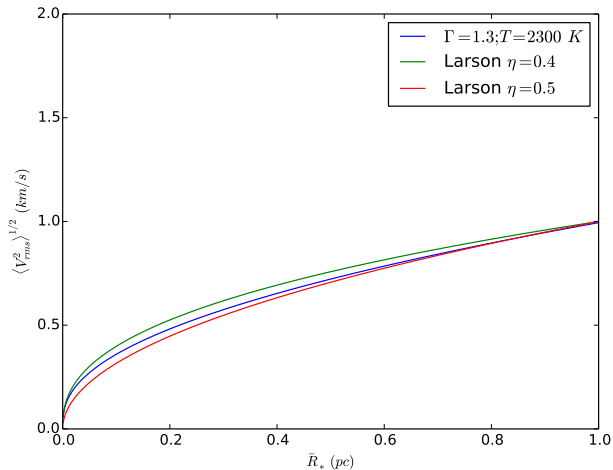
# Resultados

## *Eficiência vs. Mach*



# Resultados

## Lei de Larson



## Sumário da seção 7

1. Introdução
2. Taxa Cósmica de Formação Estelar
  - 2.1 Formação de Estrutura
  - 2.2 Modelo Hierárquico
3. Modelo regulado por Turbulência Supersônica
  - 3.1 Função de Distribuição de Probabilidade (PDF)
  - 3.2 Variância-Mach
  - 3.3 Taxa de Formação Estelar
4. Lei de Larson
5. Metodologia
6. Resultados
  - 6.1 Eficiência vs. Mach
  - 6.2 Lei de Larson
- 7. Conclusão**

## Conclusão

- Obtemos de forma consistente o número de Mach evoluindo com o redshift.
- A turbulência supersônica tem um papel dual.
- Obtivemos uma lei "tipo"Larson.

### Perpesctiva Futura

A partir desses resultados construir uma *Clump Mass Function* (CMF).



OBRIGADA!