



# ***Turbulência em Meios Astrofísicos***

***Reinaldo Santos-Lima***

***Astronomia ao Meio-Dia – 15.08.2019***

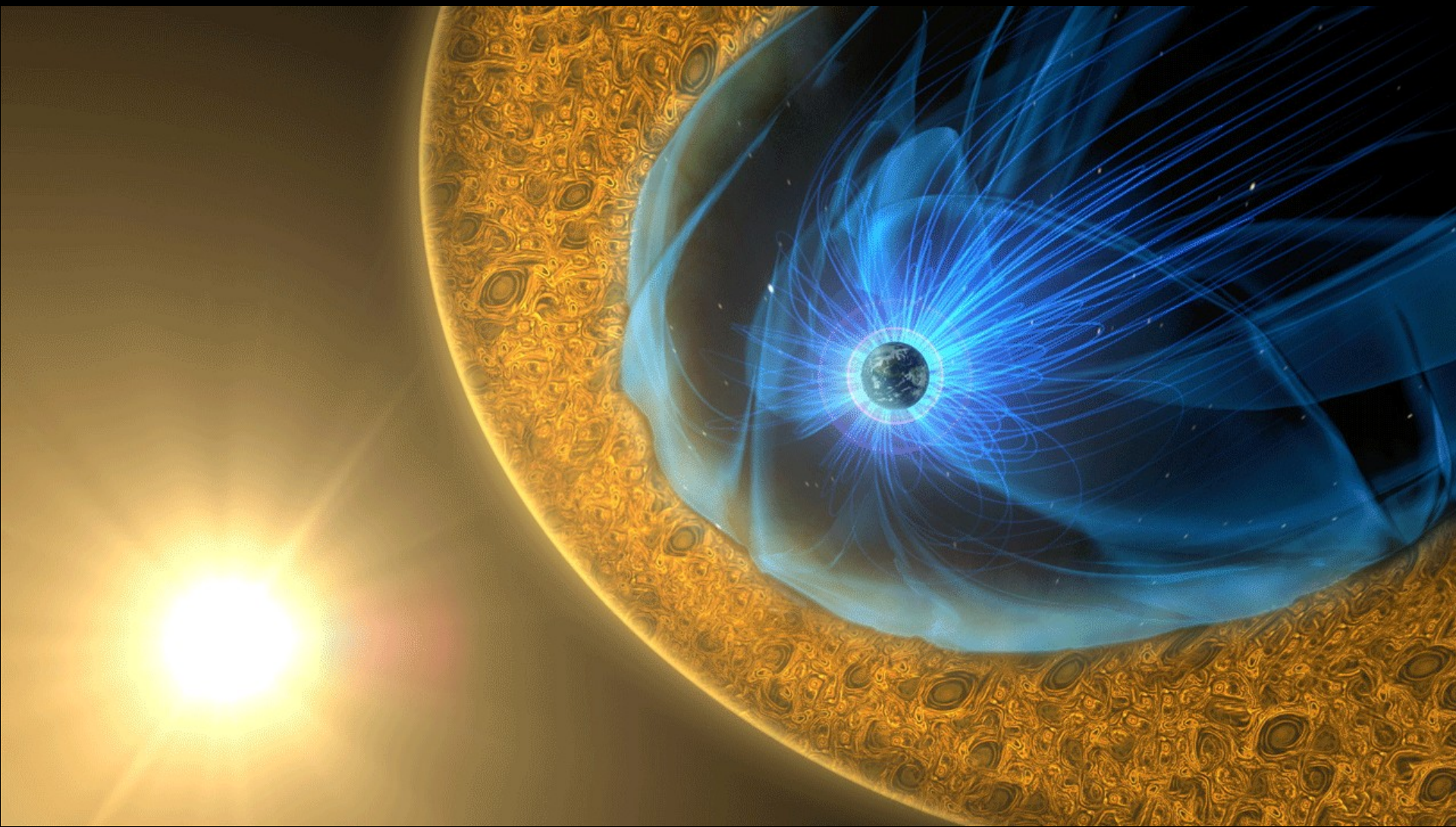
# Escoamento laminar e turbulento



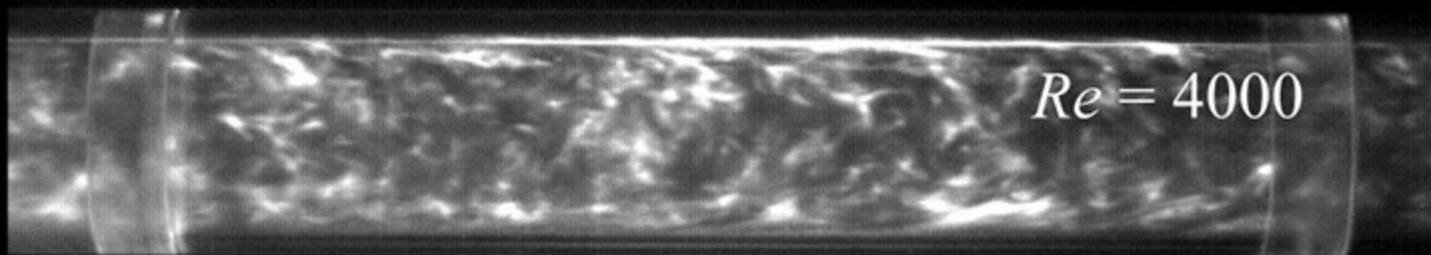
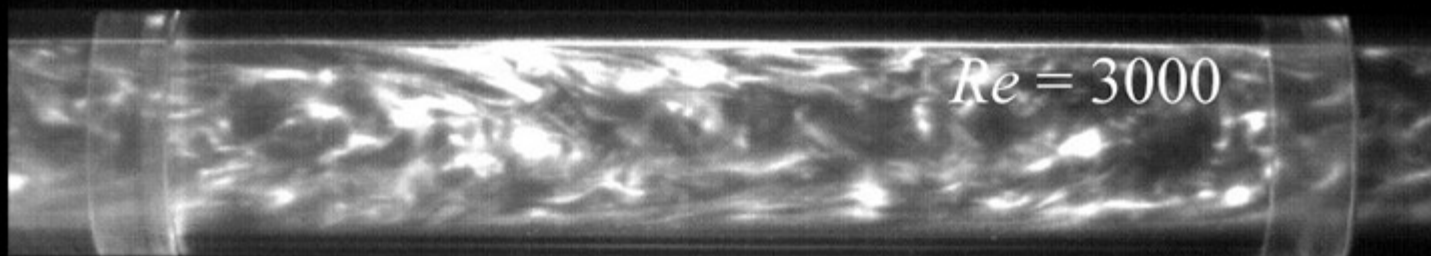
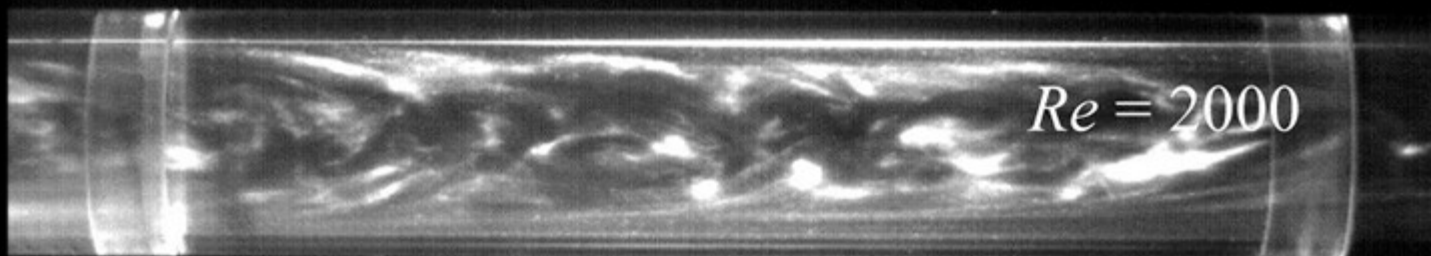


# **Exemplos de turbulência na natureza**

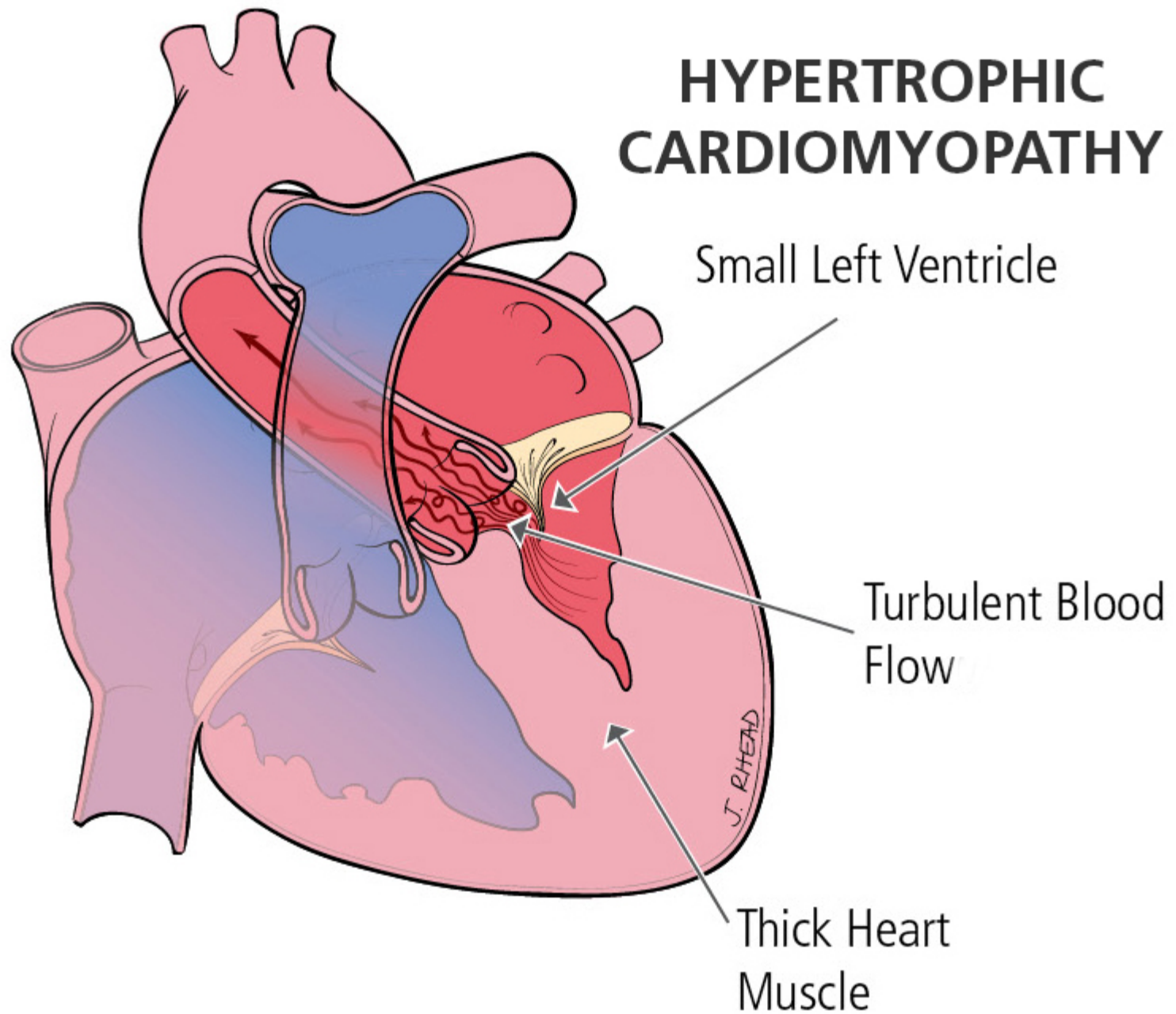


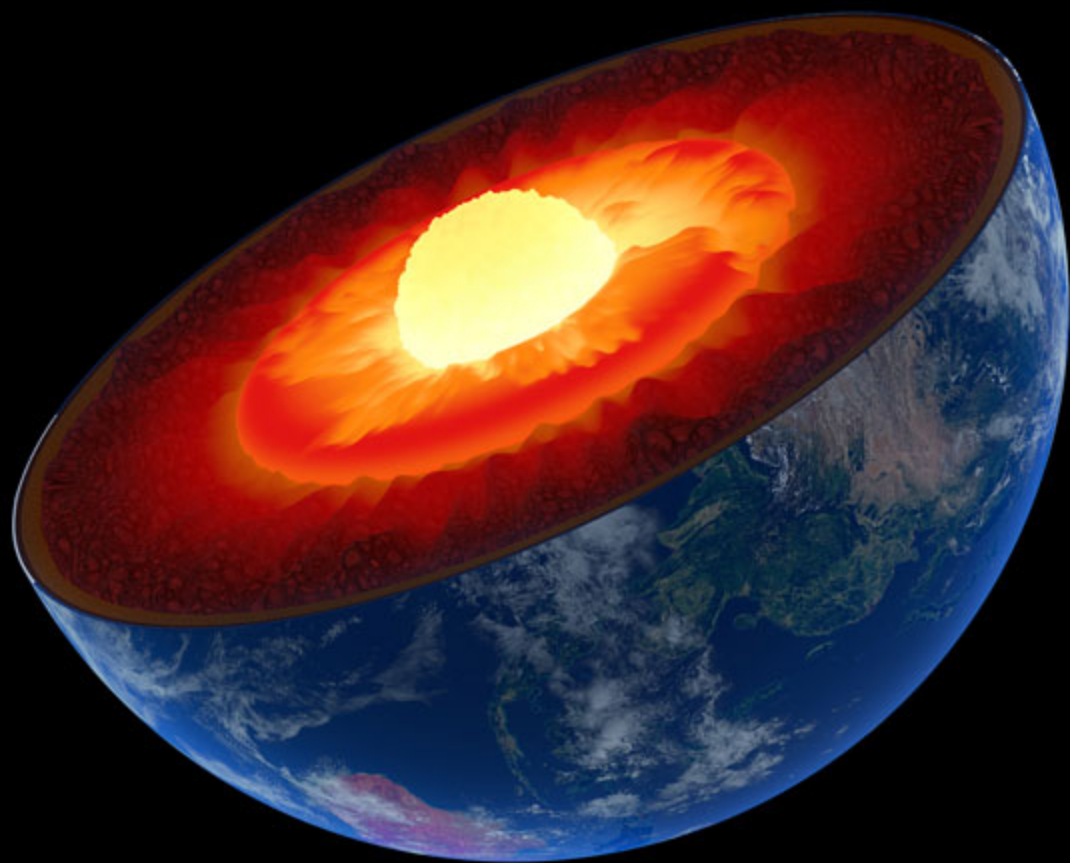






# HYPERTROPHIC CARDIOMYOPATHY







- 1. Por que a turbulência se desenvolve?***
- 2. Como compreendemos a turbulência?***
- 3. Quais são os efeitos da turbulência?***



- 1. Por que a turbulência se desenvolve?***
- 2. Como compreendemos a turbulência?***
- 3. Quais são os efeitos da turbulência?***



# Escoamentos turbulentos

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \boxed{\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \boxed{\nu \nabla^2 \mathbf{v}}$$

*advecção* *viscosidade*

$$\text{Re} \sim \frac{\text{advecção}}{\text{viscosidade}} \sim \frac{\ell v}{\nu} \gg 1$$

- Meios astrofísicos:
  - Zona convectiva do Sol: **Re**  $\sim 10^{13}$
  - Discos proto-estelares: **Re**  $\sim 10^9$
  - Meio interestelar: **Re**  $\sim 10^7$
  - Meio intra-aglomerado de galáxias: **Re**  $\sim 10^2$



- 1. Por que a turbulência se desenvolve?*
- 2. Como compreendemos a turbulência?**
- 3. Quais são os efeitos da turbulência?*



Large scale



energy injection



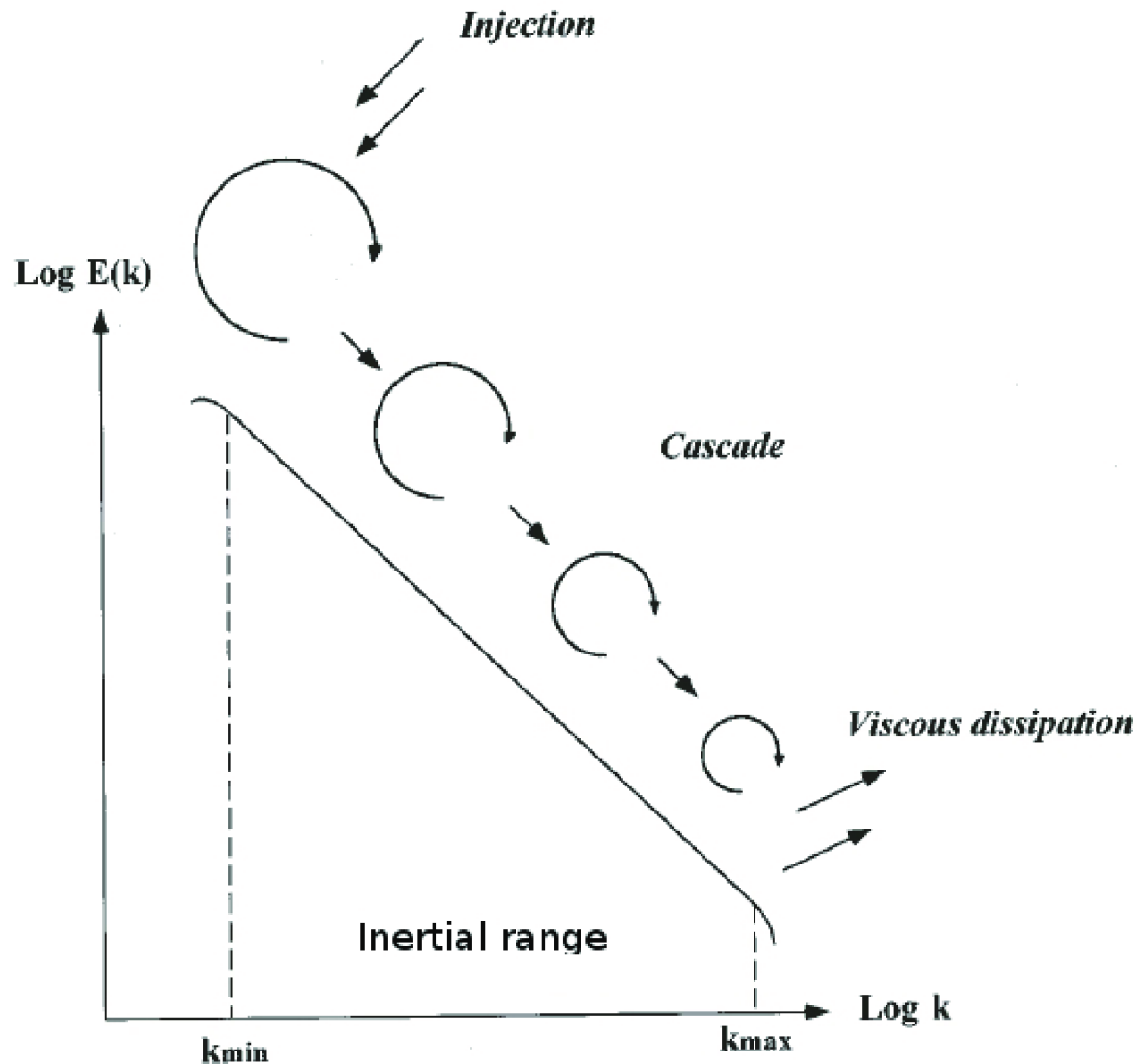
energy cascade



energy dissipation

Small scale

# Energy cascade in turbulent flows



## Kolmogorov (1941)

- isotropy
- universality
- locality

$$E(k) \propto k^{-5/3}$$

$$l_\nu = \left( \frac{\nu^3}{\epsilon} \right)^{1/4}$$



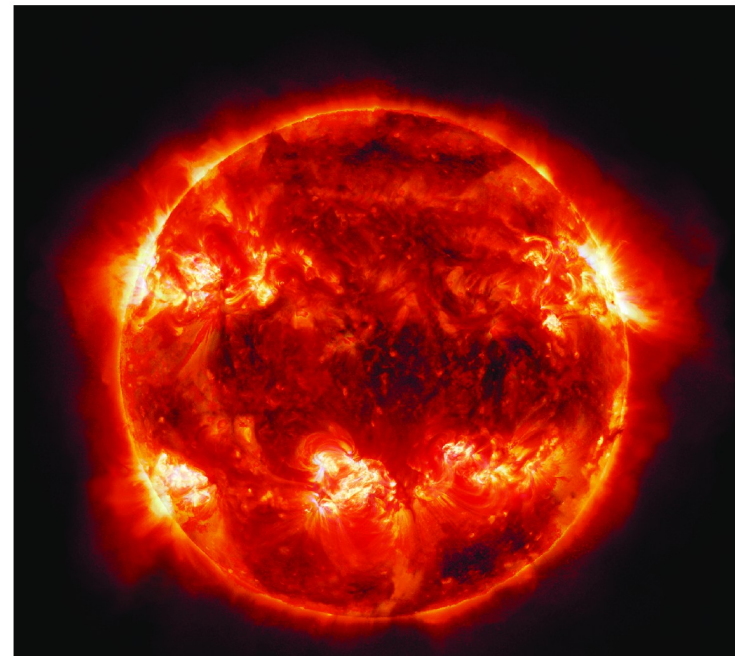
# Turbulence in plasmas

**Plasma:** gas electrically conducting.

Constitutes more than 90% of the visible Universe! (Goedbloed 2004)

**Magnetic fields** and **turbulence** – ubiquitous in astrophysical plasmas:

- Stellar surfaces and interiors
- Molecular clouds
- Warm and hot phases of the interstellar medium (ISM)
- ISM of external galaxies
- Intracluster medium of galaxies (ICM)





# Aproximação magneto-hidrodinâmica (MHD)

- Descreve a evolução conjunta de um **fluido condutor** e o **campo magnético** que o permeia

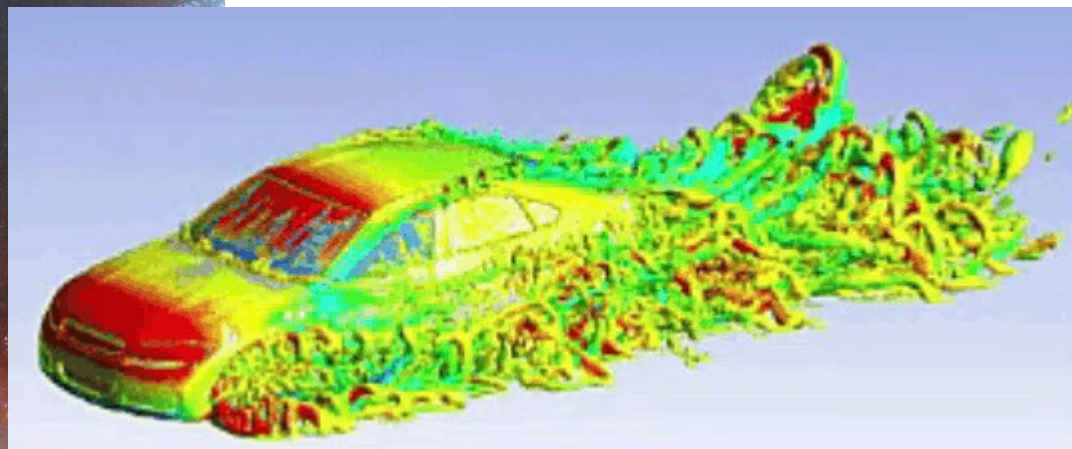
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla P + \rho \nu \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{1}{4\pi} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta_{\text{Ohm}} \nabla^2 \mathbf{B}$$



- 1. Por que a turbulência se desenvolve?*
- 2. Como compreendemos a turbulência?*
- 3. Quais são os efeitos da turbulência?**





**1.** *Por que a turbulência se desenvolve?*

**2.** *Como compreendemos a turbulência?*

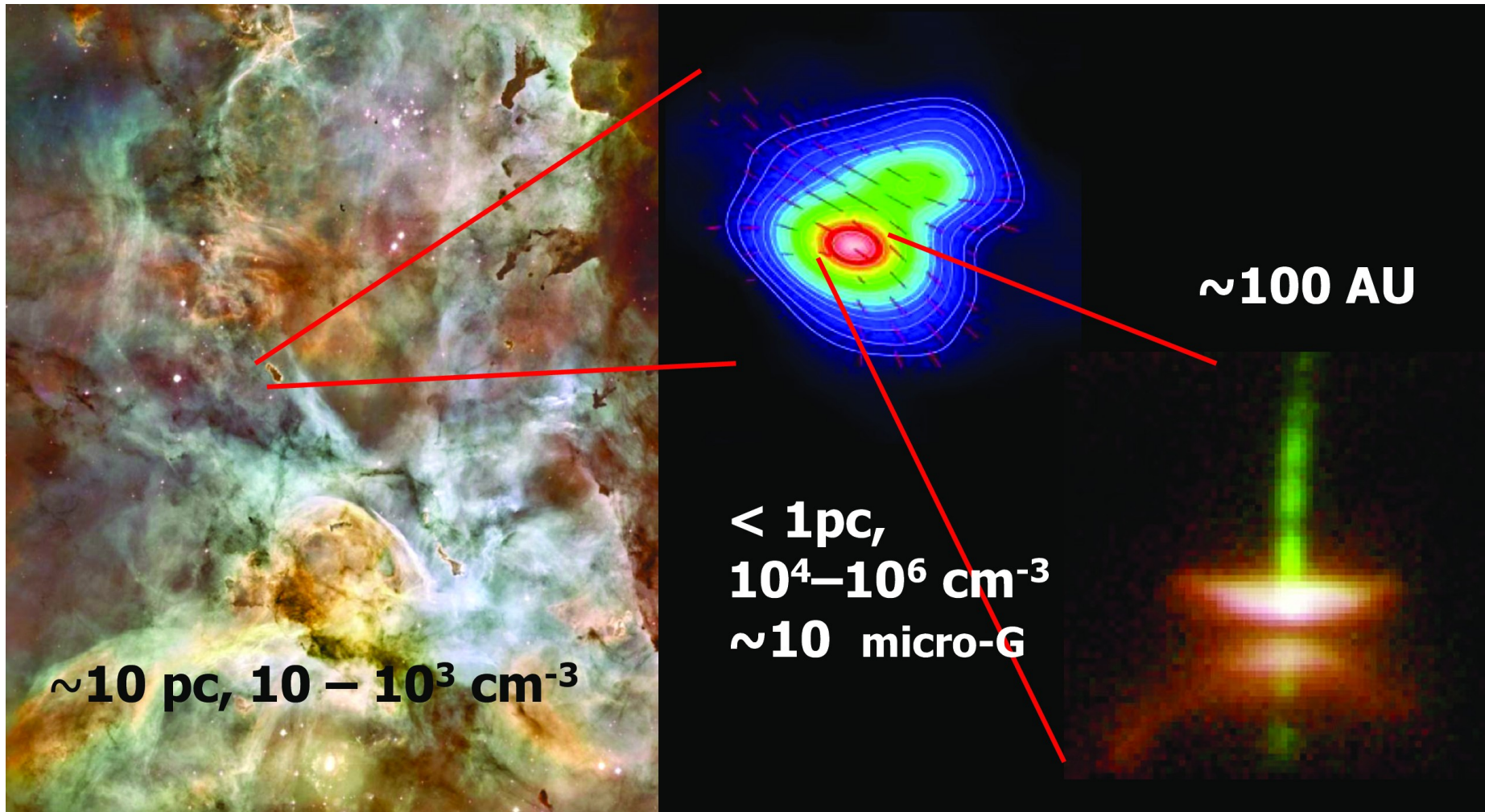
**3.** *Quais são os efeitos da turbulência?*

**➡ Na astrofísica**



- ***Controle da taxa de reconexão/difusão magnética***
- *Amplificação magnética*
- *Aceleração e transporte de raios cósmicos*

# Formação estelar: fenômenos em diversas escalas





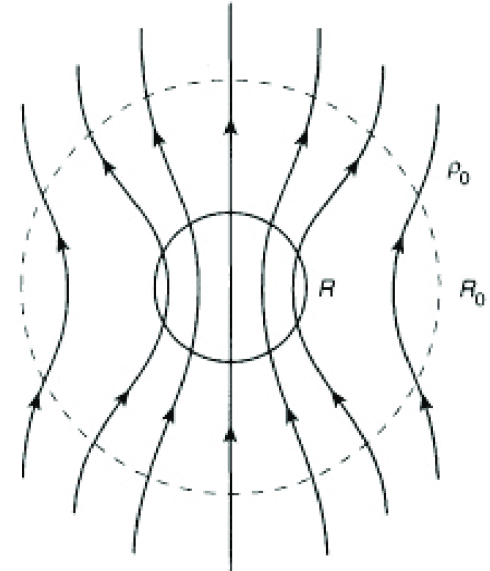
# Turbulência e campos magnéticos afetam a formação estelar

- **Pressão magnética** oferece resistência a contração gravitacional
- Linhas de campo produzem **torques** que podem frear a rotação de **discos proto-planetários**
- Turbulência **estrutura** o meio interestelar e pode desencadear **formação estelar**
- Fontes de turbulência na Galáxia:
  - **explosões de SN**
  - *outflows* de YSO
  - passagem de braços espirais

# Problema do fluxo magnético

- Baixa resistividade do plasma em ambiente de formação estelar

- **Teoria MHD**  $\Rightarrow$   
**congelamento do campo magnético**

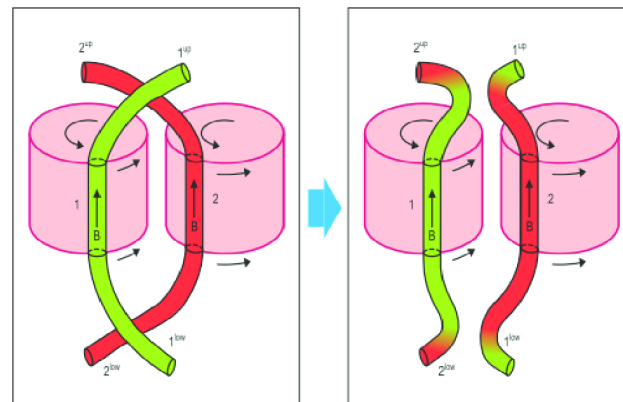


- **Observação:** fluxo magnéticos em estrelas T-Tauri  $\ll$  fluxo magnético em nuvens moleculares

$\Rightarrow$  **difusão magnética**  $\sim 10^3$  vezes **difusão ohmica** (*Shu et al. 2006*)

# Difusão por reconexão turbulenta

- Presença de turbulência acelera **reconexões do campo magnético**, tornando eficiente o transporte de tubos de fluxo



- Quebra da condição de congelamento de fluxo: difusão de campo magnético **independente** da resistividade do meio

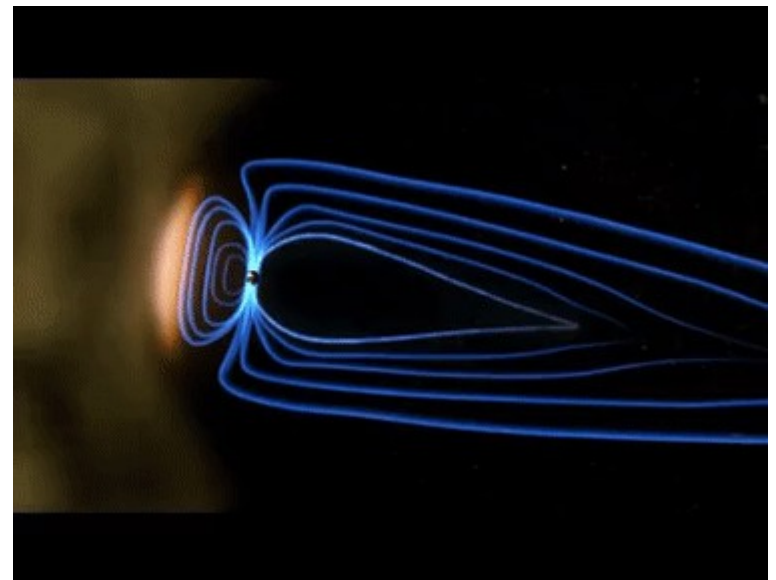
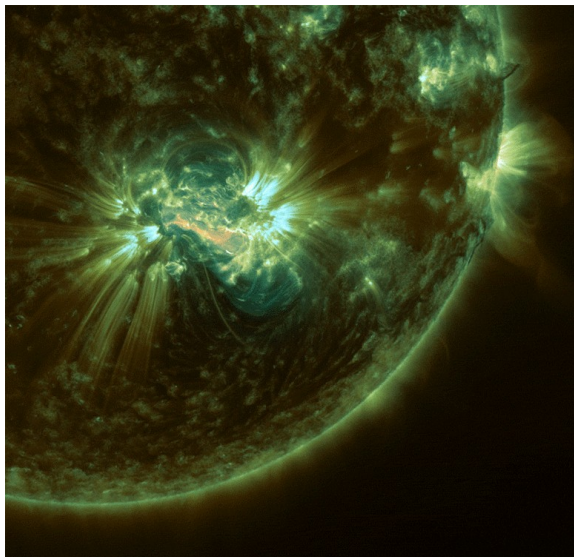
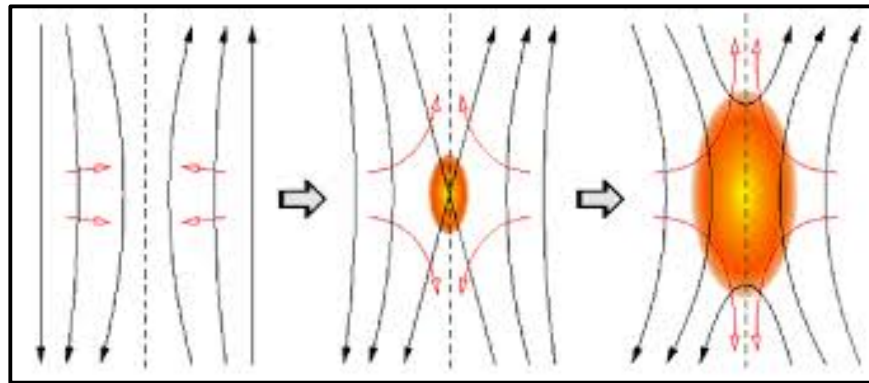
**Previsão  
teórica:**

$$D_B = \ell v_\ell \times \min \left\{ 1, \left( \frac{v_\ell}{v_A} \right)^3 \right\}$$

*Lazarian (2005)*

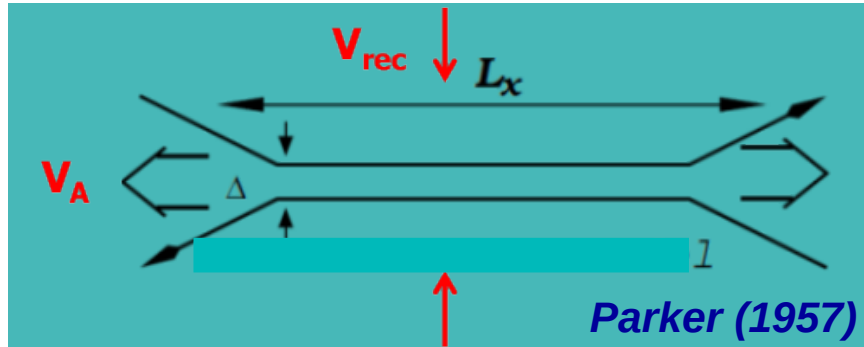
# Reconexão magnética

- Aproximação de tubos de fluxo de diferentes polaridades



# Reconexão magnética

## Modelo laminar

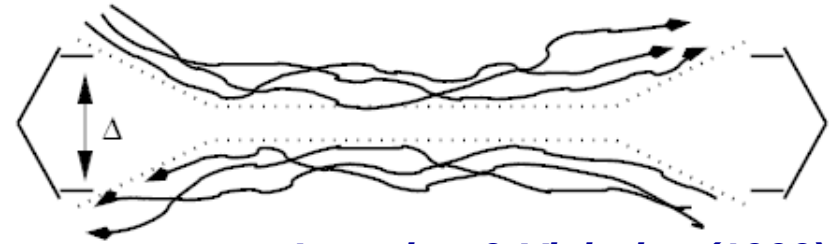


$$v_A = \frac{B}{\sqrt{4\pi\rho}}$$

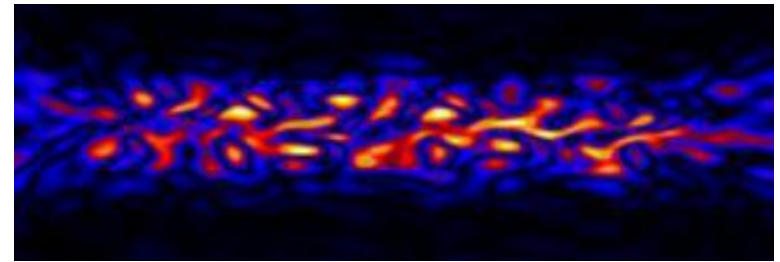
$$v_{\text{rec}} = v_A \left( \frac{Lv_A}{\eta} \right)^{-1/2}$$

$$v_{\text{rec}} \ll v_A \Rightarrow \textbf{"Lenta"}$$

## Modelo turbulento



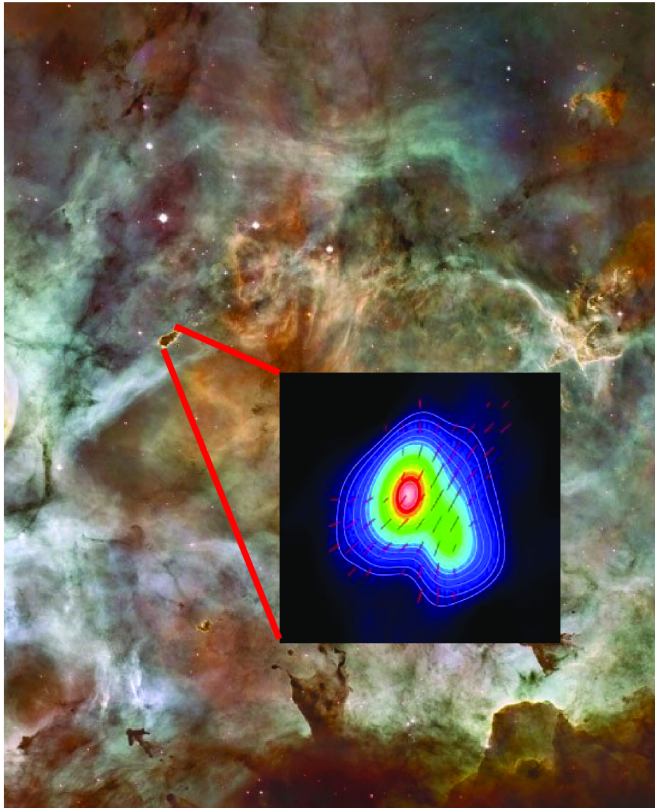
*Lazarian & Vishniac (1999)*



$$v_{\text{rec}} = v_A \left( \frac{\ell}{L} \right)^{1/2} \left( \frac{v_\ell}{v_A} \right)^2$$

$$v_{\text{rec}} \sim v_A \Rightarrow \textbf{"Rápida"}$$

# Reconnection Diffusion in clouds

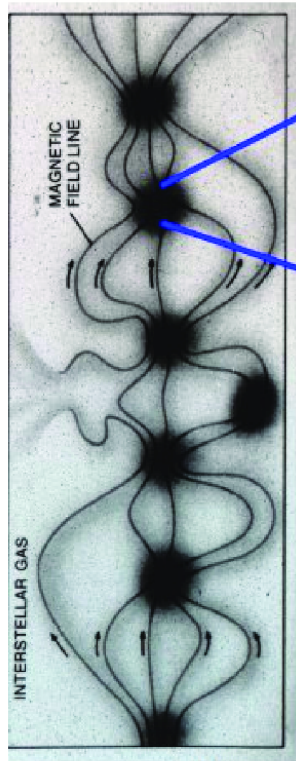


Embedded magnetic flux should be partially removed from denser to less dense regions by **reconnection diffusion**

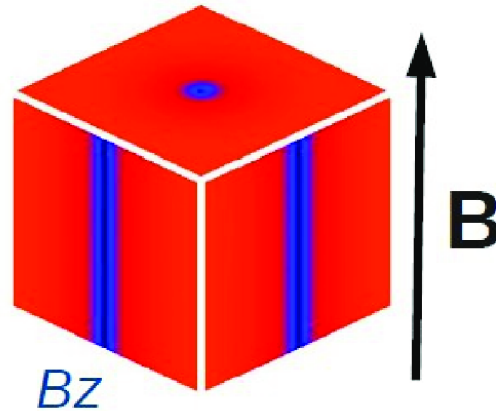


Can allow cloud clump collapse and can solve the magnetic flux problem!

# Teste da teoria em simulações MHD



From **Crutcher**  
(IAU2009 JD15)

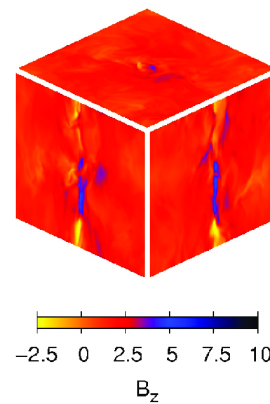
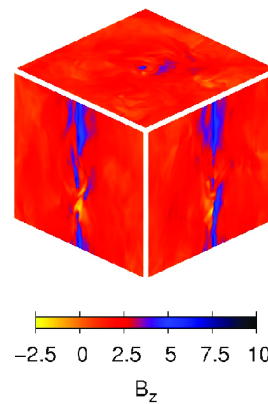
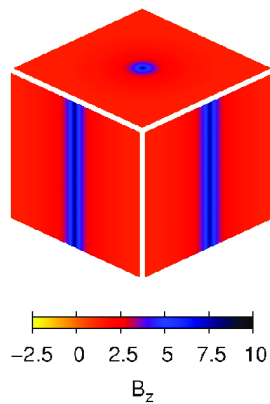
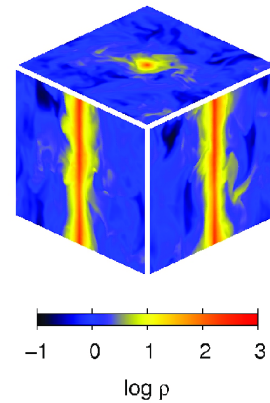
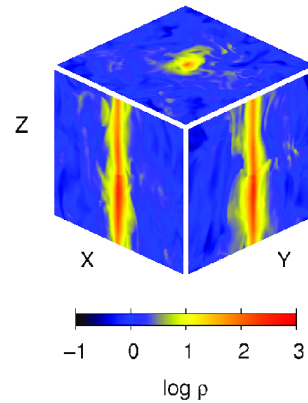
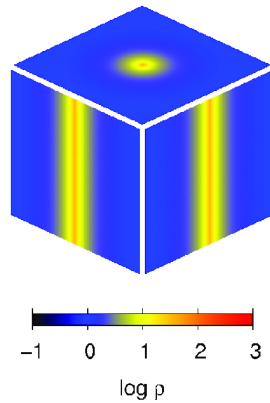


Modelo simplificado  
de nuvem molecular

Equações MHD integradas em 3D:

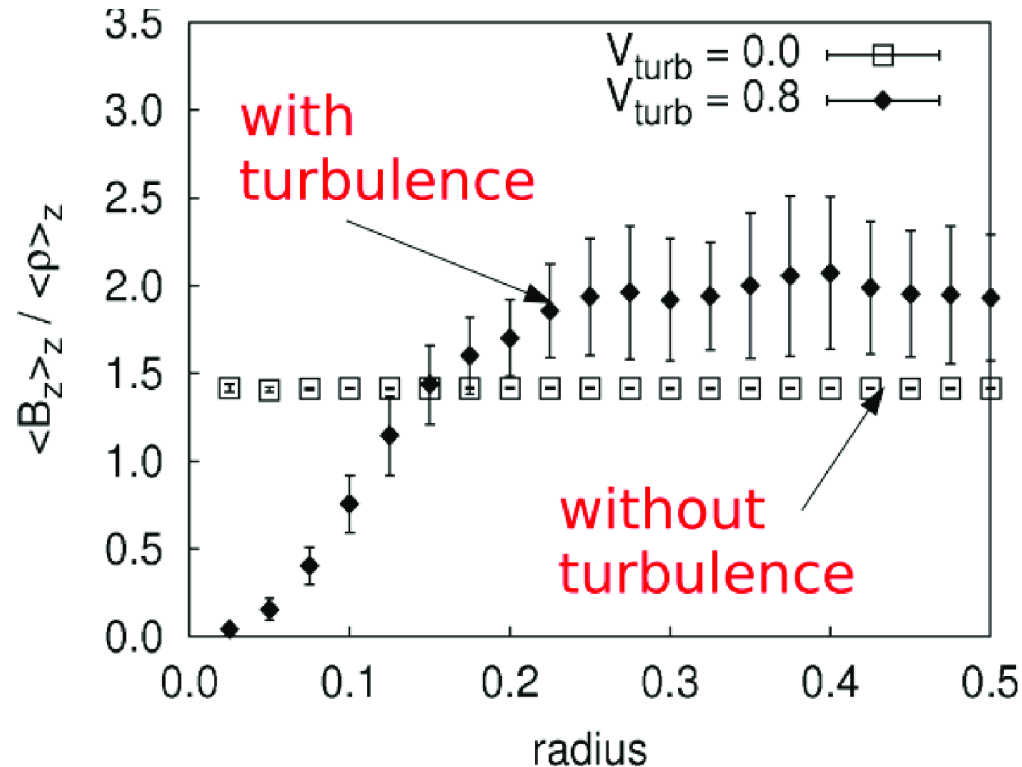
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$
$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -c_s^2 \nabla \rho + \frac{1}{4\pi} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} - \rho \nabla \Psi + \mathbf{f}$$
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

# Remoção de fluxo magnético em nuvens moleculares



# Remoção de fluxo magnético em nuvens moleculares

- Razão fluxo magnético/massa após contração gravitacional



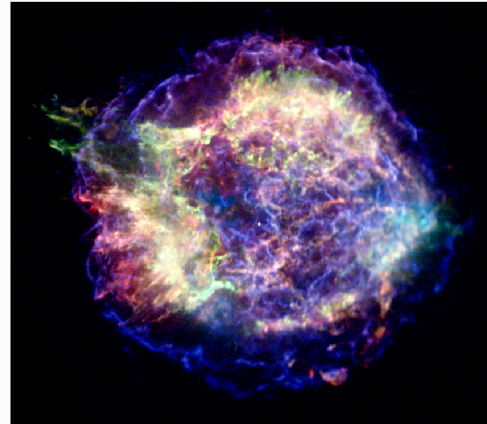
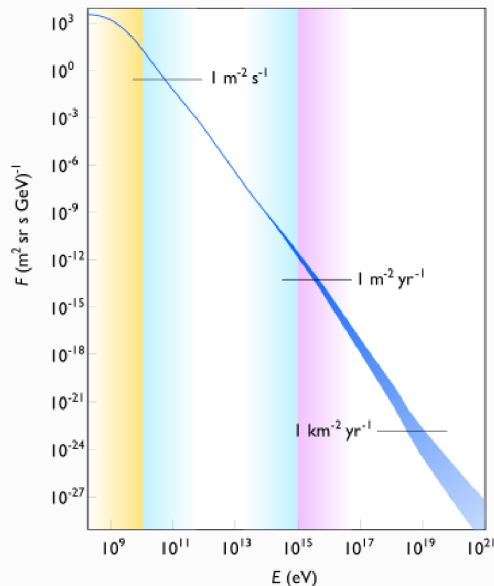


- *Controle da taxa de reconexão/difusão magnética*
- ***Amplificação magnética***
- *Aceleração e transporte de raios cósmicos*

# Cosmic rays

CRs are energetic particles with  $10^8 < E < 10^{22}$  eV.

Galactic CRs:  $E < 10^{15}$  eV (*the knee*).



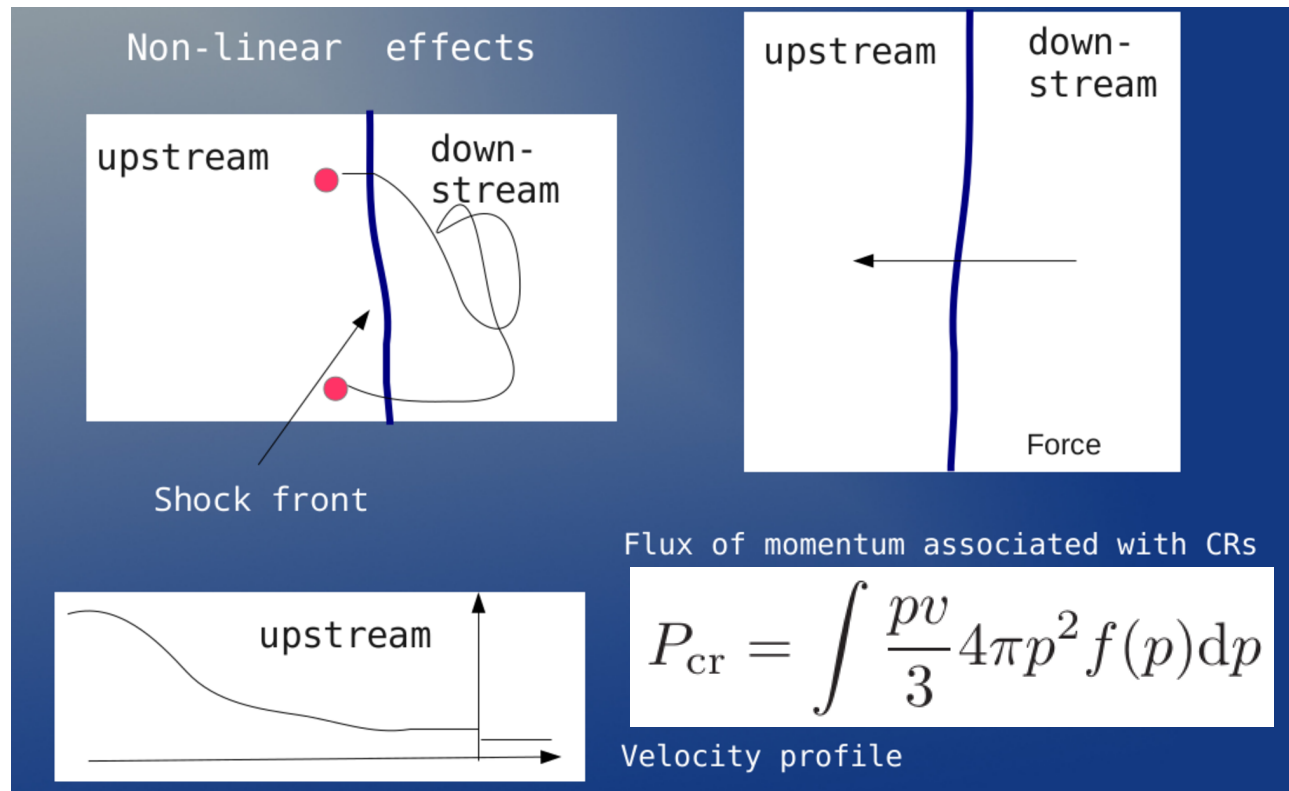
The main GCR sources: supernova remnants (SNRs) shocks.  
Accelerated through DSA (**diffusive shock acceleration**).

**But!**

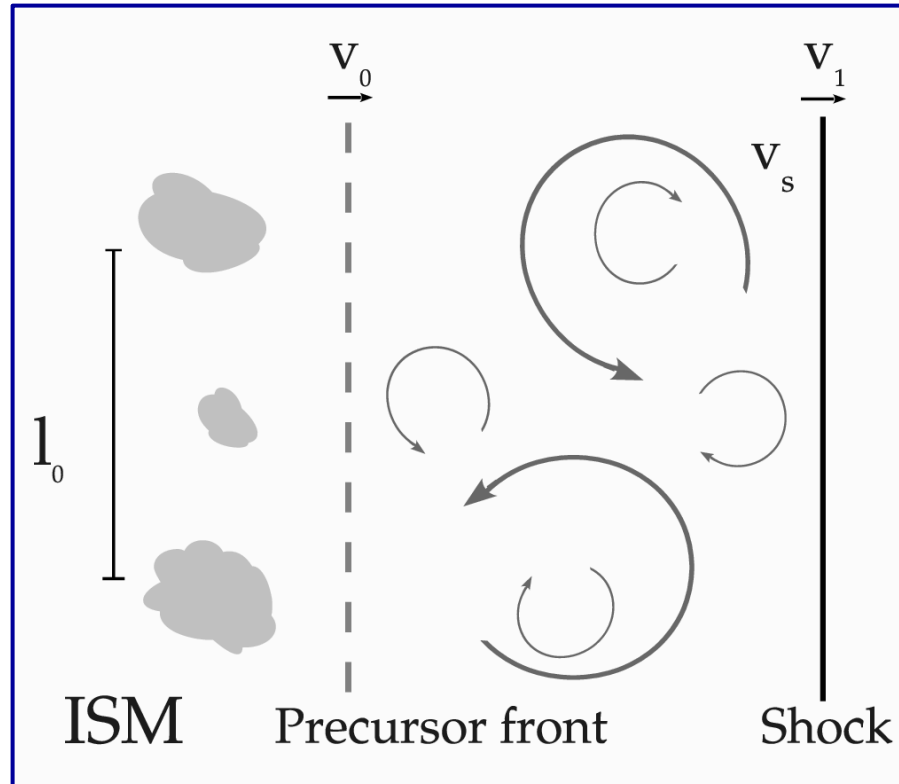
ISM magnetic field is too weak to accelerate CRs up to the *knee*.

# Shock precursor

- Pressão dos raios cósmicos  $\sim$  pressão do meio  $\Rightarrow$  produz efeitos dinâmicos



# O modelo teórico

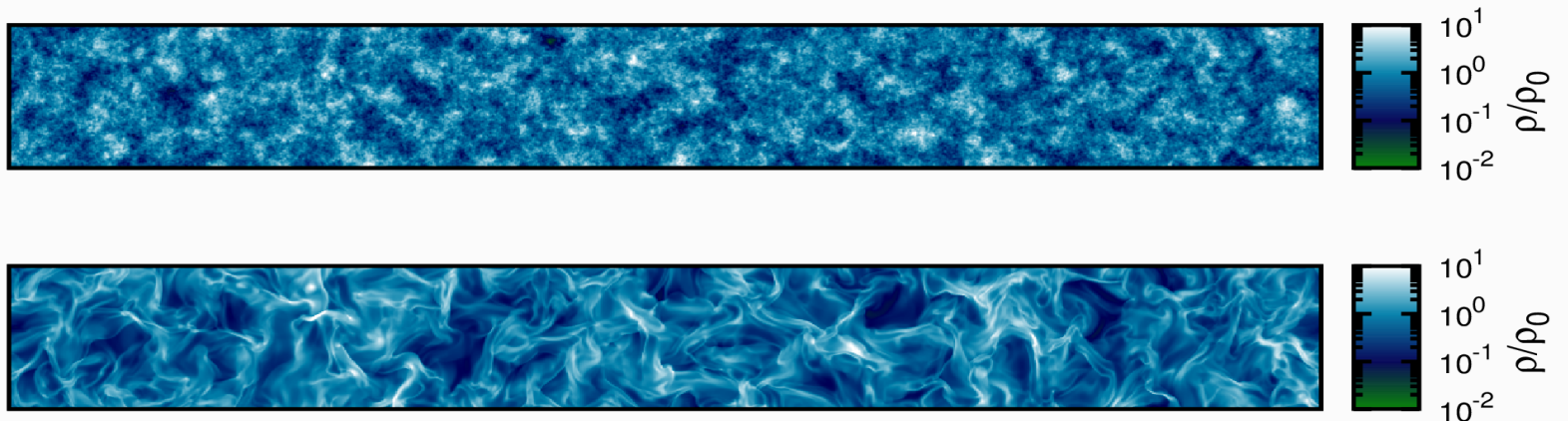
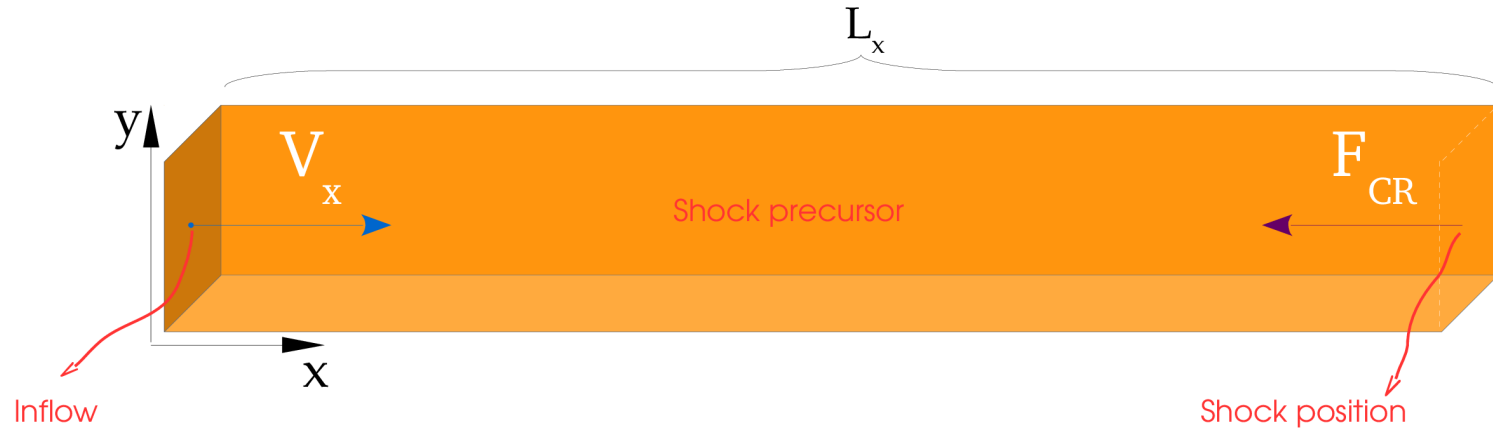


$$v_s = A_s (v_0 - v_1), \text{ with } A_s \leq 1.$$

Turbulência  $\Rightarrow$  **Dínamo!**

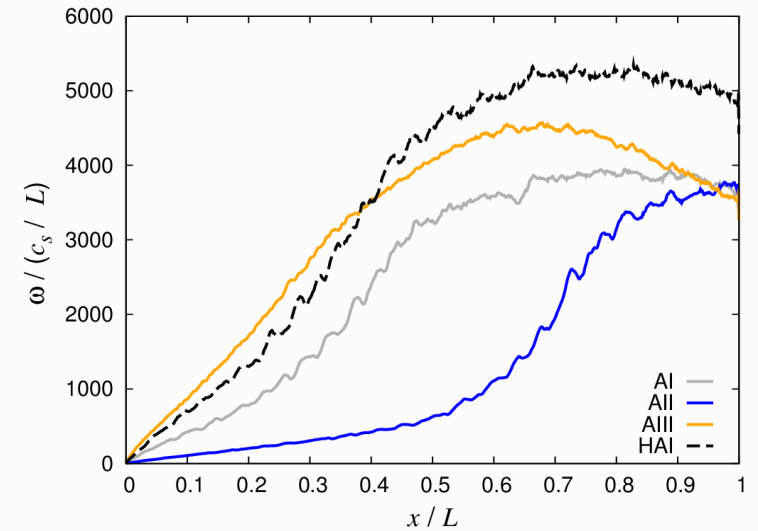
# MHD setup

3D MHD simulations of a supersonic flow in the shock referential frame.

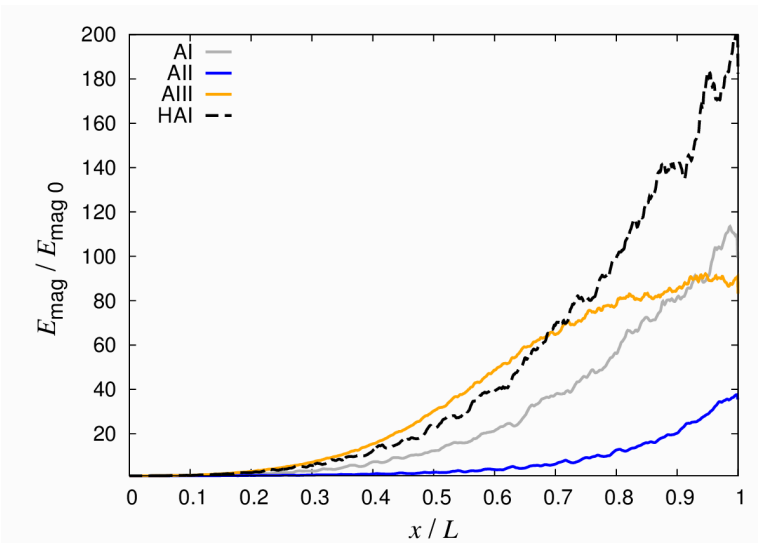




- Vorticidade



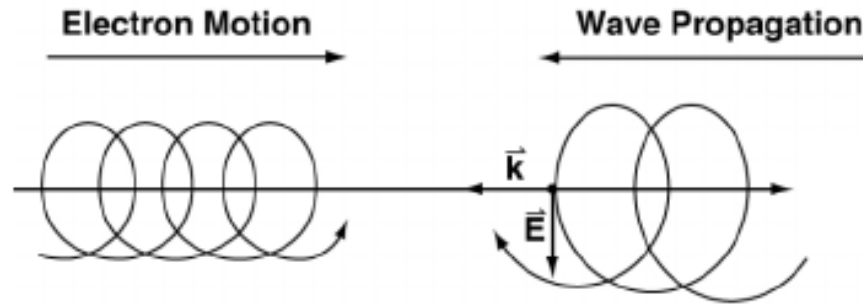
- Energia magnética





- *Controle da taxa de reconexão/difusão magnética*
- *Amplificação magnética*
- ***Aceleração e transporte de raios cósmicos***

# Interação partícula-onda



Condição de ressonância:

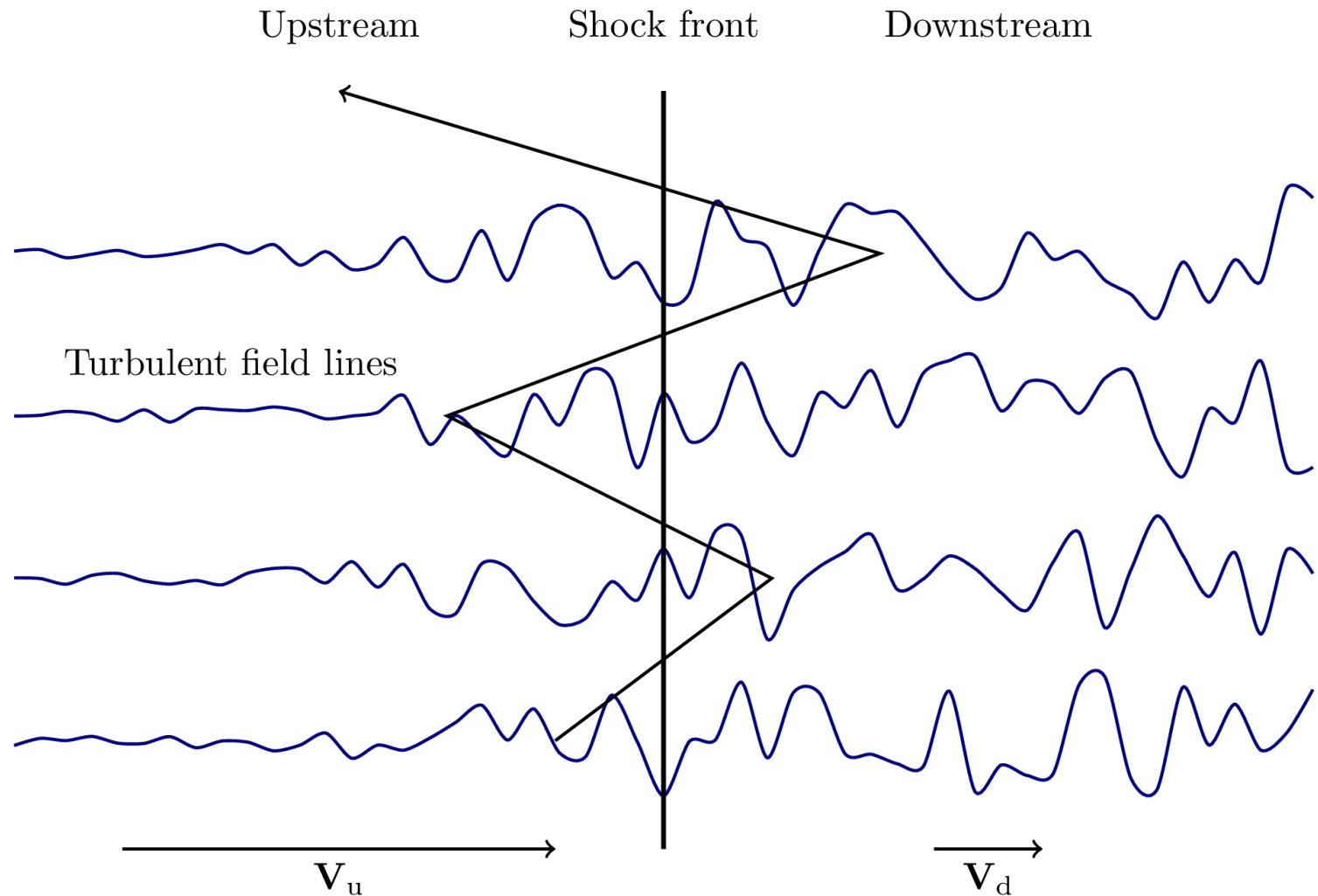
$$\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} = n\Omega, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

QL Fokker-Planck coefficient

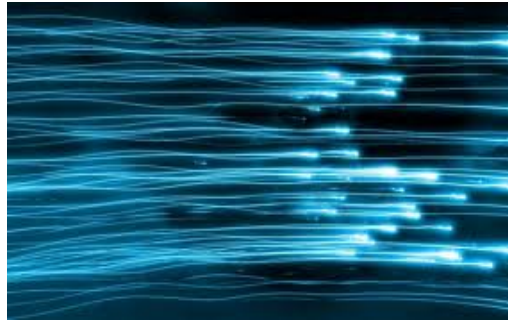
- Parallel propagating waves with circular polarization
- Static limit ( $\Gamma \rightarrow 0$ )
- $\Omega \gg \Re\{\omega_{R,L}\}$

$$D_{\mu\mu}^{QL} = \frac{\pi\Omega^2(1-\mu^2)}{2} \int dk \frac{|\mathbf{B}(k)|^2}{B_0^2} \times \\ \times \left\{ [1 - \overline{\sigma_H(k)}] \delta(v\mu k - \Omega) + [1 + \overline{\sigma_H(k)}] \delta(v\mu k + \Omega) \right\}$$

# Diffusive Shock Acceleration

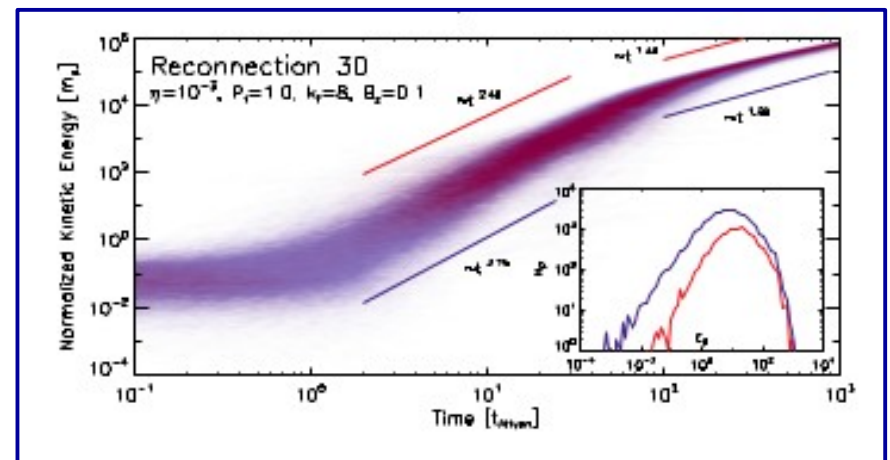
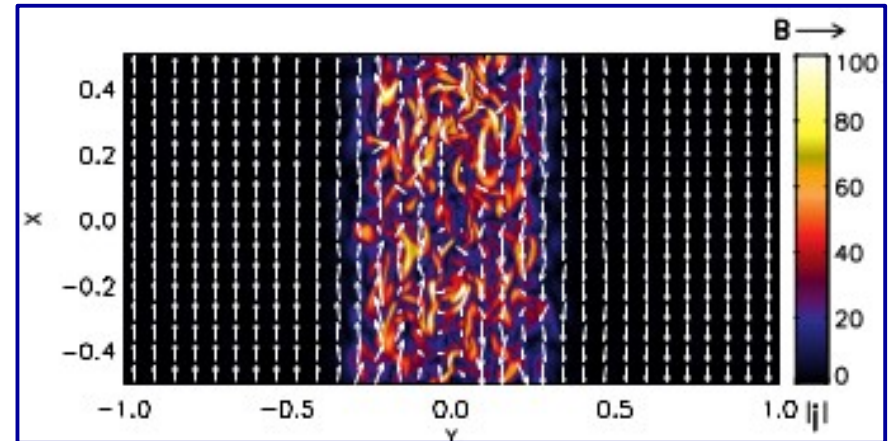


# Aceleração Fermi em reconexão magnética



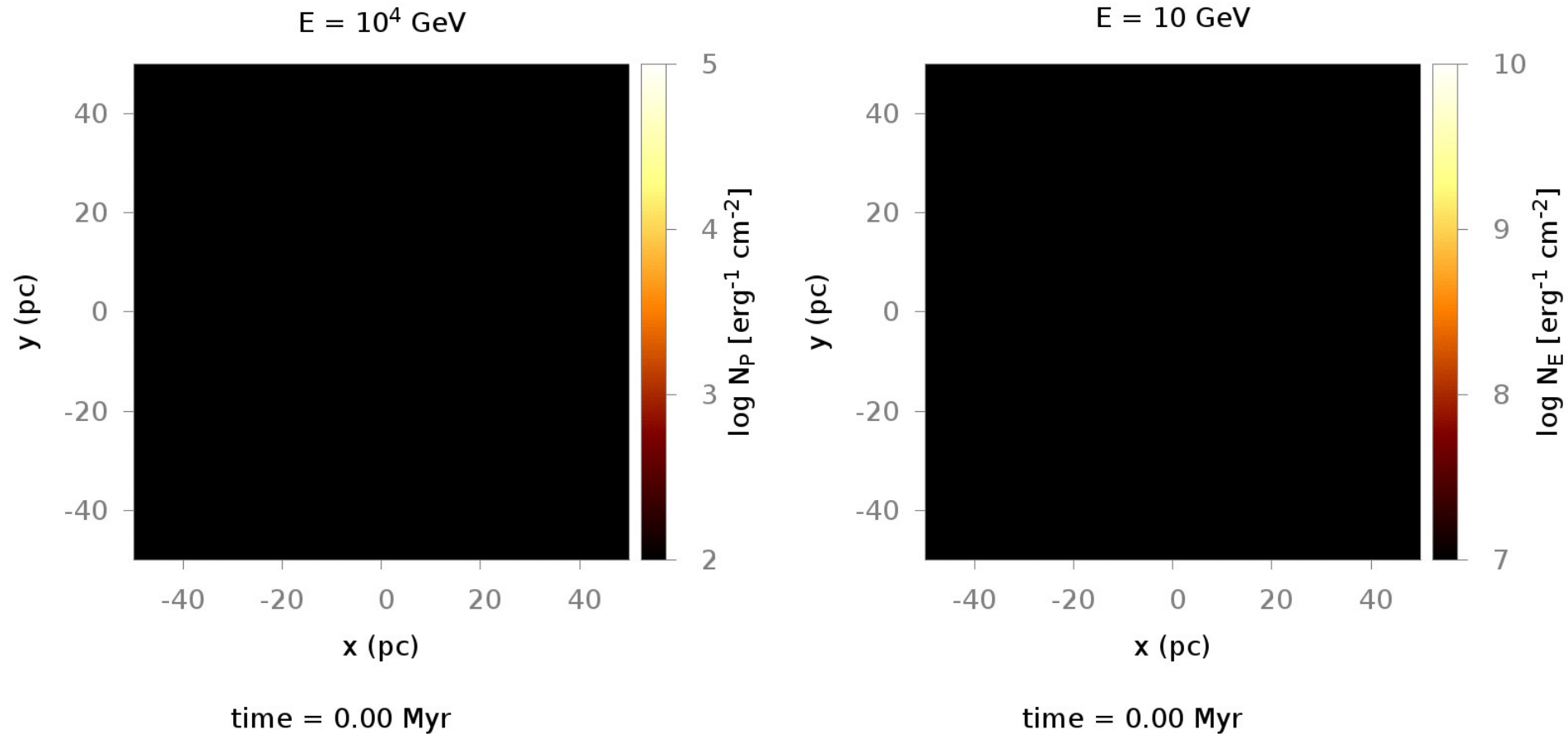
10 000 protons injected

$$\frac{d}{dt} (\gamma m \mathbf{v}) = q \left( \mathbf{E} + \frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathbf{B} \right)$$



*Kowal et al. (2012)*

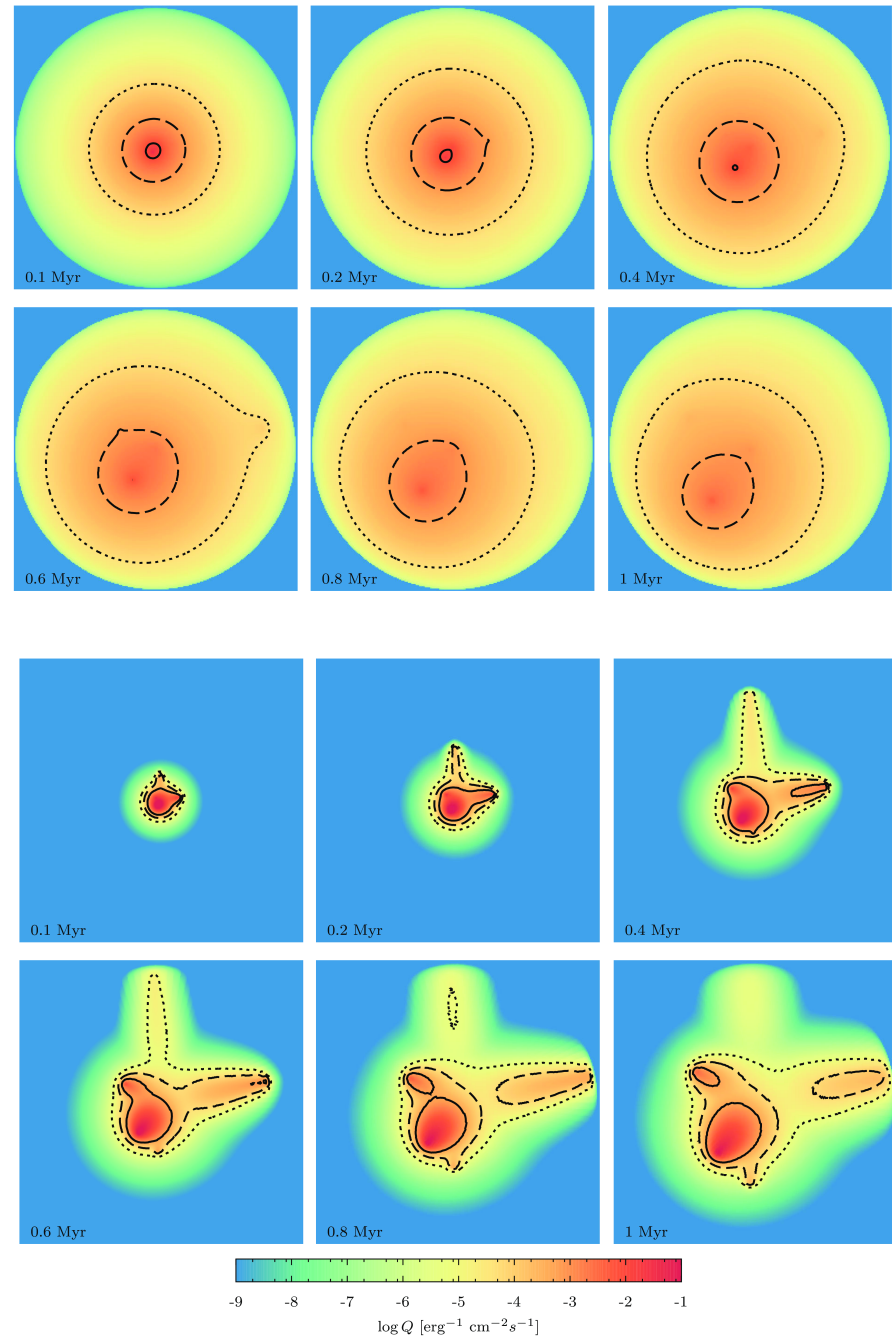
- Simulação de propagação de raios cósmicos acelerados no vento de estrelas fugitivas no interior de uma nuvem molecular



- Simulações de propagação de raios cósmicos com diferentes coeficientes de difusão

*Emissividade em 10 GeV*

*del Valle, Romero, Santos-Lima (2015)*





# ***Informações essenciais***

- **Turbulência** é **onipresente** em plasmas astrofísicos e é um **ingrediente chave** para se entender/modelar diversos dos fenômenos ocorrendo nestes meios.
- **Computação de alto desempenho** é uma das principais **ferramentas** de investigação teórica de processos astrofísicos envolvendo turbulência.
- A maior parte destes processos ainda **não estão** totalmente **compreendidos**.



