# A seta do tempo no processo de formação de galáxias

Astronomia ao meio-dia – 23/03/2017

Leandro Beraldo e Silva (IAG-USP)

# Resumo

- Mecânica Newtoniana
- Máquina a vapor
- Naturphilosophie
- Termodinâmica
- Mecânica estatística e a seta do tempo
- Formação de galáxias
- Relaxação violenta e equação de Vlasov
- Testes recentes

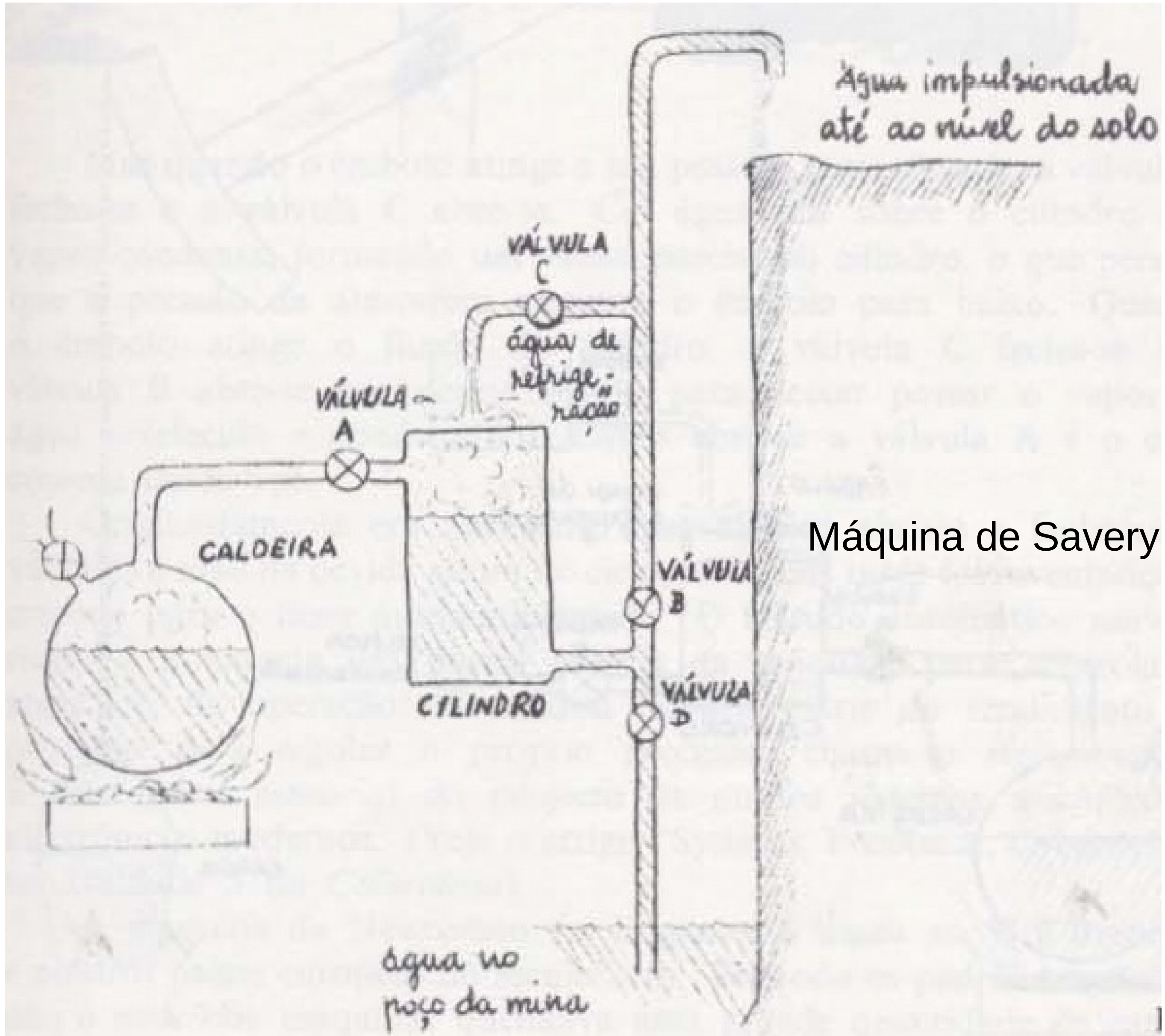
# Mecânica Newtoniana

- 1687: Principia Mathematica
- Teoria unificadora
- “Explicação” do Sistema Solar
- Marés e fases da Lua
- Órbitas dos cometas
- Equações reversíveis no tempo
- Determinismo laplaciano

# Determinismo laplaciano

“Devemos considerar o estado presente do universo como efeito dos seus estados passados e como causa dos que se vão seguir. Suponha-se uma inteligência que pudesse conhecer todas as forças pelas quais a natureza é animada e o estado em um instante de todos os objetos – uma inteligência suficientemente grande que pudesse submeter todos esses dados à análise -, ela englobaria na mesma fórmula os movimentos dos maiores corpos do universo e também dos menores átomos: nada lhe seria incerto e o futuro, assim como o passado, estaria presente ante os seus olhos.”

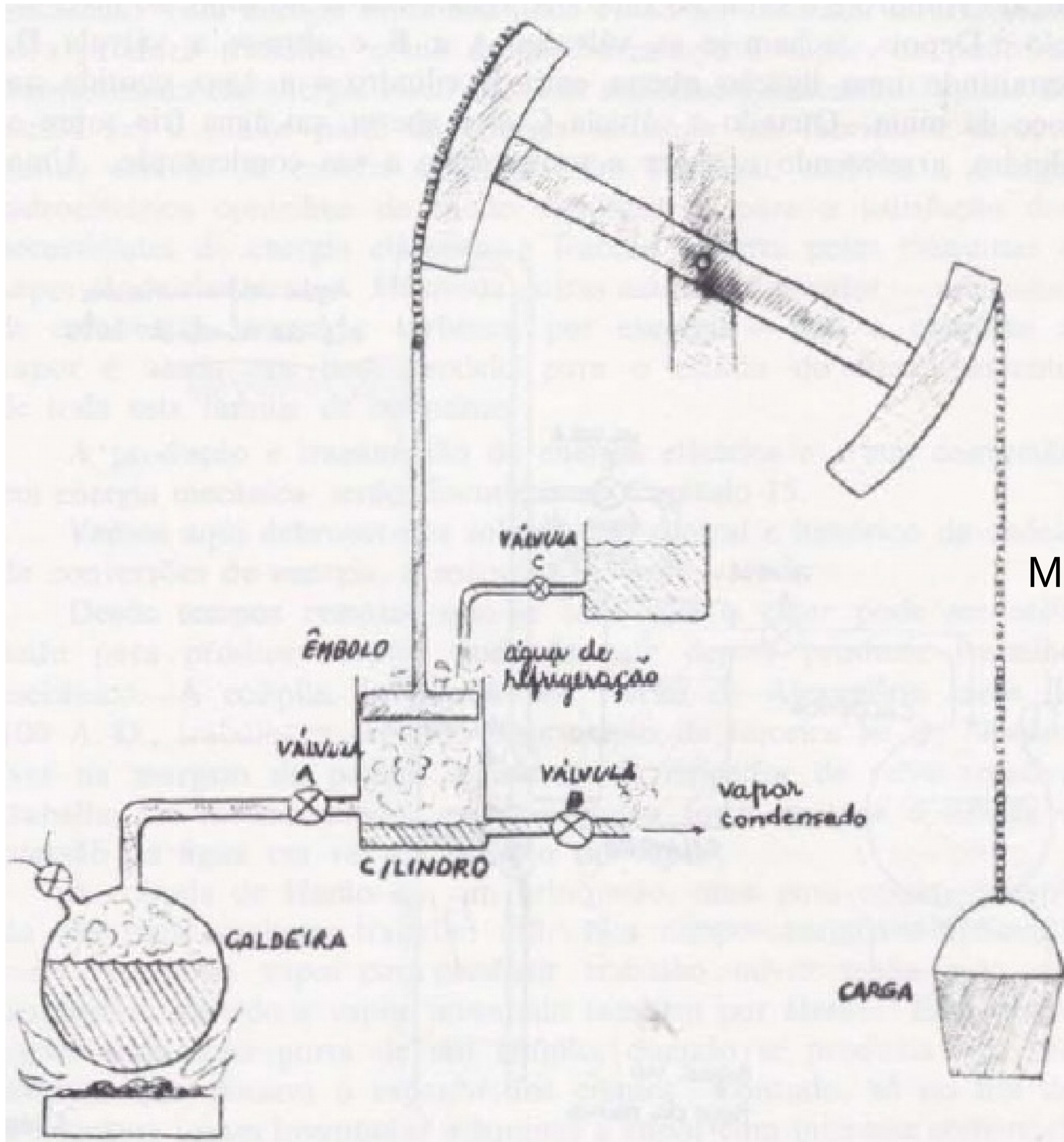
# Máquina a vapor




Máquina de Savery

Extraído do Harvard Project Physics Course (HPPC)

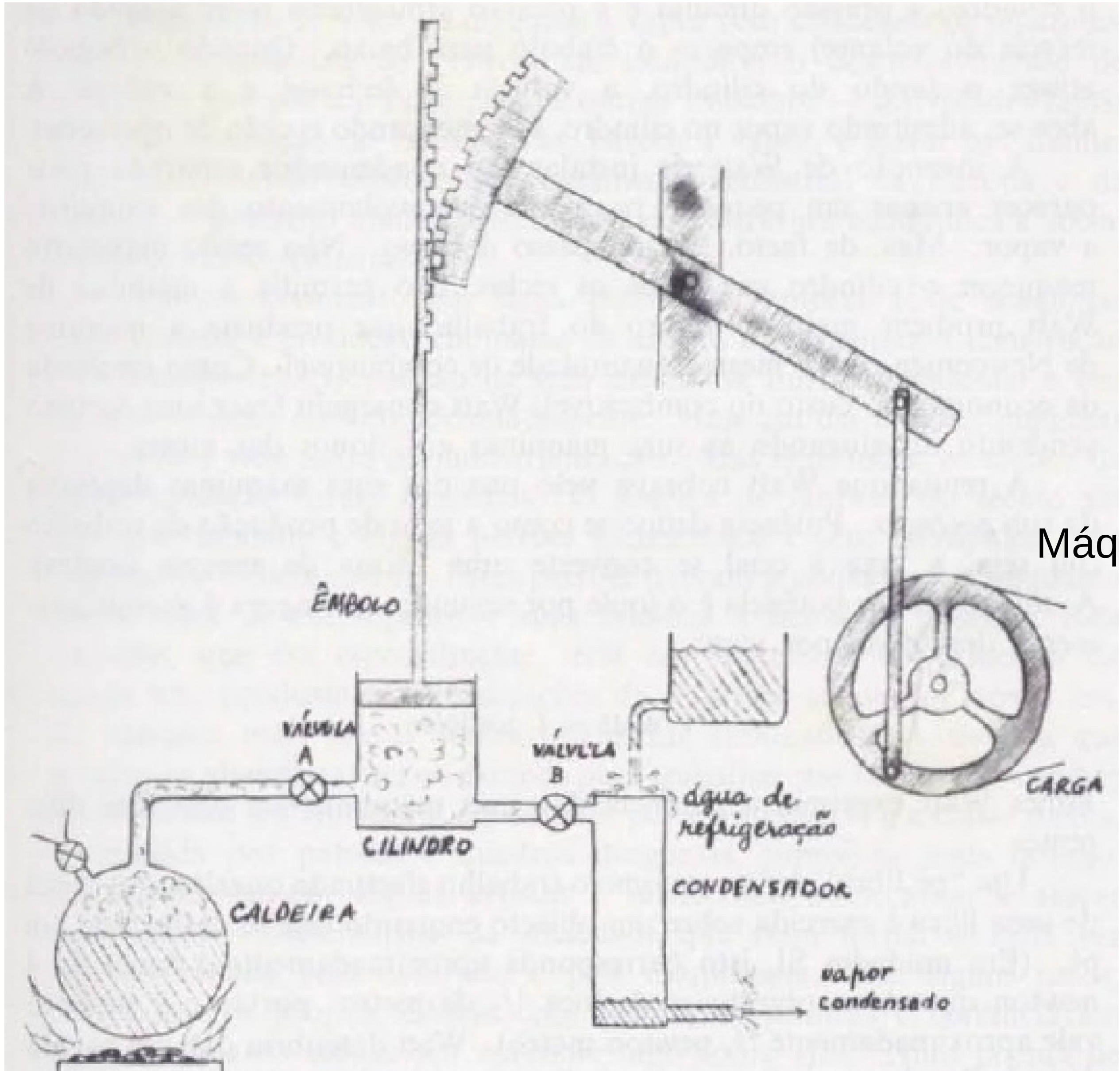
# Máquina a vapor




Máquina de Newcomen

Extraído do Harvard Project Physics Course (HPPC)

# Máquina a vapor




Máquina de Watt

Extraído do Harvard Project Physics Course (HPPC)

# Questões teóricas

- O que é o calor?
- Limite para a eficiência das máquinas?
- Moto-contínuo?
- Conservação e transformação

# Alemanha X Inglaterra/França

- Insatisfação com determinismo
- Parte X Todo
- Romantismo Alemão
- Goethe, Schelling
- Naturphilosophie
- Influência sobre cientistas - sécs. XVIII e XIX
- Mayer e Joule → E é cst. (1ª. Lei)

# Entropia

- Carnot: eficiência das máquinas térmicas
- Clausius:
  - Restrições para conversão de calor em trabalho
  - Propriedade física: entropia (transformação)
  - 2ª. Lei
  - Processos reversíveis ou irreversíveis
- Kelvin: tendência à degradação da energia
- Seta do tempo

**Mecânica**

- Eqs. reversíveis
- Trajetórias individuais
- Determinismo

**Termodinâmica**

- Fenoms. irreversíveis
- Sistema com um todo

# Ludwig Boltzmann

- Ponte entre as duas descrições
- Interpretação estatística da entropia $S = k_B \ln W$
- Teorema H
- Como os sistemas vão pro equilíbrio (relaxam)?
- Gás numa caixa
- Função distribuição $f(\vec{r}, \vec{v}, t)$
- No equilíbrio: $f(\vec{r}, \vec{v}) = f(E) = e^{\beta E}$
- Equação de transporte: $\dfrac{df}{dt} = C[f]$
- Sistemas gravitacionais???

# Moléculas vs sists. auto-gravitantes

- Gás molecular:
  - Interações de curto alcance
  - Equilíbrio via colisões $$\frac{df}{dt} = C[f]$$
- Sistemas auto-gravitantes:
  - Interações de longo alcance
  - "Colisional" (Globular clusters) $$\frac{df}{dt} = \text{``}C[f]\text{''}$$

$$\frac{\Delta v^2}{v^2} \approx 1 \quad \Rightarrow \tau_{col} \propto \frac{N}{\ln N}\tau_{cross}$$

Globular clusters: $N \approx 10^5; \tau_{cross} \approx 10^6 yr \Rightarrow \tau_{col} \approx 10^9 yr$

# Aglomerados globulares

M80: ~$10^5$ stars
HST image

# Galáxias

M87:~$10^{11}$ stars
HST image

# Formação de galáxias

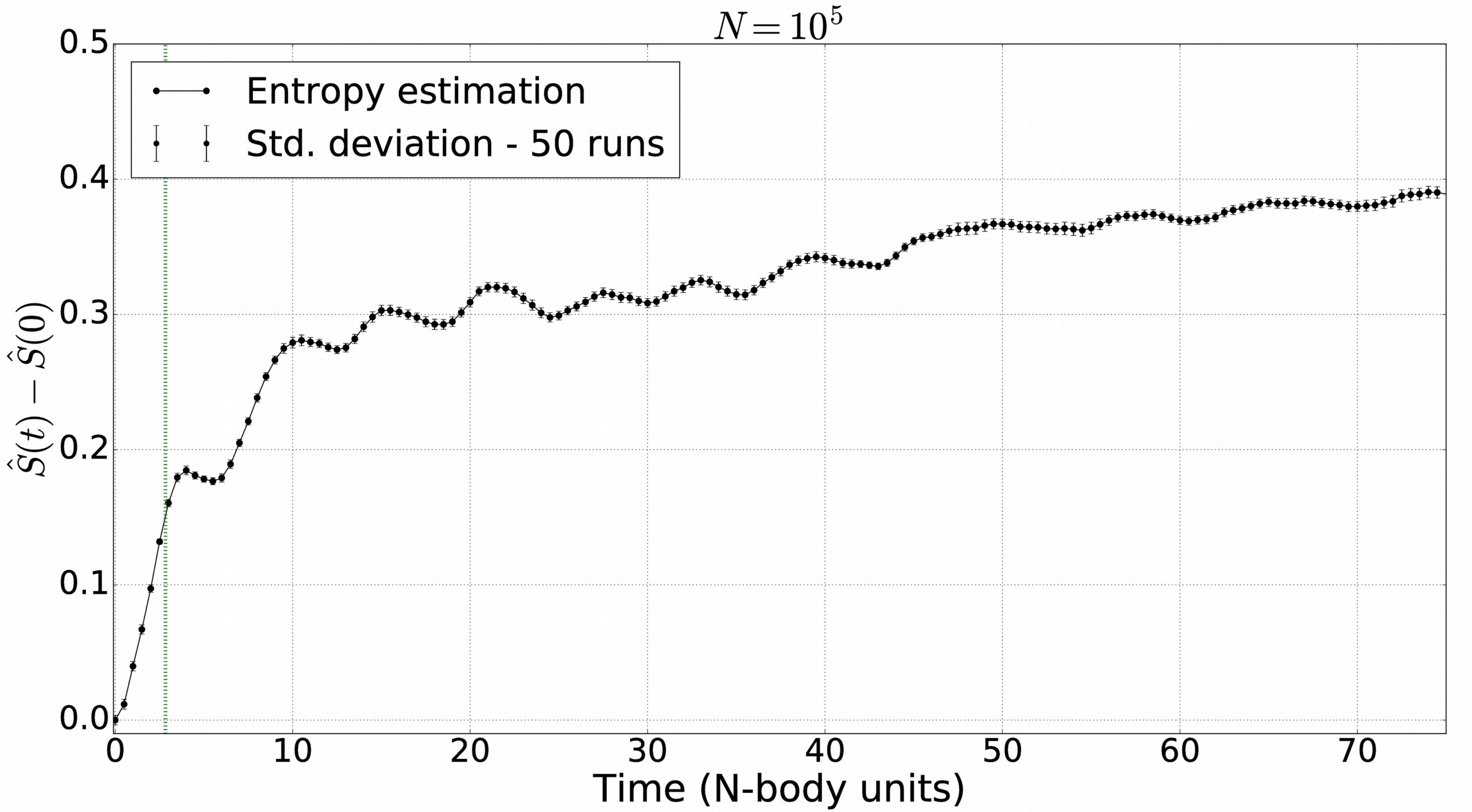
- Relaxação “colisional”: $\tau_{col} = \frac{N}{\ln N}\tau_{cr}$
- $N \to \infty \Rightarrow$ Sistema “não-colisional”
- Como uma galáxia relaxa?
  - Relaxação violenta
- Equação de Vlasov: $\frac{df}{dt} = 0$
- Equação reversível (sem seta do tempo)
- Entropia se conserva
- “Fundamental paradox of stellar dynamics” (Ossipkov 2006)
- Solução standard: coarse-grain

# Testando Vlasov

L. BeS, Walter de Siqueira Pedra, Laerte Sodré, Eder Perico, Marcos Lima

- Simulação de N-corpos
- Condições iniciais
- Estimador da função distribuição
- Estimador da entropia

# Testando Vlasov



# Conclusões

- S não se conserva durante relaxação violenta
- Equação de Vlasov parece não ser válida
- Seta do tempo na formação de galáxias

Obrigado

# Vlasov → Entropy conservation

Tremaine, Hénon, Lynden-Bell (1986)

Define entropy:

$$S \equiv \int s[f] d^3\vec{x} d^3\vec{v}$$

e.g.: $s[f] = f \ln f$

$$\frac{dS}{dt} = \int \frac{\partial s}{\partial f}\frac{\partial f}{\partial t} d^3\vec{x} d^3\vec{v}$$

If Vlasov: $$\frac{dS}{dt} = -\int \frac{\partial s}{\partial f}\left(\vec{v}\cdot\frac{\partial f}{\partial \vec{x}} - \nabla\phi\cdot\frac{\partial f}{\partial \vec{v}}\right) d^3\vec{x} d^3\vec{v}$$

$$\frac{dS}{dt} = -\int \left(\vec{v}\cdot\frac{\partial s[f]}{\partial \vec{x}} - \nabla\phi\cdot\frac{\partial s[f]}{\partial \vec{v}}\right) d^3\vec{x} d^3\vec{v}$$

$$\frac{dS}{dt} = 0 \qquad f \to 0, |\vec{x}|, |\vec{v}| \to \infty$$

# Testing Vlasov

In collab. with Laerte Sodré, Marcos Lima, Walter Pedra & Leonardo Duarte

- Using N-body simulations
- NBODY-6 (S. Aarseth)
  - Direct sum; no softening

$$S \equiv -\int f \ln f \, d^3\vec{x} d^3\vec{v}$$

$$\hat{S} = -\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \ln \hat{f}_i$$

$$D_2 = \sqrt{(\vec{x}_2 - \vec{x}_1)^2 + (\vec{v}_2 - \vec{v}_1)^2}$$

$$\hat{f}_i = \frac{1}{N D_i^6}$$