



Universidade Federal do ABC

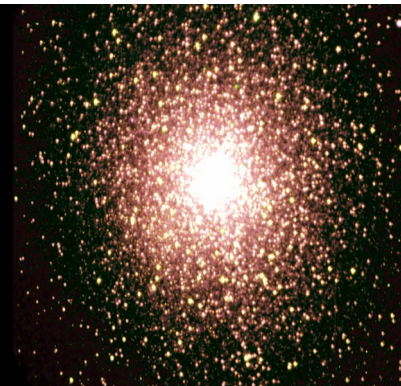
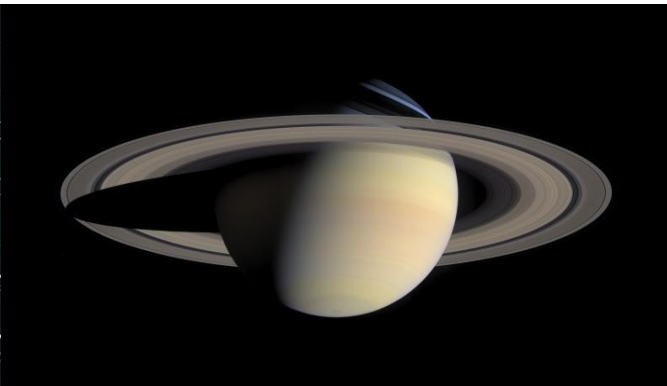
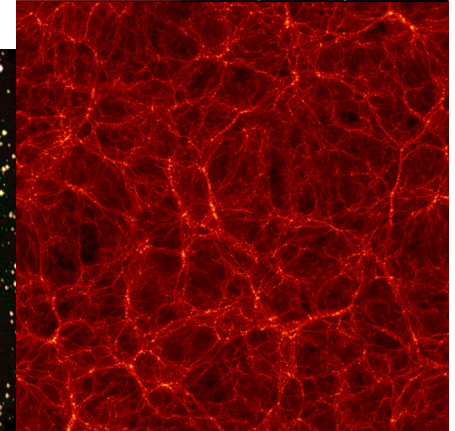
Noções de Astronomia e Cosmologia

4. O Sistema Solar: Os Planetas.

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/Astro.html>



O Sistema Solar



O Sistema Solar

Consiste do **Sol**: estrela,
~99.85 % da massa do
Sistema Solar (SS),

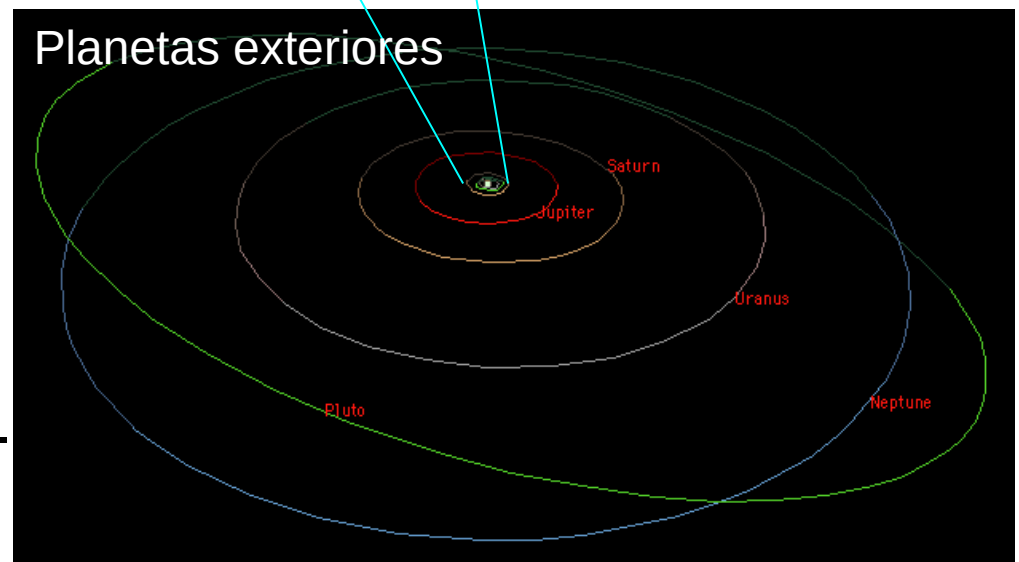
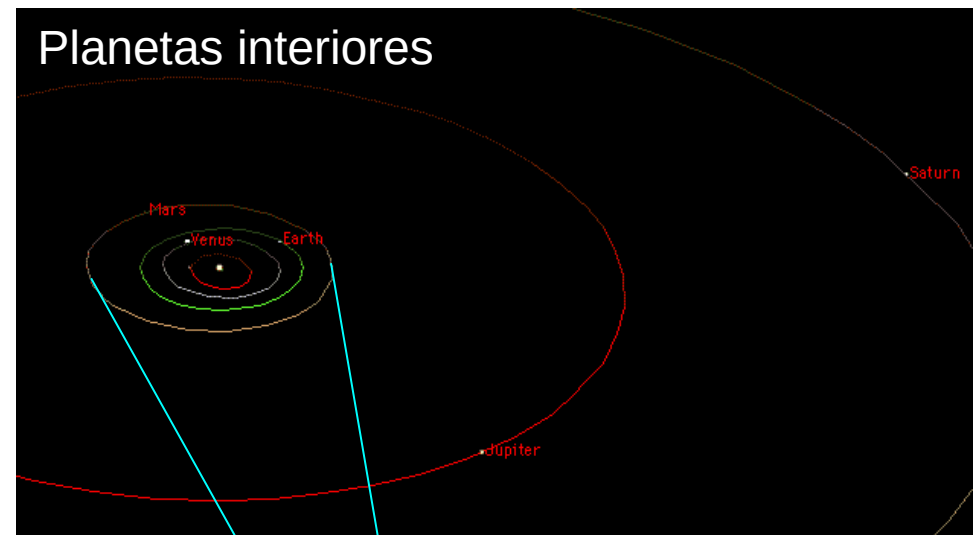
dos **planetas**

- interiores: Mercúrio, Vênus, Terra e Marte
- exteriores: Júpiter, Saturno, Urano e Netuno e suas **luas** e anéis,

de outros corpos:

asteróides, objetos trans-netunianos, cometas

e um montão de **espaço vazio** (até uns 122 AU do Sol)



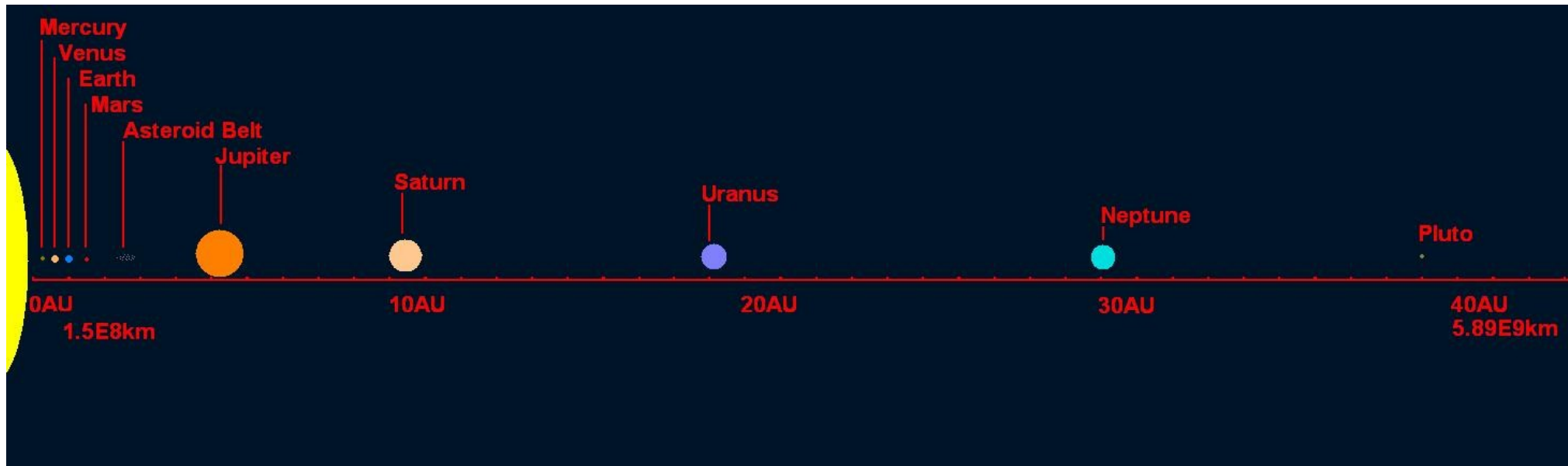
O Sistema Solar

Pra se ter uma ideia dos **tamanhos** do Sol e dos planetas:



O Sistema Solar

Pra se ter uma ideia das **distâncias**:



A 122 AU do Sol encontra-se a **heliopausa**, onde o vento solar é parado pelo meio interestelar e é considerado o **limite** do **Sistema Solar**.

Os Planetas do Sistema Solar

Planetas **interiores**, ou **terrestres**, ou **telúricos**:

- **dentro** de 2 AU do **Sol**
- **massas baixas** ($\leq M_{\oplus}$)
- “**pequenos**” (\leq tamanho da Terra)
- na maior parte material **rochoso**, contendo **ferro**, **oxigênio**, **silício**, **magnésio**, **alumínio**, **níquel**, e **enxofre**
- **densidades altas** (4000 a 5500 kg/m³)
- **temperaturas altas**: 215-733 K
- fonte da energia interna:
 - Decaimento** lento de isótopos **radioativos**
- **atividade sísmica / vulcânica** (atual ou no passado)
- possuem **poucos satélites naturais** (luas) ou nenhum
- **sem anéis**
- rotação **lenta**
- campos magnéticos **fracos** ou **ausentes**

Os Planetas do Sistema Solar

Planetas **exteriores**, ou **jovianos** ou gigantes **gasosos/gelosos**:

- a **mais** de 5 AU do **Sol**
- **massas altas** ($> 14 M_{\oplus}$, todos juntos: 99.5 % da massa dos planetas)
- **grandes** (diâmetros 4 a 11 vezes o da Terra)
- na maior parte elementos leves como **hidrogênio** e **hélio**, e um pouco de carbono, oxigênio, nitrogênio, e enxofre
- **densidades baixas** (700 a 1700 kg/m³)
- **temperaturas baixas**: 70-165 K
- fonte da energia interna: **Energia potencial gravitacional**, contração e He descendo pela atmosfera (\Rightarrow teorema do virial: Metade da energia potencial ganha esquenta o planeta, a outra metade é irradiada para fora no infravermelho)
- **sem atividade sísmica / vulcânica** (atual ou no passado)
- **muitos satélites naturais**
- **com anéis**
- rotação **rápida**
- campos magnéticos **fortes** ($B_{\text{pl}} \sim 19\,000 B_{\oplus}$)

Como calcular a temperatura dum planeta?

- Chamando temperatura e raio do Sol de T_{\odot} (= 5777 K) e R_{\odot} (= $6.96 \cdot 10^5$ km), os do planeta de T_p e R_p , e a distância Sol-planeta, de D , e supondo **equilíbrio térmico** (A energia recebida da estrela é igual à energia irradiada para o espaço):

$$P_{in} = \underbrace{\pi R_p^2}_{\text{seção transversal que o planeta apresenta á radiação da estrela}} \cdot \underbrace{F_D}_{\text{Fluxo da radiação da estrela na distância } D} = \pi R_p^2 \cdot \underbrace{L_{\odot}/4\pi D^2}_{\text{Luminosidade do Sol}}$$

Lei de Stefan-

Boltzmann,

$$L/A = \sigma T^4$$

$$= \pi R_p^2 \cdot \underbrace{\sigma 4\pi R_{\odot}^2 T_{\odot}^4}_{\text{Superfície do Sol}} / 4\pi D^2 = \pi R_p^2 \cdot \sigma R_{\odot}^2 T_{\odot}^4 / D^2$$

Potência irradiada para fora (de novo usando a Lei de Stefan-Boltzmann): $P_{out} = \sigma 4\pi R_p^2 T_p^4$

Como calcular a temperatura dum planeta?

$$P_{\text{in}} = \pi R_p^2 \cdot \sigma R_{\odot}^2 T_{\odot}^4 / D^2, \quad P_{\text{out}} = \sigma 4\pi R_p^2 T_p^4$$

igualando P_{in} e P_{out} e explicitando T_p :

$$T_p = (1/4 \cdot (R_{\odot}^2 / D^2))^{1/4} \cdot T_{\odot} = \sqrt{(R_{\odot} / 2D)} \cdot T_{\odot}$$

Ainda dá para levar em conta que uma fração da luz recebida, a **albedo** a , **não é absorvida**, mas **refletida sem esquentar** o planeta (substituir P_{in} por $(1-a) \cdot P_{\text{in}}$):

$$T_p = (1/4 \cdot (1-a) \cdot (R_{\odot}^2 / D^2))^{1/4} \cdot T_{\odot} = (1-a)^{1/4} \cdot \sqrt{(R_{\odot} / 2D)} \cdot T_{\odot}$$

Distribuição de Maxwell-Boltzmann

Fenômenos Térmicos:

Distribuição de **velocidades** v

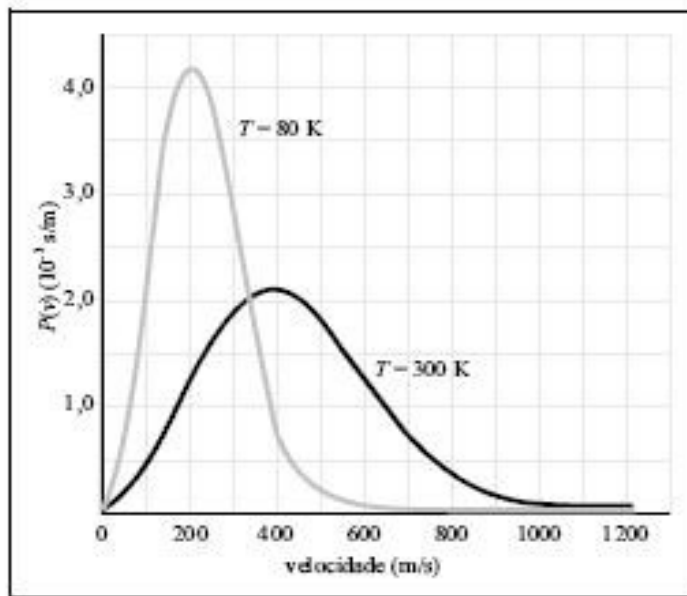
de **partículas** de massa m

num **gás** de **temperatura** T :

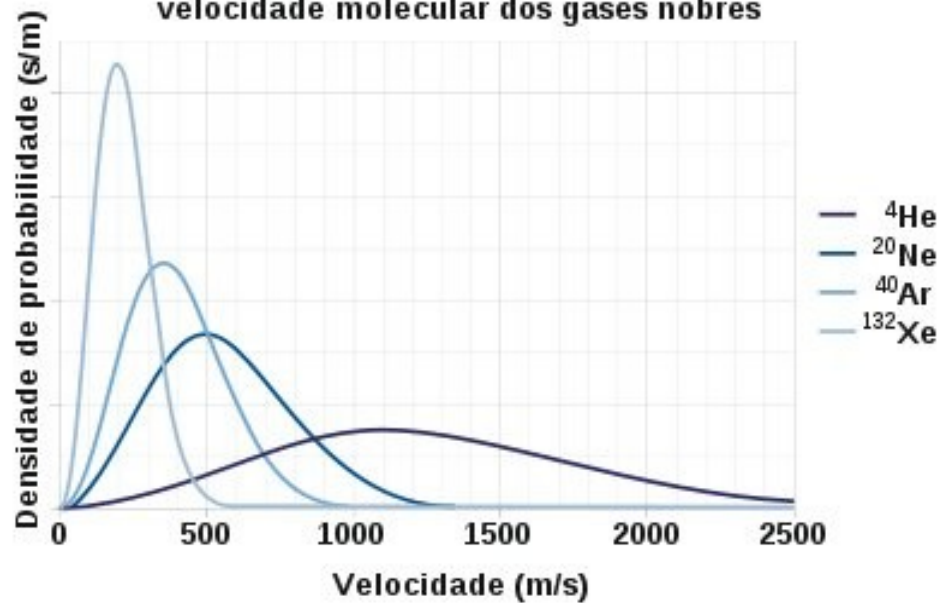
onde $k = k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K = constante de Boltzmann

$$f(v) = \sqrt{\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^3} 4\pi v^2 \exp\left(\frac{-mv^2}{2kT}\right)$$

Distribuição Maxwell-Boltzmann da
velocidade molecular dos gases nobres



variando T



variando m

Distribuição de Maxwell-Boltzmann

Velocidade **mais provável** (bom exercício para em casa):

$$v_{mp} = \sqrt{2k_B T/m}$$

Velocidade **média**: $v_{méd} = \sqrt{8k_B T/\pi m}$

Velocidade **média quadrática**: $v_{rms} = \sqrt{3k_B T/m}$

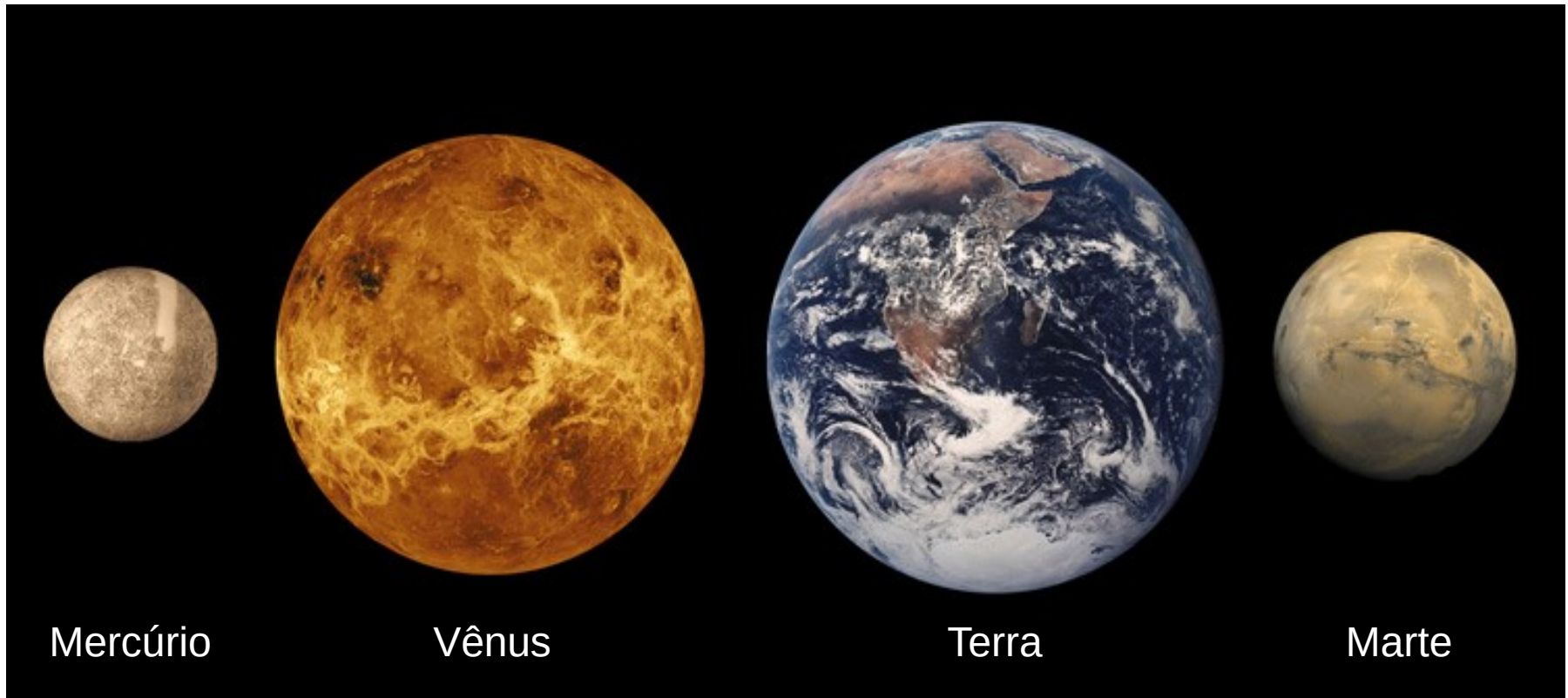
Estimativa para um planeta de massa M_p e raio R_p ter **perdido** dado **componente atmosférico** até hoje:

$$v_{rms} > 1/6 \cdot v_{esc} \Rightarrow T_{esc} = 1/54 \cdot GM_p m/k_B R_p$$

Em consequência, os elementos que compõem os gases mais leves (principalmente H e He) são subrepresentados nas atmosferas dos planetas de menor massa e maior temperatura (os interiores).

Planetas Interiores

Ou Terrestres ou Telúricos



Mercúrio

Vênus

Terra

Marte

Mercúrio

Símbolo: ☿

Na mitologia grega o deus do comércio, das viagens e do roubo

Planeta **mais próximo** do Sol (0.39 AU)

Menor planeta do Sistema Solar
($0.055 M_{\oplus}$, $0.38 R_{\oplus}$)

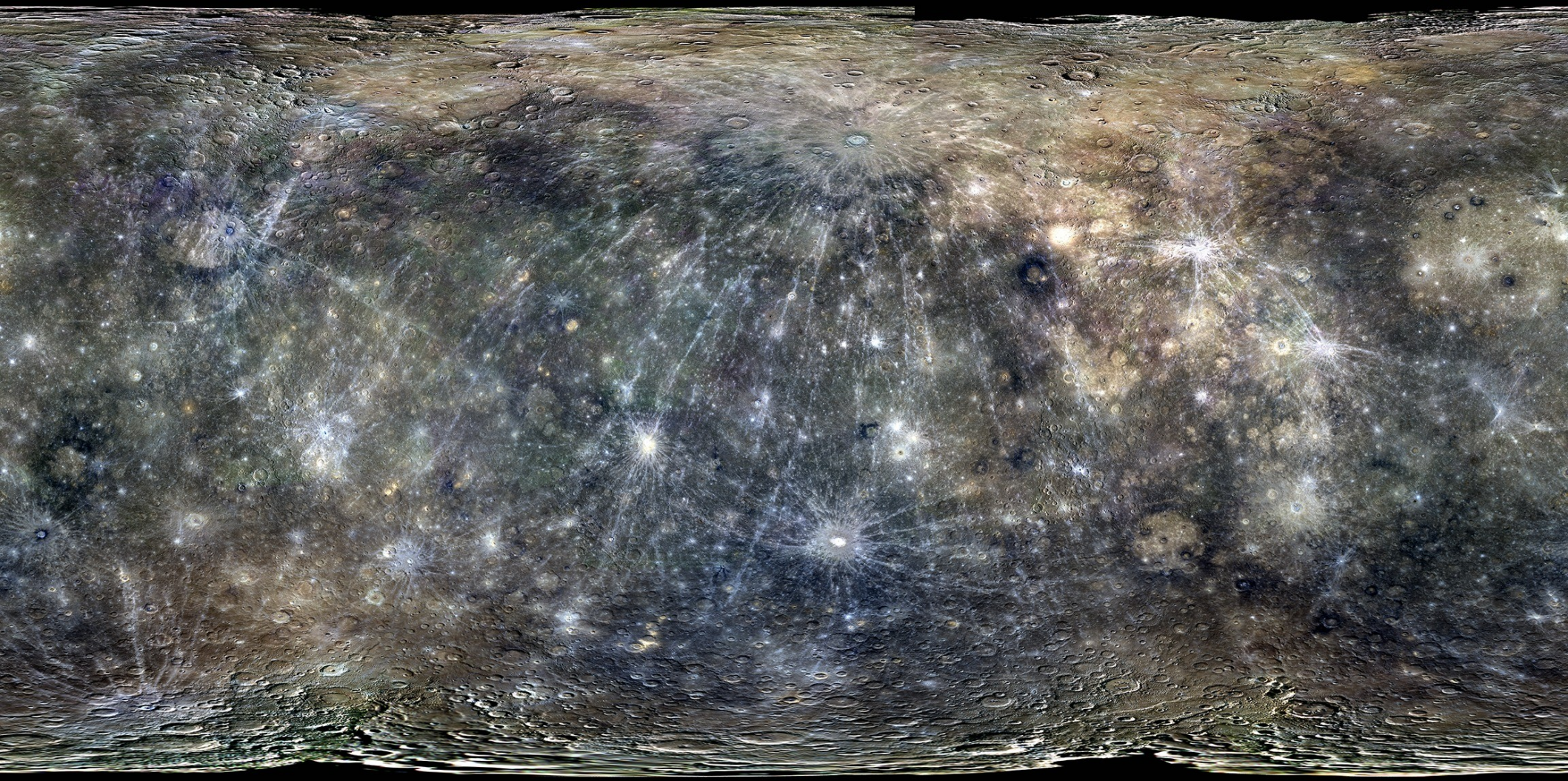
Vulcanismo no **passado**,
mas inativo há muito tempo
=> Numerosas **crateras** de **impacto**
de asteróides, etc.,
superfície “lunar” (mas sem os “mares”)

Núcleo denso, rico em **níquel** e **ferro**,
que ocupa ~65% da massa do planeta,
tal que $\rho_{\text{☿}} = 5427 \text{ kg/m}^3 = 1.6 \rho_{\text{J}}$

Talvez perdeu boa parte de um possível manto numa colisão



Mercúrio



Mapa do planeta

Mercúrio

O cálculo da temperatura de Mercúrio (supondo albedo zero)

dá $448 \text{ K} = 174 \text{ }^\circ\text{C}$

usando o albedo de 0.068

dá $440 \text{ K} = 167 \text{ }^\circ\text{C}$

Segundo a nossa estimativa,

todos os componentes atmosféricos de Mercúrio

foram **perdidos**

há um bom tempo.

Mesmo assim, **Mercúrio** tem uma **atmosfera**. muito tênue (pressão $\sim 10^{-14} P_{\oplus}$), na maior parte H e He, provavelmente partículas do vento solar capturadas pelo campo magnético.



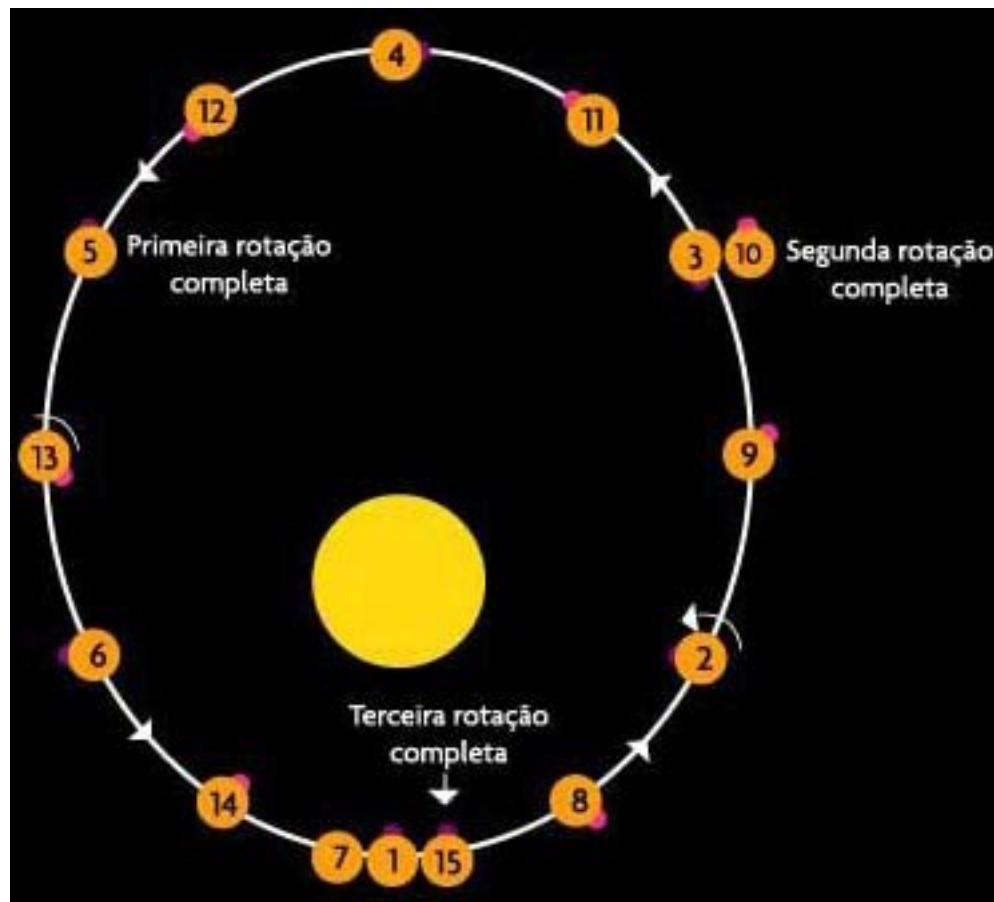
Mercúrio

Rotação (dia sideral) de 58.6 dias terrestres (d) e **Revolução** (ano sideral) de 87.9 dias em **ressonância 2:3**

=> Dia mercuriano:
 $(1/58.5 - 1/87.9)^{-1}$ d
= 175.8 d terrestres, maior que o ano mercuriano!

<https://www.youtube.com/watch?v=AUde7LFOIPs>

Juntando a isso a (quase) **falta de atmosfera**, Mercúrio tem **variações de temperatura enormes**:
dia: ~430 °C, noite: ~-170 °C

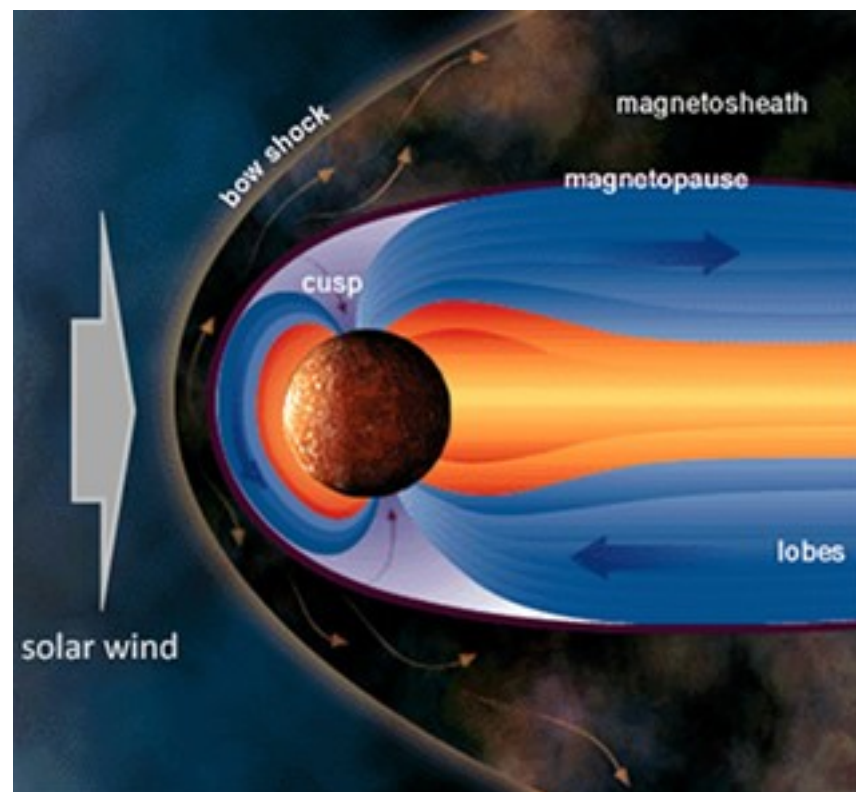


- Ainda há gelo em crateras não iluminadas nos polos!

Mercúrio

Mercúrio tem um **campo magnético fraco**, da ordem de um centésimo do da Terra, que **não** é bem **entendido**: Já que o **núcleo** deve ter se **solidificado** faz um tempo, e a **rotação** do planeta é **lenta**, o campo **não** pode ser devido a um **efeito dínamo** (efeito responsável pelos campos da Terra, dos planetas jovianos e do Sol => mais pra frente).

Campo “congelado” **sobrando** do **passado**, quando Mercúrio tinha um núcleo líquido e girava mais rapidamente?



Vênus

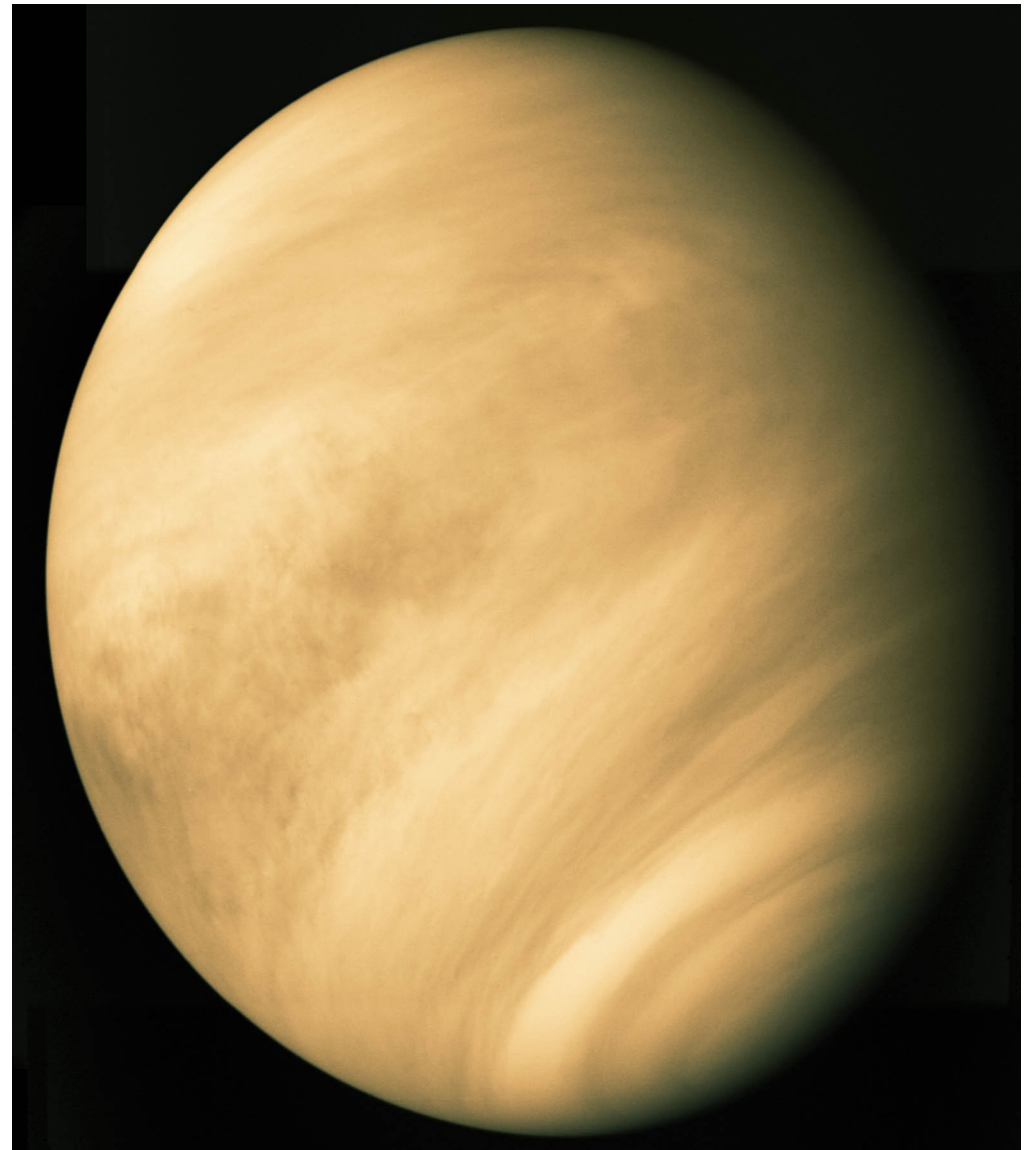
Símbolo ♀

Estrela d'Alva / da noite

Deusa grega do amor e da
beleza, “Irmã” da Terra

3º objeto mais brilhante
do céu (após Sol e Lua)

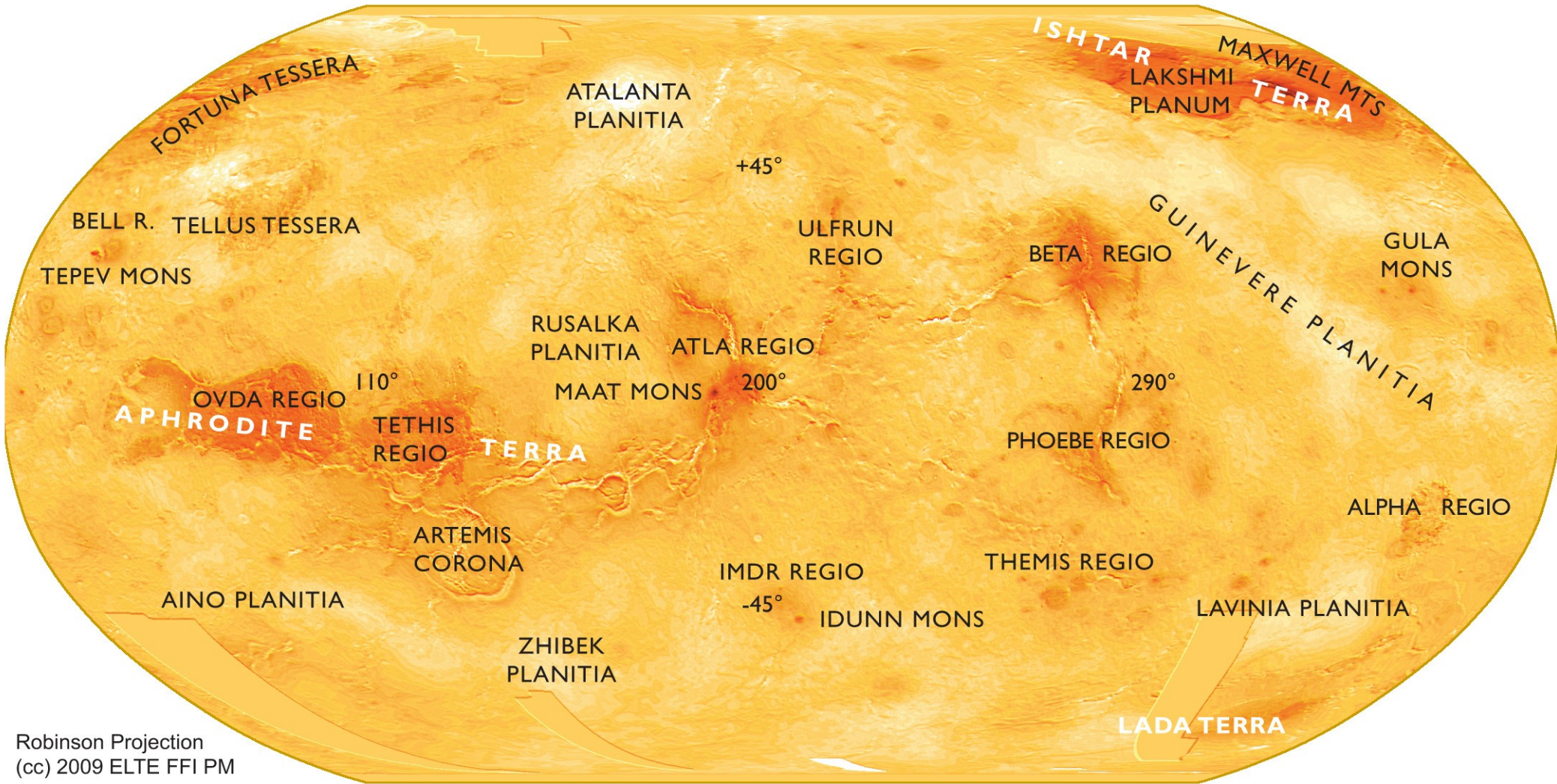
2º planeta do Sol, 0.72 AU



Mariner 10 Image of Venus

© Copyright Calvin J. Hamilton

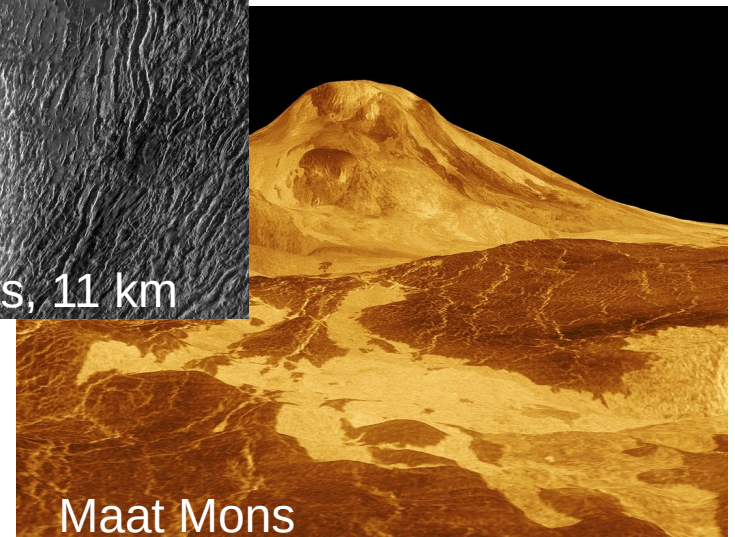
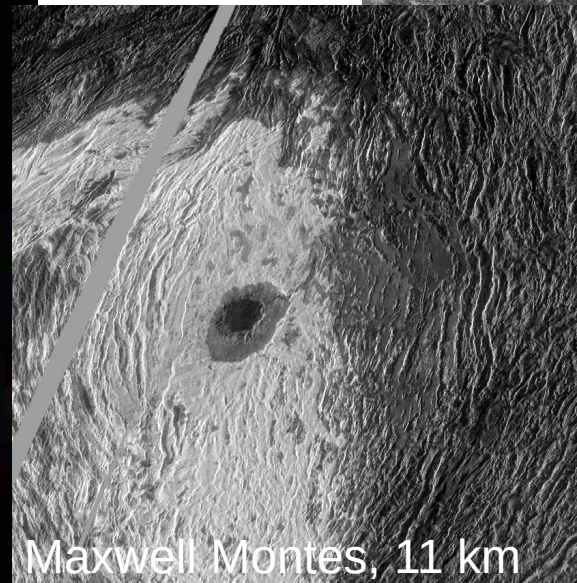
Vênus



Mapa da superfície (obtido no rádio) com os “continentes” Afrodite e Ishtar

Vênus

Geologicamente ativo,
Vulcanismo domina a superfície
=> poucas crateras de impacto



Vênus

Várias propriedades da Vênus são da **mesma ordem** que as da **Terra**: raio = $0.95 \cdot R_{\oplus}$, massa = $0.82 \cdot M_{\oplus}$,
 $R_{\text{órbita}} = 0.72 \cdot R_{\text{órbita},\oplus}$ (2º planeta do Sol).

Será que a Vênus é um lugar aconchegante?

Nosso cálculo da **temperatura** dá $327 \text{ K} = 54 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Quase agradável.

Mas Vênus tem **nuvens densos**, que **refletem** quase toda a luz incidente => albedo de 0.8 a 0.9

Assim, o cálculo da temperatura dá:

184 K a $219 \text{ K} = -89 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-54 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Um pouco frio.

Vênus

Porém, o nosso cálculo não levou em conta o **efeito estufa**, que é muito **forte** na Vênus:

Atmosfera muito densa (pressão 90 vezes a na Terra) e corrosiva, composta essencialmente por **CO₂**, algum N₂ e uma pequena quantidade de água que permitem a formação de ácidos como o HCl e o H₂SO₄.

Estas nuvens densas **retêm** o **calor**
=> **efeito estufa forte**

=> ~480 °C. Afinal não tão frio assim.



Vênus

Teoria mais provável, como se deu este efeito estufa forte:

- Inicialmente a Vênus ainda não tinha o albedo de hoje, e tinha composição similar à da Terra, incl. oceanos de **água quente** naqueles o **CO₂** da **atmosfera** estava **dissolvido**. Na **Terra**, isto ainda é o caso, e parte foi incorporada em **rochas calcárias**.
- Parte da água **evaporou**, quando a temperatura do **Sol** aumentou (=> evolução do Sol) e o planeta foi bombardeado por **planetesimais** (=> próxima aula), o que **esquentou** a **Vênus**.
- Este vapor causou um **efeito estufa**, aquecendo Vênus mais, evaporando mais água, etc. => reação em cadeia
=> **efeito estufa descontrolado**, chegando a 1800 °C

Nesta temperatura, todas as moléculas leves da atmosfera alcançaram a **velocidade de escape**, inclusive as da própria água, dissociadas pela radiação UV do Sol ($\text{H}_2\text{O} + \gamma \rightarrow \text{H} + \text{OH}$). Só **CO₂** ficou e está causando o efeito estufa atual.

Vênus

Outras chatices na Vênus:

- sempre **escuro** por causa das nuvens densas
- a já mencionada **pressão** de 9.2 MPa
- brumas de **ácido sulfúrico**

=> Não muito aconchegante.

Curiosidades:

- Vênus tem **rotação retrógrada**, de período de 243 dias terrestres. A causa não é muito clara. Acredita-se que aconteceu cedo na formação do planeta por influência dos outros planetas.
- **Sem campo magnético** => partículas do vento solar podem chegar na atmosfera superior, ionizando e causando ondas de choque.

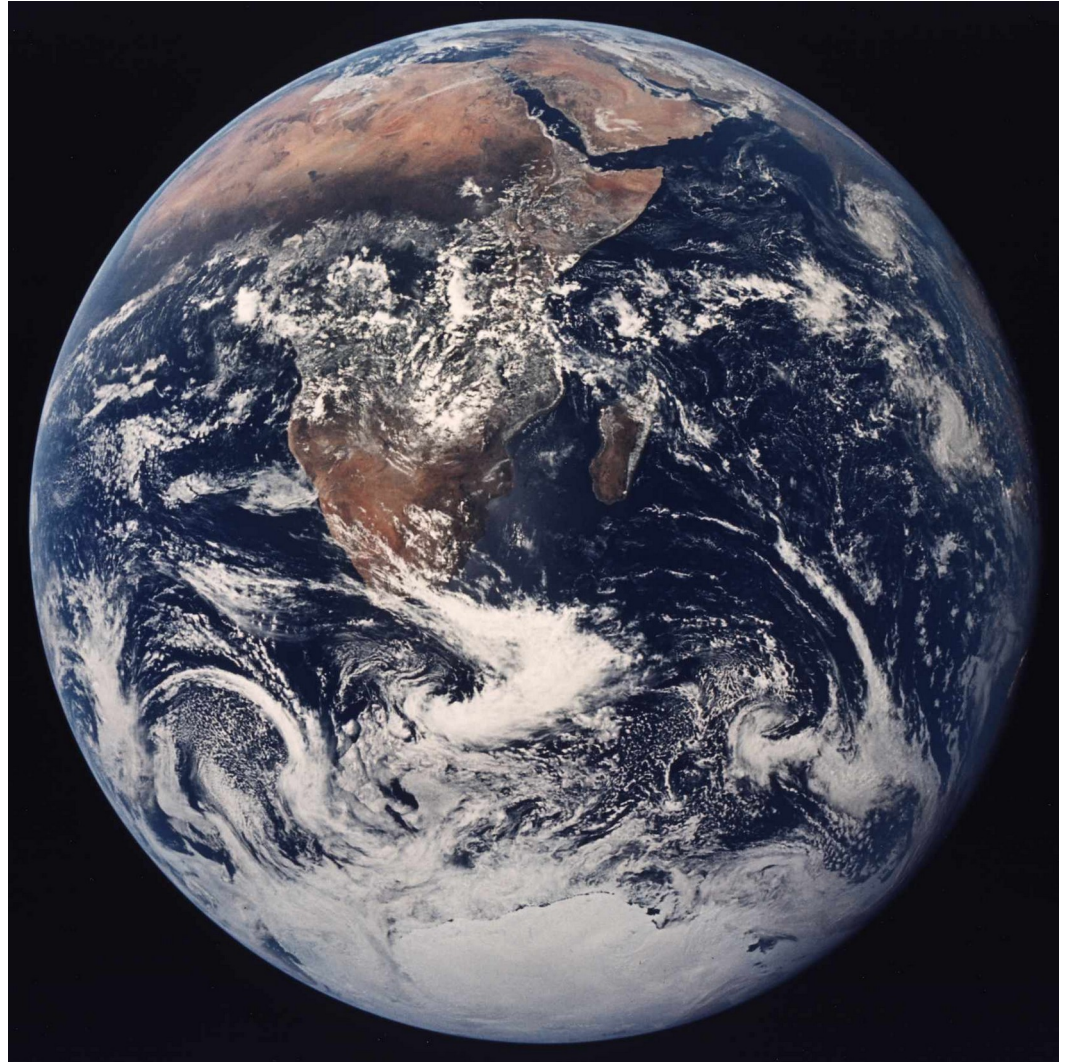
Terra

Símbolo \oplus ou ♁

3º planeta do Sol
a 150 milhões km do Sol
Massa $5.97 \cdot 10^{24}$ kg,
Raio 6378 km:
Maior planeta terrestre

Geologicamente ativo
Com intensa **atividade**
vulcânica e **sísmica**
=> poucas crateras
de impacto

Ondas sísmicas ajudam
estudar o interior.



Terra

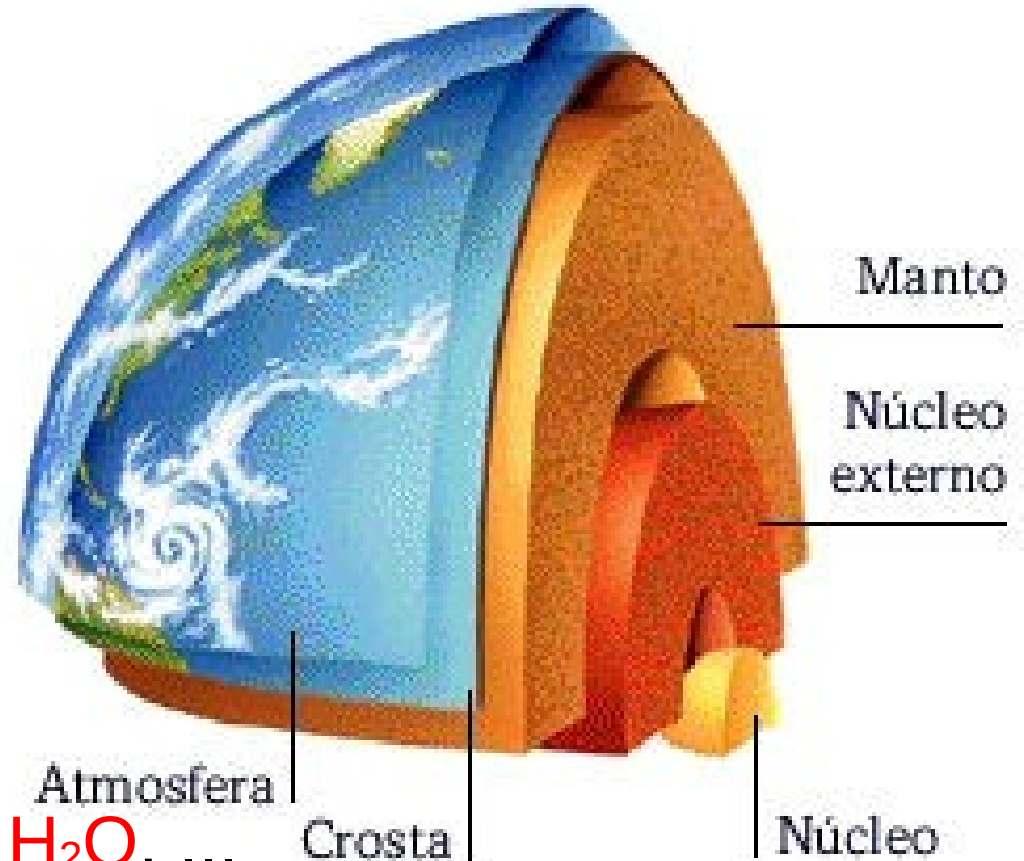
As fontes de calor interior são, além da

- **Radioatividade** já mencionada,
- **Calor residual** do processo de formação,
- **Dissipação de energia rotacional por forças de maré**, e
- Liberação de **energia potencial gravitacional** quando materiais pesados "afundam" em direção ao interior, similar ao que acontece com o He no interior dos planetas jovianos.

Terra

Composição:

- Núcleo interno de Fe e um pouco de Ni, ...
- Núcleo externo de Fe líquido
- Manto de O, Si, Mg, ...
- Crosta de O, Si, Al, ...
- Atmosfera de N₂ (77 %), O₂ (21 %), Ar (1 %), CO₂, H₂O, ...
de origem volcânica ou trazida por cometas/asteróides
A composição é parcialmente devida à existência de vida.



Planeta mais denso do Sistema Solar.

Terra

Nosso cálculo da **temperatura** dá:

- sem albedo: $279 \text{ K} = 6 \text{ °C}$

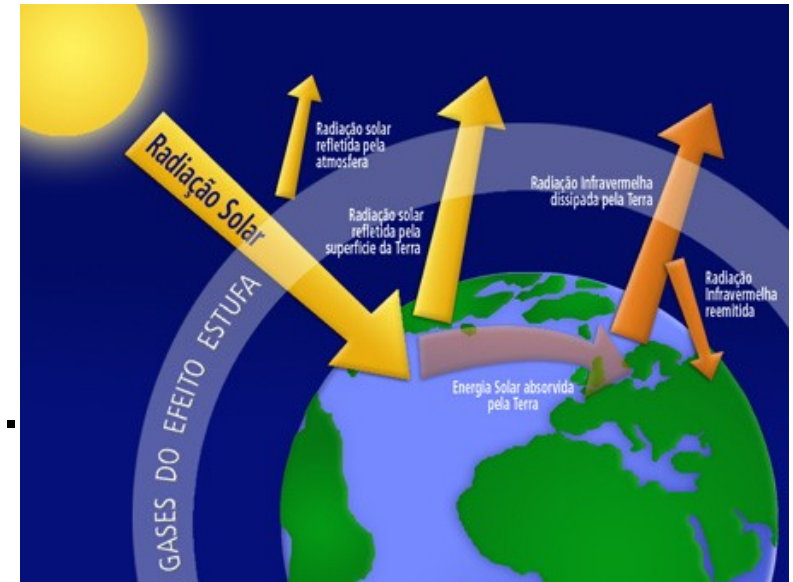
- com albedo (0.3): $255 \text{ K} = -18 \text{ °C}$

Graças a um **efeito estufa moderado**, temos $\sim +15 \text{ °C}$ na Terra.

=> Único planeta a ter **água** nos **três estados**

=> Desenvolvimento de **Vida**.

Afinal, o **efeito estufa** é o que **possibilita** a **vida** na Terra, mas **não** queremos aumentá-lo demais e chegar em um **efeito estufa descontrolado** (=> Vênus).



Terra

Apresenta um **campo magnético** produzido pelo efeito dínamo no ferro líquido do núcleo externo.

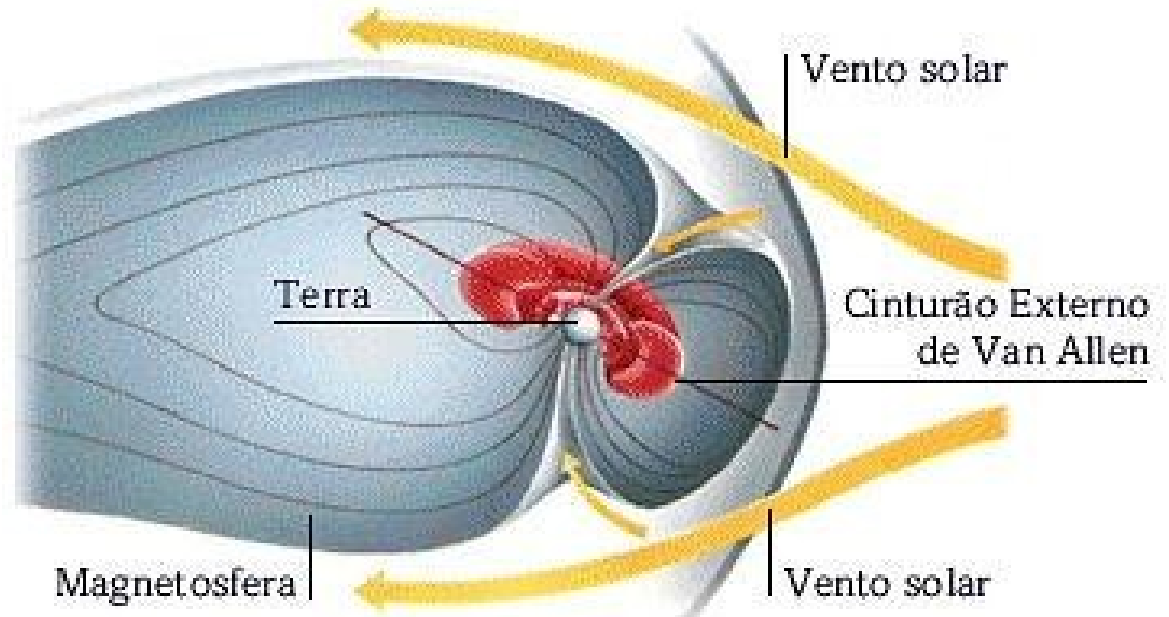
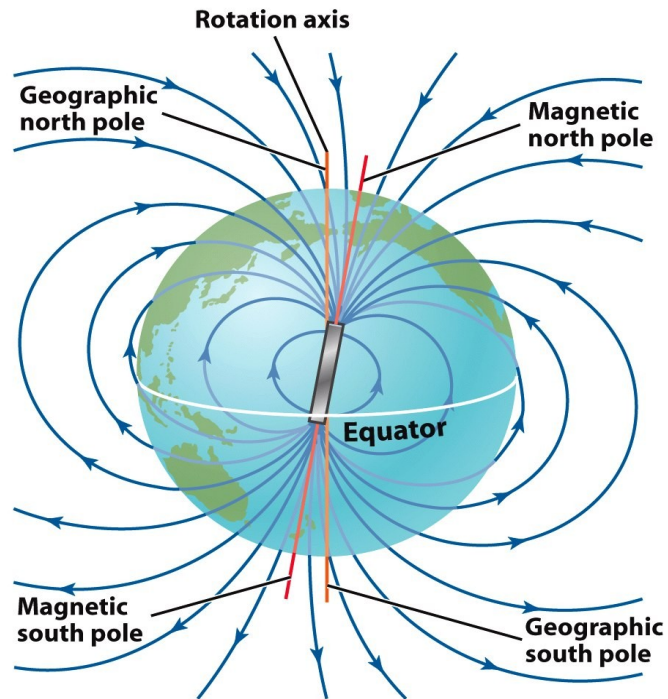


Figure 7-13b
Universe, Eighth Edition
© 2008 W.H. Freeman and Company

Este campo **protege** a Terra das **partículas carregadas** do **vento solar**, outro fator que ajudou no **desenvolvimento** de **vida**.

O campo é periodicamente revertido.

Terra

Estas partículas seguem as linhas do campo. As mais energéticas entram na **atmosfera** perto dos **polos magnéticos** da Terra (em Alaska (N) e Antártica (S)) e podem **excitar** as **partículas** da **atmosfera**. Quando estas últimas **recaem** pro estado fundamental, elas **emitem luz**, que pode ser visto como **aurora borealis** (N) ou **australis** (S).



Lua

Símbolo ☾

único **satélite natural**
da **Terra**

fica a 384 400 km, ~30
diâmetros terrestres daqui

$R_{☾} = 1737 \text{ km} \approx \frac{1}{4} \cdot R_{\oplus}$

Muitas **Crateras**, mas tem
regiões, as “**Mares**”, mais
baixas e escuras e com
menos crateras.

São **mares de lava** que chegaram na superfície e secaram
mais “recentemente” que o resto da superfície, **depois** da
época do “**bombardamento pesado**”, uns 700 mio. de anos
após a formação da Lua, que foi uns 4.6 bio. anos atrás.



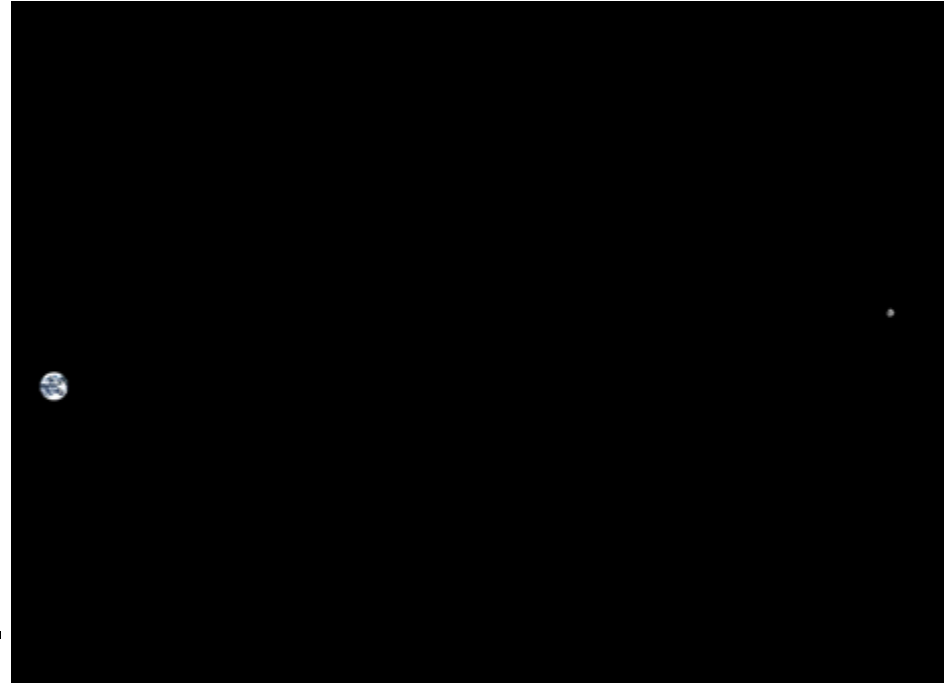
Lua

Formada junto com a Terra

Maior Satélite em relação
ao seu planeta do SS

Não possui atmosfera.

A massa do satélite,
 $0.012 M_{\oplus}$, é baixa demais
para manter uma atmosfera.

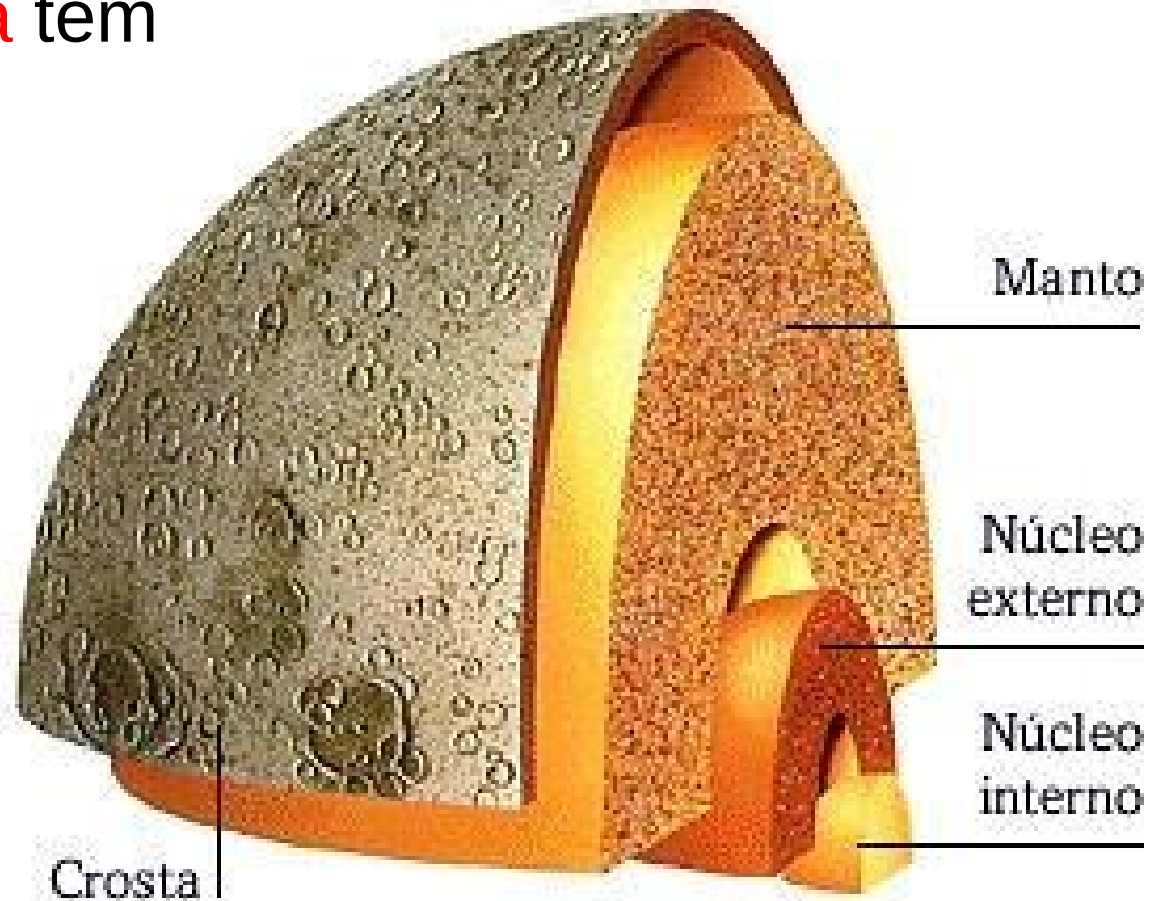


Temperaturas de $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $130\text{ }^{\circ}\text{C}$,
variação grande pelos mesmos motivos que no Mercúrio:
falta de atmosfera e dias longos.

(pergunta: quanto tempo dura um dia lunar?)

Lua

As camadas da Lua têm composição similar que aquelas da Terra, dica que as duas têm uma origem comum.



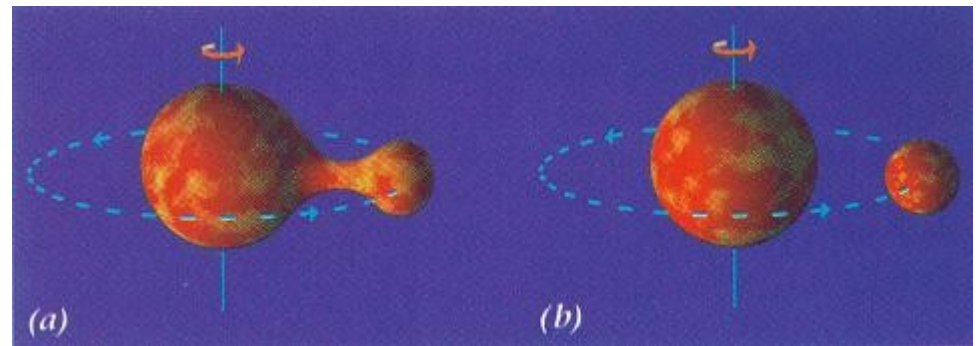
Lua

4 teorias sobre seu surgimento

- **Co-creação**: Terra e Lua se formaram **ao mesmo tempo** a partir da **Nebulosa Solar**.

Porém: A **composição química** dos dois mundos **não** é suficientemente **similar**.

- **Fissão**: Lua era **parte da Terra** até se **separar** da mesma devido a sua **rotação**.



Mas: A Terra deveria ter girado (e ainda girar) muito rapidamente para isto; Os **eixos** da rotação da Terra e da revolução da Lua **não são paralelos**; A **composição química** dos dois **não** é suficientemente **similar**.

Lua

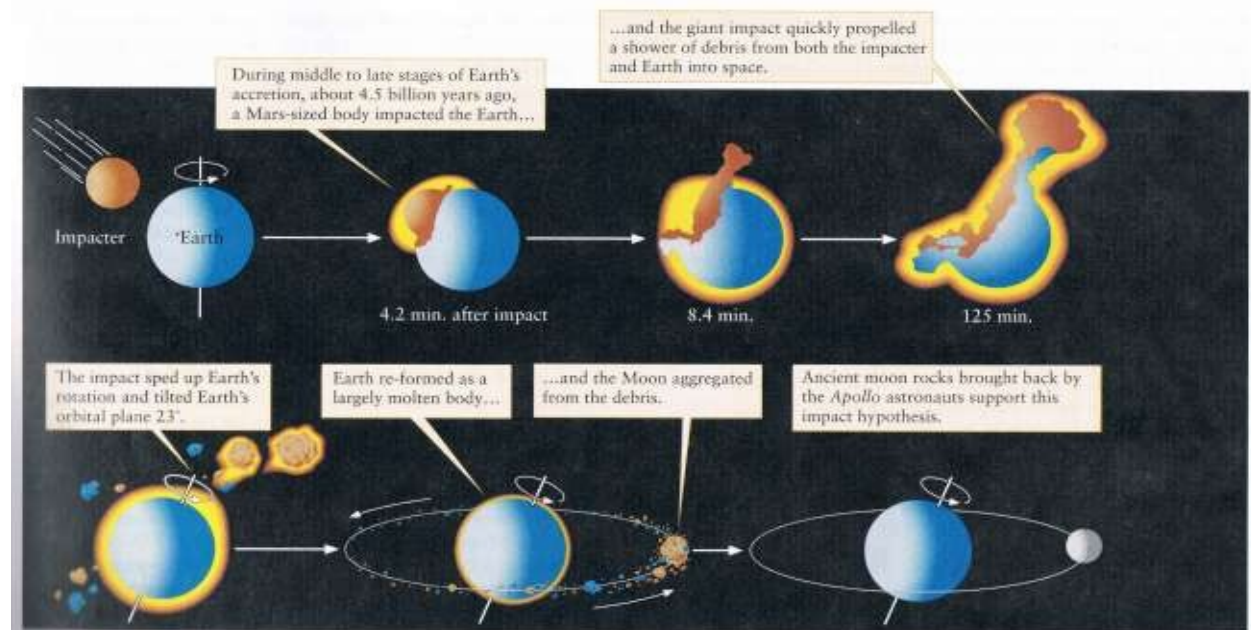
- **Captura**: Lua se formou em **outro lugar** do cosmos e foi **capturada** pela **gravidade** da Terra.

Mas: A **captura** de um corpo tão grande é **difícil** de realizar, e a **composição química** é **similar demais** (a Lua teria que ter um caroço de ferro).

- **Colisão**: Lua era **parte da Terra** e foi **separada** da mesma por um **impacto** com algum **objeto celeste** do tamanho de Marte chamado Theia.

Acha-se que a Lua é composta por silicatos do manto do segundo corpo e com pouco Fe além de porção similar de O com a Terra.

A última, **colisão**, é vista como a mais provável.



Lua

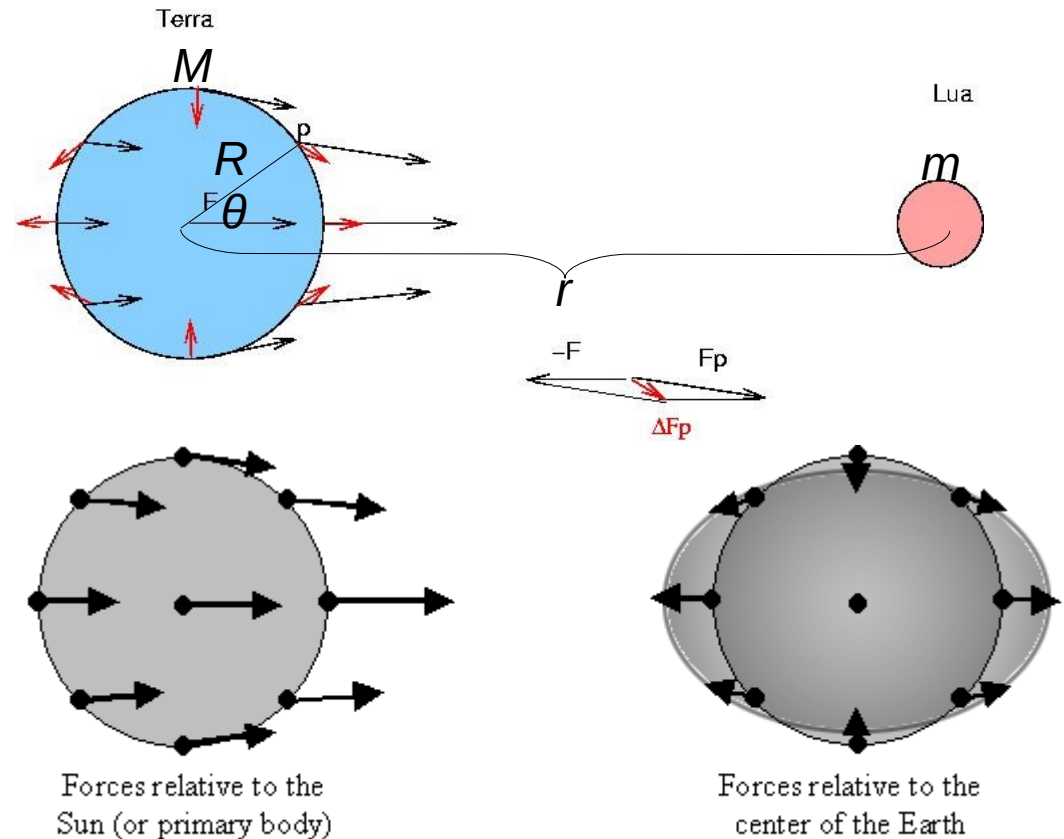
Marés

A Lua atrai os pontos da Terra mais próximos mais fortemente que os pontos mais distantes

=> ela aplica **forças diferenciais**, ou **forças de maré** no nosso planeta (=> quadro):

$$\Delta F = GMmR/r^3 \cdot (2\cos\theta, -\text{sen}\theta) \text{ prop. } r^{-3}$$

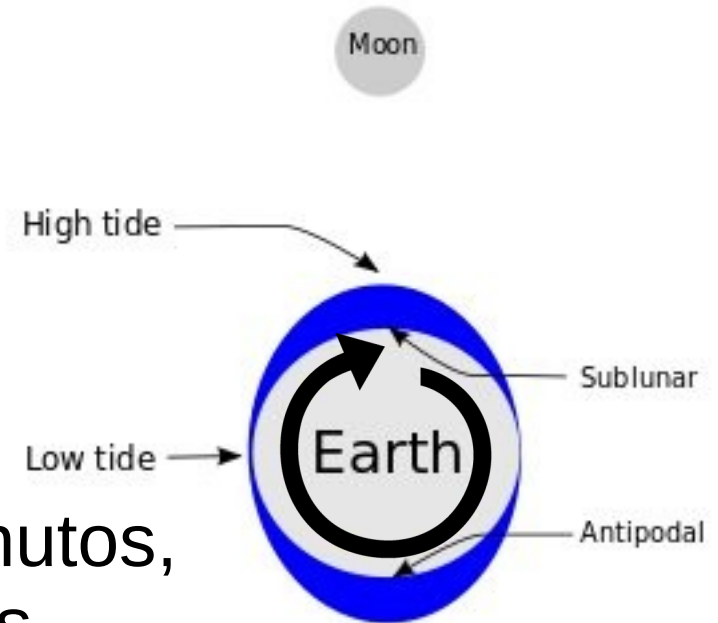
Isto causa “montanhas de água” no lado da Terra que é orientado para a Lua e no lado oposto.



Lua

Marés

Por causa da **rotação** da **Terra** e da **revolução** da **Lua**, estas elevações se propagam pela superfície da Terra, causando **marés altas** cada 12 horas e 25 minutos, e **marés baixas** entre as marés altas.



As marés também acontecem com a crosta da Terra, elevando o chão por 10 cm durante maré alta, e com a crosta da Lua, deformando-a por até ~20 m.

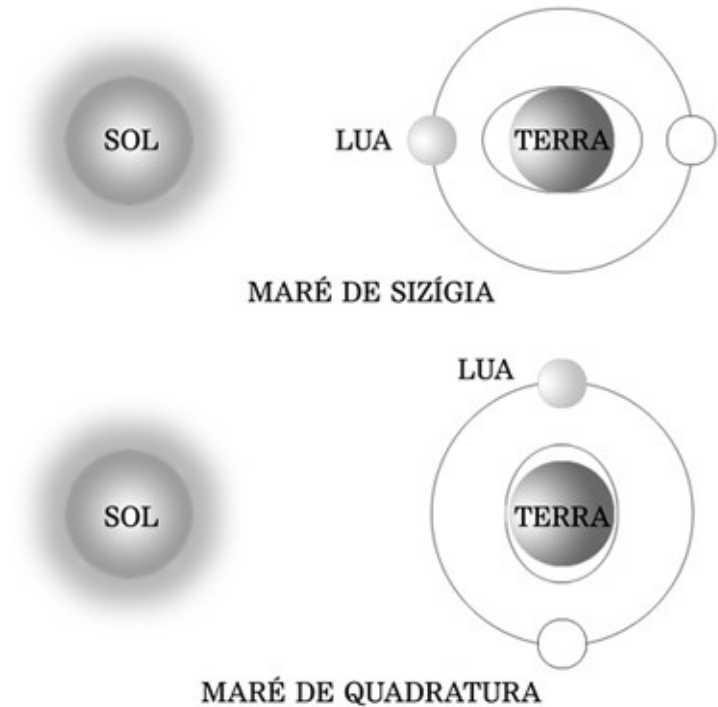
Lua

Marés

O **Sol** também aplica **forças de maré** na Terra, menores que as devidas à Lua.

Quando Terra, Lua e Sol estão **alinhados**, durante **lua cheia** ou **nova**, estas forças **amplificam** as da Lua, causando marés extra altas e baixas, chamadas **marés de sizígia** (alinhamento) ou **vivas**.

Durante os **quartos crescente** e **minguante**, elas **reduzem** as da Lua, causano **marés de quadratura** ou **mortas**.



Lua

Marés

As marés se propagando pela Terra causam **forças de fricção**, que **freiam** a **rotação** da **Terra**, tal que a **duração** de um **dia aumenta** por 0.0016 s cada século.

O **momento angular** perdido pela Terra é **transferido** pra **Lua**, **aumentando** a **órbita** desta, tal que ela se **afasta da Terra** por 3 a 4 cm cada ano, e a **duração** do **mês aumenta** (mas a uma taxa menor que a rotação da Terra).

Em consequência o tamanho angular da Lua no céu diminuirá, tal que num futuro distante, não haverá mais eclipses solares totais (só anelares).

Lua

Marés

Teoricamente, isto continua até que a rotação da Terra e a revolução da Lua estarão **sincronizadas**, chamado **ressonância** dos períodos.

Naquele momento, a Terra ficará sempre com o mesmo lado voltado pra Lua. Visto da Terra, a Lua ficará sempre na mesma posição no céu.

O dia e o mês durarão o mesmo tempo de 47 dias atuais.

Lua

Marés

Isto já aconteceu com a **Lua** há tempão, já que a **Terra** também aplica **forças de maré** nela, muito **mais fortes**.

=> A Lua sempre mostra o **mesmo lado** pra Terra.

O outro lado, o lado oculto, ou negro ou escuro, só foi observado por um satélite em 1959.



Terra sobre o horizonte da Lua

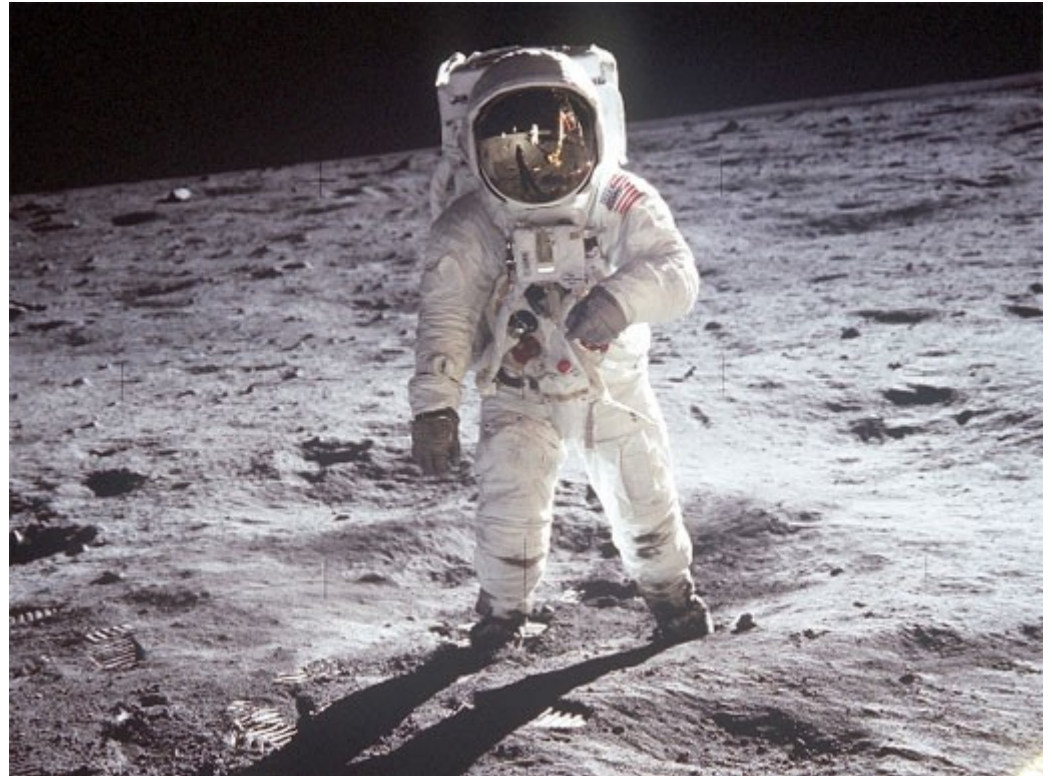


O lado oculto da Lua

Lua

O nosso satélite é o **único corpo celeste visitado por humanos** até agora.

primeira visita:
20/07/1969,
Neil Armstrong,
Edwin Aldrin
e Michael Collins
na espaçonave Apollo 11



6 visitas até dezembro 1972.

Desde então nunca mais voltamos.

Marte

Símbolo ♂

Deus da guerra,
“Estrela” vermelha,
“Irmão” da Terra

4º planeta do Sol, 1.52 AU
=> ano marciano: 1.88 a_⊕

$$R_{♂} = 0.53 \cdot R_{⊕}$$

$$M_{♂} = 0.107 \cdot M_{⊕}$$

Assemelha-se à Terra em
vários aspectos:

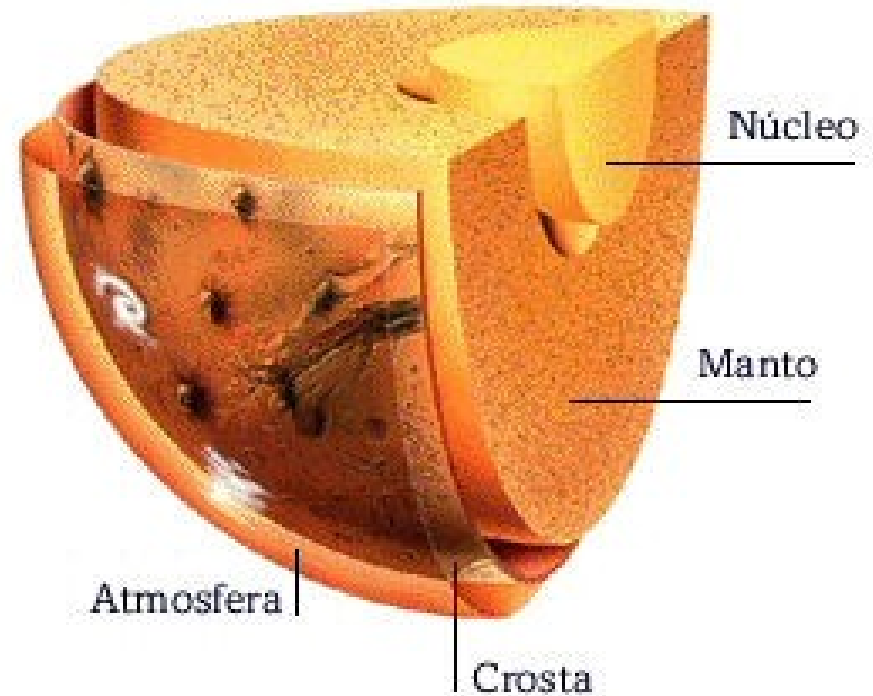
- **Atmosfera** de CO₂, N₂, Ar e O₂,
- **Gelo** nos **polos**,
- **“Tempo”**: Tempestades e nuvens,
- **Dia** de ~25 horas,
- **Estações**.



Marte

Composição:

- **Núcleo interno** de Fe, Ni e S
- **Manto** de O, Si, Mg, ...
- **Crosta** de **Silicatos** e bastante Fe que oxida em contato com a atmosfera => cor vermelha (ferrugem)
- **Atmosfera** de CO₂ (96 %), N₂, Ar e O₂, traços de H₂O e metano (provavelmente de origem vulcânica) também são encontrados.



Marte

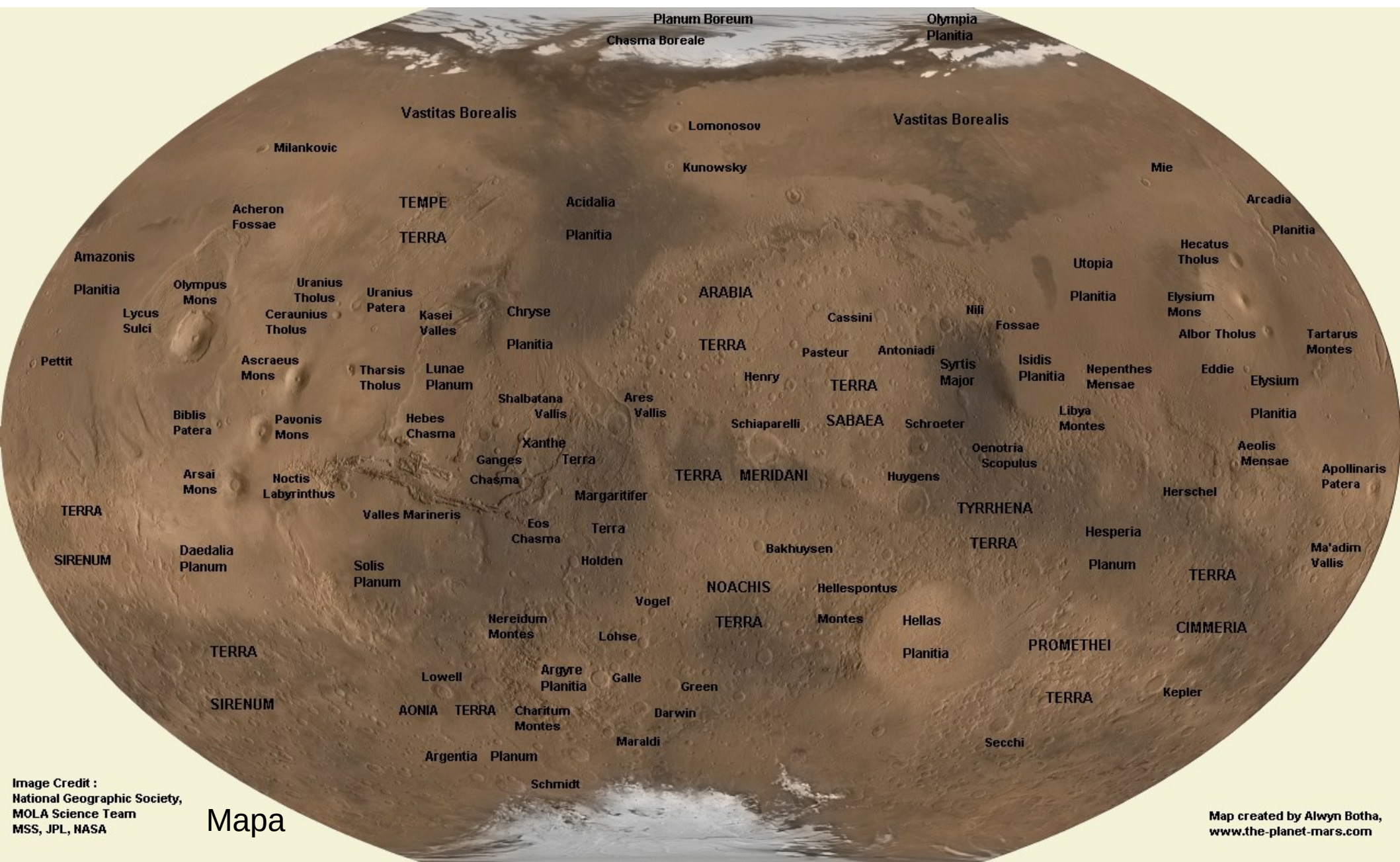


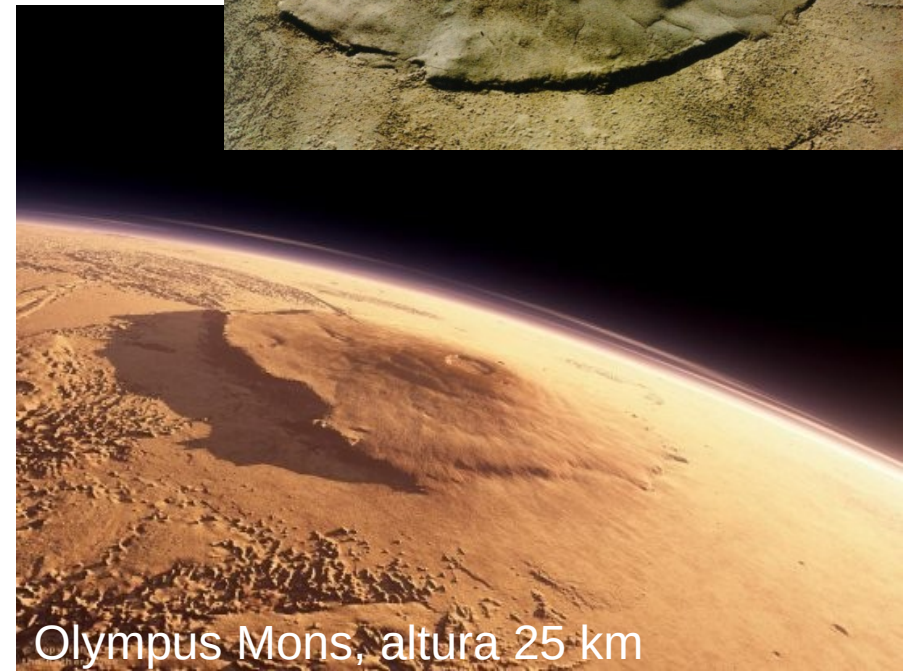
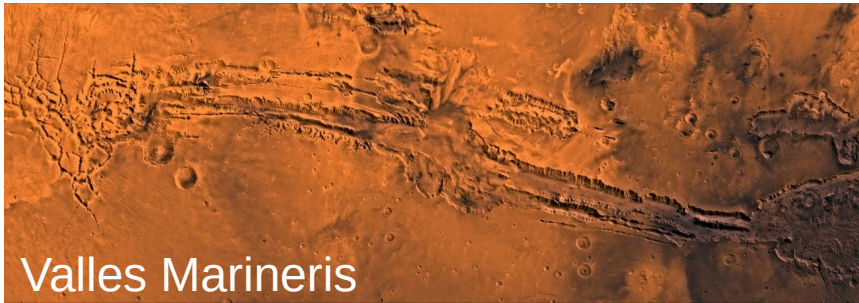
Image Credit :
National Geographic Society,
MOLA Science Team
MSS, JPL, NASA

Mapa

Map created by Alwyn Botha,
www.the-planet-mars.com

Marte

Numerosos **Vulcões inativos** e fraturas na crosta. As montanhas mais altas do Sistema Solar



23/04/2019: a sonda aterrissadora InSight possivelmente detectou "Martemotos" (talvez o vulcanismo não seja totalmente inativo ainda).

Marte

Nosso cálculo da **temperatura** dá:

- sem albedo: $226 \text{ K} = -47 \text{ °C}$

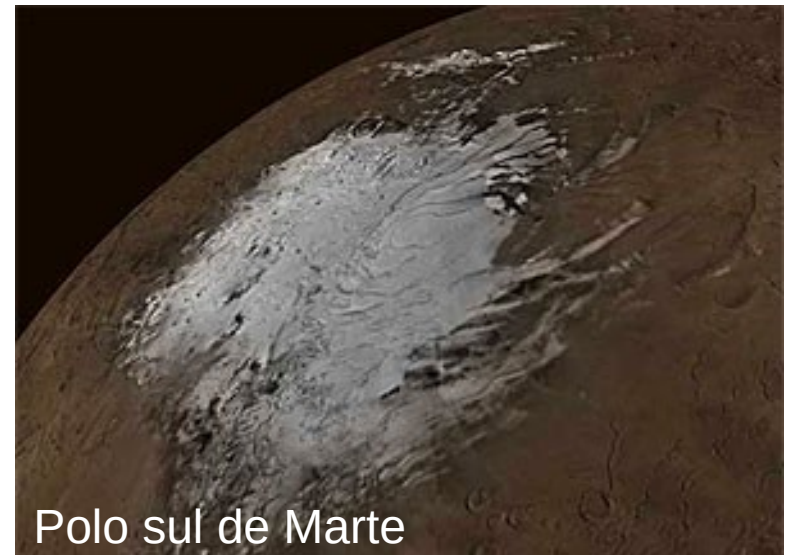
- com albedo (0.15): $210 \text{ K} = -62 \text{ °C}$,

bem perto da média das temperaturas reais de -140°C à 20°C ,

já que a **atmosfera rarefeita** (pressão ~ 140 vezes menor que na Terra) **não** causa um grande **efeito estufa**.

=> tem **gelo** nos polos e possivelmente **permafrost**.

Maior parte do gelo é **gelo seco**, CO_2 sólido, mas parte é **gelo de água**.



Polo sul de Marte

Marte

Tem **água líquida** em **Marte**?

Há dicas (**vales**, “**canais**”) de que já teve água.

Em 2017, o robô Curiosity detectou **sedimentos** típicos de rios e faz pouco (anunciado 07/06/2018), **compostos orgânicos** complexos.

=> teve água **no passado**.
As condições podem ter sido favoráveis à vida
(=> aula astrobiologia).



Marte

Tem **água líquida** em **Marte**?

Porém, com a **baixa pressão** atmosférica no presente, nas condições atuais água líquida na superfície **evapora** logo.

Em 2018, o radar MARSIS a bordo da sonda Mars Express achou dicas para um lago subterrâneo de água líquida perto do polo sul marciano.



Mars Express



A localização do lago subterrâneo

Marte

Como a água líquida na superfície de Marte sumiu?

Hipótese: **Água** no passado movia-se livremente (chuva?) e **aprisionou CO₂** em **rochas**.

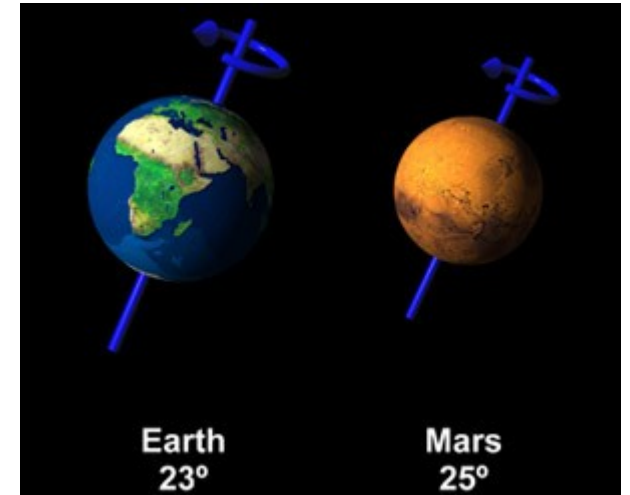
Com menos CO₂ na atmosfera, o **efeito estufa diminuiu**.

A **temperatura diminuiu** e a água **congelou**, deixando o planeta seco.

O **clima atual** conta com **tempestades de poeira** e **variações de pressão** com a **estação** do ano, já que o **CO₂** da atmosfera **congela** no **inverno**.

Marte

Segundo cálculos o **ângulo** do **eixo rotacional** de Marte em relação ao seu **eixo orbital**, atualmente de 25.19° (valor perto do da Terra, por acaso), deve **variar** entre 0° e 60° em escalas de tempo curtas da ordem de milhões de anos, devido a **interações** com o **Sol** e os outros **planetas**, e à **falta** de uma **lua grande estabilizante** como a nossa.



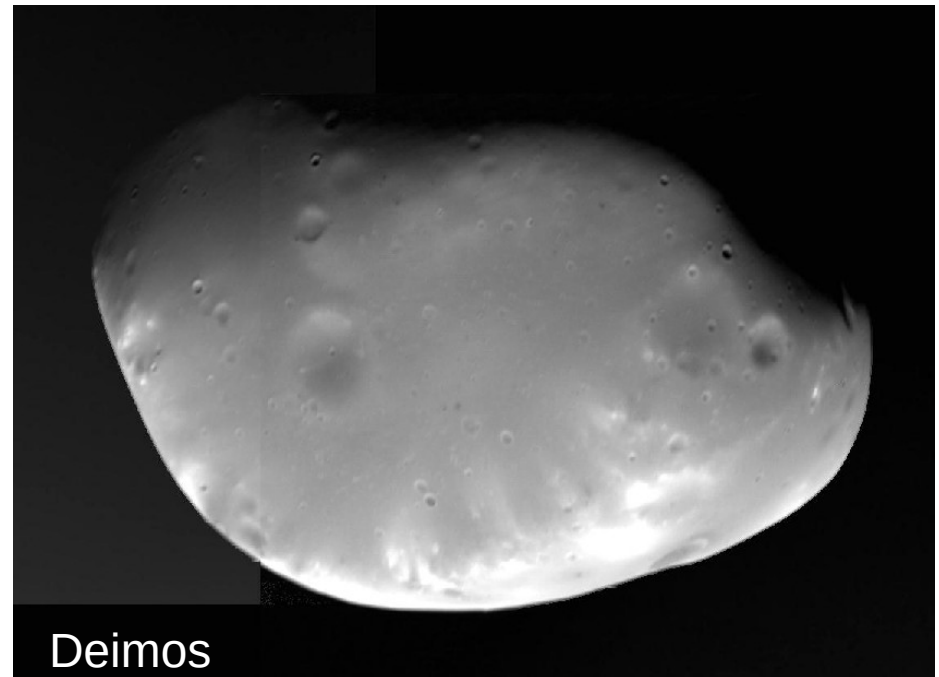
Cálculos detalhados precisam da Relatividade Geral!

Possivelmente teve **épocas**, naquelas os **polos descongelaram** (grande ângulo entre os eixos) e outras, naquelas a **atmosfera** como um todo **congelava** (ângulo pequeno).

Marte

2 Luas: **Phobos** e **Deimos**

Na mitologia grega, Phobos, “medo”, e Deimos, “pânico”, acompanharam o deus da guerra, Marte.



Marte

Phobos

28 km de diâmetro

- a 6000 km da superfície de Marte

=> lua mais **próxima** do seu planeta do Sistema Solar, e está se aproximando mais! Porém provavelmente será desrompido por forças de maré antes de bater em Marte.

- orbita Marte em 7:39 h, menos que a rotação de Marte.

- semelhanças com **asteróides**.



Marte

Deimos

16 km de diâmetro

- Tão pequena que parece uma estrela visto de Marte (raio orbital: 23 459 km).
- orbita Marte em 30:17 h.
- também semelhanças com **asteróides**
- Provavelmente Phobos e Deimos são **asteróides capturados**.



Resumo

Características dos planetas interiores (telúricos)

Table 7-1 Characteristics of the Planets

	The Inner (Terrestrial) Planets			
	Mercury	Venus	Earth	Mars
Average distance from Sun (10^6 km)	57.9	108.2	149.6	227.9
Average distance from Sun (AU)	0.387	0.723	1.000	1.524
Orbital period (years)	0.241	0.615	1.000	1.88
Orbital eccentricity	0.206	0.007	0.017	0.093
Inclination of orbit to the ecliptic	7.00°	3.39°	0.00°	1.85°
Equatorial diameter (km)	4880	12,104	12,756	6794
Equatorial diameter (Earth = 1)	0.383	0.949	1.000	0.533
Mass (kg)	3.302×10^{23}	4.868×10^{24}	5.974×10^{24}	6.418×10^{23}
Mass (Earth = 1)	0.0553	0.8150	1.0000	0.1074
Average density (kg/m^3)	5430	5243	5515	3934

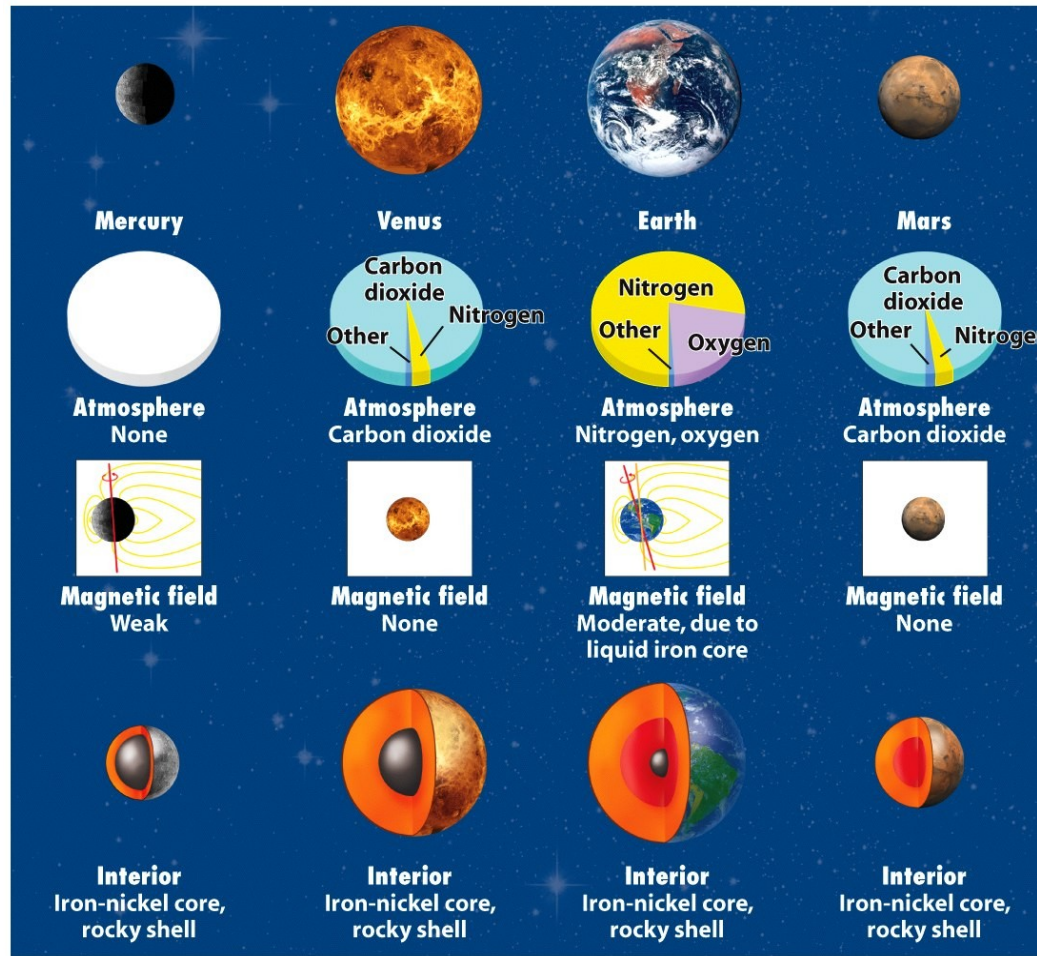
Table 7-1 part 1

Universe, Eighth Edition

© 2008 W. H. Freeman and Company

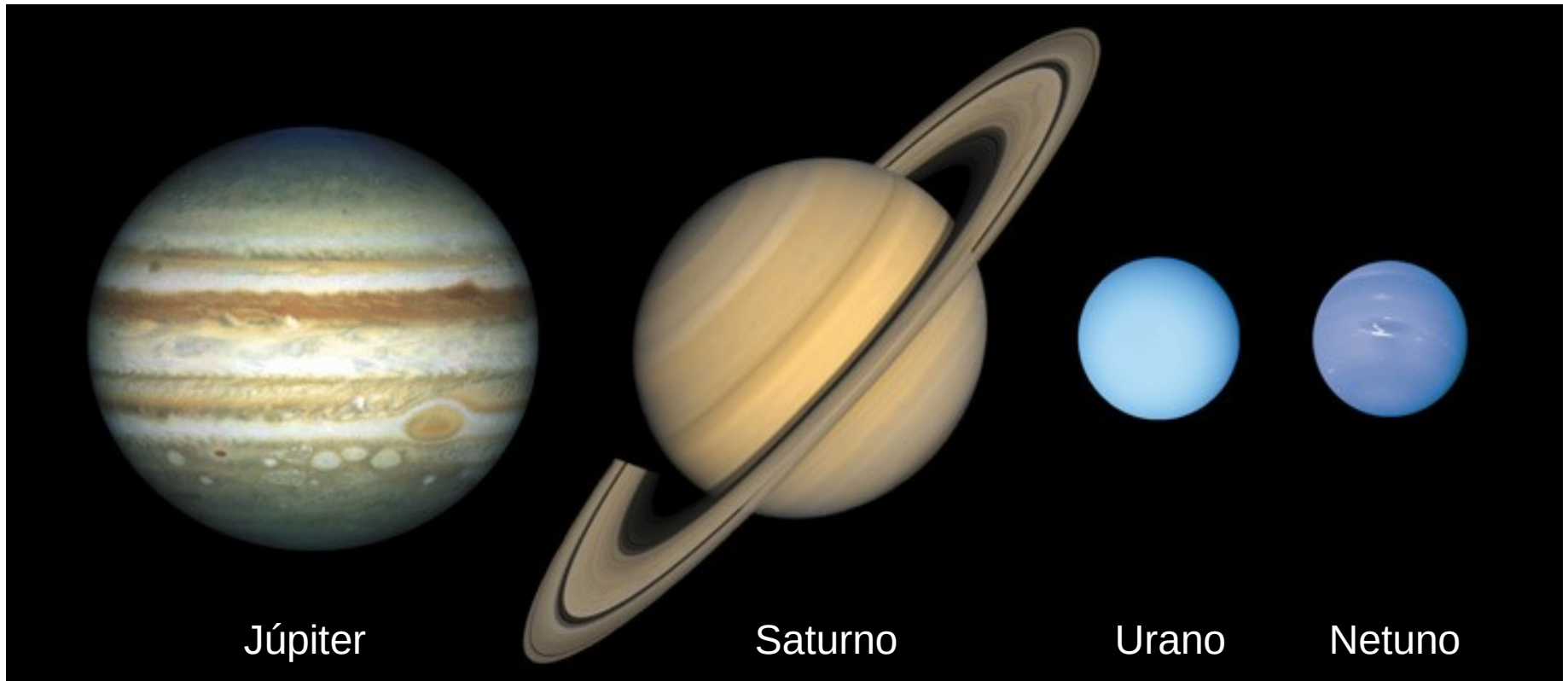
Resumo

Características dos planetas interiores (telúricos)



Planetas Exteriores

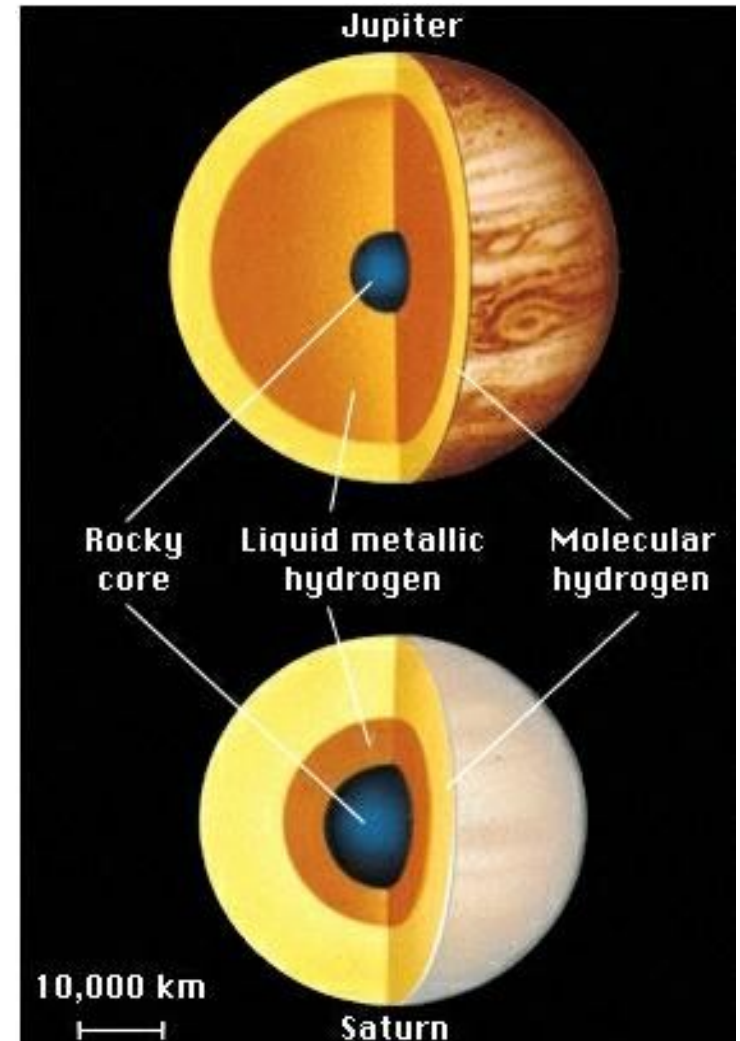
Ou Jovianos ou Gigantes Gasosos e Gelosos



Planetas Exteriores

Júpiter e Saturno: gigantes gasosos:

- **caroços sólidos e densos** de **gelo e “rocha”** : Mg, Si, Fe, ...:
10 a 15 M_{\oplus} , equivalendo a
3 % resp. 16 % da massa total
- **maior parte é atmosfera** de
composição **“solar”**: H_2 e He,
outros elementos (O, C, N, S)
 $\leq 1 \text{ ‰}$,
na forma dos compostos
 H_2O , CH_4 , NH_3 , H_2S



Planetas Exteriores

Urano e Netuno: gigantes “gelosos”:

- **caroços** de $\sim 13 M_{\oplus}$, correspondendo a **85 % a 95 % da massa total**
- atmosferas contêm **mais gelo** e **mais elementos pesados**, i. e. C $\sim 3 \%$, que as de Júpiter e Saturno



Planetas Exteriores

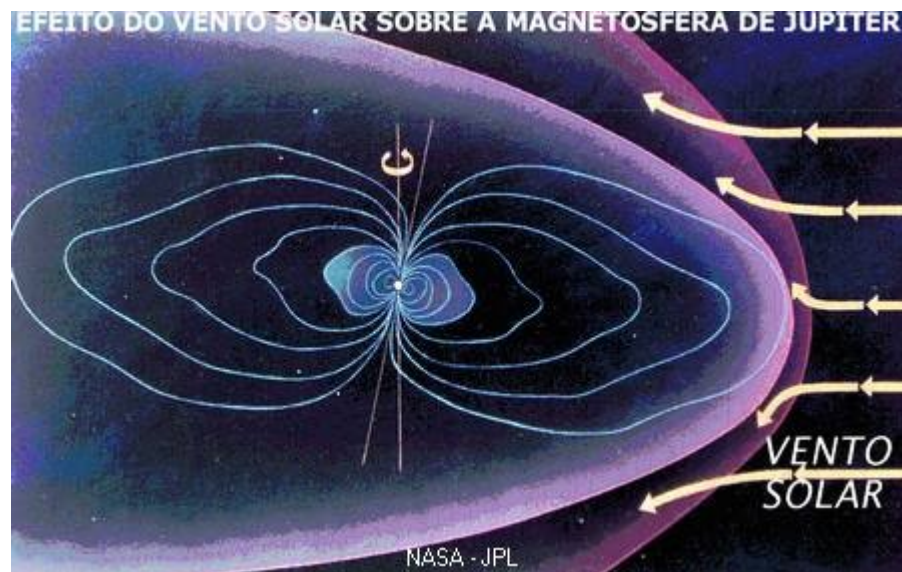
Rotação rápida

(0.4 a 0.7 dias terrestres) +
boa parte **líquida** e **gasosa**
=> mais **achatados** que os
planetas terrestres

A rotação é **diferencial**
(mais rápida no equator).

Esta rotação rápida,
especialmente do caroço externo,
que é **hidrogênio metálico líquido**
com **moléculas ionizadas** dissol-
vidas nele, causa **campos magné-
ticos fortes** pelo efeito dínamo.

Estes levam a auroras ultravioletas.



Sobreposição de uma imagem no
ótico de Júpiter com uma no UV

Júpiter

Símbolo ♃

Rei dos deuses gregos

5º planeta do Sol, 5.2 AU

4º mais brilhante objeto no céu

$$R_{\text{♃}} = \sim 11 R_{\oplus}$$

$$M_{\text{♃}} = 1.9 \cdot 10^{27} \text{ kg} = \sim 318 M_{\oplus}$$

=> **Maior planeta** e de **maior massa** do **Sistema Solar**

densidade média: 1326 kg/m^3

Rotação 0.41 dias terrestres

Revolução: 11.8 anos terr.

Temperatura média: -148°C



Júpiter

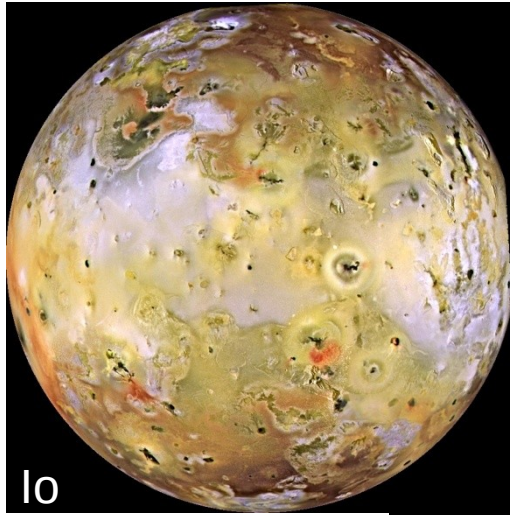
Faixas se devem às **nuvens** de amoníaco, hidrossulfeto de amônio e água, e à **rotação diferencial**.

Grande Mancha Vermelha: Tempestade com ventos > 500 km/h, e diâmetro maior que o da Terra, existe > 300 anos



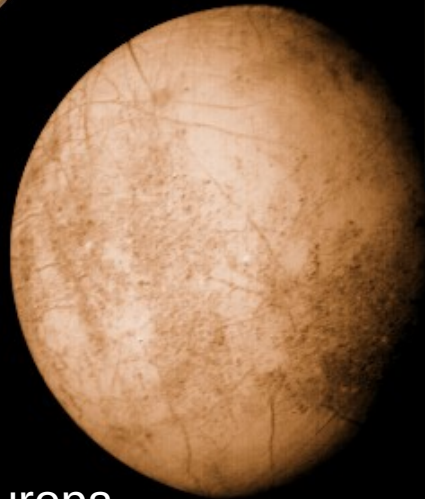
As Luas de Júpiter

> 90 luas (92 encontradas até agora),
entre elas as 4 Luas galileanas



Io

vulcanismo (nove vulcões) => coberto por S, SO₂, constantemente deformado por forças de maré devidas a Júpiter, Europa e Ganímedes



Europa



Ganímedes

maior lua do SS (> que Mercúrio), superfície de gelo com crateras



Calisto

similar a Ganímedes

distância de Júpiter →

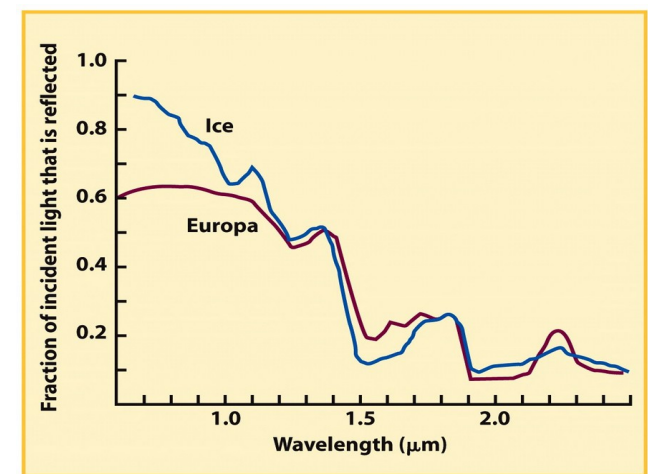
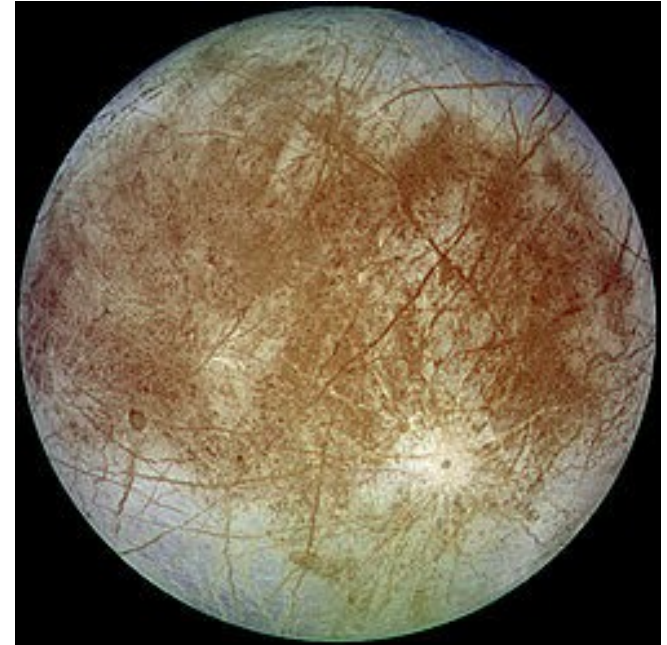


As Luas de Júpiter

Europa

- **caroço** rico em **ferro**
- **manto** de **silício**
- capa de **gelo** (\Rightarrow espectro) que protege um **possível oceano** de ~ 150 km de profundidade mantida líquida por calor produzido por interações de maré com Júpiter e outras luas, também responsáveis pelas rachaduras na superfície
- praticamente sem crateras
- Fina **atmosfera** de **O₂** (95 %) e H₂

Um dos **possíveis** locais **habitáveis** no Sistema Solar (\Rightarrow aula astrobiologia).



The spectrum of light reflected from Europa

As Luas de Júpiter

Luas galileanas formadas **juntas** com o Júpiter da **mesma** nuvem de gás

Montante de **voláteis** (H, He, H₂O, CO₂, ...) **aumentando** com a distância de Júpiter

Todas girando no **mesmo sentido**, como se fosse um mini Sistema Solar

Io, Europa, Ganímedes: períodos de revolução em **ressonância** 1:2:4



ideia dos tamanhos das luas galileanas

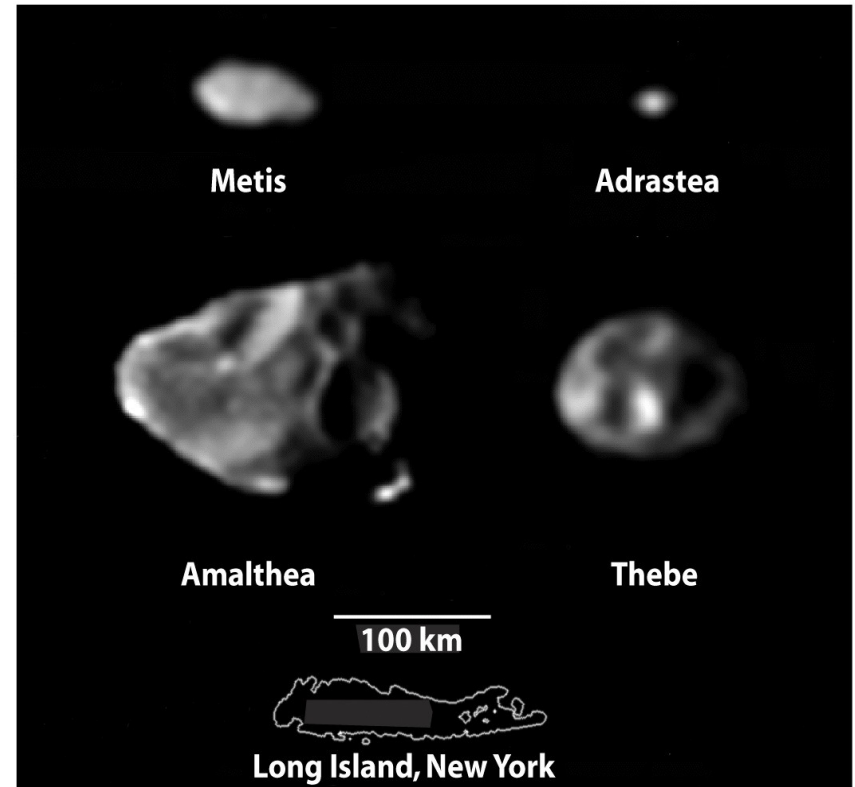
As Luas de Júpiter

Tem mais de 80 **luas menores** (88 conhecidas até hoje, as últimas 12 descobertas em 2023),

algumas orbitam no mesmo sentido que as galileanas, algumas retrogradamente, algumas em planos que têm nada a ver com o plano das luas galileanas.

Asteróides capturados?

Pedaços de um maior satélite destruído por uma colisão?



Saturno

Símbolo ♄
Deus da
agricultura

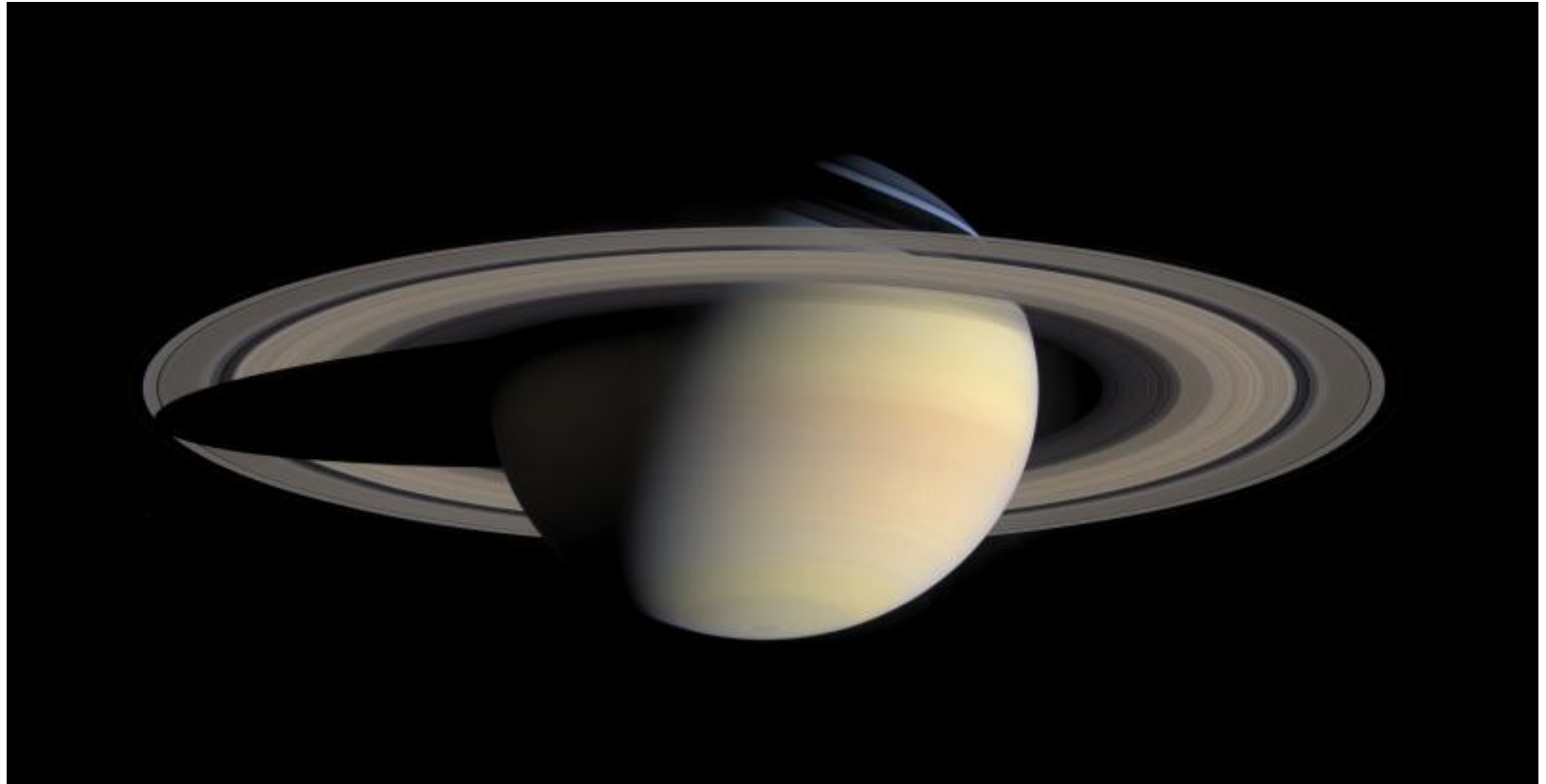
6º planeta
do Sol,
Último(?)
planeta
visível a
olho nu

tamanho:

só um pouco menor que Júpiter, mas massa $\approx 1/3 \cdot M_{\text{J}}$
por causa da pressão menor

=> densidade baixa: 687 kg/m^3 (mais baixa que a de água)

Rotação: 0.44 dias, Revolução: 29.4 anos, $T_{\text{méd.}}: -178 \text{ }^\circ\text{C}$



As Luas de Saturno

Titã

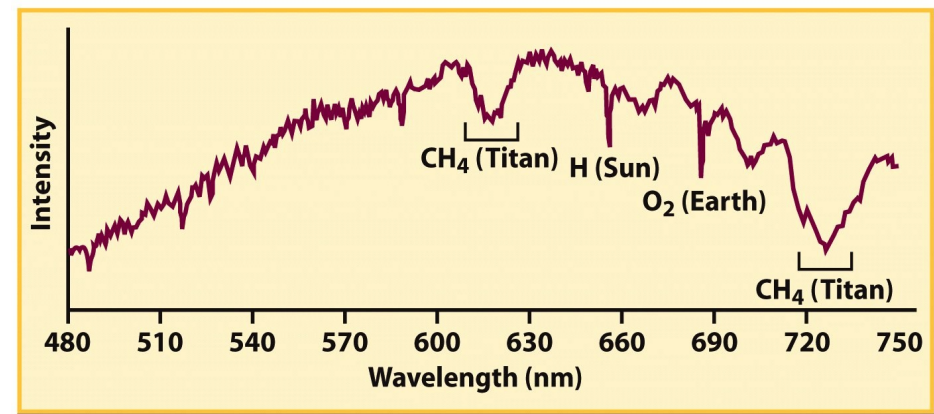
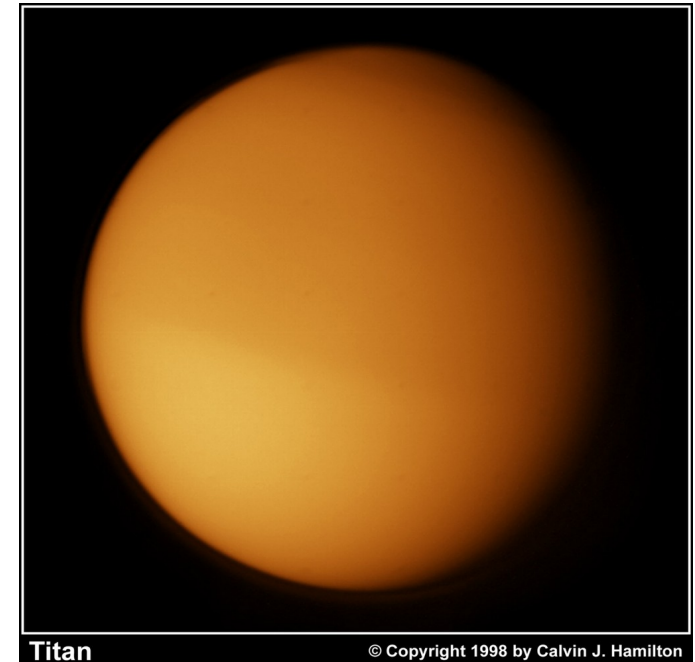
2ª maior lua do Sistema Solar

Metano líquido na superfície,
-180 °C

Atmosfera densa (1.5 atm) de N₂
rica em **metano** (CH₄ => espectro),
moléculas orgânicas e **água**

Às vezes chove metano,
"ciclo do metano(/etano)"

Condições **similares** à **Terra**
na época do **surgimento** da
vida (=> aula astrobiologia)

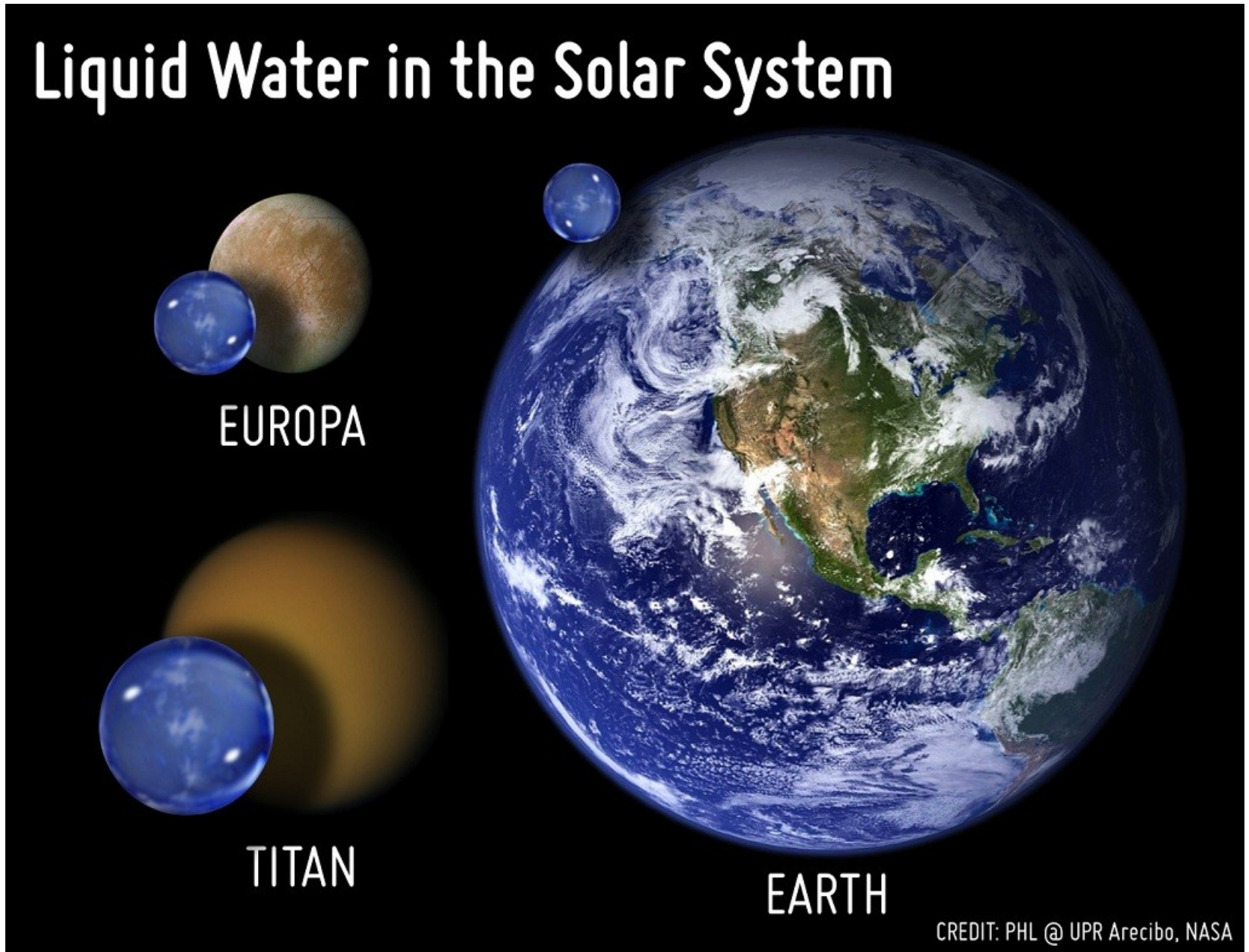


The spectrum of sunlight reflected from Titan

Figure 7-3b
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

As Luas de Saturno

Titã



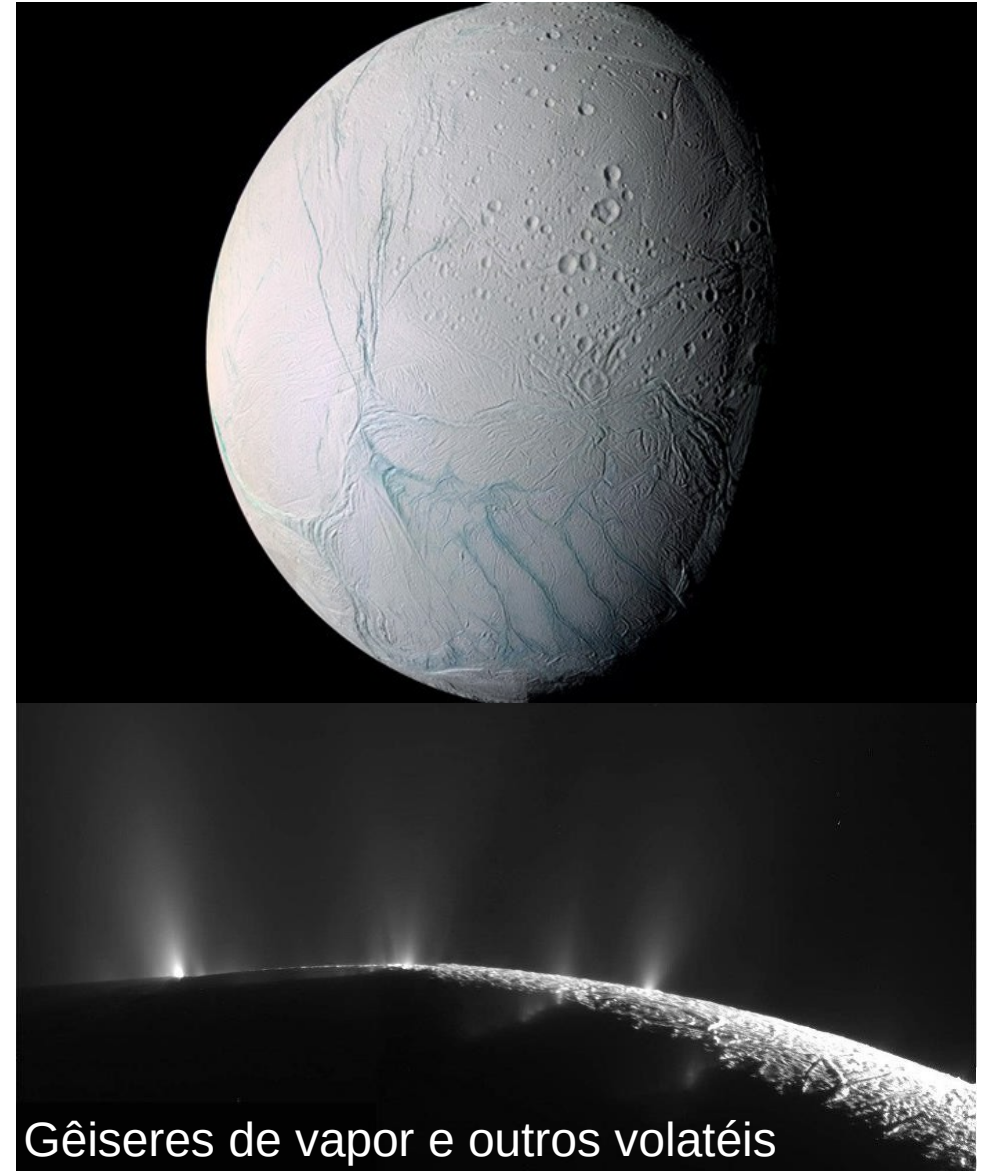
As Luas de Saturno

Encélado

6ª maior lua de Saturno
(diâmetro ~500 km)

Semelhanças com Titã:

- **atividade geológica**:
aquecido por forças de maré,
material contribui para o
anel E de Saturno
- evidencia para **oceano salgado**
a baixo da superfície
- **atmosfera** com **metano**
e outras **moléculas orgânicas**
- possivelmente habitável para
microorganismos
(=> Aula astrobiologia)



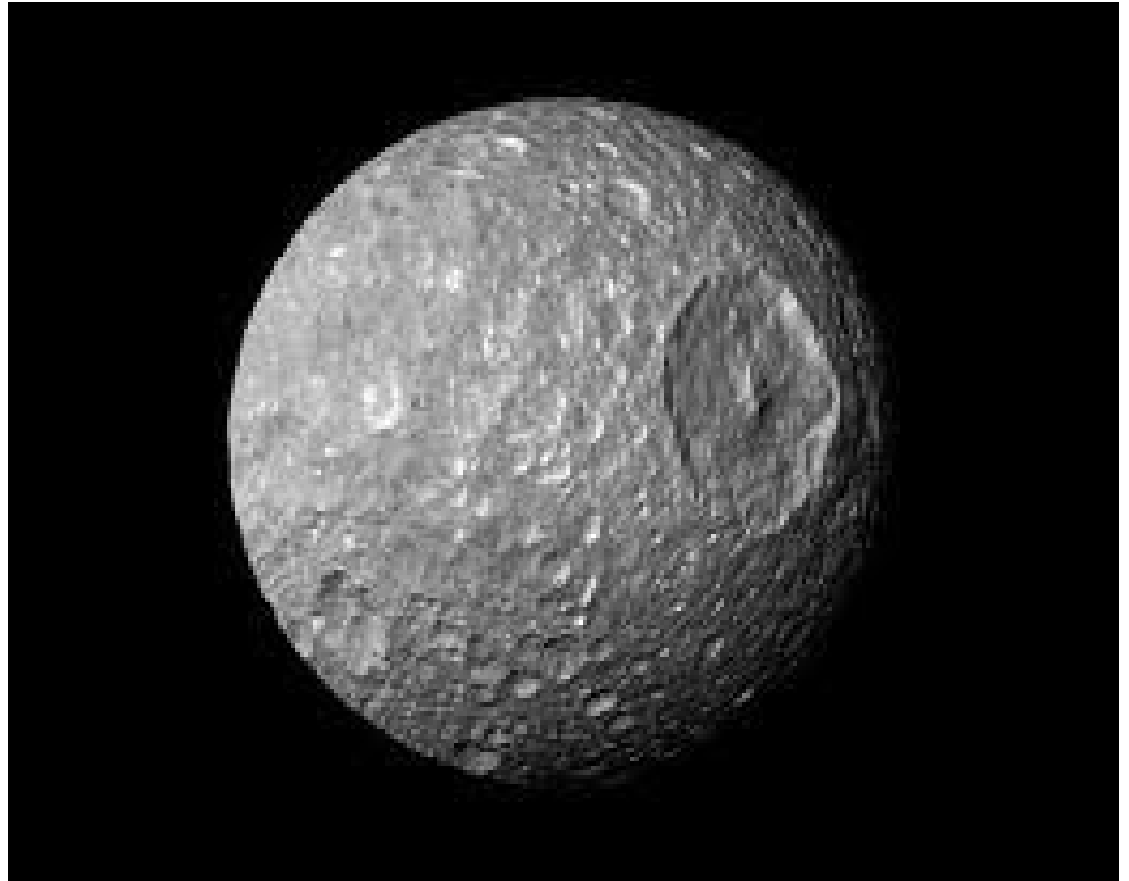
Gêiseres de vapor e outros volatéis

As Luas de Saturno

Mimas

Menor corpo esférico, do Sistema Solar, cratera Herschel testemunha de um impacto que poderia ter destruído a lua

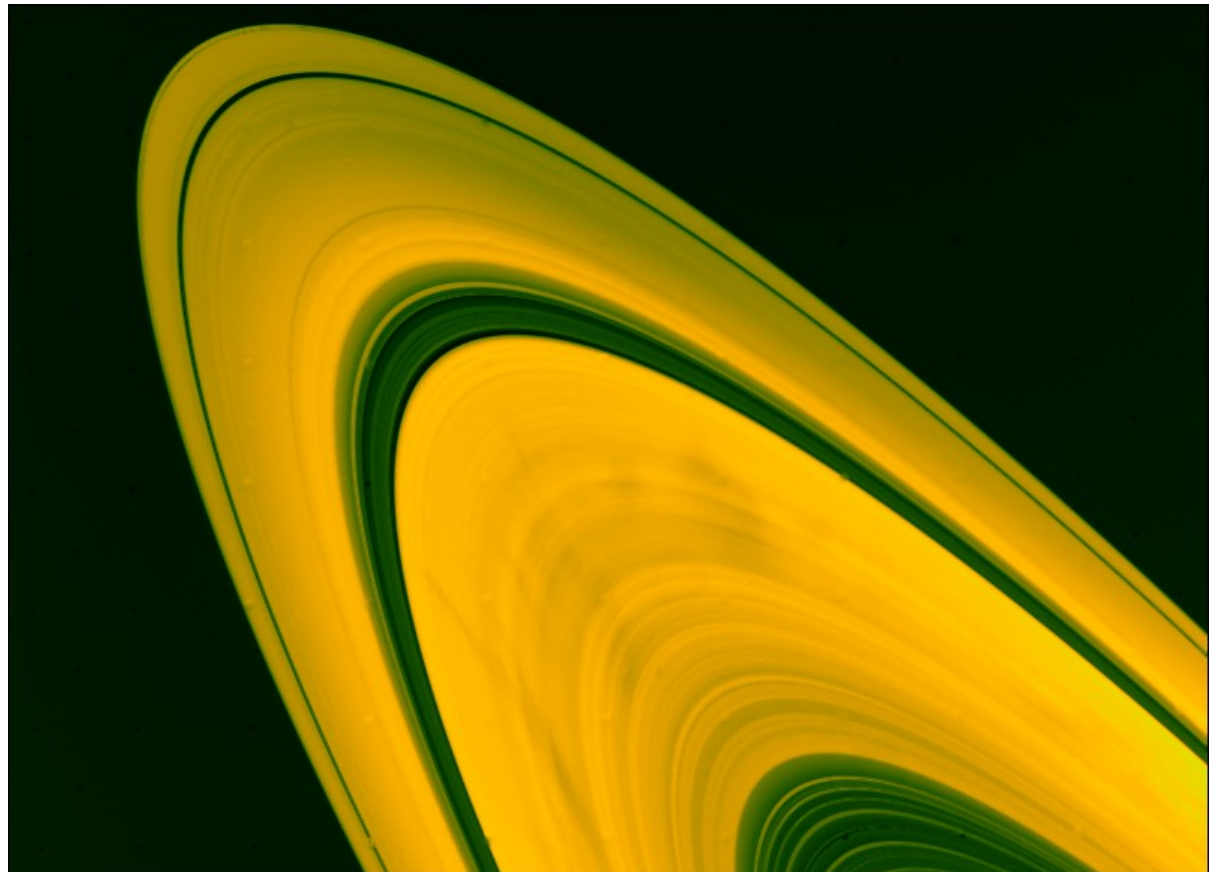
Além de Titã, Encélado e Mimas, Saturno tem pelo menos 59 luas a mais, similar ao Júpiter



Os Anéis de Saturno

Galileu Galilei foi o primeiro a observá-los, porém só em 1659 que Christiaan Huygens anunciou a descoberta da existência de Anéis ao seu redor.

Na verdade são **centenas** de **anelzinhos** com diâmetros de 250 000 km ou mais (até $8 R_{\text{b}}$)
Espessura < 1 km
orientados no **plano equatorial** do planeta



Anéis

“**Rochas**”/ bolas de **gelo** até alguns metros de diâmetro.

Material de albedo alto
=> anéis bem visíveis

Em **colisões** trocaram os seus momentos lineares paralelos ao momento angular total => todos **num plano**

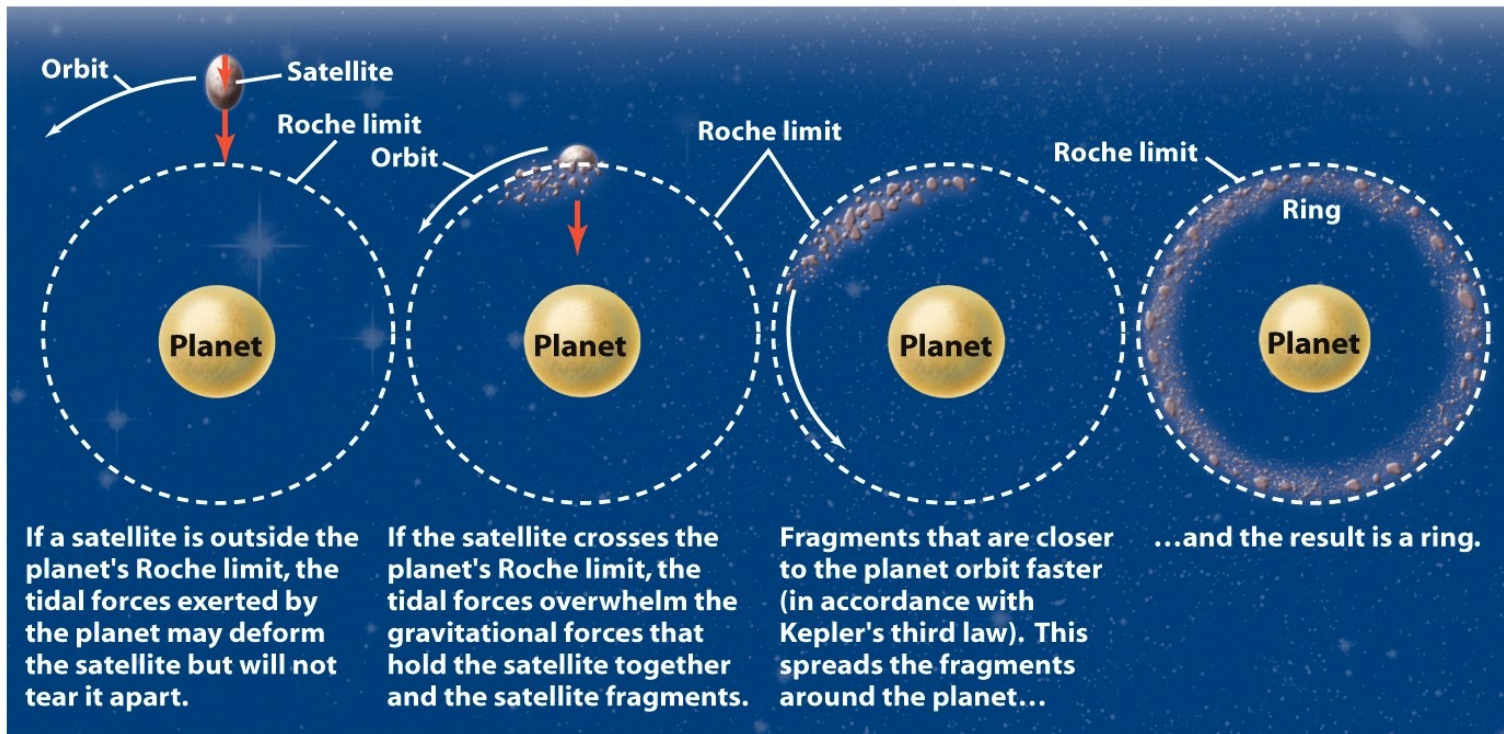
Algumas das luas de Saturno, as **luas “pastores”**, ajudam a mantê-las nas órbitas. **Ressonâncias** também ajudam.

Os outros planetas gigantes **também** têm **anéis**, mais fracos.



Anéis

Provavelmente formados pela **destruição** de uma **lua** que ultrapassou o **limite de Roche** (distância até o planeta, dentro daquela as forças de maré superam as forças que mantêm a lua inteira).



Problema em aberto: Escala de tempo: como os anéis sobrevivem por bilhões de anos aos processos dissipativos?

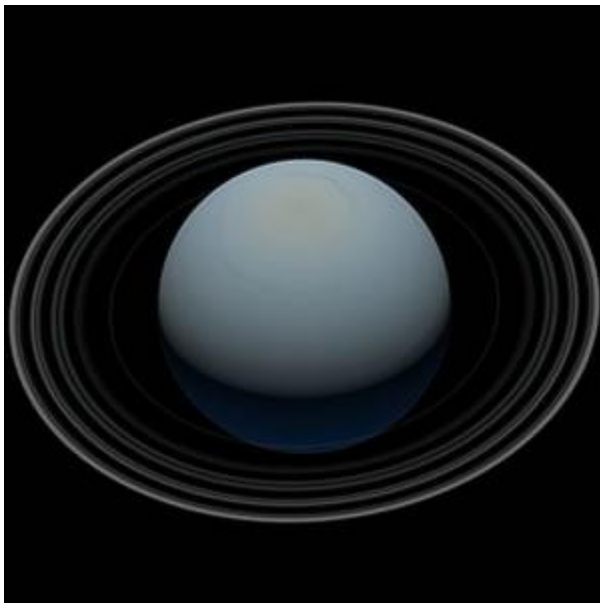
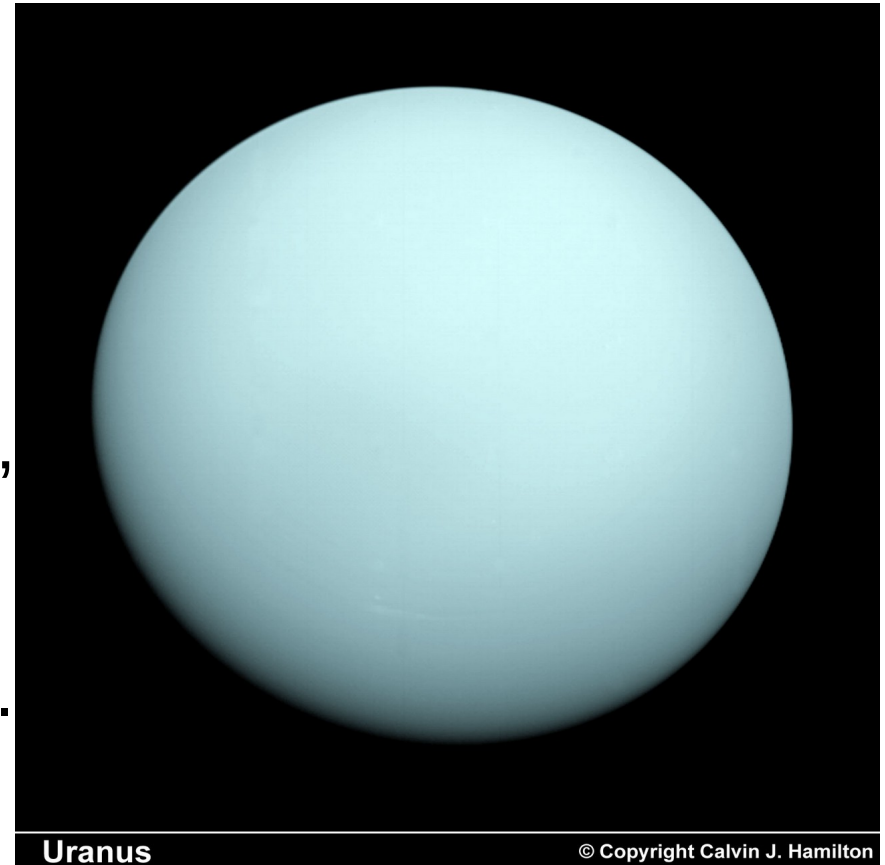
Talvez o material é "reposto" por ejeção de material de luas por meteoritos (Lua Mab de Urano) e/ou vulcanismo (Encélado).

Urano

Símbolo $\♁/\mathbb{H}$, Deus dos céus
7º planeta do Sol

Descoberto por acaso em
1781 por William Herschel

Rotação 0.72 dias “retrógrada”



Revolução:
84 anos terr.

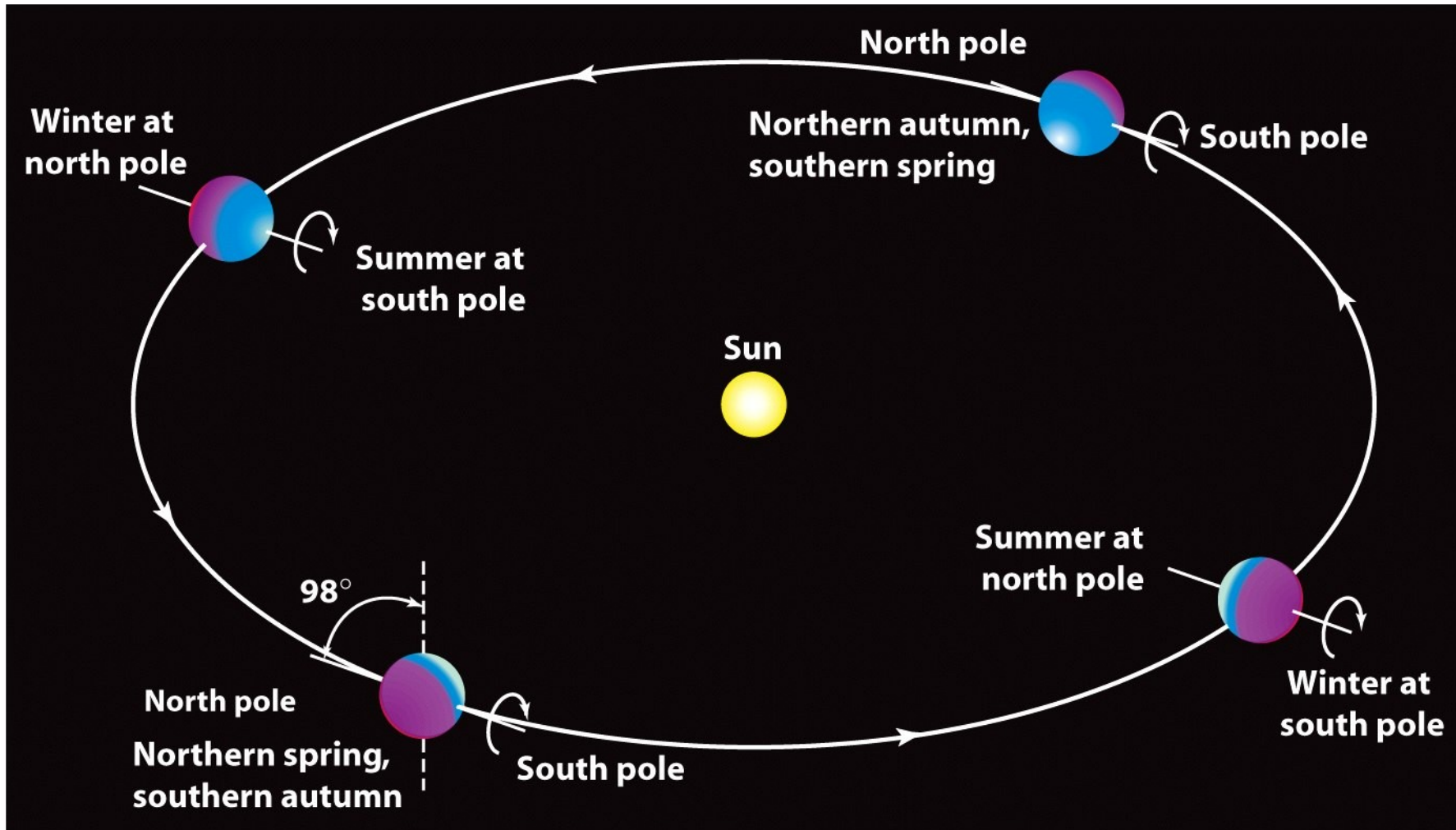
T. média:
-216 °C

Massa: $14.5 M_{\oplus}$; Raio: $4 R_{\oplus}$

Densidade média: 1318 kg/m^3

Anéis finos

Urano



Todas as luas orbitam no seu plano equatorial (não no plano orbital) mas este está inclinado $97,5^\circ$ em relação à eclíptica! A orientação do sistema de Urano é um mistério.

As Luas de Urano

Pelo menos 27 luas com nomes de caracteres de William Shakespeare e Alexander Pope.

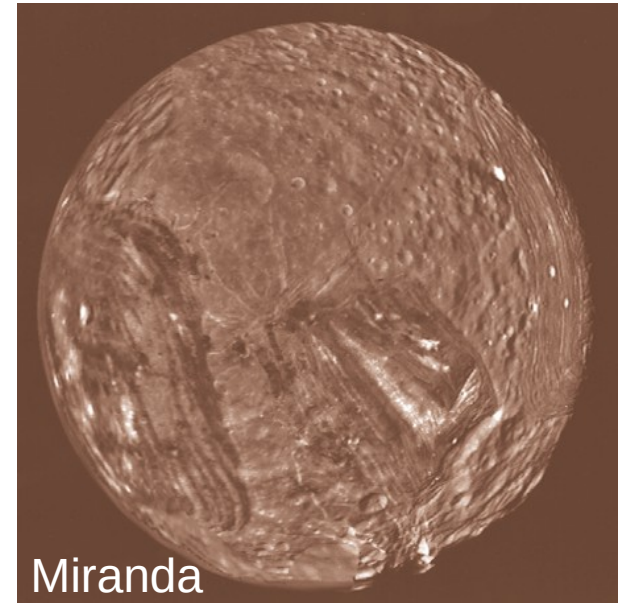
40 % - 50 % **água**, o resto **rocha**.

Miranda

Diâmetro de 479 km.

Superfície altamente fraturada.

Há teorias, de que Miranda foi destruída e reconstruída várias vezes por colisões com asteróides ou forças de maré de Urano e outras luas.



Netuno

Símbolo Υ , Deus do Mar
8º planeta do Sol

Previsto por John Couch Adams e Joseph leVerrier, descoberto 1846 por Johann Gottfried Galle

Rotação: 0.67 dias terr.

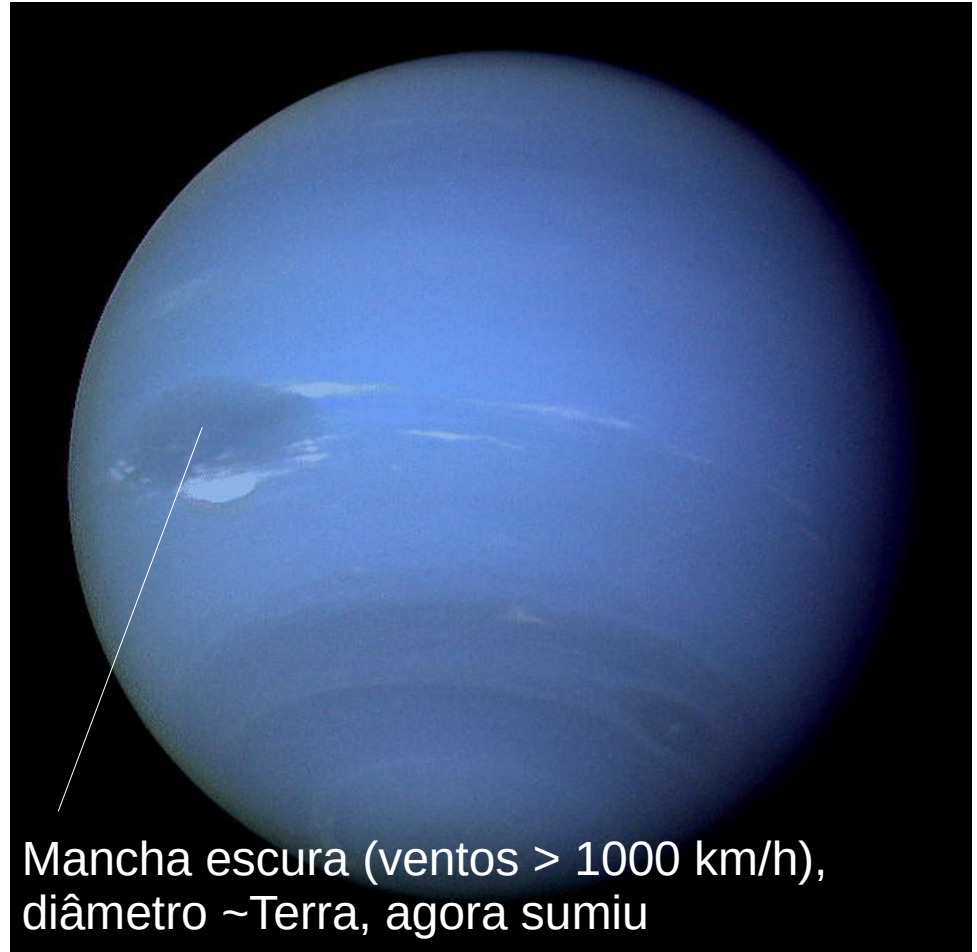
Revolução: 164.6 anos t.

Temperatura m.: $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$
(não muito menos que T_{H} ,

pela maior energia interna)

Massa: $17 M_{\oplus}$

Raio: $3.8 R_{\oplus} \Rightarrow$ densidade média: 1638 kg/m^3



Mancha escura (ventos $> 1000\text{ km/h}$),
diâmetro \sim Terra, agora sumiu

As Luas de Netuno

Tritão

Maior lua de Netuno

Temperatura: $-236\text{ }^{\circ}\text{C}$

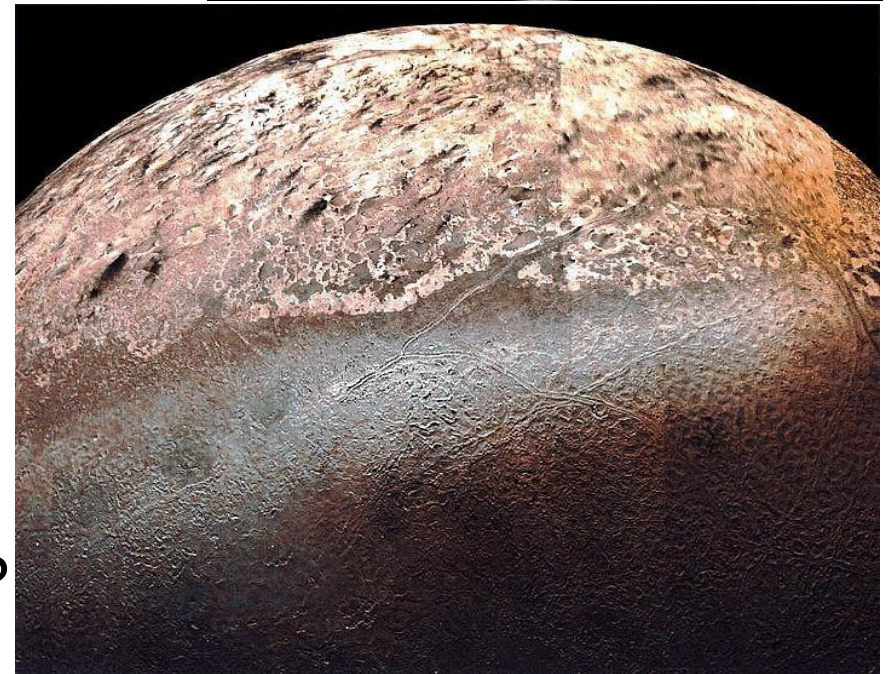
Coberto de N_2 , CH_4 , CO e CO_2 sólidos,
poucas crateras => recente

Lagos de gelo de água
indicativos de vulcões de gelo

Gêiseres de Nitrogênio líquido

Órbita retrógrada

Objeto transnetuniano capturado?
Pode ter desestabilizado um
sistema de satélites pré-existente na órbita de Netuno



As Luas de Netuno

Proteu

Maior lua
não esférica do
Sistema Solar

Além de Tritão e Proteu,
Netuno tem mais
12 luas conhecidas



Resumo

Características dos planetas exteriores (jovianos)

Table 7-1 Characteristics of the Planets				
	The Outer (Jovian) Planets			
	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptune
Average distance from Sun (10^6 km)	778.3	1429	2871	4498
Average distance from Sun (AU)	5.203	9.554	19.194	30.066
Orbital period (years)	11.86	29.46	84.10	164.86
Orbital eccentricity	0.048	0.053	0.043	0.010
Inclination of orbit to the ecliptic	1.30°	2.48°	0.77°	1.77°
Equatorial diameter (km)	142,984	120,536	51,118	49,528
Equatorial diameter (Earth = 1)	11.209	9.449	4.007	3.883
Mass (kg)	1.899×10^{27}	5.685×10^{26}	8.682×10^{25}	1.024×10^{26}
Mass (Earth = 1)	317.8	95.16	14.53	17.15
Average density (kg/m^3)	1326	687	1318	1638

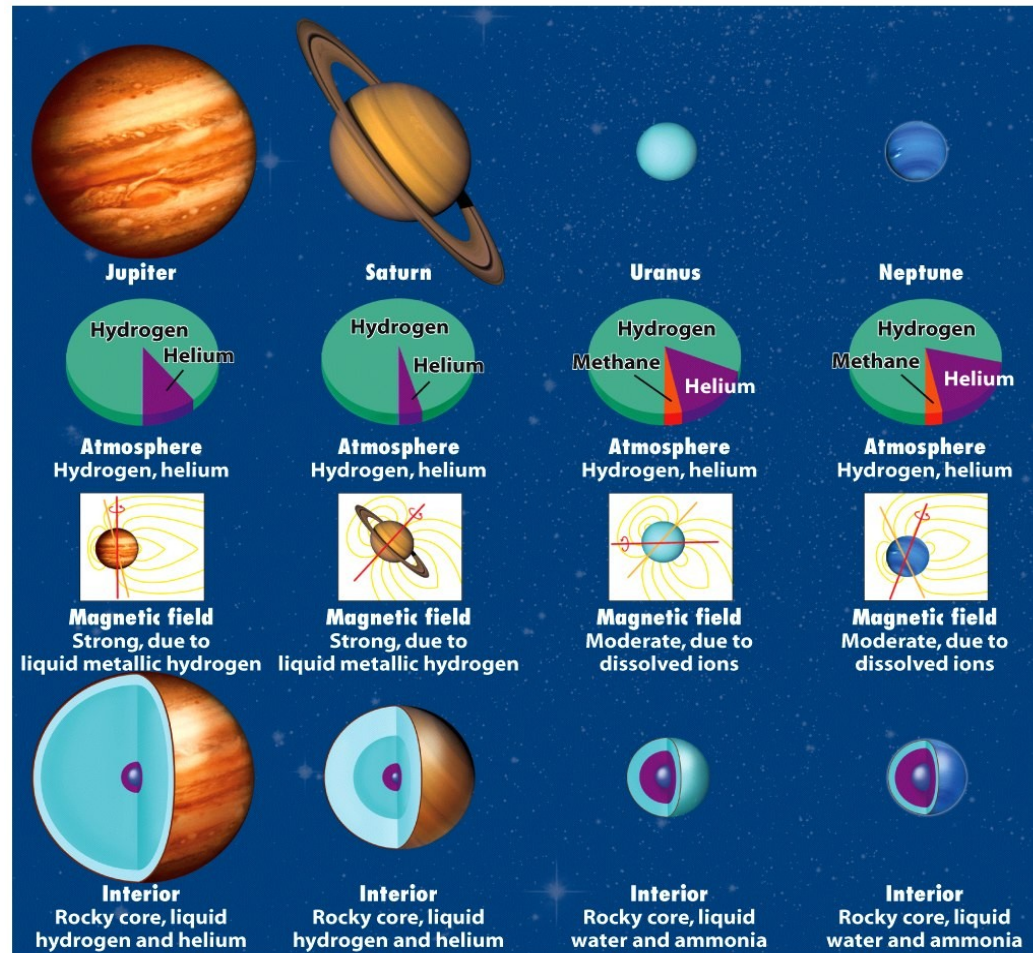
Table 7-1 part 2

Universe, Eighth Edition

© 2008 W. H. Freeman and Company

Resumo

Características dos planetas exteriores (jovianos)





Universidade Federal do ABC

Noções de Astronomia e Cosmologia

FIM PRA HOJE

