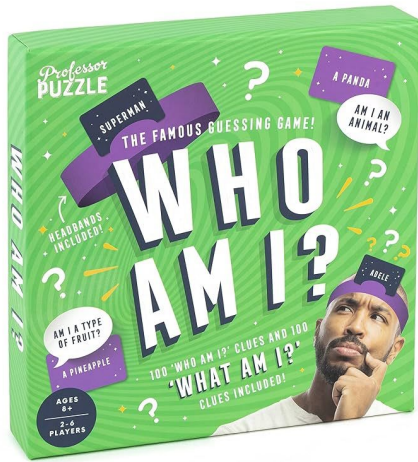


Escola de inverno em Astrofísica 2025

Formação de satélites e anéis planetários

Dr Gustavo Madeira





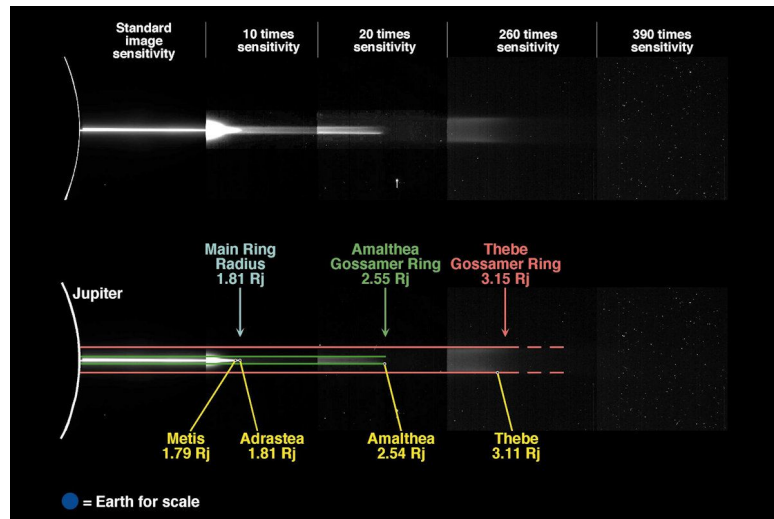
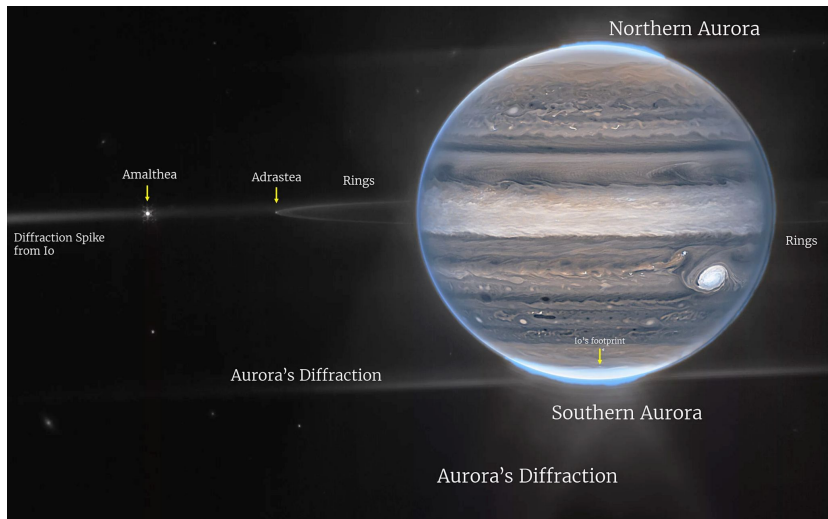
- Pesquisador de Ciências Planetárias no Observatório Nacional
- Doutor em Física pela UNESP, com especialização em Dinâmica Orbital e Astronomia de Posição
- Pós-doutorado em cosmoquímica pelo Institut de Physique du Globe de Paris
- Membro das missões DART/NASA, Hera/ESA, RAMSES/ESA

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.

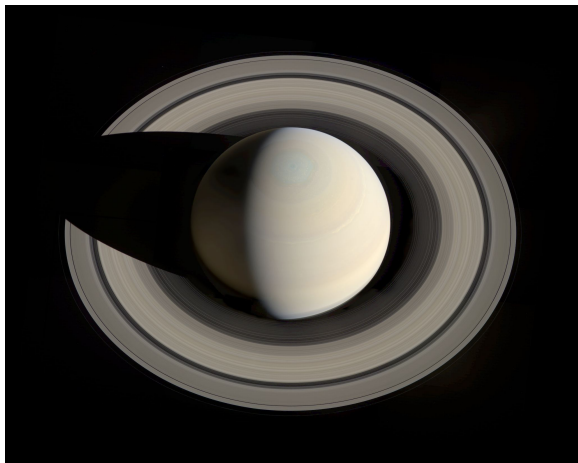


Júpiter:

- 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

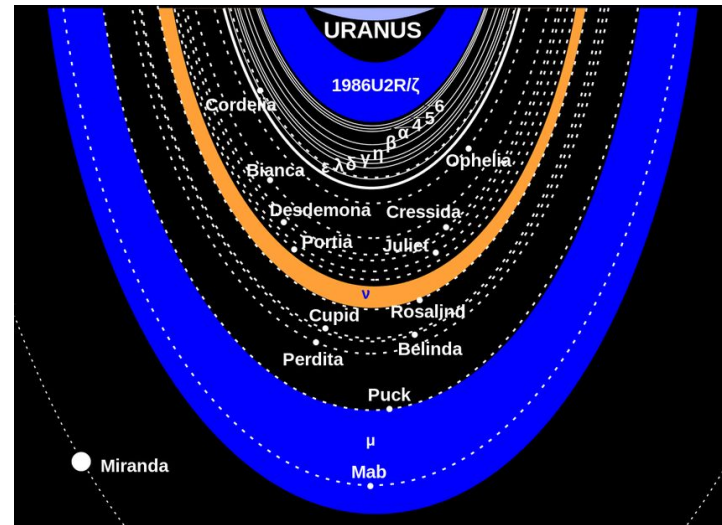
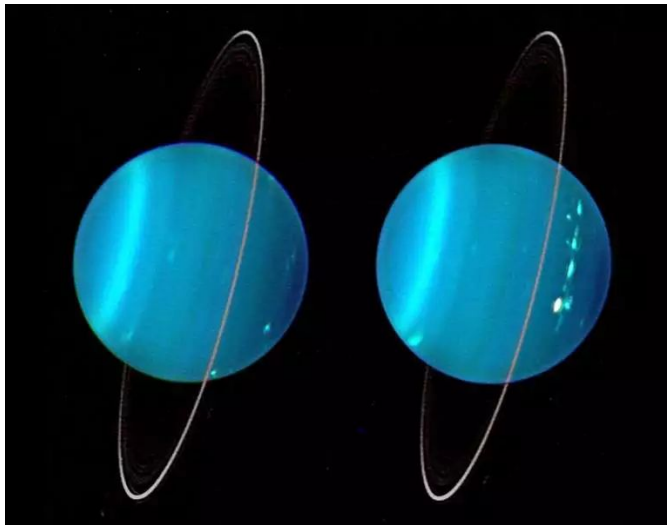
- Anel F
- Anel G
- Anel E



- Anéis coorbitais
- Arcos planetários

Os anéis do Sistema Solar

Todos os planetas gigantes do Sistema Solar possuem anéis

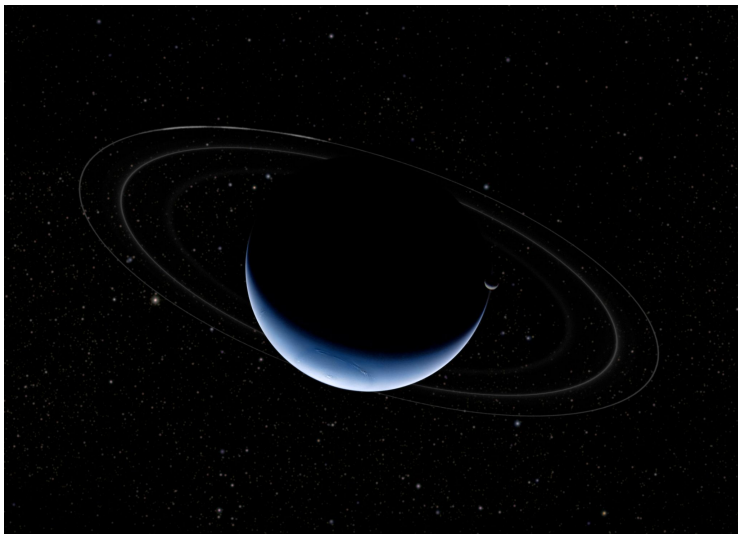


Urano:

- Conjunto de anéis estreitos intercalados com satélites
- α , β , η , γ , δ , 4, 5, 6, λ , ε , ζ , ν , μ

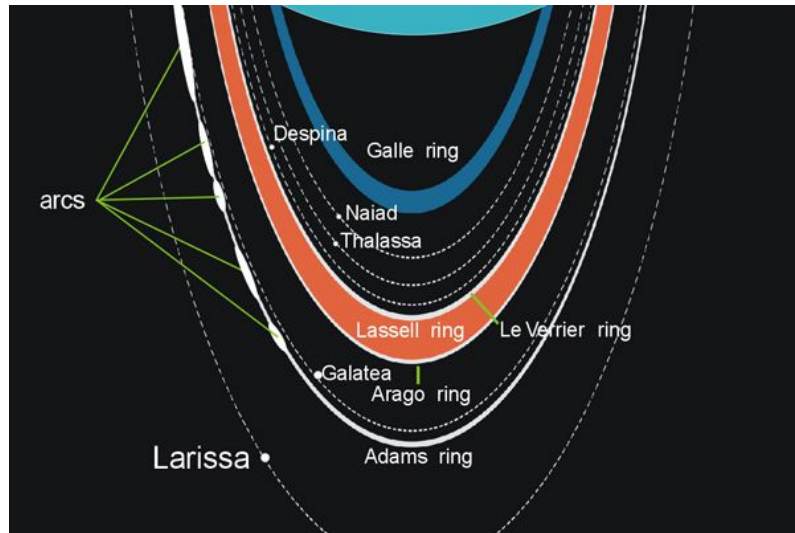
Os anéis do Sistema Solar

Todos os planetas gigantes do Sistema Solar possuem anéis



Netuno:

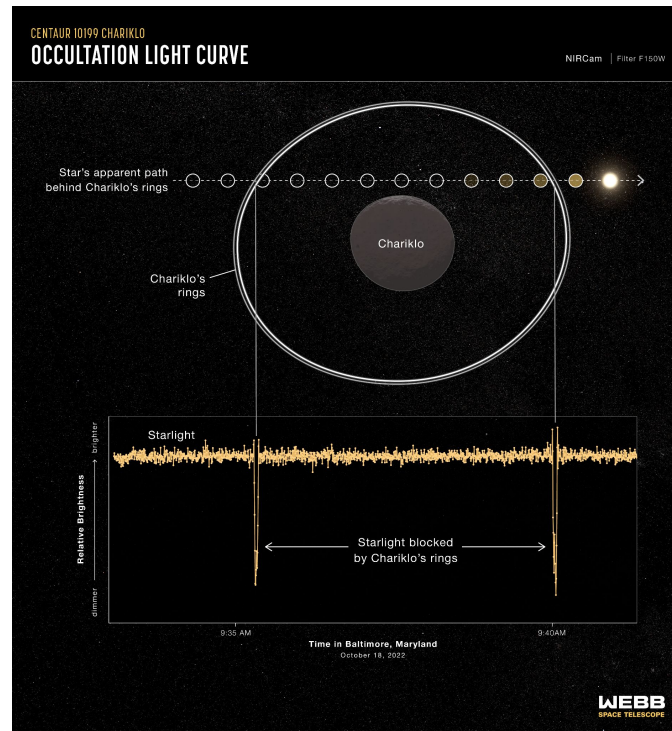
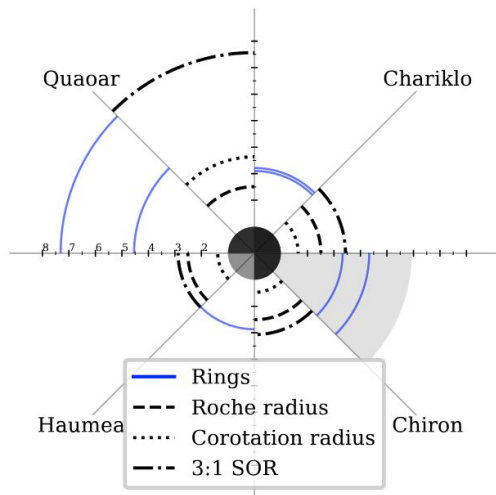
- anel Galle
- anel Le Verrier
- anel Lassell
- anel Arago
- anel Adams
- arcos (Fraternité, Egalité, Liberté e Courage)



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

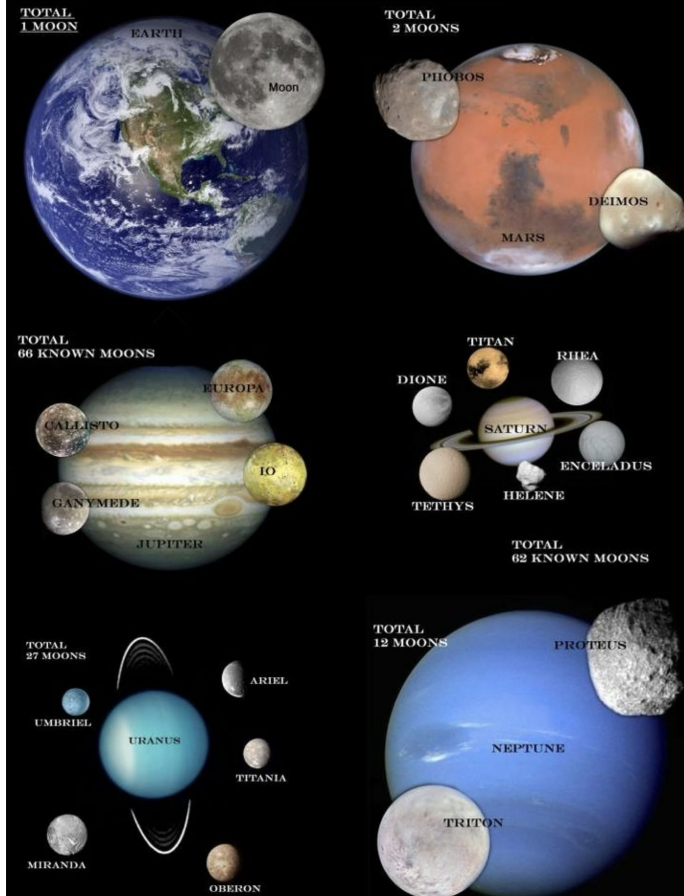


Os satélites do Sistema Solar

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

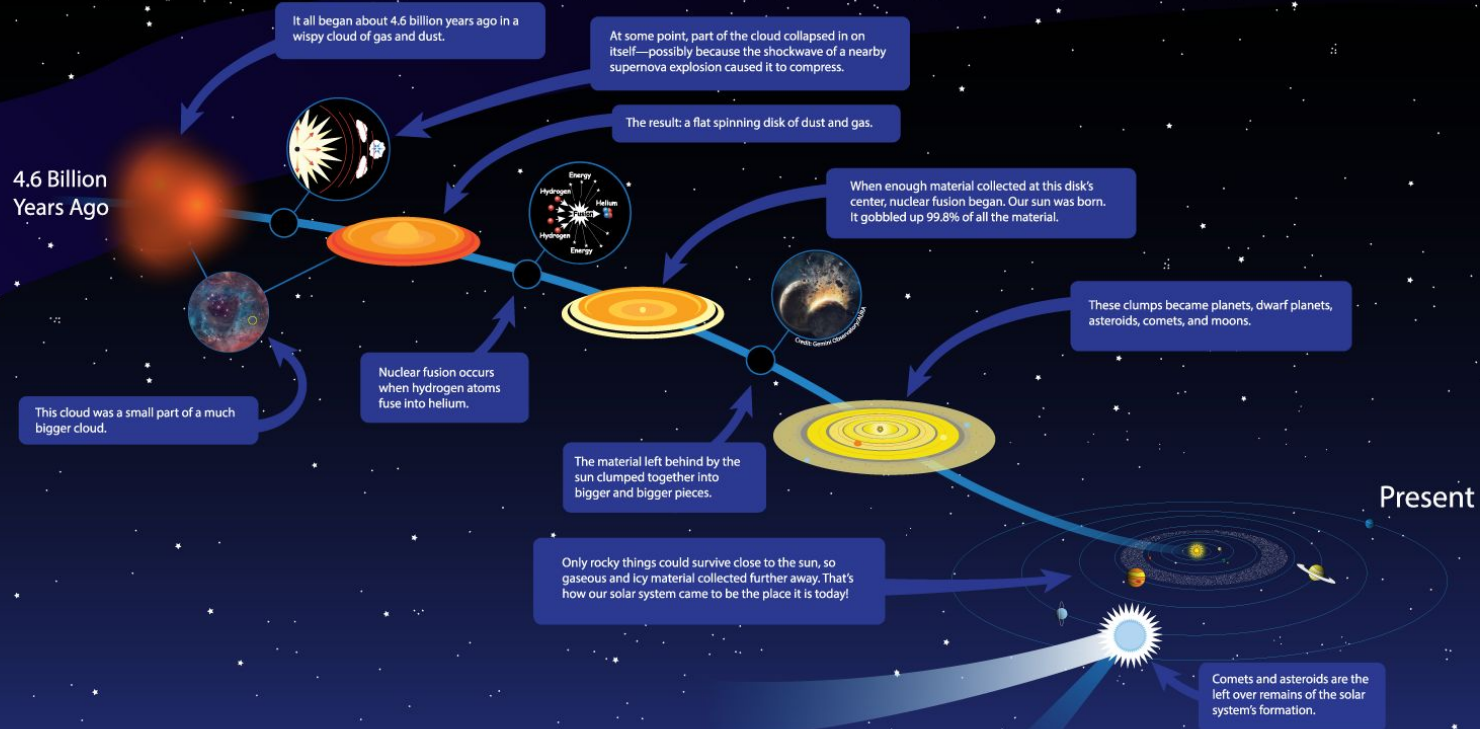


Como o Sistema Solar se formou?



How did our solar system come to be?

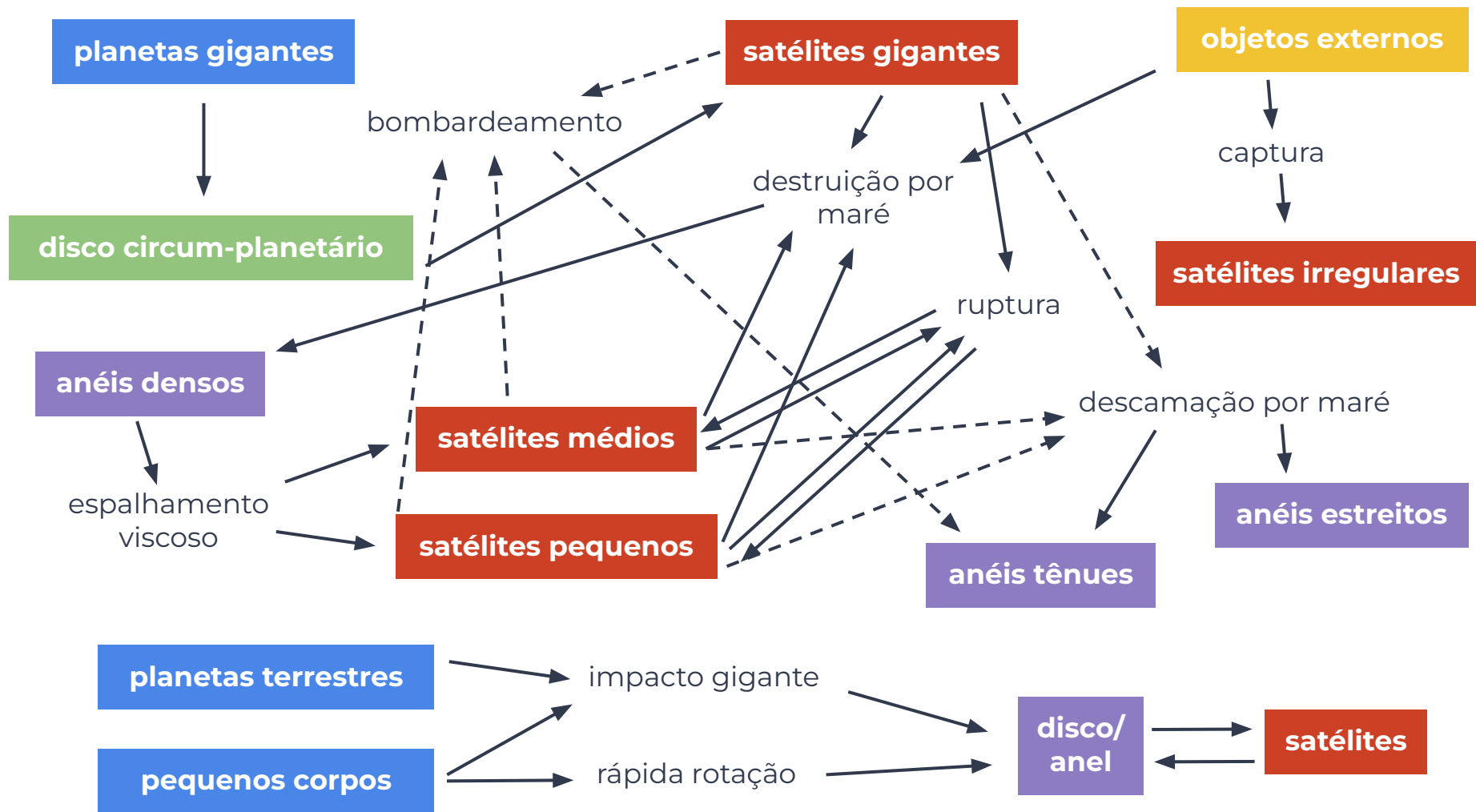
National Aeronautics and
Space Administration



Not to Scale

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





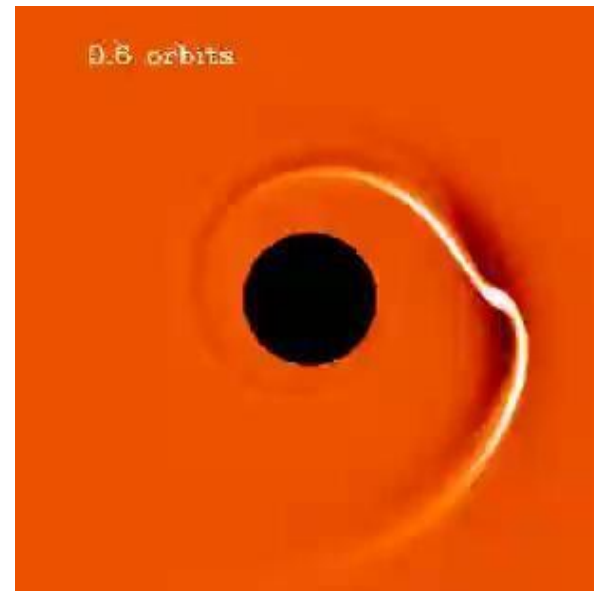


That's all Folks!

Construindo um disco circumplanetário

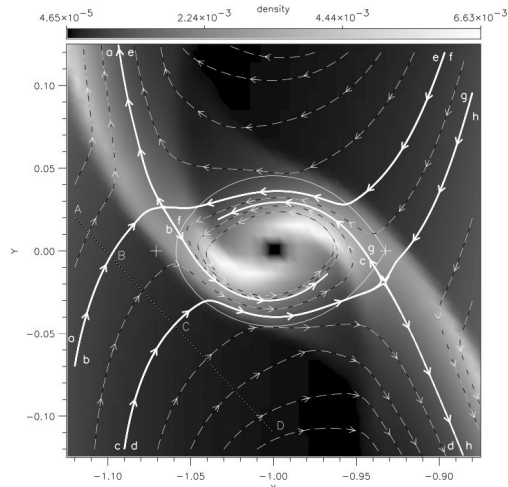


Formação do disco circumplanetário

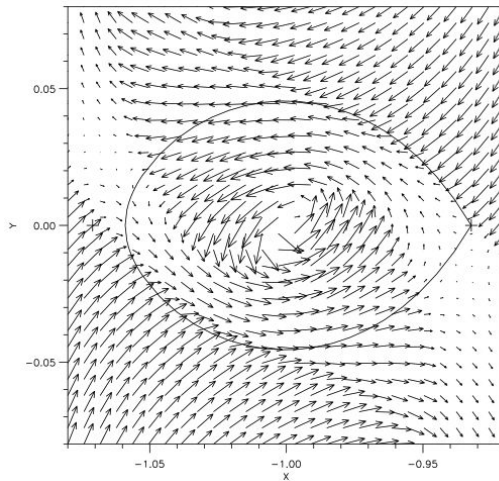


Formação do disco circumplanetário

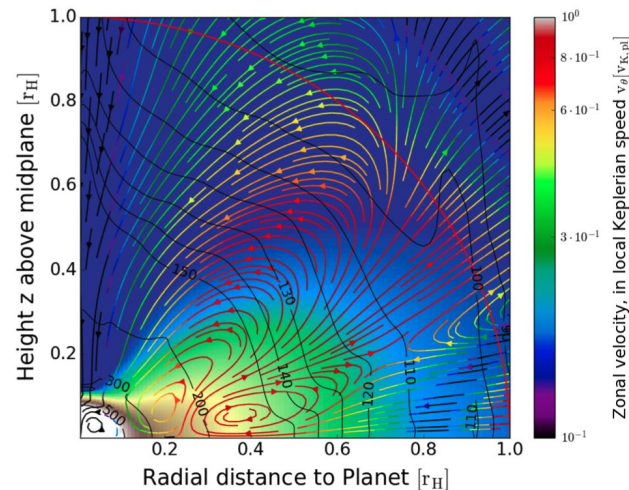
Evolução no plano:



braços espirais



Evolução espacial:

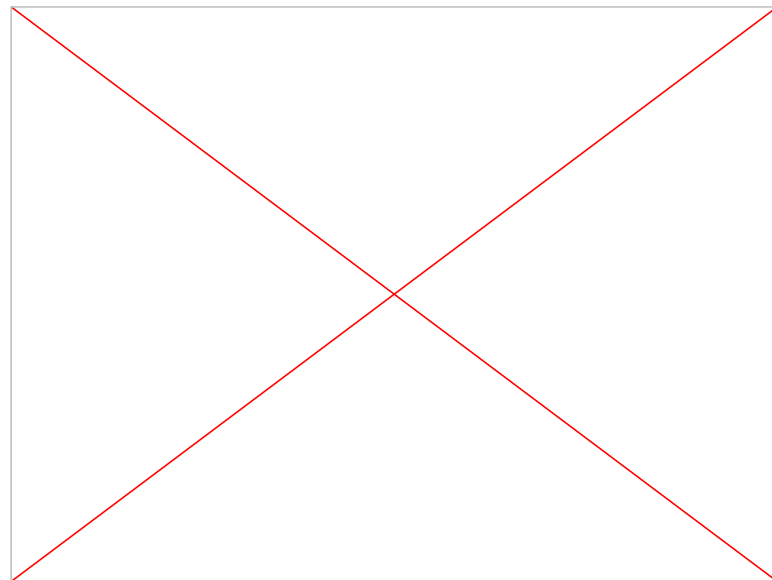


fluxo meridional

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





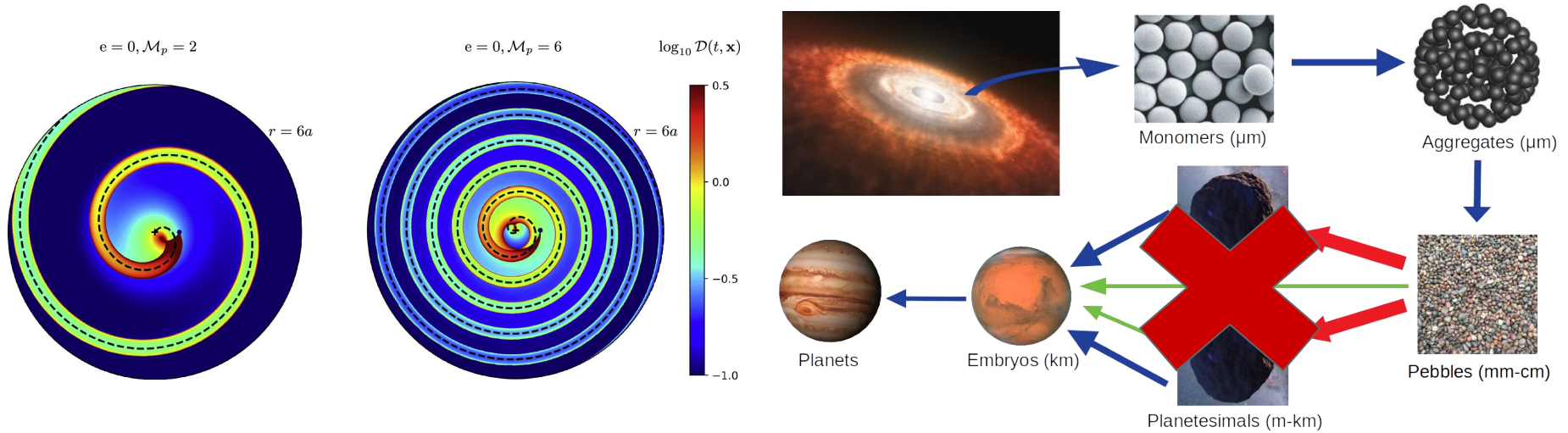
- Satélites com razão de massa em relação a Júpiter comparável à de Netuno com o Sol
- Satélites essencialmente rochosos em órbitas de baixa excentricidade e inclinação
- Io, Europa, Ganymedes se encontram em ressonância Laplaciana

- 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 satelitesimais

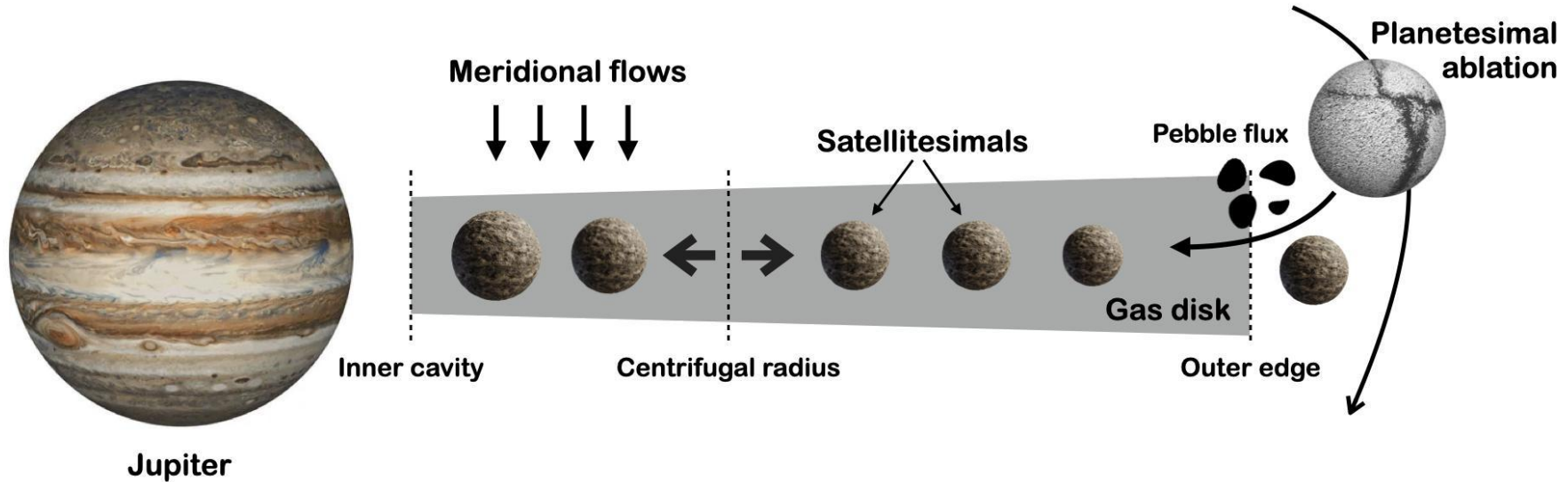
- O arrasto do gás no disco faz as órbitas dos sólidos espiralar rapidamente



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

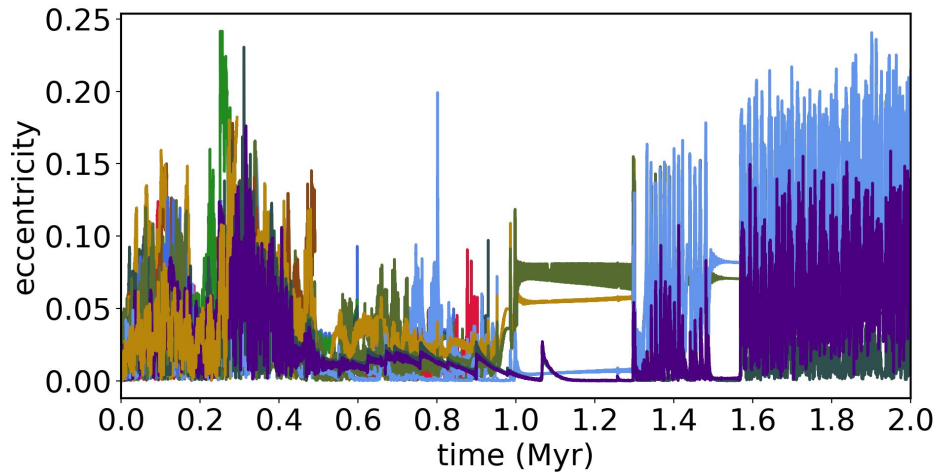
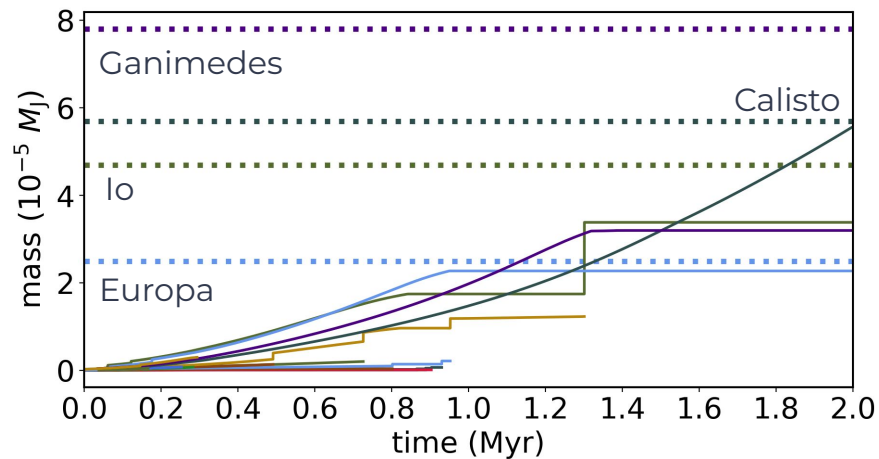
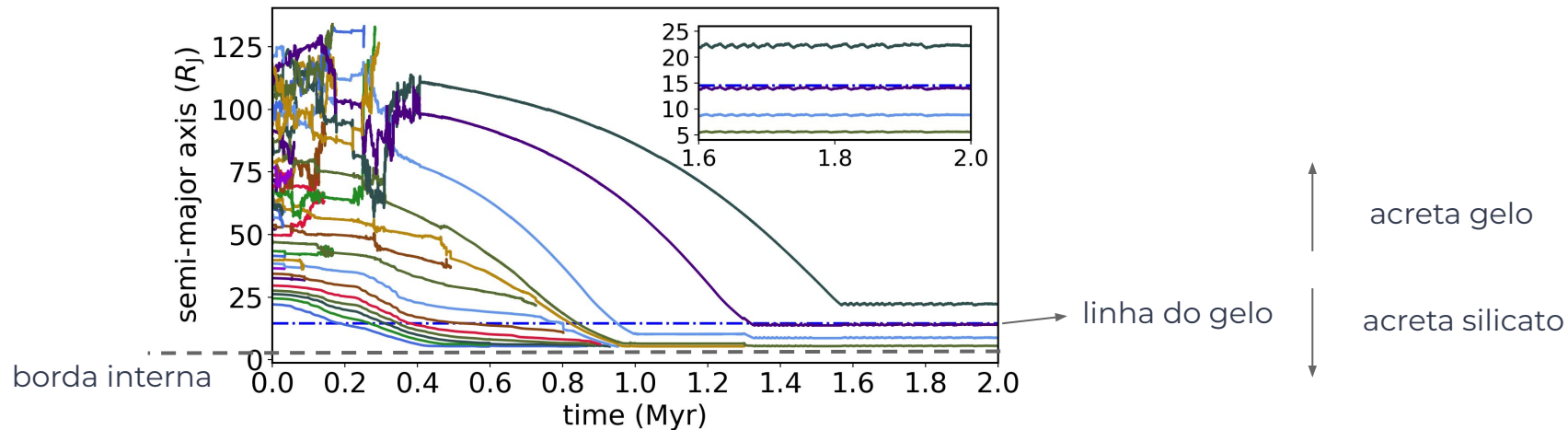
O modelo de Madeira et al. 2021

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

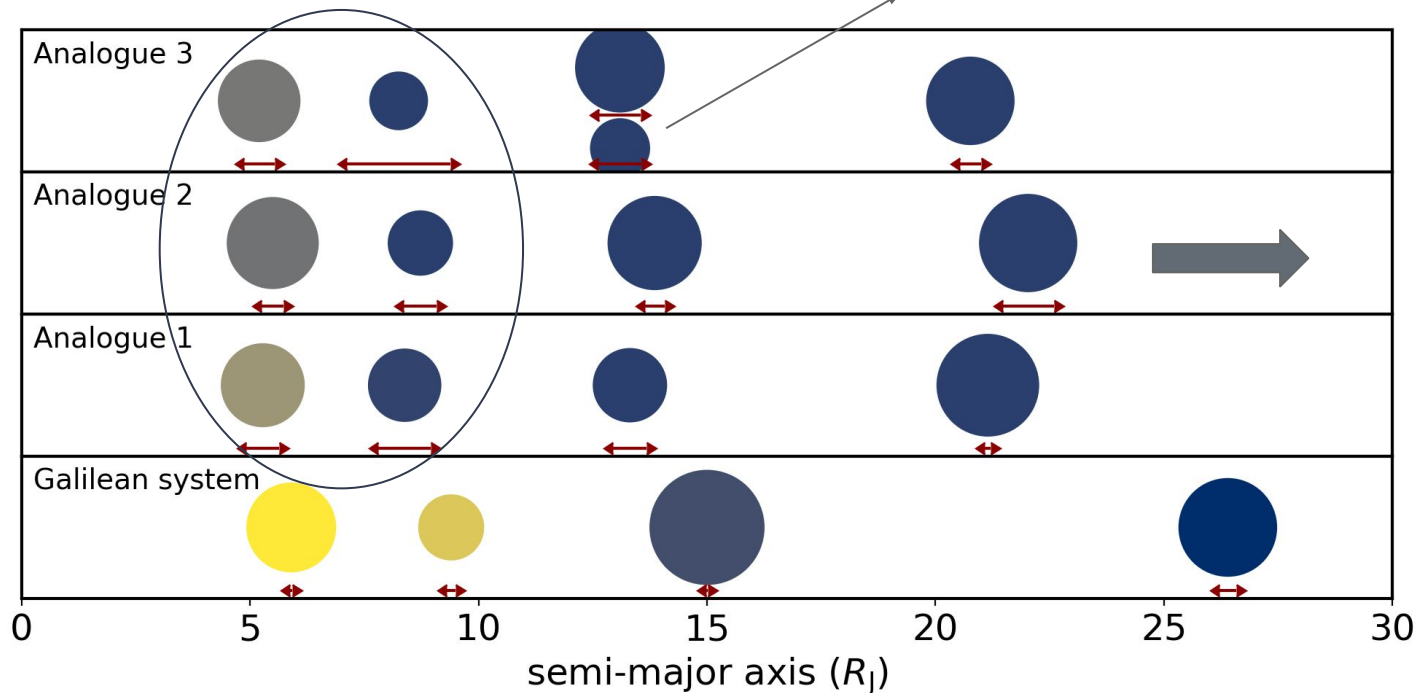
Formação do sistema Galileano



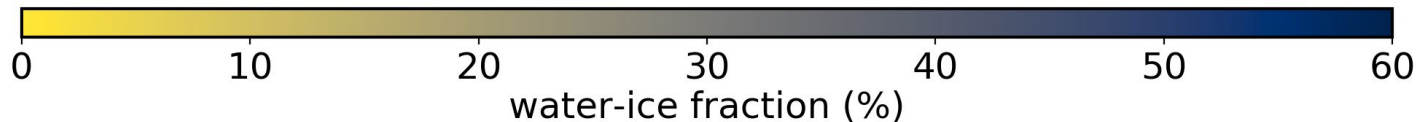
Predições sobre o sistema Galileano

Io e Europa passaram por perda de água devido escape hidrodinâmico

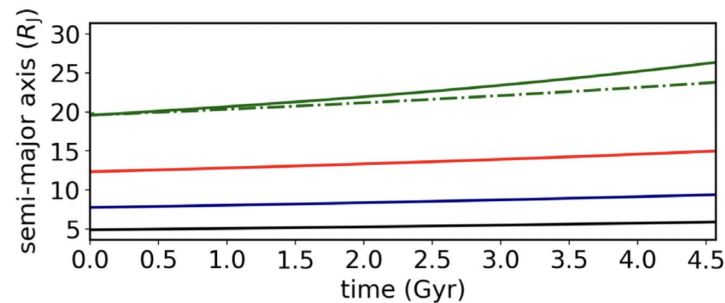
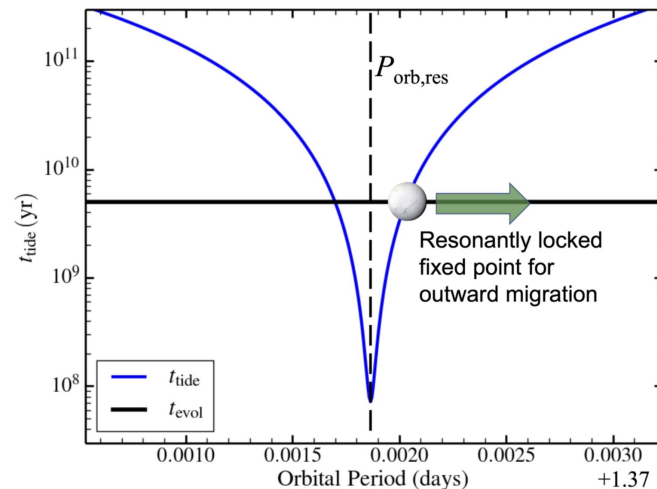
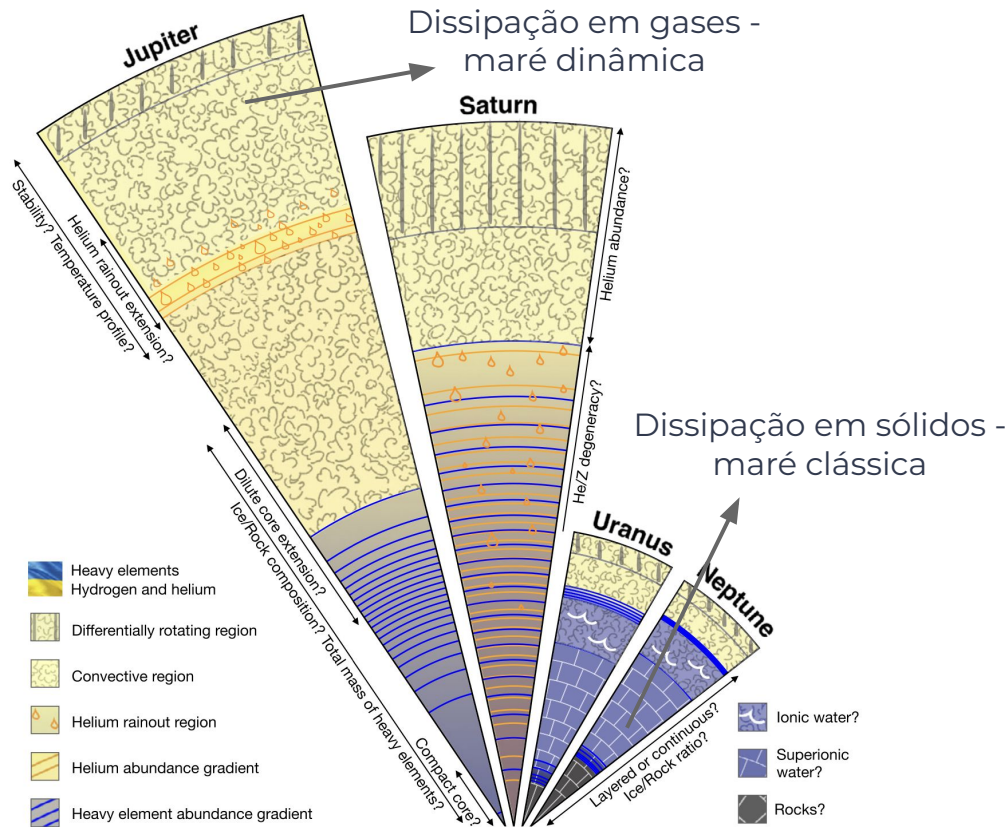
A massa anormalamente grande de Calisto foi originada do impacto de dois satélites coorbitais



Calisto se formou na corrente ressonante



Evolução do sistema Galileano

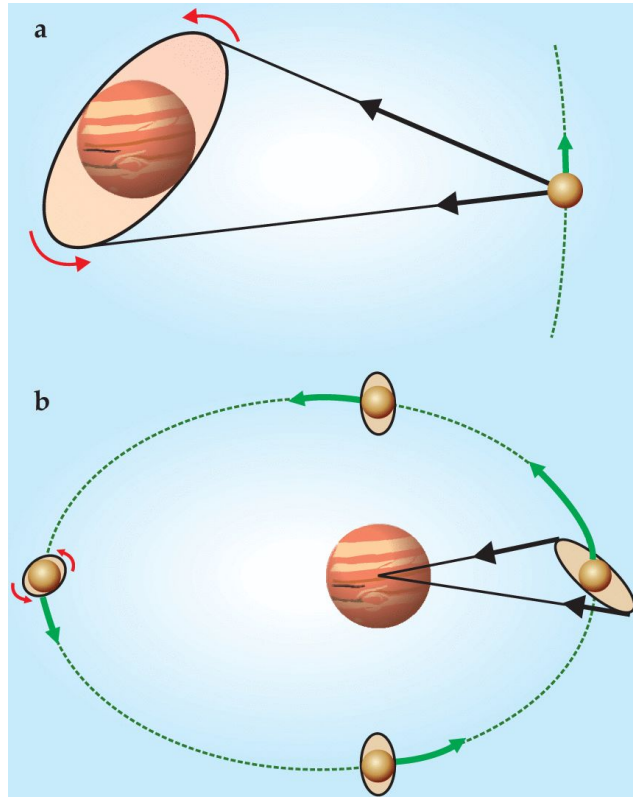


Construindo um anel denso/disco de sólidos

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

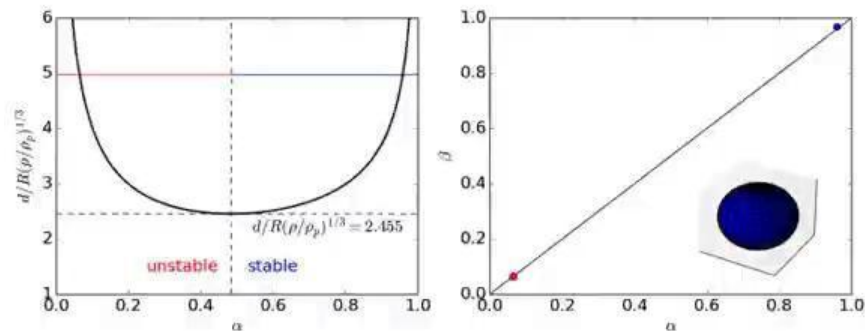


- A indução do bojo no satélite produz dissipação de energia, responsável por aumentar sua temperatura, amortecer a excentricidade e distorcer sua forma

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 restauradores (auto-gravidade) e as forças distorcivas (rotação e maré planetária).

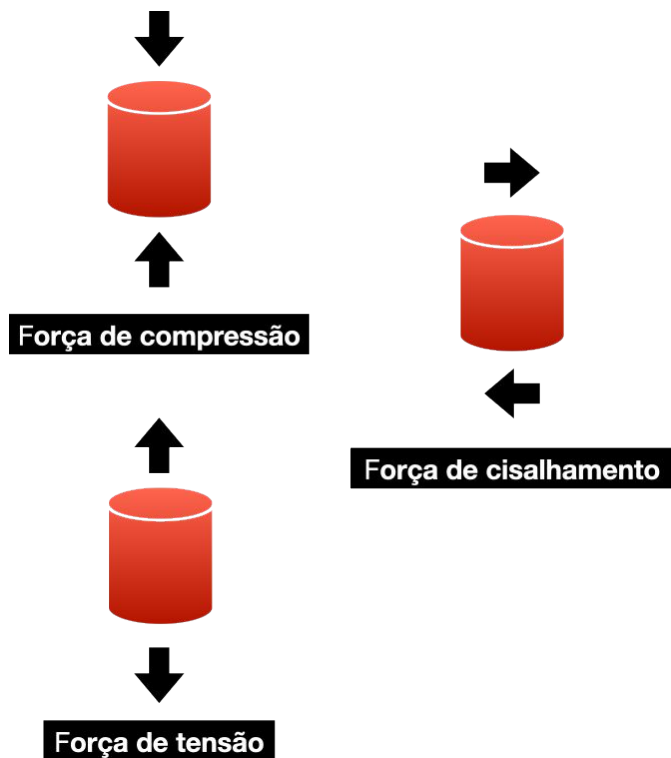


Limite fluído de Roche:

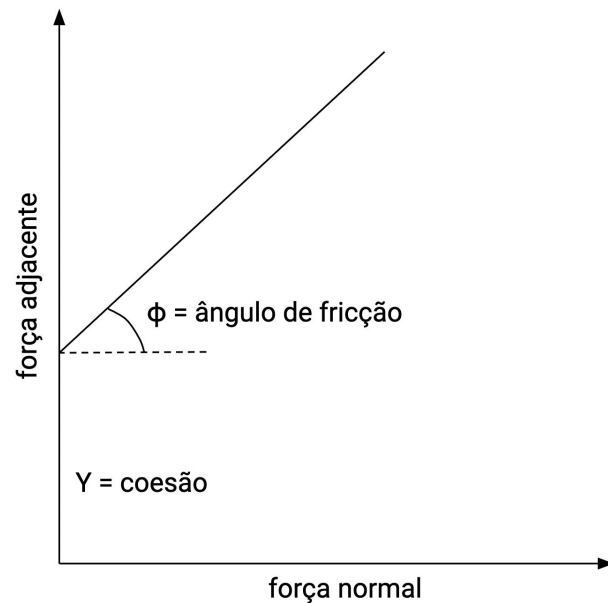
- Distância a partir da qual o satélite não pode suportar as forças das marés, se rompendo.
- Um anel fluído dentro de tal limite não pode ser agregar, uma vez que o corpo resultante não pode alcançar o equilíbrio

E para um satélite mais realista?

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

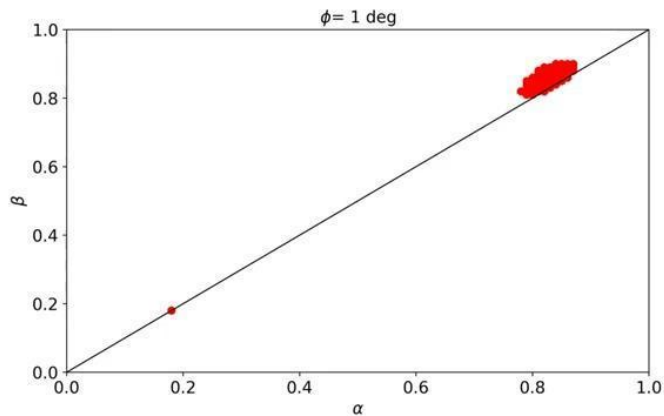


Crítério de Drucker-Prager:

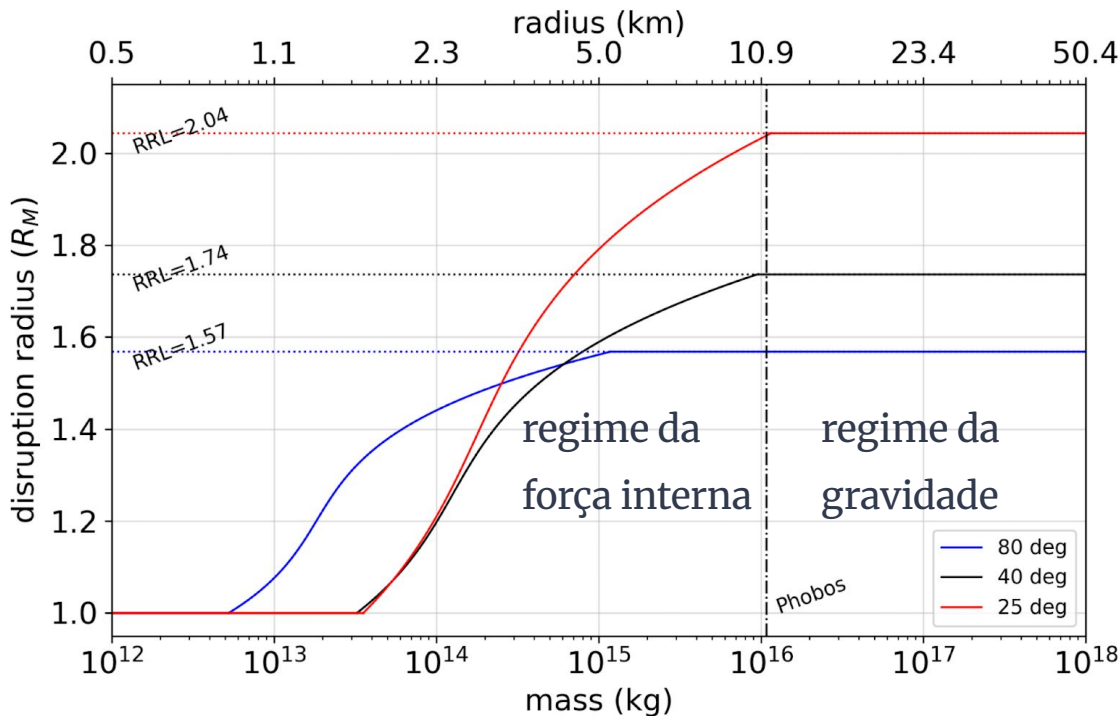


E para um satélite mais realista?

- 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

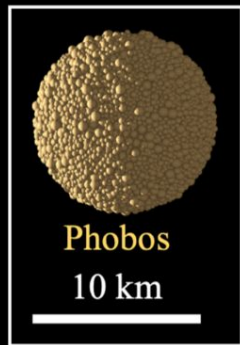




Mars

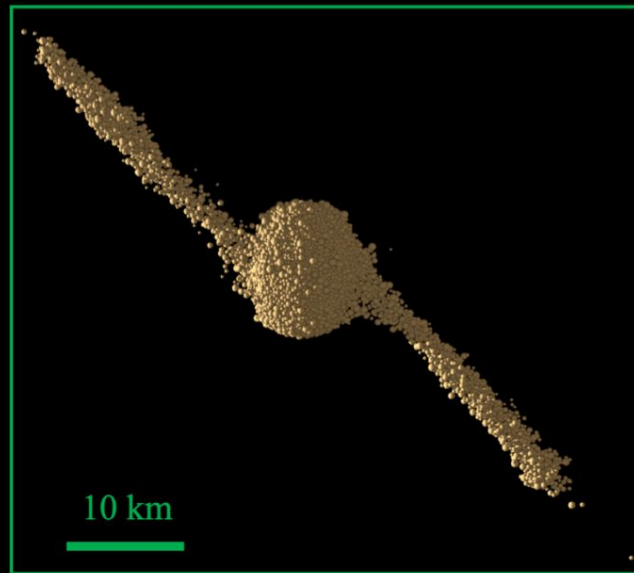
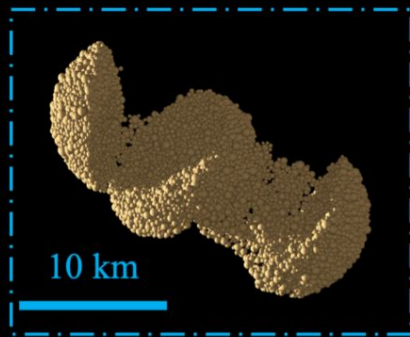
$t = 0$ h
 $a = 1.76 R_M$
 $e = 0.0151$
 $f = 180^\circ$
 $r = 1.79 R_M$

Homogeneous
cohesion

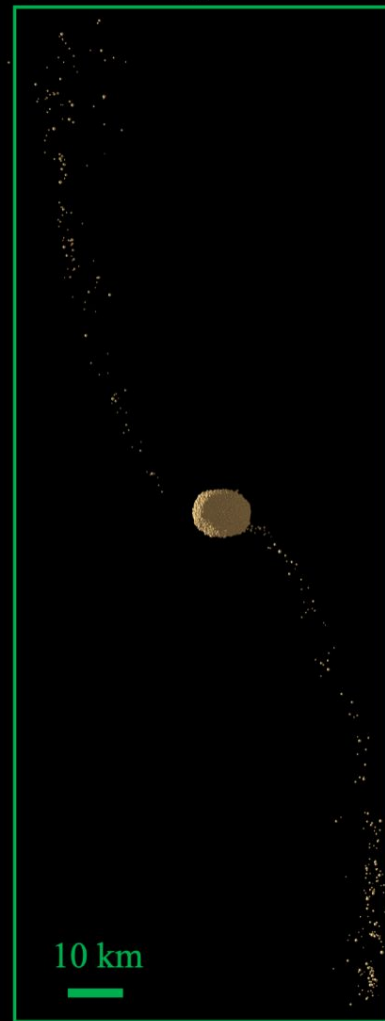
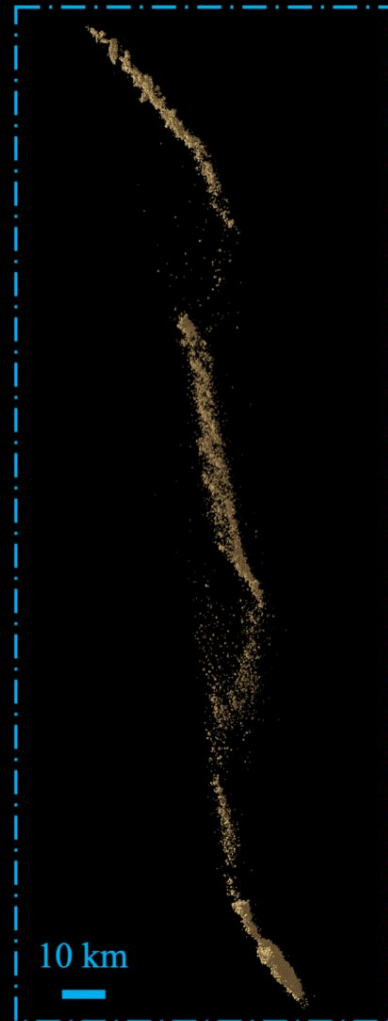


Heterogeneous
cohesion

$t = 1.4$ h, $f = 308^\circ$, $r = 1.74 R_M$



$t = 3.6$ h, $f = 157^\circ$, $r = 1.78 R_M$



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:

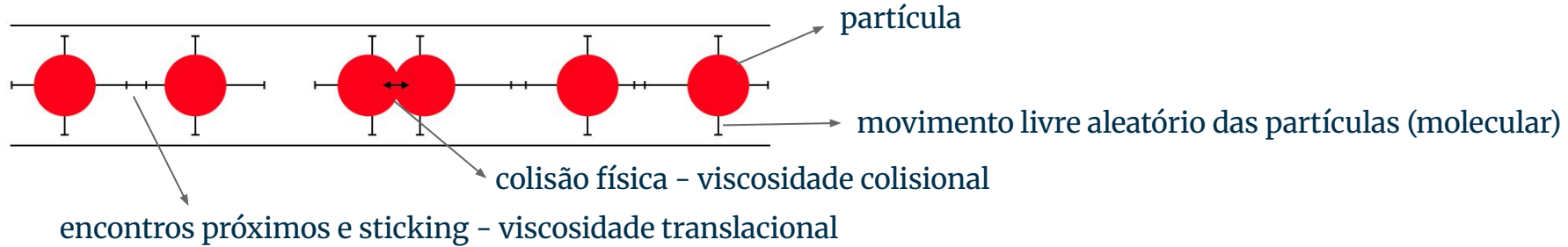


- Gás formado no impacto, expande e condensa, formando partículas que se depositam no plano do equador devido a impactos.

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:

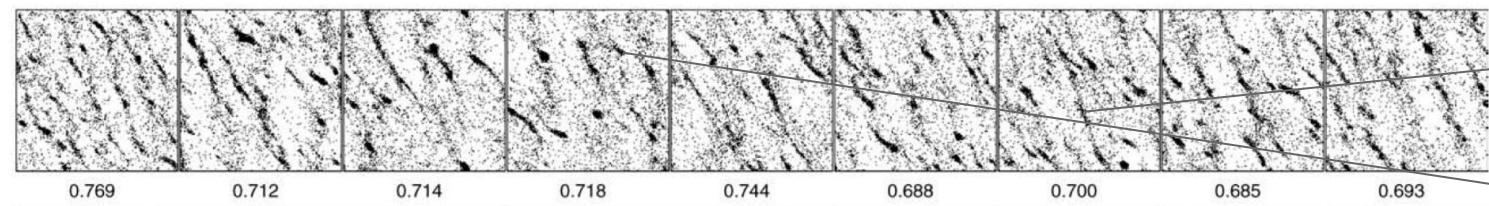
$$Q = \frac{c_r \Omega}{3.36 G \Sigma}$$

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

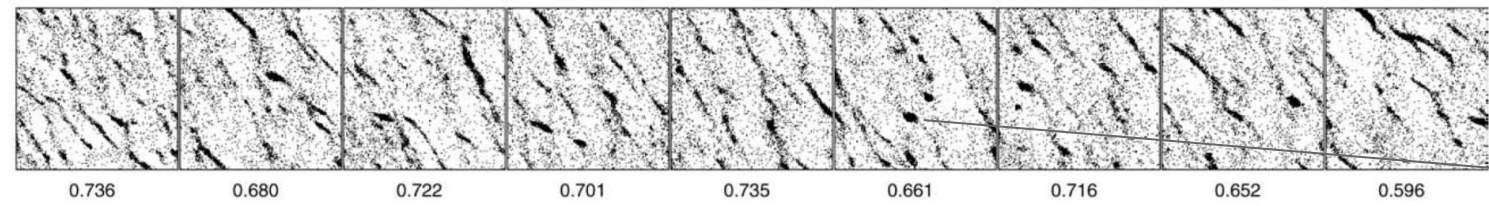
$T = 2$ $T = 4$ $T = 6$ $T = 8$ $T = 10$ $T = 20$ $T = 30$ $T = 40$ $T = 50$

tempo →

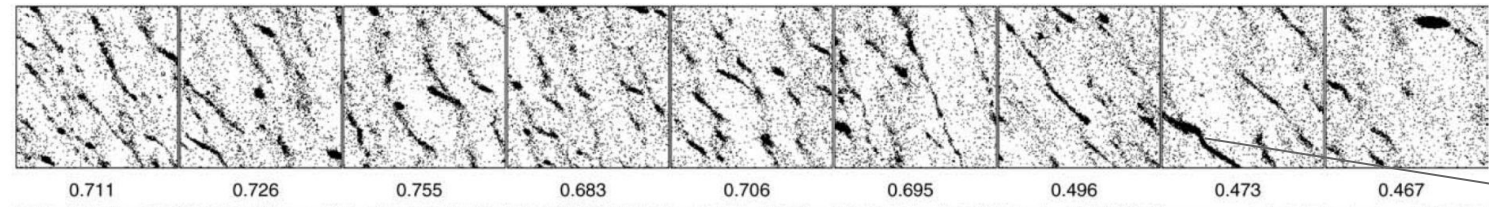
$r_p = 0.937$
 $a = 130,000$



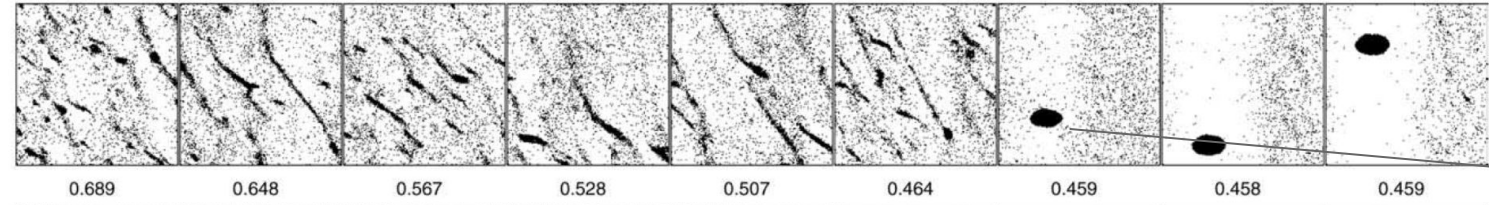
$r_p = 0.903$
 $a = 135,000$



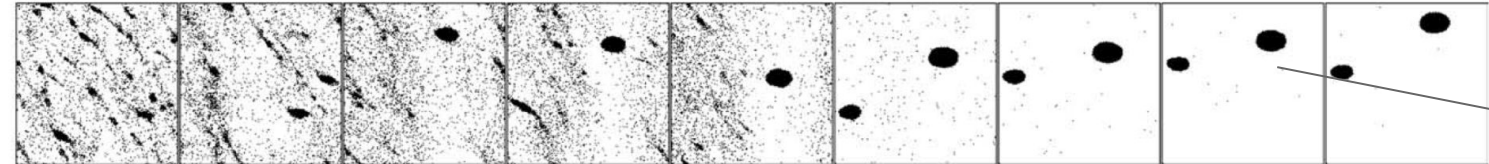
$r_p = 0.870$
 $a = 140,000$



$r_p = 0.858$
 $a = 142,000$



$r_p = 0.840$
 $a = 145,000$

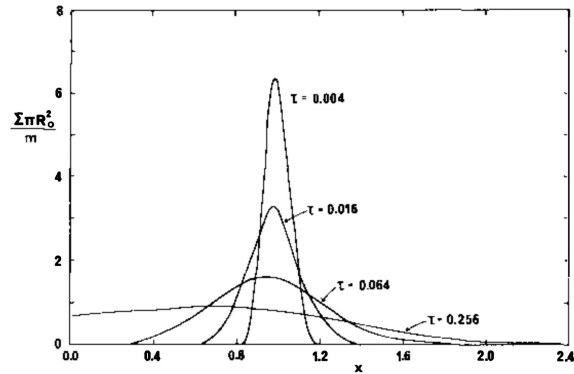


↓ distância

O efeito da viscosidade

- A interação entre as partículas acarreta:

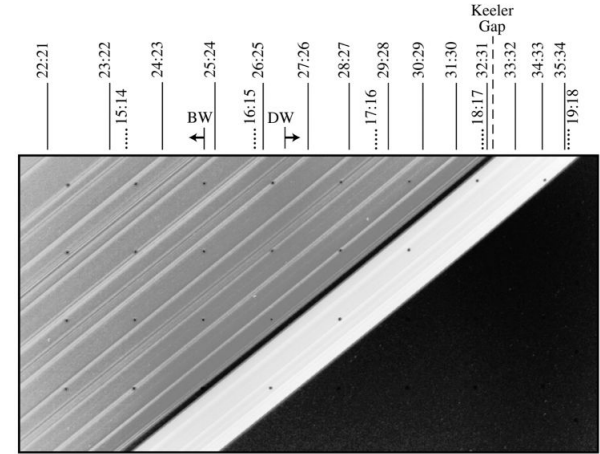
- acreção e coagulação
- espalhamento radial do disco



Anel

- A interação entre partículas e satélites:

- migração dos satélites
- confinamento do disco



Murray & Dermott 1999

2:1 MMR com o anel

1.59 x anel

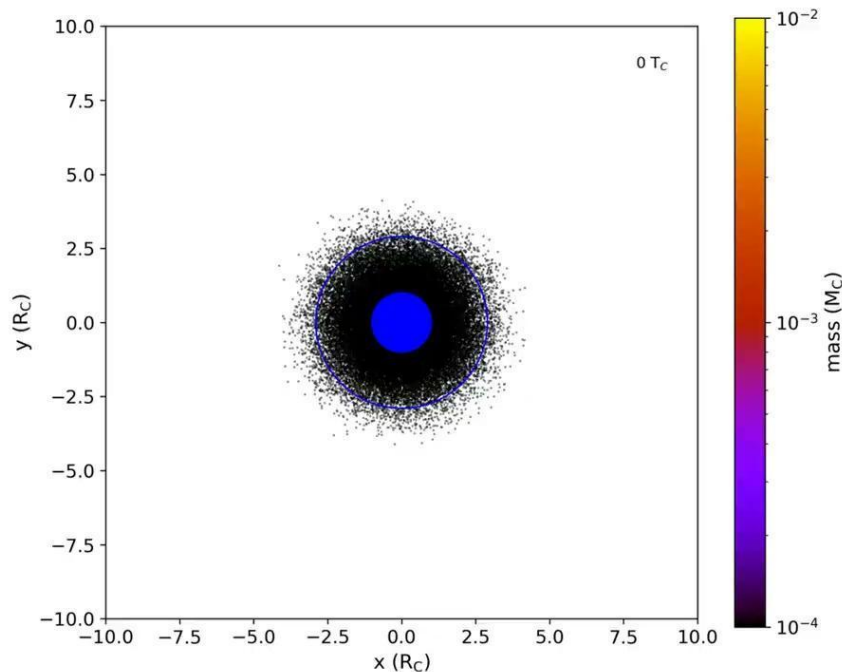
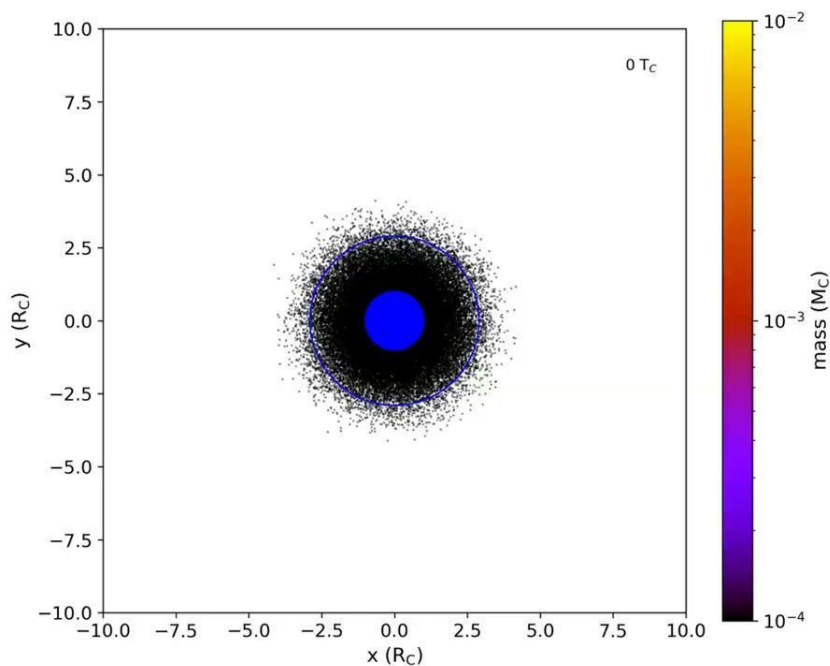
Migração devido apenas maré

Migração devido anel e maré

Ressonâncias de Lindblad

Acreção em um disco massivo

Madeira et al. 2025b:



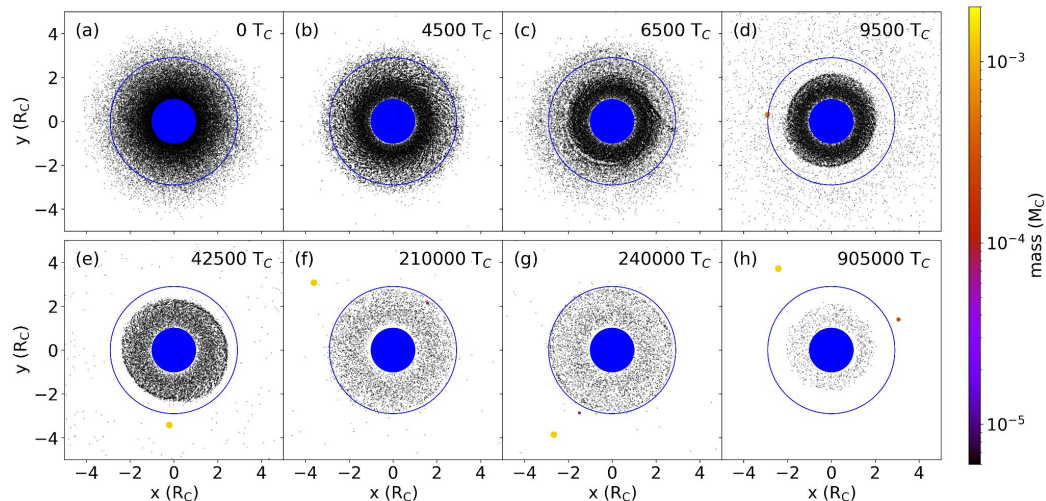
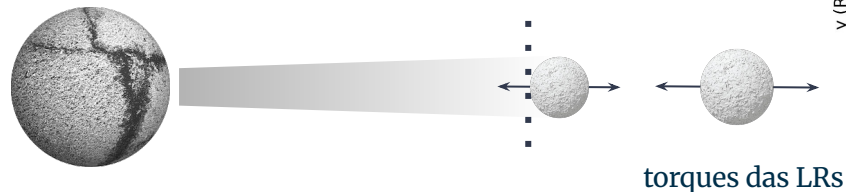
A formação em discos é de modo geral caótica, uma vez que depende da interação mútua entre as partículas.

Padrões de formação

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



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



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

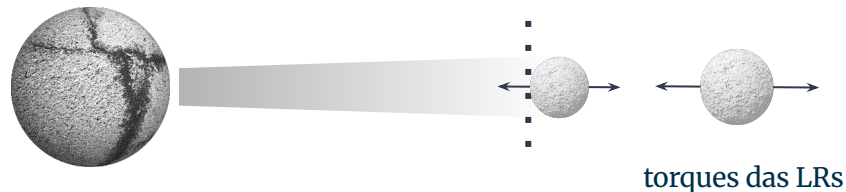
$$M_{\text{l,sat}} = (0.20 \pm 0.16) M_{\text{disk}}^{0.98 \pm 0.16}$$

Padrões de formação

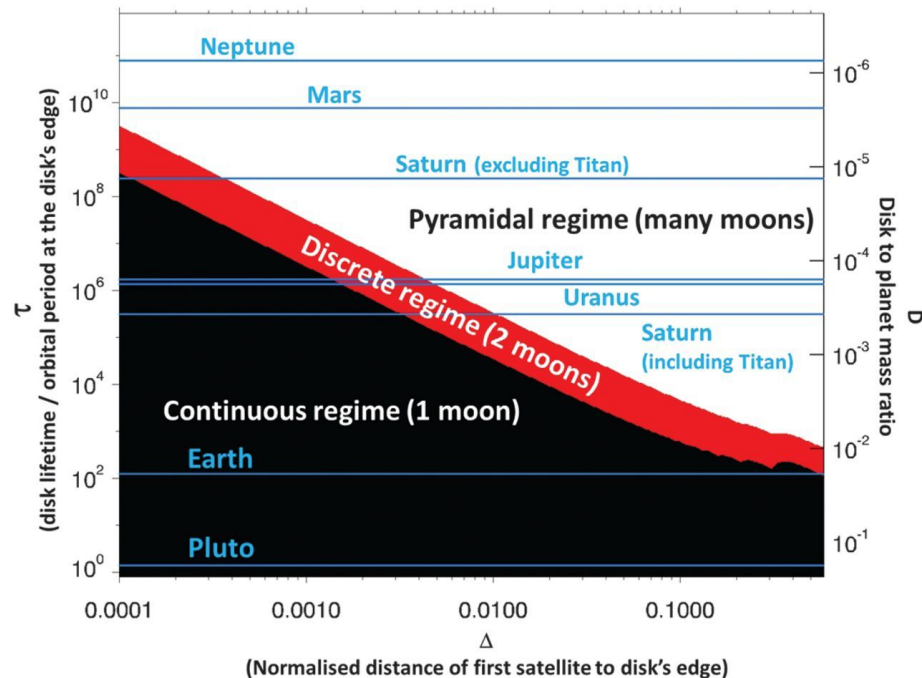
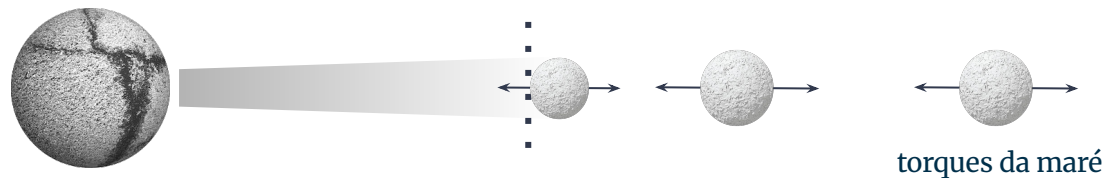
$M_{\text{disk}} > 0.05 M_C$ - regime contínuo



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



$M_{\text{disk}} \lesssim 0.003 M_C$ - regime piramidal

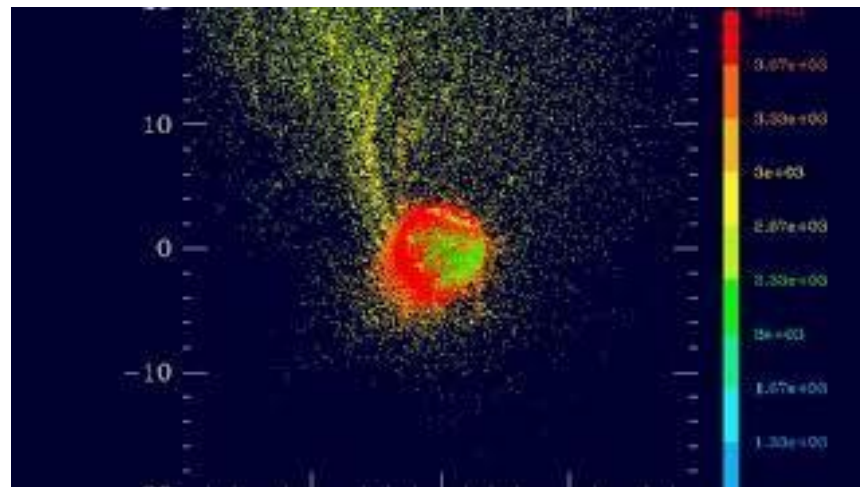
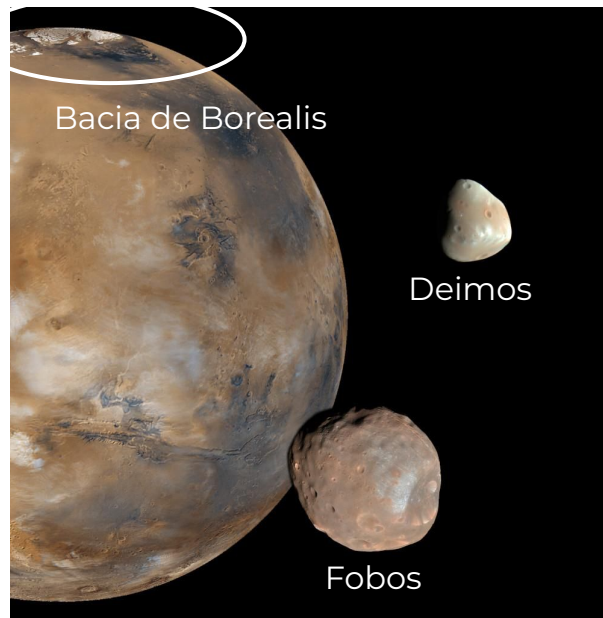


Construindo e destruindo o satélite Fobos de Marte



O sistema marciano

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

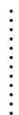


massa do disco = 100,000 massas de Fobos
massa do satélite = 20,000 massas de Fobos



Marte

RRL



FRL



Phobos

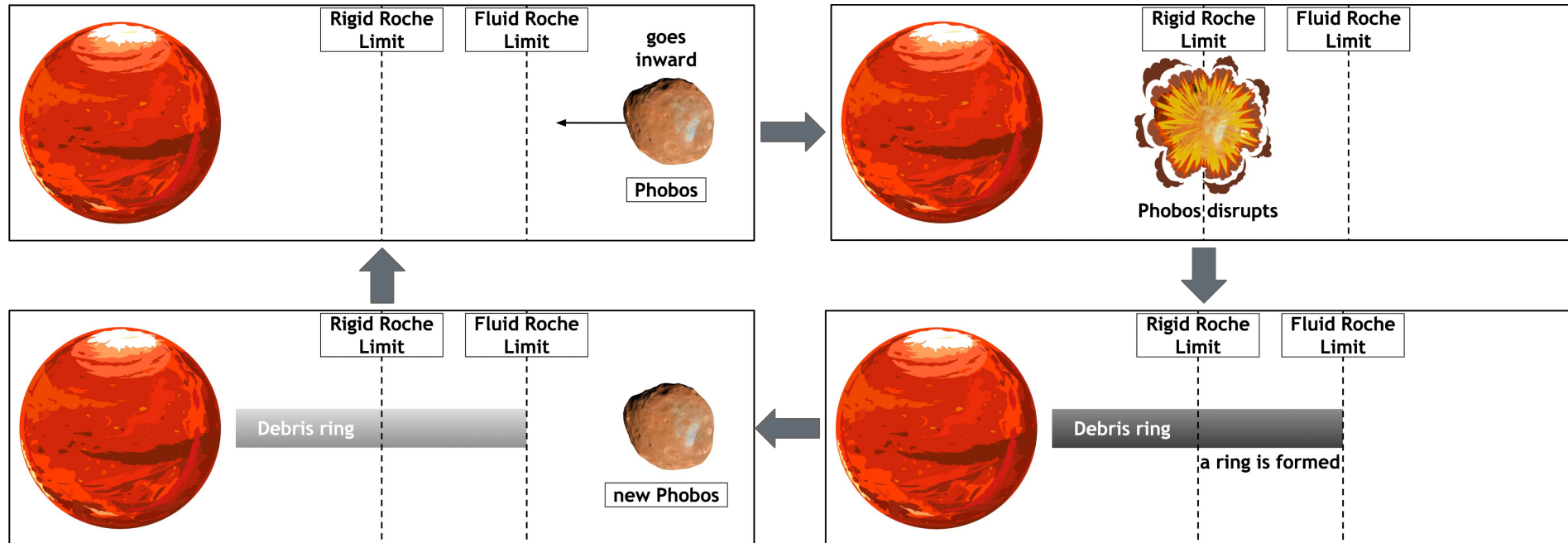
a_{syn}



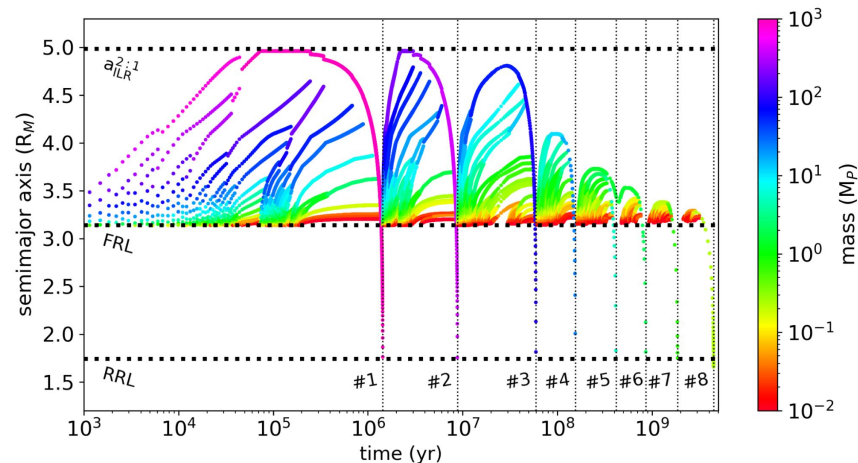
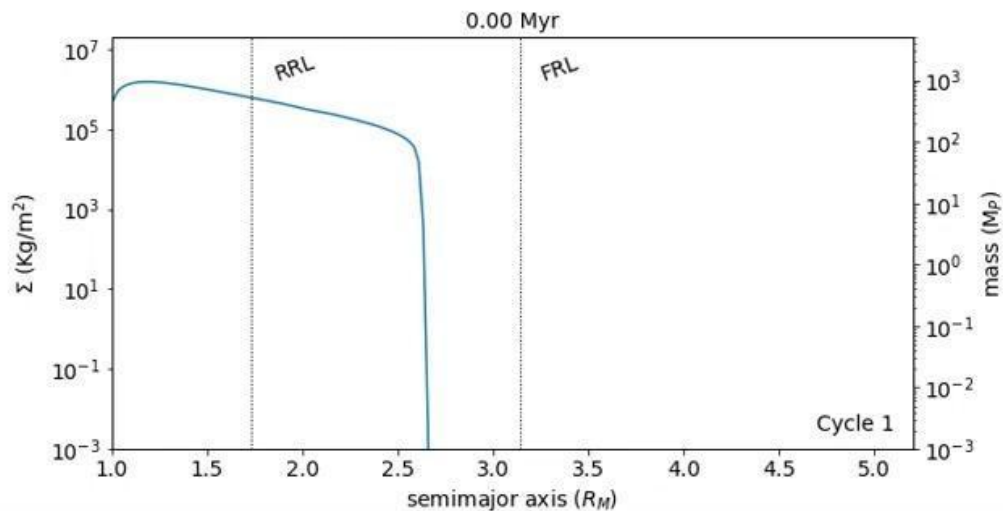
Deimos

Modelo de reciclagem

impacto gigante ↙
↘ Deimos
disco de sólidos → um Fobos



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

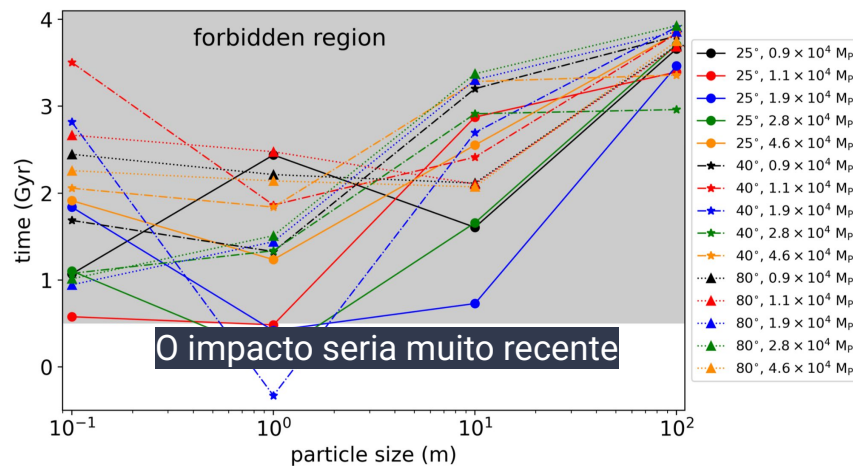
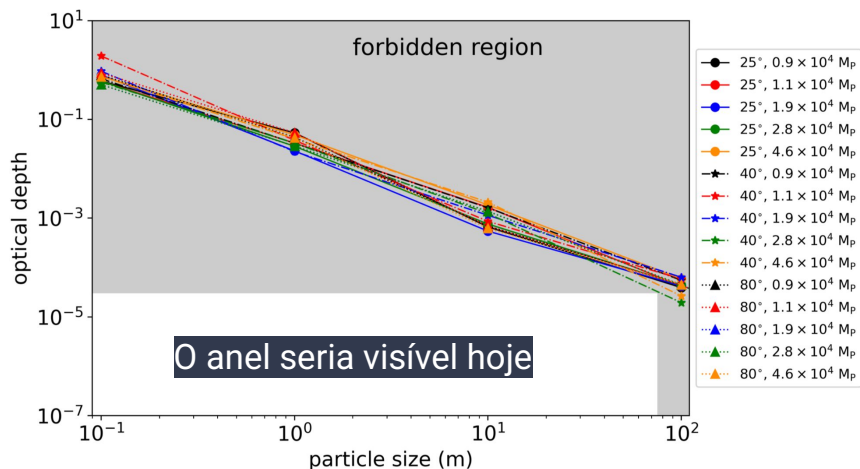


Fobos é formado em 1.8 Gyr, após 6 ciclos...no entanto um anel denso também é obtido

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