



Universidade Federal do ABC

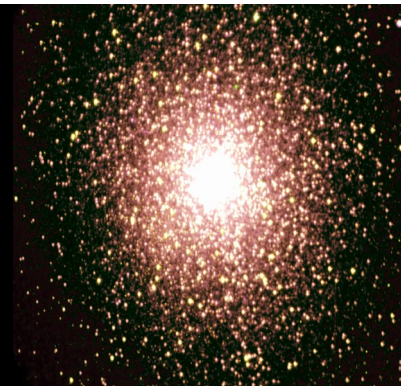
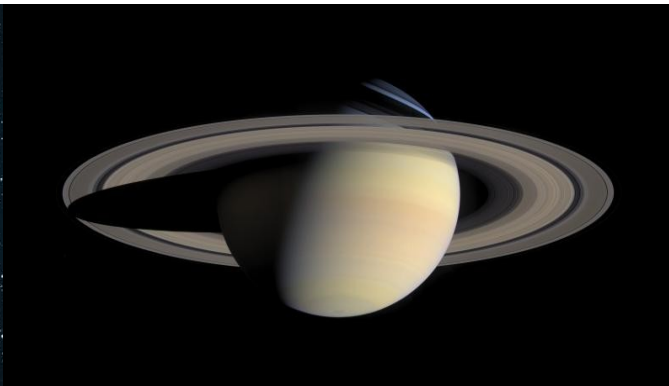
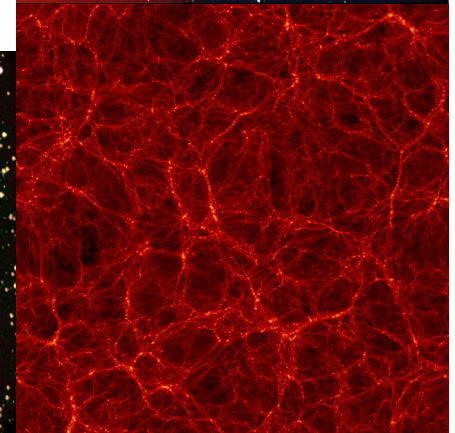
Física Contemporânea

07. O Sistema Solar II: Os Planetas, Corpos Menores, Formação

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),

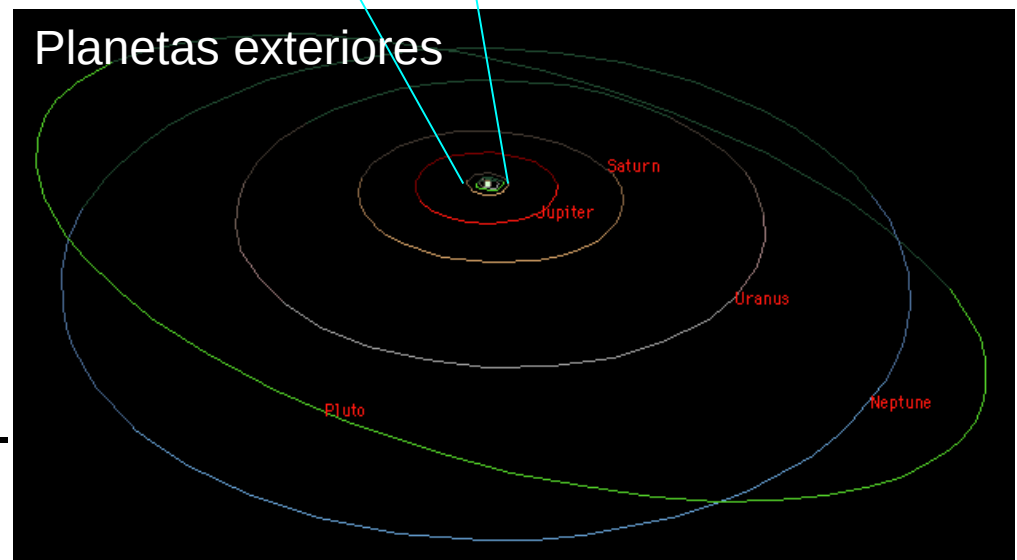
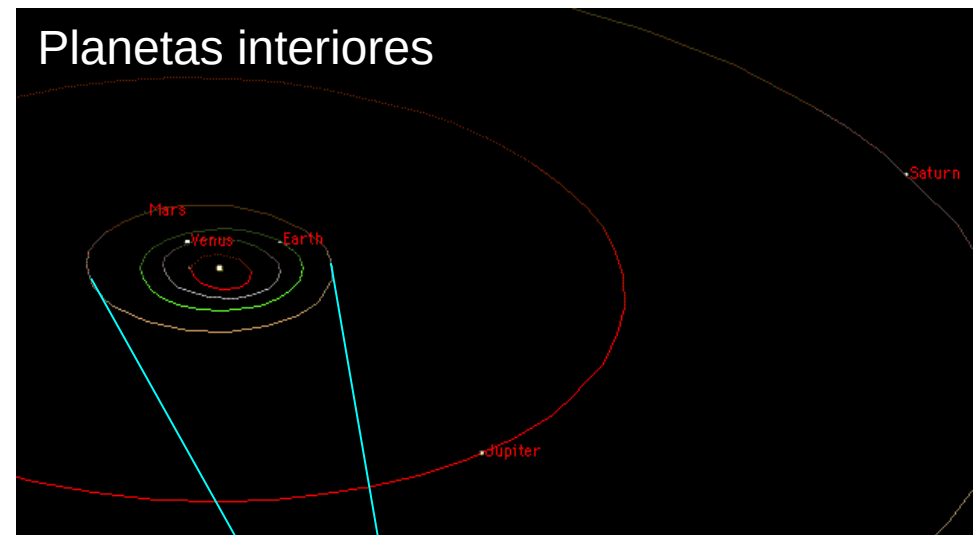
dos **planetas**

- 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**



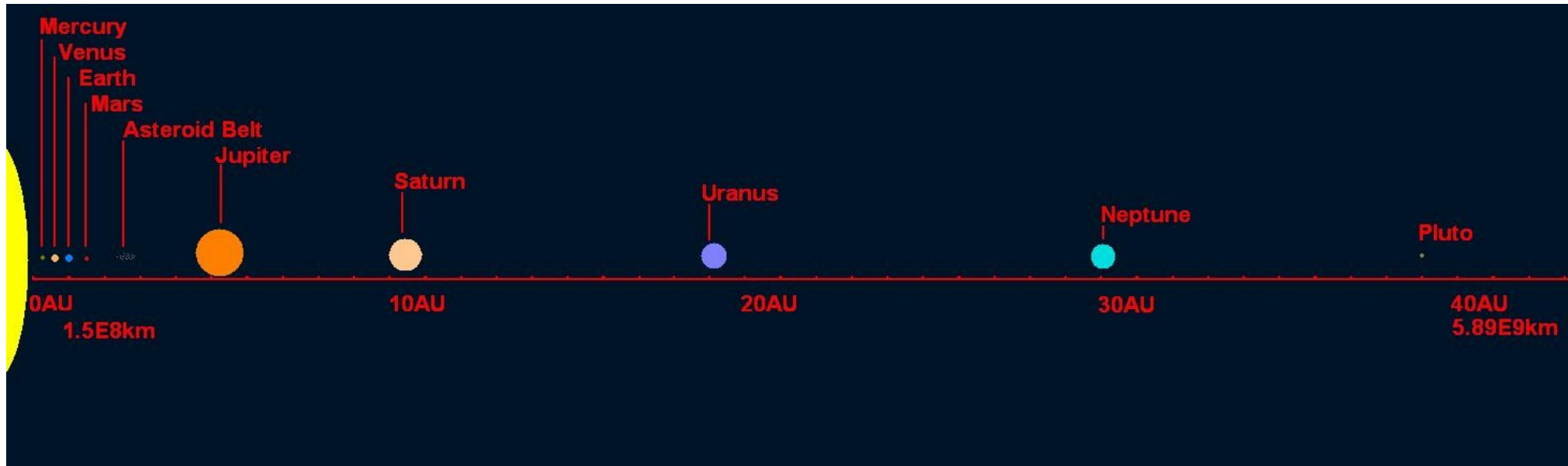
O Sistema Solar

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



O Sistema Solar

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



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 (=> 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?

- Supondo **equilíbrio térmico**: A energia recebida do Sol é igual à energia irradiada para o espaço (=> quadro):

$$T_p = T_{\odot} \cdot \sqrt{(R_{\odot} / 2D)}, \text{ onde}$$

$$T_{\odot} = 5777 \text{ K} = \text{temperatura do Sol,}$$

$$R_{\odot} = 6.96 \cdot 10^5 \text{ km} = \text{Raio do Sol,}$$

D = distância Sol-planeta

A estimativa é mais realista, levando em conta que uma fração a da luz recebida, chamada **albedo** a , não é absorvida, mas **refletida** sem esquentar o planeta:

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

Distribuição de Maxwell-Boltzmann

Fenômenos Térmicos:

Distribuição de **velocidades** v

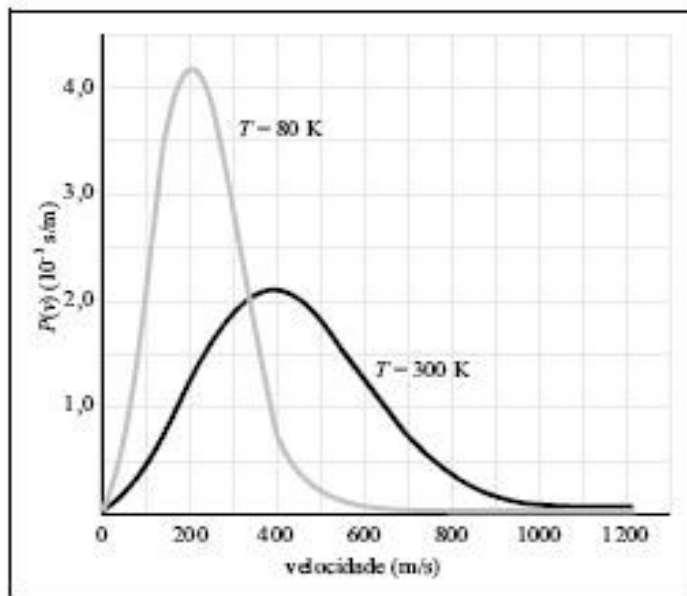
de **partículas** de massa m

num **gás** de **temperatura** T :

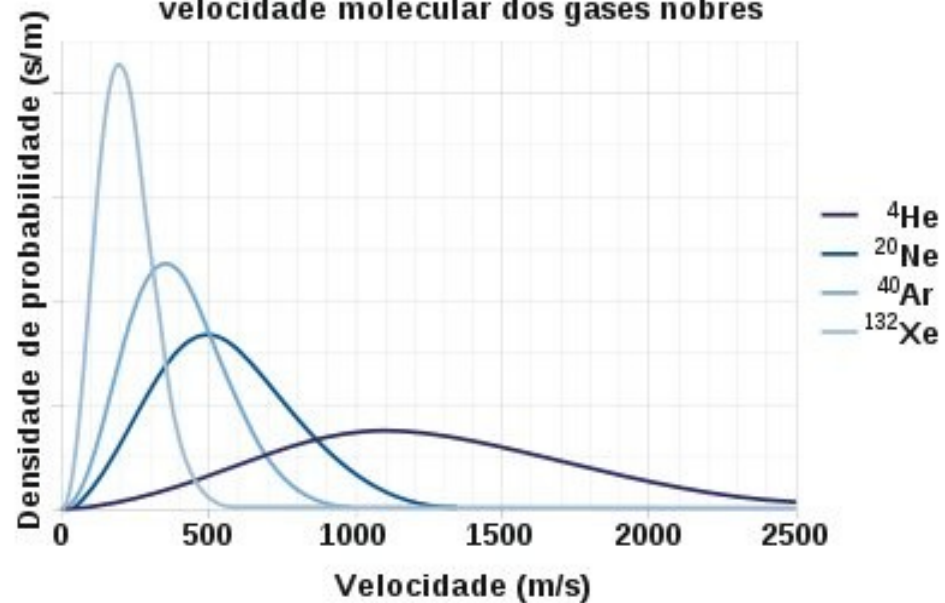
onde $k = k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K = constante de Boltzmann

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

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

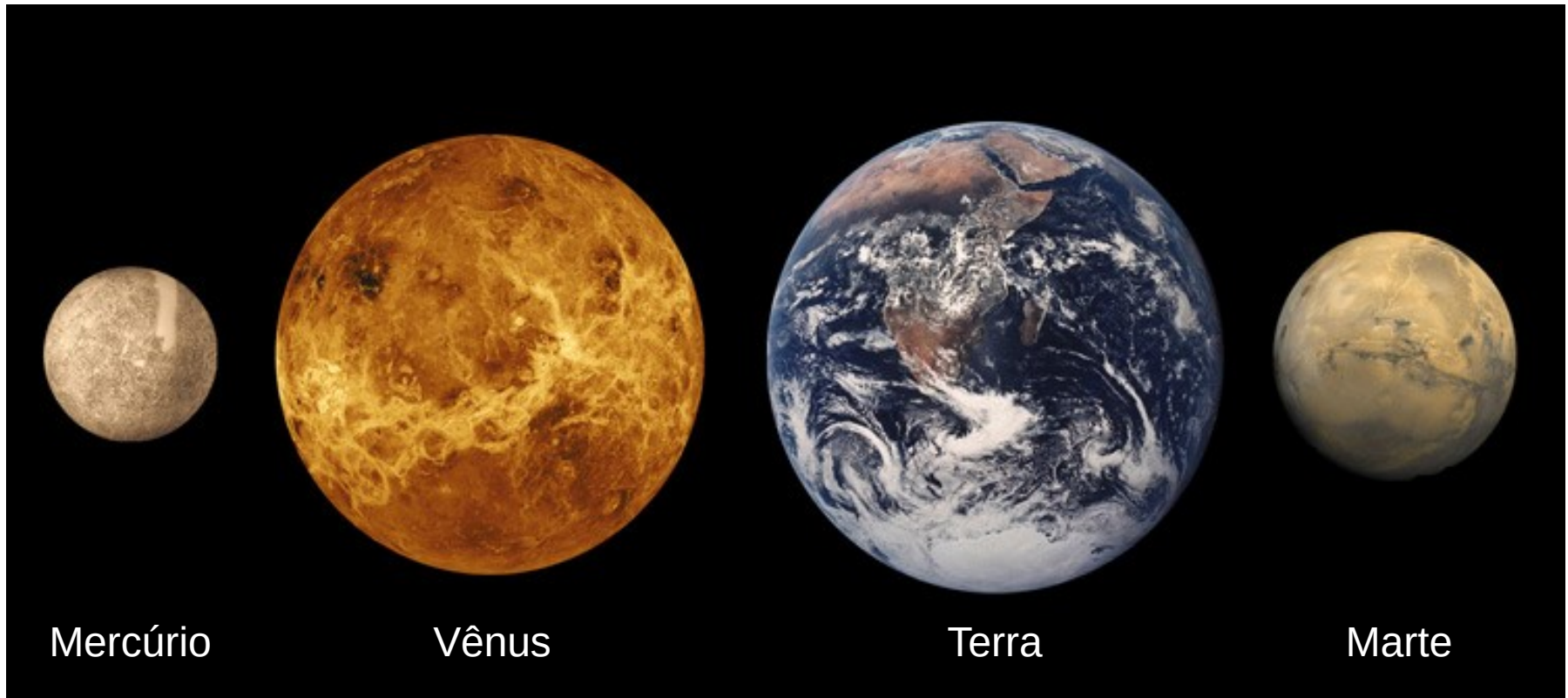
Estimativa para um planeta de massa M_p e raio R_p ter **perdido** dado **componente atmosférico** até hoje:

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

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
($0.055 M_{\oplus}$, $0.38 R_{\oplus}$)

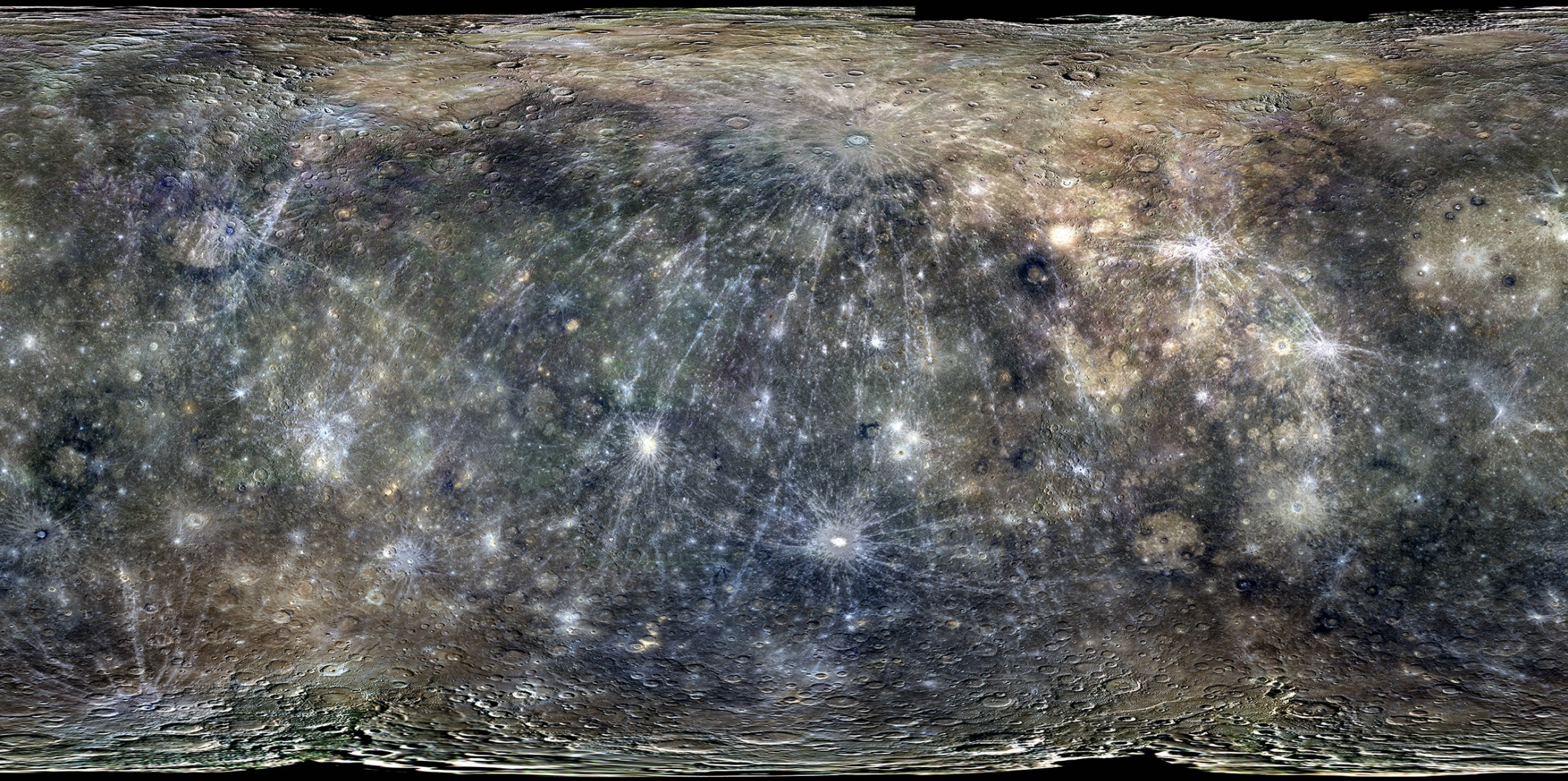
Vulcanismo no **passado**,
mas inativo há muito tempo
=> Numerosas **crateras** de **impacto**
de asteróides, etc.,
superfície “lunar” (mas sem os “mares”)

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

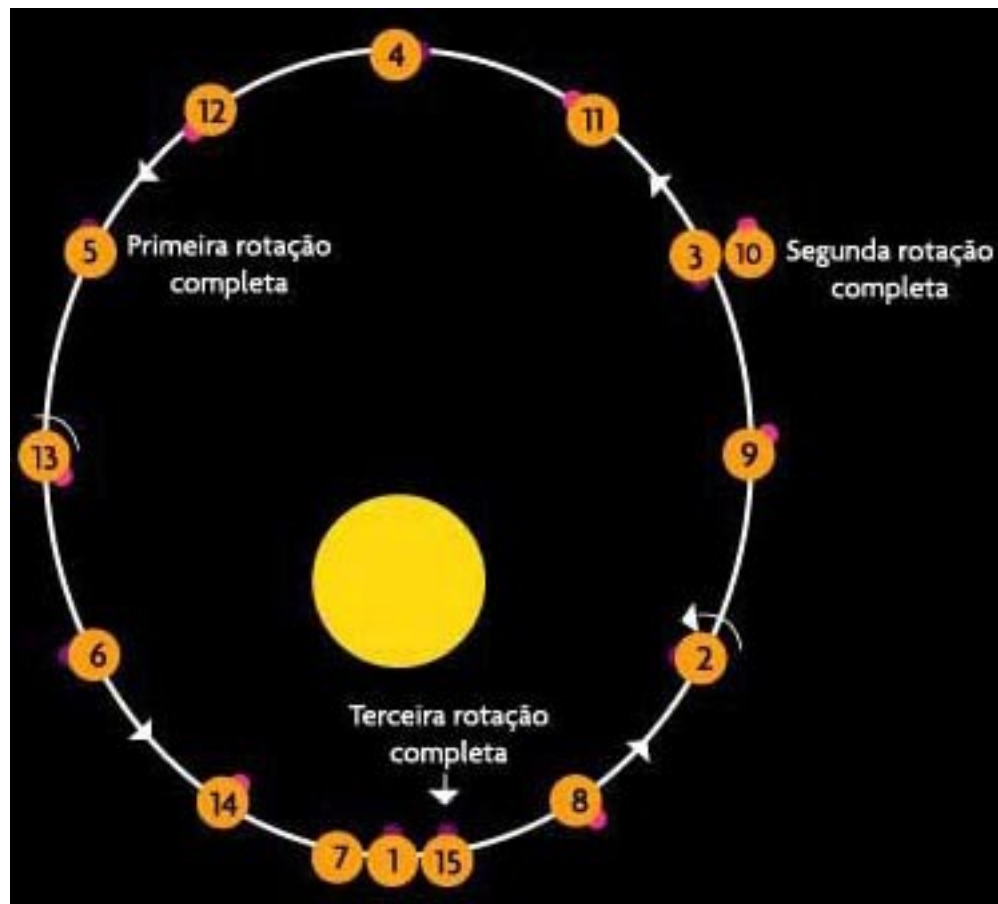
Rotação (dia sideral) de 58.6 dias terrestres (d) e **Revolução** (ano sideral) de 87.9 dias em **ressonância 2:3**

=> 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

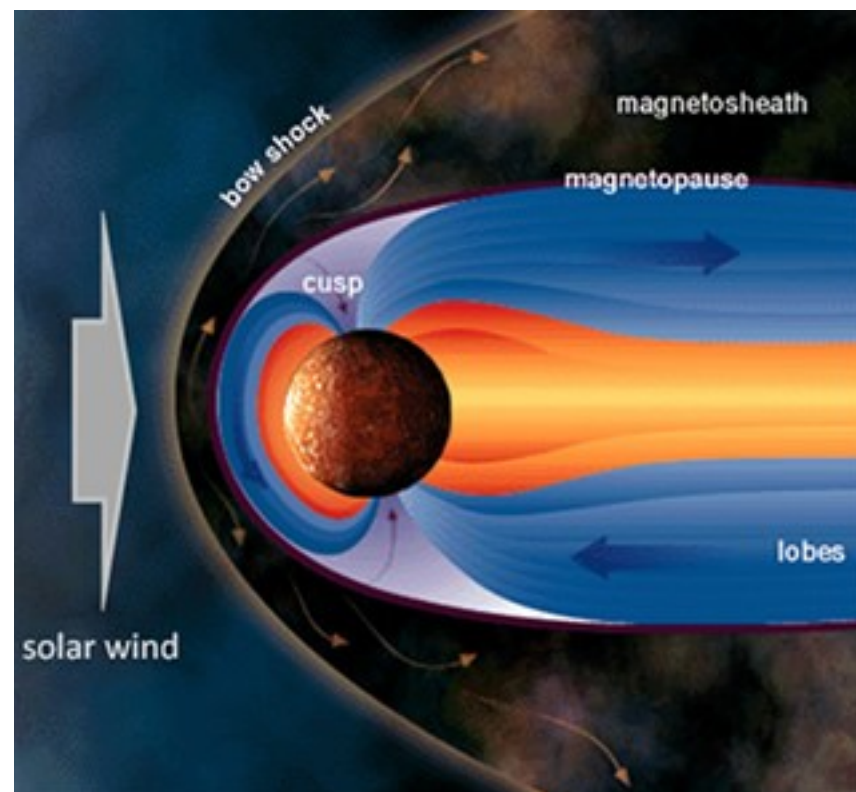
- Ainda há gelo em crateras não iluminadas nos polos!



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

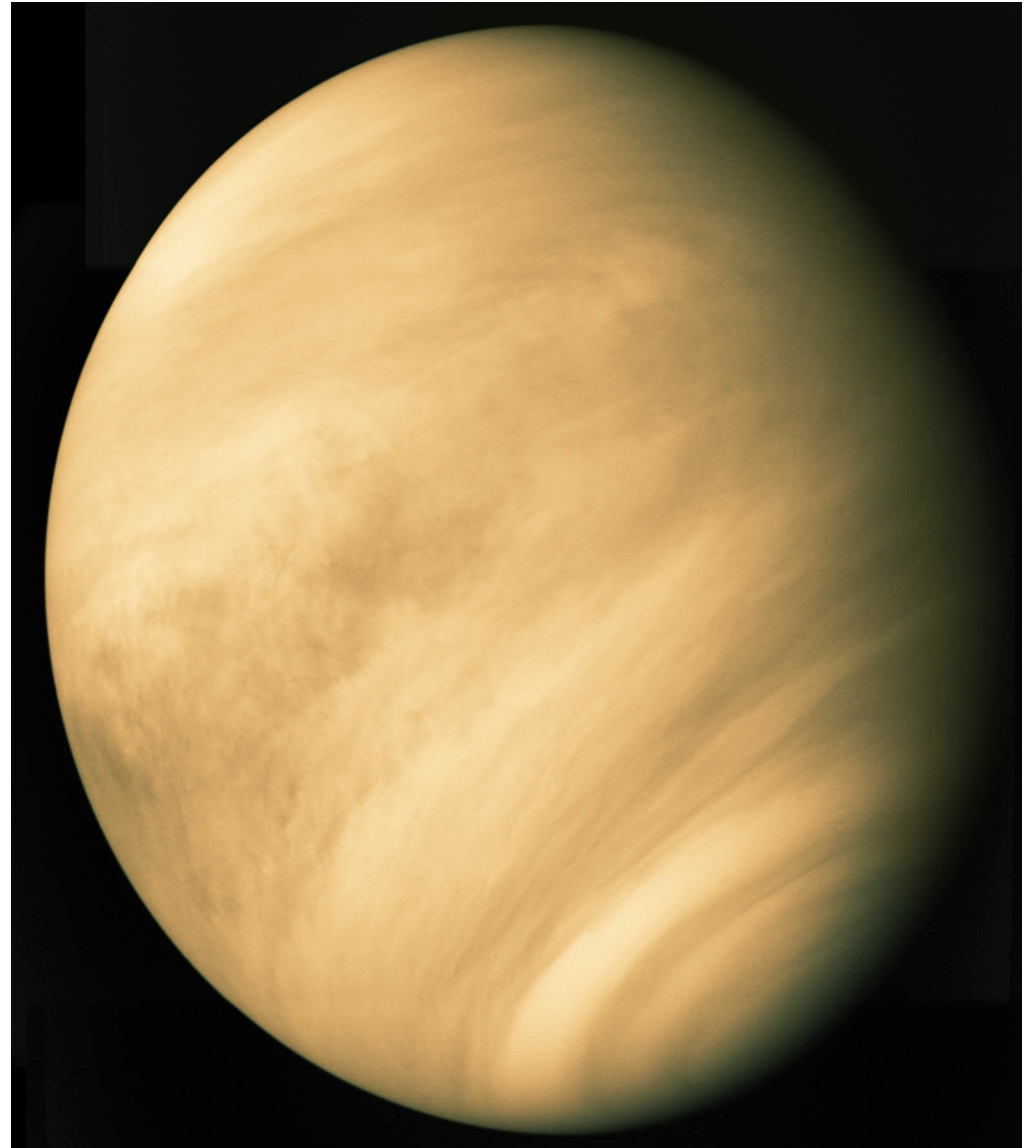
Símbolo ♀

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)

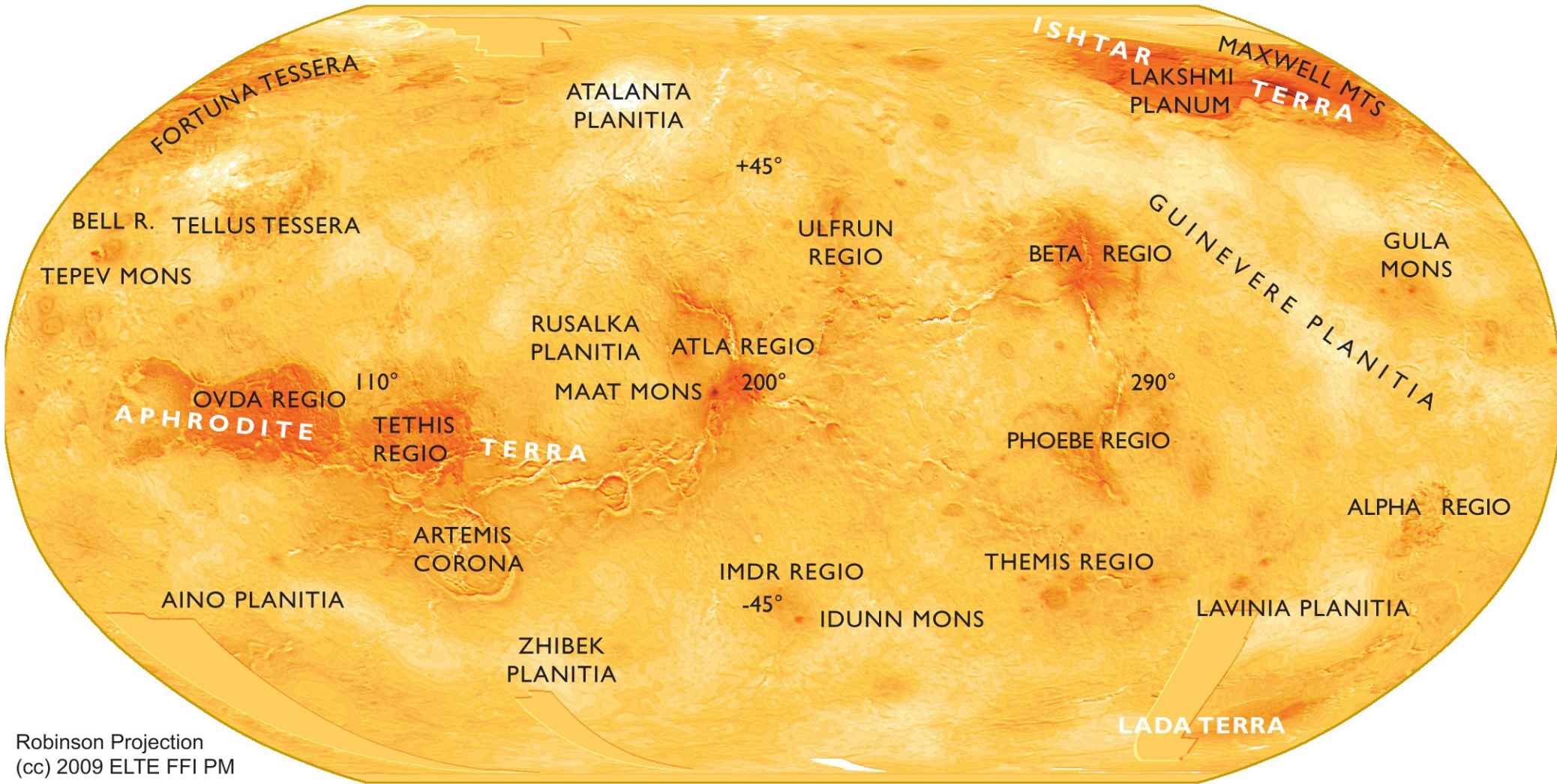
2º planeta do Sol, 0.72 AU



Mariner 10 Image of Venus

© Copyright Calvin J. Hamilton

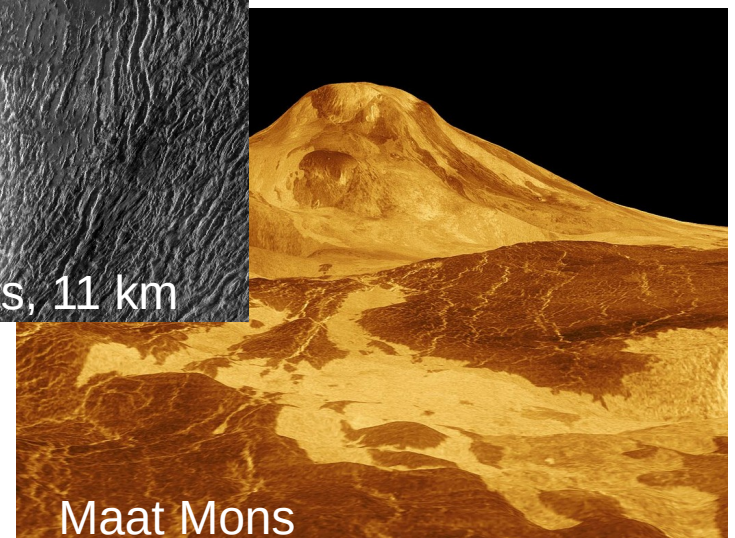
Vênus



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 = $0.82 \cdot M_{\oplus}$,

$$R_{\text{órbita}} = 0.72 \cdot R_{\text{órbita},\oplus} \text{ (2º planeta do Sol).}$$

Será que a Vênus é um lugar aconchegante?

Nosso cálculo da **temperatura** dá $327 \text{ K} = 54 \text{ °C}$
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:

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

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 CO_2 , algum N_2 e uma pequena quantidade de água que permitem a formação de ácidos como o HCl e o H_2SO_4 .

Estas nuvens densas **retêm** o **calor**
=> **efeito estufa forte**
=> $\sim 480^\circ\text{C}$. 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, disocciadas 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:

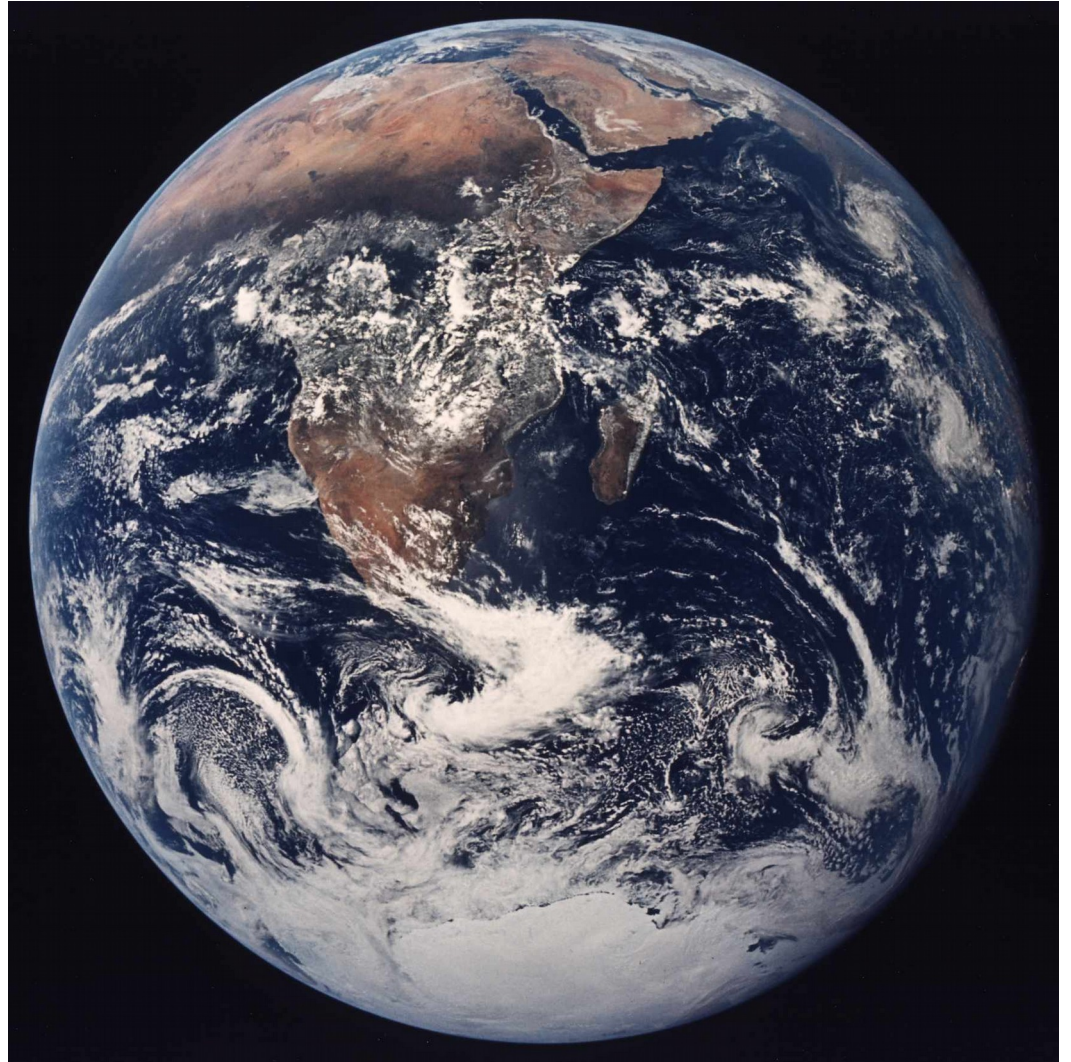
Maior planeta terrestre

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, ...

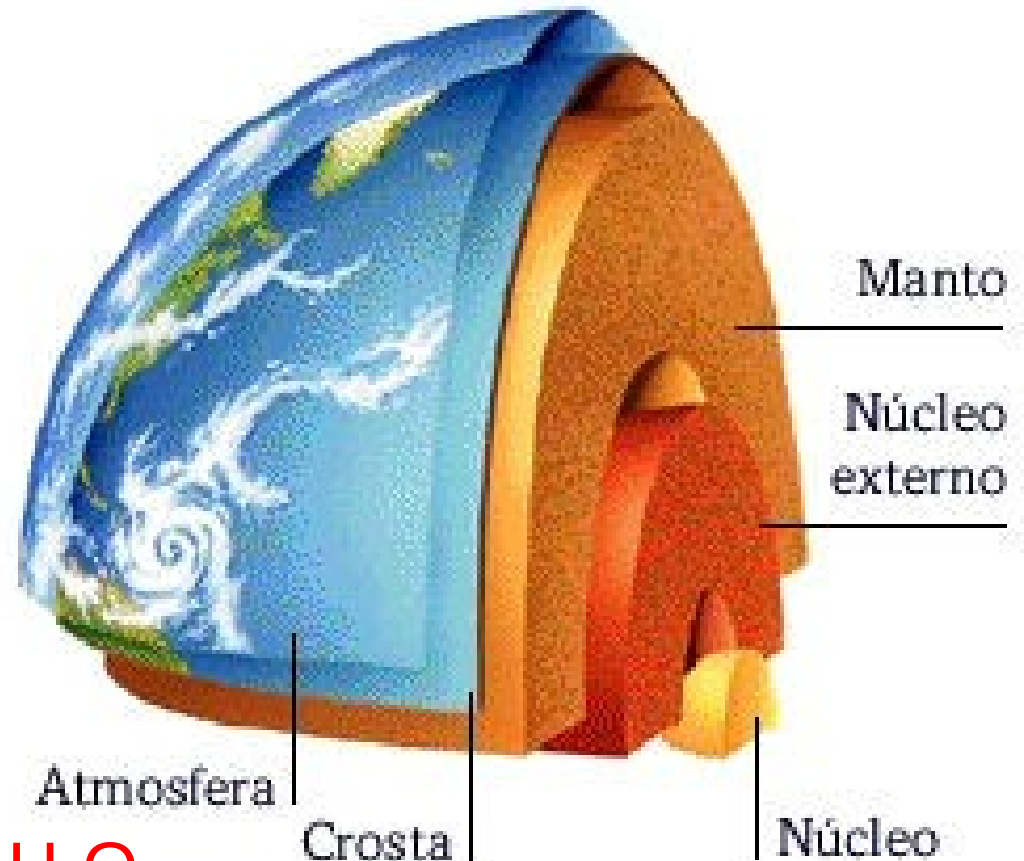
- Crosta de O, Si, Al, ...

- Atmosfera de N_2 (77 %), O_2 (21 %), Ar (1 %), CO_2 , H_2O , ...

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:

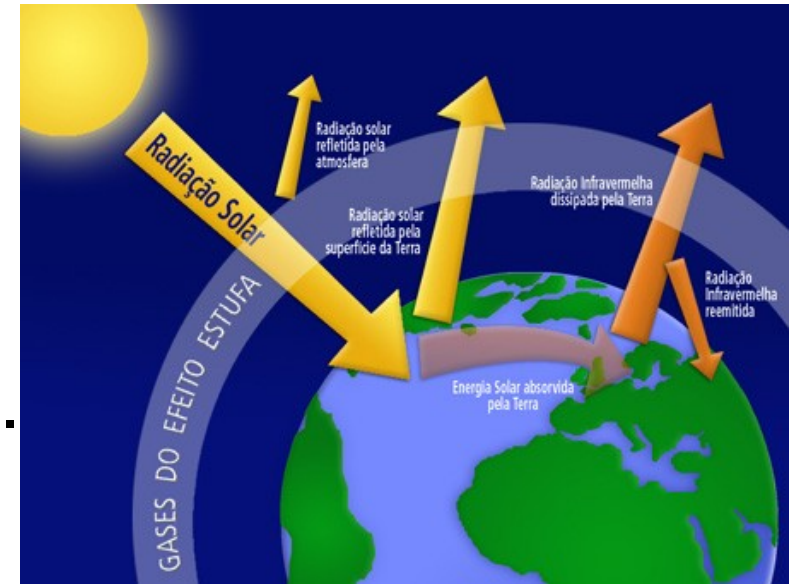
- sem albedo: $279\text{ K} = 6\text{ °C}$
- com albedo (0.3): $255\text{ K} = -18\text{ °C}$

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.

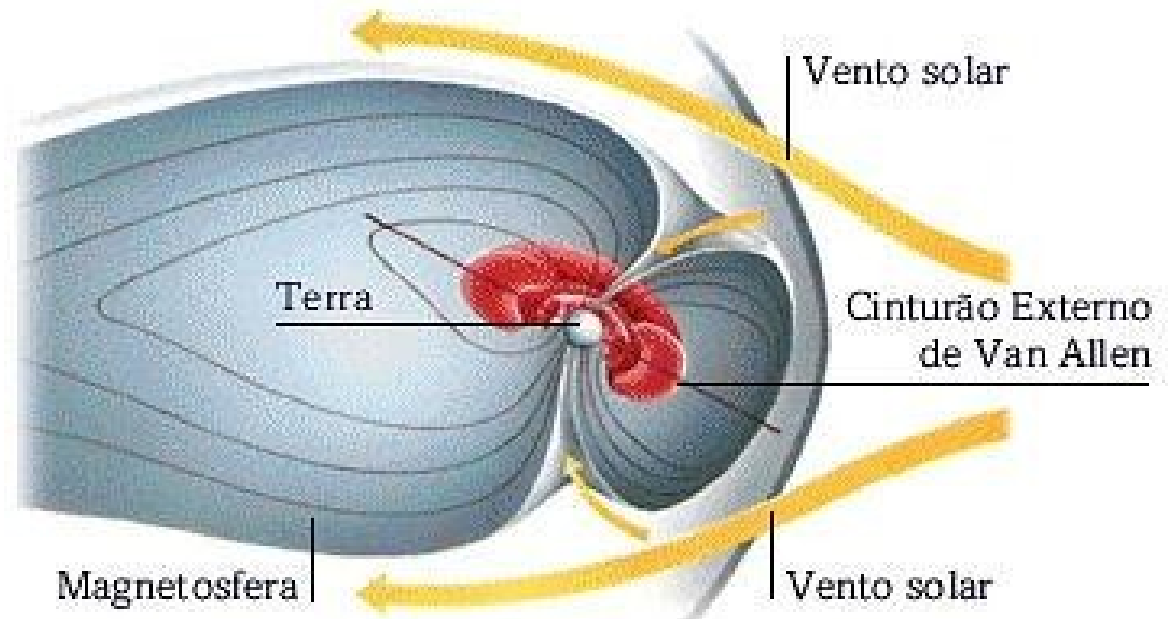
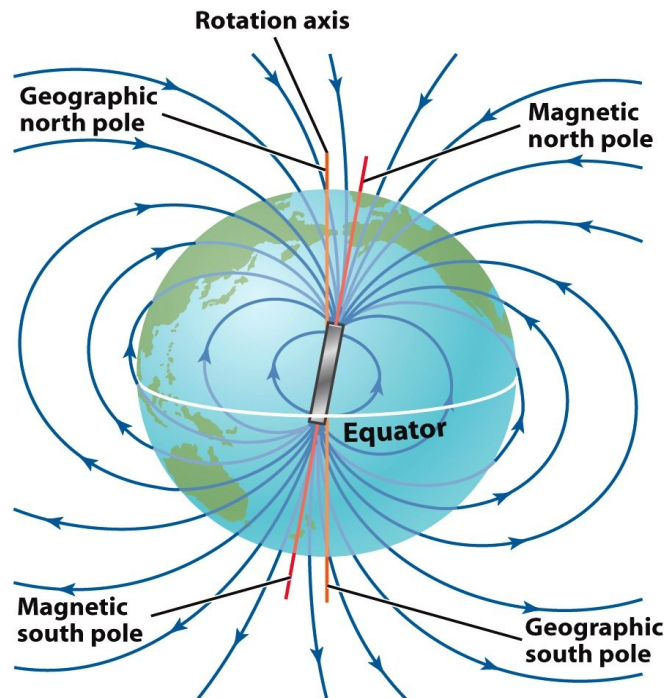


Figure 7-13b
Universe, Eighth Edition
© 2008 W.H. Freeman and Company

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

$$R_{☾} = 1'737 \text{ km} \approx \frac{1}{4} \cdot R_{\oplus}$$

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.



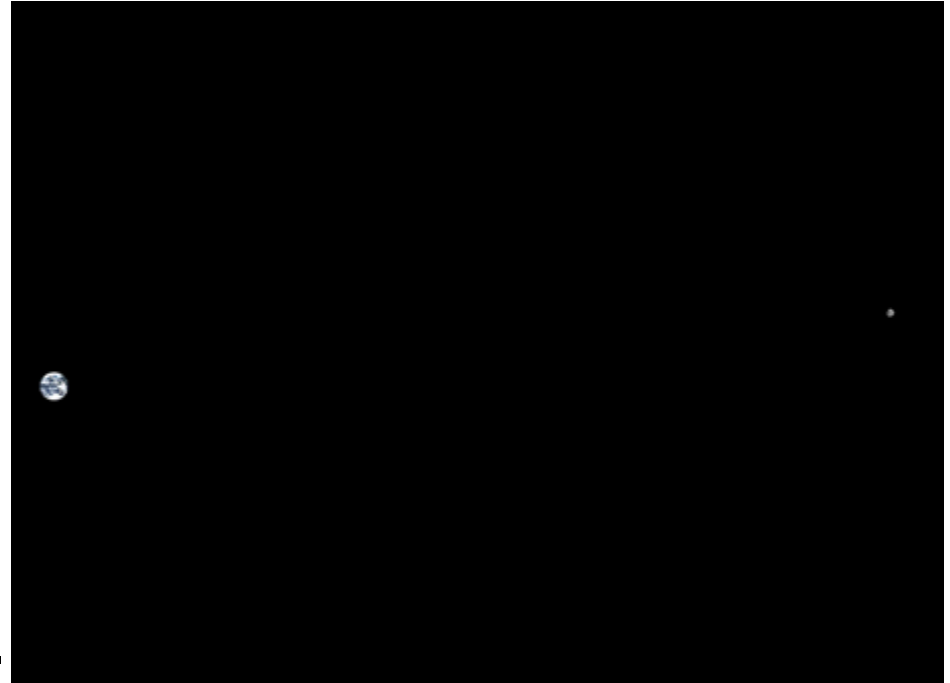
Lua

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.

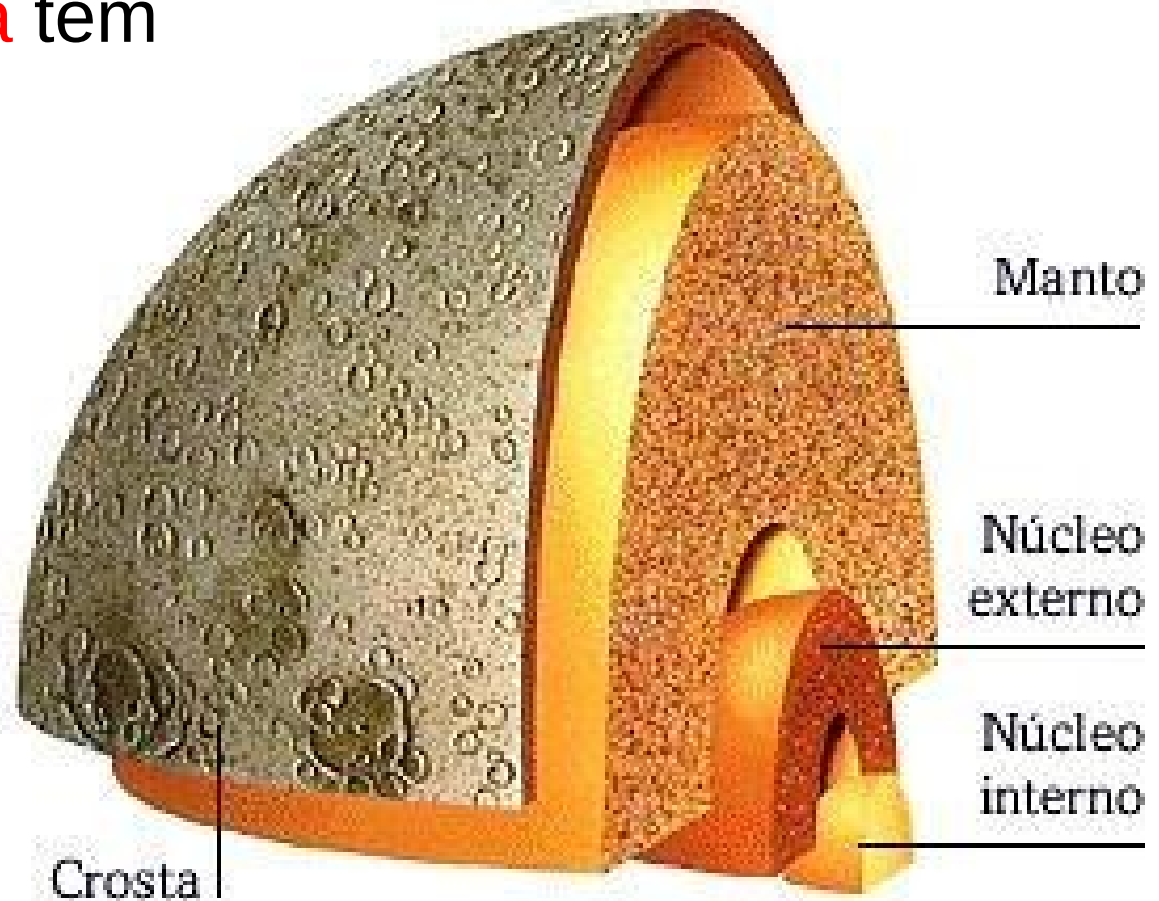


Temperaturas de $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $130\text{ }^{\circ}\text{C}$,
variação grande pelos mesmos motivos que no Mercúrio:
falta de atmosfera e dias longos.

(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.



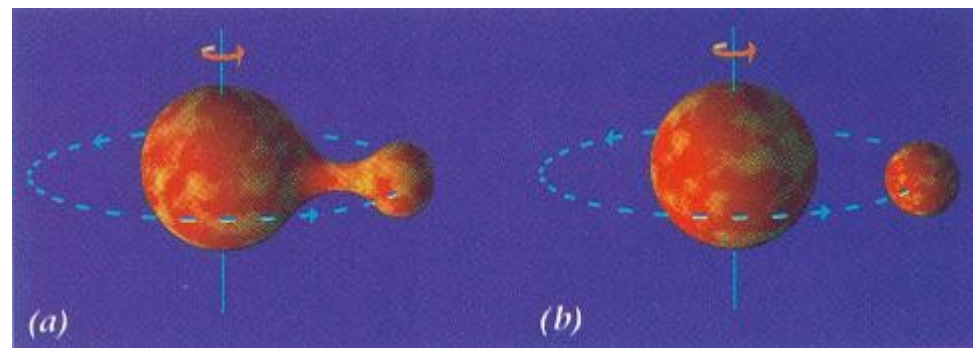
Lua

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

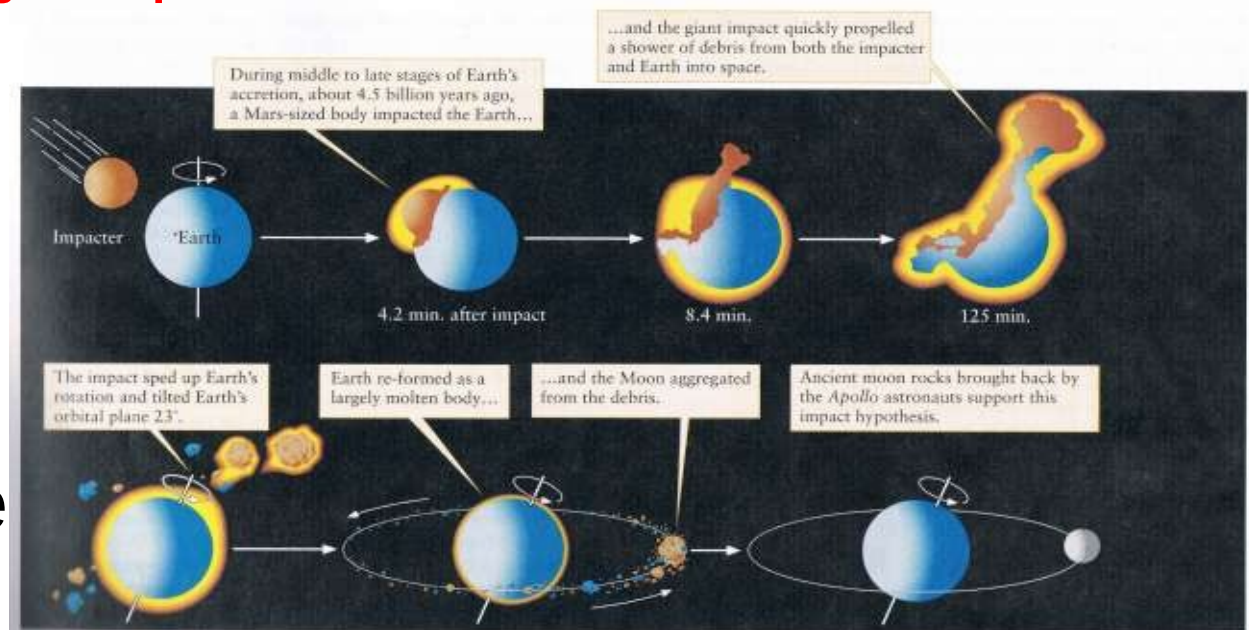
- **Captura**: Lua se formou em **outro lugar** do cosmos e foi **capturada** pela **gravidade** da Terra.

Mas: A **captura** de um corpo tão grande é **difícil** de realizar, e a **composição química** é **similar demais**.

- **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

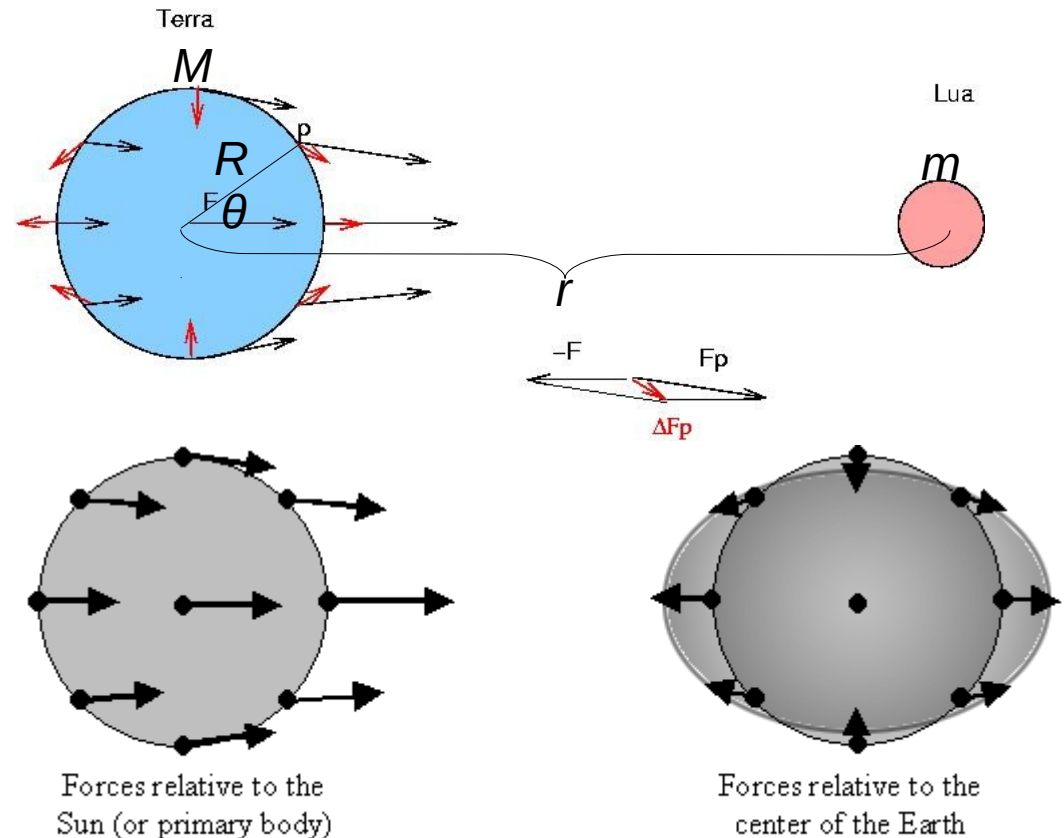
Marés

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):

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

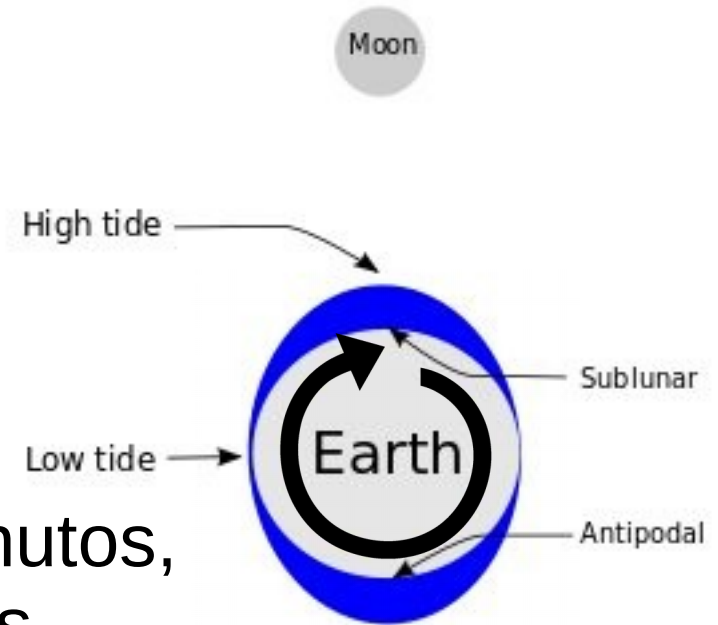
Isto causa “montanhas de água” no lado da Terra que é orientado para a Lua e no lado oposto.



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.

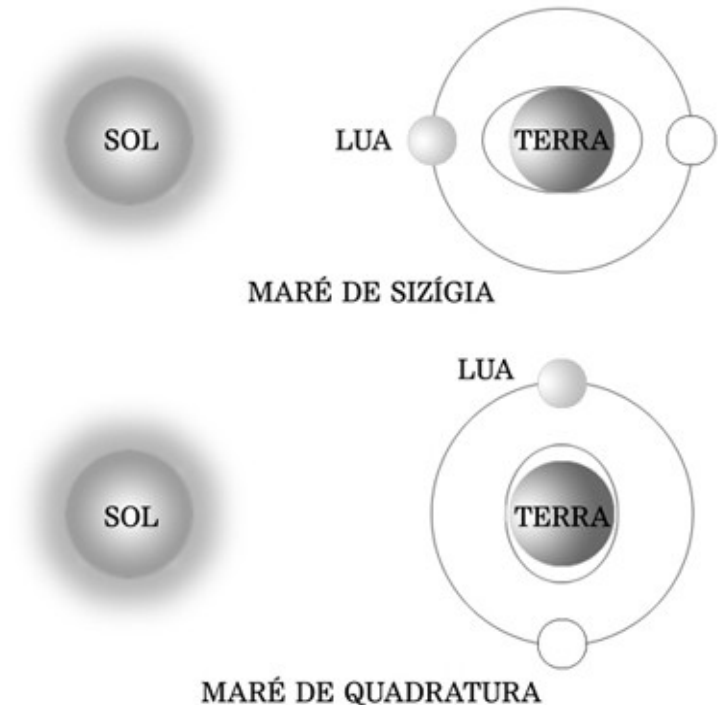
Lua

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

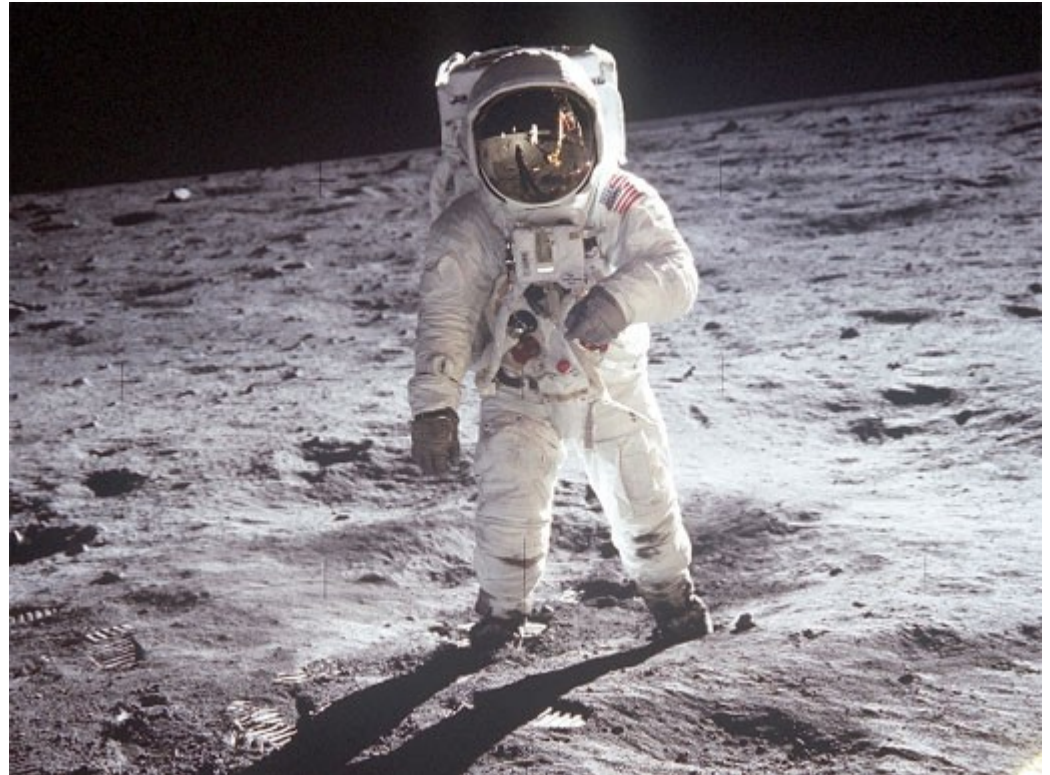
Lua

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:

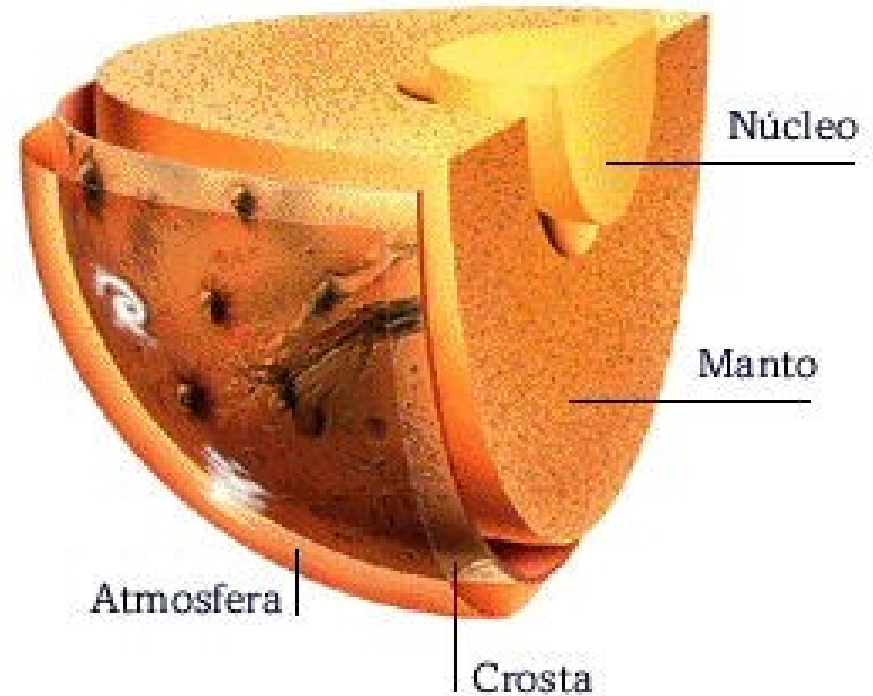
- **Atmosfera** de CO₂, N₂, Ar e O₂,
- **Gelo** nos **polos**,
- **“Tempo”**: Tempestades e nuvens,
- **Dia** de ~25 horas,
- **Estações**.



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

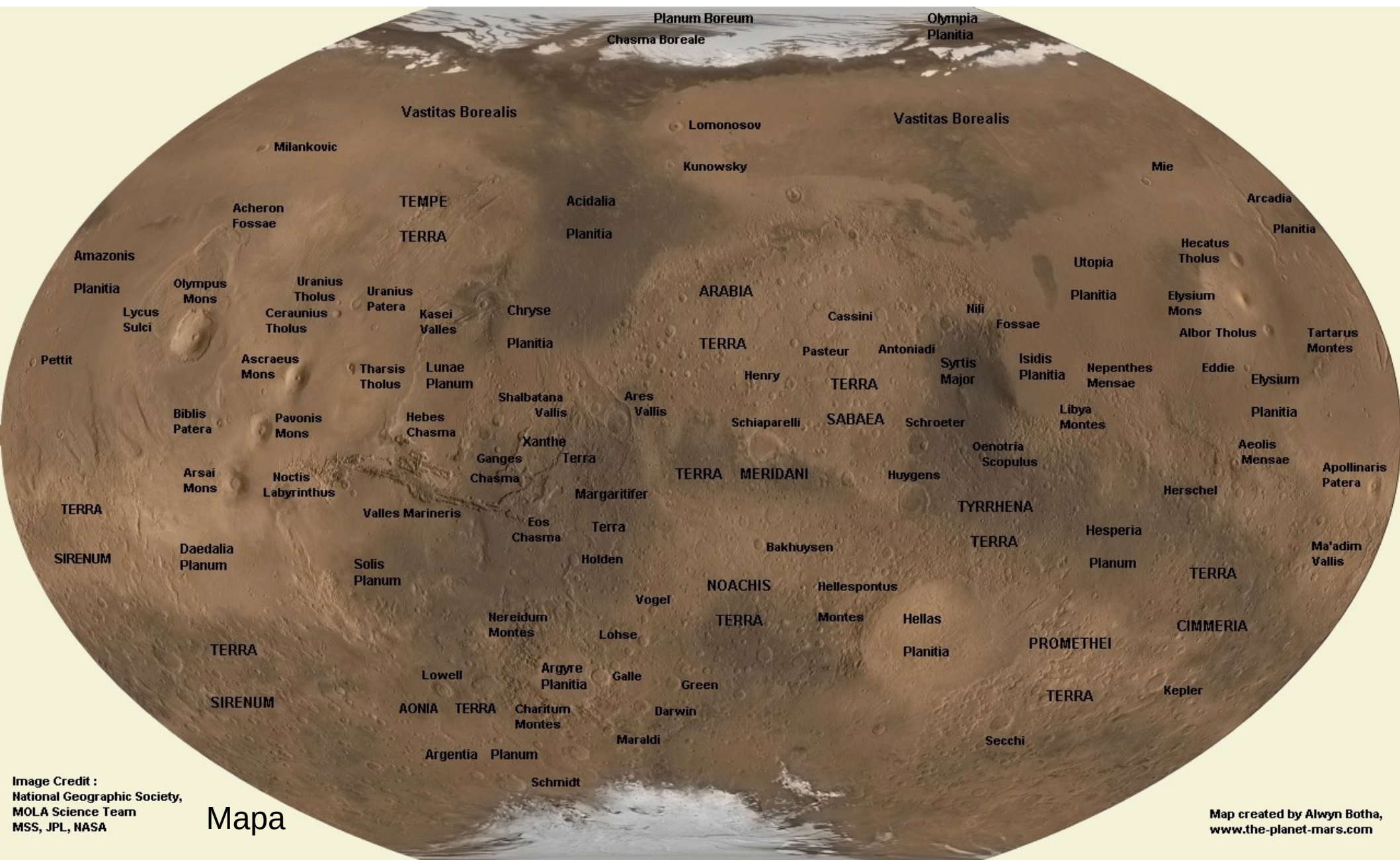


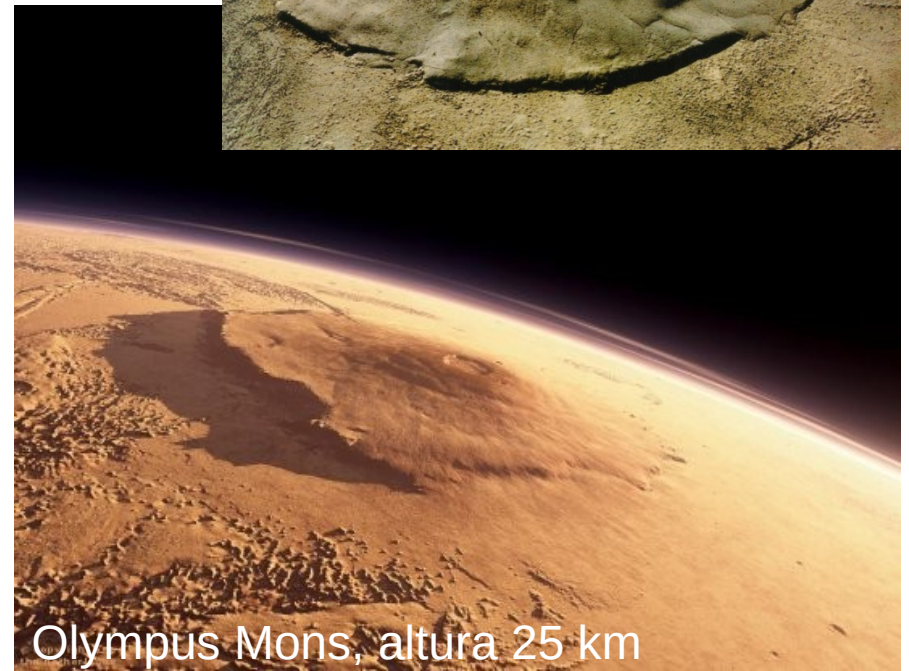
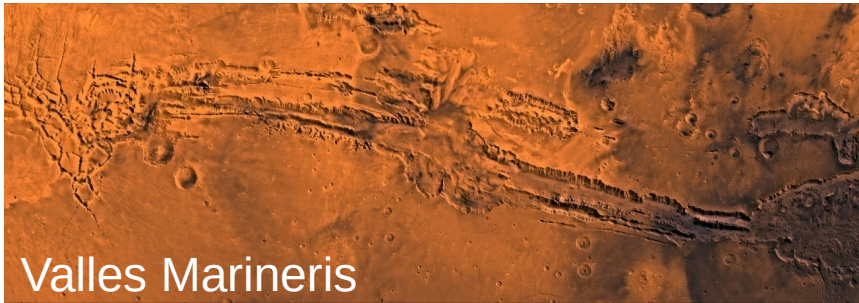
Image Credit :
National Geographic Society,
MOLA Science Team
MSS, JPL, NASA

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 K = -47 °C

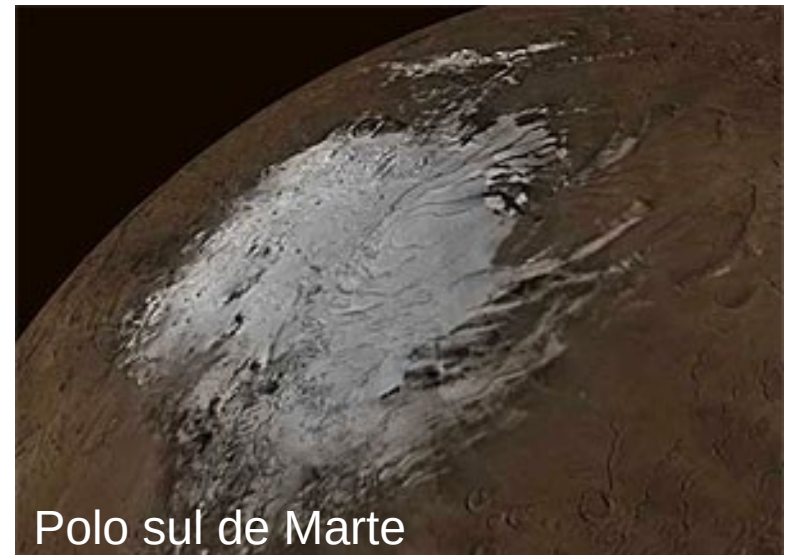
- com albedo (0.15): 210 K = -62 °C,

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**, CO₂ 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**.

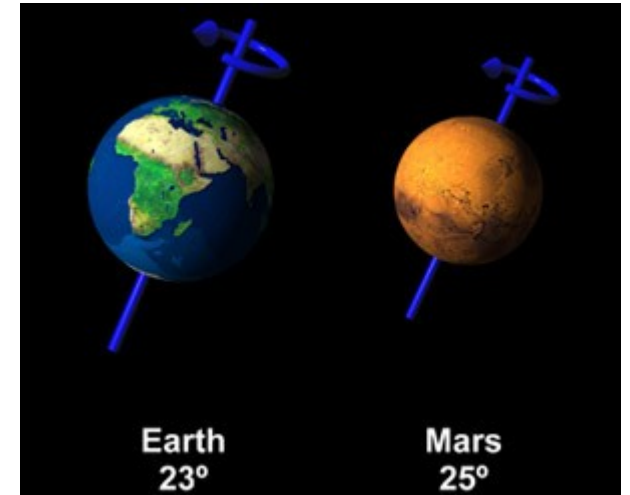
Com menos CO₂ na atmosfera, o **efeito estufa diminuiu**.

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.



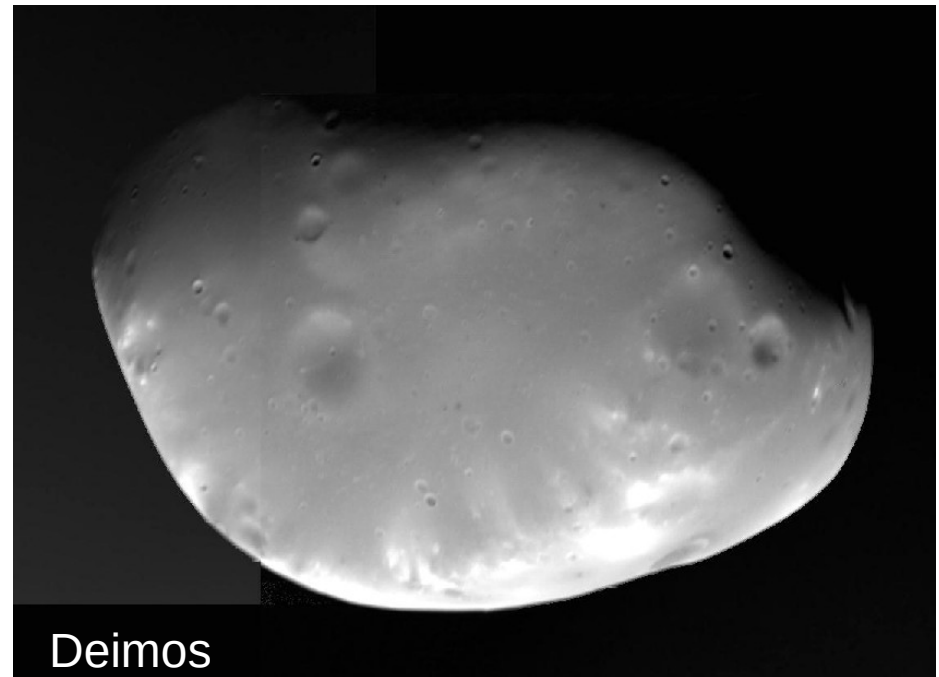
Cálculos detalhados precisam da Relatividade Geral!

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

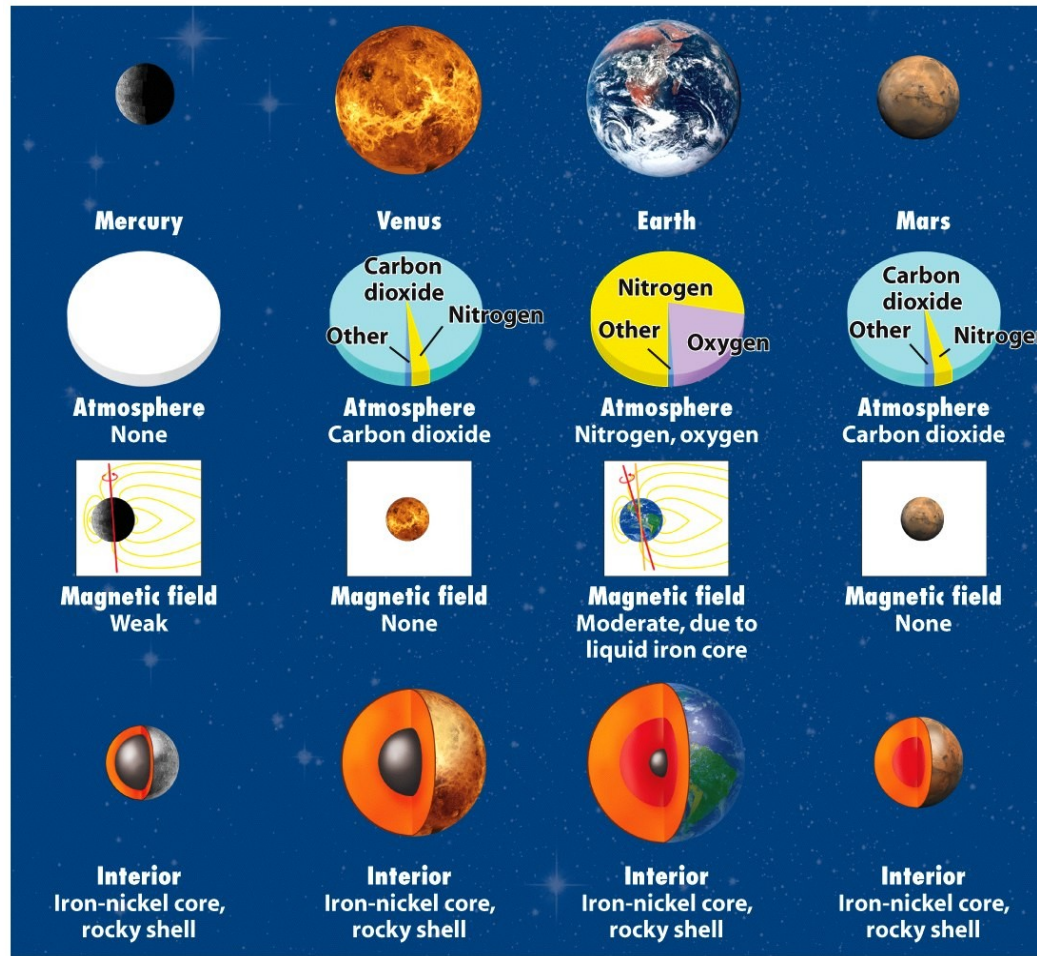
Table 7-1 part 1

Universe, Eighth Edition

© 2008 W. H. Freeman and Company

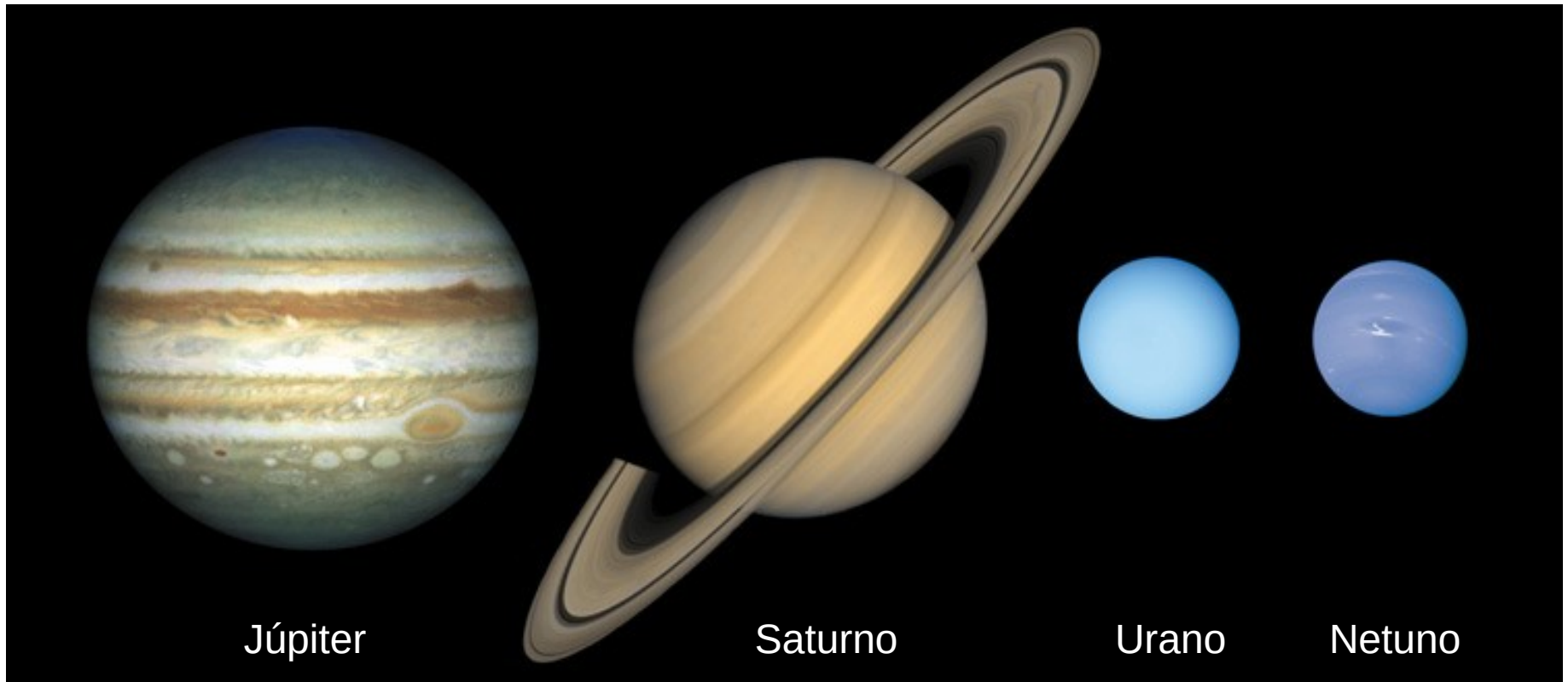
Resumo

Características dos planetas interiores (telúricos)



Planetas Exteriores

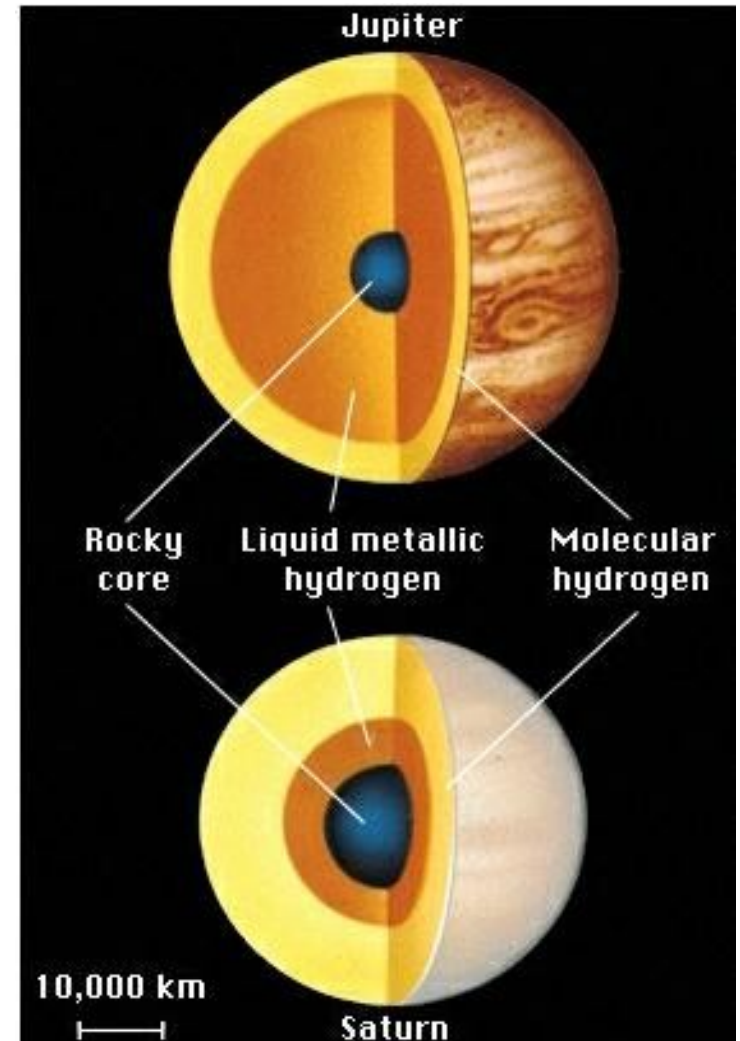
Ou Jovianos ou Gigantes Gasosos e Gelosos



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

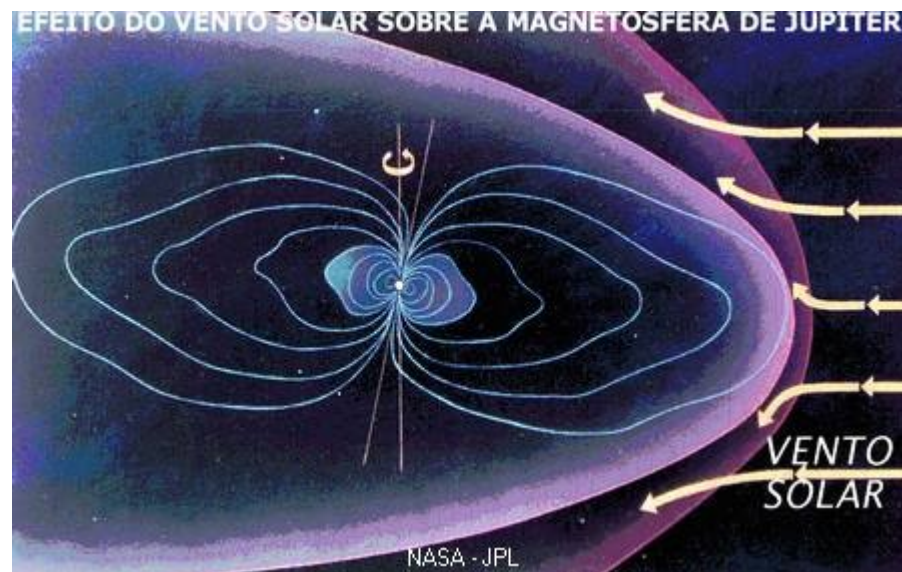
Rotação rápida

(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.



Júpiter

Símbolo ♃

Rei dos deuses gregos

5º planeta do Sol, 5.2 AU

4º mais brilhante objeto no céu

$$R_{\text{♃}} = \sim 11 R_{\oplus}$$

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

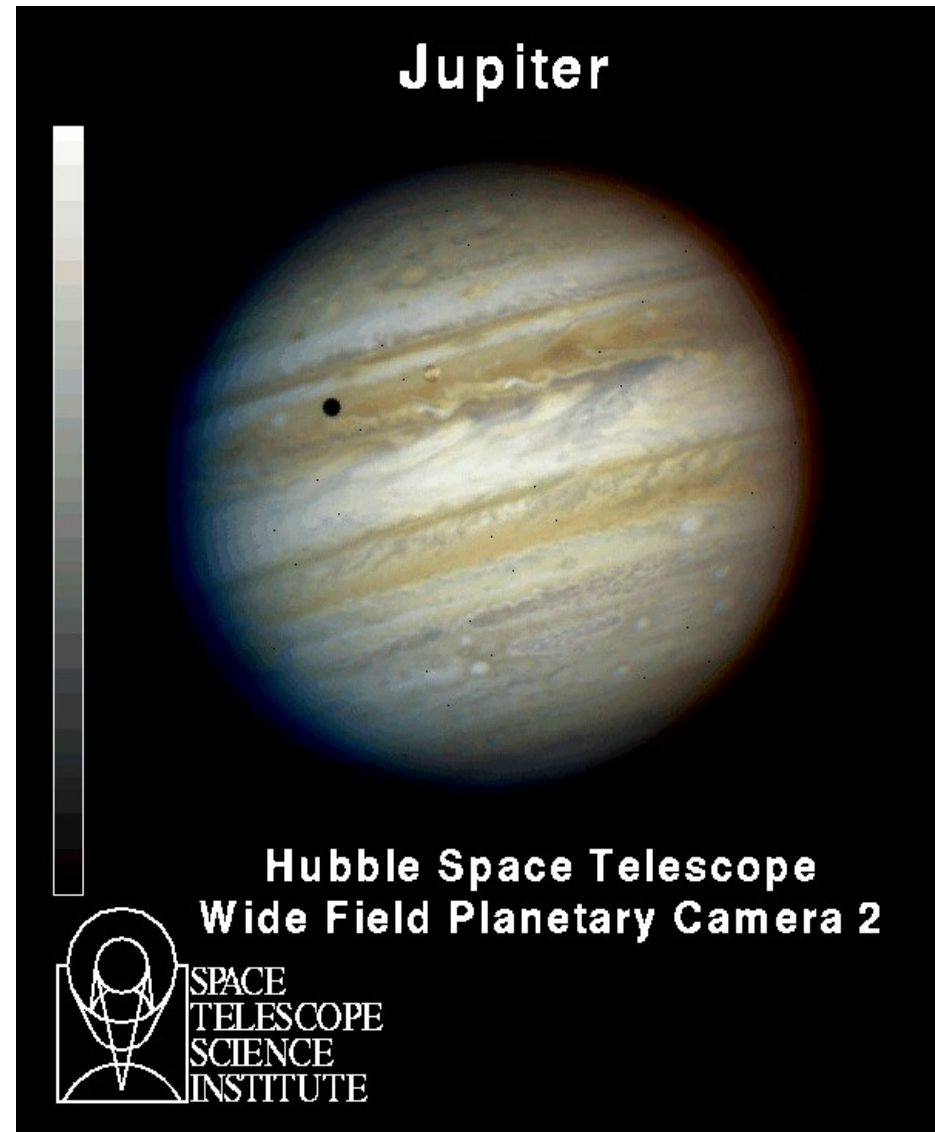
=> **Maior planeta** e de **maior massa** do **Sistema Solar**

densidade média: 1326 kg/m^3

Rotação 0.41 dias terrestres

Revolução: 11.8 anos terr.

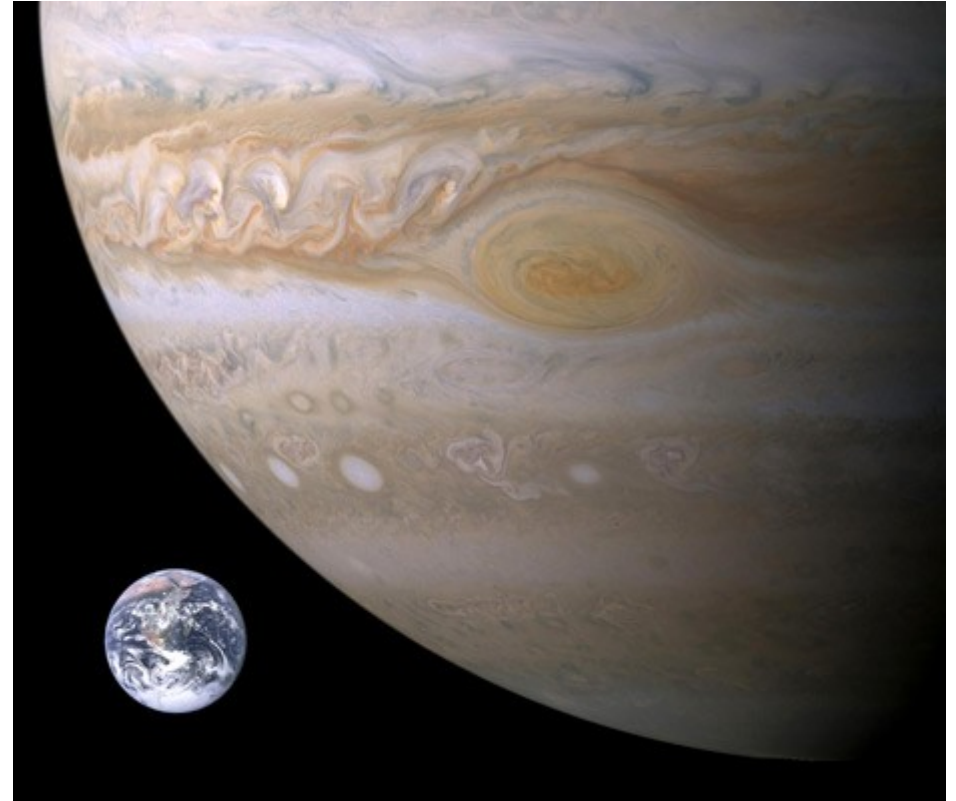
Temperatura média: -148°C



Júpiter

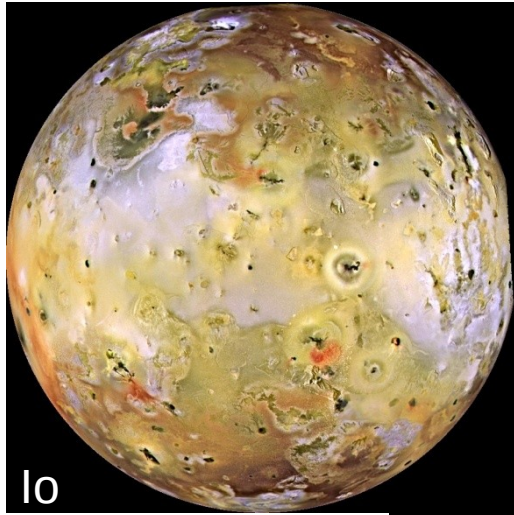
Faixas se devem às **nuvens** de amoníaco, hidrossulfeto de amônio e água, e à **rotação diferencial**.

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



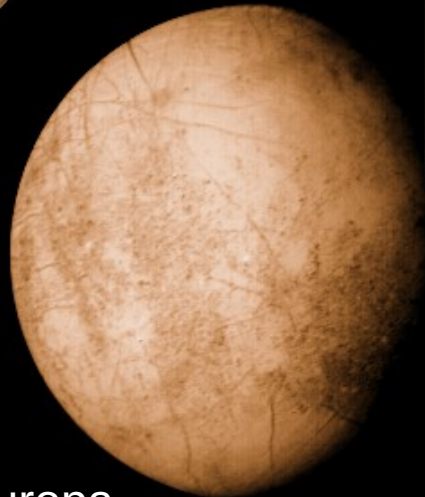
As Luas de Júpiter

> 70 luas (79 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

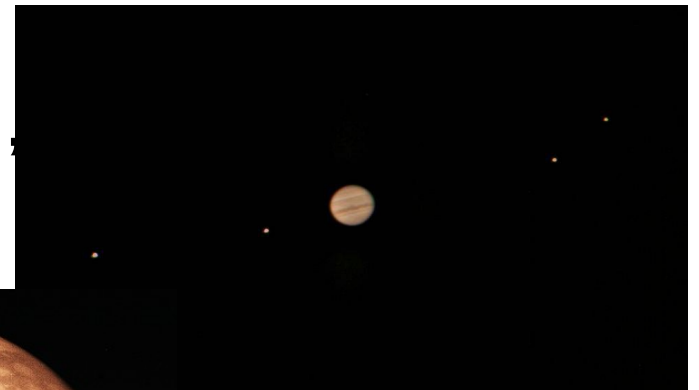
maior lua do SS (> que Mercúrio), superfície de gelo com crateras



Calisto

similar a Ganímedes

distância de Júpiter →

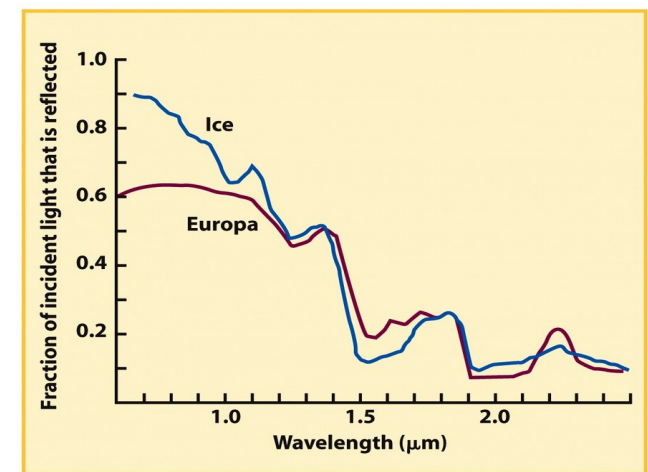
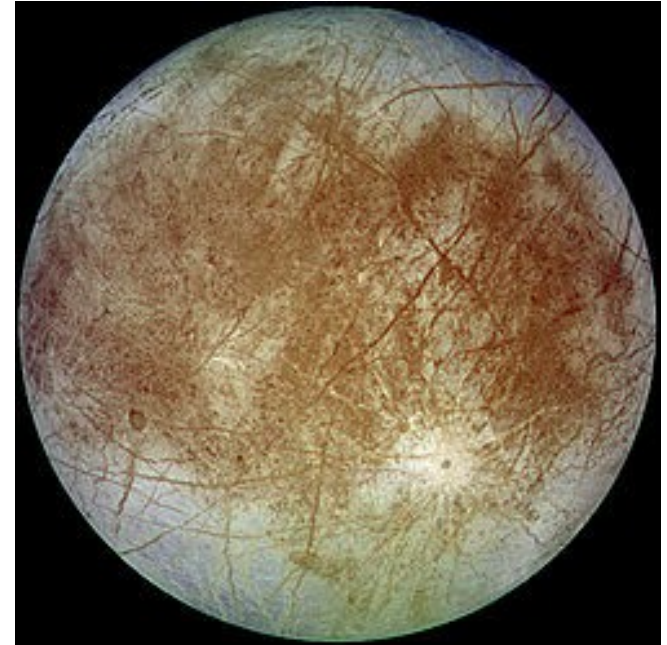


As Luas de Júpiter

Europa

- **caroço** rico em **ferro**
- **manto** de **silício**
- capa de **gelo** (=> 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 (=> 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

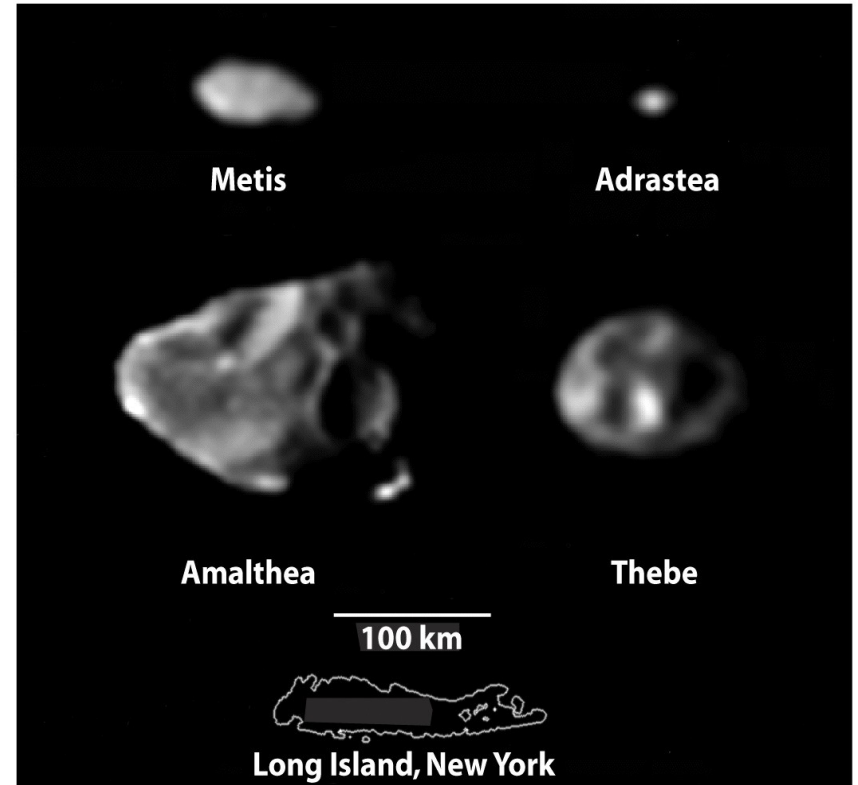
As Luas de Júpiter

Tem mais de 70 **luas menores** (75 conhecidas até hoje, as últimas 12 descobertas de 2016 a 2018),

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?

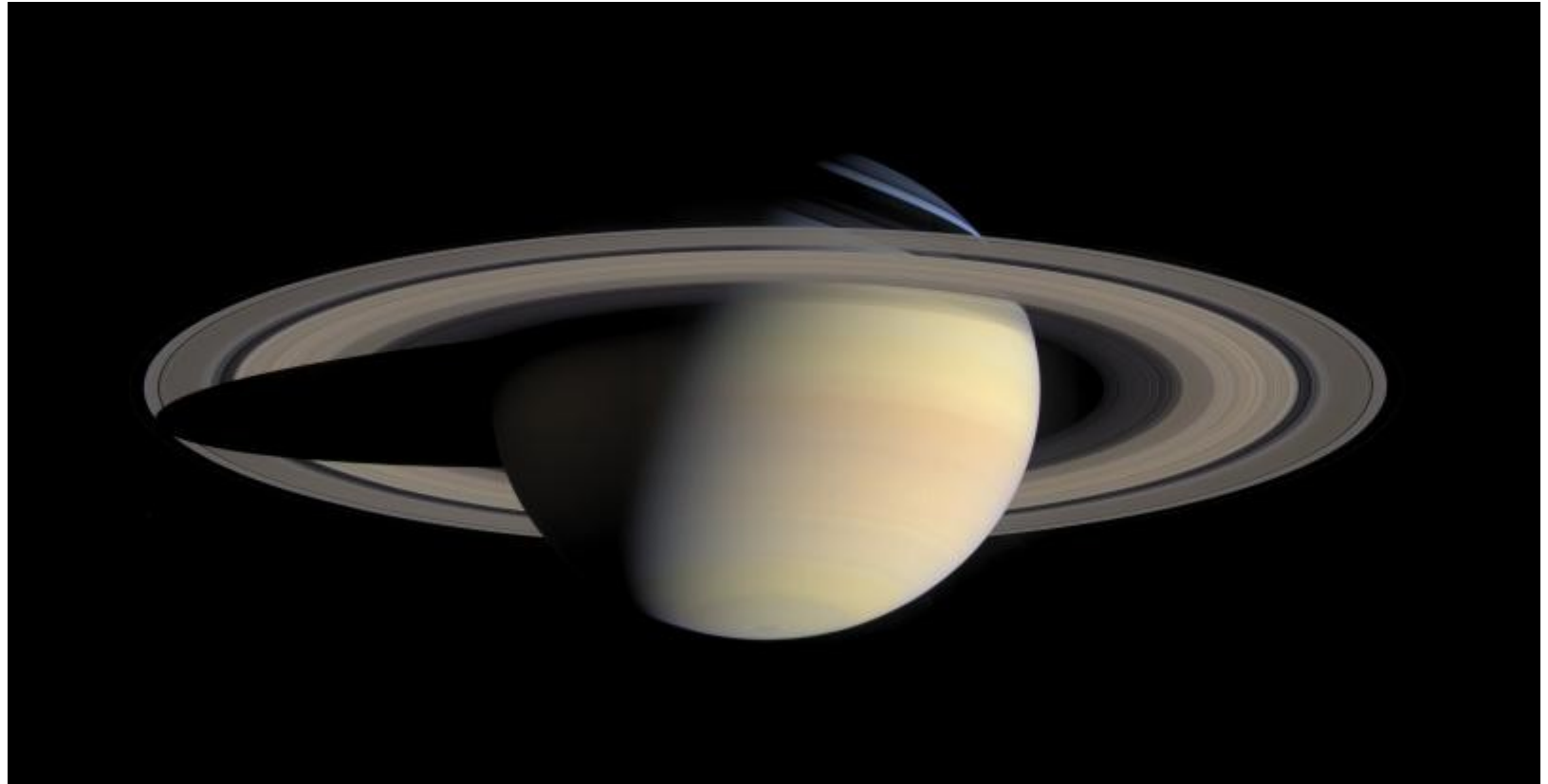
Pedaços de um maior satélite destruído por uma colisão?



Saturno

Símbolo ♄
Deus da
agricultura

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



tamanho:

só um pouco menor que Júpiter, mas massa $\approx 1/3 \cdot M_{\text{J}}^{\text{pl}}$

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

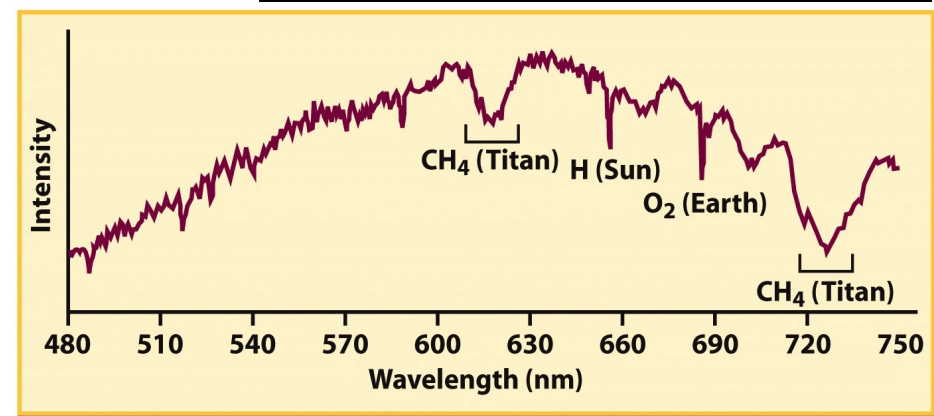
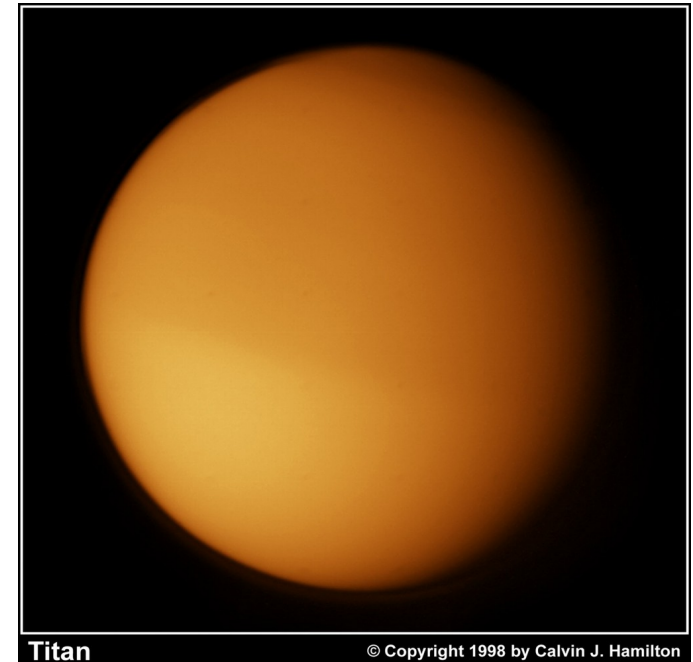
2ª maior lua do Sistema Solar

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)

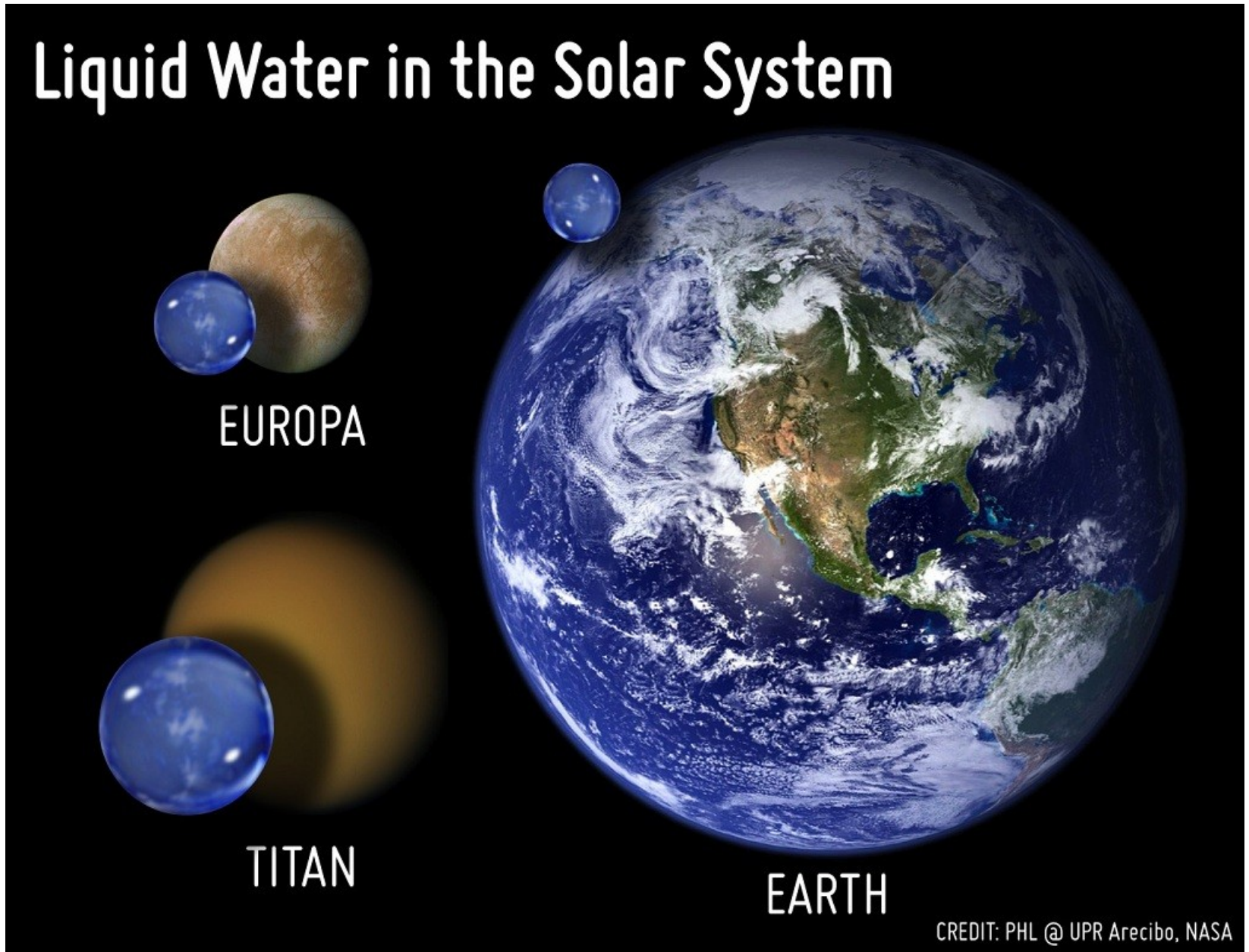


The spectrum of sunlight reflected from Titan

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

As Luas de Saturno

Titã



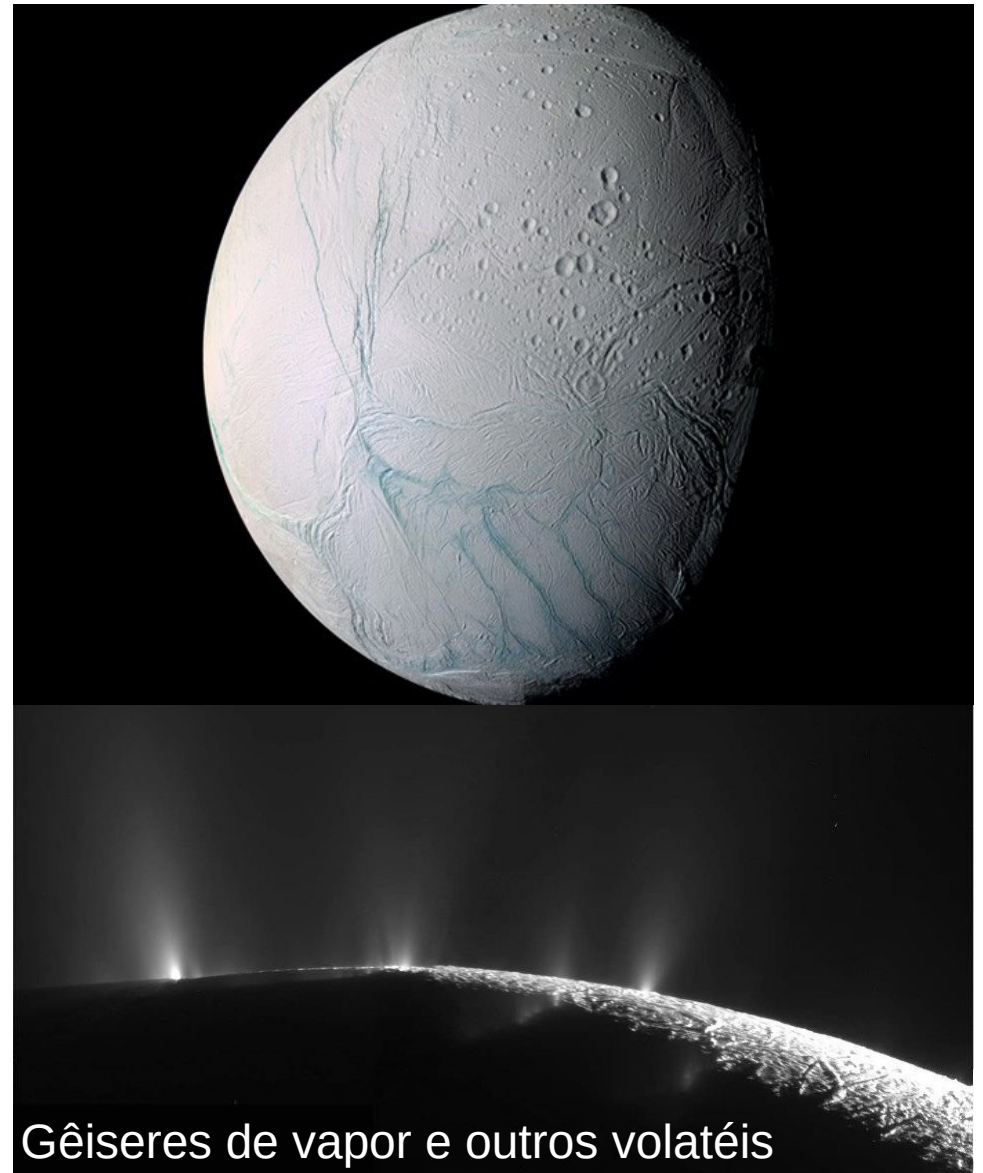
As Luas de Saturno

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)



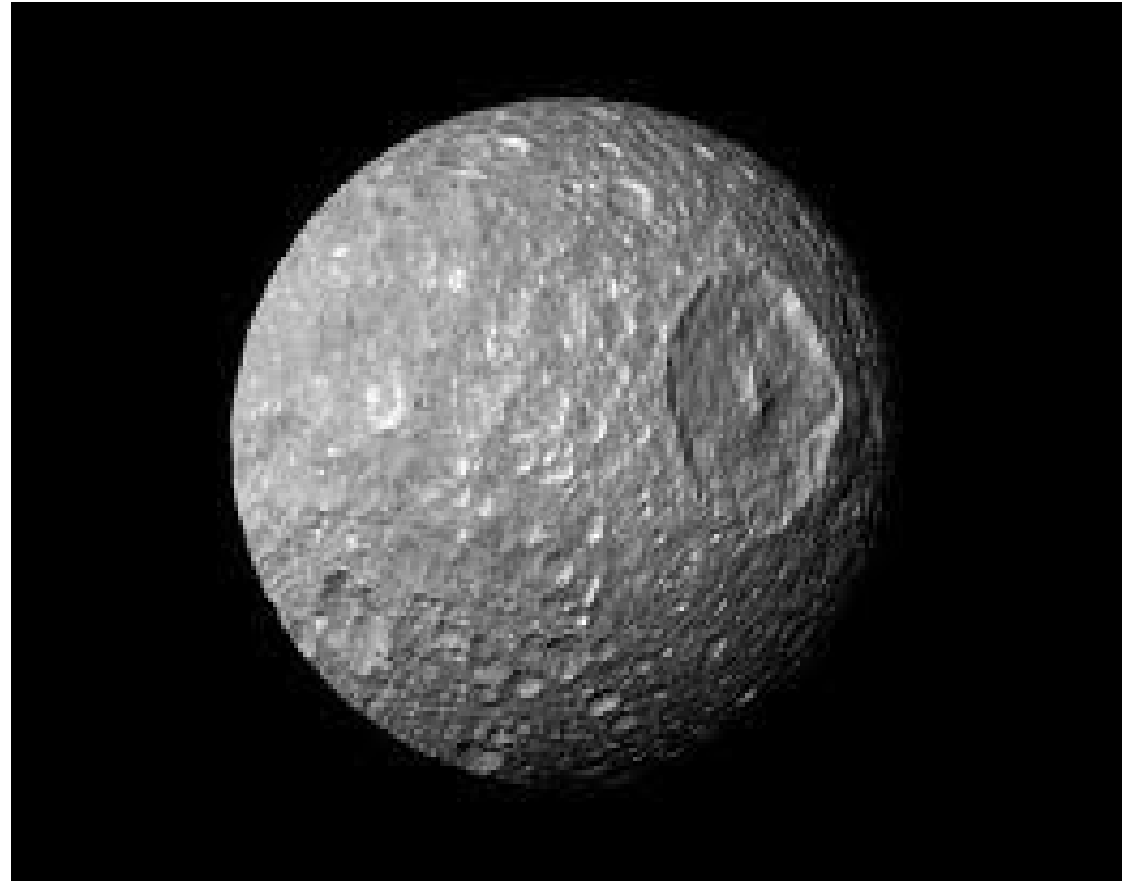
Gêiseres de vapor e outros volatéis

As Luas de Saturno

Mimas

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

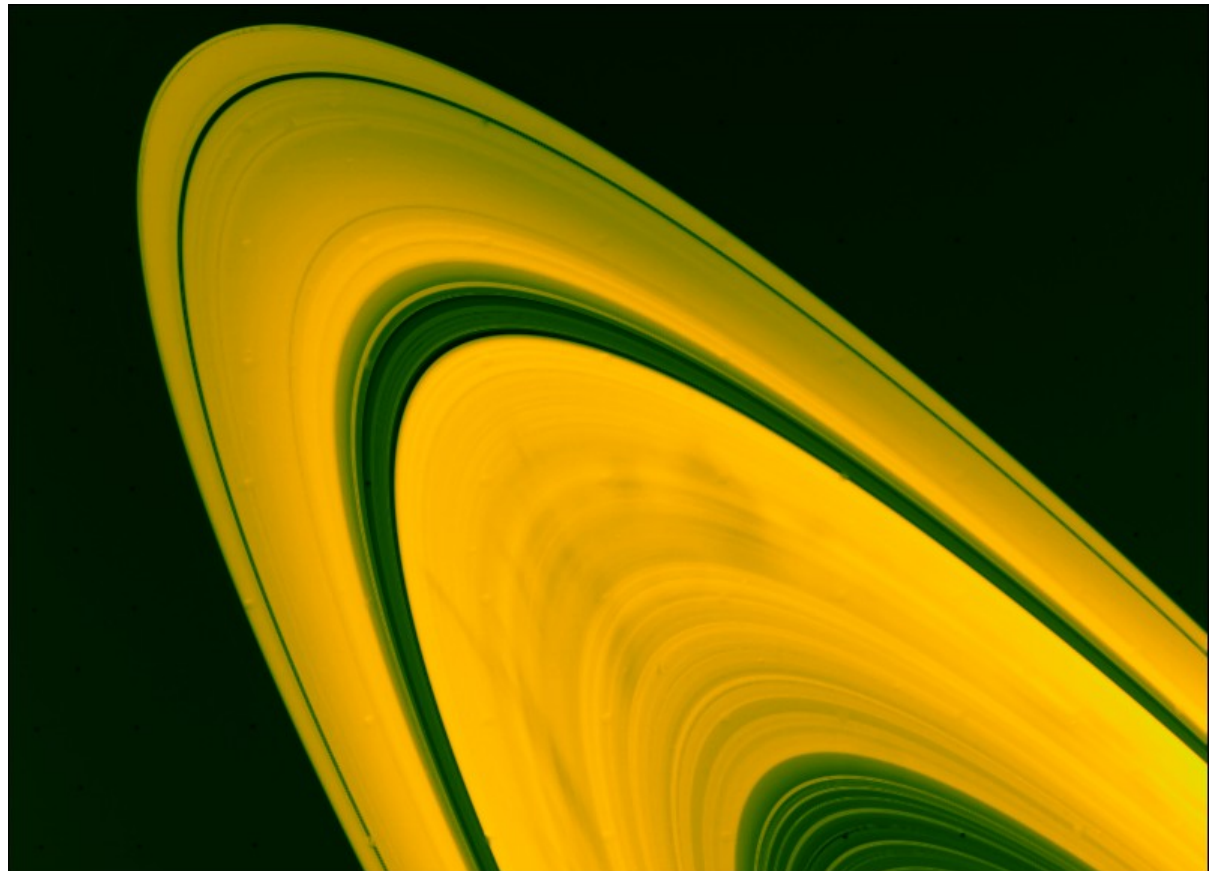
Além de Titã, Encélado e Mimas, Saturno tem pelo menos 59 luas a mais, similar ao Júpiter



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 $8 R_h$)
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**

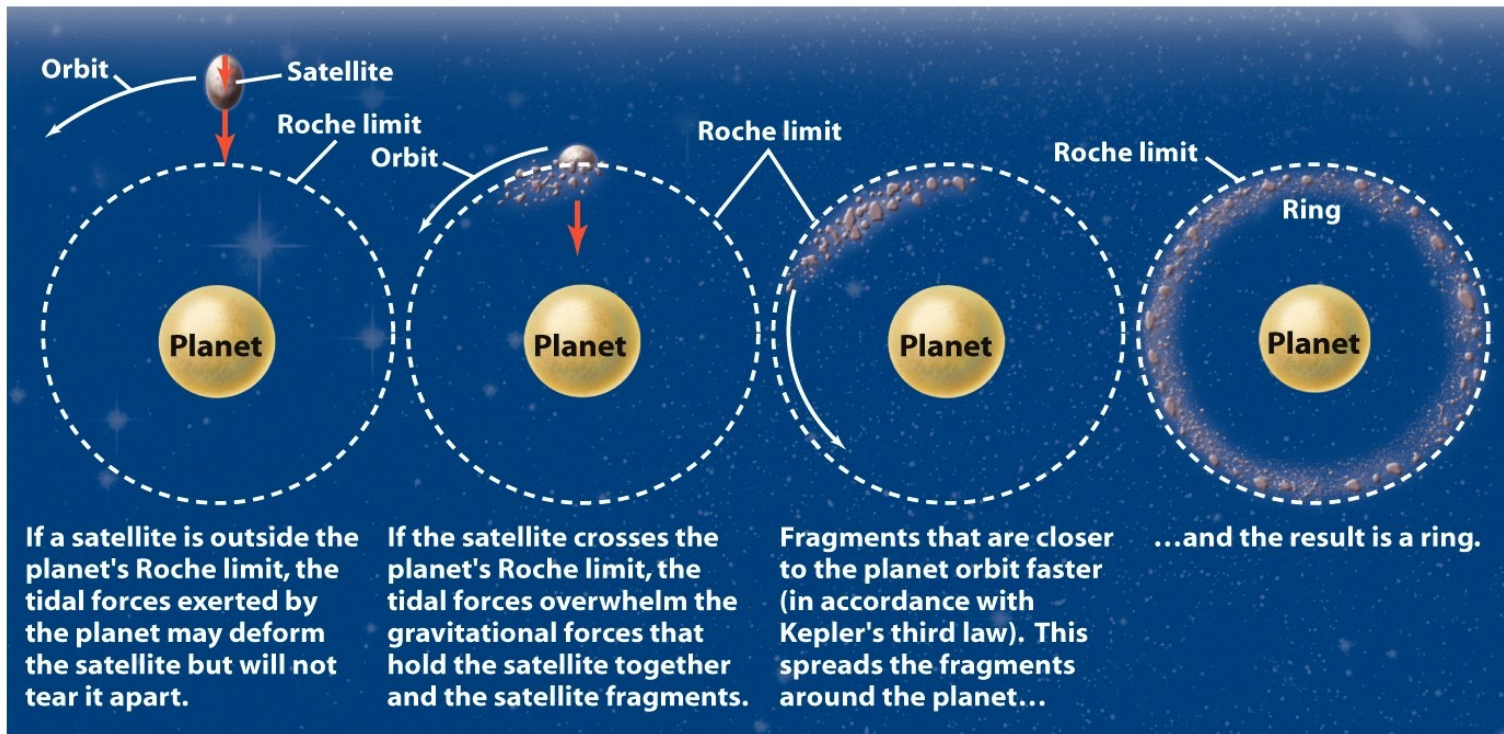
Algumas das luas de Saturno, as **luas “pastores”**, ajudam a mantê-las nas órbitas. **Ressonâncias** também ajudam.

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?

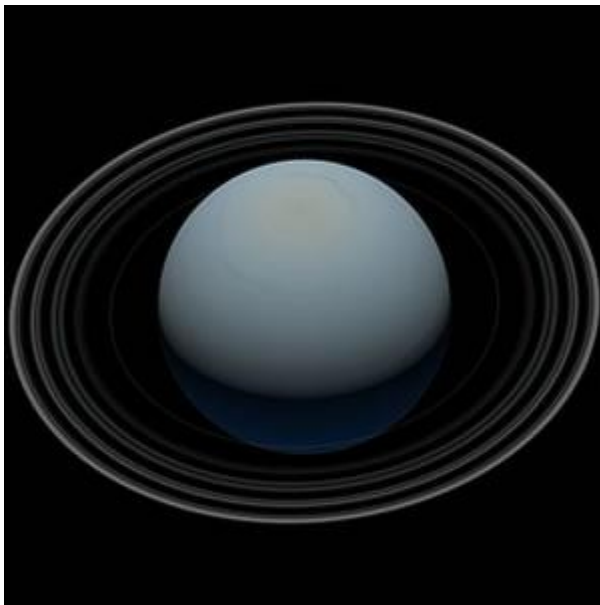
Talvez o material é "reposto" por ejeção de material de luas por meteoritos (Lua Mab de Urano) e/ou vulcanismo (Encélado).

Urano

Símbolo $\Upsilon/\♁$, Deus dos céus
7º planeta do Sol

Descoberto por acaso em
1781 por William Herschel

Rotação 0.72 dias “retrógrada”



Revolução:
84 anos terr.

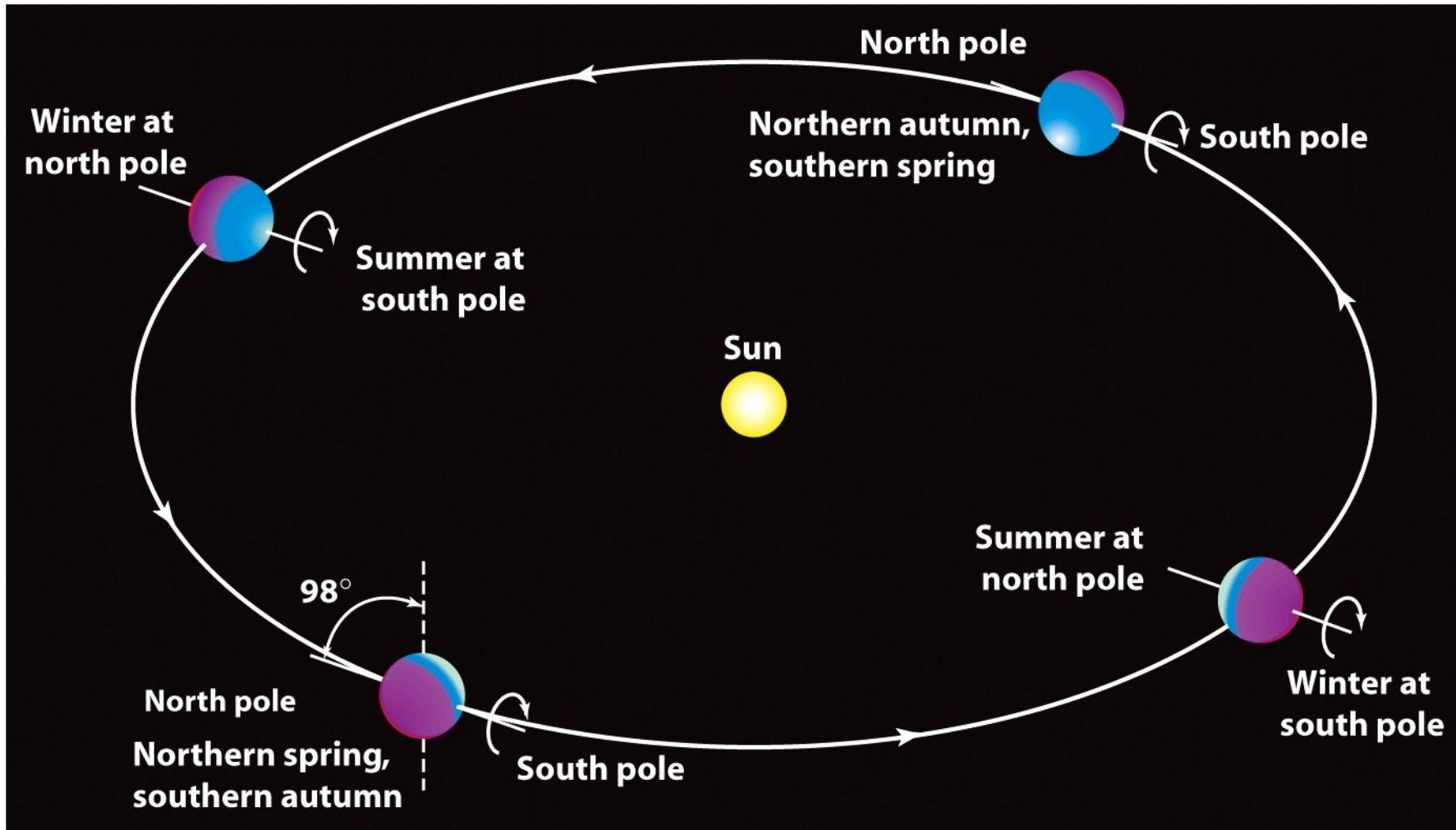
T. média:
-216 °C

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.

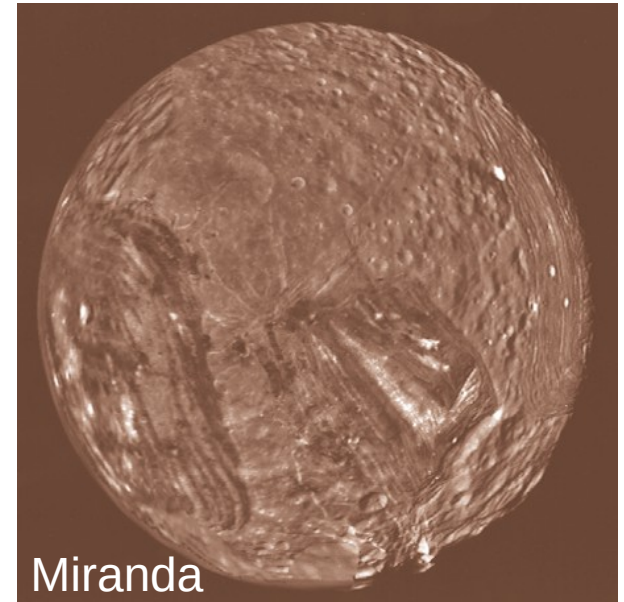
40 % - 50 % **água**, o resto **rocha**.

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

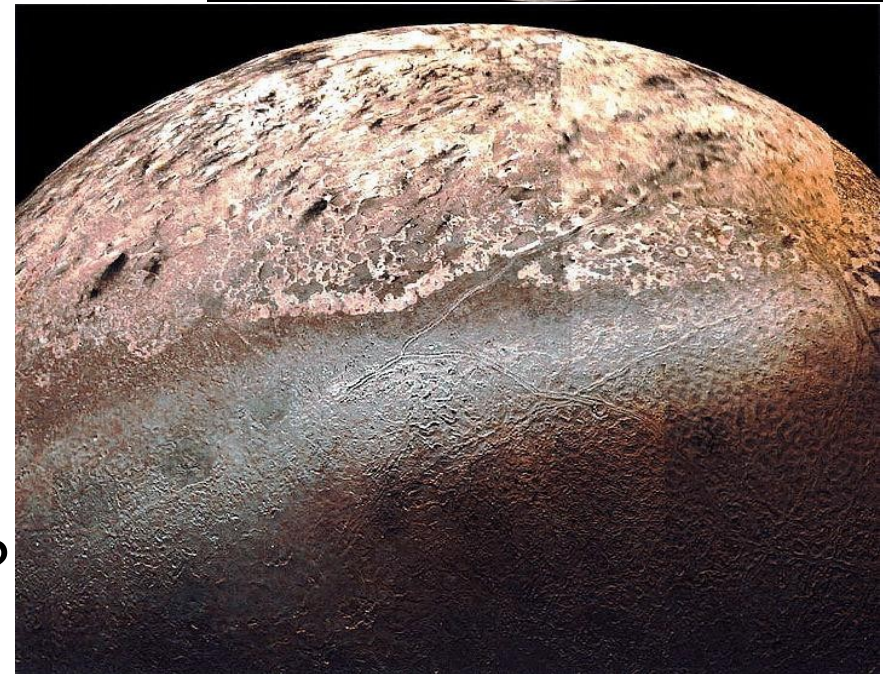
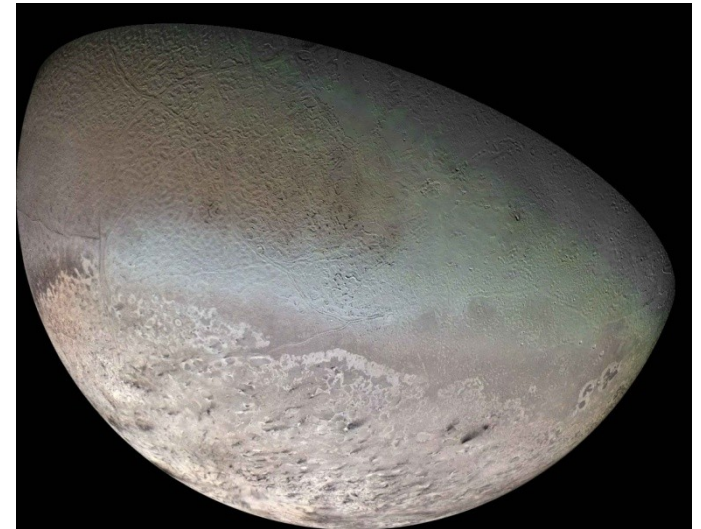
Gêiseres de Nitrogênio líquido

Órbita retrógrada

Objeto transnetuniano capturado?

Pode ter desestabilizado um

sistema de satélites pré-existente na órbita de Netuno

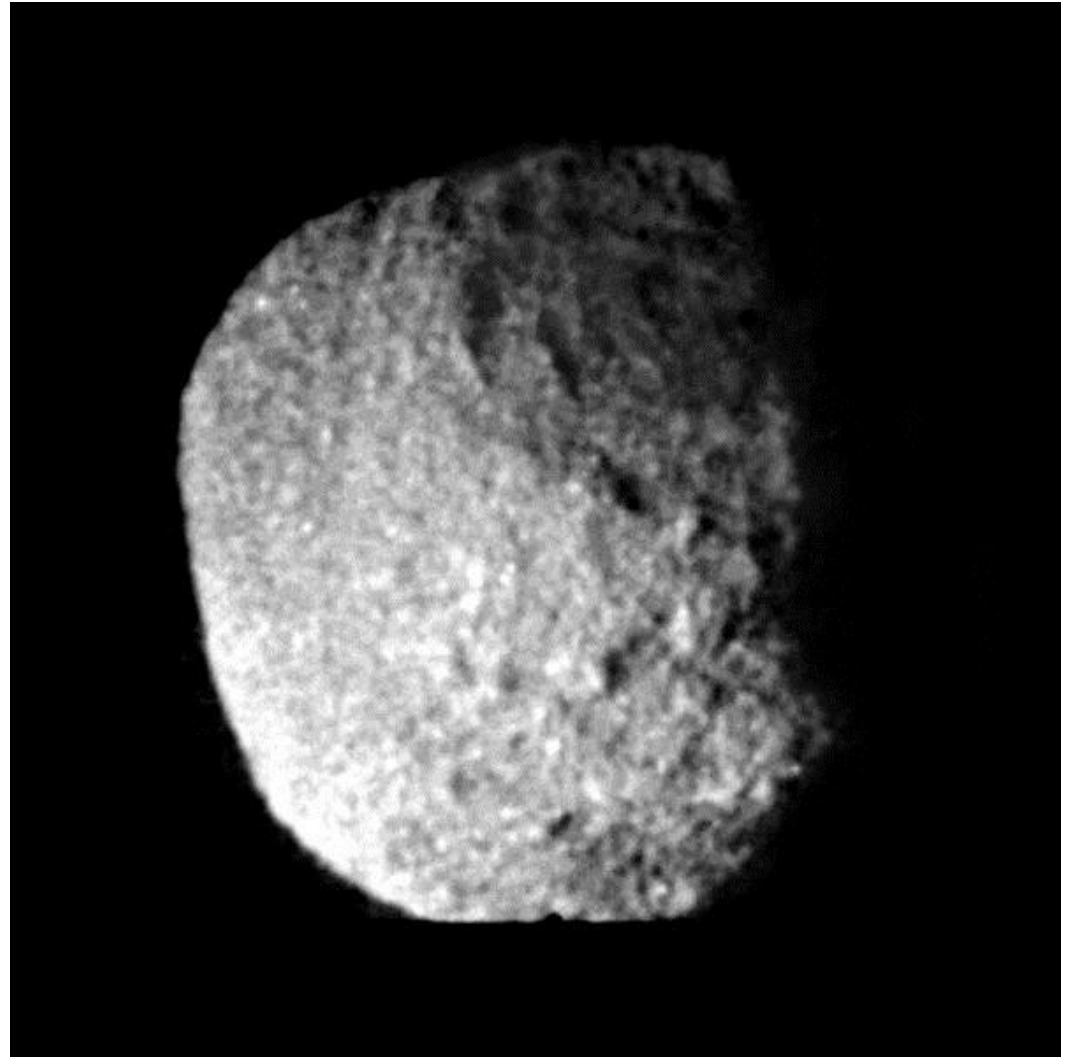


As Luas de Netuno

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

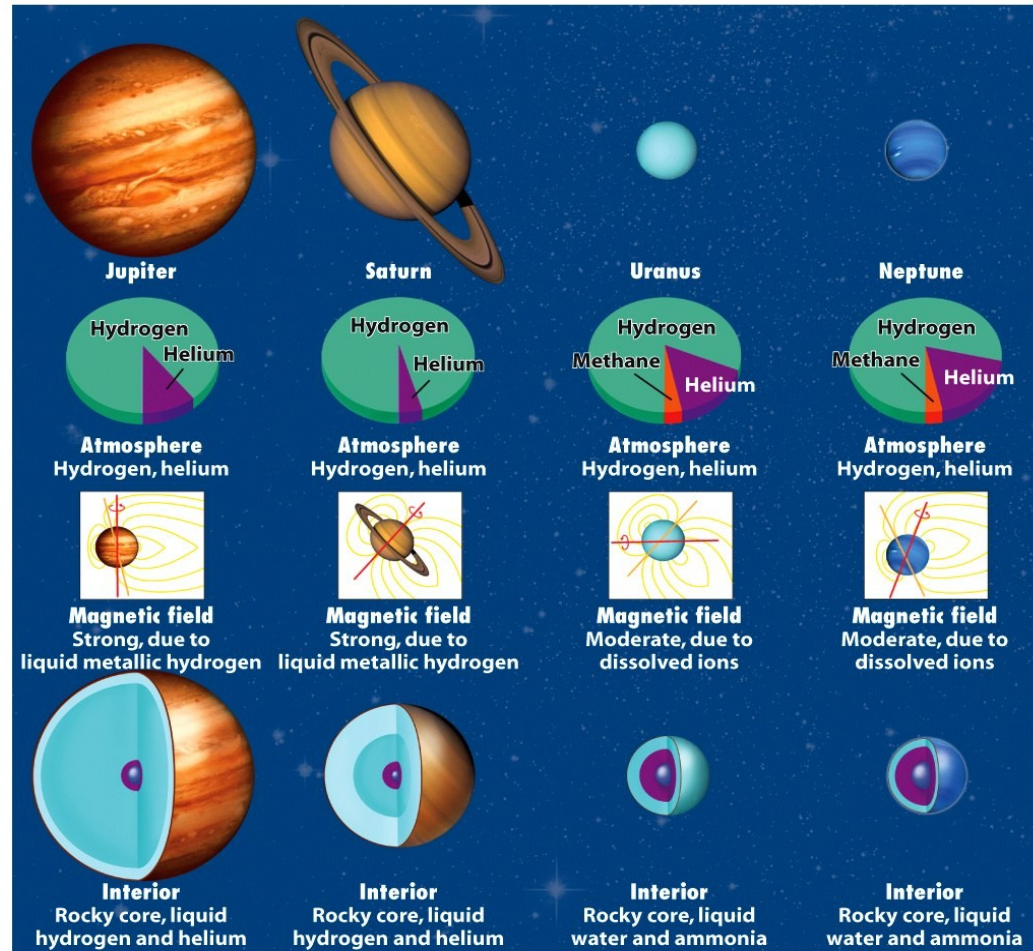
Table 7-1 part 2

Universe, Eighth Edition

© 2008 W.H. Freeman and Company

Resumo

Características dos planetas exteriores (jovianos)



Corpos Menores do Sistema Solar

Além dos planetas e suas luas, tem milhares de **corpos menores** orbitando o Sol.

Eles podem ser classificados em três grupos:

- **Asteroides**: corpos **rochosos**, muitos deles em órbitas entre Marte e Júpiter, na **Cintura de Asteroides**.
- **Objetos TransNetunianos** (TNOs): corpos **gelosos** em órbitas além da de **Netuno**, em regiões chamadas **Cintura de Kuiper** e **Nuvem de Oort**.
- **Cometas** periódicos: corpos **gelosos** que passam maior parte do tempo na **Cintura de Kuiper** ou na **Nuvem de Oort**, e periodicamente passam pelo SS interior.
- Cometas não-periódicos estão só de passagem, eles não fazem parte do Sistema Solar.

Asteroides

Em 1766, Johann Titius detectou uma **regularidade** nas **distâncias médias** dos **planetas** do **Sol**, popularizada mais tarde por Johann Elert Bode, a **Lei de Titius-Bode** (a é a distância média Sol – n -ésimo planeta em AU):

$$a = 0.4 + 0.3 \cdot 2^n$$

A lei **prevê** bem as **distâncias** de **Vênus a Saturno** e até de **Urano**, que ainda não tinha sido descoberto em 1766 (detalhe: para Mercúrio se tem que usar $2^n = 0$, e não $2^n = 2^{-1} = 0.5$).

Planeta	n	a [AU]	a real [AU]
Mercúrio	$-\infty$	0.4	0.39
Vênus	0	0.7	0.72
Terra	1	1.0	1.00
Marte	2	1.6	1.52
?	3	2.8	
Júpiter	4	5.2	5.20
Saturno	5	10.0	9.58
(Urano)	6	19.6	19.20
(Netuno)	7	38.8	30.05
(Plutão)	8	77.2	39.48

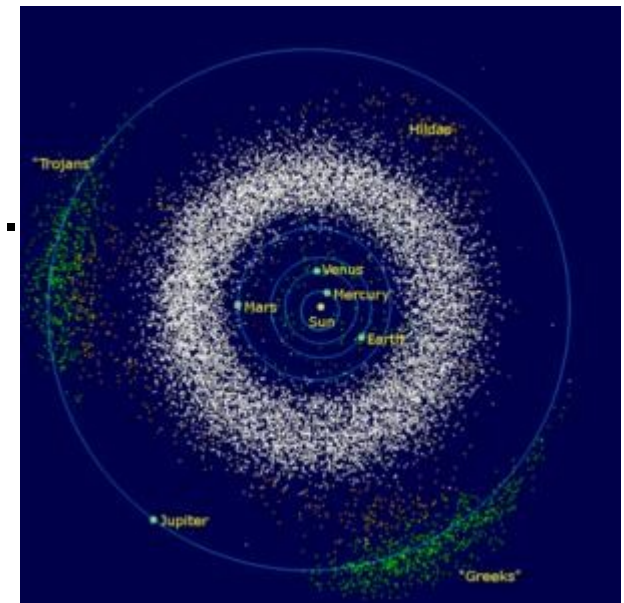
Asteroides

A Lei de Titius-Bode **prevê** um **planeta** a 2.8 AU do Sol, **entre Marte** e **Júpiter**.

Em 1801 Giuseppe Piazza encontrou um objeto a 2.77 AU do Sol de diâmetro ~1000 km, e chamou-o **Ceres** (♀), o **primeiro asteroide descoberto**.

Desde então encontraram >100'000 asteroides na região entre 2 e 3.5 AU do Sol, chamada **Cintura de Asteroides**.

Apesar da previsão correta das distâncias de Urano e Ceres, hoje os astrônomos acreditam que a Lei de Titius-Bode é só um acaso.

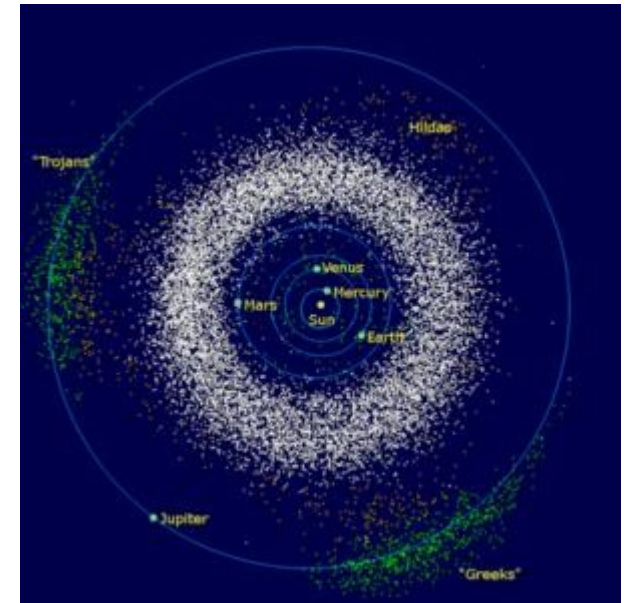


Asteroides

A maioria dos asteroides se encontra na Cintura de Asteroides, mas alguns seguem outras órbitas:

- Os **Troianos** (pontos verdes) se encontram nos pontos lagrangianos L_4 e L_5 do sistema Sol-Júpiter

(Os pontos lagrangianos são posições nas quais a força gravitacional exercida pelas duas massas, no caso, M_{\odot} e M_{J} , sobre uma pequena massa m iguala a força centrípeta necessária para que m se mova com o sistema.), compartilhando a **órbita de Júpiter**, 60° na frente ou atrás do planeta gigante; os na frente, no ponto L_4 são, às vezes chamados **Gregos**.



Asteroides

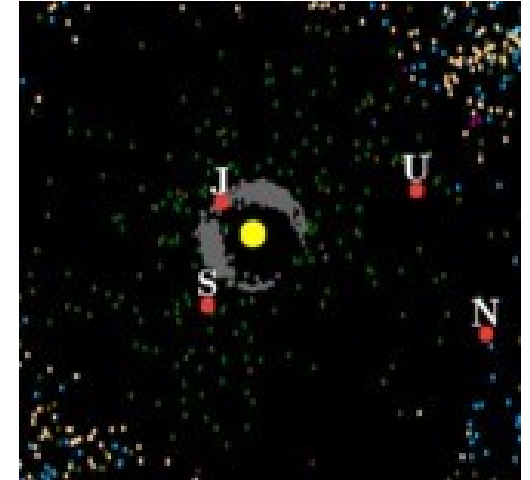
- Os **Centauros**, com órbitas entre as dos planetas externos).

- Os **Amors**, **Apollos** e **Atens** orbitam no **Sistema Solar interno**, podendo cruzar as órbitas dos planetas internos.

Seriam asteroides inicialmente no cinturão que sofreram perturbações de Júpiter?

Entre eles há objetos interessantes como 3753 Cruithne (um Aten), em ressonância 1:1 com a Terra, e 2016 HO₃ (um Apollo), "quasi-satélite" da Terra.

- Alguns formam famílias, e acredita-se que tais famílias, chamadas **famílias Hirayama**, consistem de fragmentos de corpos maiores destruídas em colisões.



cinza: troianos,
verde: centauros

Asteroides

Os asteroides podem ser **classificados** segundo as suas **composições**, determinadas pelos seus **espectros**:

- tipo S: De 2 a 3.5 AU do Sol, silicatos ricos em ferro e magnésio, poucos voláteis, avermelhados, albedos moderados: 0.1-0.2
- tipo M: 2 a 3.5 AU, ferro e níquel, avermelhados, albedos moderados: 0.1-0.18



Asteroides

- tipo C: 2 a 4 AU, maioria perto de 3 AU, compostos carbonáceos, muitos contêm água, escuros, albedos baixos: 0.03-0.07
 - tipo P: 3 a 5 AU, maioria ~4 AU, compostos orgânicos, avermelhados, albedos baixos: 0.02-0.06
 - tipo D: similar aos tipo P, mas mais vermelhos e um pouco mais longes do Sol, a maioria dos Troianos são tipo D
- => Quanto **mais longe** do **Sol**, tanto **mais água** e outros **voláteis**, a mesma tendência que para os **planetas** e **luas**.
- => Dica sobre a **formação** do **Sistema Solar**.

Mathilde, tipo C



Cybele, tipo P



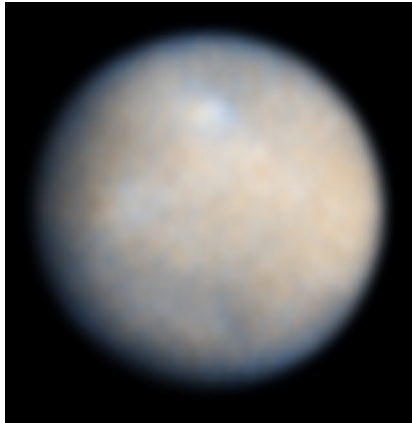
Hektor, tipo D,



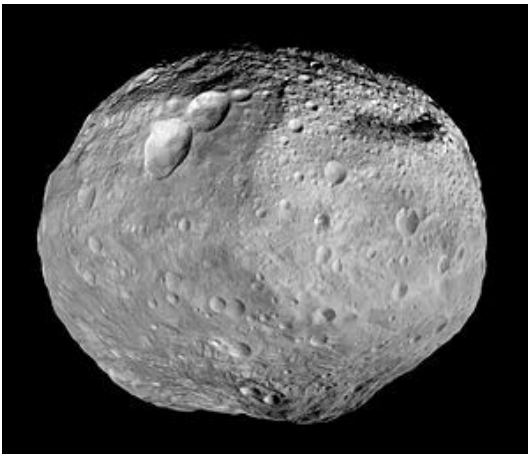
Asteroides

Os maiores Asteroides

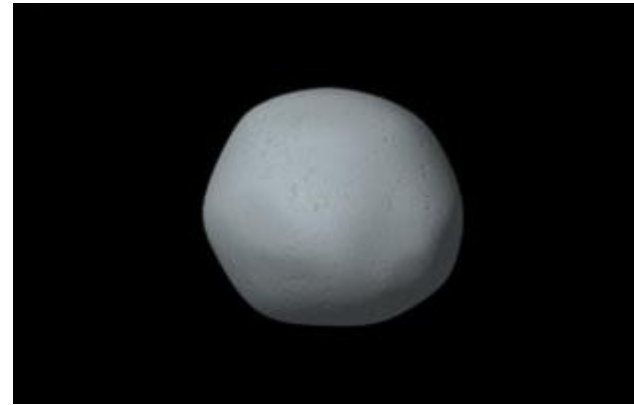
Ceres ♃ (diâmetro 952 km)



Vesta ⚓ (525 km)



Pallas ♃ (544 km)



Hygeia ♃ (431 km)

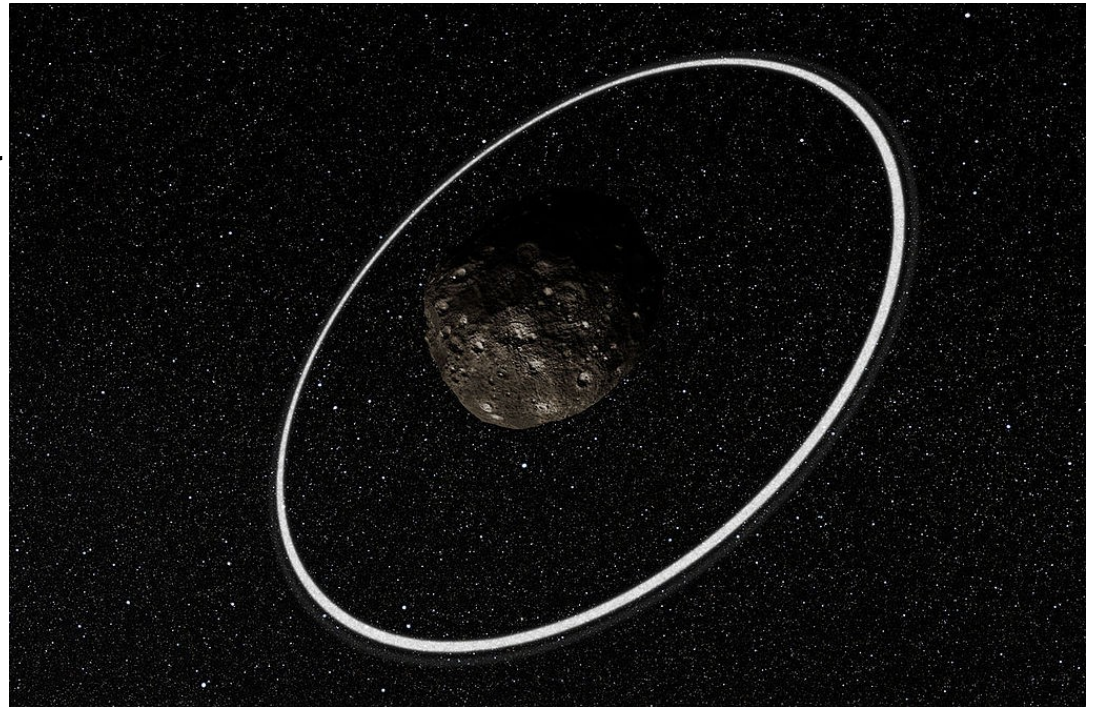
Não há foto

Asteroides

Anéis um torno de Asteroides

Em 2014, astrônomos anunciaram a descoberta de dois **anéis** em torno de 10199 Chariklo (em centauro), por ocultação estelar.

A origem destes anéis não é muito clara.



Chariklo com seus áneis (interpretação artística)

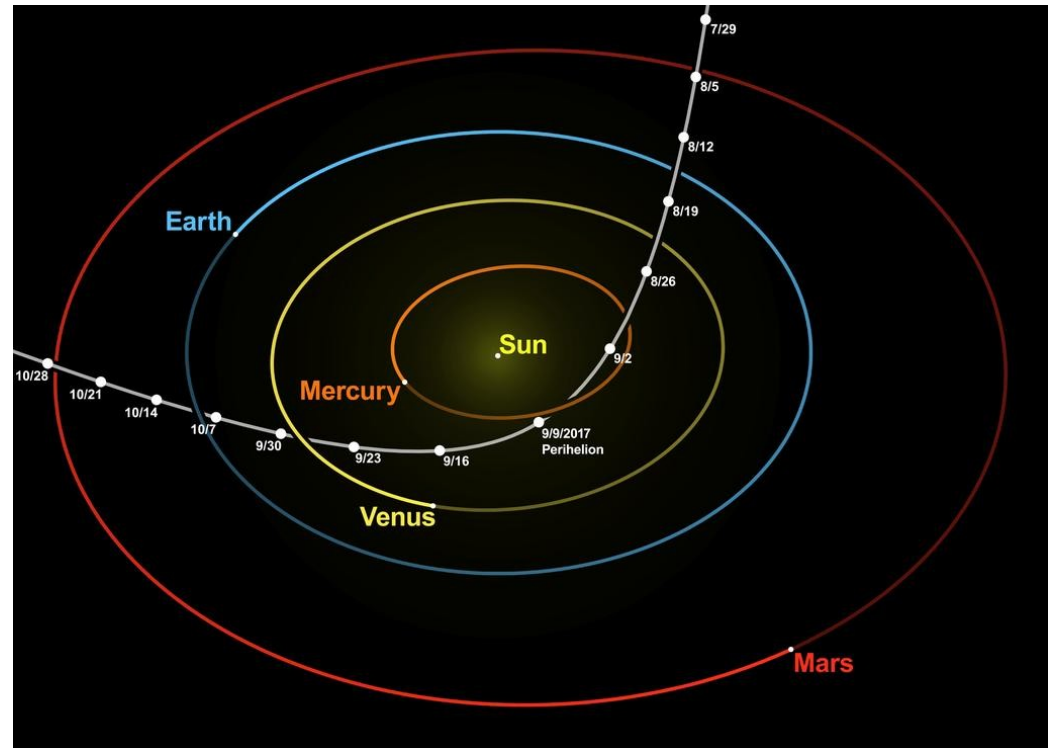
Asteroides

Asteroide de fora do Sistema Solar

Em setembro 2017, passou perto do Sol o primeiro **objeto interestelar** conhecido pelo Sistema Solar, 1I/2017 U1 (Oumuamua).

Inicialmente suspeito de ser um cometa, foi reclassificado como asteroide e finalmente como primeiro de uma nova classe de objetos interestelares.

24/09/2019 foi publicado a descoberta de um segundo objeto interestelar, 2I/Borisov.



Trajetório de Oumuamua

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Matéria no espaço interplanetário que é muito **pequena** para ser chamado asteroide ou cometa, e em **rota** de **colisão** com a **Terra** é chamado **Meteoroides**.

Se queimados na atmosfera: **Meteoros**, estrelas cadentes

Se resta algo chegando no chão: **Meteoritos**



Meteoro



Cratera de meteorito em Arizona, EUA

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Chuvas de Meteoros

Quando a **Terra cruza** a **trilha** de **detritos** deixada por um **cometa** (cometas: em breve nesta aula), ocorre um **número elevado** de **estrelas cadentes**, chamado **chuva de meteoros**.

Os meteoros parecem vir todos da **mesma direção**, a direção do movimento dos detritos relativo ao movimento da Terra, chamada **radiante**.

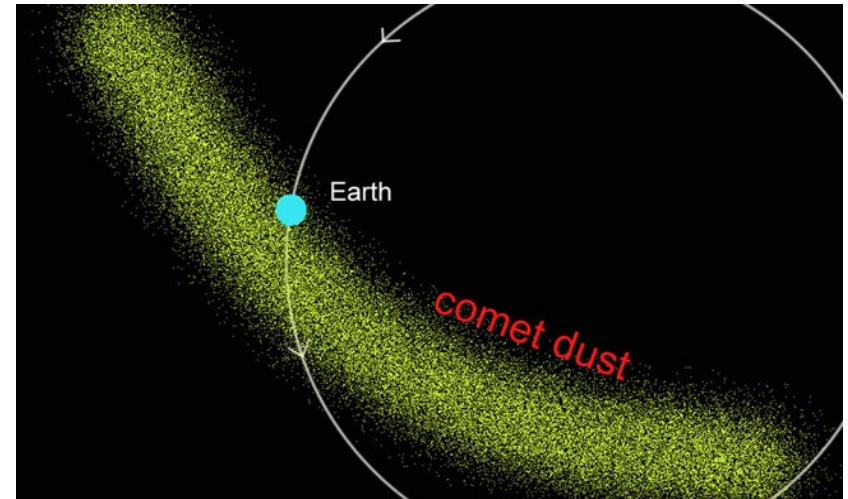


Foto de longa exposição durante os Geminídeos

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Chuvas de Meteoros

Chuvas de meteoros são fenômenos **periódicos anuais**, e ganham o nome da **constelação**, de onde elas parecem vir (onde fica o radiante).

As mais conhecidas e intensas são as Perseidas, em agosto, e as Leônidas, em novembro.

Nome	Máximo	Taxa Horária*	Constelação
Quadrantídeas	04 Jan	95	Bootes
Lirídeas	22 Abr	15	Lyra
Eta-Aquarídeas	05 Mai	30	Aquarius
Delta-Aquarídeas	29 Jul	20	Aquarius
Perseídeas	13 Ago	95	Perseus
Orionídeas	22 Out	20	Orion
Taurídeas	03 - 13 Nov	15	Taurus
Leonídeas	18 Nov	12	Leo
Geminídeas	14 Dez	90	Gemini



Foto de longa exposição durante os Geminídeos

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Meteoritos

Têm **idades** de **~4.5 bilhões de anos**, e são amostras de matéria dos **primórdios** do **Sistema Solar**, embora em muitos casos as propriedades deles tenham sido modificadas por processos térmicos-metamórficos.

Ajudaram muito no **estudo** da **formação** e **evolução** do **Sistema Solar**.

Dividem-se em três grupos:

- **Rochosos**
- **Ferrosos rochosos**
- **Ferrosos**.

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Meteoritos Rochosos

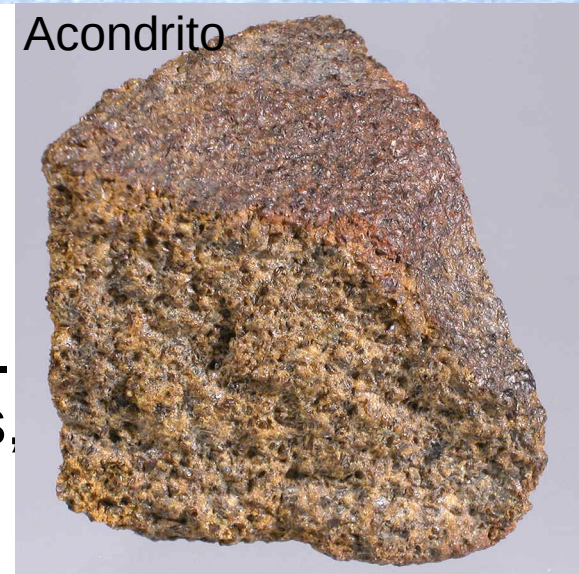
Representam ~94 % dos meteoritos conhecidos.

- **Condritos**, ~86 %, são chamados assim por conterem **côndrulos**, pequenas partículas redondas, compostas na maioria por silicatos.

Parecem ter se formado como objetos flutuando livremente no espaço.

Alguns contêm material **orgânico**.

- **Acondritos**, ~8 %, não contêm côndrulos, formados pelo derretimento e recristalização. Vêm de **crostas** de **planetesimais**, asteróides, ou corpos maiores (a Lua, Marte)



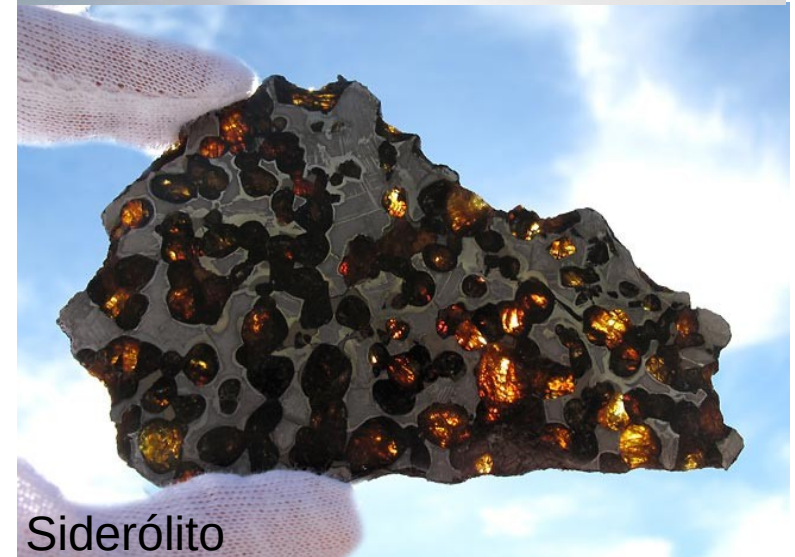
Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Meteoritos

- **Ferrosos (sideritos)**, ~5 %, constituídos por **ligas metálicas** de **Fe** e **Ni**, com quantias secundárias de carbono, enxofre, e fósforo. Maioria parece ter se formado nos **núcleos** de **planetesimais** que estavam derretidos algum dia.
- **Ferrosos rochosos (siderólitos)**, ~1 %, constituídos por mistura de **minerais silicáticos** e **liga metálica (Fe + Ni)**. Parcialmente formados nas zonas de **fronteira** entre os **núcleos** e **crostas** de **planetesimais**.



Siderito

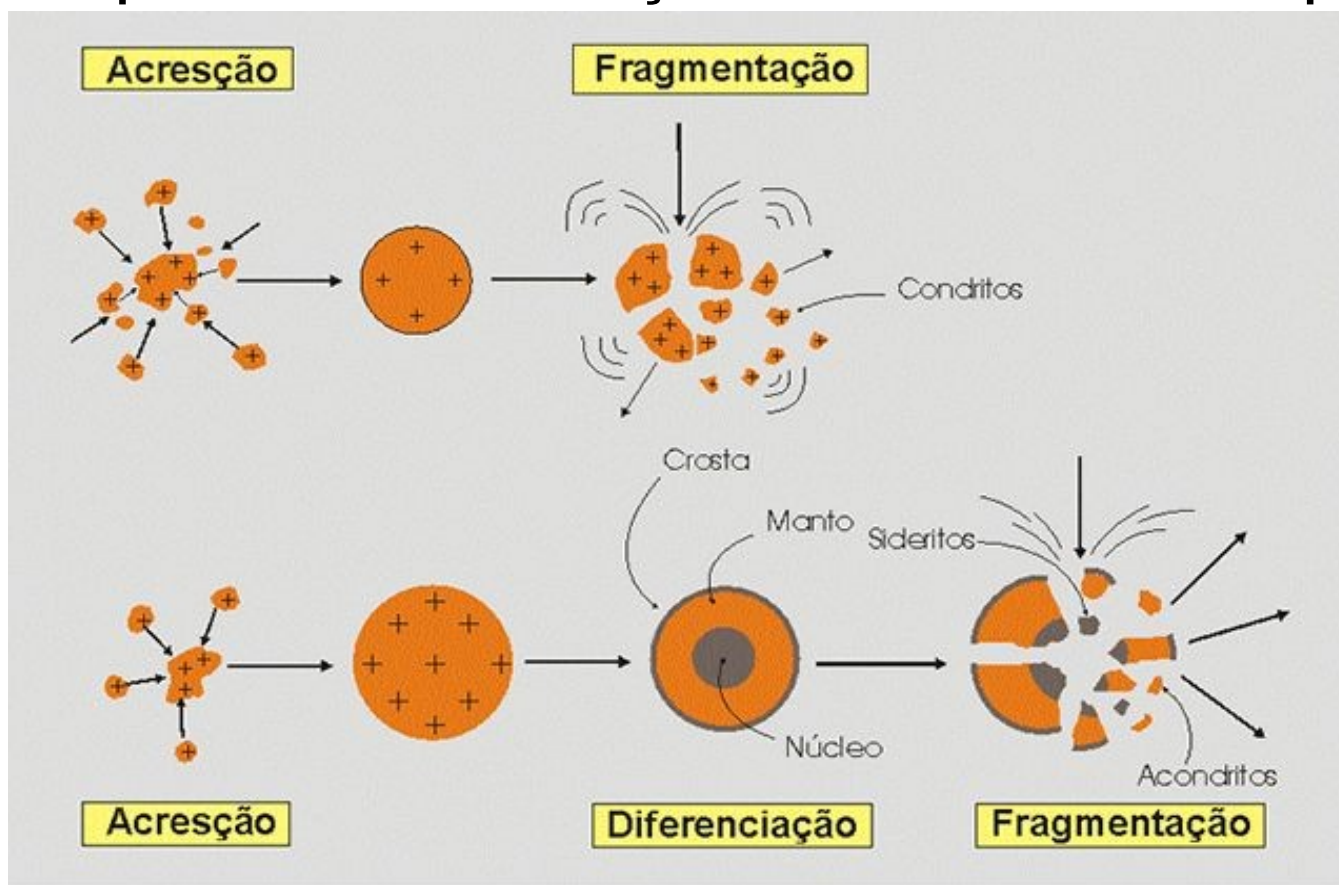


Siderólito

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Meteoritos

Esquema da formação dos diferentes tipos de meteoritos.



Esquema simplificado da origem dos meteoritos diferenciados e não diferenciados.

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Alguns Meteoritos conhecidos

O meteorito de **Bendegó**, um siderito, foi encontrado em 1784 perto do riacho do mesmo nome, na Bahia.

É o maior meteorito já encontrado no Brasil e o 16º maior do mundo.

Em 1888, foi pro Museu Nacional, no Rio de Janeiro e sobreviveu ao incêndio do museu de 02/09/2018.



Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Alguns Meteoritos conhecidos

O meteorito de **Murchison**, um condrito carbonáceo, caiu em 1969 na Austrália.

Contém mais de 92 aminoácidos!

Mais sobre ele na aula sobre astrobiologia.



Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Alguns Meteoritos conhecidos

Na manhã do dia 15/02/2013, o dia naquele era esperada a passagem próxima de um asteroide, caiu, perto de **Челябинск** (Chelyabinsk), na Rússia, um meteorito de 17 a 20 metros de diâmetro e 11 mil toneladas, gerando uma onda de choque que feriu mais de 1200 pessoas e danificou centenas de residências.



A passagem esperado do outro asteróide, de 45 m de diâmetro, também aconteceu, mais tarde no mesmo dia.

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Alguns Meteoritos conhecidos

Várias pessoas filmaram o evento:

<https://www.youtube.com/watch?v=svzB0QYNIWI>

Um similar passou no dia

21/05/2019 similar sobre

Adelaide (Australia):

<https://www.youtube.com/watch?v=wcFVZrl4PQs>



Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Alguns Meteoritos conhecidos

O evento de **Тунгуска** (Tunguska) na Sibéria (1908) era uma explosão gigantesca (~mil vezes a da bomba de Hiroshima), que derrubou 80 milhões de árvores em uma área de 2150 mil km².



É o maior corpo celeste que já atingiu a Terra na história registrada.

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Alguns Meteoritos conhecidos

A teoria mais aceita sobre as causas das mudanças climáticas responsáveis pela **extinção Cretáceo-Paleogeno** (K-Pg, antigamente K-T), uns 65 milhões de anos atrás, naquela os dinossauros não avianos encontraram seu fim, é a do **impacto** de um **meteorito** de ~10 km de diâmetro, talvez em “colaboração” com erupções vulcânicas na Índia.



Evidência geológica da mudança climática K-Pg

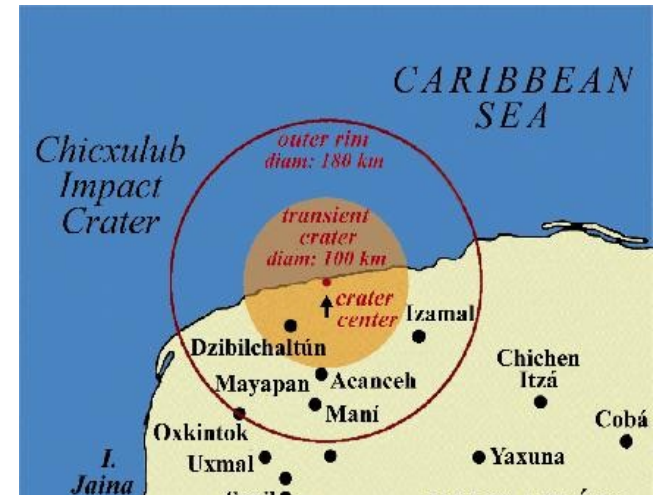


Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Alguns Meteoritos conhecidos

A provável cratera deste impacto é a de Chicxulub, no México, cratera de 180 km de diâmetro descoberta em 1978.

Teorias, segundo aquelas a extinção do Permiano-Triássico ou extinção Permo-Triássica (~251 mio. anos atrás, matou uns 90 % a 95 % dos espécies existentes na época) também seja devida ao impacto de um meteorito, são tidas como **improváveis**, mas um meteorito pode ter colaborado.



A extinção do Permiano-Triássico

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

A probabilidade para um Meteorito devastador

Near Earth Objects (NEO, objetos próximos à Terra; às vezes chamadas NEA, *Near Earth Asteroids*) são corpos celestes como **cometas** e **asteroides**, cujas órbitas se encontram **perto** da órbita do nosso planeta.

Um objeto é classificado como NEO quando, necessariamente, possuir periélio menor que 1.3 AU.

Dentre eles os *Potentially Hazardous Asteroids*, PHAs (asteróides potencialmente perigosos) são os que possuem maior risco de colidir com a Terra, devido às suas baixas distâncias de passagem pela órbita do planeta.

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

A probabilidade para um Meteorito devastador

A **Escala de Torino** categoriza os NEO pelo **risco** de um **impacto** com a **Terra**, e pelos possíveis **danos** que eles causariam no caso de um tal impacto.

THE TORINO SCALE

Assessing Asteroid/Comet Impact Predictions

No Hazard	0	The likelihood of collision is zero, or is so low as to be effectively zero. Also applies to small objects such as meteors and bolides that burn up in the atmosphere as well as infrequent meteorite falls that rarely cause damage.
Normal	1	A routine discovery in which a pass near the Earth is predicted that poses no unusual level of danger. Current calculations show the chance of collision is extremely unlikely with no cause for public attention or public concern. New telescopic observations very likely will lead to re-assignment to Level 0.
Meriting Attention by Astronomers	2	A discovery, which may become routine with expanded searches, of an object making a somewhat close but not highly unusual pass near the Earth. While meriting attention by astronomers, there is no cause for public attention or public concern as an actual collision is very unlikely. New telescopic observations very likely will lead to re-assignment to Level 0.
	3	A close encounter, meriting attention by astronomers. Current calculations give a 1% or greater chance of collision capable of localized destruction. Most likely, new telescopic observations will lead to re-assignment to Level 0. Attention by the public and by public officials is merited if the encounter is less than a decade away.
	4	A close encounter, meriting attention by astronomers. Current calculations give a 1% or greater chance of collision capable of regional devastation. Most likely, new telescopic observations will lead to re-assignment to Level 0. Attention by the public and by public officials is merited if the encounter is less than a decade away.
Threatening	5	A close encounter posing a serious, but still uncertain threat of regional devastation. Critical attention by astronomers is needed to determine conclusively whether or not a collision will occur. If the encounter is less than a decade away, governmental contingency planning may be warranted.
	6	A close encounter by a large object posing a serious, but still uncertain threat of a global catastrophe. Critical attention by astronomers is needed to determine conclusively whether or not a collision will occur. If the encounter is less than three decades away, governmental contingency planning may be warranted.
	7	A very close encounter by a large object, which if occurring this century, poses an unprecedented but still uncertain threat of a global catastrophe. For such a threat in this century, international contingency planning is warranted, especially to determine urgently and conclusively whether or not a collision will occur.
Certain Collisions	8	A collision is certain, capable of causing localized destruction for an impact over land or possibly a tsunami if close offshore. Such events occur on average between once per 50 years and once per several 1000 years.
	9	A collision is certain, capable of causing unprecedented regional devastation for a land impact or the threat of a major tsunami for an ocean impact. Such events occur on average between once per 10,000 years and once per 100,000 years.
	10	A collision is certain, capable of causing a global climatic catastrophe that may threaten the future of civilization as we know it, whether impacting land or ocean. Such events occur on average once per 100,000 years, or less often.

Fig. 2. Public description for the Torino Scale, revised from Binzel (2000) to better describe the attention or response that is merited for each category.

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

A probabilidade para um Meteorito devastador

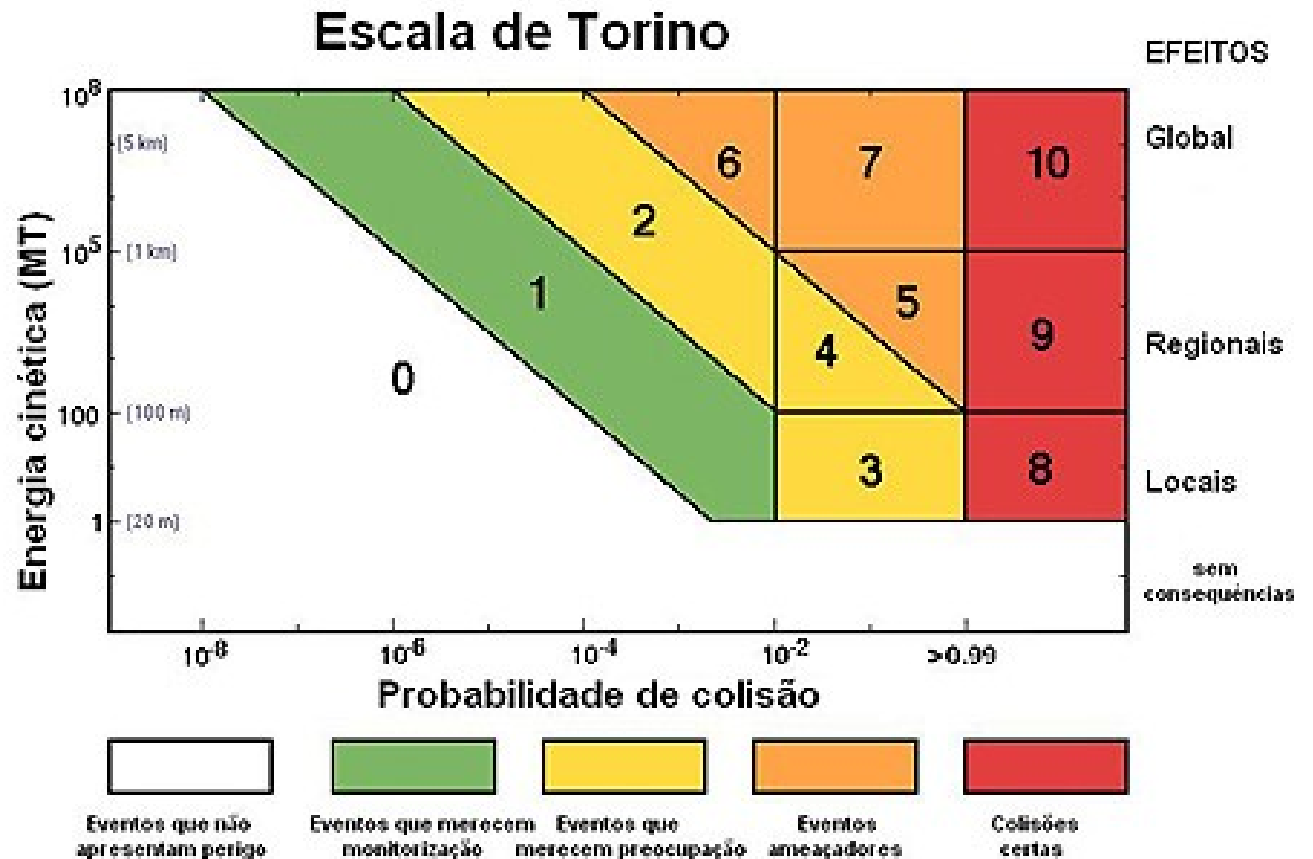
Uma tradução para um português pior que o meu.

Tendo Não eventos prováveis consequências (White Zone)	0	A probabilidade de uma colisão é zero, ou bem abaixo da chance de que um objeto aleatório do mesmo tamanho vai atingir a Terra dentro das próximas décadas. Esta designação também se aplica a qualquer objeto pequeno que, em caso de uma colisão, é improvável que alcance a superfície da Terra intacta.
Eventos que merecem cuidadosa monitorização (Green Zone)	1	A chance de colisão é extremamente improvável, quase o mesmo como um objeto aleatório do mesmo tamanho colidir com a Terra dentro das próximas décadas.
Preocupação eventos que merecem (Zona Amarela)	2	Um encontro um pouco perto, mas não incomum. Colisão é muito improvável.
	3	Um encontro próximo, com 1% ou maior a chance de uma colisão capaz de causar destruição localizada.
	4	Um encontro próximo, com 1% ou maior a chance de uma colisão capaz de causar devastação regional.
Ameaçando Eventos (Orange Zone)	5	Um encontro próximo, com uma ameaça significativa de uma colisão capaz de causar devastação regional.
	6	Um encontro próximo, com uma ameaça significativa de uma colisão capaz de causar uma catástrofe global.
	7	Um encontro próximo, com uma ameaça extremamente significativa de uma colisão capaz de causar uma catástrofe global.
Colisões certos (Red Zone)	8	Uma colisão capaz de causar destruição localizada. Tais eventos ocorrem em algum lugar na Terra entre uma vez por 50 anos e uma vez por 1000 anos.
	9	Uma colisão capaz de causar devastação regional. Tais eventos ocorrem entre uma vez por 1.000 anos e uma vez por 100.000 anos.
	10	Uma colisão capaz de causar uma catástrofe climática global. Tais eventos ocorrem uma vez por 100 mil anos, ou menos frequentemente.

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

A probabilidade para um Meteorito devastador

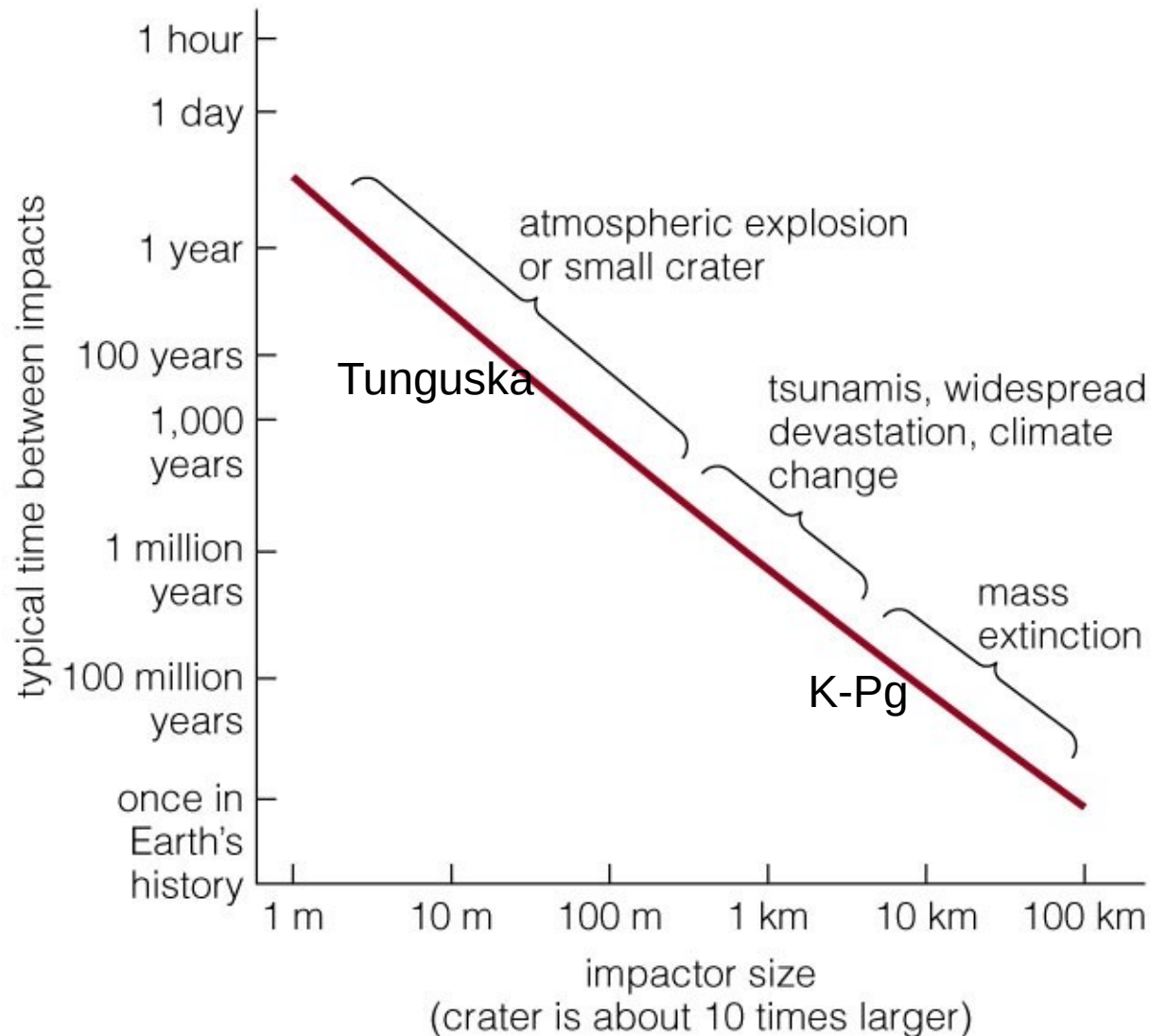
A **classificação** de um NEO na **escala de Torino** depende da maneira ilustrada nesta figura da **probabilidade** de **colisão** e do/a **tamanho / energia cinética** do corpo.



Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

A probabilidade para um Meteorito devastador

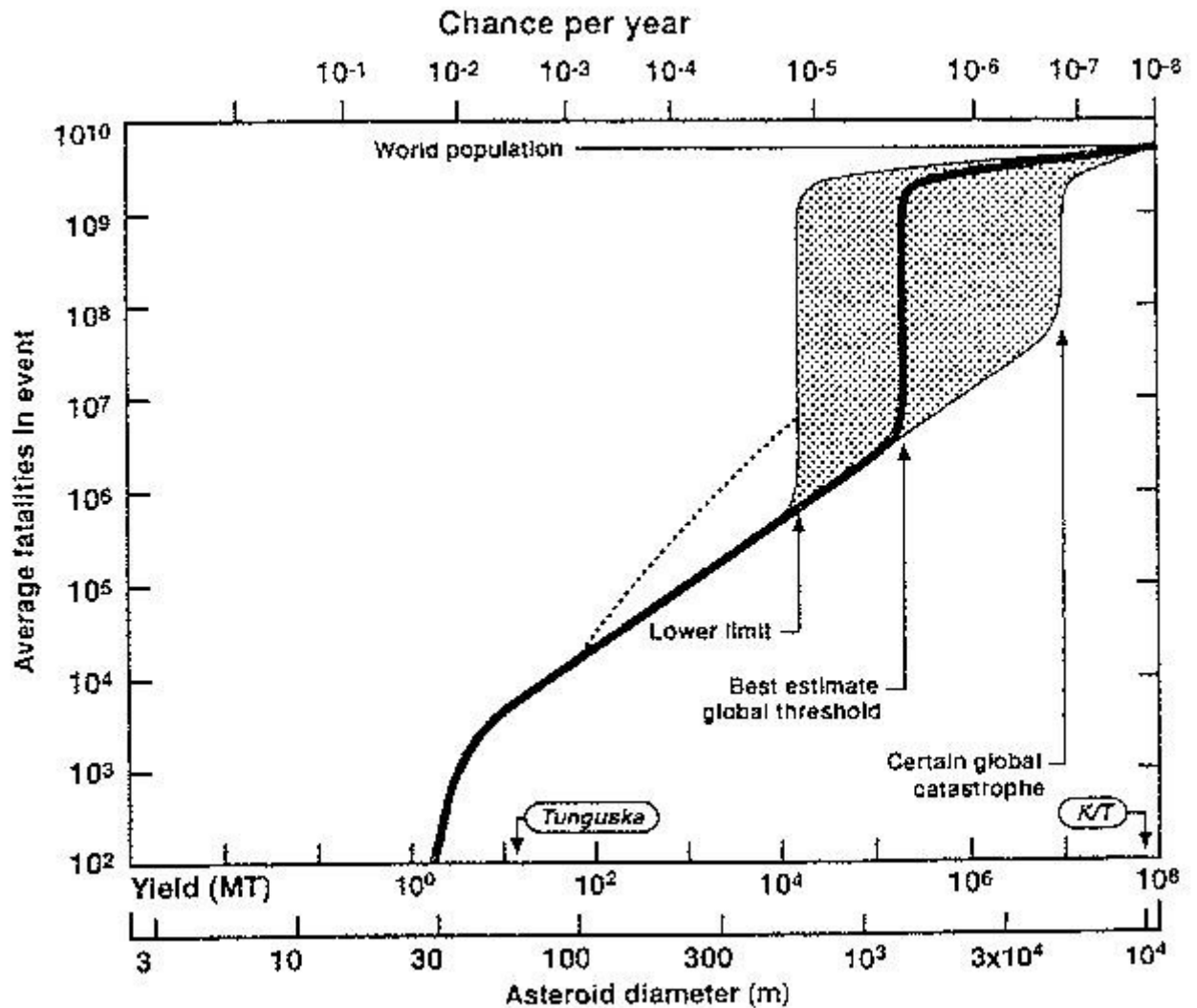
Também fizeram estimativas da **frequência** de impactos em função do **tamanho** do impactor.



Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

A probabilidade para um Meteorito devastador

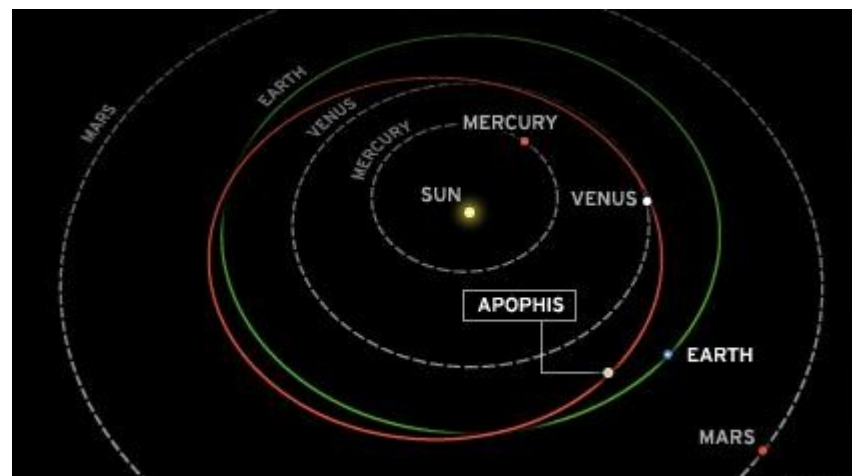
... e do número de **fatalidades** em função de **tamanho**, da **energia** de impacto, respectivamente da **probabilidade** de impacto **por ano** ...



Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

A probabilidade para um Meteorito devastador

Um NEO que está mais ou menos em rota de colisão com a Terra é **Apophis**, de ~350 m de diâmetro, que poderia colidir conosco em **2036**, causando **tsunamis** e/ou **mudanças climáticas** e **milhões de mortos**.



A órbita de Apophis

MSNBC

Quando descoberto, o asteroide era um no. 4 na escala de Torino (~1 % de risco de colisão), recorde até hoje.

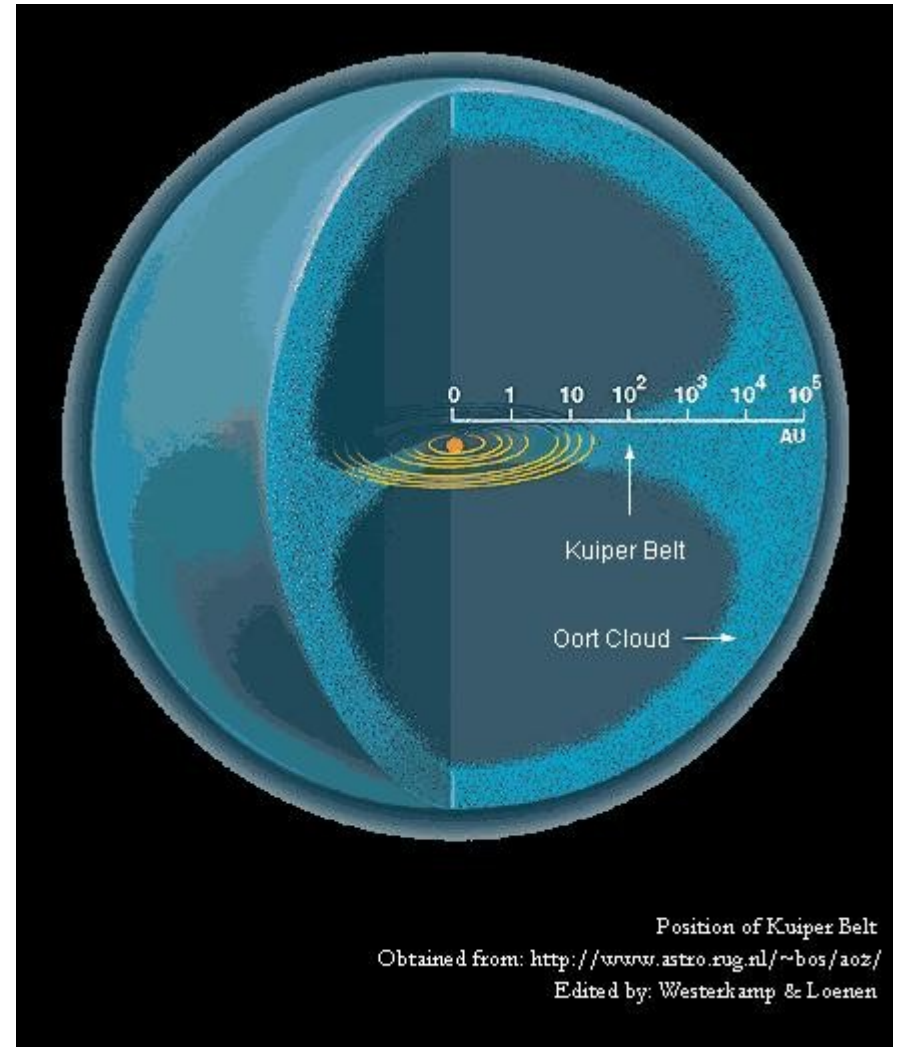
Felizmente, desde então, a órbita foi determinada com melhor precisão, e o risco de colisão baixou para **menos** que **1:1'000'000**, tornando Apophis um no. **0**.

Objetos Transnetunianos

Corpos **gelosos** com **órbitas além** de **Netuno**.

Distribuídos em 2 regiões:

- A **Cintura de Kuiper**, de 30 a 100 AU do Sol, onde se encontram os **objetos da Cintura de Kuiper clássicos**, e originam os **cometas de curto período**.
- A hipotética **Nuvem de Oort**, entre 300 e 100'000 AU do Sol, repositório de **cometas de longo período**.
Contém 10^{12} - 10^{13} objetos, massa total $\sim 100 M_{\oplus}$



Plutão

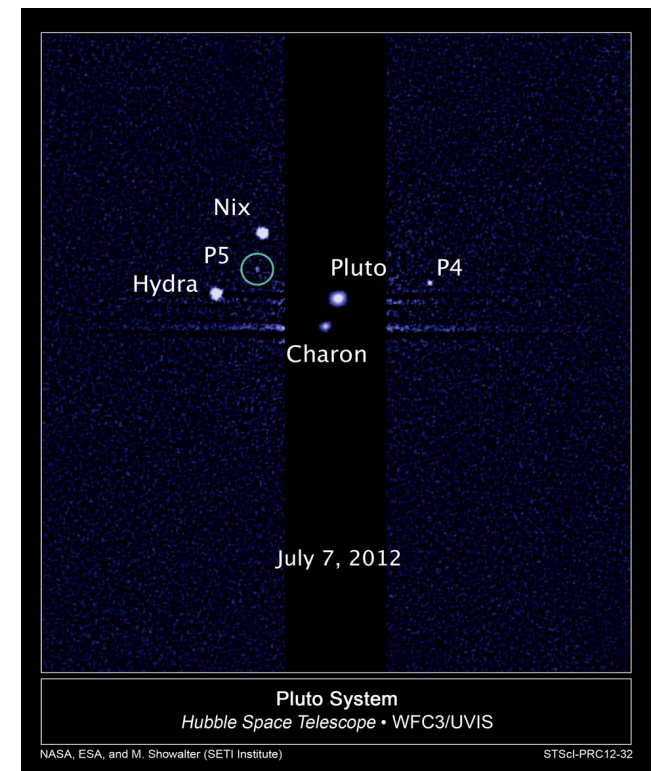
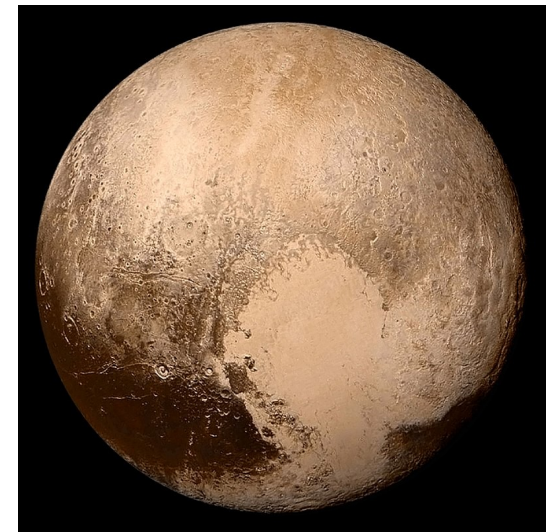
Símbolo ♇, Deus do Submundo
Descoberto em 1930 por Clyde Tom-
baugh na procura por um nono planeta.

=> Foi batizado o **nono planeta**.

- Semi-eixo maior da órbita: 39.5 AU
- Período orbital: 246 anos terrestres
= 1.5 anos netunianos
- Período rotacional: 6.4 dias terr.
retrógrada

Foram encontrados **5 satélites naturais** (luas) de Plutão:

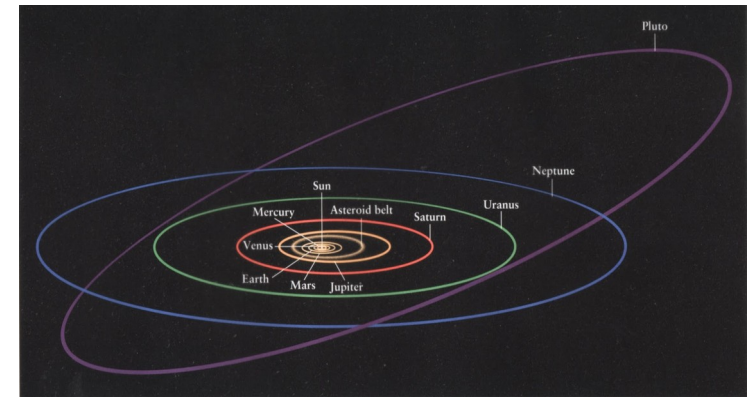
Caronte (*Charon*), Nix, Hidra (*Hydra*),
Cérbero (*Kerberos*), Estige (*Styx*)



Plutão

Porém, Plutão tem **muitas propriedades não** muito **típicas** para um **planeta**:

- **Órbita** muito mais **inclinada**, 17° com a eclíptica, e **elíptica**, $e = 0.25$, que as dos outros planetas, e que cruza a órbita de Netuno, em ressonância 3:2 com o período orbital de Netuno.



- **Raio** e **massa baixos** de $0.18 R_{\oplus}$ e $0.002 M_{\oplus}$
- **Composição** química similar a **TNOs** e a **Tritão**, mas **não** aos **planetas**.

Em 2005 foi descoberto um TNO **maior** que Plutão, Éris. => Conflito



Plutão

Em reação, 2006, a União Astronômica Internacional (IAU) estabeleceu **3 critérios formais** para **planetas**:

1. **Orbitar** uma **estrela**, i. e. o Sol.
2. Massa alta o suficiente para ter **forma esférica** pela gravitação própria.
3. Ter **esvaziado** a **vizinhança** da **órbita**.
Melhor seria “dominar a órbita”, já que nem Júpiter esvaziou a dela (Troianos).

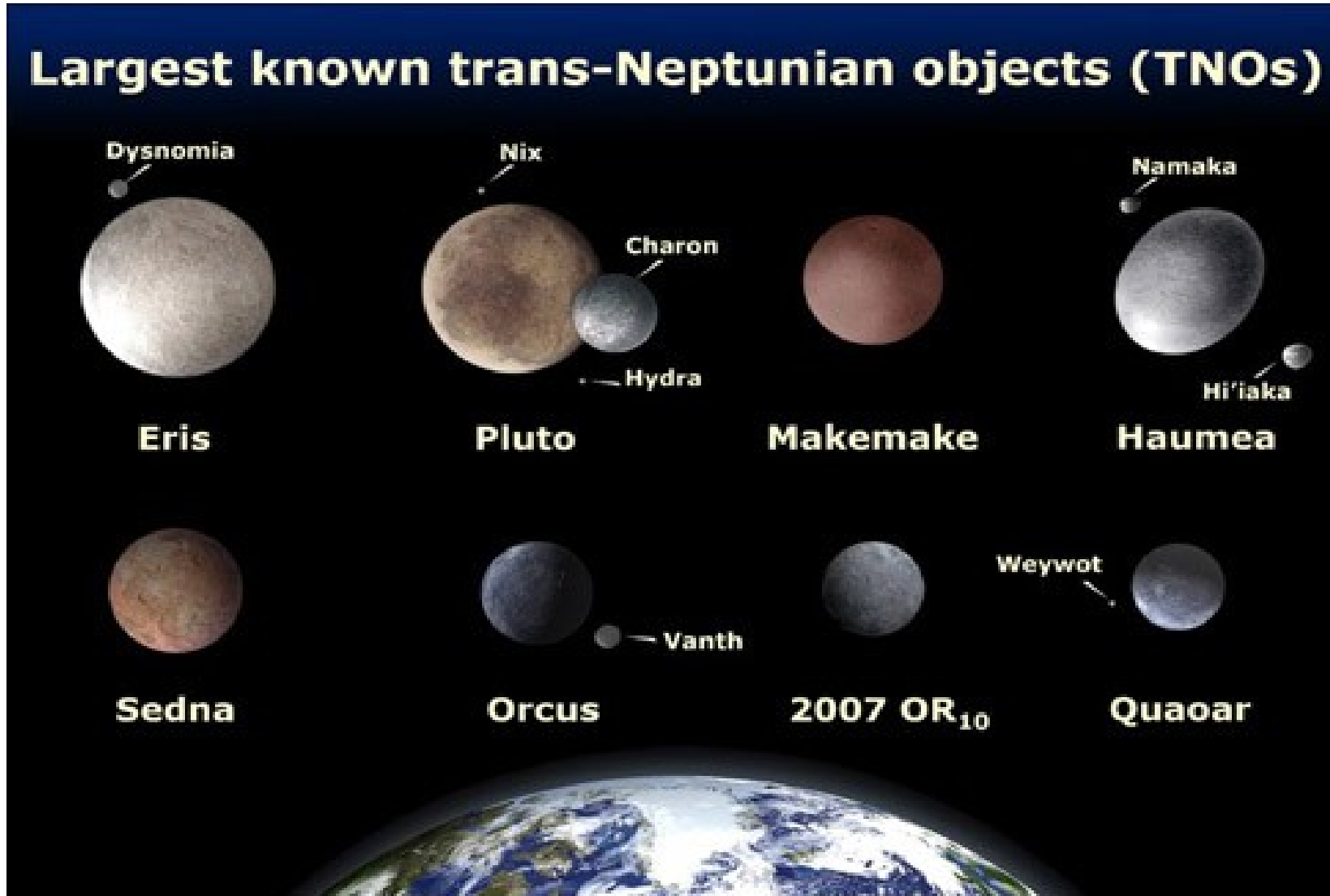
Plutão não satisfaz critério 3:

=> Reclassificado junto com Éris para **planeta anão**,
ou **plutóide** (objeto que satisfaz 1 e 2, mas não 3),
ou **objeto transnetuniano** ou **objeto da Cintura de Kuiper**.

Plutinos são TNOs em ressonância 3:2 com Netuno.

Objetos Transnetunianos

Os maiores Objetos Transnetunios conhecidos



Cometas

Pequenos **TNOs** compostos por **gelo** (água, metano, amônia e dióxido de carbono), **poeira**, às vezes material orgânico e/ou um núcleo rochoso,
=> “Bolas de gelo sujo”,
que se aventuram no **Sistema Solar interior**.

Apresentam **caudas** de até 1 AU de comprimento quando passam pelo Sistema Solar interior.

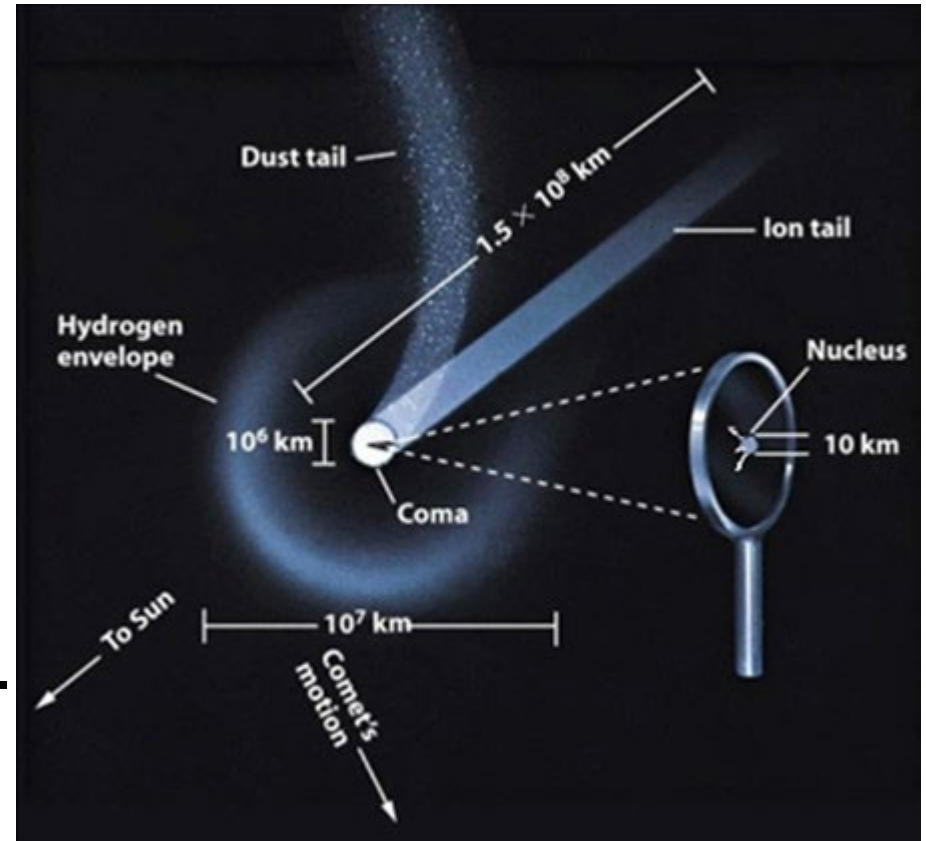


Cometas

Quando o cometa se **aproxima** do **Sol** (< 5 AU), o gelo **sublima**, formando um **coma** de gás evaporado e poeira em torno do **núcleo** sólido.

Ainda se forma um **halo** de **hidrogênio** em torno do coma.

O **gás** é parcialmente **ionizado** pela **radiação solar**.



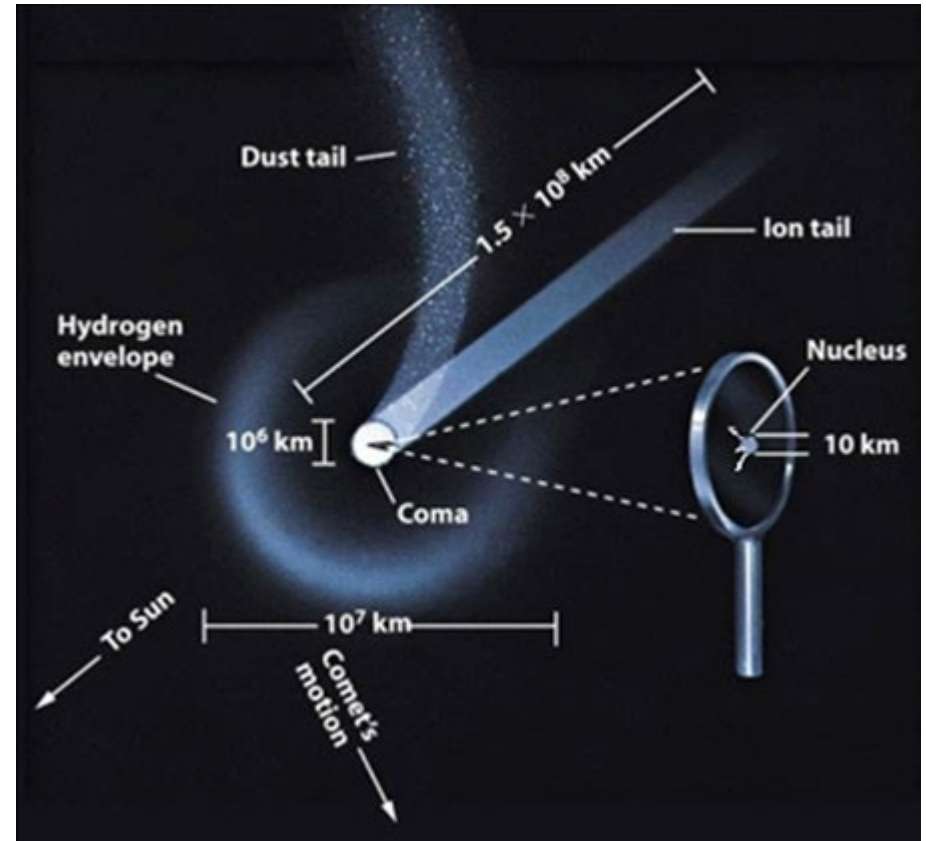
Cometas

A **pressão** da **radiação** do **vento solar empurra** a **poeira** para longe do Sol, formando a **cauda** de **poeira**.

O vento solar e o campo magnético do Sol empurram o **gás ionizado** para longe, formando a **cauda** de **íons**.

=> A(s) cauda(s) está(o) sempre **voltada(s)** para o **lado contrário** do **Sol**.

Quando o cometa sai da vizinhança do Sol, a cauda some (mas o cometa não, e pode voltar algum dia).



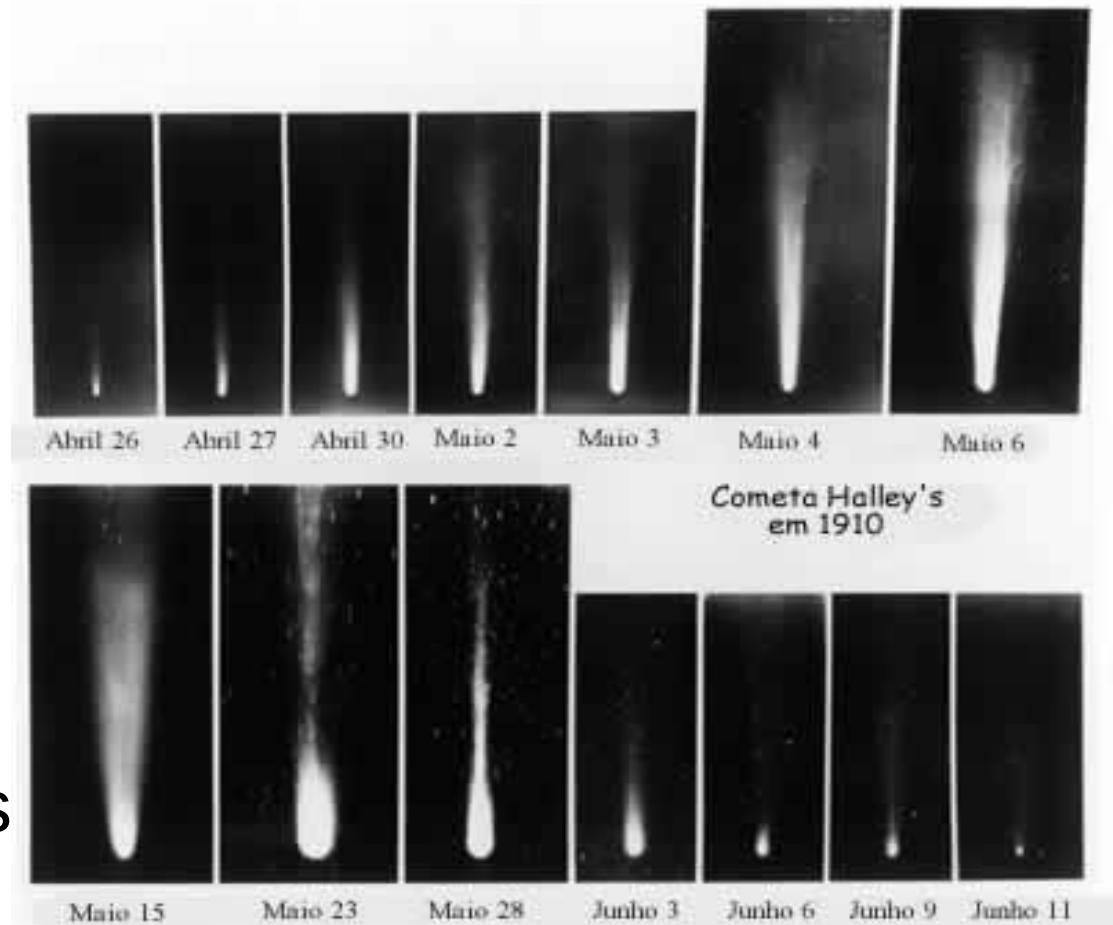
Cometas

Há **cometas periódicos**

- de **curto período** (< 200 anos) como Halley, que volta a cada 76 anos, vindos da **Cintura de Kuiper**.
- de **longo período** (> 200 anos, até mais de 1 mio. anos), vindos da **Nuvem de Oort**.

Há teorias, de que estes são defletidos rumo Sol por estrelas passando perto do limite do Sistema Solar.

e **não-periódicos**, indo para **fora do Sistema Solar**.



Cometas

No passado, cometas **colidiram** frequentemente com **planetas**, **luas** e **asteroides**.

=> Muitas **crateras** de impacto

Trouxeram pelo menos metade da **água** dos **oceanos** pra Terra (=> aula Astrobiologia).

A detecção de **moléculas orgânicas** nos cometas levou a especulações de que cometas ou meteoritos podem ter trazido os **elementos precursores** da **vida** ou mesmo os primeiros elementos vivos para a **Terra**.

=> (neo)**panspermia** (=> aula Astrobiologia)

Cometas

Alguns dos cometas mais conhecidos

Hale-Bopp: 19 meses de visibilidade (recorde) a partir de 23/07/1995, muito brilhante por ser grande, só volta em 2400 anos



Swift-Tuttle: passou em 1862 e 1992, deixa uma trilha de detritos que causa a chuva de meteoros das Perseidas. Já foi suspeito de poder se chocar com a Terra algum dia



Cometas

Alguns dos cometas mais conhecidos

Hyakutake passou perto da Terra em 1996 e tinha uma das caudas mais compridas já observadas. Não volta por pelo menos 14'000 anos

Halley: Cometa periódico com período de 76 anos, seus detritos causam a chuva de meteoros das Orionidas. Volta em 2061

Shoemaker-Levy 9 é conhecido por ter se chocado com Júpiter, o que forneceu informações sobre a composição do planeta gigante



Hyakutake



Halley

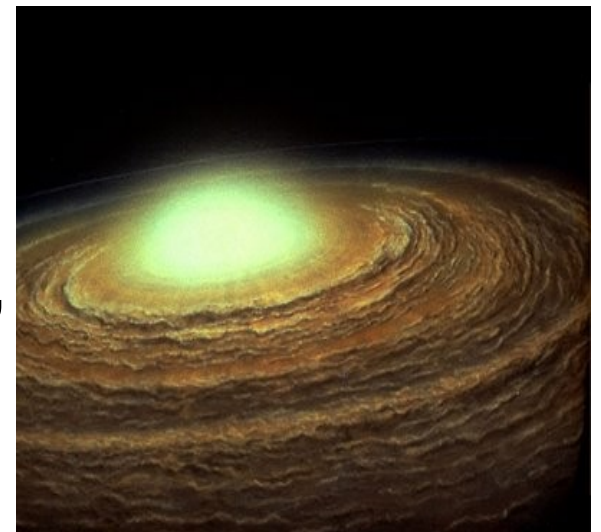


Shoemaker-Levy 9

Origem e Evolução do Sistema Solar

Hipótese Nebular

- Proposto já por **René Descartes** (1596-1650), **Immanuel Kant** (1724-1804) e o **Marquês de Laplace** (1749-1827): O **Sol** e os **planetas** se formaram **simultaneamente** da mesma nuvem de material, a **Nébulosa Solar**.
- Este material já continha uns 2 % de **elementos** mais **pesados** que H e He, formadas por estrelas que precediam o Sol (=> aula Estrelas).



Origem e Evolução do Sistema Solar

- **Colapso gravitacional** da **Nébulua Solar**
(datações de meteoritos: ~4.57 bio. anos atrás)

- **Momento angular** da nébula

=> **Disco de acreção**

(similar aos anéis de Saturno)

=> Explica, por que (quase) tudo no

Sistema Solar se encontra no

mesmo plano, a eclíptica, e gira

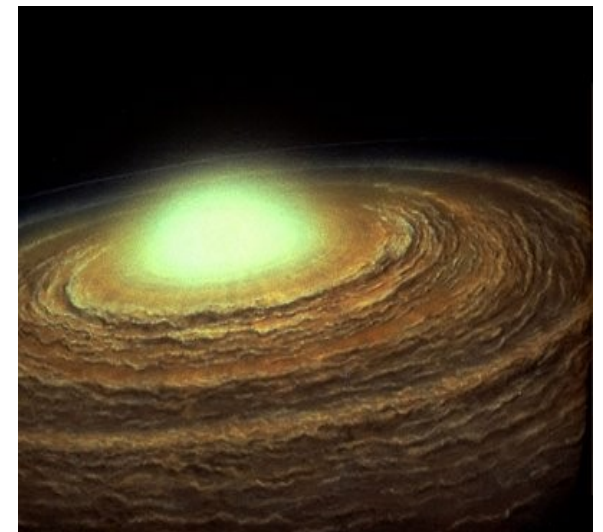
no **mesmo sentido**

(99 % do momento angular do SS está nos planetas, maior parte em Júpiter)

- **Calor** do **proto-Sol**:

=> **Gradiente de temperatura**

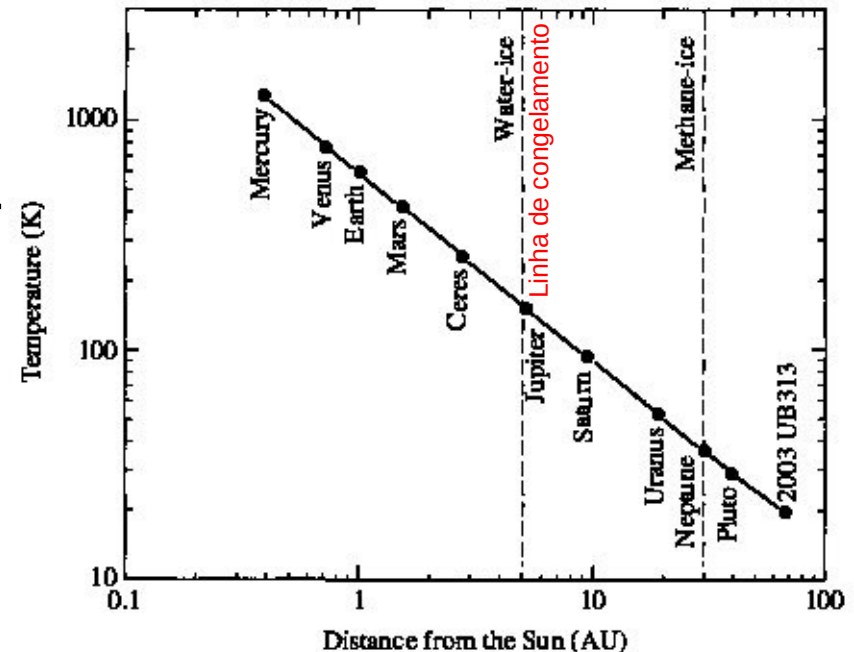
no disco protoplanetar



Origem e Evolução do Sistema Solar

- Formação de corpos de até ~1 km, os **planetesimais**, por **forças de coesão** a partir da **poeira** na nébula.
- Na parte **interior** do disco protoplanetar: **Temperaturas altas**, só material **rochoso** conseguiu condensar
=> **poucos** planetesimais, que eram **rochosos**
- Na parte **exterior** do disco: **Temperaturas baixas**, material **rochoso** e **gelos** podiam condensar
=> **muitos** planetesimais, **rochosos** e **gelosos**

A fronteira entre as duas regiões (a ~5 AU do Sol, onde $T \sim 150$ K) se chama **linha de congelamento**.



Origem e Evolução do Sistema Solar

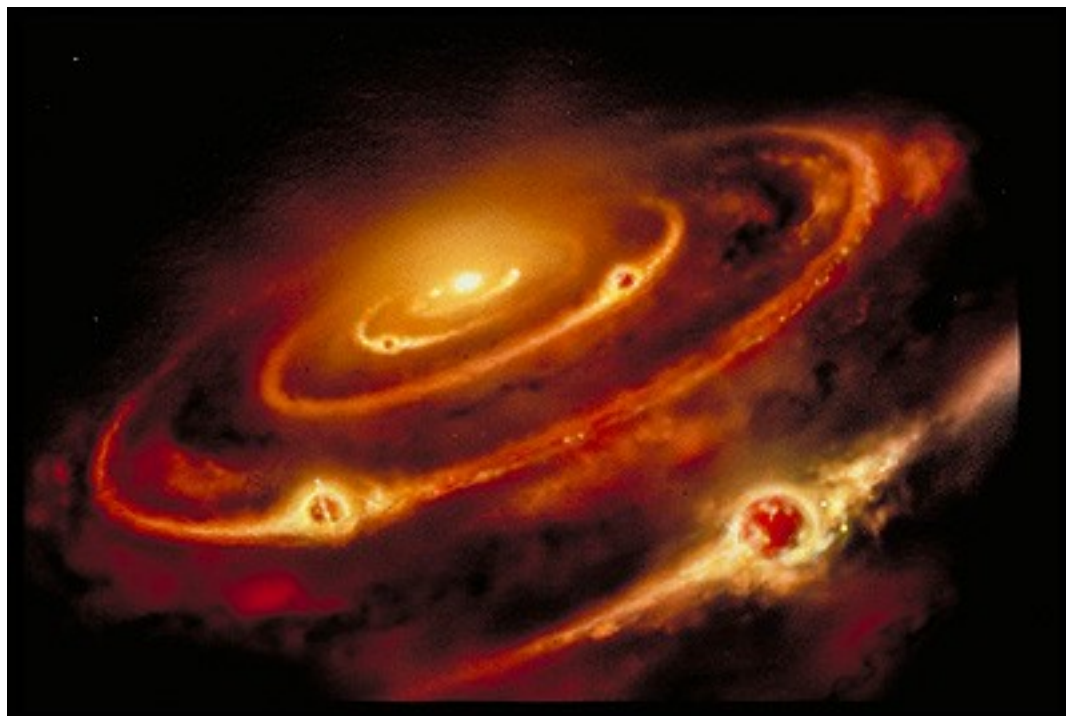
- Formação dos **protoplanetas** por **atração gravitacional** entre os planetesimais:
- Disco **interior**:
Protoplanetas **rochosos** de **massa não muito alta** (já que formados por poucos planetesimais)

=> **Não** conseguiram atrair e acumular **atmosferas**

(Estas foram formadas depois, talvez por vulcanismo, vento solar e/ou trazidas por planetesimais/cometas/asteróides)

=> **Planetas terrestres**

Neste período também ocorreram as **colisões** que resultaram na **Lua** terrestre e nas **inclinações** dos **eixos rotacionais** dos planetas, e tiraram o manto de Mercúrio.



Origem e Evolução do Sistema Solar

- Disco **exterior**:
protoplanetas **rochosos**
e gelosos de **massa alta**
=> Conseguiram atrair
e acumular **atmosferas**,
=> Gigantes **gelosos**,
ou até **atmosferas massivas**
=> Gigantes **gasosos**

Em torno dos planetas
gigantes:

Formação de algumas das **luas** de maneira similar que os planetas
em torno do Sol se formaram, em pequenos discos de acreção.

=> i. e. as **Luas Galileanas** de Júpiter

Como o disco era mais denso na região de Júpiter, foi este gigante
que acabou acumulando a maior massa.

A formação de Júpiter e suas luas deve ter levado ~1 mio. anos.



Origem e Evolução do Sistema Solar

- **Entre** as duas regiões do disco protoplanetar, um pouco **dentro** da região da formação de **gelo**: Região, onde, pela baixa densidade e pela influência de Júpiter (pelos mesmos motivos, Marte conseguiu acumular menos material que Vênus e Terra), os **planetesimais rochosos não** conseguiram formar um **planeta** grande, só **corpos menores**.

=> **Cintura de Asteroides**

Quanto mais para o exterior, tanto mais gelo podia ser integrado nos asteroides

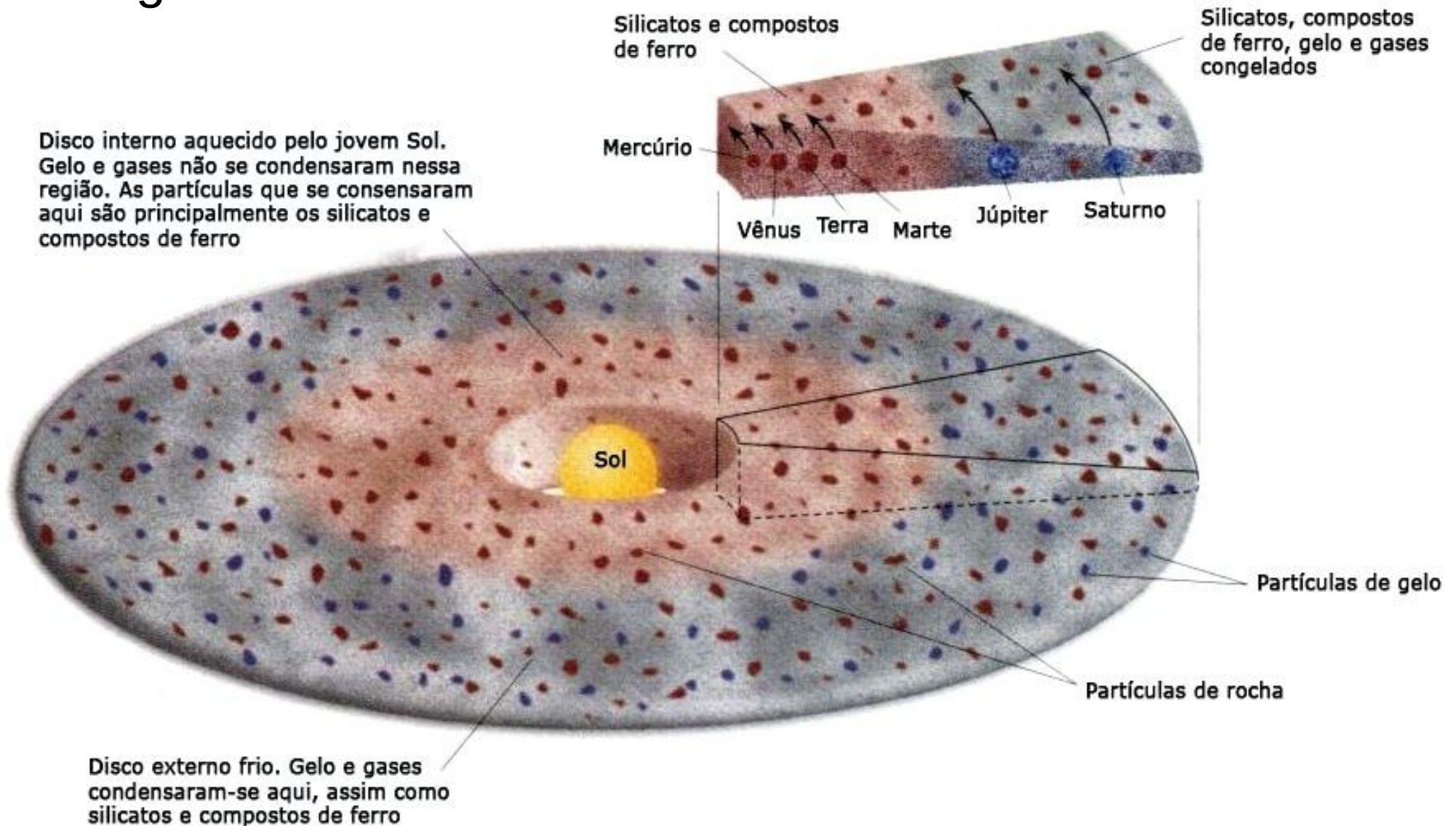
=> Explica as posições dos vários tipos de asteroides

- Mais pro **exterior** que os protoplanetas gigantes: **Densidade menor**, planetesimais **gelosos** também só conseguiram formar **corpos menores**

=> **Cintura de Kuiper**

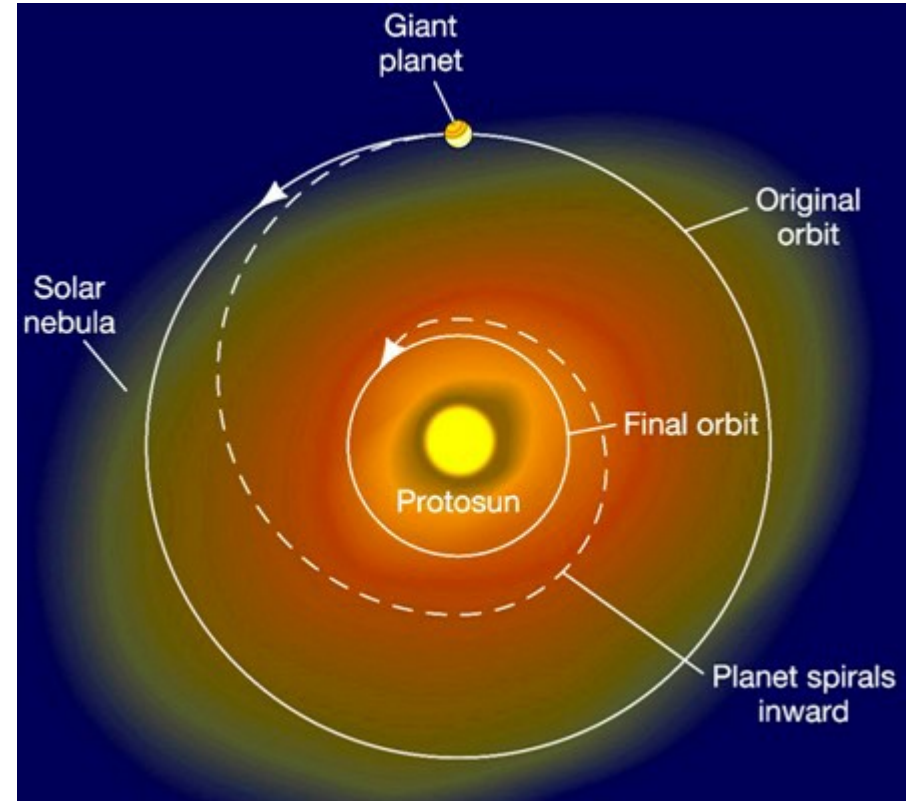
Origem e Evolução do Sistema Solar

Imagem ilustrando esta ideia



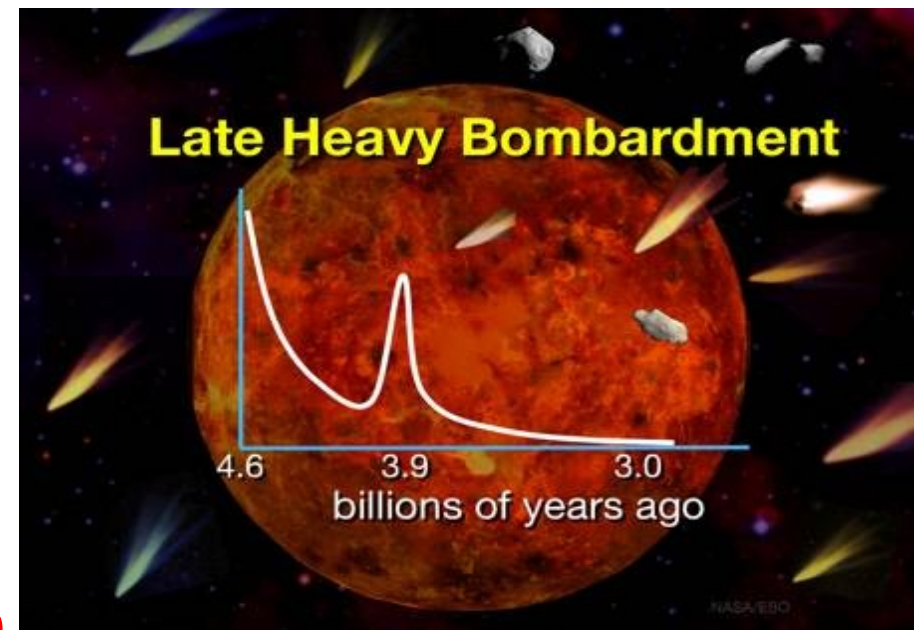
Origem e Evolução do Sistema Solar

- Por **interações** viscosas e de maré com o **disco de acreção** e com os **planetesimais**, **Júpiter migrou** mais para **dentro**, enquanto **Saturno**, **Urano** e **Netuno** migraram mais pro **exterior** do disco
- No caminho, os planetas gigantes **capturaram** alguns **planetesimais**, e **defletiram** outros, para **dentro** ou para **fora** do disco



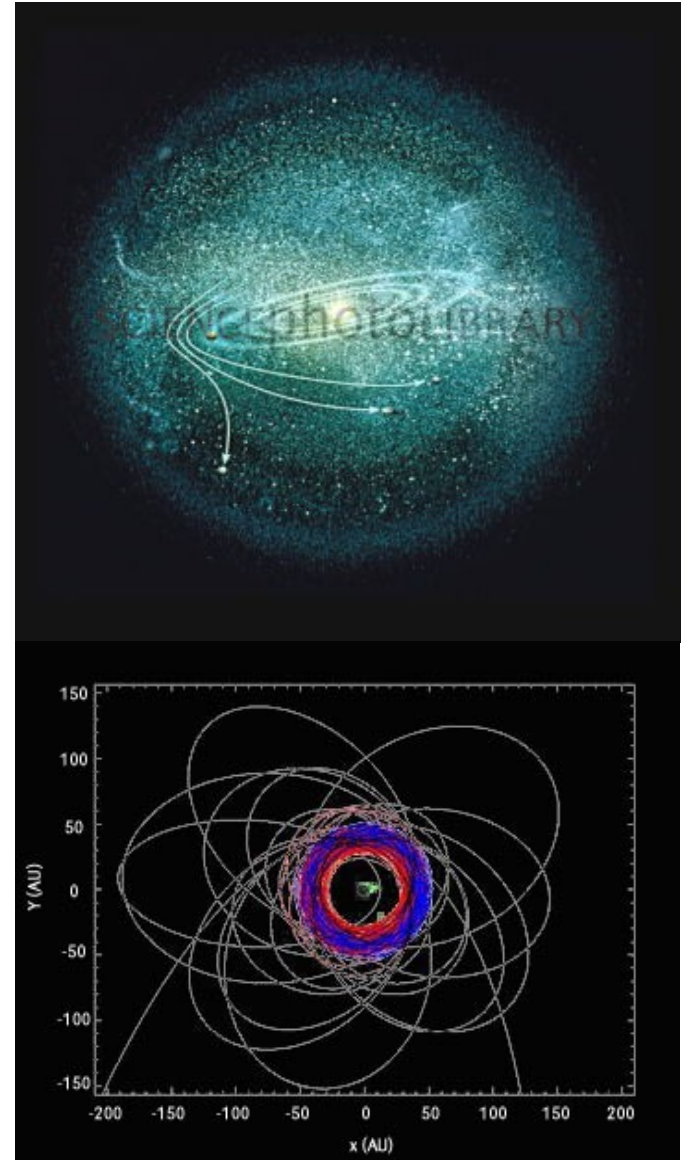
Origem e Evolução do Sistema Solar

- Os planetesimais **capturados** pelos planetas se tornaram **luas** menores
- Os defletidos para **dentro** caíram em cima dos planetas e luas recém-formados, causando **crateras** de impacto. Isto continua em escala menor **até hoje**, e deve ter sido particularmente intenso uns 700 mio. anos após a formação do Sistema Solar, quando **Júpiter** e **Saturno** passaram por uma **ressonância** de 1:2, causando os dois a “colaborarem”, **amplificando** as defleções.
=> **bombardeamento pesado**



Origem e Evolução do Sistema Solar

- Os defletidos para **fora** formaram a **Nuvem de Oort**, ou foram **expelidos** do Sistema Solar
- No caminho pra fora, **Netuno** ainda **capturou** alguns **objetos** da **Cintura de Kuiper** em **ressonâncias** orbitais 3:2, os **plutinos** atuais.





Universidade Federal do ABC

Física Contemporânea

FIM PRA HOJE

