

# O EFEITO DE MARÉ

Adrián Rodríguez Colucci  
Observatório do Valongo  
UFRJ

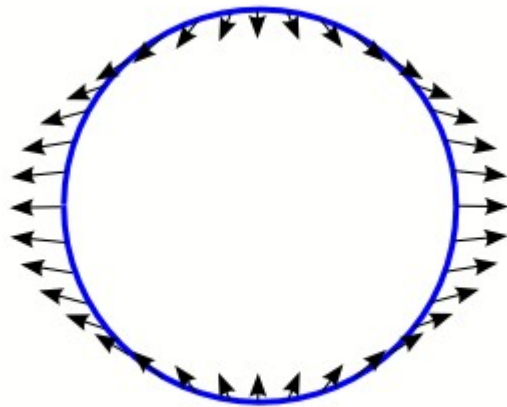


Paraty – RJ

# FORÇA DE MARÉ

A força de maré é um efeito secundário da força gravitacional de atração entre corpos massivos não pontuais.

Corpos com extensão  $\rightarrow$  massa externa atrai com força diferencial as distintas partes do corpo, provocando deformação e a consequente aparição de marés altas e baixas.



● m

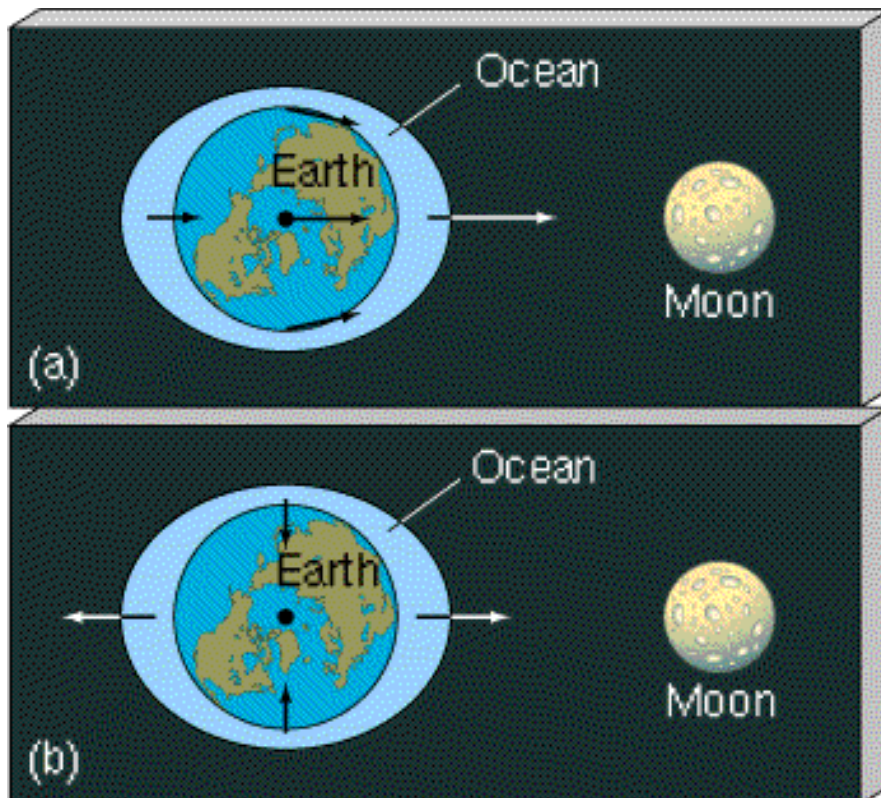
# O SISTEMA TERRA-LUA



# O SISTEMA TERRA-LUA

Terra → objeto rochoso rodeado por manto fluido deformável (oceanos)

Lua → perturbador

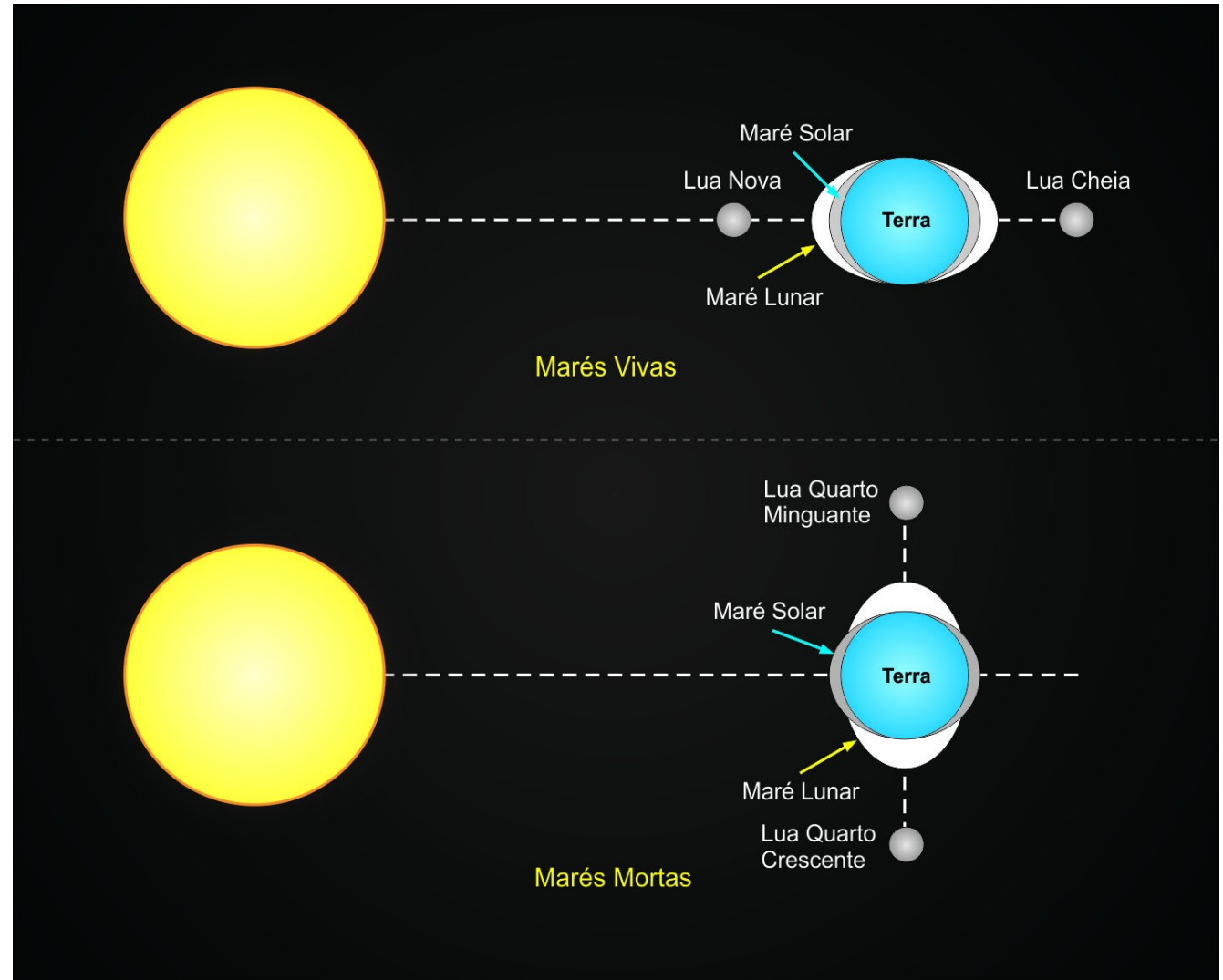


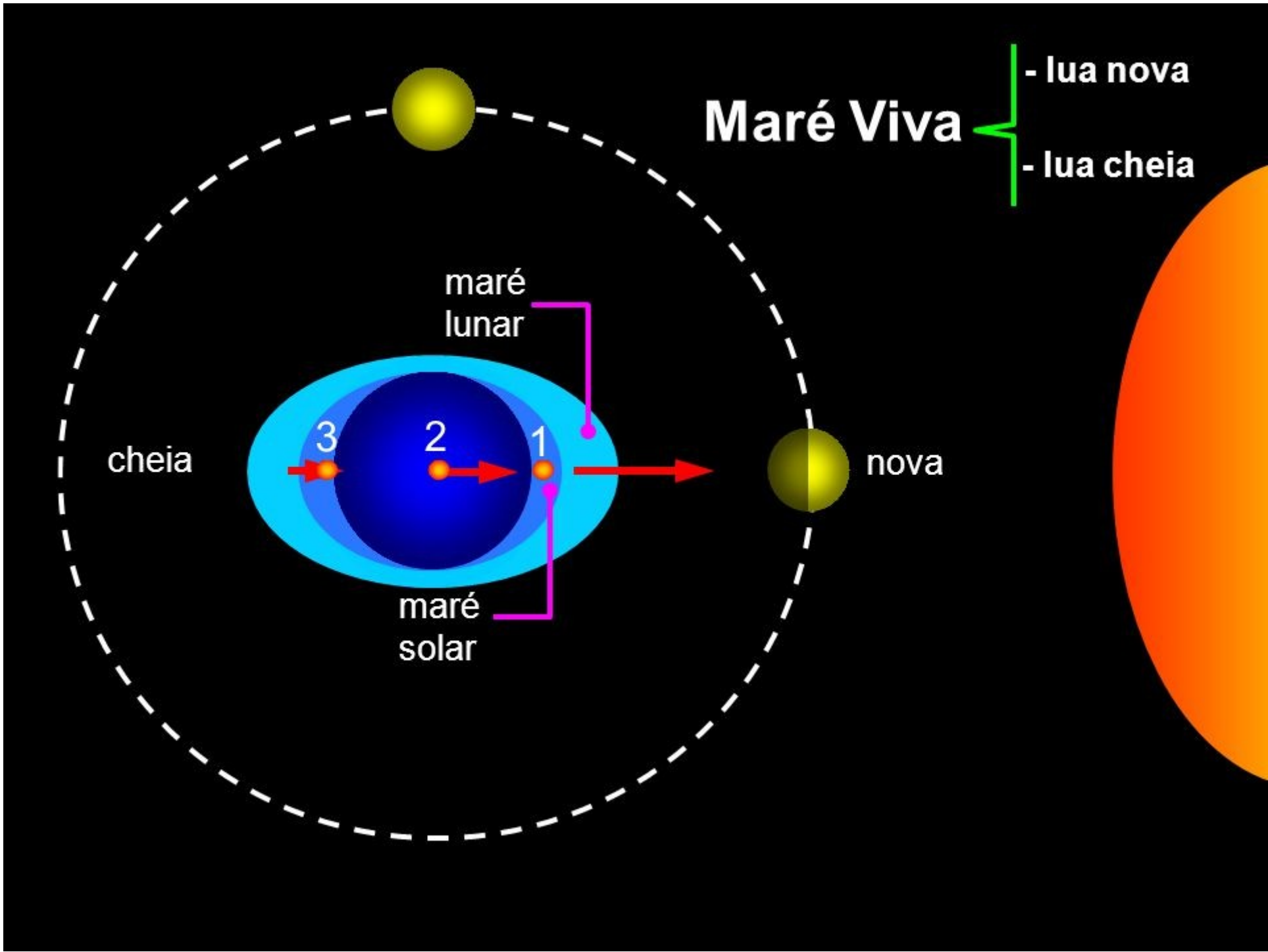
Rotação da Terra → marés alta e baixa aparecem duas vezes por dia → **Marés semi-diurnas**

## Movimento de translação da Lua (fases)

- Sol → Também participa (em menor grau) na deformação

- Marés são maiores quando a Lua está no perigeio e a Terra no periélio (começo de Janeiro)





# Maré Viva

- lua nova
- lua cheia

maré lunar

maré solar

cheia

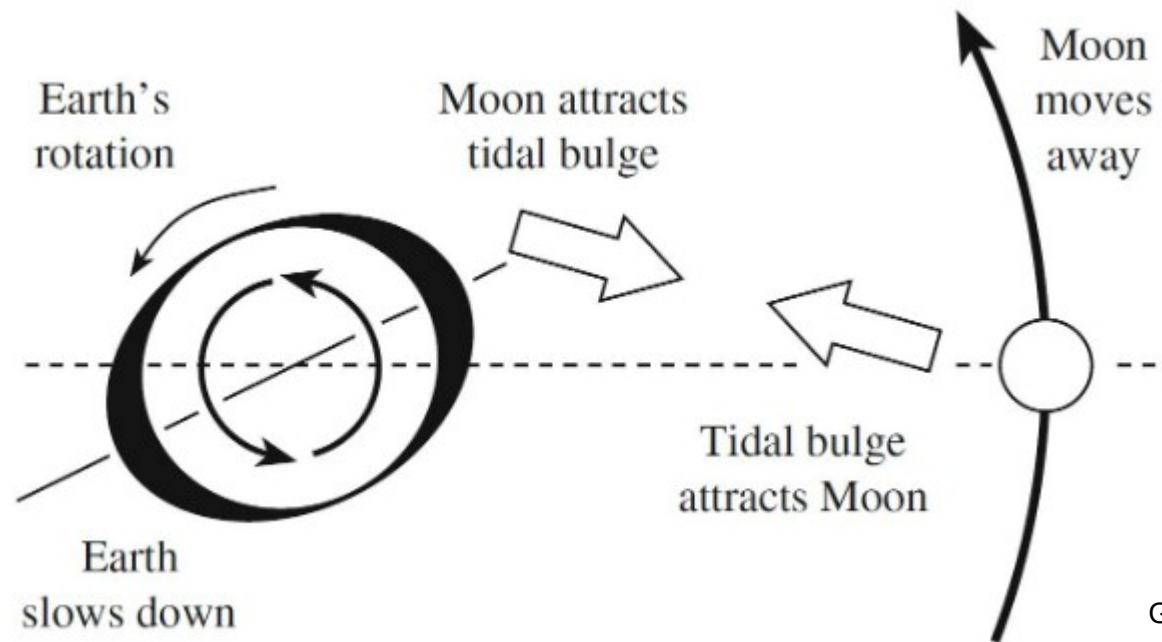
nova

3

2

1

# O ATRASO DA MARÉ

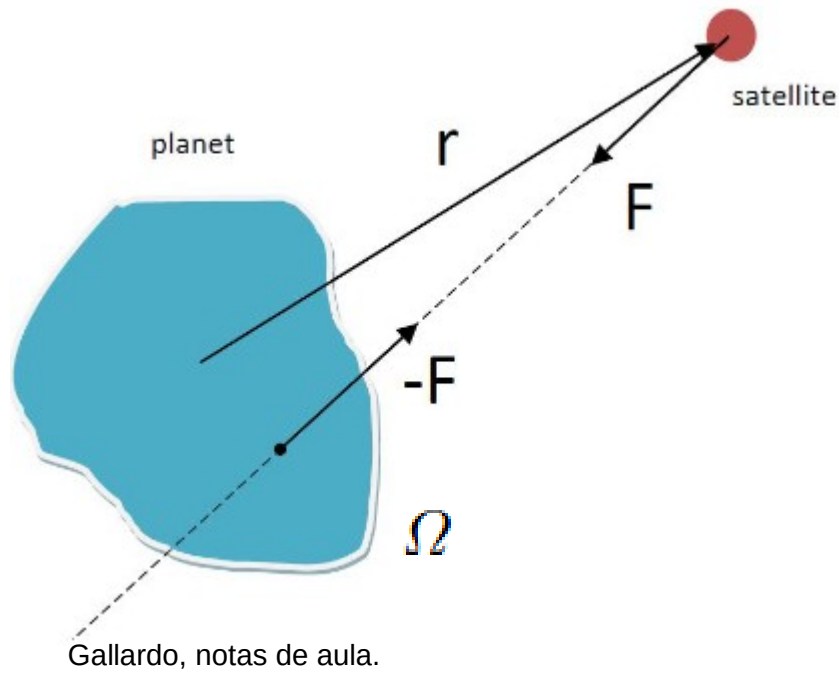


Viscosidade interna introduz uma demora na resposta às forças de maré  
→ atraso na deformação

Aparece um **torque de maré  $T$**  na deformação →

→ Consequências dinâmicas importantes que determinam a futura evolução do sistema.

# TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO ANGULAR



$$\vec{F} = -m\nabla V$$



Força na posição do satélite

$$\vec{\mathcal{M}} = \vec{r} \wedge (-\vec{F}) = \vec{r} \wedge m\nabla V$$



Torque aplicado na rotação  $\Omega$

$$\frac{d\vec{L}_{pla}}{dt} = \vec{\mathcal{M}} \quad \vec{L}_{pla} = I\Omega$$

$$\vec{L}_{pla} + \vec{L}_{orb} = \text{constante} \quad \Delta\vec{L}_{orb} = -\Delta\vec{L}_{pla}$$

**Conservação do momento angular:** ganho (perda) na rotação é compensada pela componente orbital através do **aumento ou decaimento do semi-eixo** do satélite.



1) Diminui ou aumenta a velocidade angular de rotação  $\Omega$   
(sempre que  $2\pi/\Omega = P_{\text{rot}} < P_{\text{orb}}$  ou  $P_{\text{rot}} > P_{\text{orb}}$ )

2) Conservação do momento angular total do sistema  $\rightarrow$

No caso  $P_{\text{rot}} < P_{\text{orb}} \rightarrow \Omega$  decresce  $\rightarrow$  semi-eixo deve aumentar

No caso  $P_{\text{rot}} > P_{\text{orb}} \rightarrow \Omega$  cresce  $\rightarrow$  semi-eixo deve diminuir

No sistema **Terra-Lua** →

Prot (T) = 24 horas

Porb (L) = 27.3 dias



→ A velocidade de rotação da Terra está diminuindo pela ação do torque de maré → **Duração do dia da Terra está aumentando com o tempo (0.002 seg/século)**

Conservação de  $L_{tot}$  → semieixo da Lua aumenta → **Lua se afasta continuamente da Terra (4 cm/ano)**

Quando a evolução da rotação devida ao efeito de maré termina ?

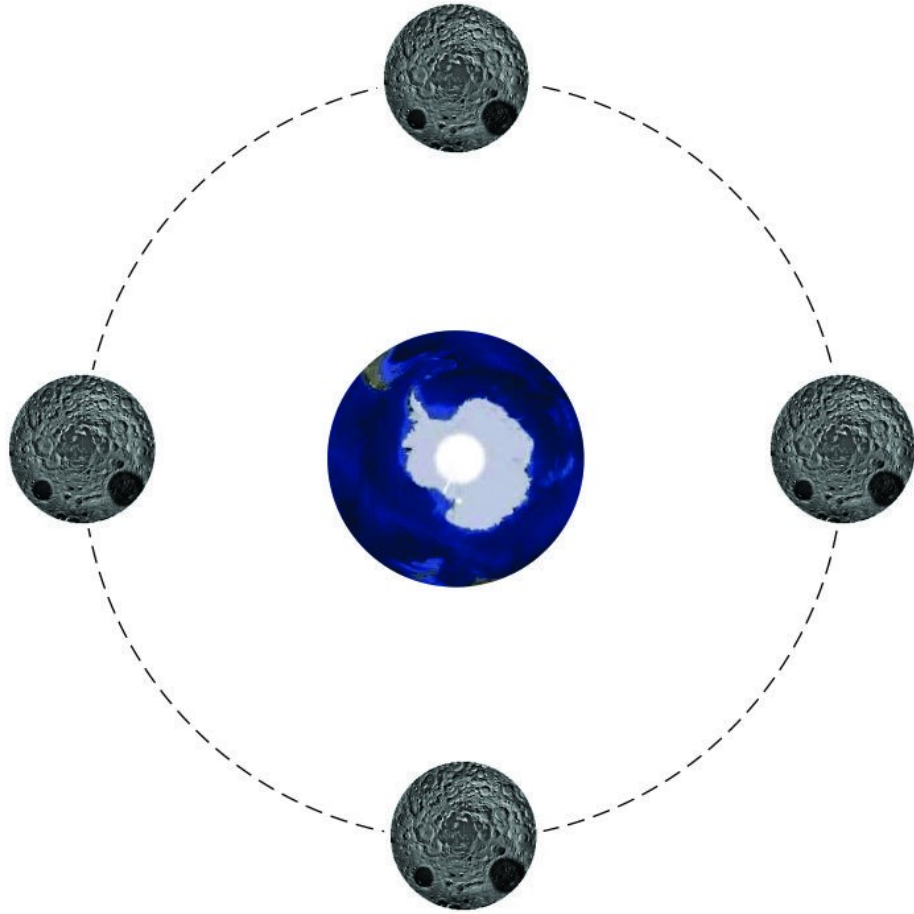
→ Quando o sistema atinge o estado de **sincronismo spin-órbita**:

$$\mathbf{P_{rot} = P_{orb}}$$

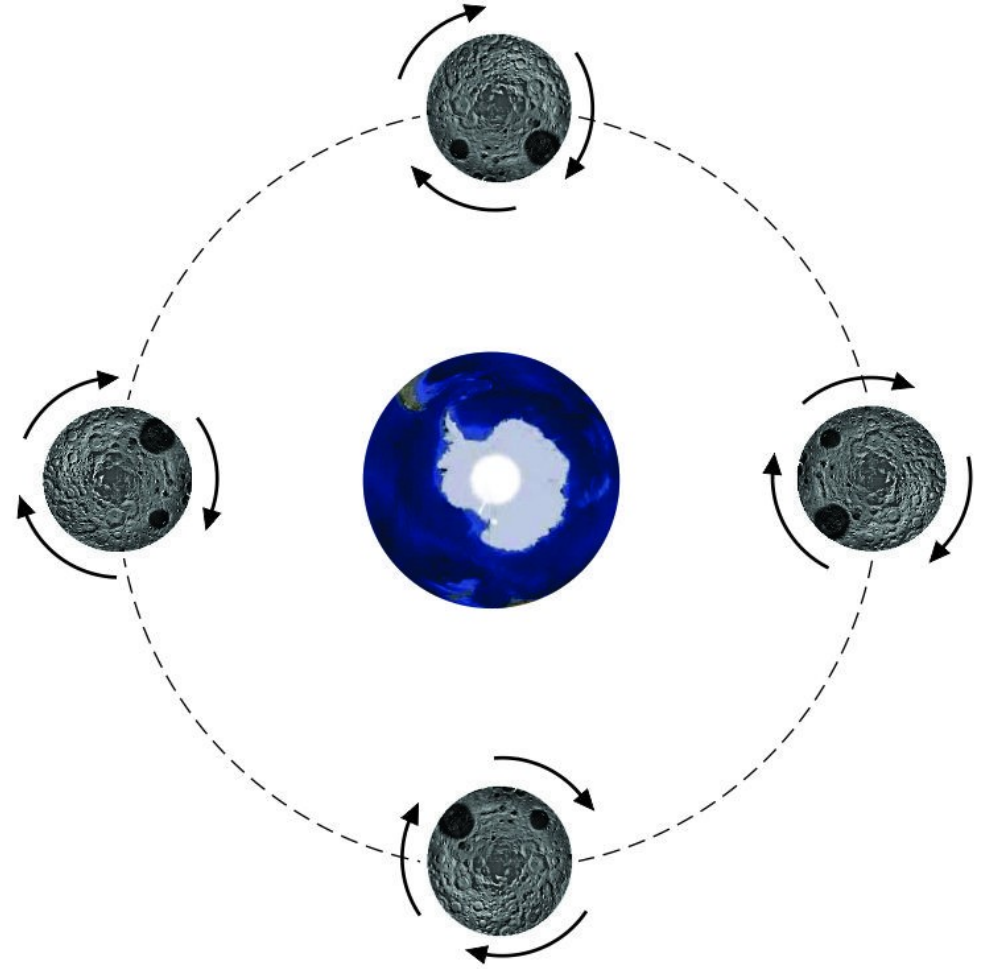
Ou seja, quando o **dia fica igual ao mês** (objeto mostra sempre a mesma face)

**OBS:** Tempos de evolução dependem das massas e raios

# - A Lua já atingiu o seu estado de sincronismo



Sem Rotação

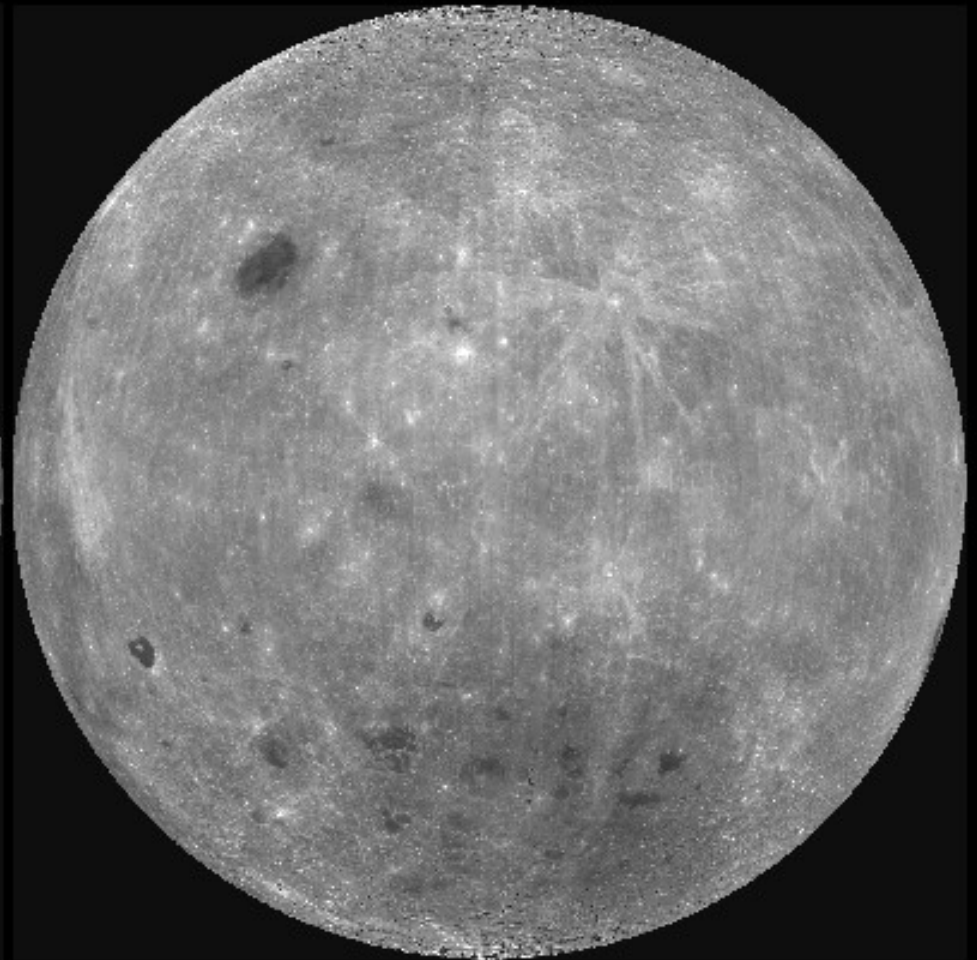


Com rotação sincronizada

# O lado oculto da Lua



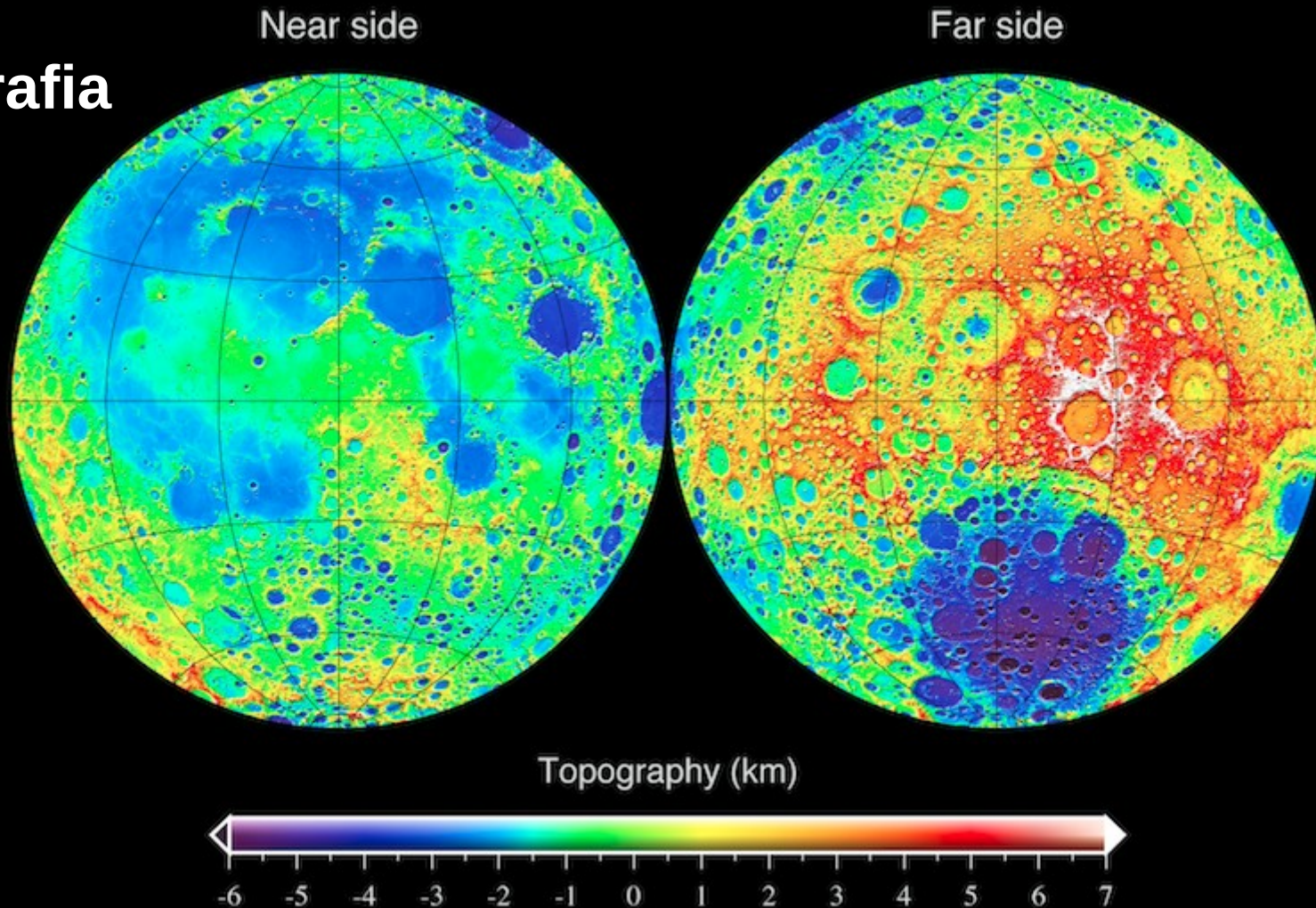
Near Side



Far Side

# Superfície da Lua

## Topografia



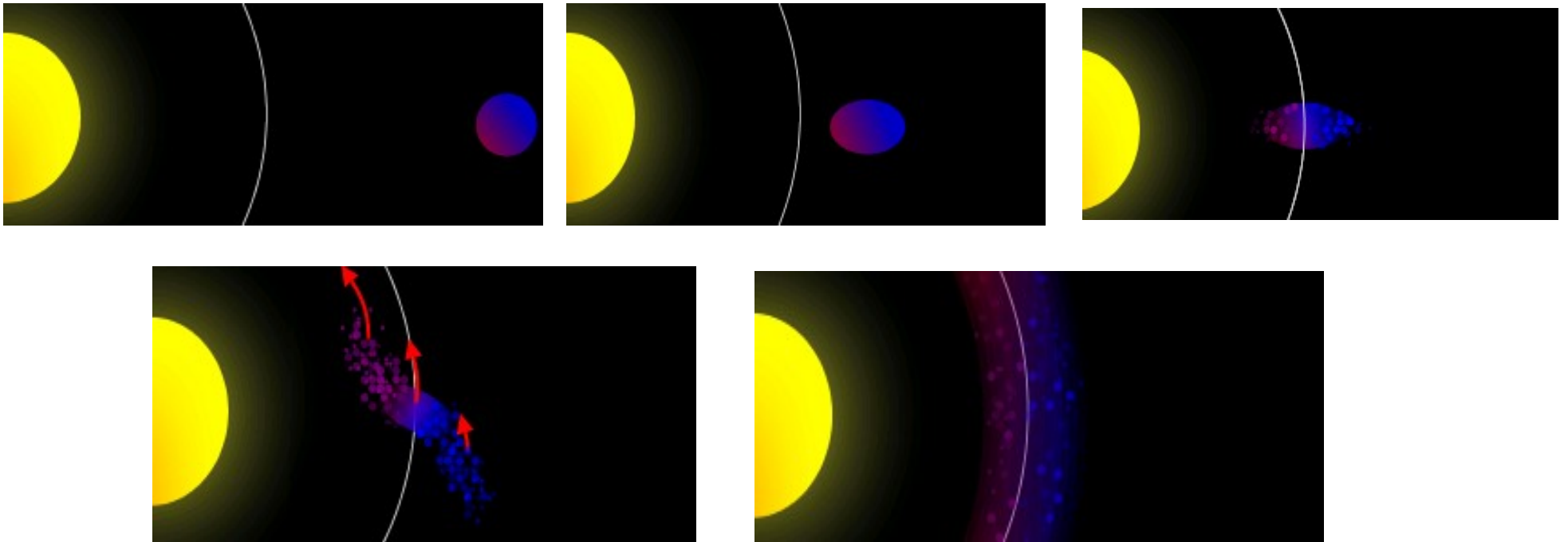
- A face oculta tem, em média, uma altitude 1.9 km maior do que a face visível.

**Plutão e Caronte** atingiram o estado de duplo sincronismo, em que ambos períodos de rotação coincidem com o período orbital (6.4 d)



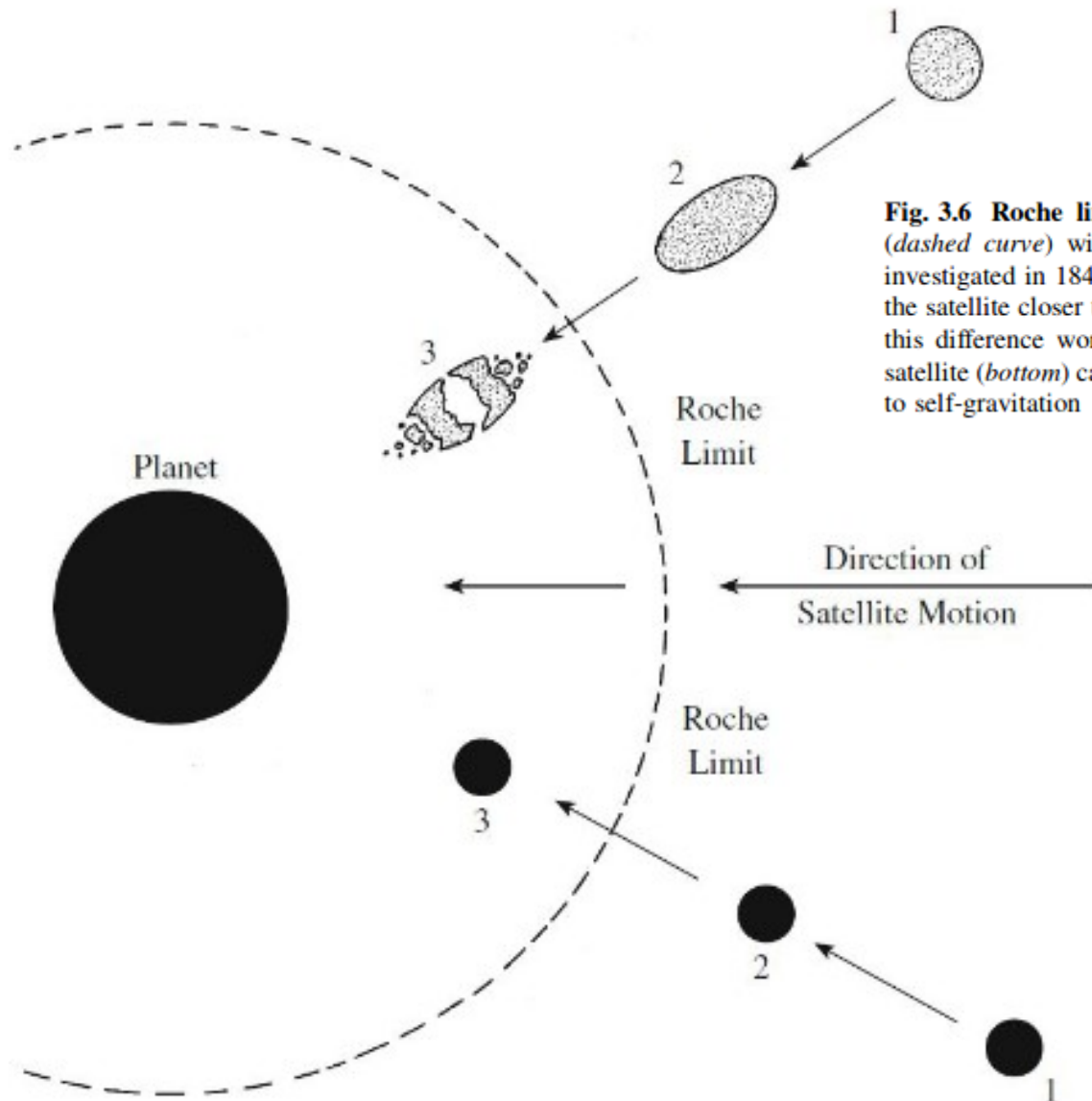
# O LIMITE DE ROCHE

Distância máxima para a qual um objeto pode se aproximar de um outro sem ser destruído pela ação da maré





# O LIMITE DE ROCHE



**Fig. 3.6 Roche limit** A large satellite (*top*) that moves well within a planet's Roche limit (*dashed curve*) will be torn apart by the tidal force of the planet's gravity. This was first investigated in 1849 by the French mathematician Édouard A. Roche (1820–1883). The side of the satellite closer to the planet feels a stronger gravitational pull than the side farther away, and this difference works against the self-gravitation that holds the body together. A small solid satellite (*bottom*) can resist tidal disruption because it has significant internal cohesion in addition to self-gravitation

$$r_R \sim 2,46R_p \left( \frac{\rho_p}{\rho_s} \right)^{1/3}$$

# O LIMITE DE ROCHE

Para um satélite sem coesão interna e assumindo a mesma densidade do planeta, tem-se, para a Terra e os 4 planetas gigantes, resp.:

$$r_{\text{Roche}} = 175,000 \text{ km} = 2.4 R_{\text{Terra}}$$

$$r_{\text{Roche}} = 175,000 \text{ km} = 2.5 R_{\text{Jup}}$$

$$r_{\text{Roche}} = 147,000 \text{ km} = 2.4 R_{\text{Sat}}$$

$$r_{\text{Roche}} = 62,000 \text{ km} = 2.4 R_{\text{Ura}}$$

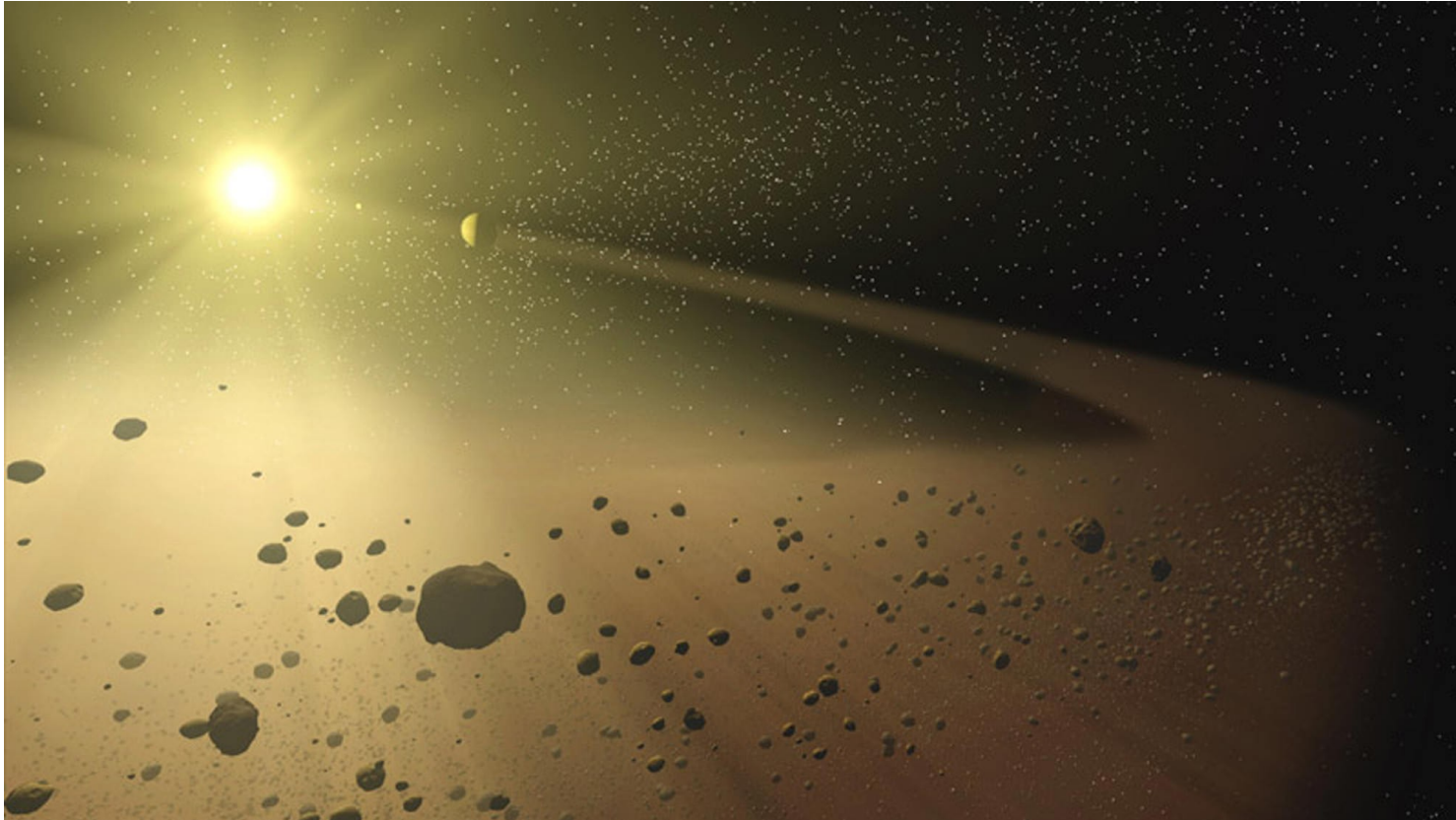
$$r_{\text{Roche}} = 59,000 \text{ km} = 2.4 R_{\text{Net}}$$

$$r_R \sim 2,46 R_p \left( \frac{\rho_p}{\rho_s} \right)^{1/3}$$

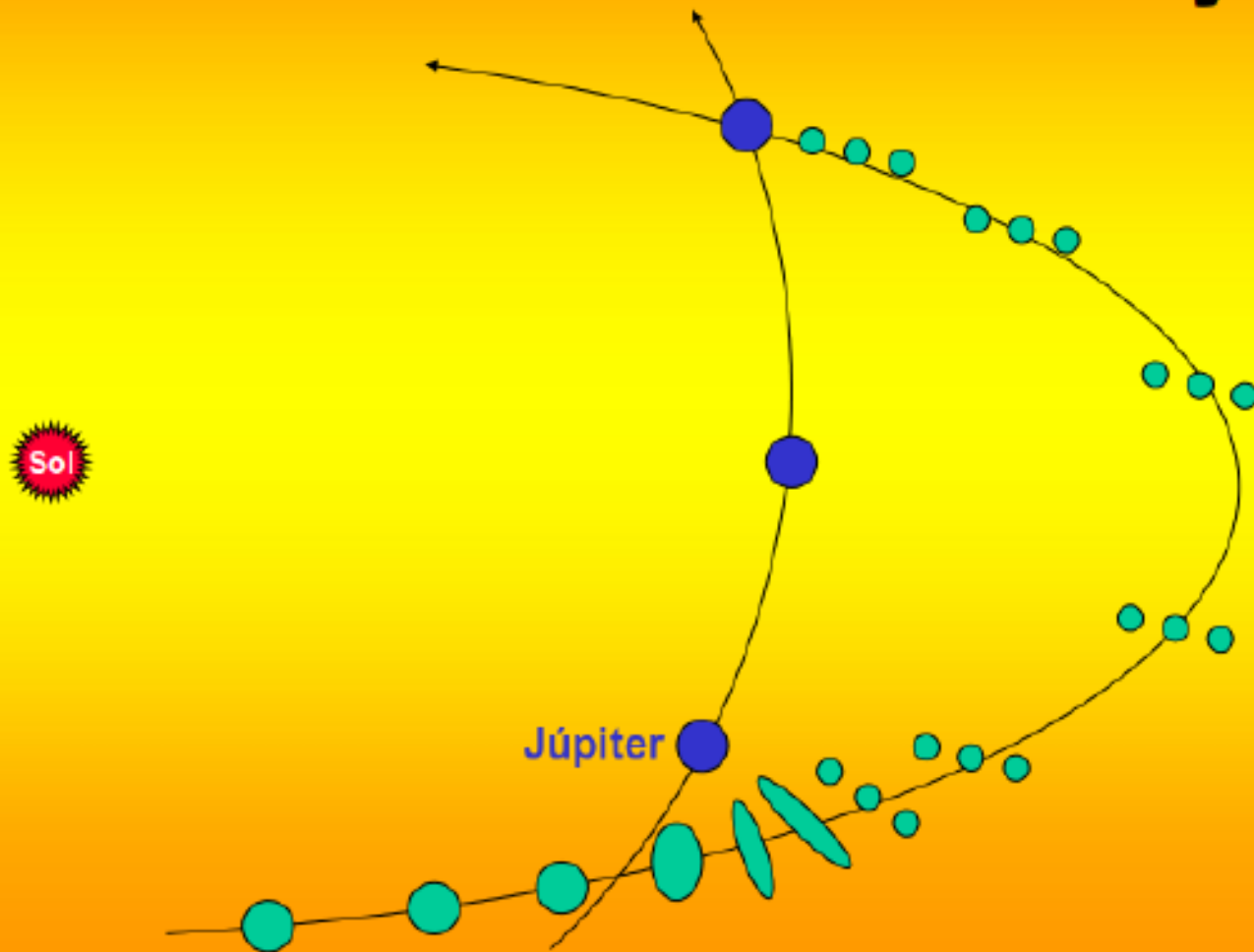
**Os anéis dos planetas gigantes estão localizados dentro do limite de Roche de cada planeta.**



A maré também evita a formação por acreção se o corpo estiver se formando próximo de algum outro corpo de massa grande



# Cometa Shoemaker-Levy



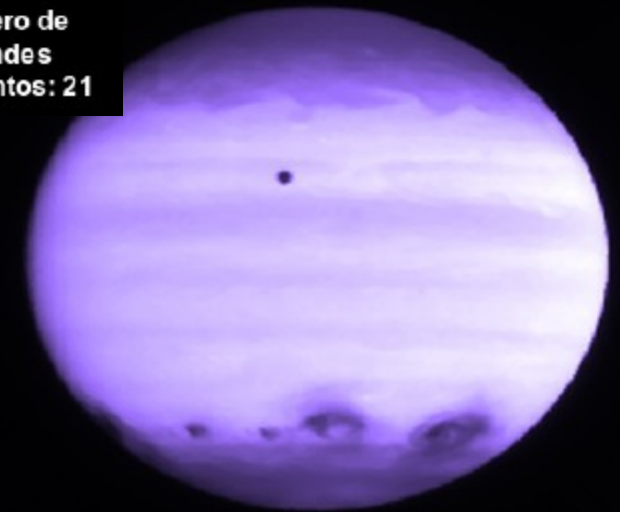
# Cometa Shoemaker-Levy 9

(1994 maio)



## Jupiter in Ultraviolet

Número de grandes fragmentos: 21

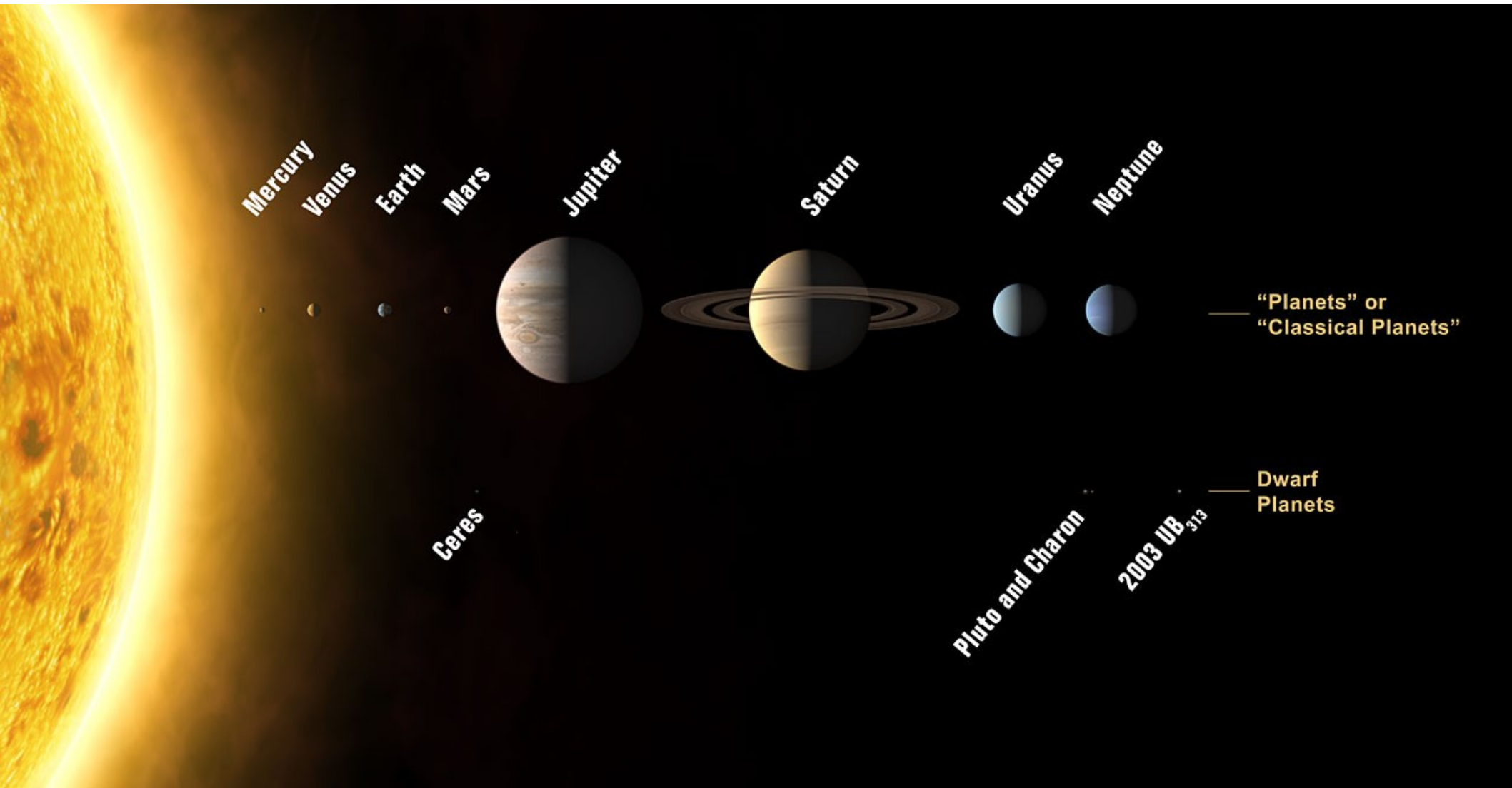


H N Q<sub>2</sub> D/G  
B Q<sub>1</sub> R L

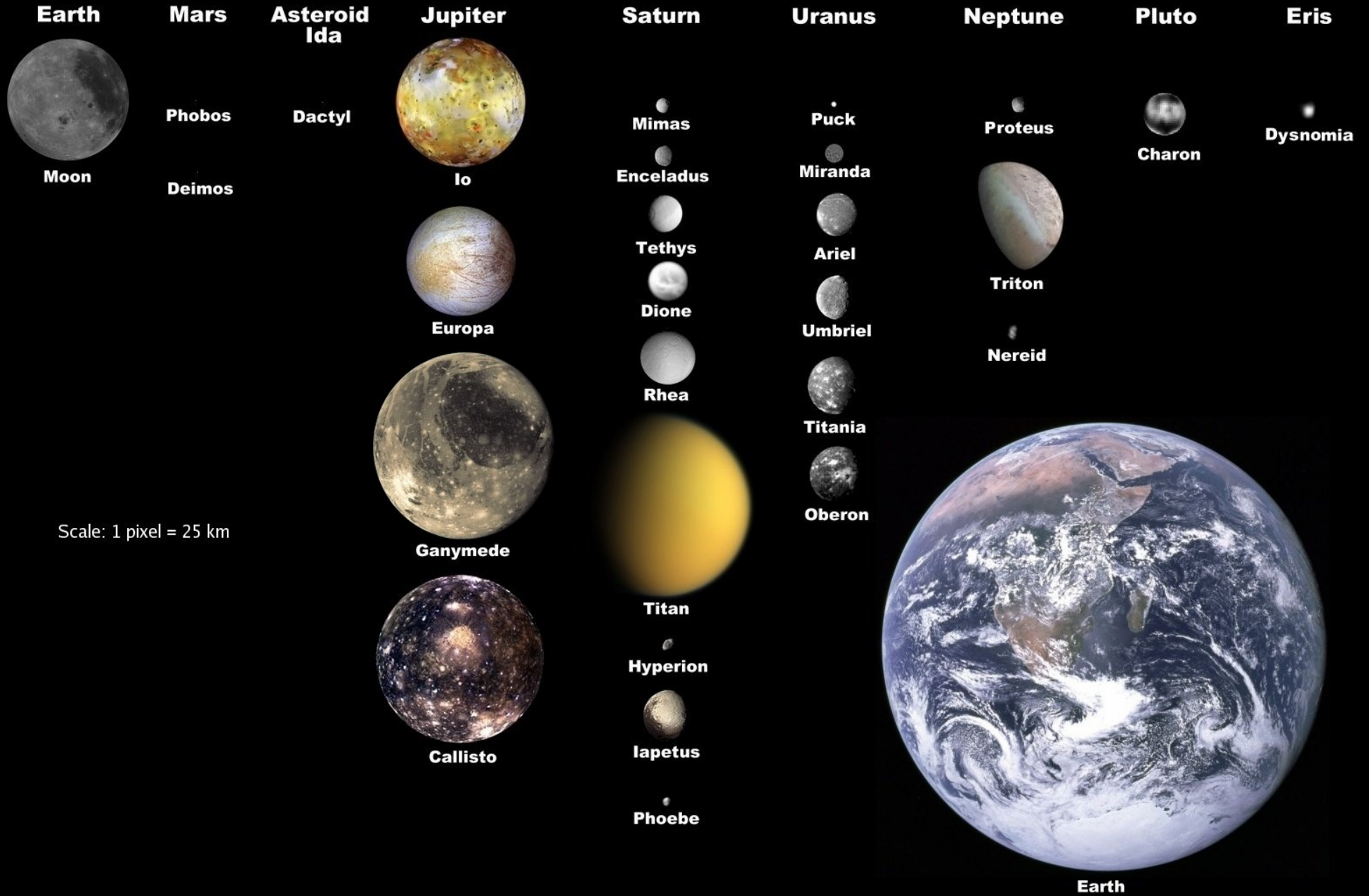
Hubble Space Telescope  
Wide Field Planetary Camera 2

1024x1024 Near-Infrared Camera  
University of Hawaii 2.2-meter telescope

# O SISTEMA SOLAR



# Selected Moons of the Solar System, with Earth for Scale





# MERCÚRIO:



- A maré é devida ao Sol

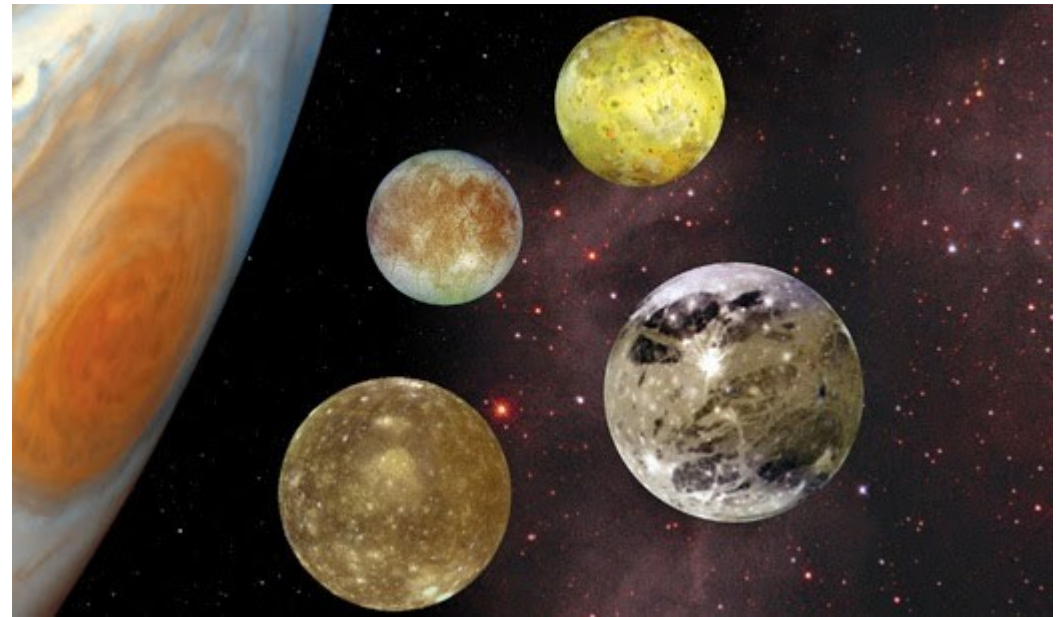
- Prot = 58.7 dias

Porb = 88 dias  $\rightarrow$  Porb/ Prot = 3/2

$\rightarrow$  Mercúrio roda 3 vezes em torno do seu eixo enquanto completa duas órbitas ao redor do Sol  $\rightarrow$  (2ano = 3dia)  $\rightarrow$

**Ressonância spin-órbita**

# OS SATÉLITES GALILEANOS



Júpiter → Prot = 9.92 horas

Satélites: → Rotação Síncrona

## Orbital parameters

|                     | Semi-major axis<br>( $10^3$ km) | Semi-major axis<br>(Jovian Radii) | Orbital Period*<br>(days) | Rotation Period<br>(days) | Inclination<br>(degrees) | Eccentricity |
|---------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------|
| Galilean Satellites |                                 |                                   |                           |                           |                          |              |
| Io (JI)             | 421.8                           | 5.91                              | 1.769138                  | S                         | 0.04                     | 0.004        |
| Europa (JII)        | 671.1                           | 9.40                              | 3.551181                  | S                         | 0.47                     | 0.009        |
| Ganymede (JIII)     | 1070.4                          | 14.97                             | 7.154553                  | S                         | 0.18                     | 0.001        |
| Callisto (JIV)      | 1882.7                          | 26.33                             | 16.689017                 | S                         | 0.19                     | 0.007        |

*Ganymedes*



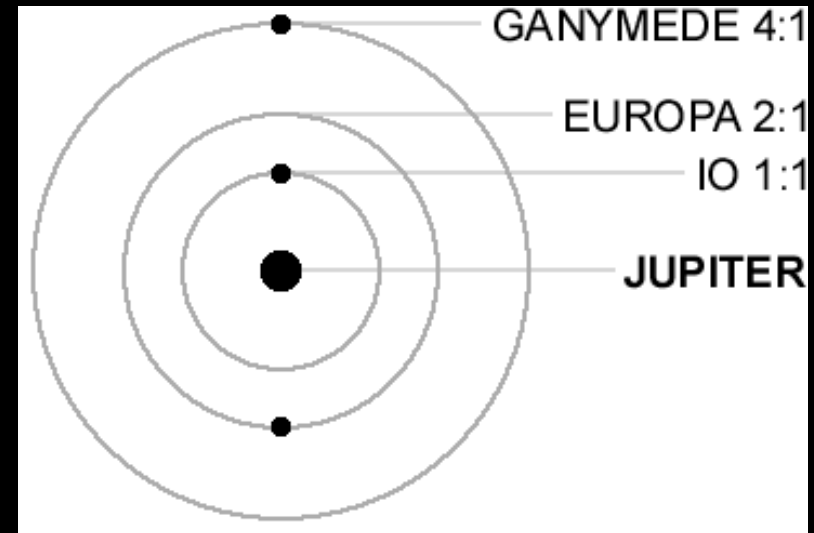
*Europa*



*Io*



*Calisto*



# Europa



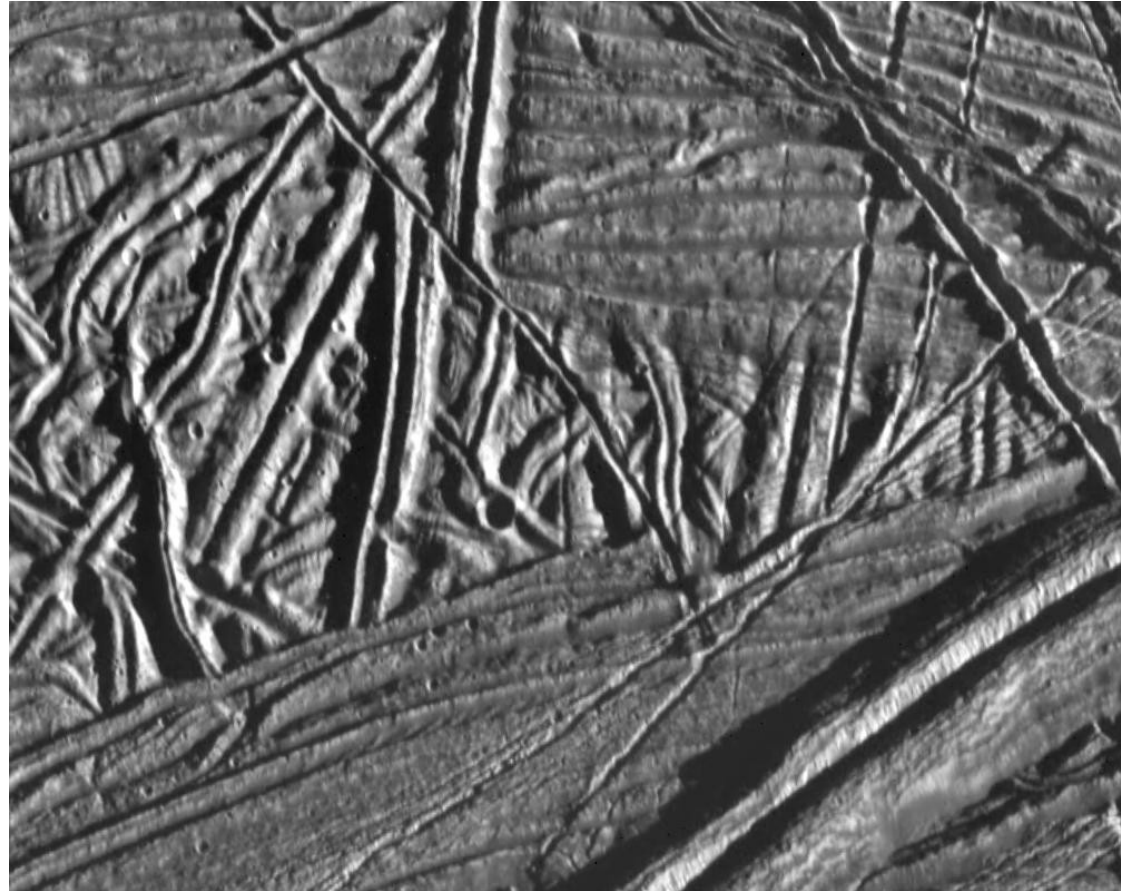
Foto da Sonda Galileo

# EUROPA

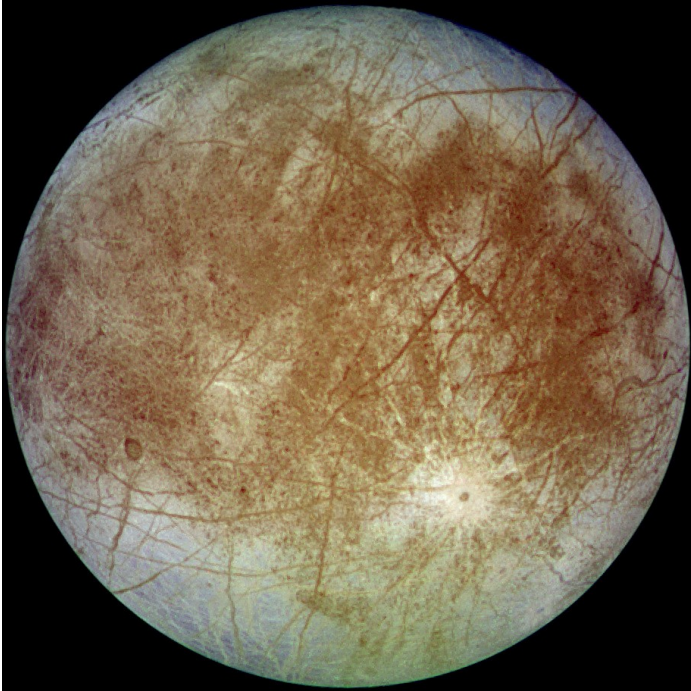
**R = 1561 km**

**D = 9.4 R<sub>Jup</sub>**

- É o menor dos galileanos. Sua superfície está formada por gelo de água, incluindo fraturas e relevos.
- Possui um **oceano sub-superficial de água líquida**, abaixo de uma crosta congelada, produto do aquecimento interno devido ao efeito de maré.
- Estima-se que a espessura da crosta seja de 15 – 25 km, flutuando num oceano de 60 – 150 km de profundidade.
- Com  $\frac{1}{4}$  do tamanho da Terra, Europa pode ter o dobro de água líquida.
- É o objeto mais promissor para a busca de vida fora da Terra dentro do Sistema Solar.

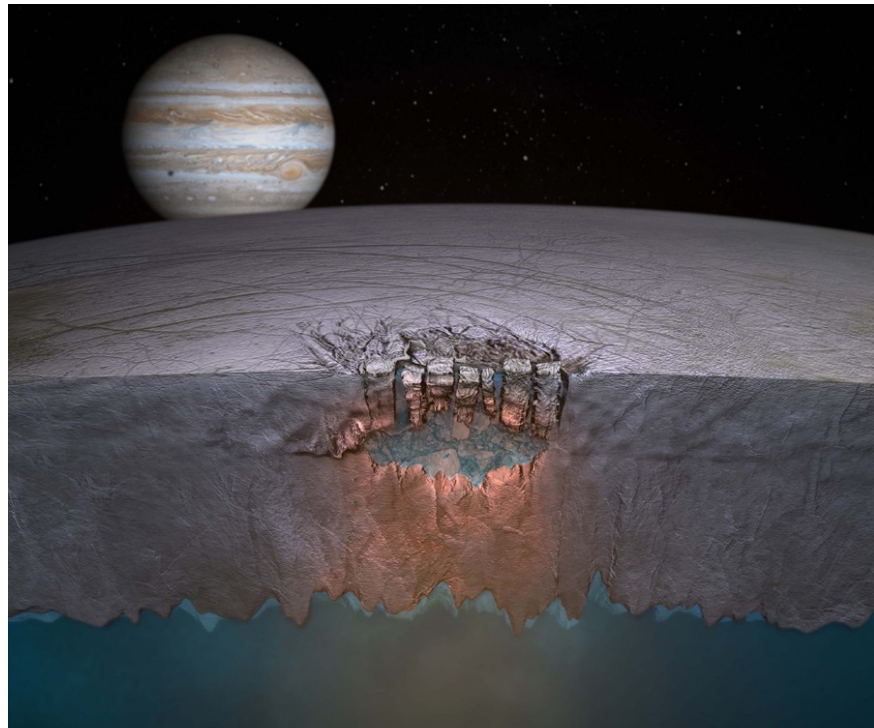


# EUROPA

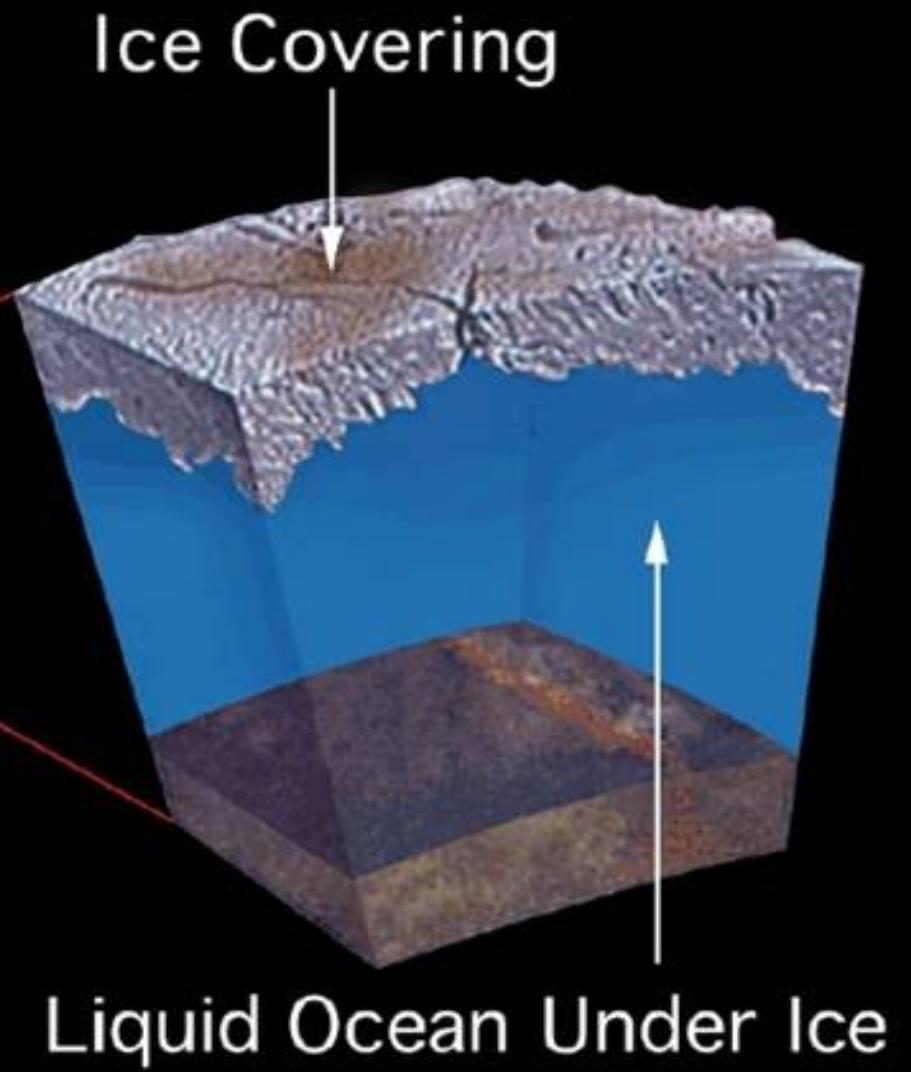
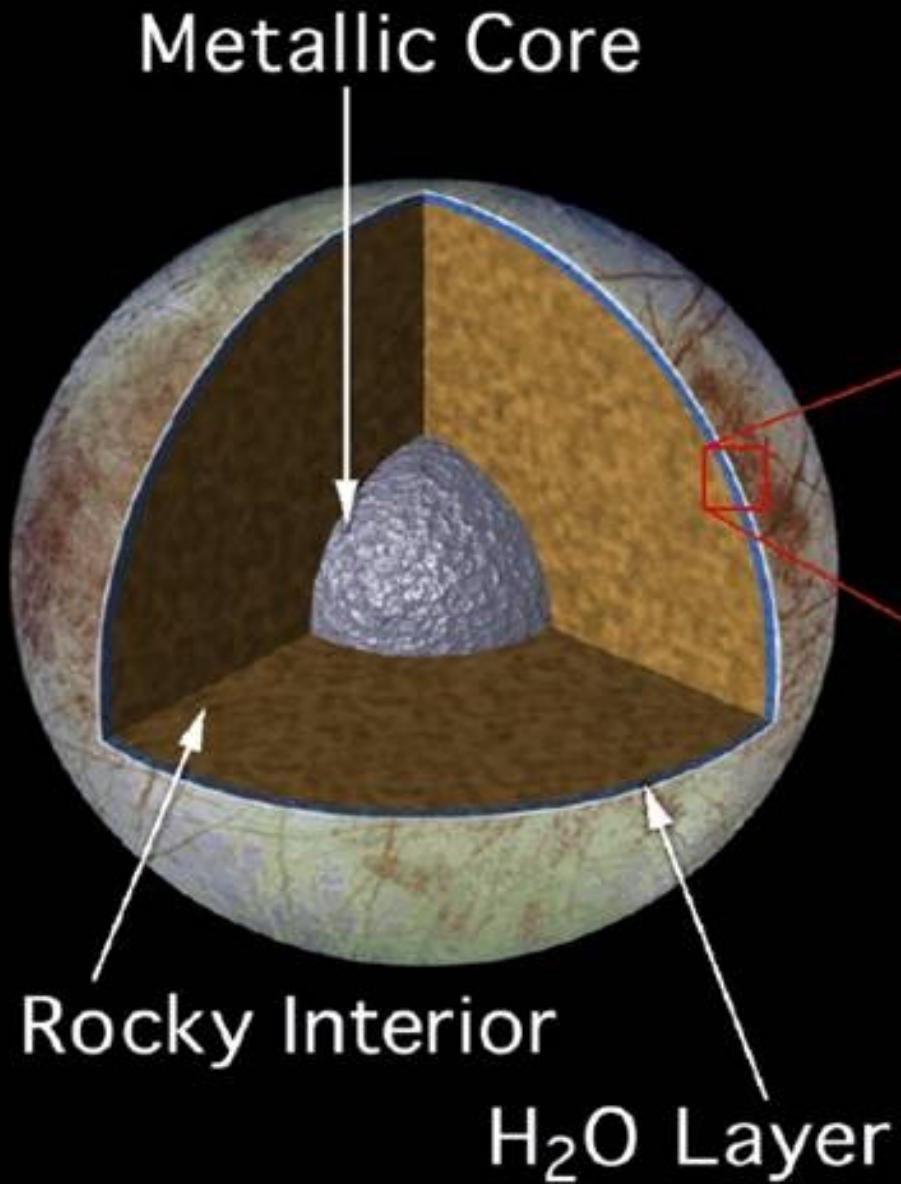


## Oceano sub-superficial:

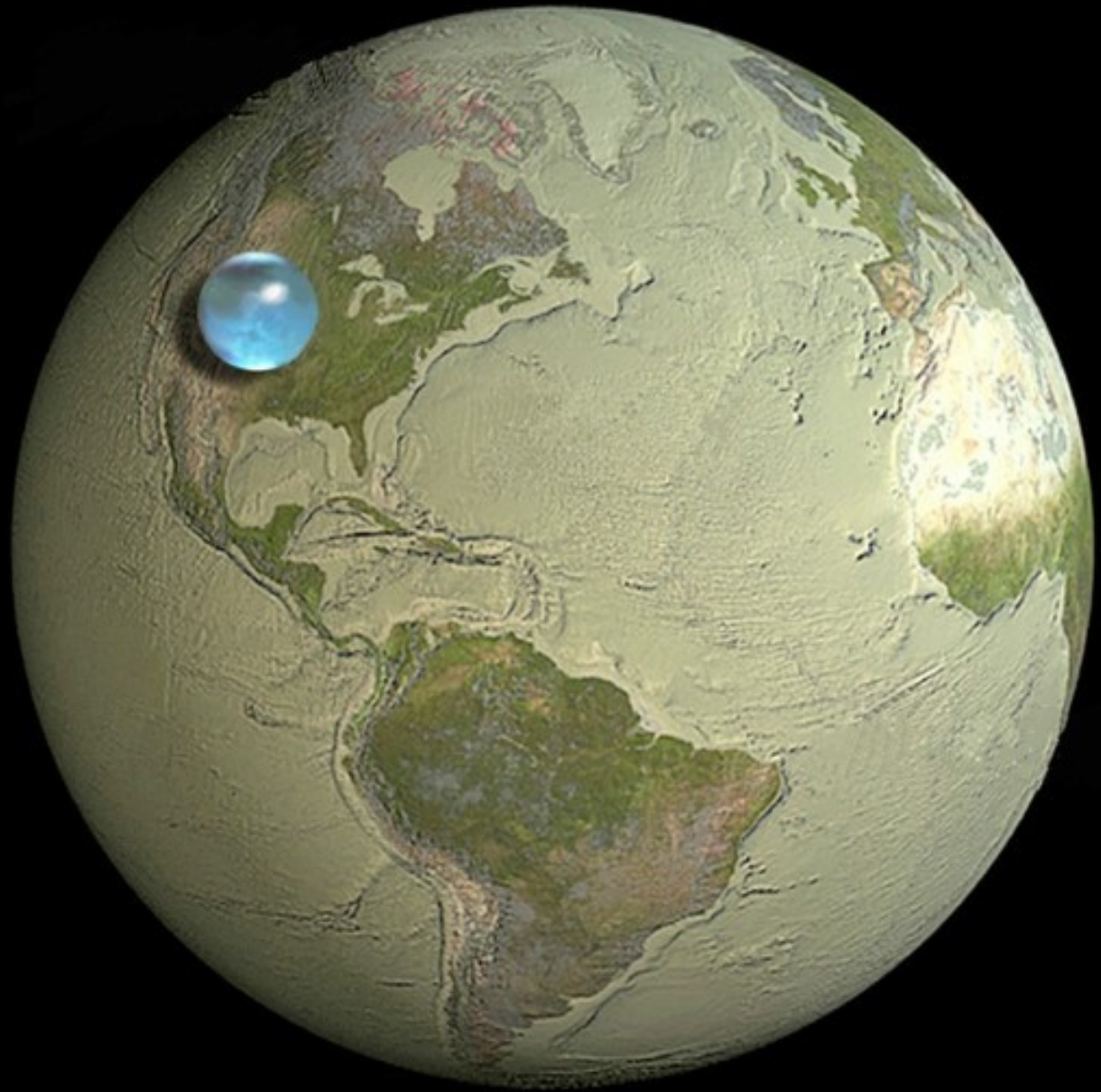
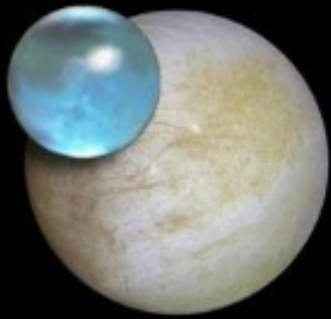
aquecimento interno devido à maré de Júpiter provoca derretimento de camada de gelo abaixo da superfície (oceano de dezenas de km de espessura)



$$\frac{dE}{dt} = \frac{21}{2} \frac{R^5 n^5 e^2}{G} \text{Im}(\bar{k}_2).$$



**Europa**



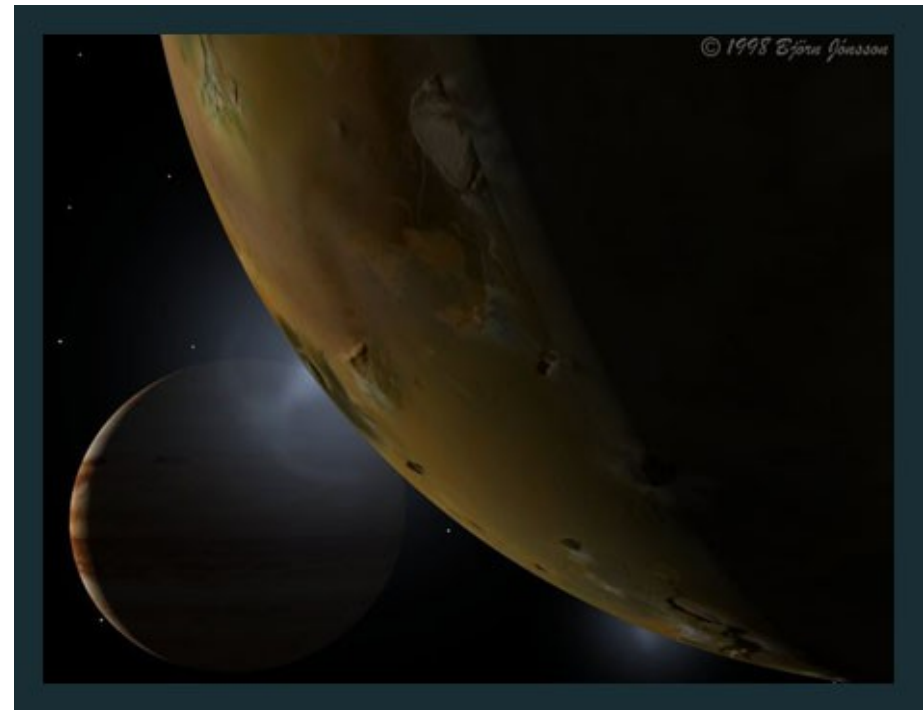
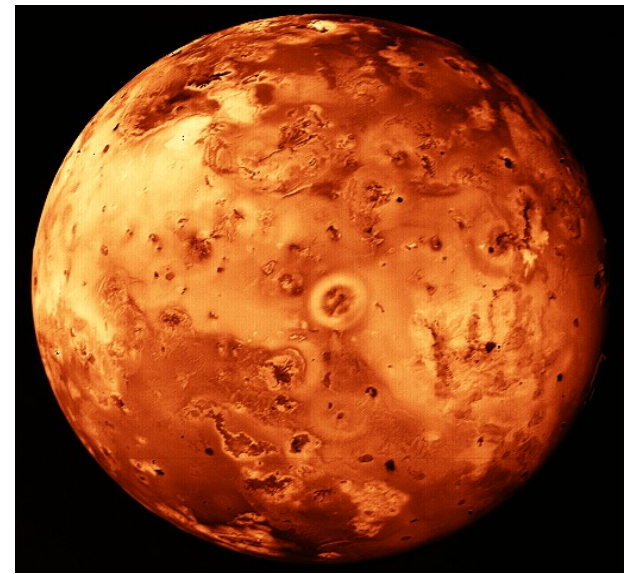


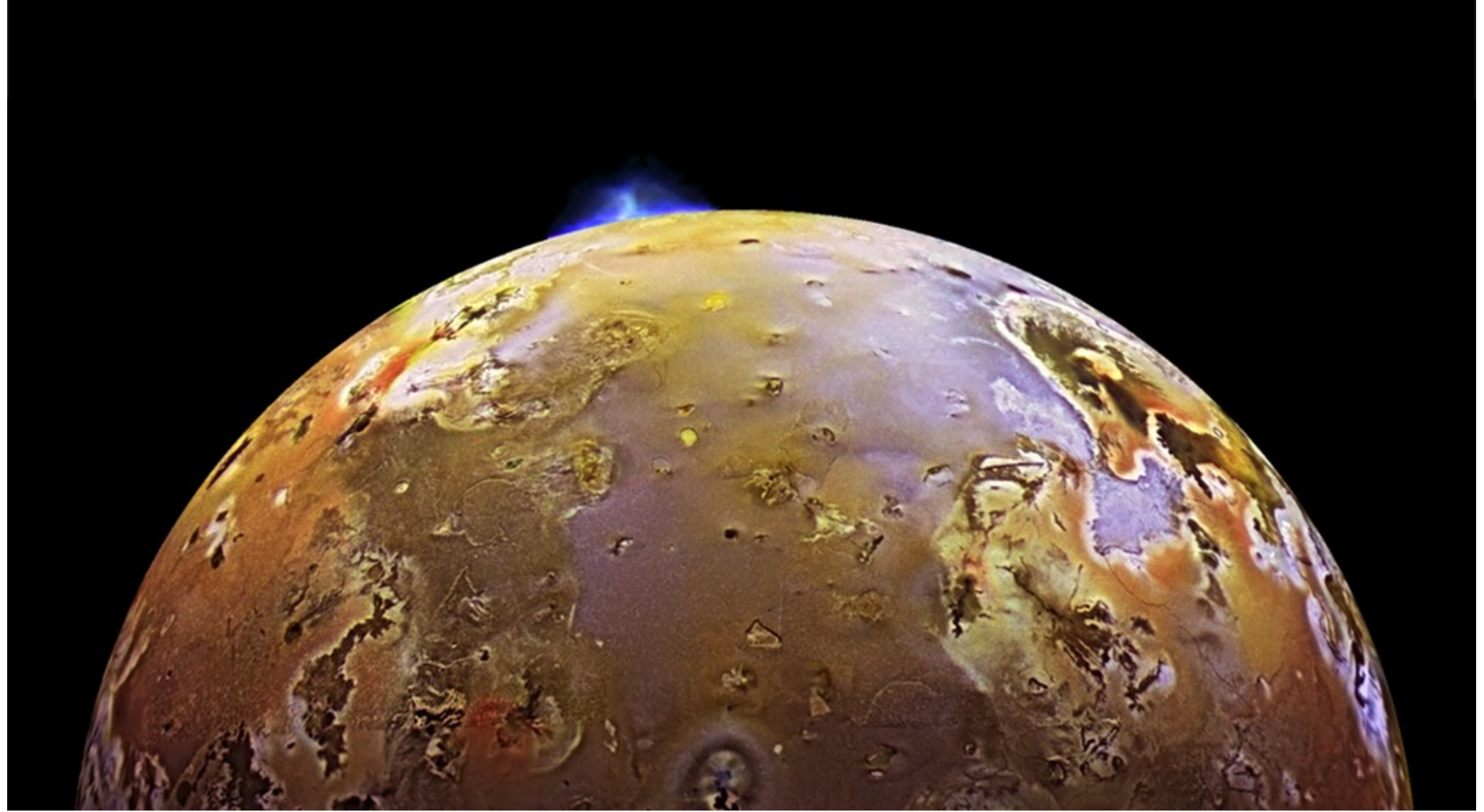
# IO

- Maré → deformação →  
fricção interna → **dissipação  
de energia no interior**

- A maré é muito violenta em  
Io. O satélite apresenta  
**atividade vulcânica.**

- É o objeto vulcanicamente  
mais ativo do Sistema Solar.

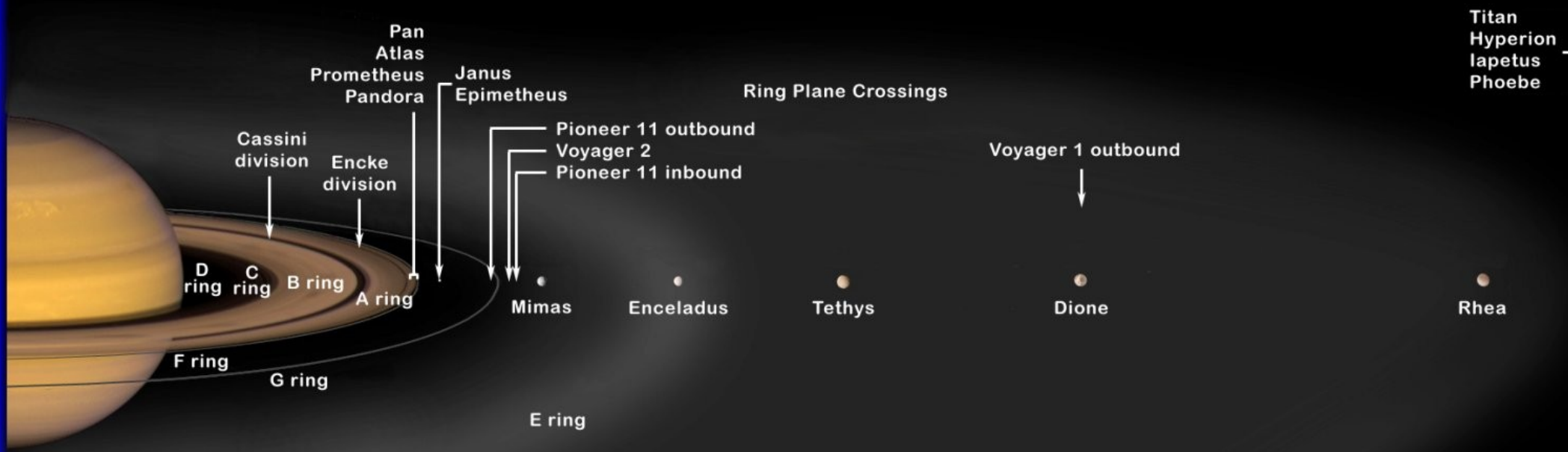
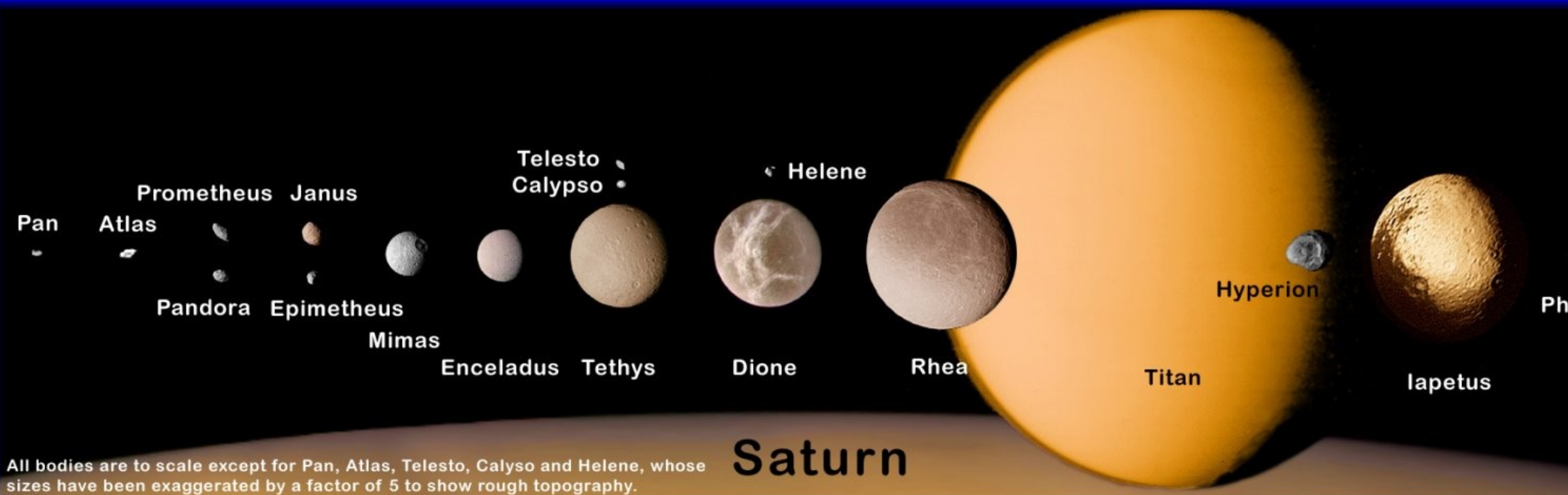


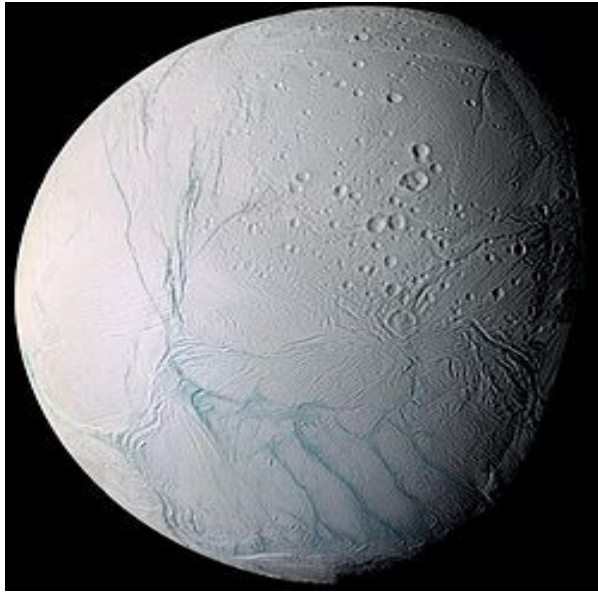


New Horizons – Março 2007 (pluma de 200 km)

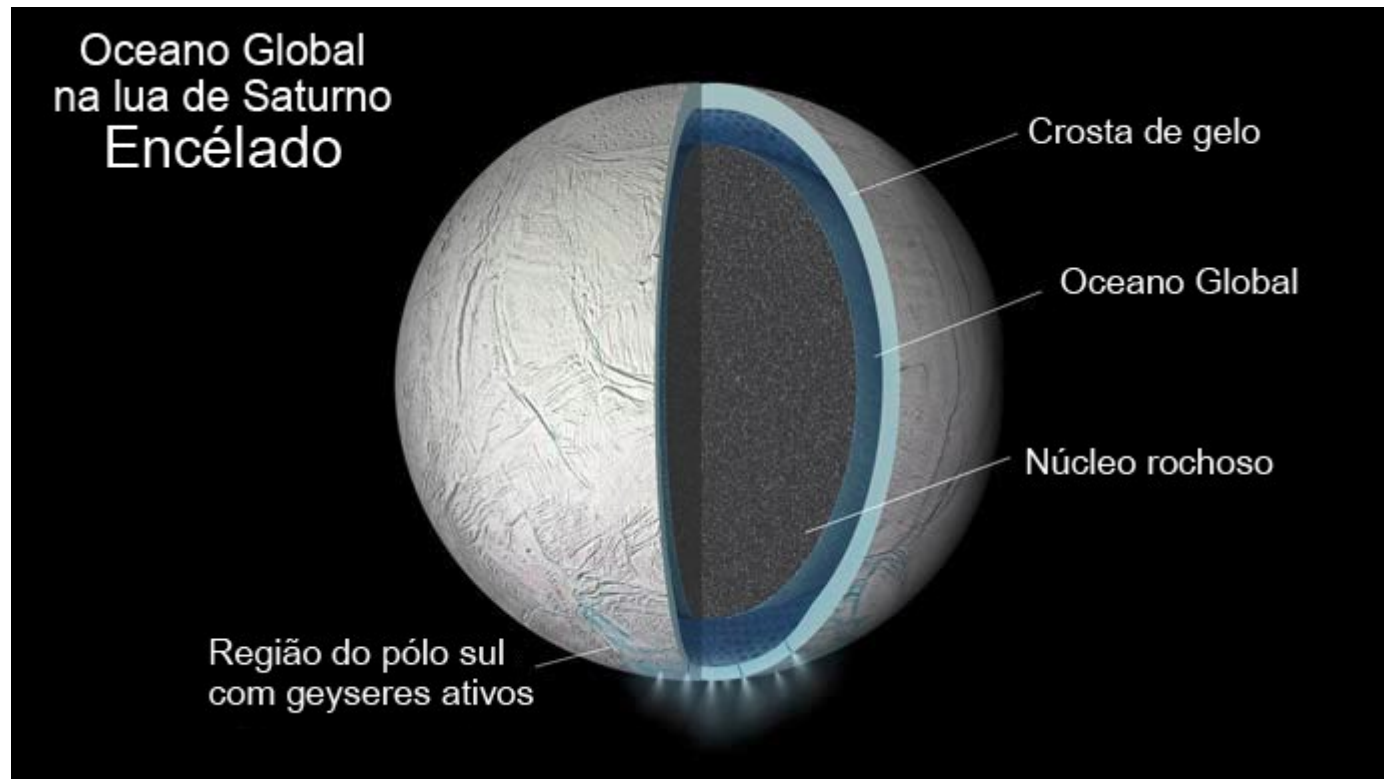
Altura das estruturas (plumas) é de dezenas ou até centenas de km.

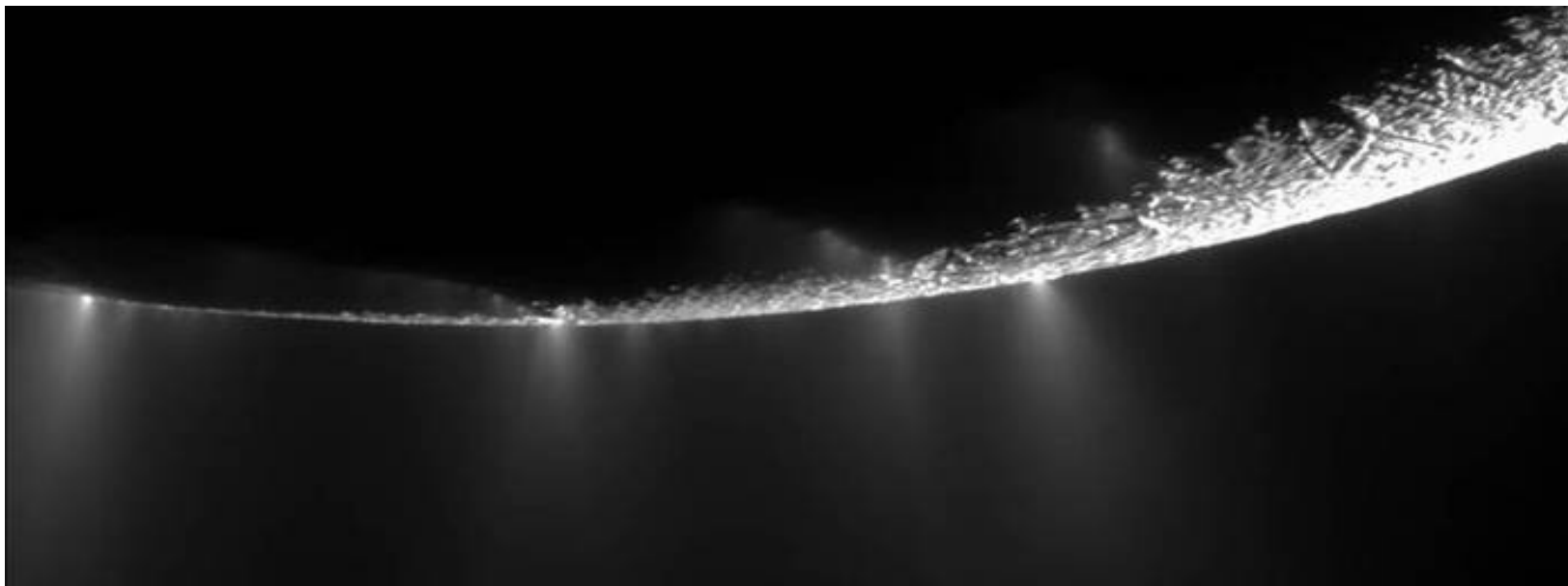
# Saturn's Satellites and Ring Structure





# Encélado





Cassini

**A análise espectroscópica revelou a presença de sais, poeira e carbonatos nas plumas de água, o que é físico-quimicamente melhor explicado pela presença de água em grande quantidade.**



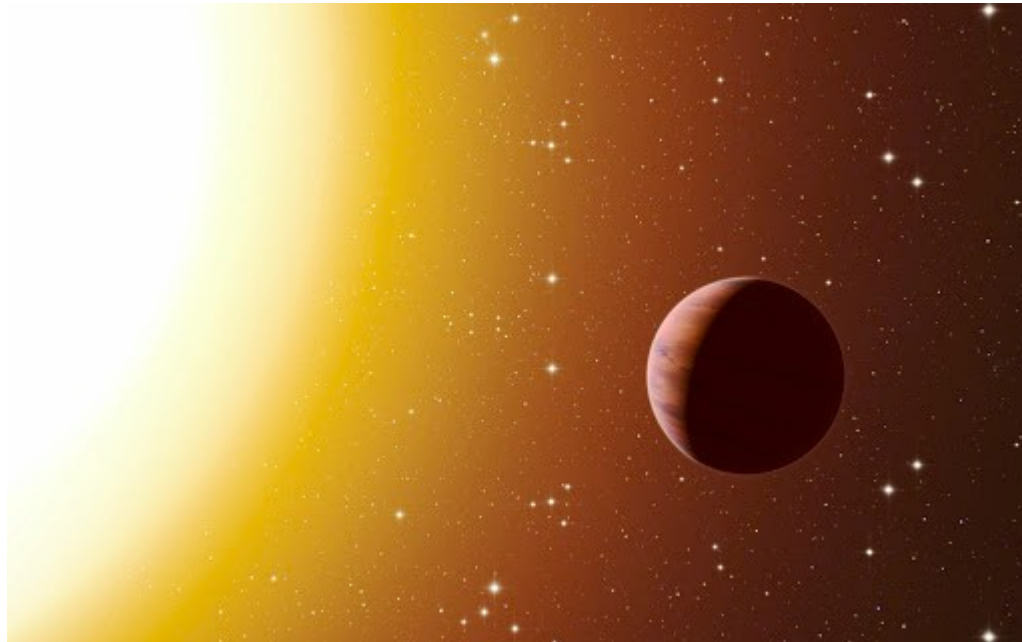
# Alimentação do anel E com partículas de gelo



# Exoplanetas

Dados observacionais mostram **grande concentração** de planetas com períodos orbitais de alguns poucos dias (planetas quentes).

Isto garante o sometimento a grandes forças de maré com as estrelas hospedeiras, resultando em **variação dos elementos orbitais e da rotação**.



# Exoplanetas: evolução orbital

$$\langle \dot{a} \rangle = -\frac{2}{3}na^{-4}[(2 + 46e^2)\hat{s} + 7e^2\hat{p}],$$
$$\langle \dot{e} \rangle = -\frac{1}{3}nea^{-5}(18\hat{s} + 7\hat{p}).$$

$$\frac{\hat{p}}{\hat{s}} = 2\frac{k_{dp}}{k_{d*}}\frac{Q_*}{Q_p}\left(\frac{m_*}{m_p}\right)^2\left(\frac{R_p}{R_*}\right)^5$$

Interação de maré provoca **decaimento orbital** e **circularização**.



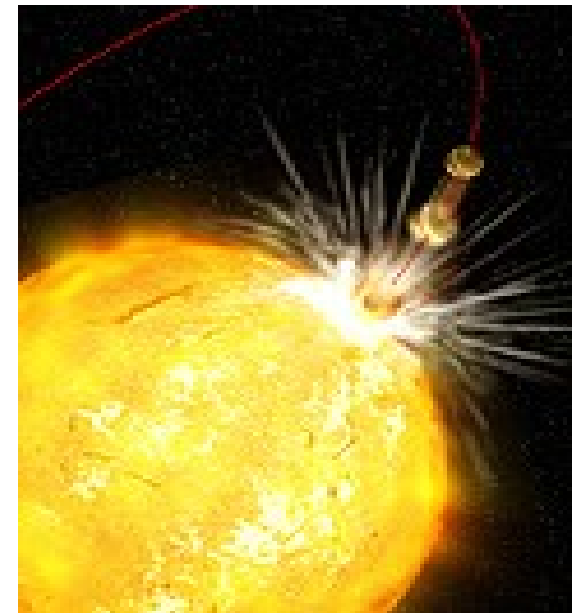
# MARÉ DA ESTRELA

- Migração → o semi-eixo atinge valor crítico → interação de maré
- Supondo sistema Sol – Hot Júpiter: Prot (estrela) = 25 dias  
Porb (planeta) = 3 dias

Prot  $\gg$  Porb → Torque tende a acelerar a rotação da estrela e diminuir semi-eixo do planeta

- Estado final ? → dependendo dos tempos de evolução, o planeta pode ser “engolido” pela estrela

- HD 82943 (Excesso de Litio 6 na atmosfera)



# Empirical evidence for tidal evolution in transiting planetary systems

Frédéric Pont<sup>★</sup>

*University of Exeter, Stocker Road, Exeter EX4 4QL*

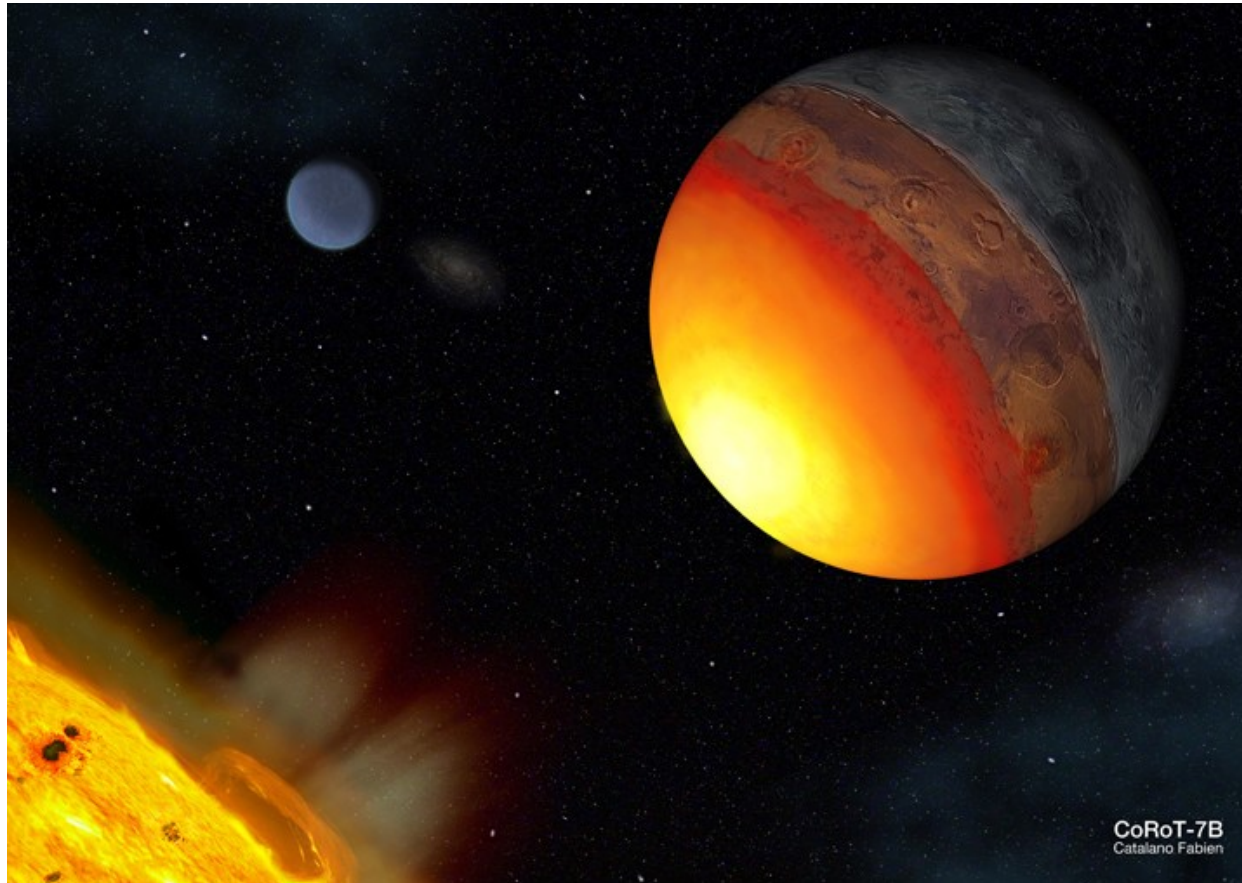
## ABSTRACT

Most transiting planets orbit very close to their parent star, causing strong tidal forces between the two bodies. Tidal interaction can modify the dynamics of the system through orbital alignment, circularization, synchronization and orbital decay by exchange of angular momentum. Evidence for tidal circularization in close-in giant planet is well known. Here, we review the evidence for excess rotation of the parent stars due to the pull of tidal forces towards spin-orbit synchronization. We find suggestive empirical evidence for such a process in the present sample of transiting planetary systems. The corresponding angular momentum exchange would imply that some planets have spiralled towards their star by substantial amounts since the dissipation of the protoplanetary disc. We suggest that this could quantitatively account for the observed mass–period relation of close-in gas giants. We discuss how this scenario can be further tested and point out some consequences for theoretical studies of tidal interactions and for the detection and confirmation of transiting planets from radial velocity and photometric surveys.

# ROTAÇÃO

$$\Omega_{\text{stat}} = n(1 + 6e^2), \longrightarrow$$

Devido à circularização da órbita, a rotação tende ao sincronismo entre os períodos orbital e de rotação.



# REFERÊNCIAS

Leituras adicionais recomendadas:

- **Kenneth R. Lang. *Essential Astrophysics***. 2013. (ver Sec. 3.4).

<https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-642-35963-7>

- **Tabaré Gallardo, notas de aula**

<http://www.fisica.edu.uy/~gallardo/notasCPTG.pdf>