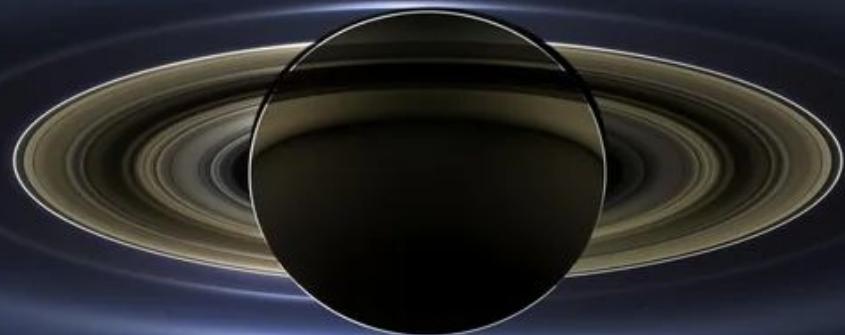
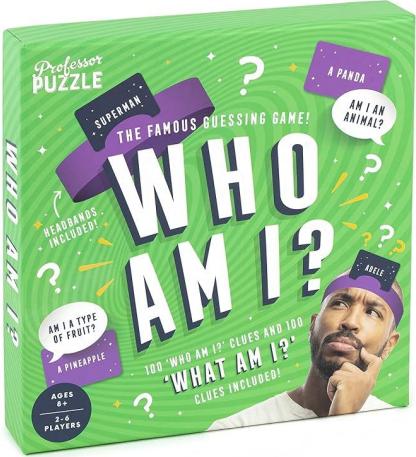


Escola de inverno em Astrofísica 2025

# Formação de satélites e anéis planetários

Dr Gustavo Madeira





- Pesquisador de Ciências Planetárias no Observatório Nacional
- Doutor em Física pela UNESP, com especialização em Dinâmica Orbital e Astronomia de Posição
- Pós-doutorado em cosmoquímica pelo Institut de Physique du Globe de Paris
- Membro das missões DART/NASA, Hera/ESA, RAMSES/ESA

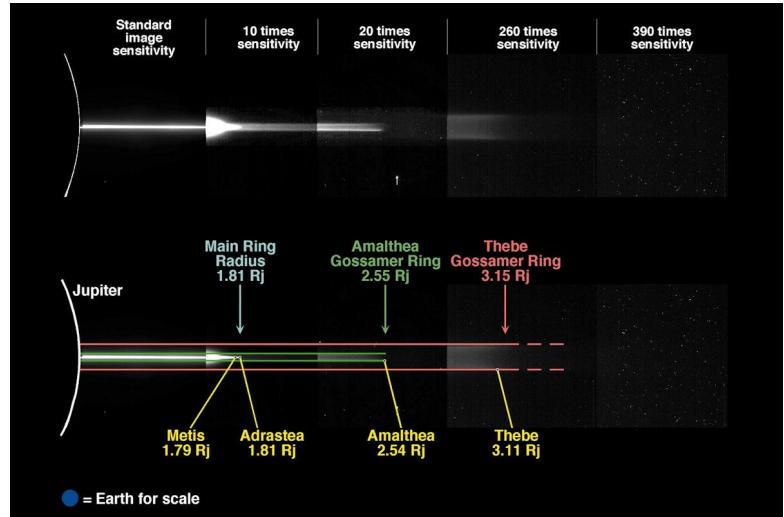
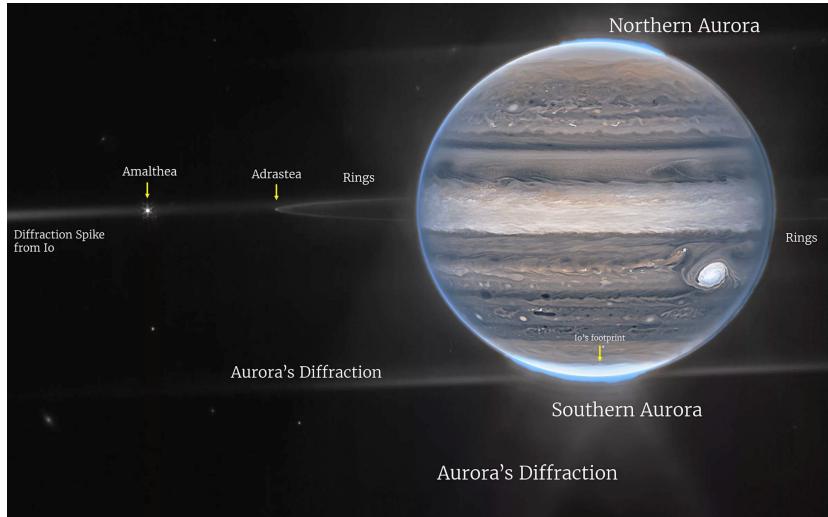
## Tópicos de Pesquisa

- Formação de satélites
- Evolução e composição de satélites
- Formação de pequenos corpos
- Impactos
- Formação e evolução de anéis
- Evolução de discos



# Os anéis do Sistema Solar

Todos os planetas gigantes do Sistema Solar possuem anéis.



## Júpiter:

- Halo
- Anel Principal
- Anel de véu fino de Amaltéia
- Anel de véu fino de Tebe

# Os anéis do Sistema Solar

Todos os planetas gigantes do Sistema Solar possuem anéis

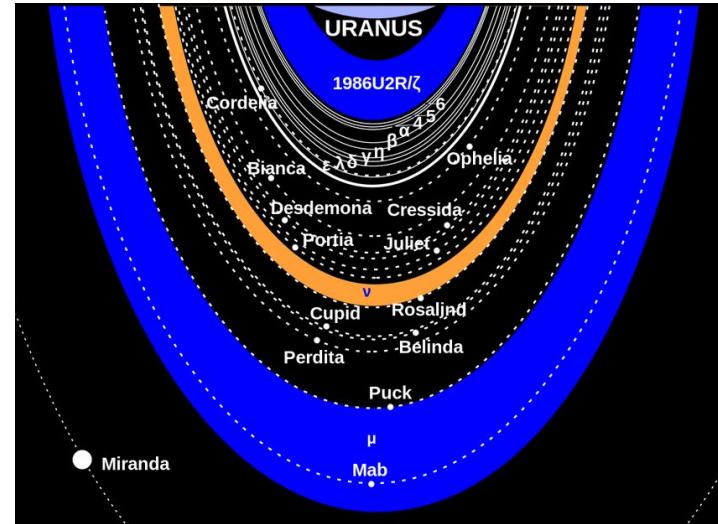
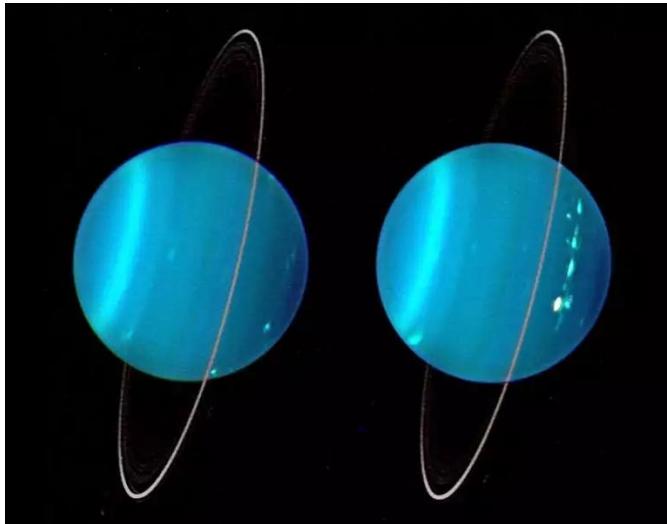


## Saturno:

- Anel D
  - Anel C
  - Anel B
  - Divisão de Cassini
  - Anel A
  - Falha de Encke
- { Anéis principais
- Anel F
  - Anel G
  - Anel E
- + • Anéis coorbitais
- Arcos planetários

# Os anéis do Sistema Solar

Todos os planetas gigantes do Sistema Solar possuem anéis

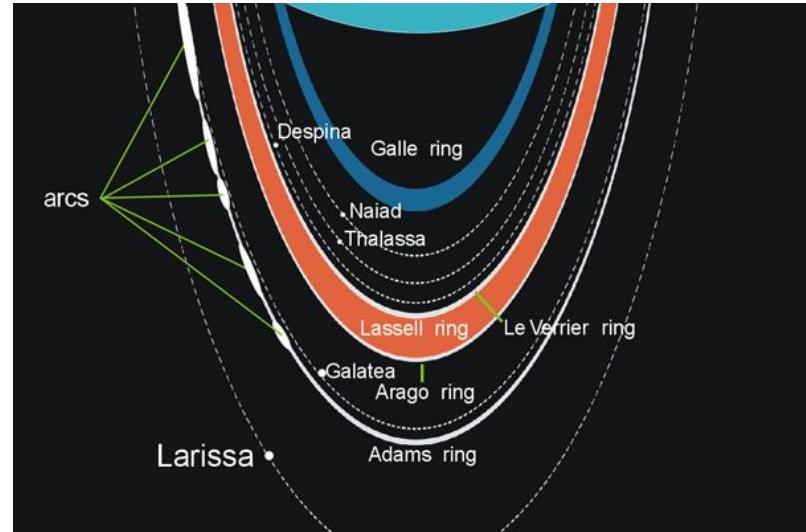
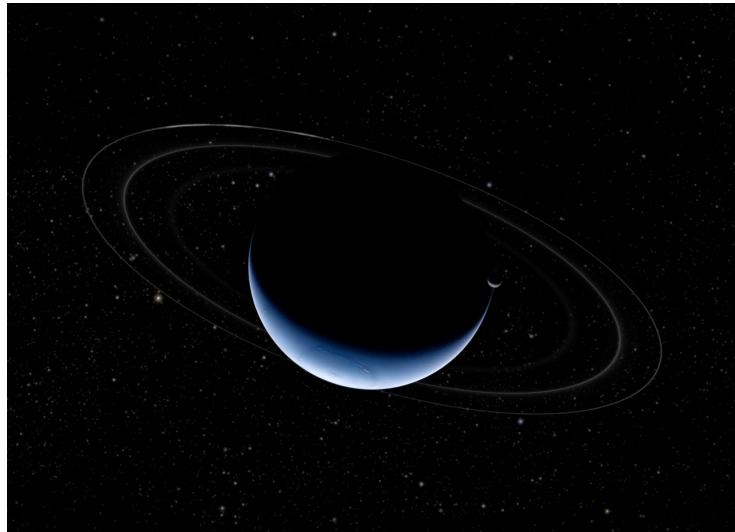


## Urano:

- Conjunto de anéis estreitos intercalados com satélites
- $\alpha, \beta, \eta, \gamma, \delta, 4, 5, 6, \lambda, \varepsilon, \zeta, \nu, \mu$

# Os anéis do Sistema Solar

Todos os planetas gigantes do Sistema Solar possuem anéis



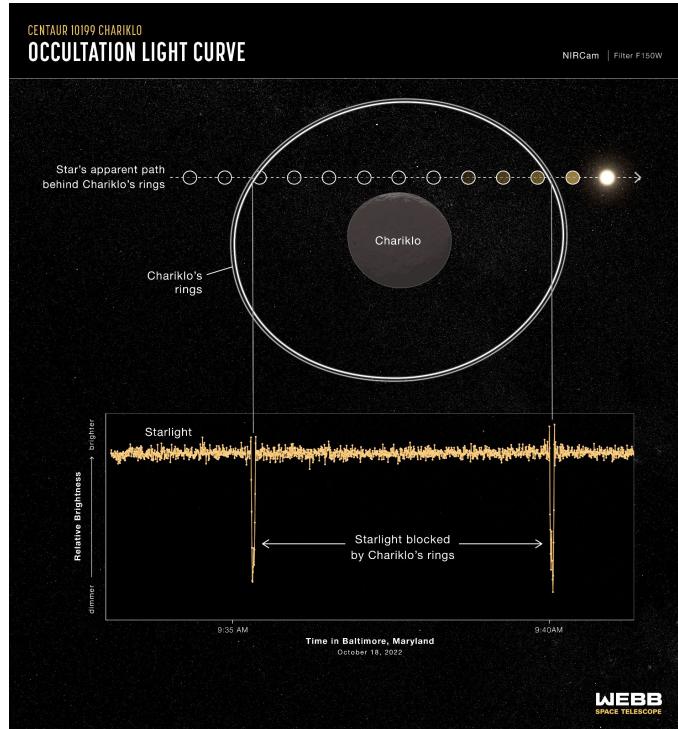
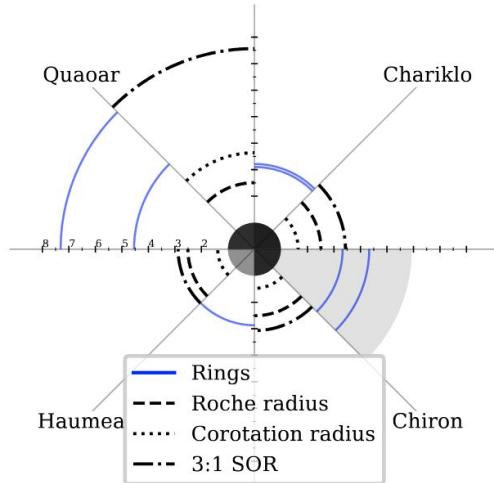
## Netuno:

- anel Galle
- anel Le Verrier
- anel Lassel
- anel Arago
- anel Adams
- arcos (Fraternité, Egalité, Liberté e Courage)

# Os anéis do Sistema Solar

Além disso, alguns corpos menores além da órbita de Júpiter têm anéis detectados.

- Centauro *Chariklo* - C1R e C2R
- Planeta-anão *Haumea* - H1R
- TNO *Quaoar* - Q1R e Q2R
- Centauro *Chiron* - evidências de possuir anéis

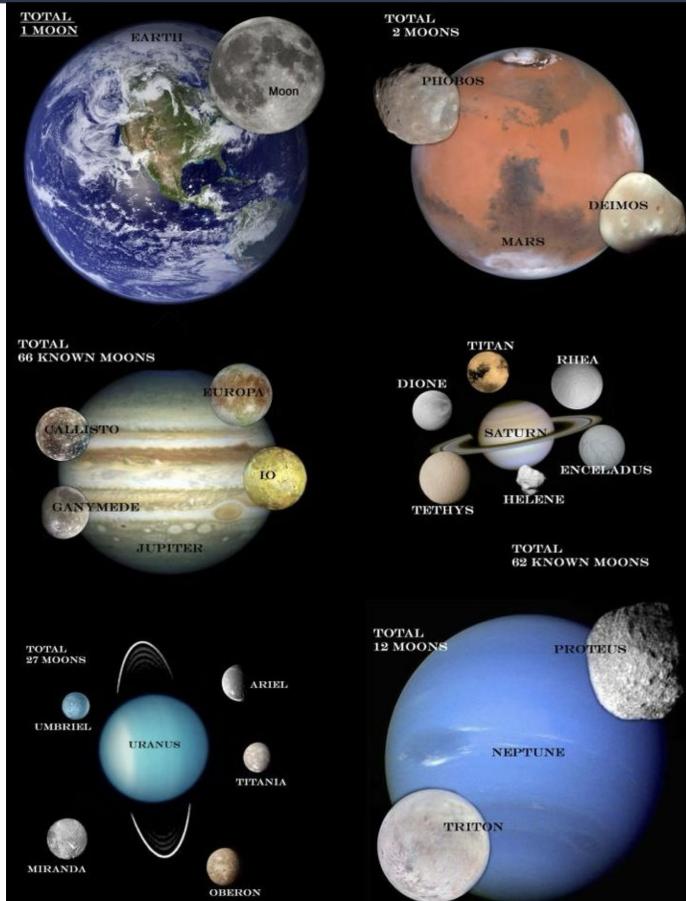


# Os satélites do Sistema Solar

No Sistema Solar, existem 417 satélites planetários naturais detectados até o momento:

- Terra: 1 satélite
- Marte: 2 satélites
- Júpiter: 97 satélites
- Saturno: 274 satélites
- Urano: 28 satélites
- Netuno: 16 satélites

Além de mais de 475 luas naturais orbitando planetas-anões, asteroides e objetos trans-netunianos

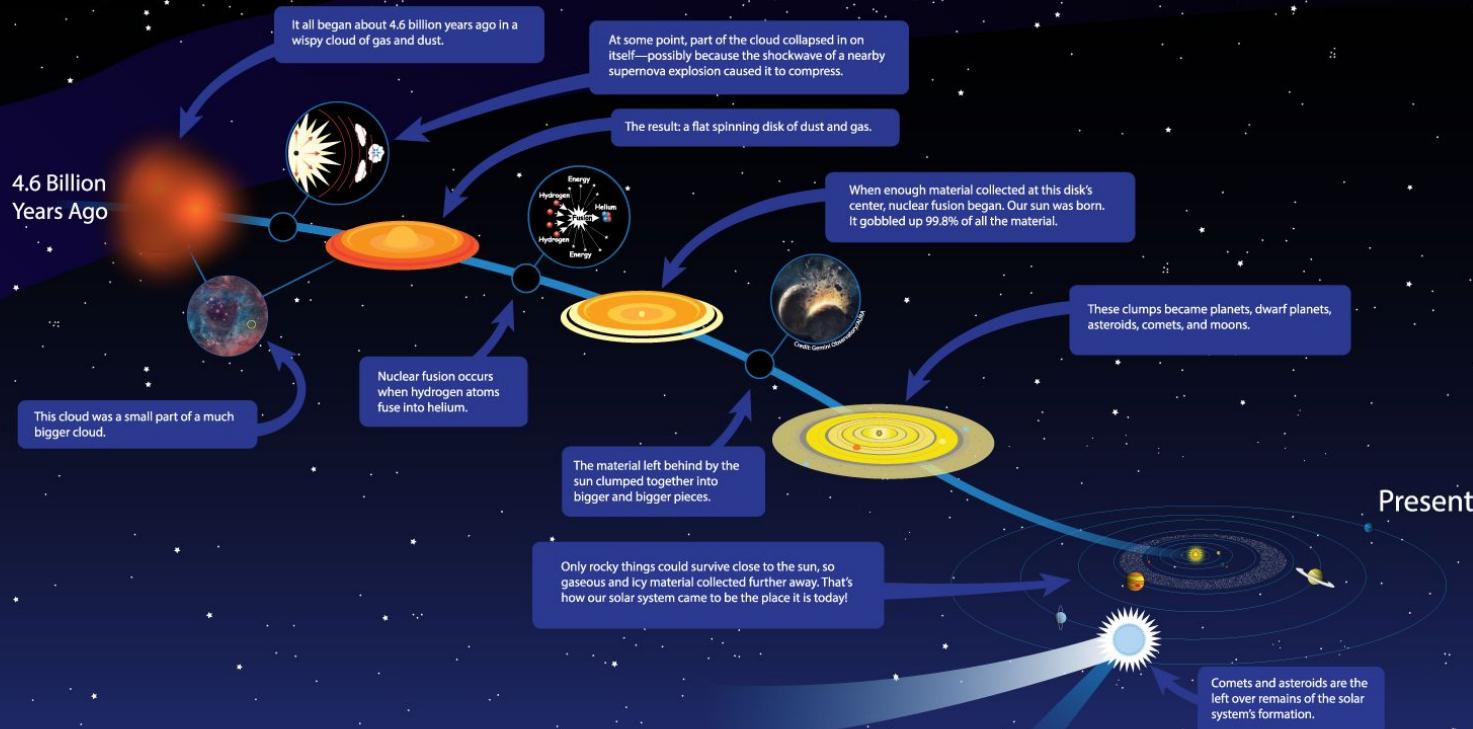


# Como o Sistema Solar se formou?



# How did our solar system come to be?

National Aeronautics and Space Administration



Not to Scale

...mas dentro dessa  
história, como e  
quando os satélites e  
anéis se formaram?



planetas gigantes

satélites gigantes

objetos externos

disco circum-planetário

anéis densos

satélites médios

espalhamento viscoso

satélites pequenos

satélites irregulares

anéis estreitos

planetas terrestres

pequenos corpos

destruição por maré

ruptura

descamação por maré

anéis tênues

impacto gigante

rápida rotação

disco/  
anel

satélites



bombardeamento



destruição por maré



captura



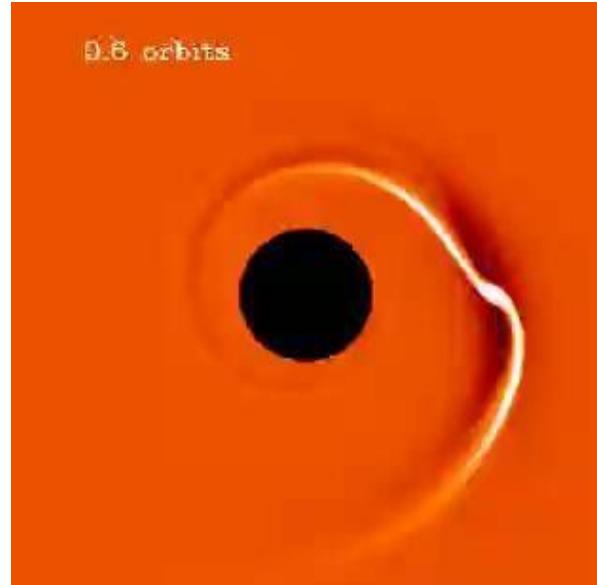


*That's all Folks!*

# Construindo um disco circumplanetário

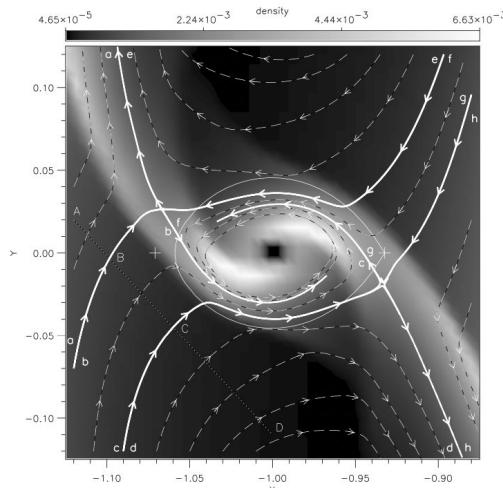


# Formação do disco circumplanetário

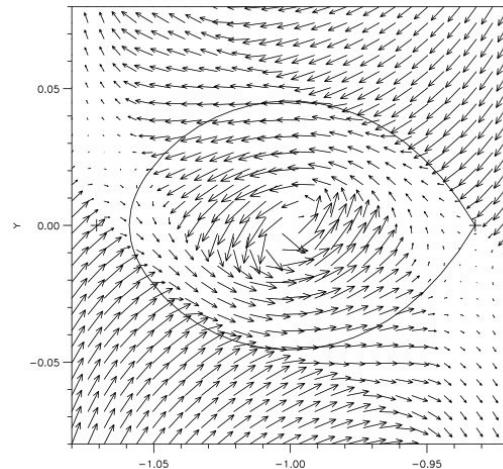


# Formação do disco circumplanetário

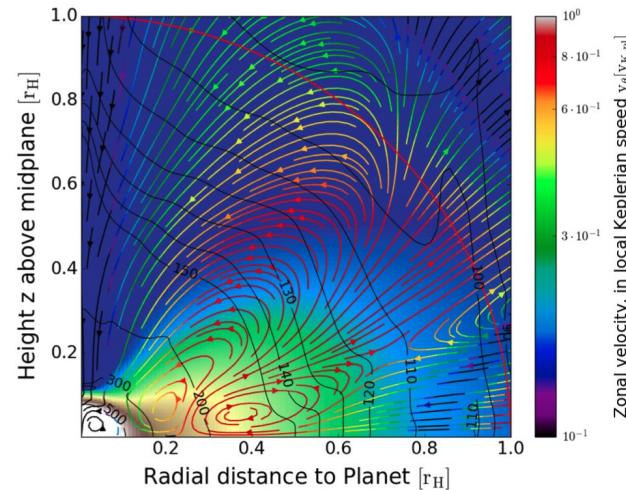
## Evolução no plano:



**braços espirais**



## Evolução espacial:

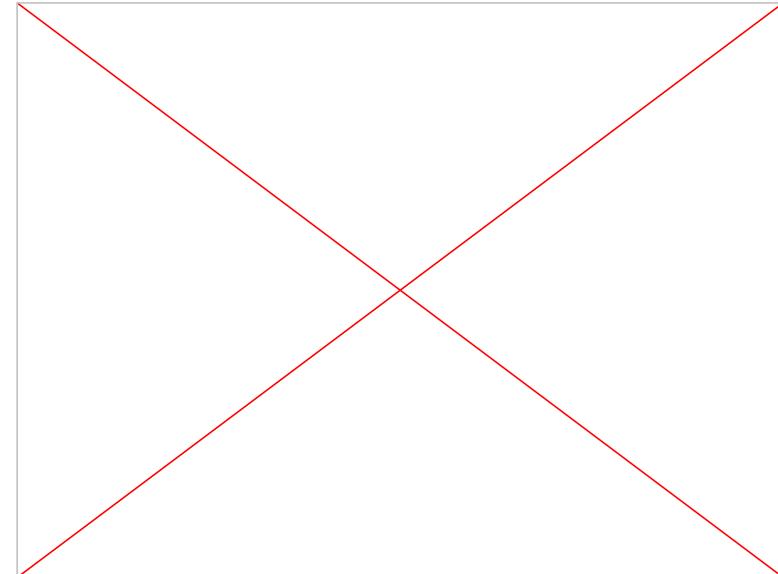


**fluxo meridional**

Um disco circumplanetário possui a mesma composição do disco proto-planetário no momento da abertura do gap - predominância de gás (>90%) e baixa concentração de poeira

# Construindo os satélites Galileanos de Júpiter





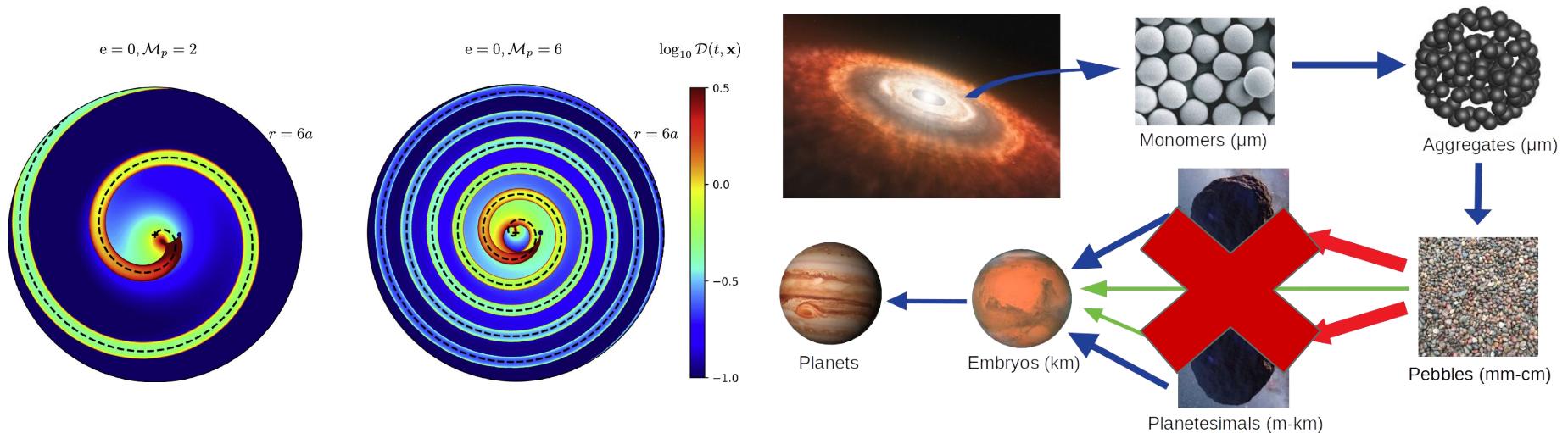
- Satélites com razão de massa em relação a Júpiter comparável à de Netuno com o Sol
- Satélites essencialmente rochosos em órbitas de baixa excentricidade e inclinação
- Io, Europa, Ganimedes se encontram em ressonância Laplaciana

- A princípio o crescimento dos satélites no disco Joviano deveriam ocorrer da mesma forma que os planetas.



- Modelos mais antigos propõem que o material depositado no disco coagula formando satélitesimais

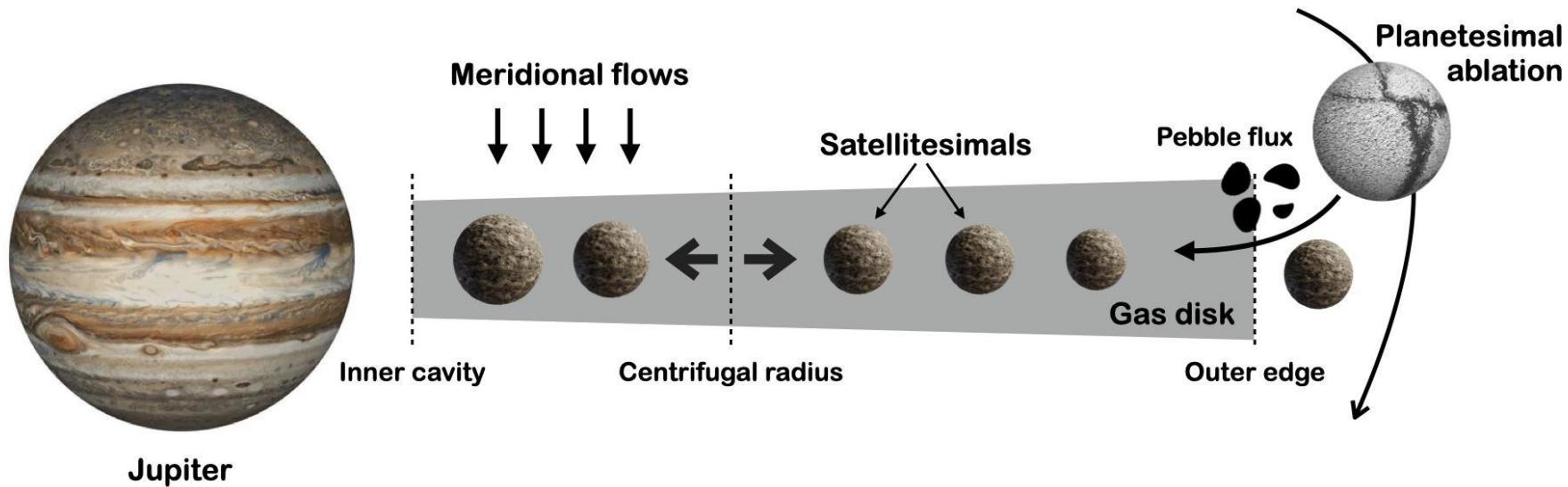
- O arrasto do gás no disco faz as órbitas dos sólidos espiralar rapidamente



- É altamente improvável que satélitesimais se formem de maneira eficiente no disco

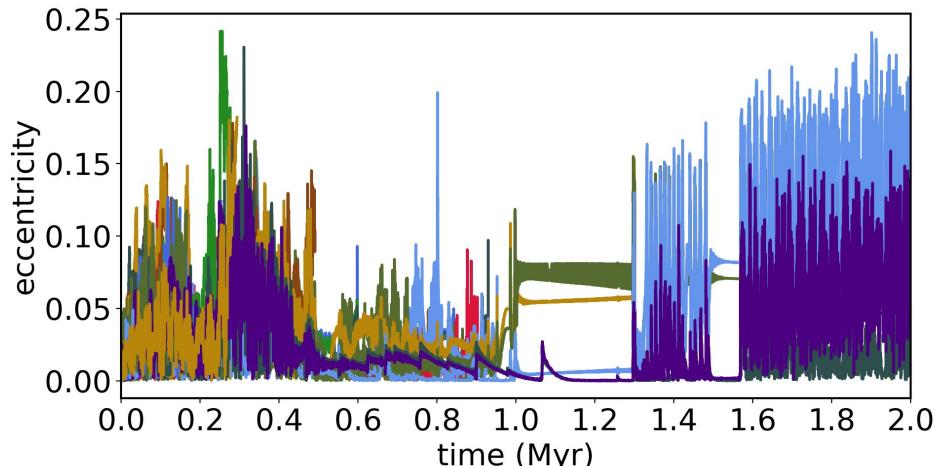
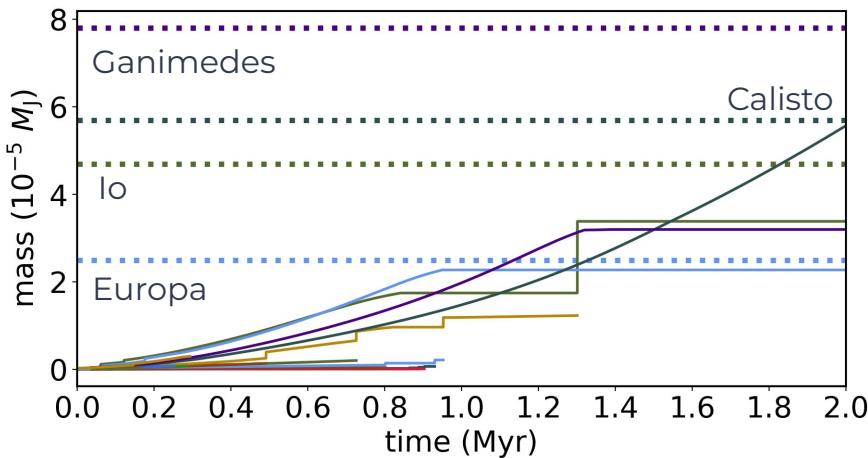
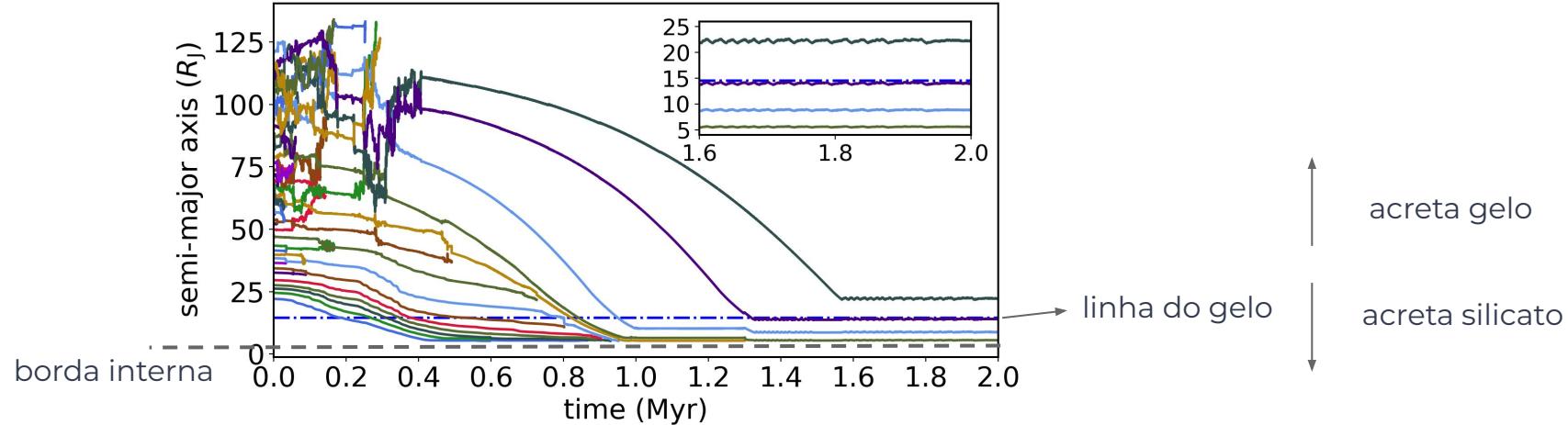
# O modelo de Madeira et al. 2021

Madeira et al. 2021: Formation of the Galilean Satellites



Os satelitesimais e os pebbles no disco circumplanetário tem uma origem exógena, sendo provenientes de planetesimais na zona de influência planetária

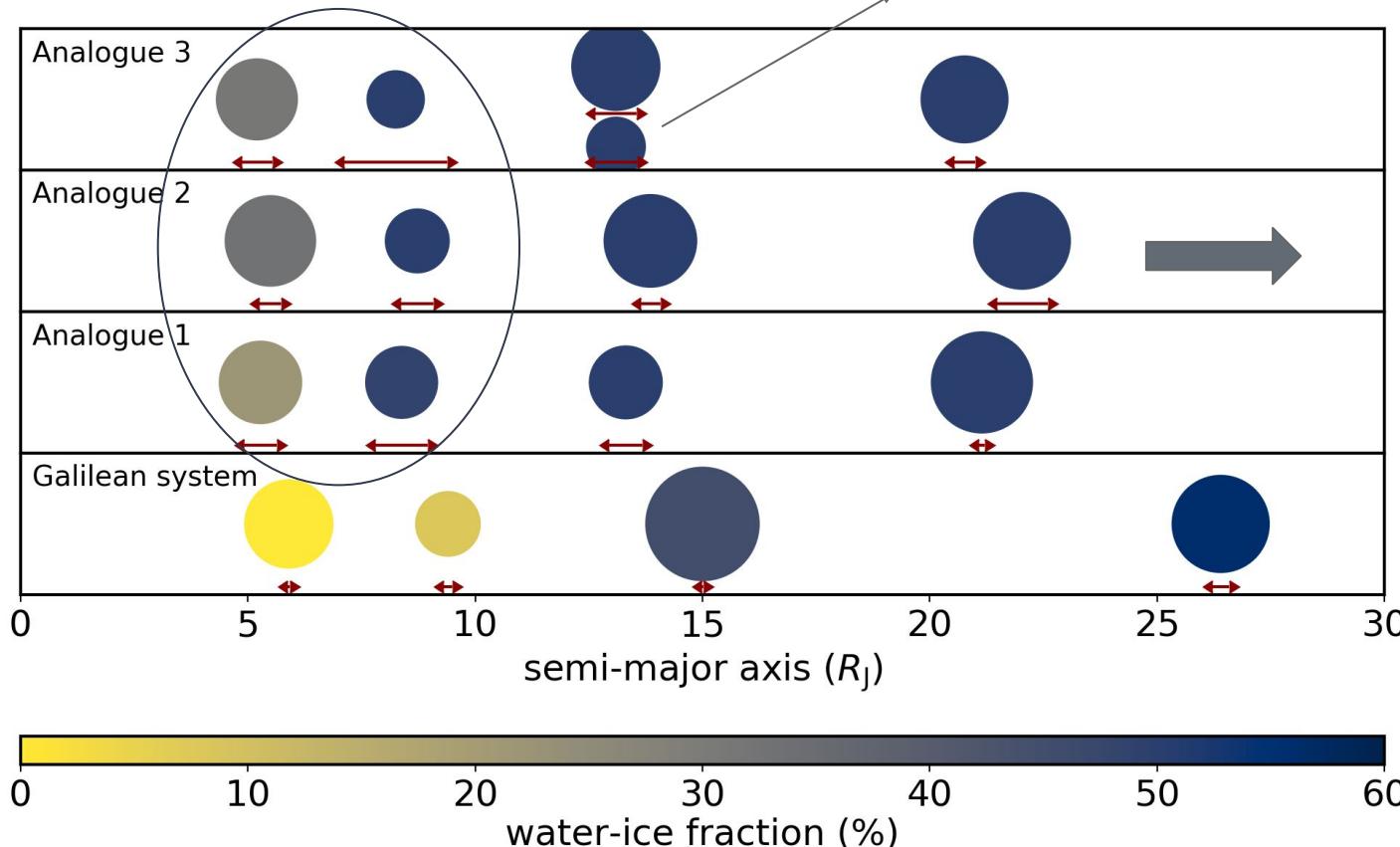
# Formação do sistema Galileano



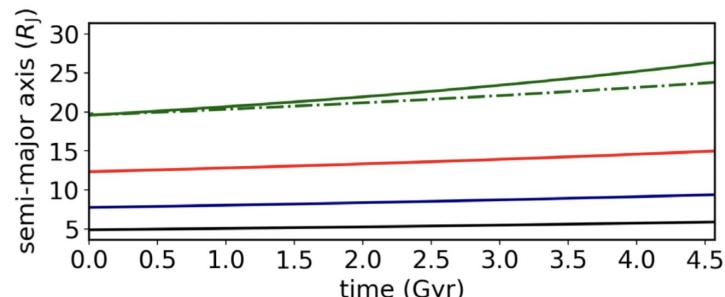
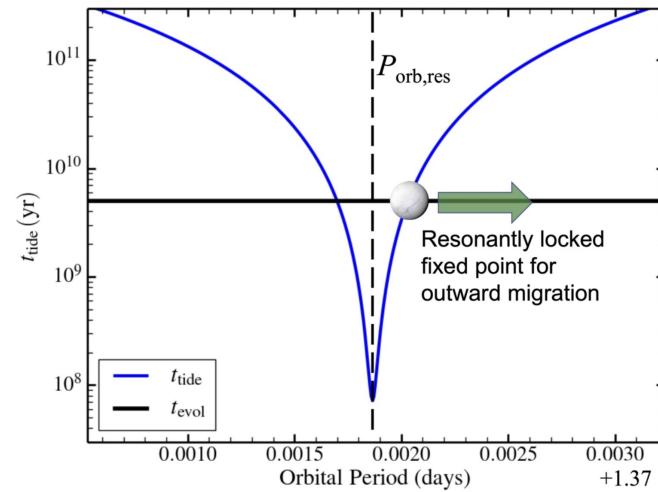
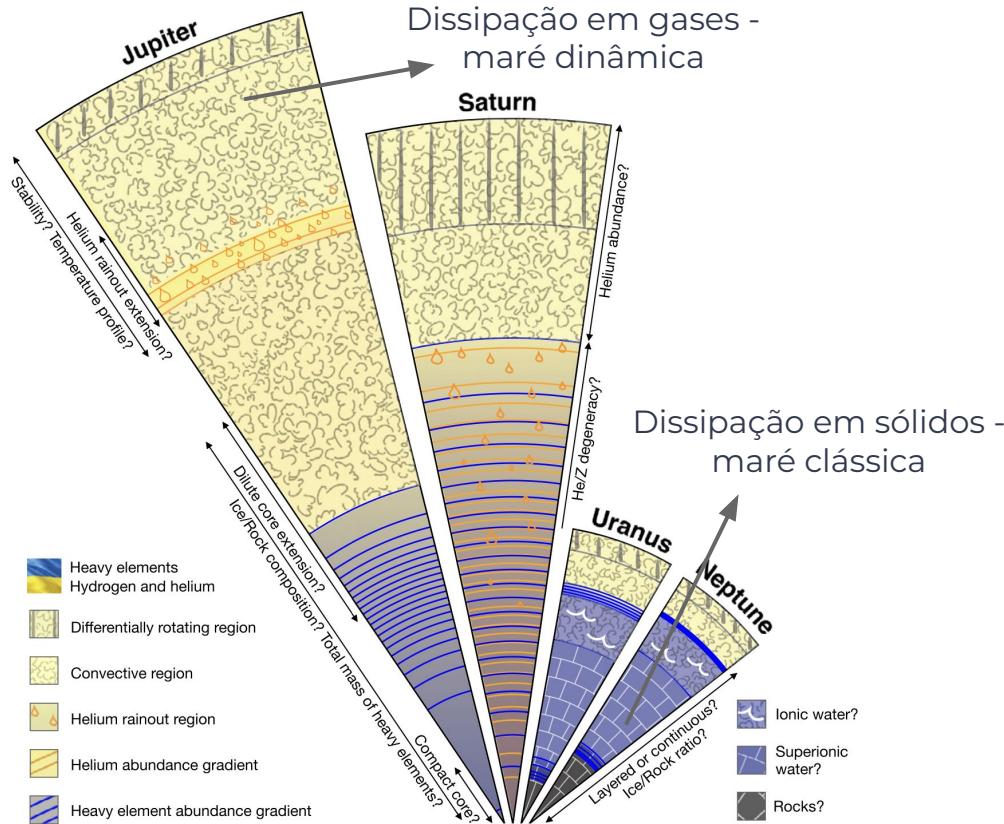
# Predições sobre o sistema Galileano

Io e Europa passaram por perda de água devido escape hidrodinâmico

A massa anomalamamente grande de Calisto foi originada do impacto de dois satélites coorbitais



# Evolução do sistema Galileano

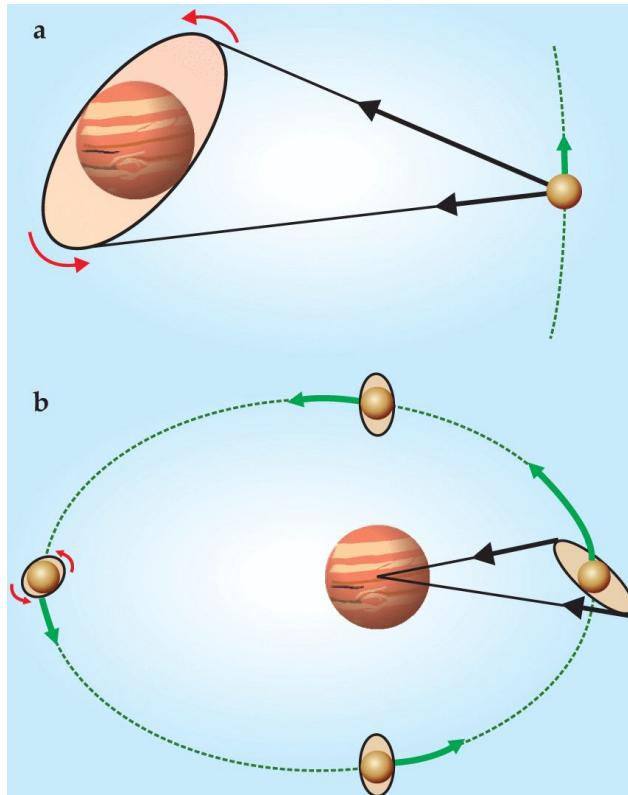


# Construindo um anel denso/disco de sólidos

## 1. Destruição por maré



# Um satélite é estável ao redor de um planeta?



- Gradiente de gravidade nos corpos induz a formação de um bojo no planeta e no satélite (maré)
- O bojo do planeta gera um torque no satélite que o leva a migrar

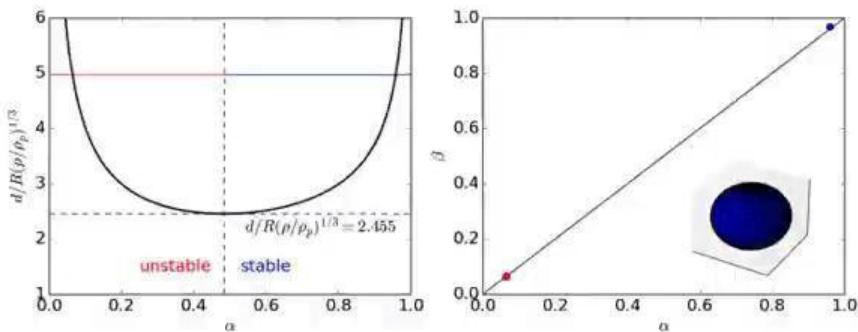


- A indução do bojo no satélite produz dissipação de energia, responsável por aumentar sua temperatura, amortecer a excentricidade e distorcer sua forma

Como se dá a distorção do satélite? Ele pode ser tão distorcido a ponto de ser destruído?

# Um satélite é estável ao redor de um planeta?

- Assume-se um satélite fluído e em estado de spin-locked
- O formato de equilíbrio do objeto será dado pelo balanço entre as forças restauradoras (auto-gravidade) e as forças distorcivas (rotação e maré planetária).

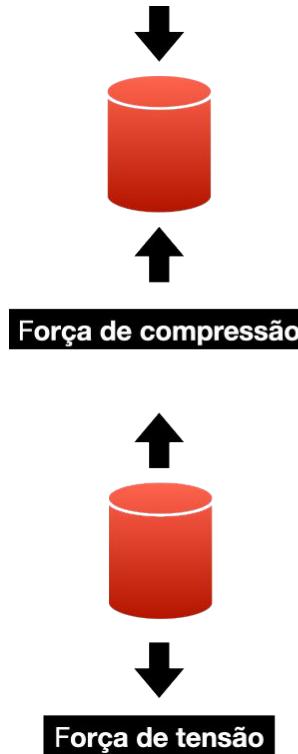


Limite fluido de Roche:

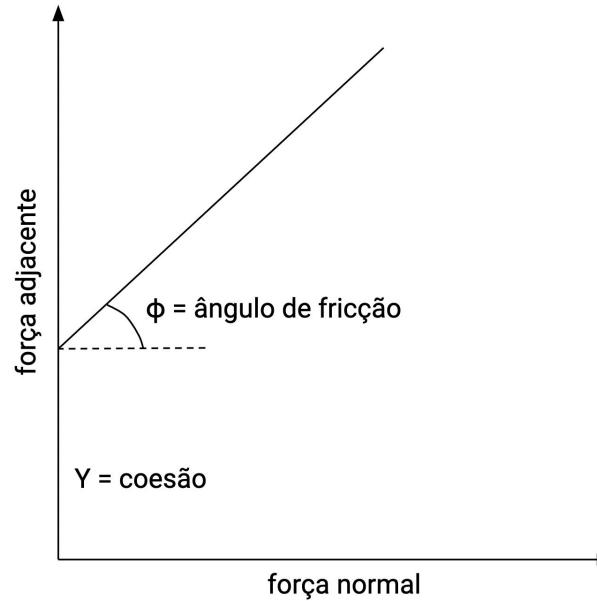
- Distância a partir da qual o satélite não pode suportar as forças das marés, se rompendo.
- Um anel fluido dentro de tal limite não pode ser agregar, uma vez que o corpo resultante não pode alcançar o equilíbrio

# E para um satélite mais realista?

- A resistência interna de um satélite define quanto ele resiste a tensões externas.

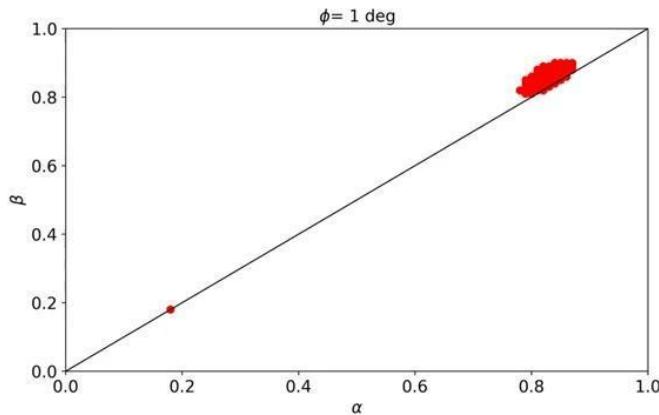


Critério de Drucker-Prager:

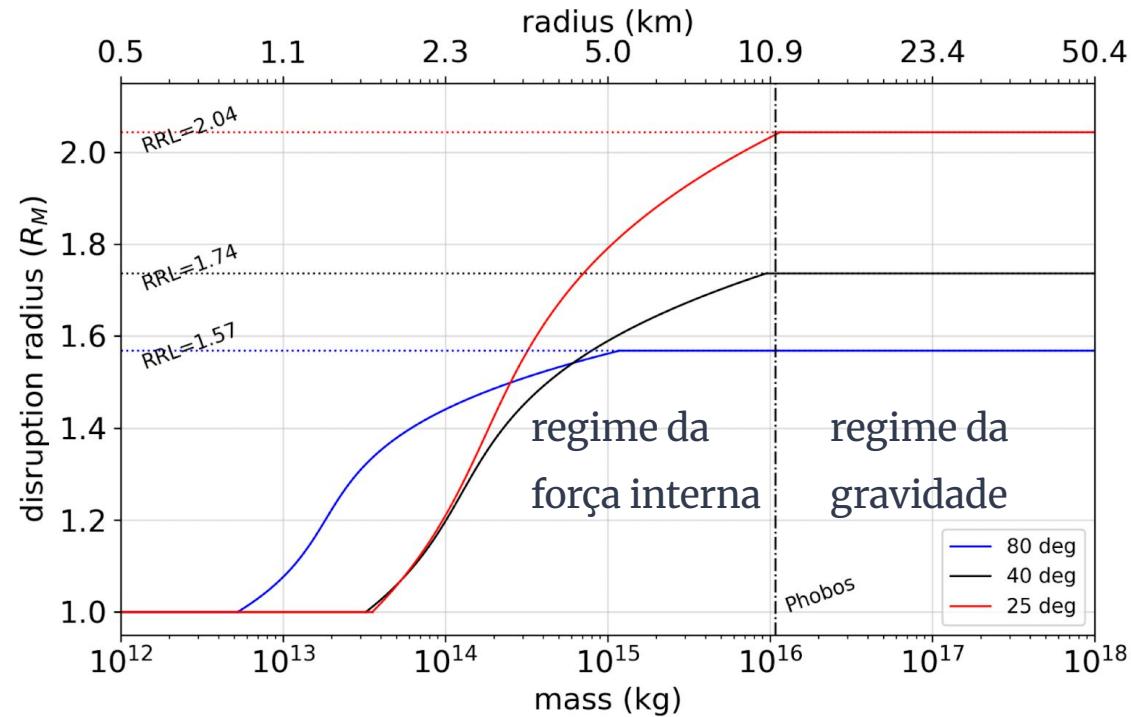


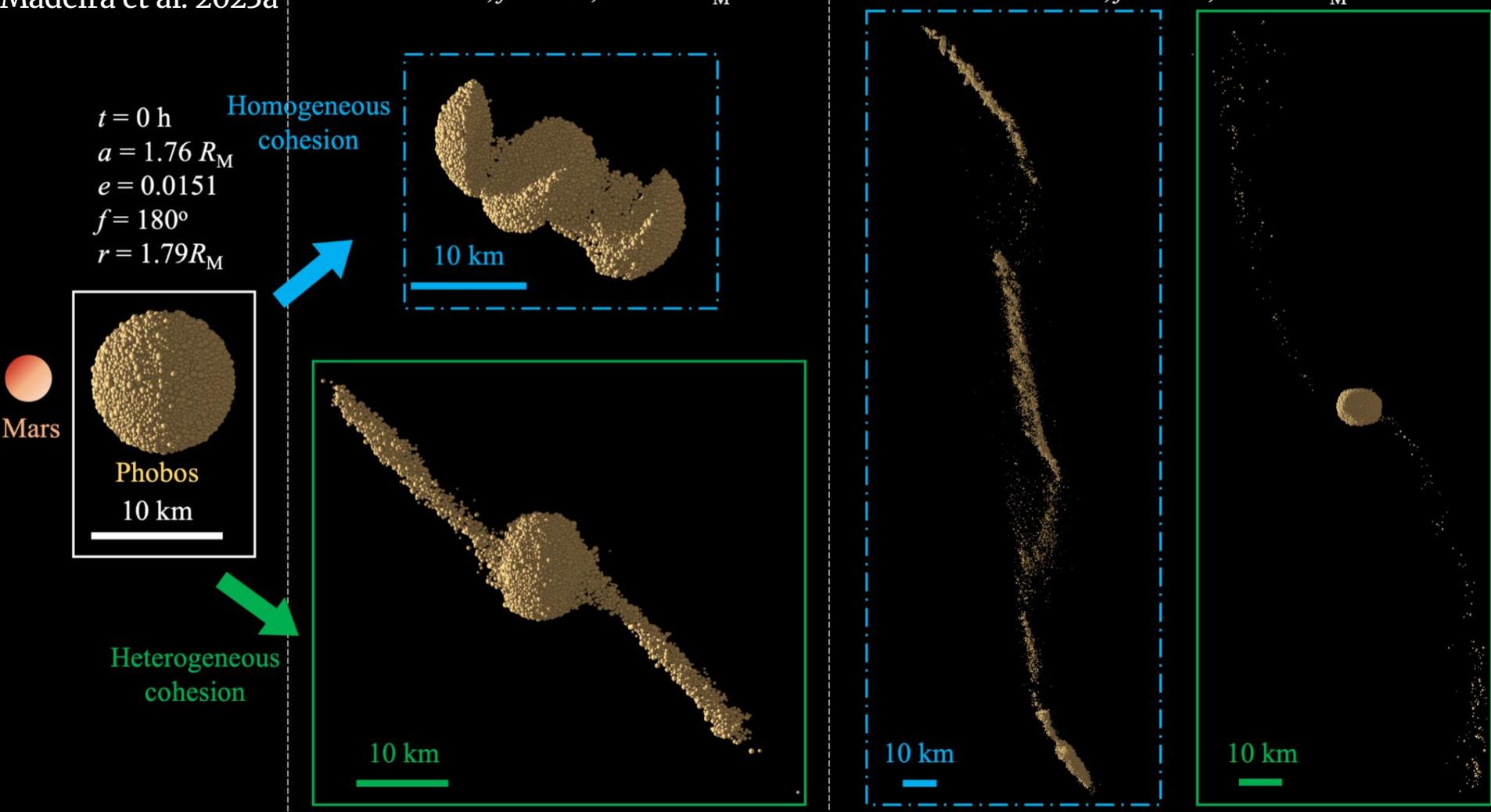
# E para um satélite mais realista?

- Madeira et al. 2023a: resistência de satélites rubble-pile ao redor de Marte



Limite sólido de Roche: limite onde um satélite é rompido pela maré planetária





# Construindo um anel denso/disco de sólidos

## 2. Impacto gigante



# Como um disco de sólidos se forma?

- Modelos de formação de planetas terrestres preveem que impactos energéticos entre (proto-)planetas são comuns nos estágios finais de formação.
- Modelo canônico da formação lunar:

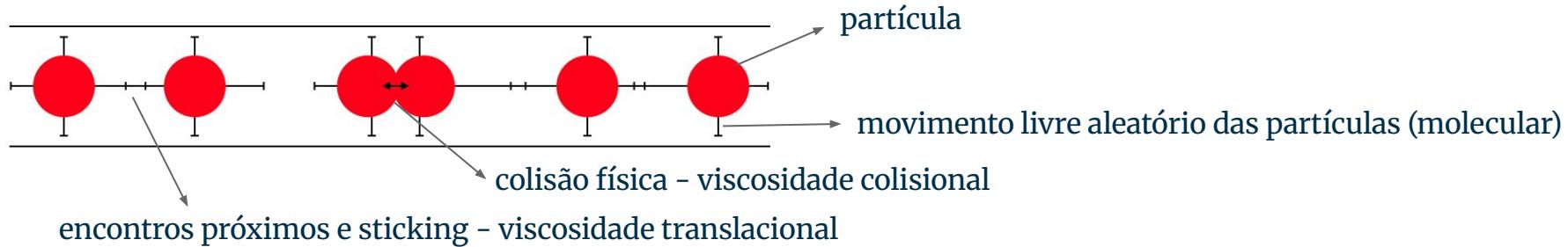


- Gás formado no impacto, expande e condensa, formando partículas que se depositam no plano do equador devido a impactos.

# Construindo satélites a partir de um anel denso/disco de sólidos



- A evolução do disco é definida pela interação entre as partículas, responsáveis por dissipar energia e transportar momento angular entre as diferentes partes do disco (viscosidade).

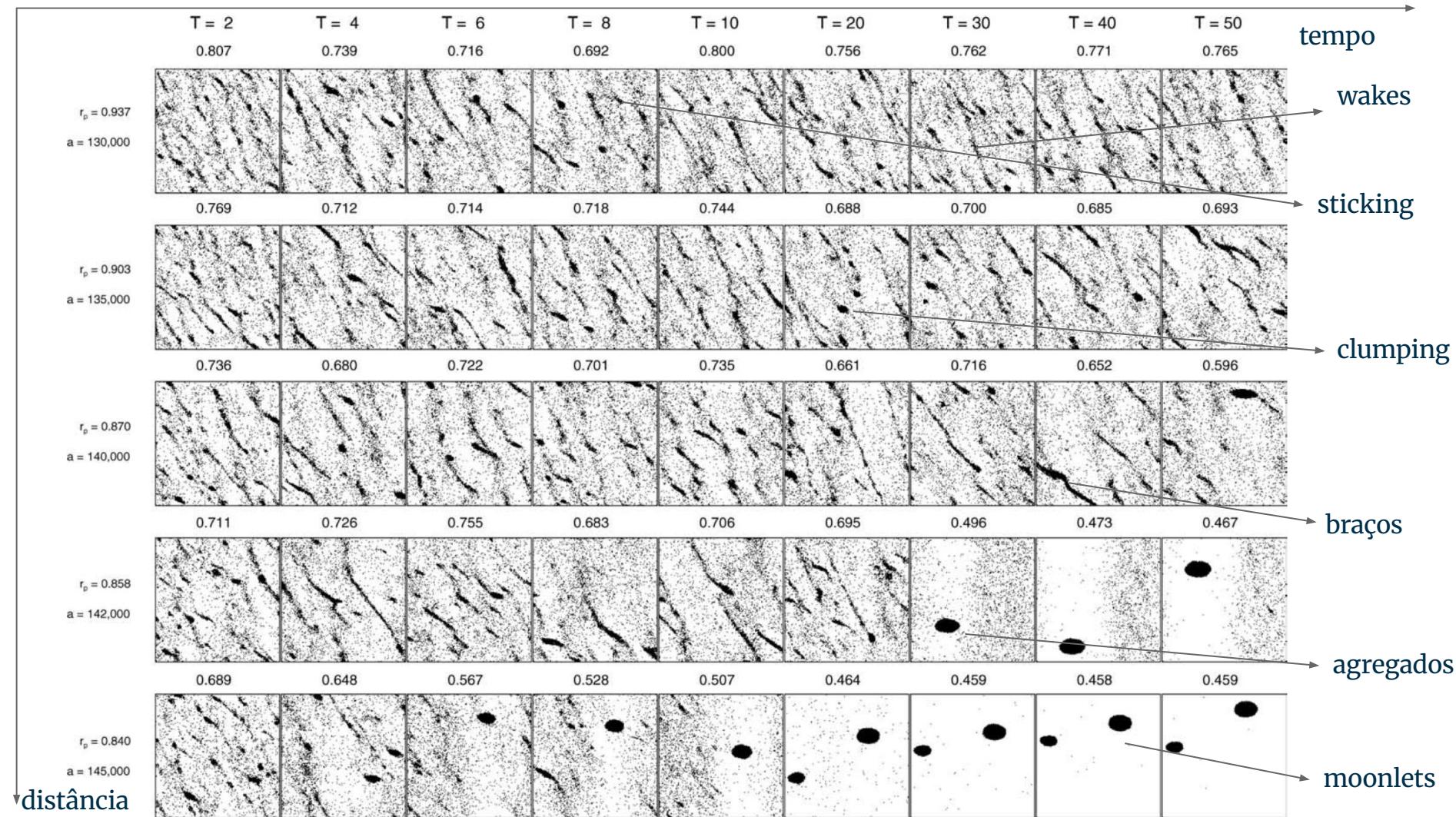


+ viscosidade gravitacional – transporte de momento angular em estruturas organizadas (braços espirais, wakes)

- Parâmetro de Toomre: mede a estabilidade de um anel mantido por auto-gravidade ante a rotação diferencial e dispersão aleatória das velocidades:

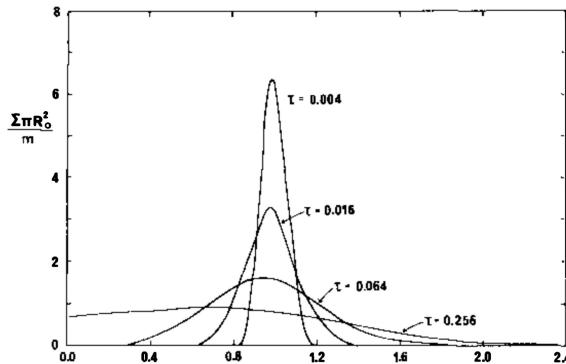
$$Q = \frac{c_r \Omega}{3.36 G \Sigma}$$

- $Q < 1$  – anel instável (ocorrerá aglutinação)
- $1 < Q < 2$  – anel estável com formação de wakes
- $Q > 2$  – anel estável (aproximação para um fluido é válida)



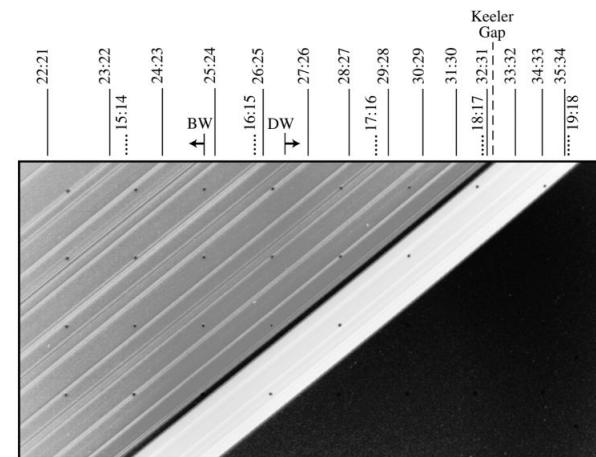
# O efeito da viscosidade

- A interação entre as partículas acarreta:
  - acreção e coagulação
  - espalhamento radial do disco
- A interação entre partículas e satélites:
  - migração dos satélites
  - confinamento do disco



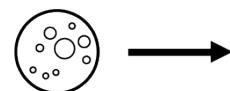
Anel

Ressonâncias de Lindblad



2:1 MMR com o anel

Murray & Dermott 1999



Migração devido anel e maré

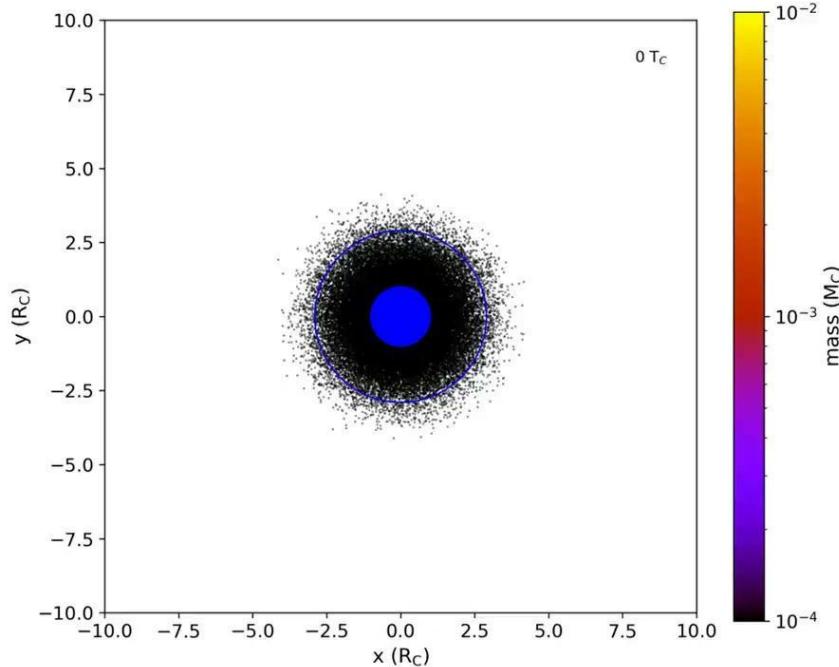
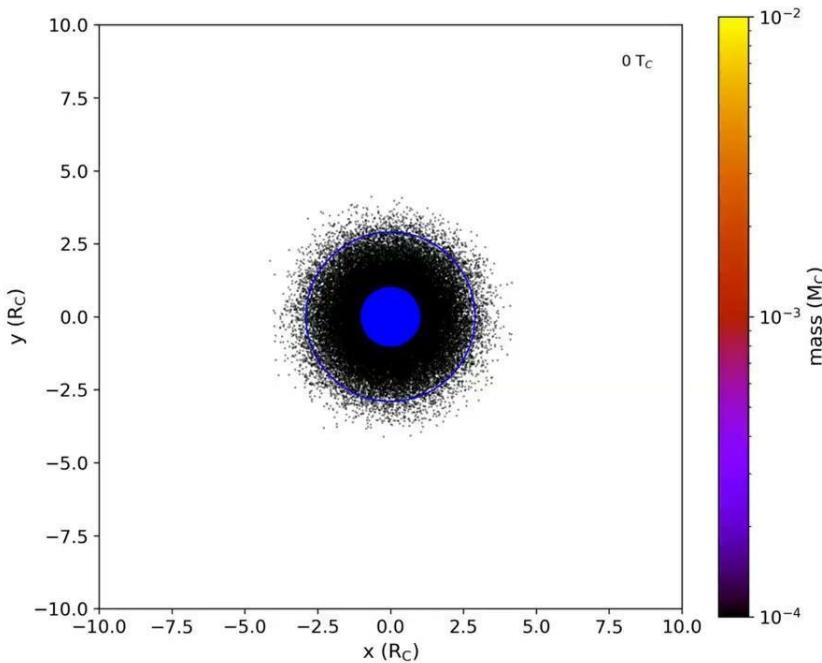
1.59 x anel



Migração devido apenas maré

# Acreção em um disco massivo

Madeira et al. 2025b:



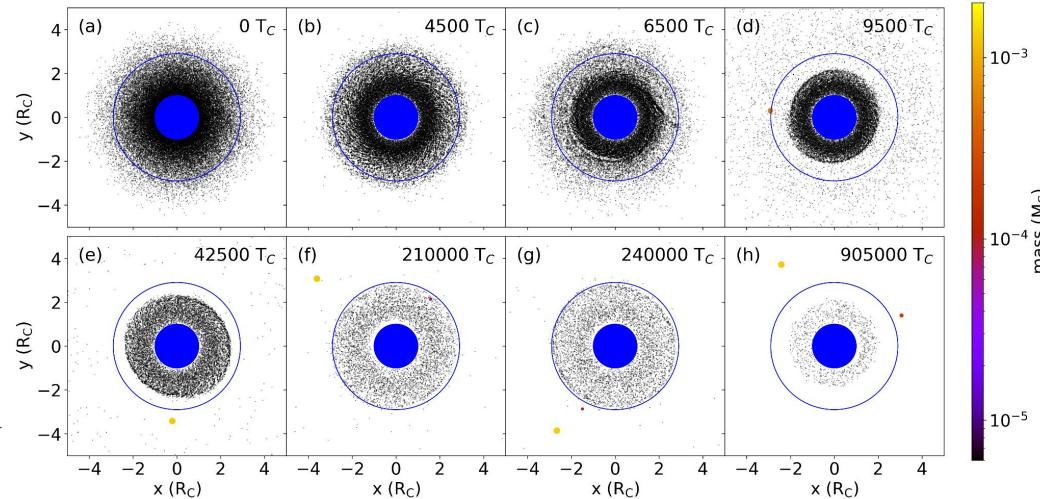
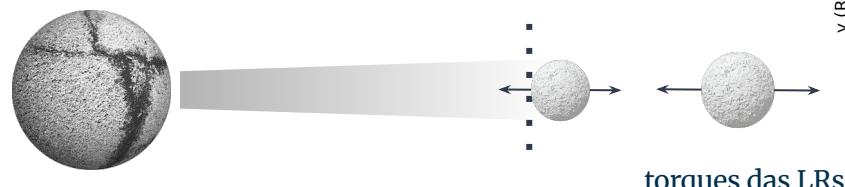
A formação em discos é de modo geral caótica, uma vez que depende da interação mútua entre as partículas.

# Padrões de formação

$M_{\text{disk}} > 0.05 M_{\text{C}}$  - regime contínuo



$0.005 M_{\text{C}} \leq M_{\text{disk}} \leq 0.05 M_{\text{C}}$  - regime discreto



Madeira et al. 2025b: A massa do satélite formado em ambos regimes segue a mesma regra empírica, dependente da massa do disco

$$M_{\text{l,sat}} = (0.20 \pm 0.16) M_{\text{disk}}^{0.98 \pm 0.16}$$

# Padrões de formação

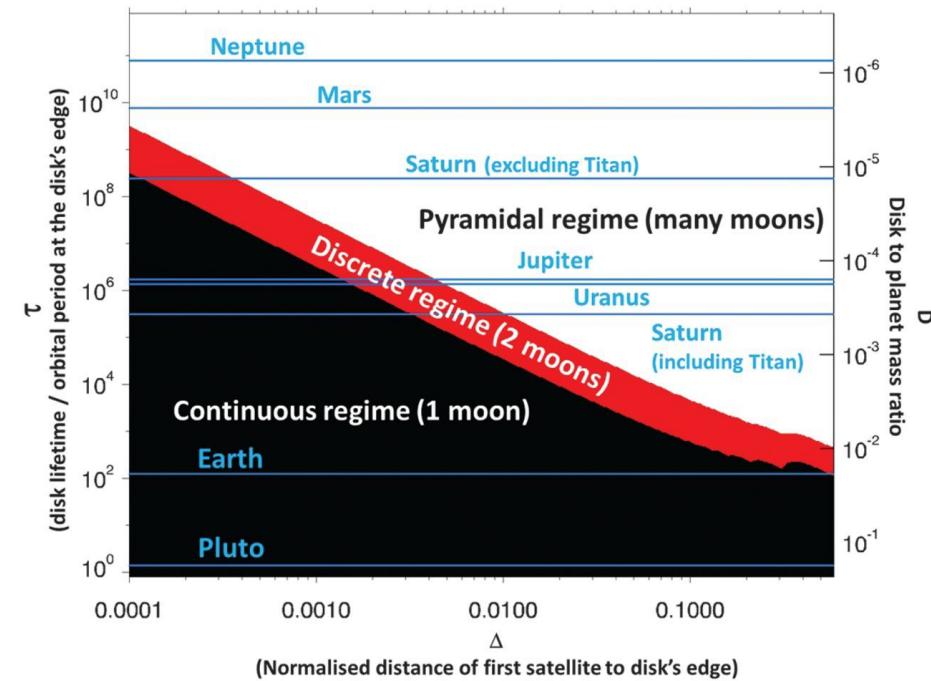
$M_{\text{disk}} > 0.05 M_{\text{C}}$  - regime contínuo



$0.005 M_{\text{C}} \leq M_{\text{disk}} \leq 0.05 M_{\text{C}}$  - regime discreto



$M_{\text{disk}} \leq 0.003 M_{\text{C}}$  - regime piramidal

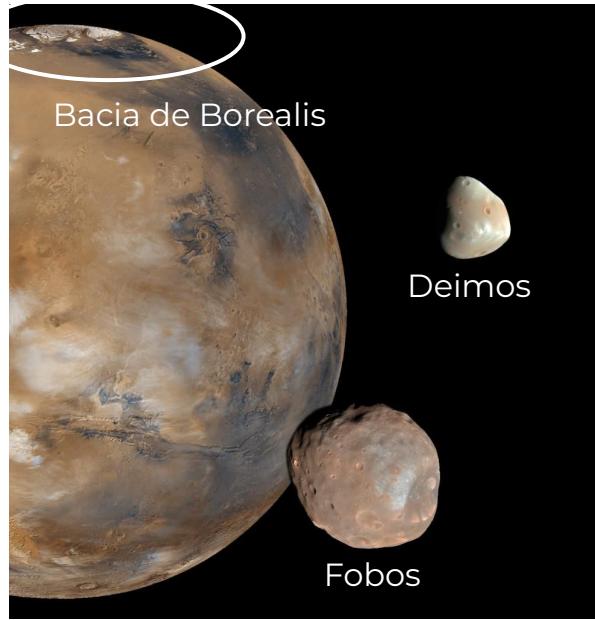


torques da maré

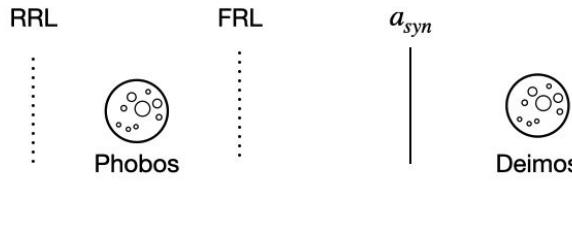
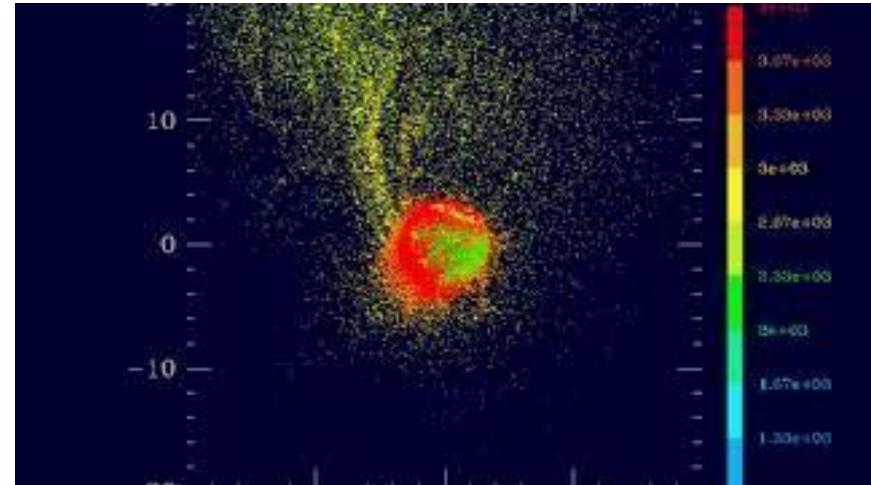
# Construindo e destruindo o satélite Fobos de Marte



# O sistema marciano



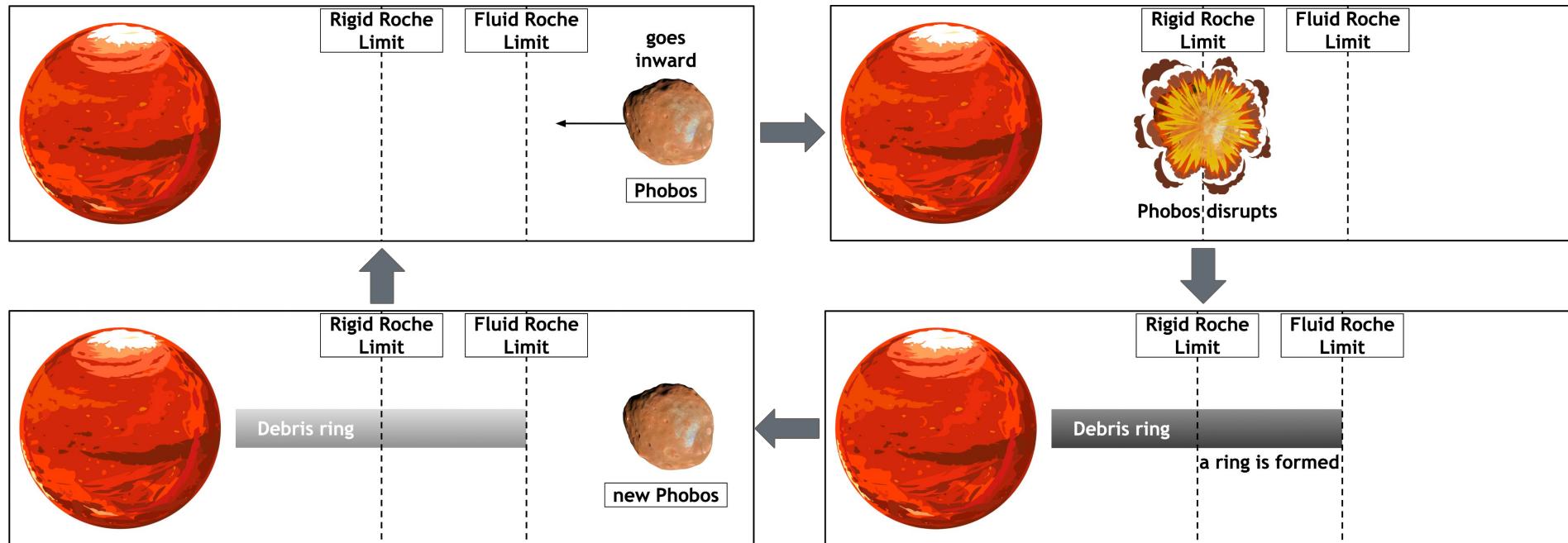
- Impacto gigante responsável pela Bacia de Borealis é capaz de reproduzir a velocidade de rotação anômala de Marte



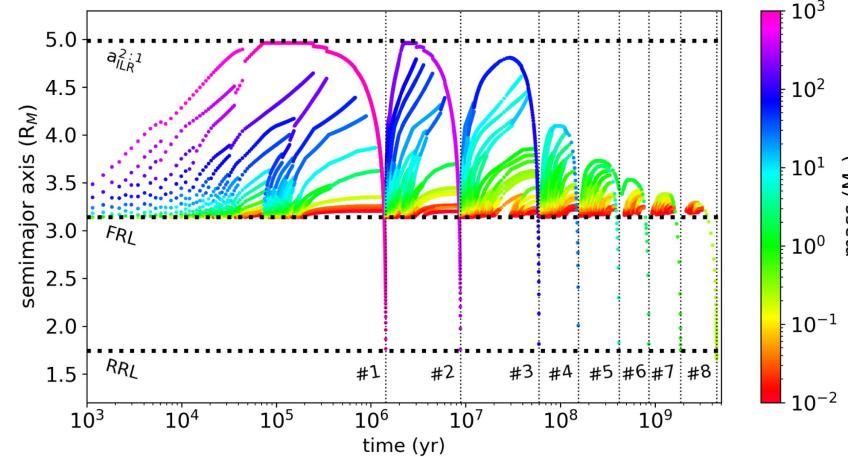
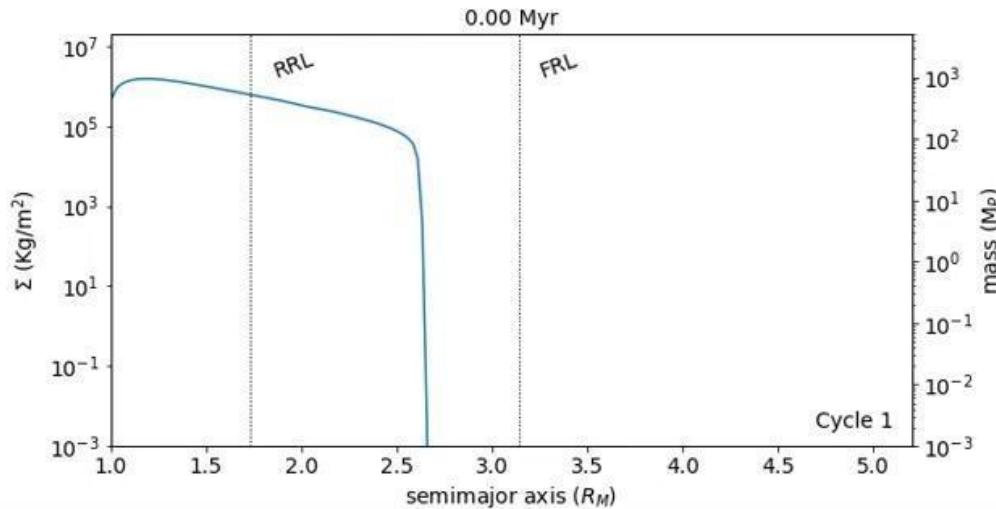
massa do disco = 100,000 massas de Fobos  
massa do satélite = 20,000 massas de Fobos

# Modelo de reciclagem

impacto gigante  Deimos  
disco de sólidos um Fobos



# Isso faz sentido? (Madeira et al. 2023a)

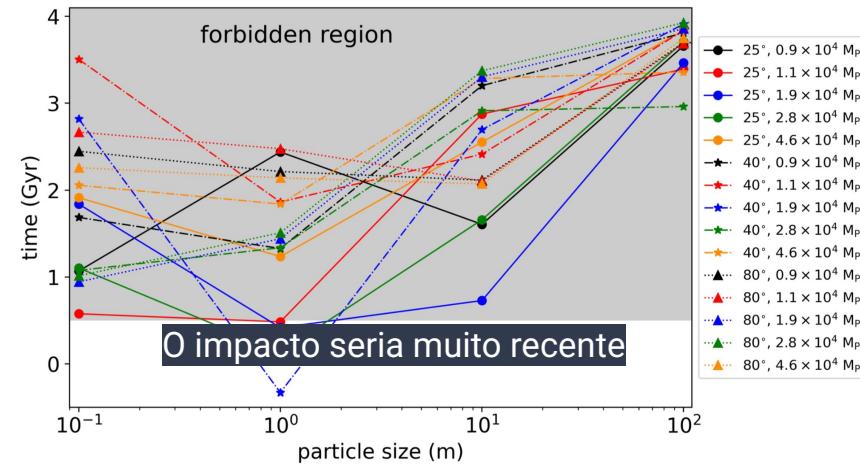
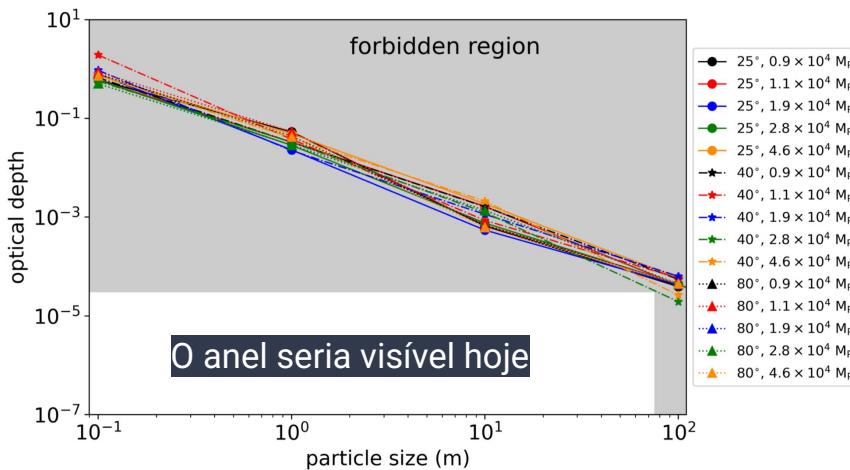


Fobos é formado em 1.8 Gyr, após 6 ciclos...no entanto um anel denso também é obtido

# Isso faz sentido? (Madeira et al. 2023a)

Das observações:

- Marte não tem um anel com profundidade ótima maior que  $3e-5$
- Não existem partículas maiores que 75 m ao redor de Marte
- O impacto ocorreu  $<0.5$  Gyr após a formação de Marte



Fobos não se formou pelo processo de reciclagem, ficando o mistério a respeito da sua formação.

# Perguntas?



[madeira@on.br](mailto:madeira@on.br)

