



---

---

# Evolução orbital de anéis densos através de simulações numéricas de N-corpos e SPH

— **R. Sfair**<sup>1,2</sup>, J. P. Cavalcante<sup>1</sup> —

rafael.sfair@unesp.br

---

---

1 - UNESP, Grupo de Dinâmica Orbital e Planetologia. Guaratinguetá, Brazil

2- Institut für Astronomie und Astrophysik, Eberhard Karls Universität Tübingen. Tübingen, Germany

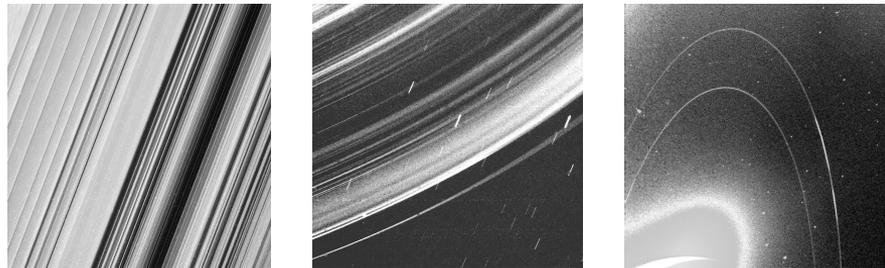


# Anéis densos

Anéis planetários apresentando uma grande variedade de características:

- Largura
  - Estreito x largo
- Densidade de partículas
  - Denso x tênue
- Tamanho das partículas
  - Metros x poeira ( $\mu\text{m}$ )
- Bordas
  - Definidas x difusas
- Interação com satélites
  - Imersos x ressonância

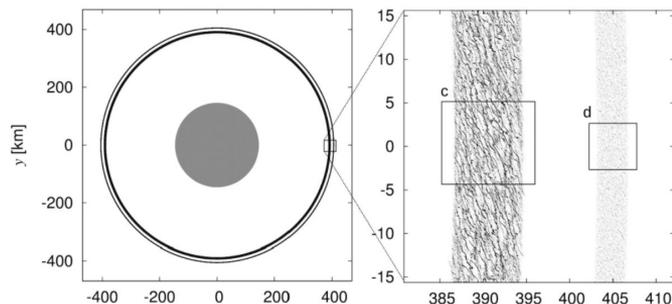
- Anéis densos geralmente são compostos por partículas macroscópicas (de centímetros até poucos metros de raio)
- Colisões podem ser determinantes na evolução deste tipo de sistema



Anéis densos podem ser encontrados em Saturno, Urano e Netuno

# Objetivos

Analisar a dinâmica de anéis densos (tais como os de Saturno e Chariklo) comparando simulações numéricas com SPH e a abordagem usual de n-corpos.



Exemplo de evolução de um anel denso (Michikoshi & Kokubo, 2017)

# Smoothed-particle hydrodynamics (SPH)

- Método Lagrangiano sem malha
- Grandezas conservadas
  - Massa, energia interna, momento
- Equações constitutivas
- A pressão, densidade e temperatura seguem uma equação de estado
  - Adotamos o modelo de Murnaghan

$$p = \frac{K_0}{n} \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right]$$

- Autogravidade
  - Método da árvore (Barnes & P. Hut, 1986)
- Inclusão das propriedades do material
  - Dano, plasticidade, rigidez

# Smoothed-particle hydrodynamics (SPH)

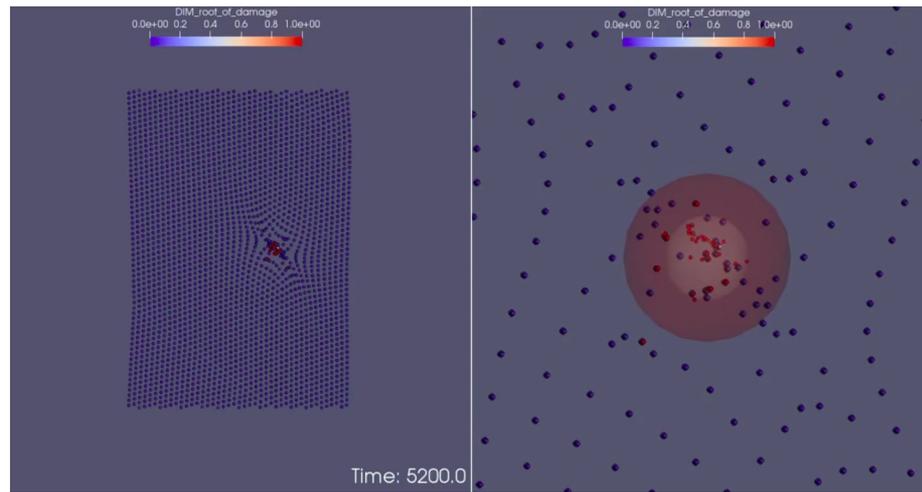
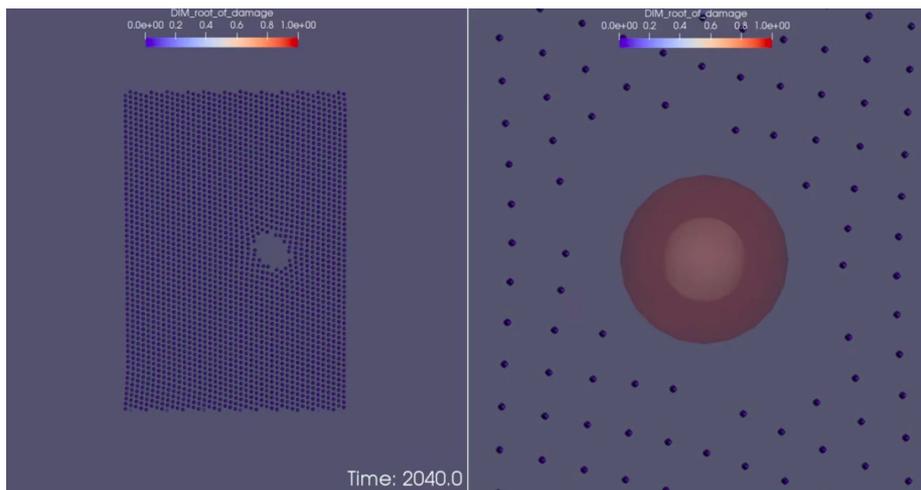
- Código: *miluphcuda* (Schäfer et al., 2020)
  - Versátil e de código aberto
  - Adaptável para problemas de 2 e 3 dimensões
  - Dispõe de modelos de porosidade e fragmentação
- Modificações
  - Condições de contorno periódicas (*shearing sheet*)
  - Referencial girante que acompanhar o movimento médio do anel → forças não inerciais
  - Satellite perturbation as an external force
- Sistema: Chariklo
  - Seção do anel de 8 km x 5 km
  - Efeitos de um satélite hipotético na região da falha observada entre os anéis
  - Partículas com as propriedades do gelo
  - O número de partículas e o tamanho de  $r_p \sim 12$  m foi escolhido de acordo com a profundidade óptica observada ( $\tau$ )

$$r_p = \sqrt{\frac{\tau A_T}{\pi N_p}}$$

# SPH - evolução do anel



(video)

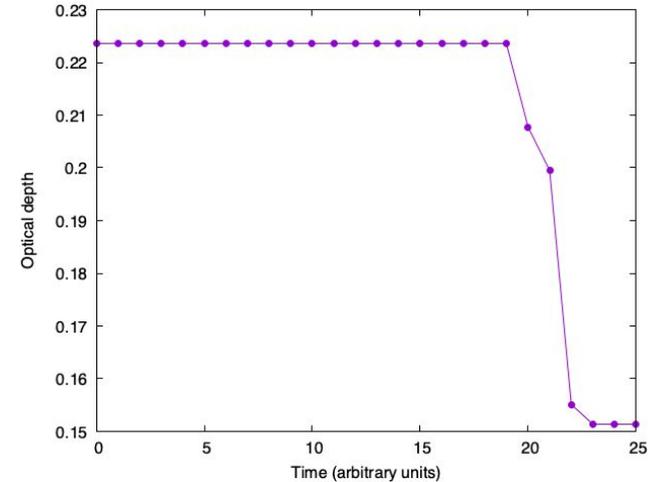
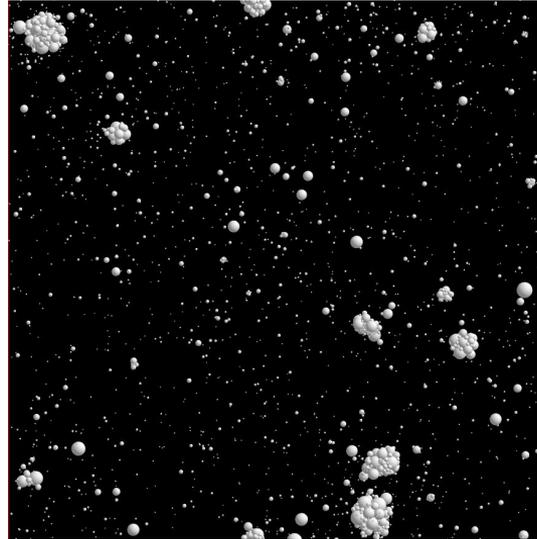
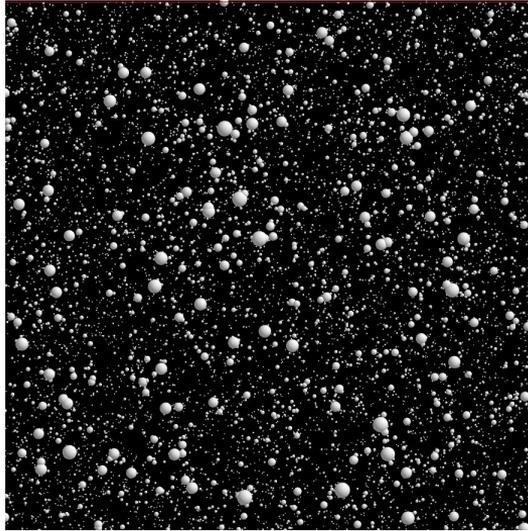


Evolução do anel após 2040 s (esquerda) e 5200 s (direita). As regiões em vermelho indicam a localização do satélite hipotético e a região de suavização. É possível notar a fragmentação das partículas e a formação de aglomerados.

# Simulações de n-corpos

- Código: *REBOUND* (Rein & Liu, 2012)
  - Versátil e de código aberto
  - Uso de um integrador simplectico epicíclico + *Sheering sheet*
- Considerações
  - Densidade superficial:  $500 \text{ kg/m}^2$
  - Densidade das partículas:  $0.9 \text{ cm/cm}^3$  (gelo)
  - Distribuição de tamanho: lei de potência com  $r=[1, 10] \text{ m}$  e  $q=-3$
- Sistema: Chariklo
  - Seção do anel de  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$
  - Modelo de colisão elástica

# N-corpos - evolução do anel



Distribuição inicial das partículas [esquerda] e após 1 período orbital (~17 h) [centro]. Também é mostrada a evolução da profundidade óptica do anel [direita]. É possível notar que a formação dos aglomerados resulta em uma queda na profundidade óptica.

# Considerações finais

- O código *miluphcuda* foi adaptado com sucesso em um modelo de *shearing sheet*
- Simulações com SPH são úteis para analisar em detalhes a evolução colisional em escalas de tempo curtas
- A evolução dos agregados pode ser acompanhada através do REBOUND
- Próximas etapas
  - Investigar a dependência das propriedades do material, especialmente a porosidade
  - Incluir um mecanismo de confinamento (e.g. satélites pastores)
  - Comparar a evolução com outros sistemas (e. g. anel A de Saturno, anel  $\epsilon$  de Urano)
  - Calcular grandezas como o preenchimento vertical e comparar com dados observacionais

## Agradecimentos

Gerson Barbosa e Maria Eduarda Matos pelas discussões e contribuições no desenvolvimento dos códigos. Apoio financeiro: FAPESP (proc. 2016/24561-0).