

Mercúrio ♀

Distância média até o Sol: $0.387 \text{ UA} = 5.79 \times 10^7 \text{ km}$ (máx: 0.467 UA , mín: 0.307 UA)

Excentricidade: 0.21

Velocidade média orbital: 47.9 km/s

Período de revolução sideral (ano): $88.0 \text{ dias terrestres} = 0.24 \text{ ano terrestre}$

Período de rotação sideral: $58.6 \text{ dias terrestres}$

Período de rotação Solar (dia): $176 \text{ dias terrestres}$

Inclinação do equador em relação à órbita: 0.5°

Inclinação da órbita em relação à eclíptica: $7^\circ 00' 16''$

Diâmetro (equatorial): $4880 \text{ km} = 0.382 \text{ diâmetro terrestre}$

Massa: $3.30 \times 10^{23} \text{ kg} = 0.0553 \text{ massa terrestre}$

Densidade média: $5430 \text{ kg/m}^3 = 0.984 \text{ densidade terrestre}$

Velocidade de escape: 4.3 km/s

Gravidade na superfície: $0.38 g$

Albedo: 0.12 (12% da luz é refletida)

Temperatura média superficial: Dia: $350^\circ\text{C} = 623 \text{ K}$; Noite: $-170^\circ\text{C} = 103 \text{ K}$

Pressão atmosférica: 10^{-14} atm

Atmosfera: H_2 e He (Sol), e K, Mg, Ca e Na (das rochas), e O_2 (do gelo)

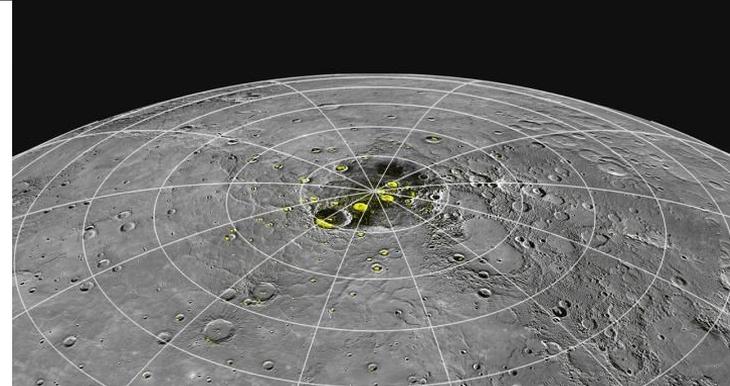
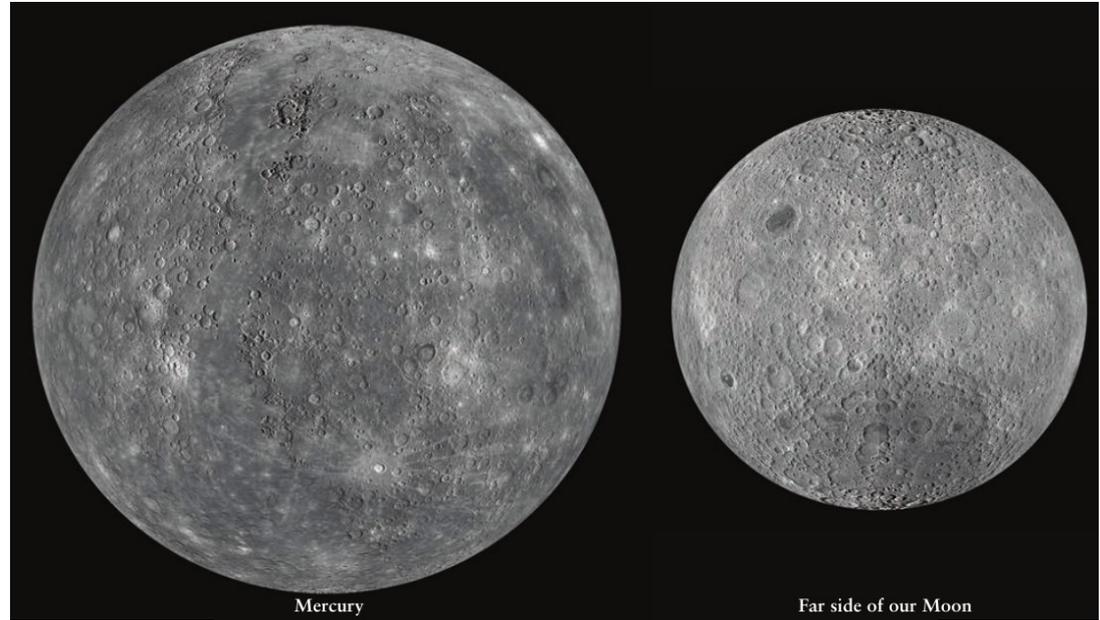
Mercúrio ♀

Muitas crateras:
sem atividade geológica relevante.

Gelo nas crateras polares
De onde vem a água?
Hidroxilas bombardeadas por prótons
do Sol.

Os prótons atingem a superfície do
planeta porque não há proteção
magnética efetiva.

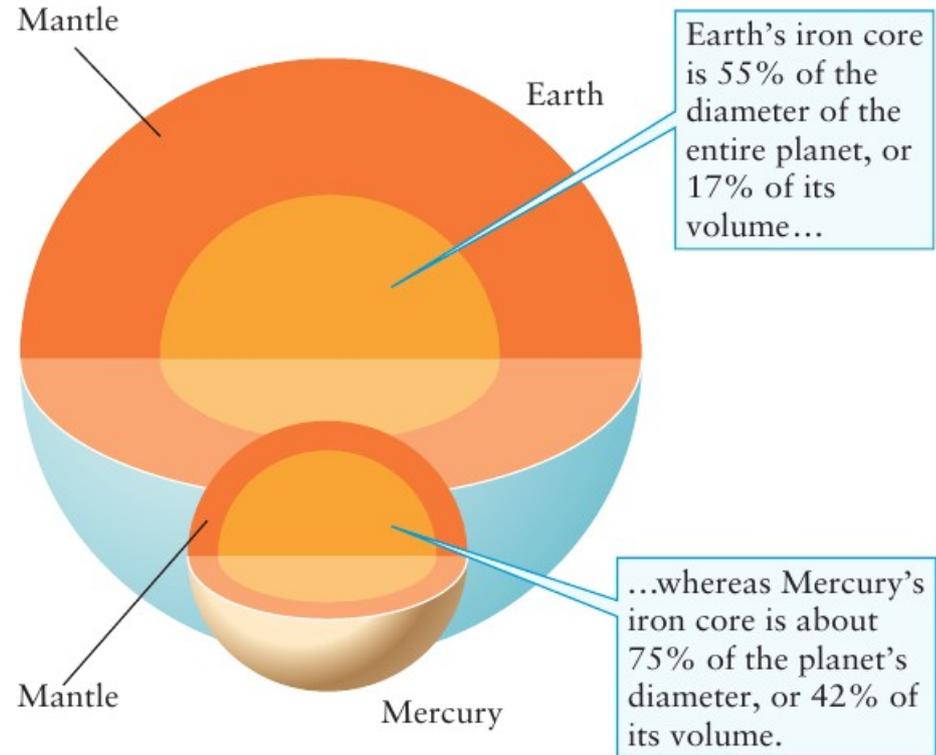
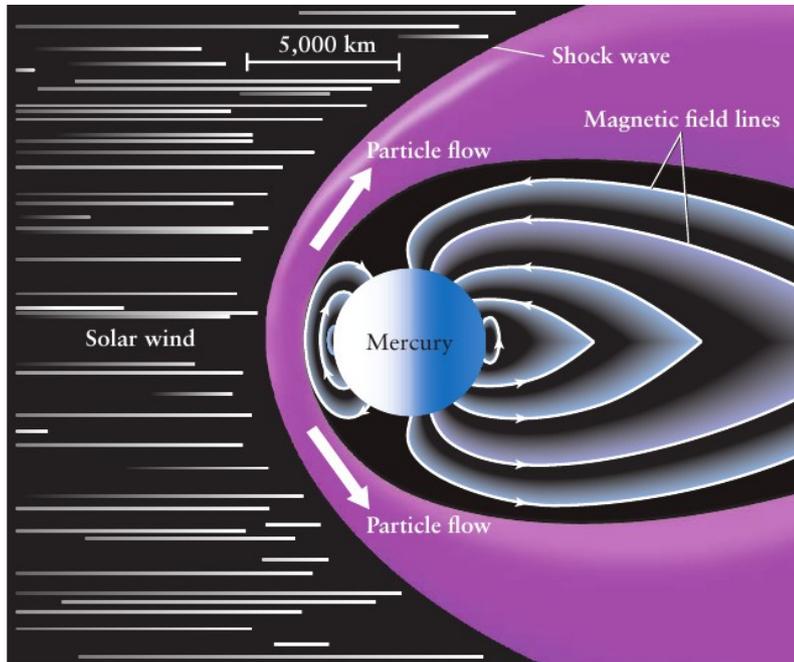
Entretanto, descobriu-se que Mercúrio
possui um campo magnético fraco.



Mercúrio ♀

Qual o orgiem do campo magnético?

Possivelmente do núcleo de ferro parcialmente derretido. (Correntes elétricas bem menores que aquelas no núcleo da Terra porque a rotação é mais lenta que da Terra. $B_{\text{Merc}} \sim 1\% B_{\text{Terra}}$)

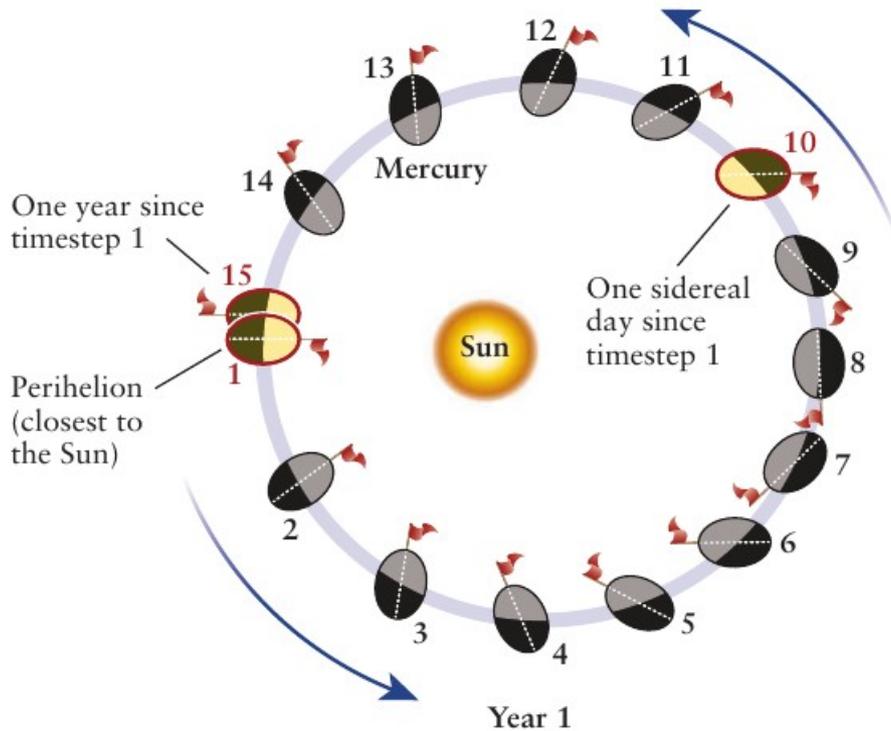


Mercúrio ♀

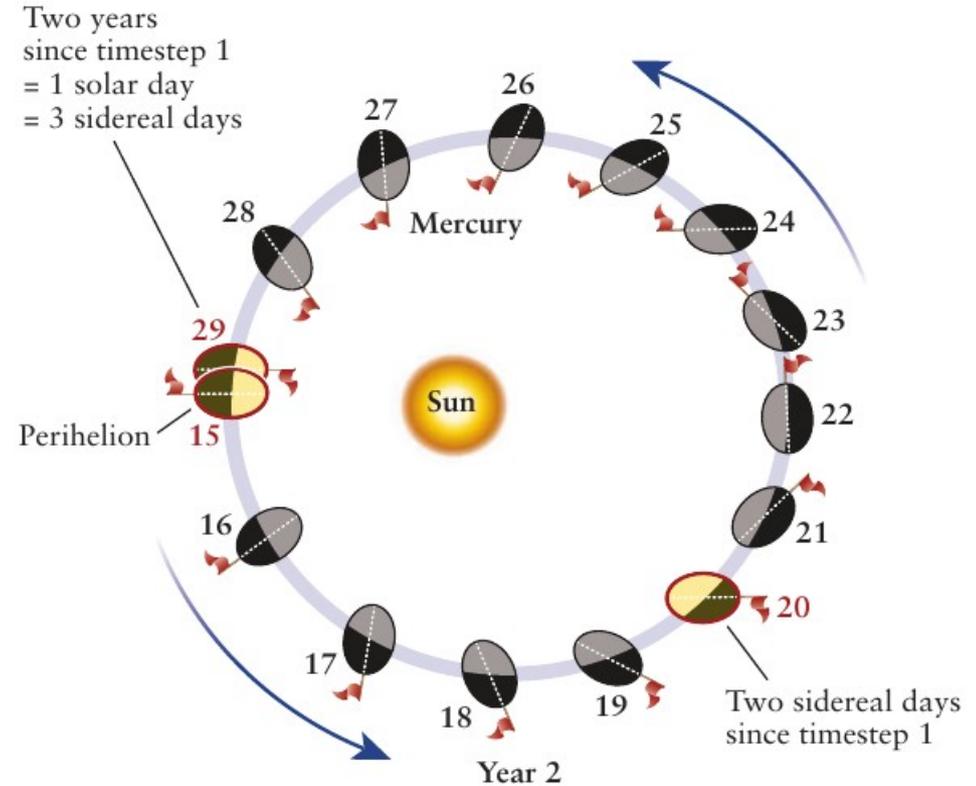
Ressonância 3:2 entre rotação e translação.

(Ressonância 1:1 não aconteceu por causa da alta excentricidade.)

3 dias siderais = 2 anos siderais = 1 dia Solar



a



b

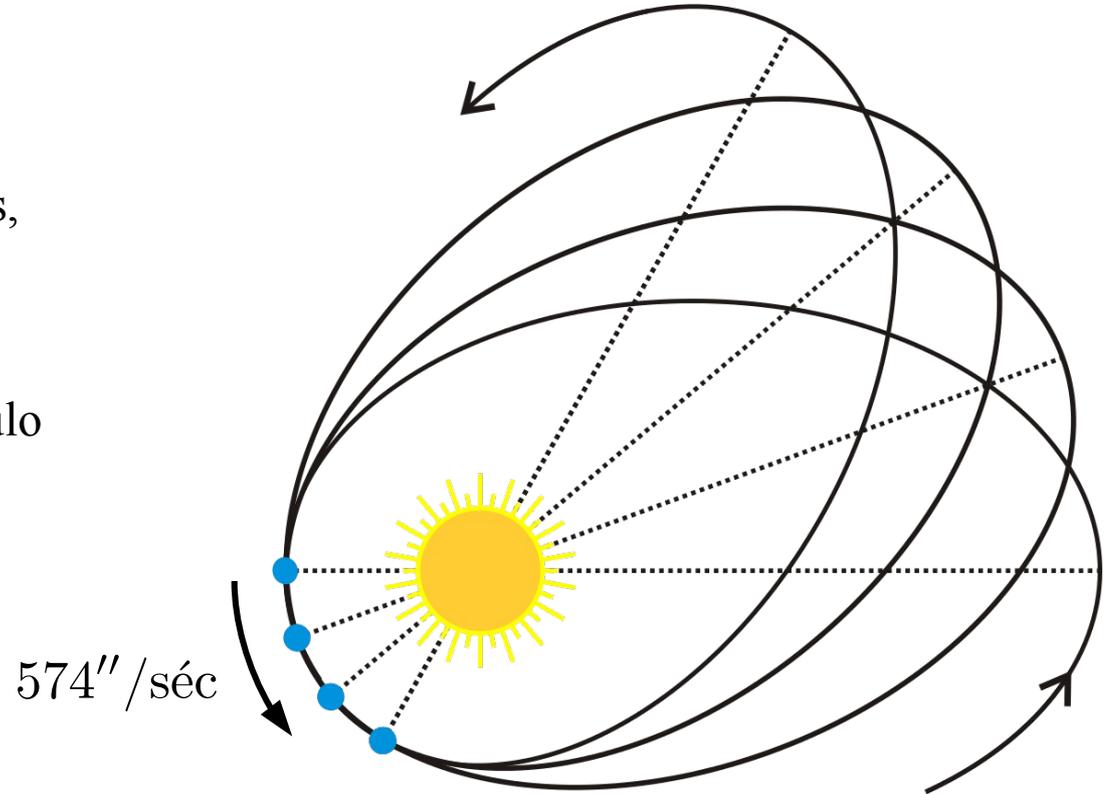
Mercúrio ♀

Precessão do periélio.

Observado: 574.10 ± 0.65 arcsec/século

Predição Newtoniana (planetas externos,
maior contribuição vem de Júpiter):
532.30 arcsec/século

Predição relativística: 42.98 arcsec/século



Vênus ♀

Distância média até o Sol: $0.723 \text{ UA} = 1.082 \times 10^8 \text{ km}$ (máx: 0.728 UA , mín: 0.718 UA)

Excentricidade: 0.007

Velocidade média orbital: 35.0 km/s

Período de revolução sideral (ano): $224.7 \text{ dias terrestres} = 0.615 \text{ ano terrestre}$

Período de rotação sideral: $243.0 \text{ dias terrestres}$ (**retrógrado**)

Período de rotação Solar (dia): $116.8 \text{ dias terrestres}$

Inclinação do equador em relação à órbita: 177.4°

Inclinação da órbita em relação à eclíptica: 3.39°

Diâmetro (equatorial): $12104 \text{ km} = 0.949 \text{ diâmetro terrestre}$

Massa: $4.87 \times 10^{24} \text{ kg} = 0.815 \text{ massa terrestre}$

Densidade média: $5240 \text{ kg/m}^3 = 0.949 \text{ densidade terrestre}$

Velocidade de escape: 10.4 km/s

Gravidade na superfície: $0.91 g$

Albedo: 0.75

Temperatura média superficial: $460^\circ\text{C} = 733 \text{ K}$

Pressão atmosférica: 92 atm

Atmosfera (nr. de moléculas): $96.5\% \text{ CO}_2$, $3.5\% \text{ N}_2$, $0.003\% \text{ H}_2\text{O}$

Vênus ♀

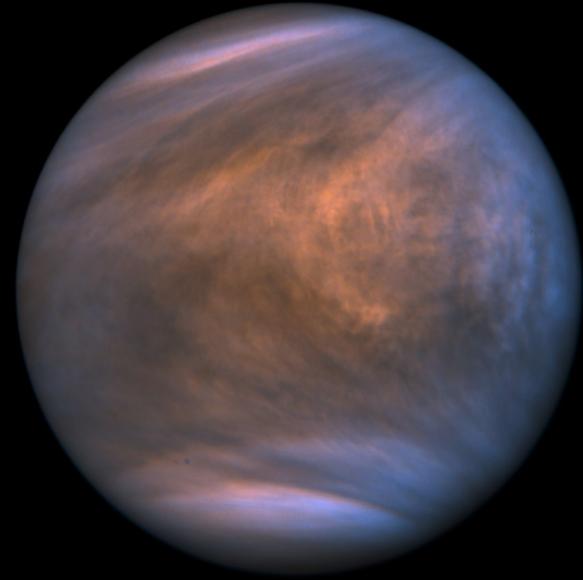
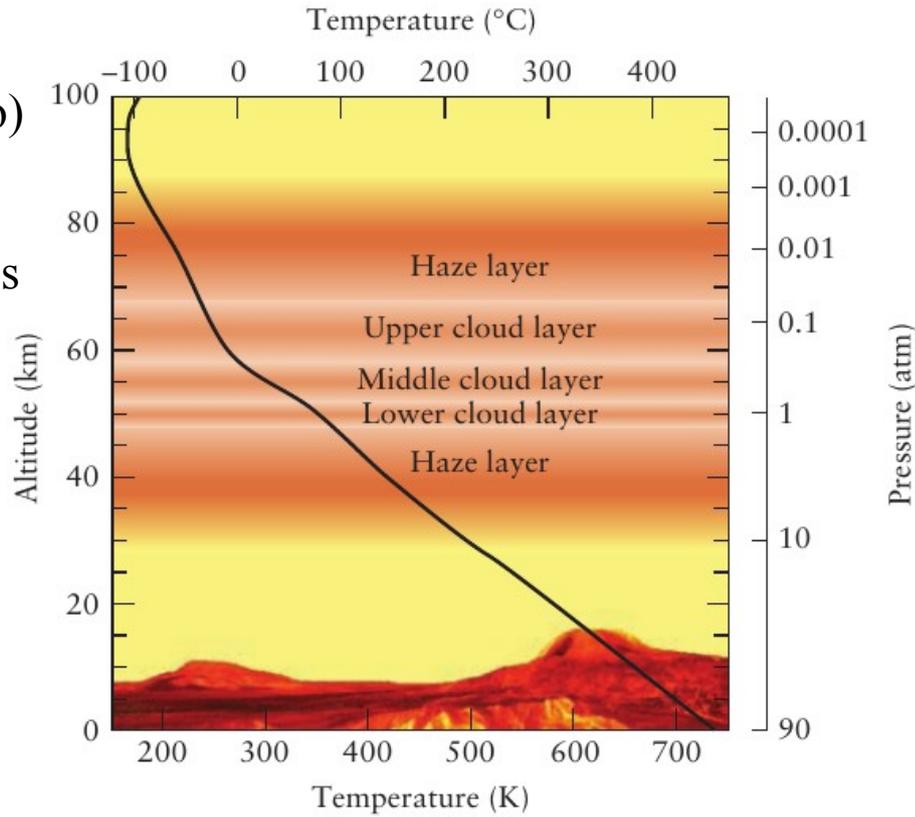
Coberto por nuvens de ácido sulfúrico H_2SO_4 . Gotículas permanecem suspensas (névoa) por causa da alta pressão atmosférica. Origem: possivelmente vulcanismo

Acentuado efeito estufa (mais quente que Mercúrio)

Sem evidências de placas tectônicas (muitas planícies vulcânicas e inúmeros fluxos de lava)

Poucas crateras (mecanismo de erosão?)

Sem campo magnético (baixa velocidade de rotação. Colisão?)



Terra \oplus (\otimes)

Distância média até o Sol: 1.00 UA = 1.496×10^8 km (máx: 1.017 UA, mín: 0.983 UA)

Excentricidade: 0.017

Velocidade média orbital: 29.79 km/s

Período de revolução sideral (ano): 365,26 dias terrestres = 1.00 ano terrestre

Período de rotação sideral: 0.997 dias terrestres

Período de rotação Solar (dia): 1 dia terrestre = 24 h

Inclinação do equador em relação à órbita: 23.5° (estável por causa de uma grande Lua)

Inclinação da órbita em relação à eclíptica: 0°

Diâmetro (equatorial): 12756 km

Massa: 5.974×10^{24} kg

Densidade média: 5520 kg/m³

Velocidade de escape: 11.2 km/s

Gravidade na superfície: g

Albedo (médio): 0.31

Temperatura superficial: Máx: $60^\circ\text{C} = 333$ K, Mín: $-90^\circ\text{C} = 183$ K, Méd: $14^\circ\text{C} = 287$ K

Pressão atmosférica: 1 atm

Atmosfera (nr. de moléculas): 78.08% N₂, 20.95% O₂, 0.035% CO₂, 1% H₂O

Terra ⊕ (♁)

1ª atmosfera: H e He (formação)

Evaporou-se nos primeiros milhões de anos porque são elementos leves.

2ª atmosfera: elementos pesados (vulcanismo)

100× mais densa que a atual.

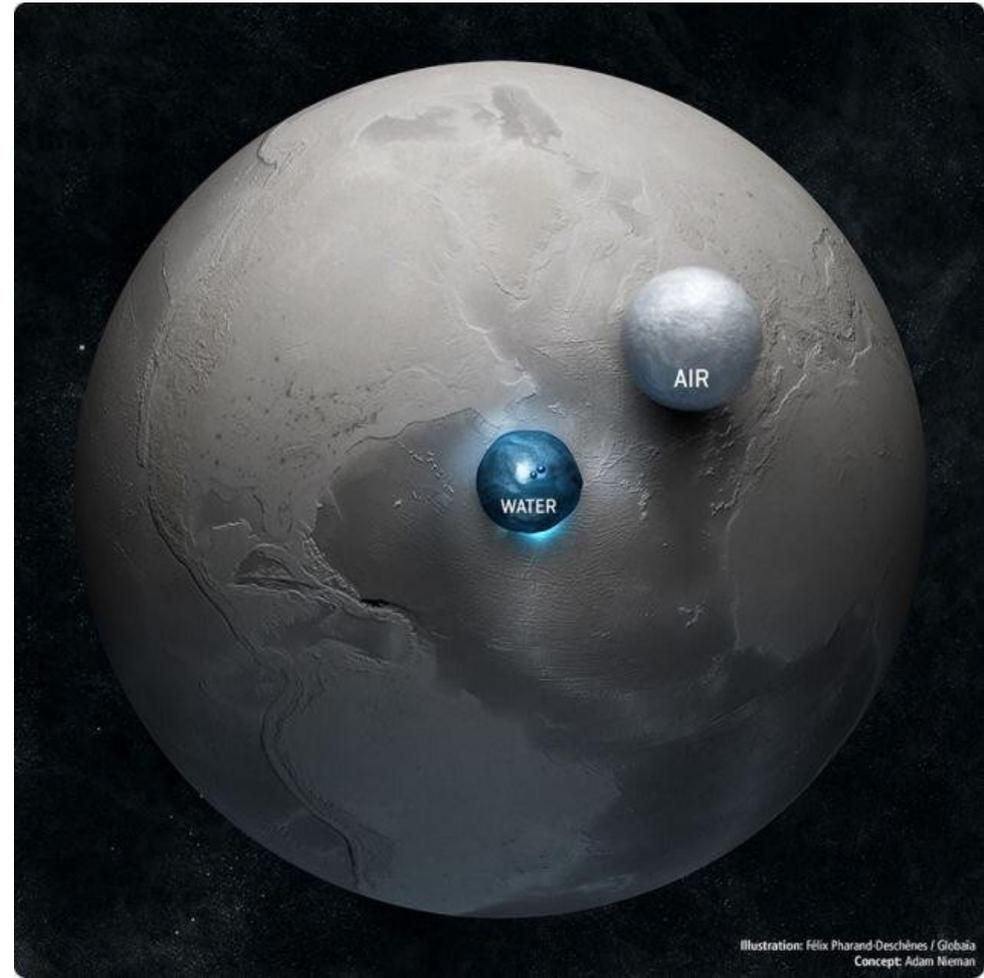
Efeito estufa (muito CO₂). Sol menos luminoso na época.

300 milhões de anos até o CO₂ ser absorvido pelos oceanos, e então aprisionado em calcário.

3ª atmosfera: (nitrogênio e oxigênio)

O₂ (fotossíntese e CO₂ quebrado pela luz UV)

Muito reativo, oxidou a superfície do planeta até 2 bilhões de anos atrás.



Temperatura e velocidade

Densidade de probabilidade de encontrar uma partícula com velocidade v

$$P(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2k_B T}}$$

T = temperatura

m = massa das partículas do gás

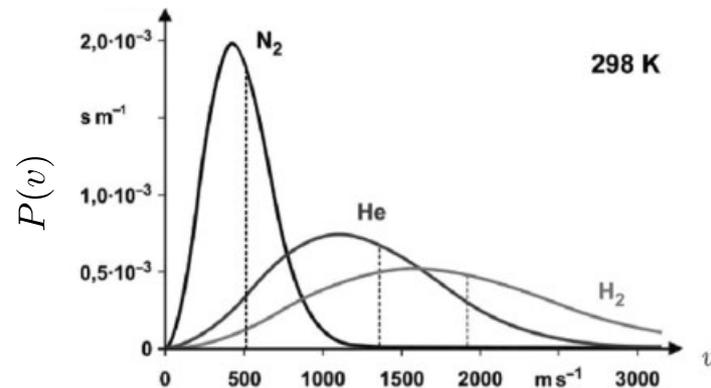
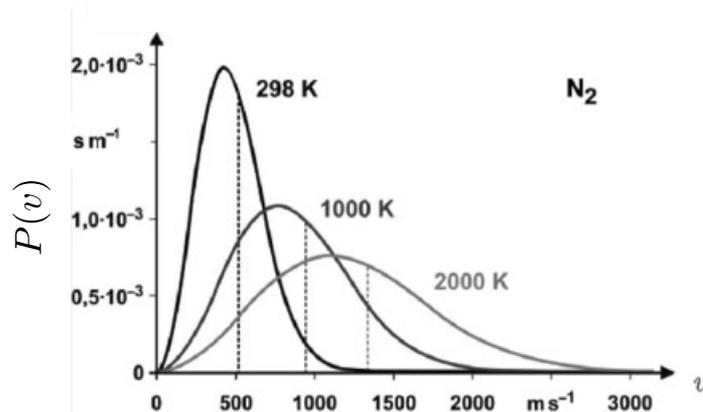
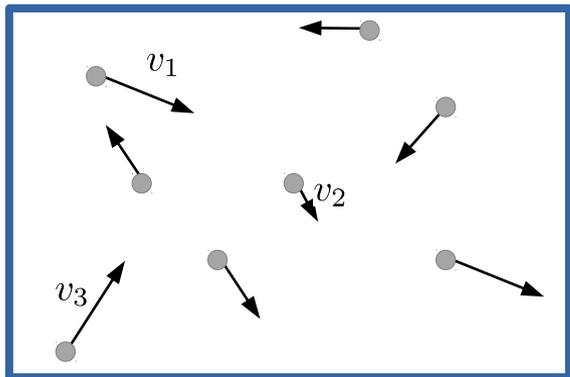
k_B = constante de Boltzmann = 1.38×10^{-23} J/K

Energia cinética média e velocidade RMS

$$\frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} k_B T, \quad \Rightarrow$$

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}}$$

velocidade média: $\bar{v} = \sqrt{\frac{2k_B T}{m}}$



Retenção atmosférica

Critério: poucas moléculas devem ter velocidade maior que a velocidade de escape.

Quantas? 1 partícula em cada 10^{15} .

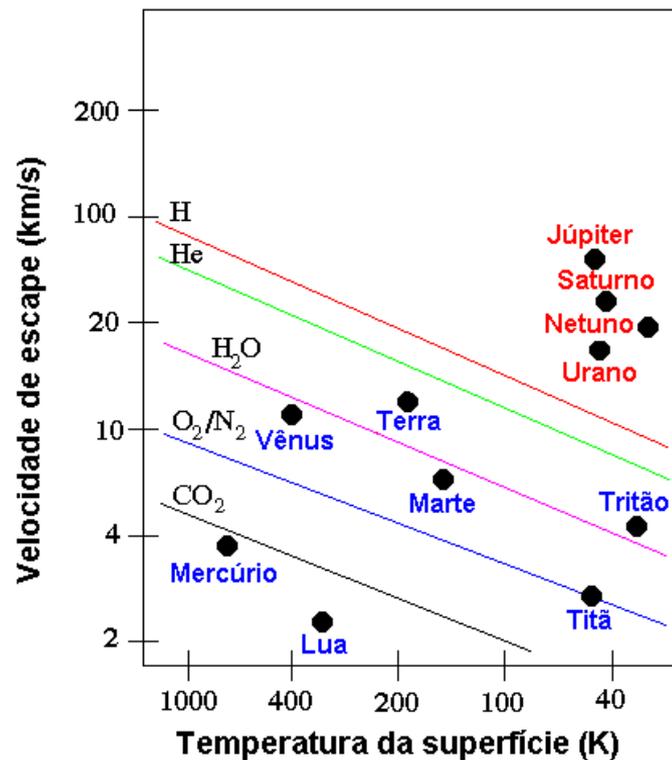
Com isso, garante-se que o planeta retenha esse gás na atmosfera por bilhões de anos.

$$\text{Prob. de encontrar uma partícula com } v > v_{\text{escape}} = \int_{v_{\text{escape}}}^{\infty} P(v) dv \leq 10^{-15}$$

$$\Rightarrow v_{\text{rms}} \lesssim \frac{1}{4.931} v_{\text{escape}} \Rightarrow k_B T \lesssim \frac{1}{36.47} \times \frac{mv_{\text{escape}}^2}{2}$$

$$\Rightarrow \frac{3}{2} k_B T \lesssim \frac{1}{24.31} \times \frac{GMm}{R} \Rightarrow \overline{E_c} < \frac{1}{24} (-U_G)$$

A **energia (cinética) térmica** do gás deve ser menor que a **energia potencial gravitacional** na superfície do planeta dividido por 24.



Terra \oplus (\otimes)

Troposfera (0 ~ 11 km)

aquecida pela Terra (infra-vermelho): $T \downarrow$ com $h \uparrow$

Estratosfera/camada de ozônio (11 ~ 50 km)

($3 \text{ O}_2 + \text{UV} \rightarrow 2 \text{ O}_3$)

aquecida por UV: $T \uparrow$ com $h \uparrow$

Mesosfera (50 ~ 90 km)

transparente: $T \downarrow$ com $h \uparrow$

Termosfera/Ionosfera (90 – 700 km)

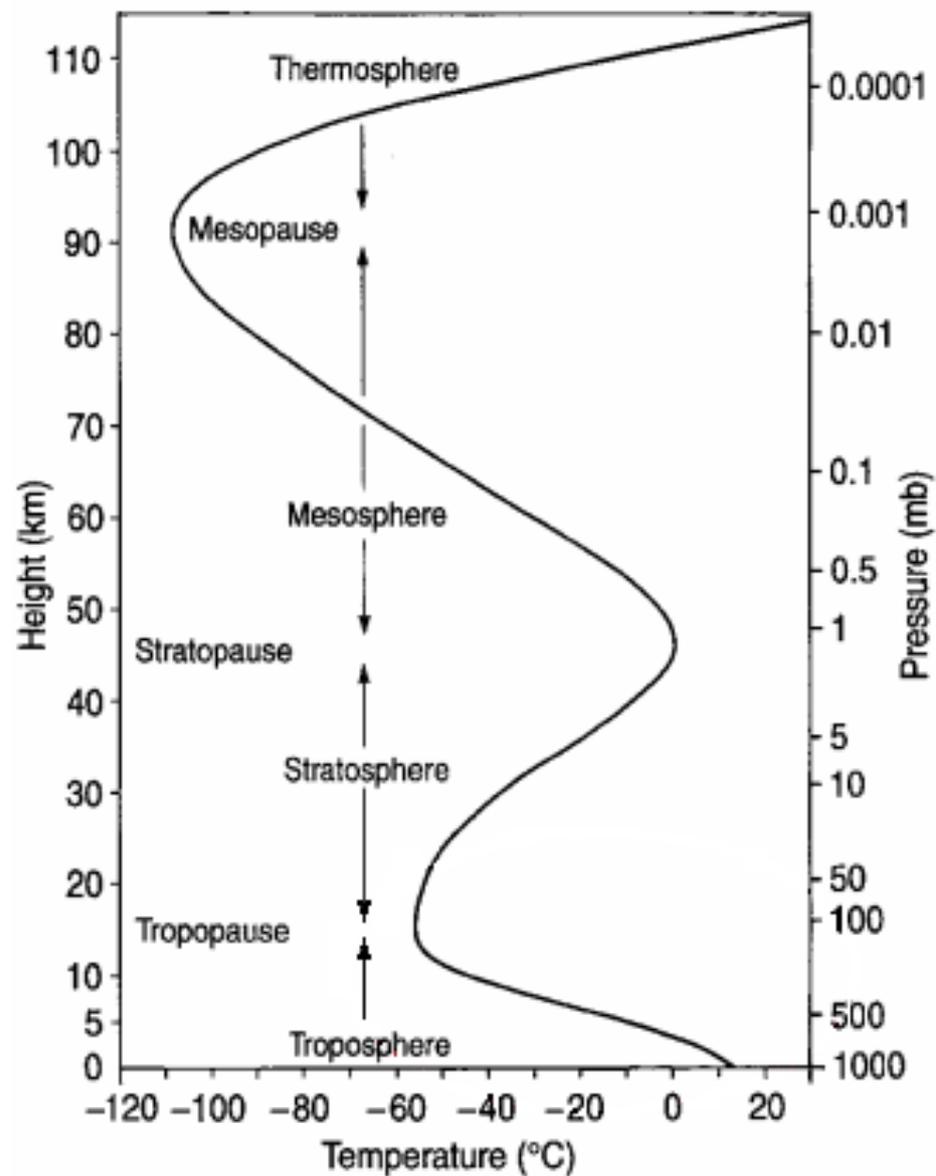
aquecida por raios- γ , raios-X, UVC: $T \uparrow$ com $h \uparrow$

íons livres que refletem ondas de rádio

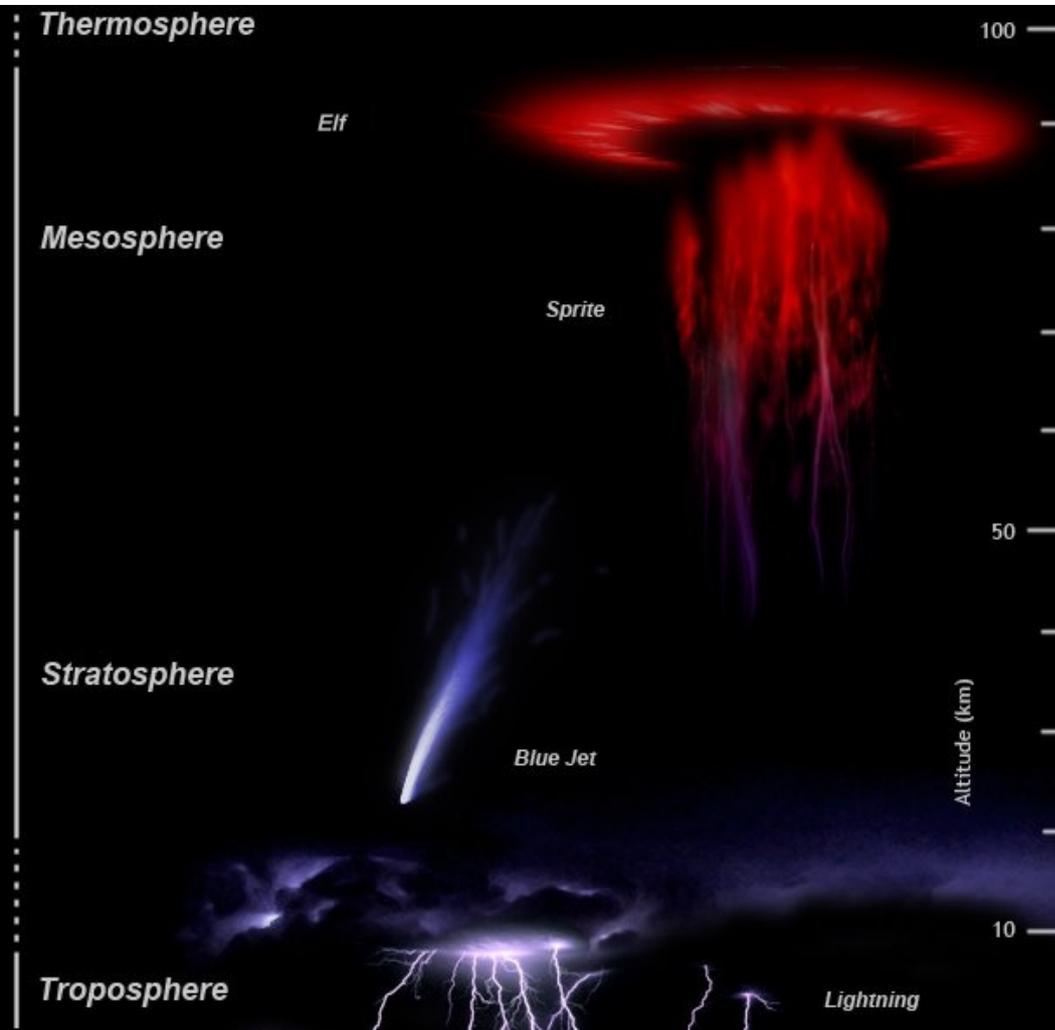
“estrela guia” na camada de sódio (laser 589.2 nm)

Exosfera (700 ~ 10000 km)

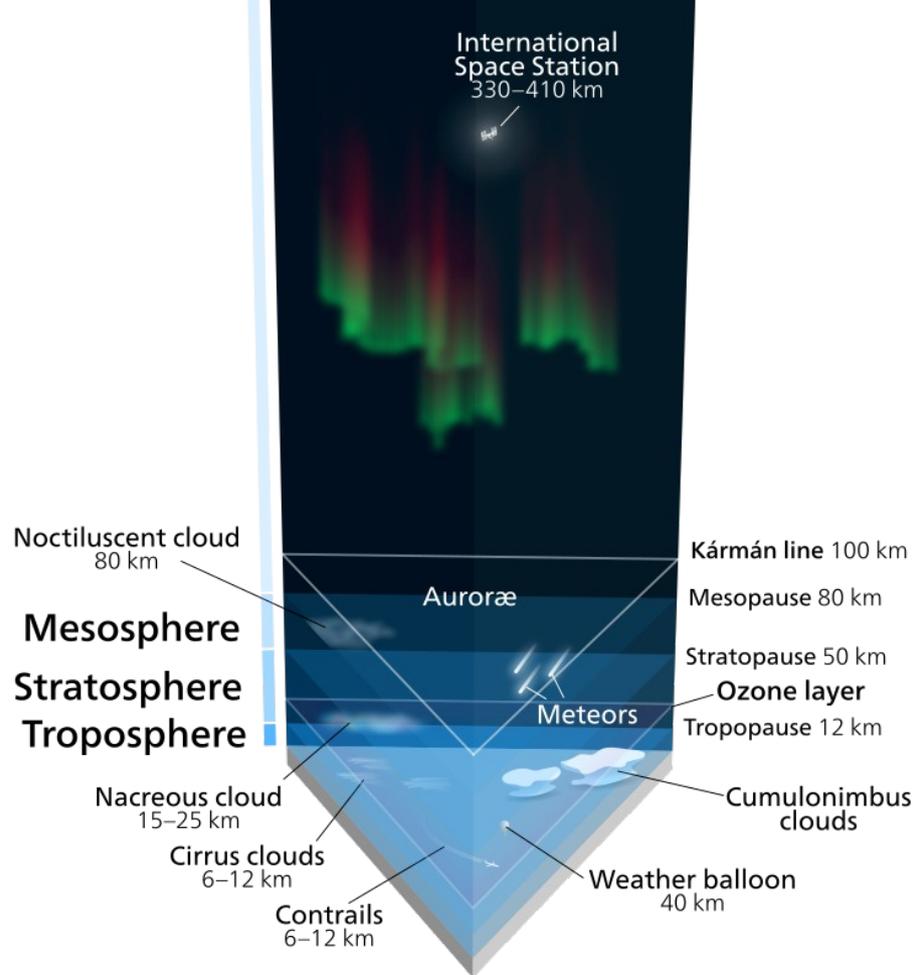
Temperatura determinada pelo vento solar ($\sim 1500^\circ \text{C}$)



Terra ⊕ (♁)



Thermosphere



OBJECTS WITHIN LAYERS NOT DRAWN TO SCALE

Terra ⊕ (♁)

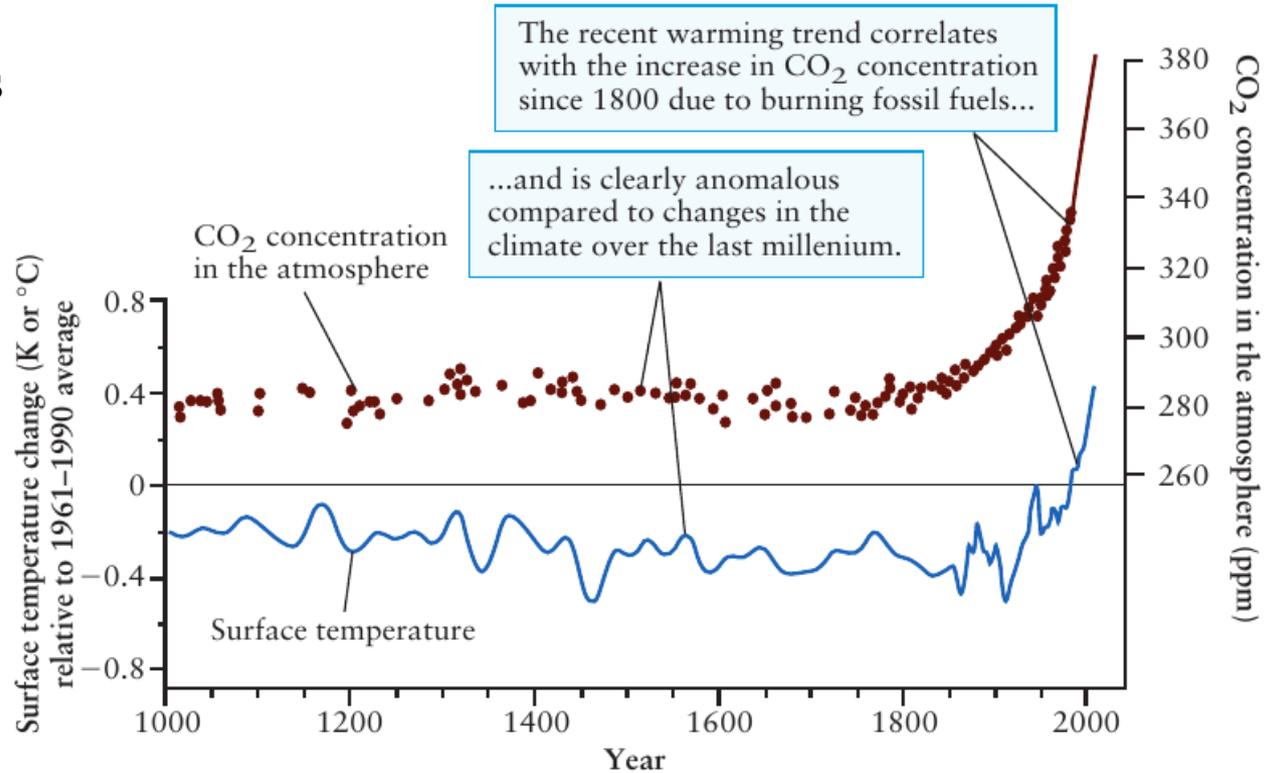
Efeito estufa

Luz visível (energia) é absorvida pelos objetos na Terra e são aquecidos

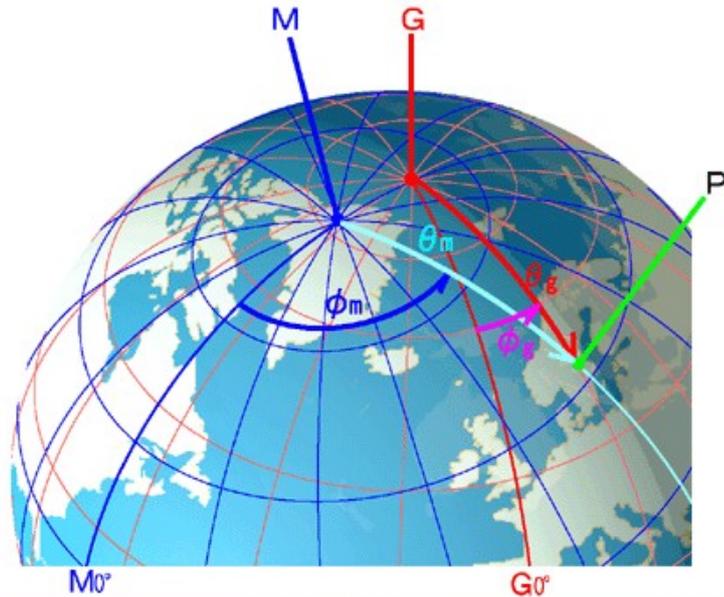
Objetos aquecidos emitem luz Infra-Vermelha (IV) e se re-esfriam

Gases de efeito estufa (CO_2 , CH_4 , H_2O) são opacos ao IV espalhando essa radiação de volta à Terra causando o Efeito Estufa

Aumento da concentração de gases estufas são a causa das mudanças climáticas/aquecimento global e desestabilização do ecossistema.



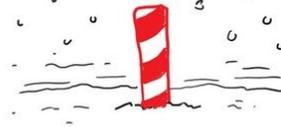
Terra ⊕ (♁)



G: polo geográfico M: polo magnético P: um ponto
 θ_g : colatitude geográfica ϕ_g : latitude geográfica
 θ_m : colatitude magnética ϕ_m : latitude magnética

Em 2018, o polo N geomag. está localizado em latitude 80,5 N e longitude 73,0 O, enquanto o polo S geomag. está localizado em latitude 80,5 S e longitude 107,0 L.

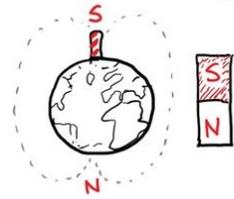
8 FACTS ABOUT THE MAGNETIC NORTH POLE



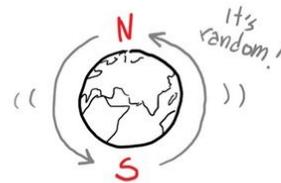
It TILTS 11 degrees OFF the Spin axis of the EARTH.



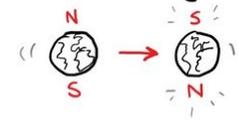
The **NORTH POLE** is actually the **MAGNETIC SOUTH**



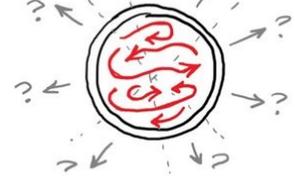
The **NORTH** and **SOUTH** poles **REVERSE** every 0.1 - 50 Million Years



The **LAST** time the poles flipped was **780,000** years ago.



The direction is determined by the **MOTION** of the Earth's molten **CORE**



The **NORTH POLE** is slowly **DRIFTING** towards **SIBERIA**

JORGE CHAM © 2019



And it's getting weaker. It was twice as strong in **ROMAN TIMES** than it is today.



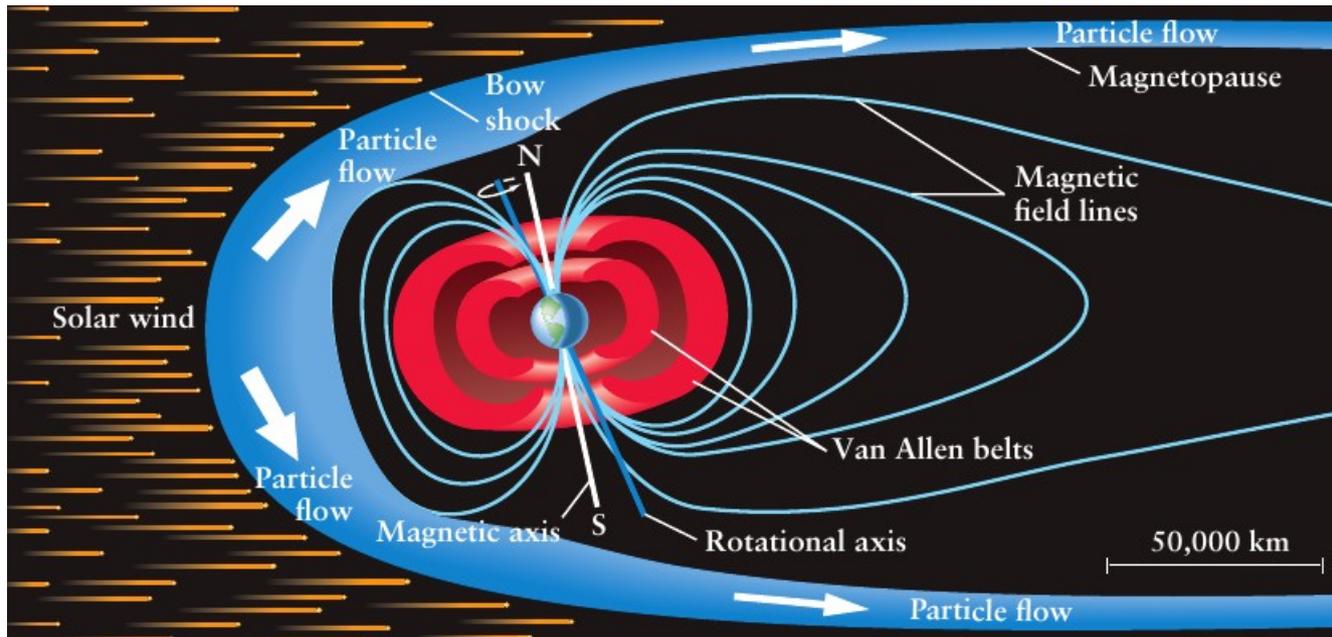
Not all planets have a magnetic field. Ours may one day **DISAPPEAR**.

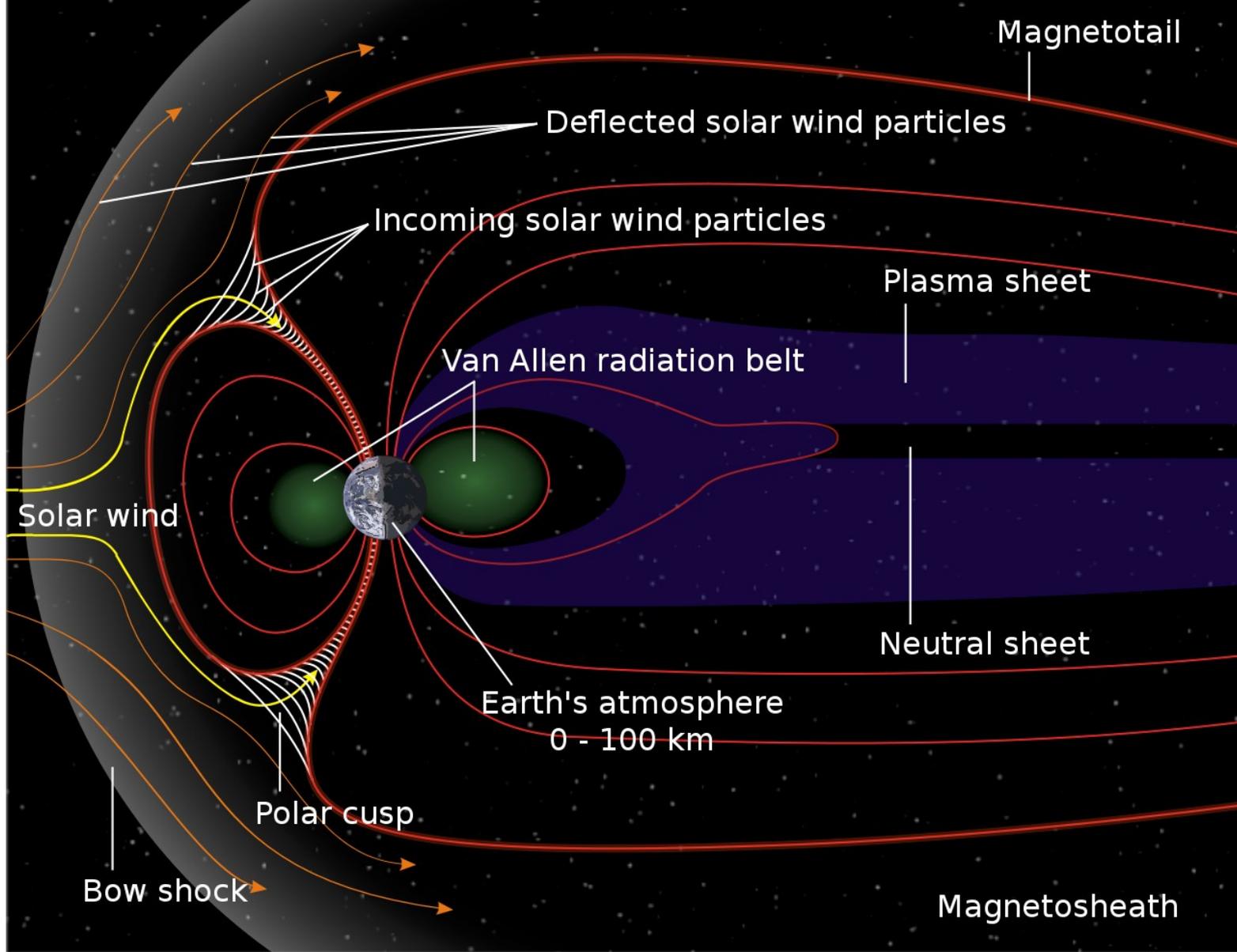


Terra \oplus (\otimes)

Vento Solar: fluxo de partículas carregadas que causaria erosão na atmosfera do planeta.

A grande maioria é defletidas pelo campo magnético. Uma pequena parte é aprisionada nos Cinturões de Van Allen (interno e externo, regiões vermelhas na figura abaixo).





Terra ⊕ (♁)

Os satélites podem ser danificados pela radiação nas regiões dos cinturões.
Precisam de proteção adequada.

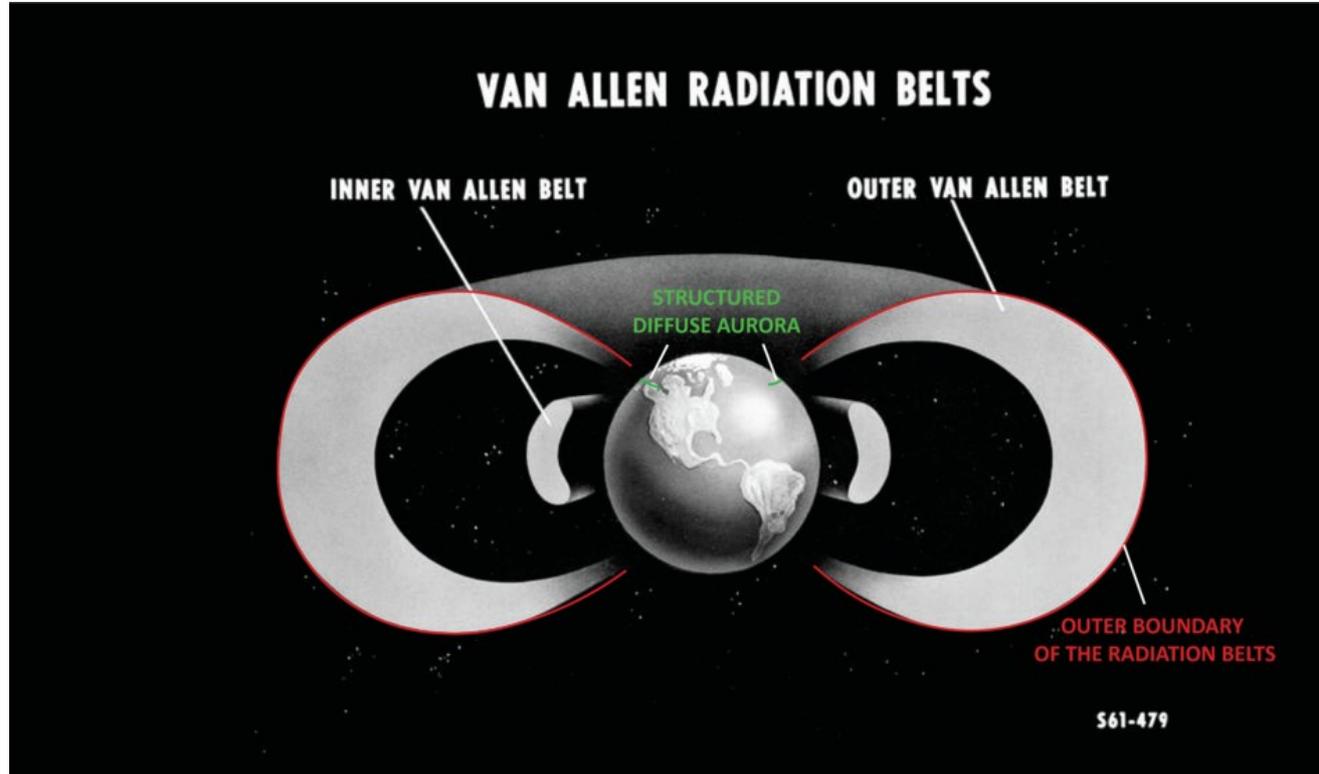
Cinturão interno:

1000 – 5000 km acima da superfície.
Anomalia do Atlântico Sul: fronteira interna pode descer até 200 km.

Cinturão externo:

15000 – 25000 km acima da superfície.

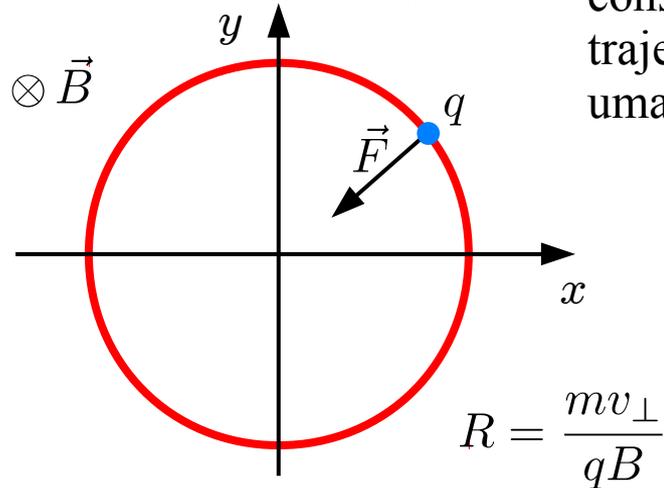
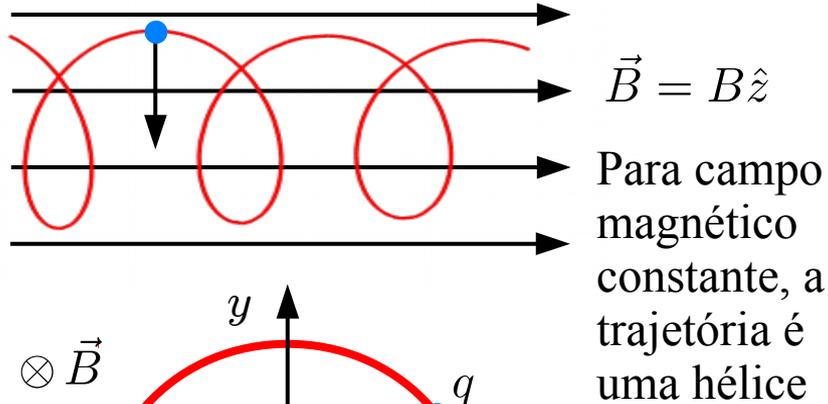
Não existe uma fronteira delimitada entre os cinturões. Eles são apenas regiões (de máxima densidade de radiação) de uma mesma estrutura.



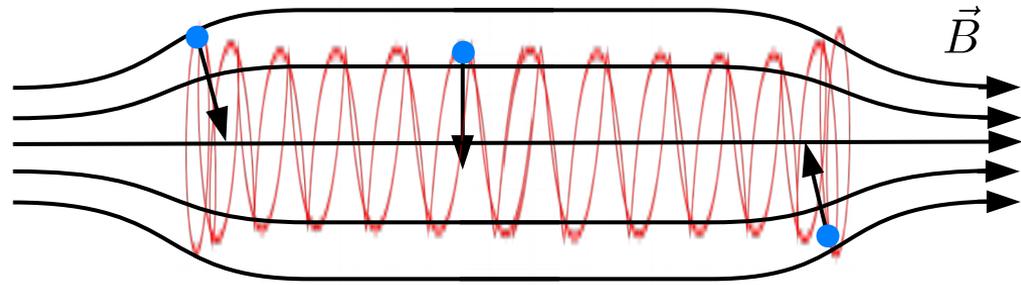
Terra \oplus (\otimes)

Garrafa magnética (e o cinturão de Van Allen)

Força de Lorentz: $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$



O que acontece se o campo magnético se afunila?



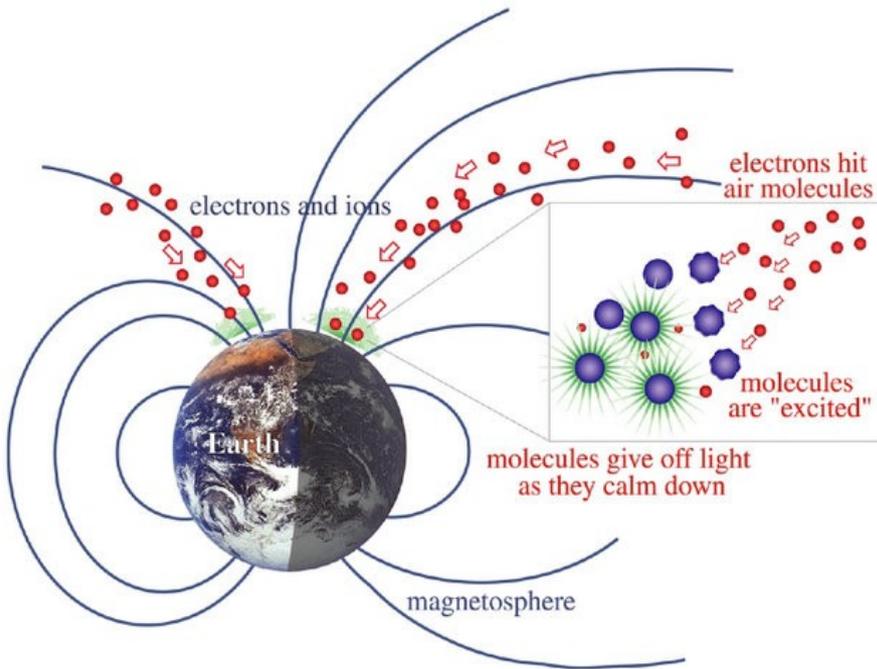
Como $\vec{F} \perp \vec{B}$

Então há uma componente da força que é contrária ao movimento longitudinal \rightarrow partícula carregada aprisionada (garrafa magnética).

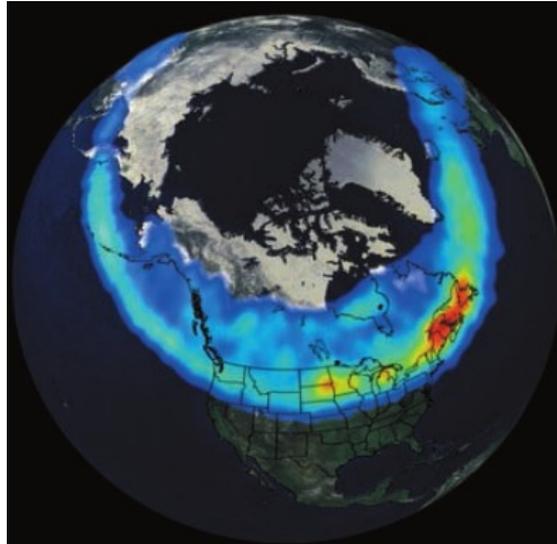
Terra \oplus (\ominus)

Auroras

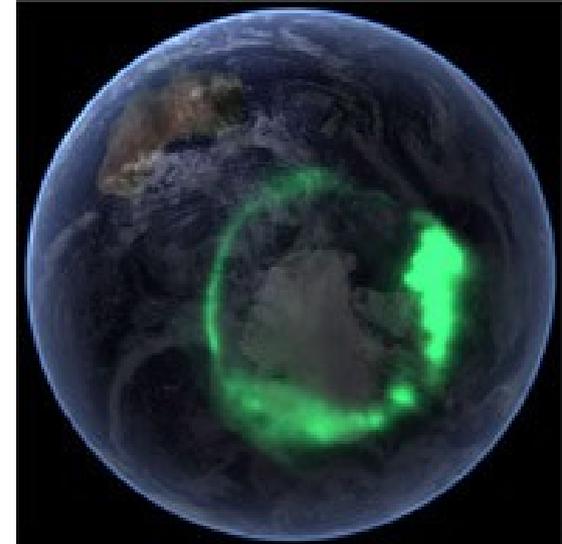
Quando o fluxo de partículas do vento Solar está alto (por conta de uma tempestade Solar, por exemplo), algumas partículas penetram mais profundamente na magnetosfera atingindo as moléculas das camadas mais altas da atmosfera (essencialmente da termosfera), ionizando ou excitando-as. Quando da recombinação ou desexcitação, essas moléculas emitem luz, criando as Auroras.



Polo Norte



Polo Sul



Descrever a forma e cor de uma aurora é complicado e tema de pesquisa.

Ao lado, temos um exemplo de aurora discreta em Kiruna, Suécia.

Aurora discreta:
Estrutura tipo cortina em arco ou em arcos separados por dezenas de quilômetros.



<https://www.youtube.com/watch?v=7Mz2laHjVoQ>

<https://www.nasa.gov/feature/aurora-mysteries-unlocked-with-nasa-s-themis-mission>

Aurora difusa em
Östersund, Suécia.

Aurora difusa:
Estrutura tipo banda
luminosa larga de
espessura de dezenas de
quilômetros, ou um
grupo de auroras
discretas muito
próximas ao longo de
um cinturão.





Des Moines, Iowa, EUA.



Grotfjord, Noruega.

Aurora
discreta/difusa(?) em
Yellowknife, Canada.





www.goldpaintphotography.com

© 2012 Brad Goldpaint

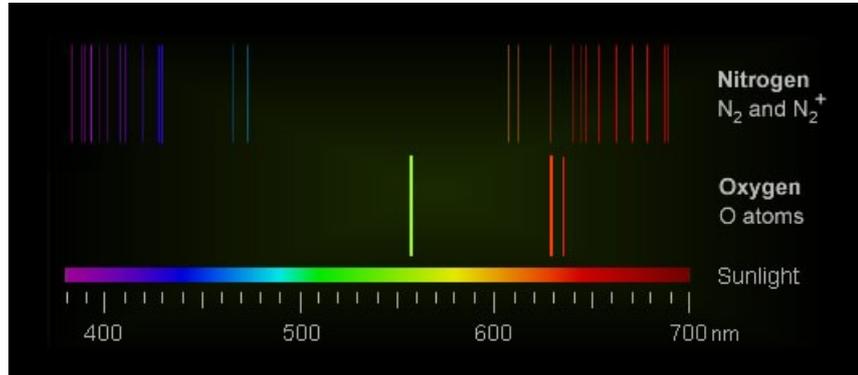
Crater Lake in Oregon, EUA

Vermelho (630 nm): Desexcitação do oxigênio atômico.
Altas altitudes ~ de 200 a 400 km

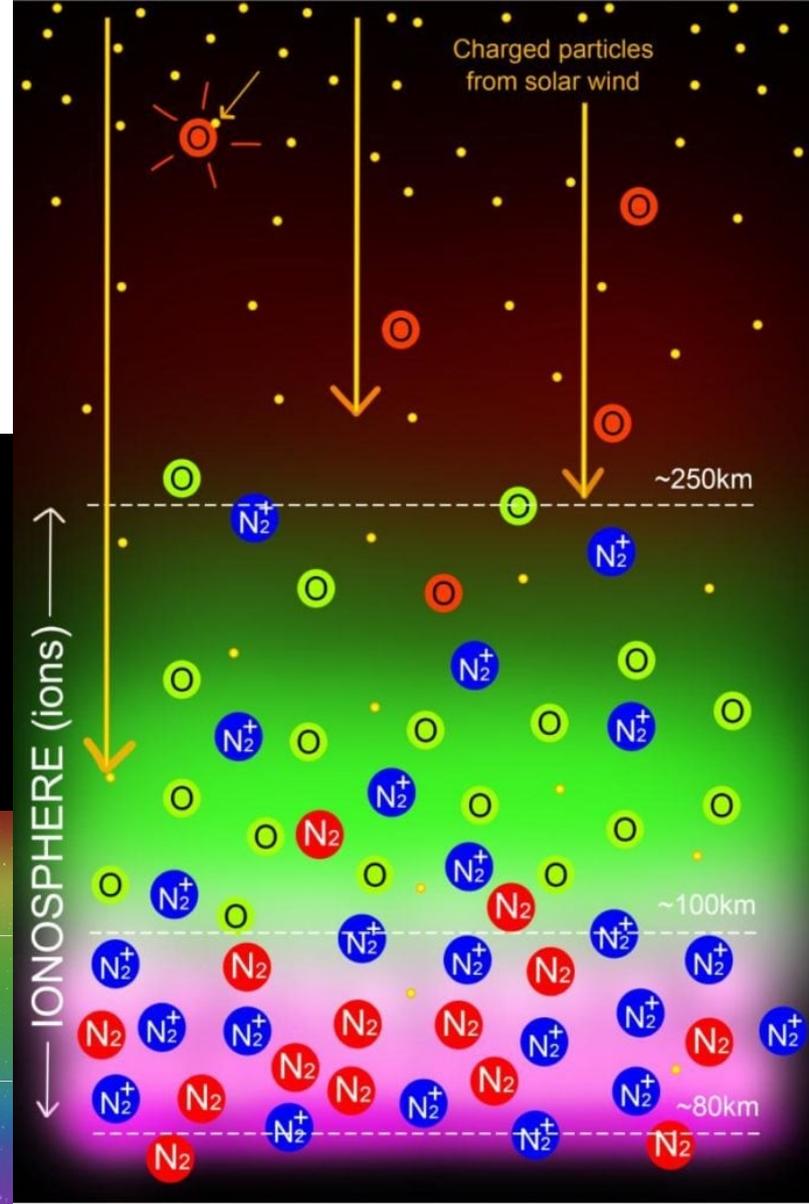
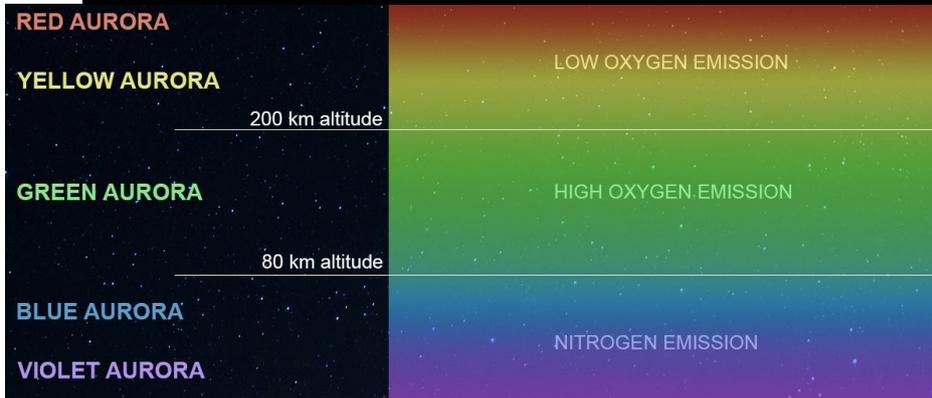
Verde (557.7 nm): Desexcitação do oxigênio atômico na presença de N_2 (colisões). Baixas altitudes ~ de 100 a 200 km

Abaixo de 100 km, a concentração de O atômico cai abruptamente.

Azul (428 nm):
 N_2 and N_2^+
ionizado em
baixas altitudes
~ 100 km

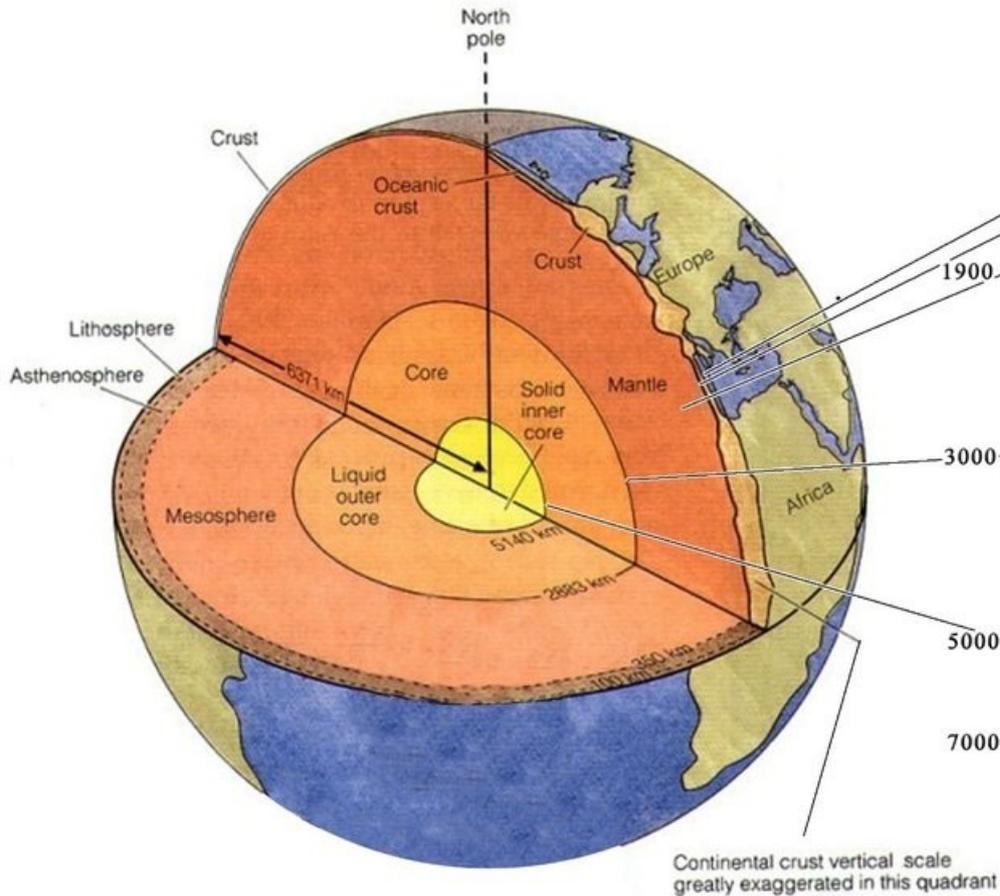


Outras cores
(amarelo e
rosa): mistura
das outras.

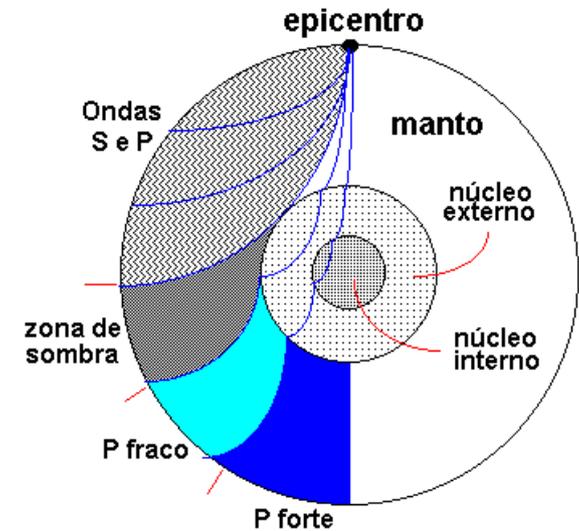
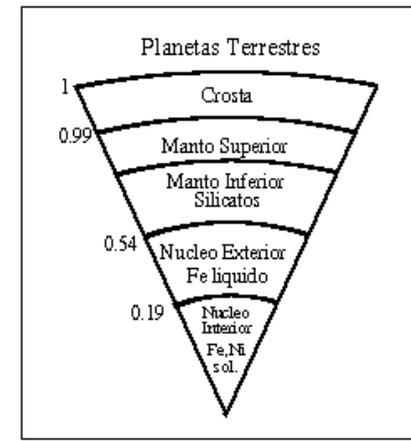
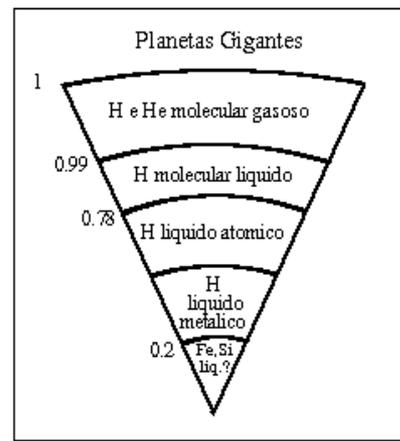
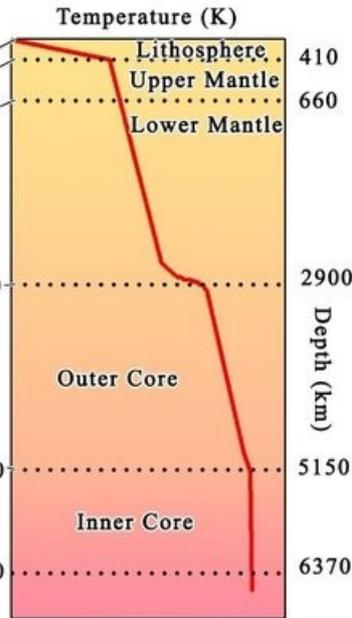


Terra ⊕ (♁)

Estrutura da Terra



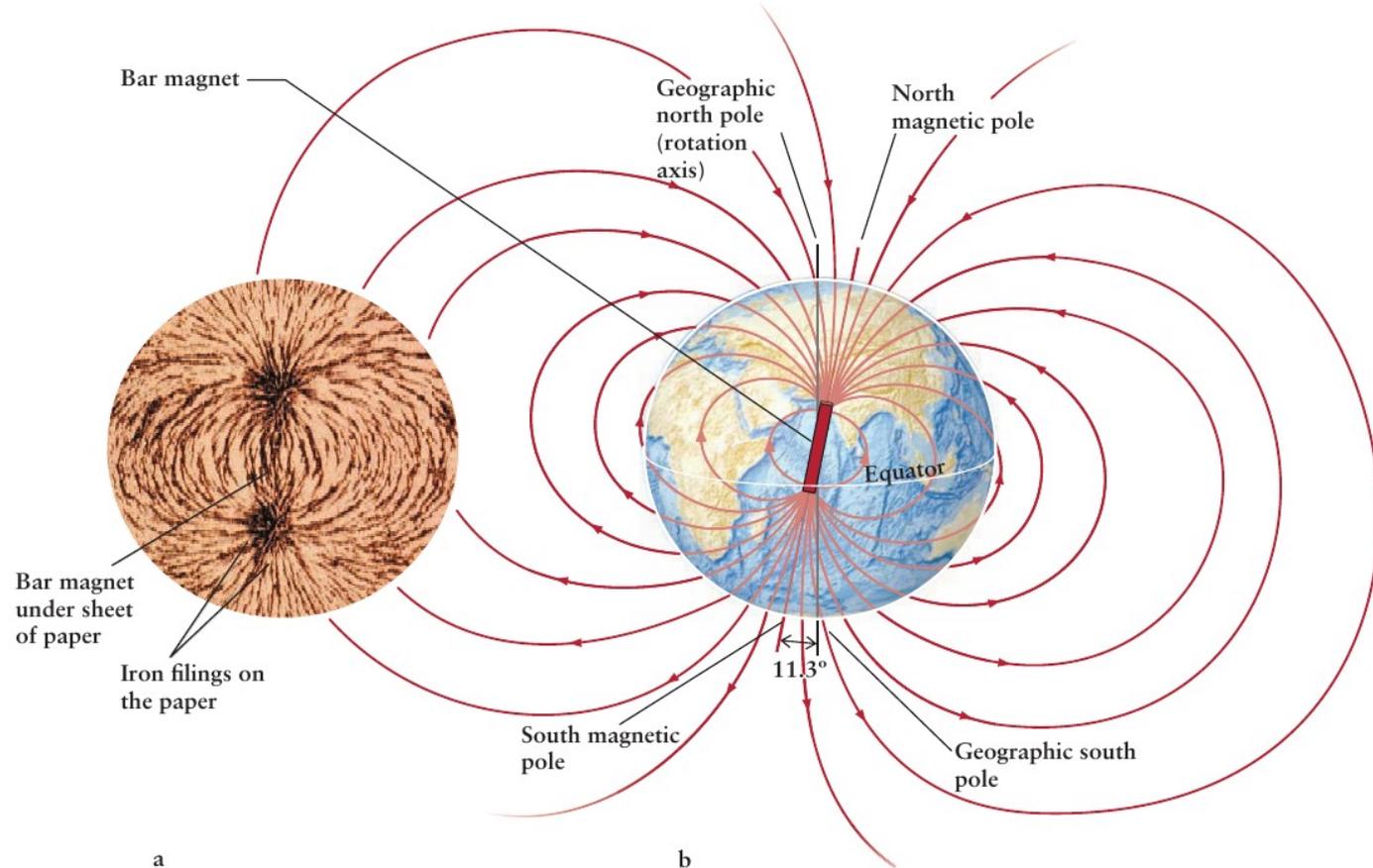
Continental crust vertical scale greatly exaggerated in this quadrant



Terra \oplus (\otimes)

Teoria do dínamo:

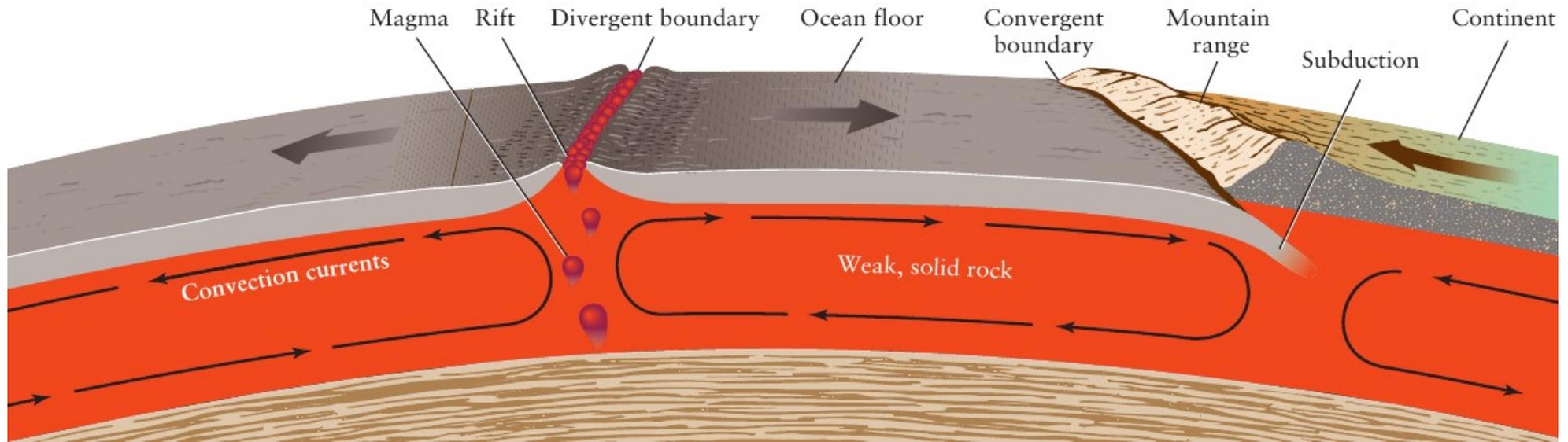
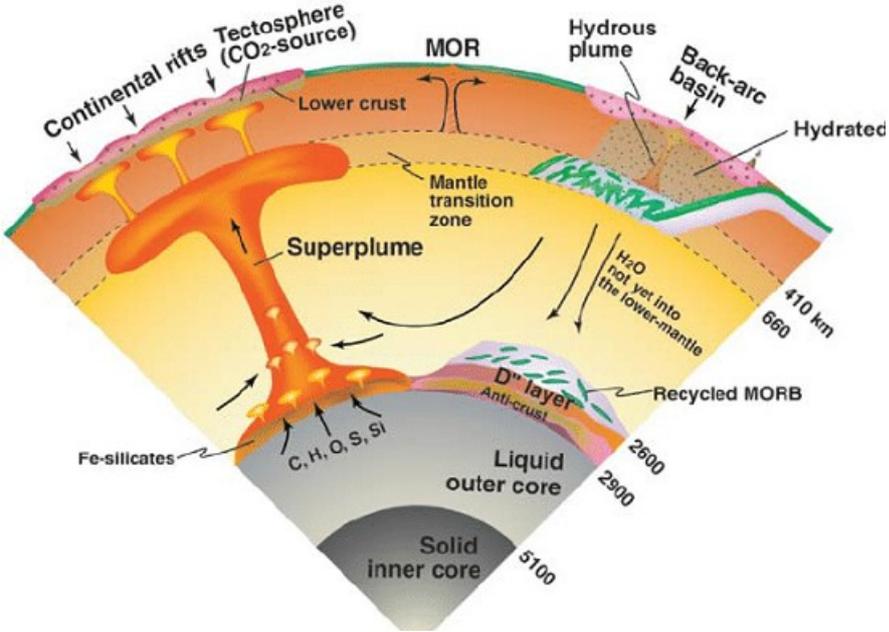
Correntes de convecção de Fe líquido no núcleo externo geram correntes elétricas que dão origem ao campo magnético da Terra.



Terra ⊕ (♁)

O movimento das placas tectônicas permite a transferência de calor (correntes de convecção).

Se não houvesse placas tectônicas, a crosta poderia eventualmente derreter.

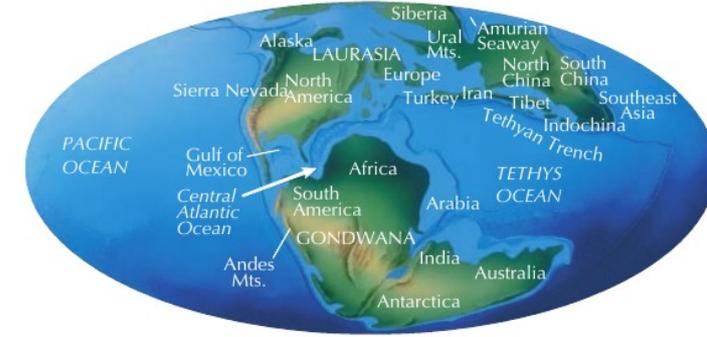


Terra ⊕ (♁)

O constante movimento das placas tectônicas causa mudanças “rápidas” na morfologia da crosta terrestre (ausência de crateras).



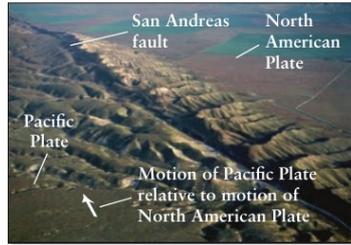
a 237 million years ago: the supercontinent Pangaea



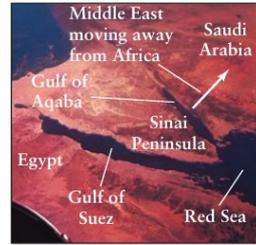
b 152 million years ago: the breakup of Pangaea



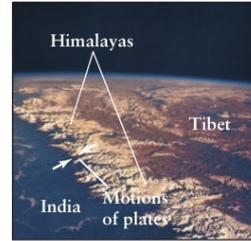
c The continents today



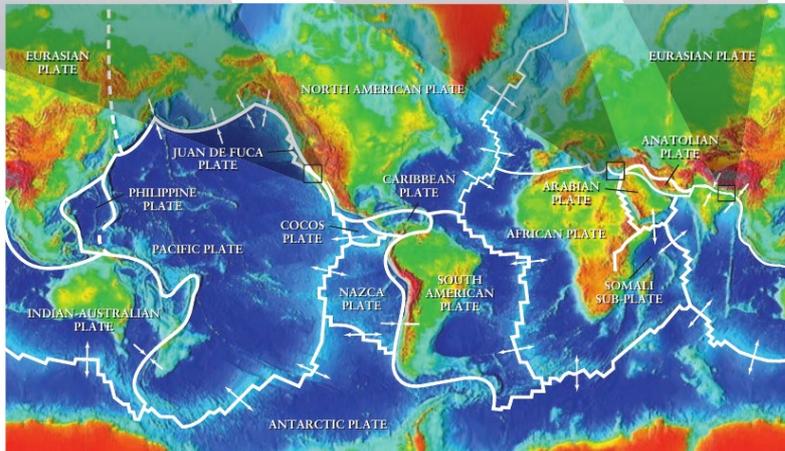
b



c



d



Exercício

Se pararmos de despejar na atmosfera elementos químicos prejudiciais à camada de ozônio (como CFCs), ela se recuperará naturalmente em 100 anos.

- 1) Verdadeiro
- 2) Falso

Exercício

Se a Terra não tivesse campo magnético, teríamos

- 1) mais auroras
- 2) menos auroras

Exercício

Por que conseguimos ver estrelas através da aurora?

- 1) Porque são muito rarefeitas. Conseguimos enxergá-las porque olhamos através de várias dezenas de quilômetros de gás fluorecendo.
- 2) Porque as estrelas emitem luz em outros comprimentos de onda que as auroras.
- 3) Não conseguimos. As fotos são obtidas em longa exposição e a estrela atrás da aurora acaba sendo capturada quando a mesma se mexe.

Lua ☾

Distância média até a Terra: 384400 km (máx: 405500 km, mín: 363300 km)

Excentricidade: 0.055

Velocidade média orbital: 1.022 km/s

Período de revolução sinódico (fase da Lua): 29.53 dias terrestres

Período de revolução sideral (em torno da Terra): 27.32 dias terrestres

Rotação síncrona

Inclinação do equador em relação à órbita: 6.68°

Inclinação da órbita em relação à eclíptica: 5.15°

Diâmetro (equatorial): 3476 km = 0.272 diâmetro terrestre

Massa: 7.35×10^{22} kg = 0.012 massa terrestre

Densidade média: 3340 kg/m³ = 0.605 densidade terrestre

Velocidade de escape: 2.4 km/s

Gravidade na superfície: 0.17 *g*

Albedo: 0.12

Temperatura superficial: Dia: 130°C = 403 K, Noite: -180°C = 93 K

Atmosfera: traços de Ar, He, Na e K

Lua ☾

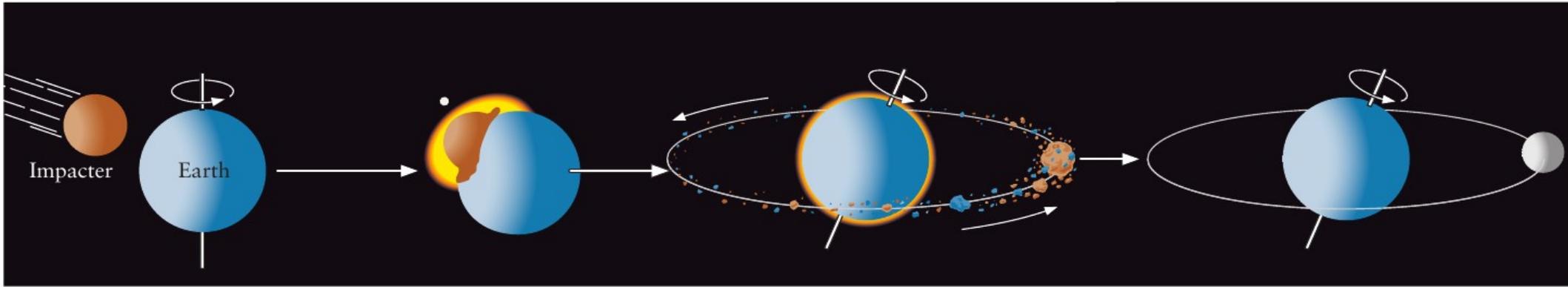
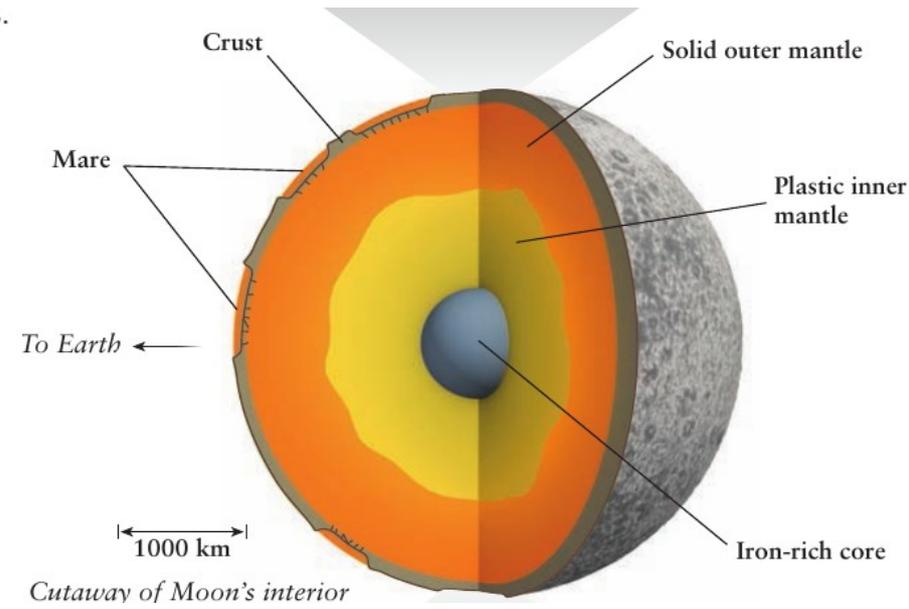


FIGURE 6-29 Tilting Earth's Axis The collision that created the Moon could have also knocked Earth's rotation axis over so that today it has a $23\frac{1}{2}^\circ$ tilt, thereby creating the seasons.

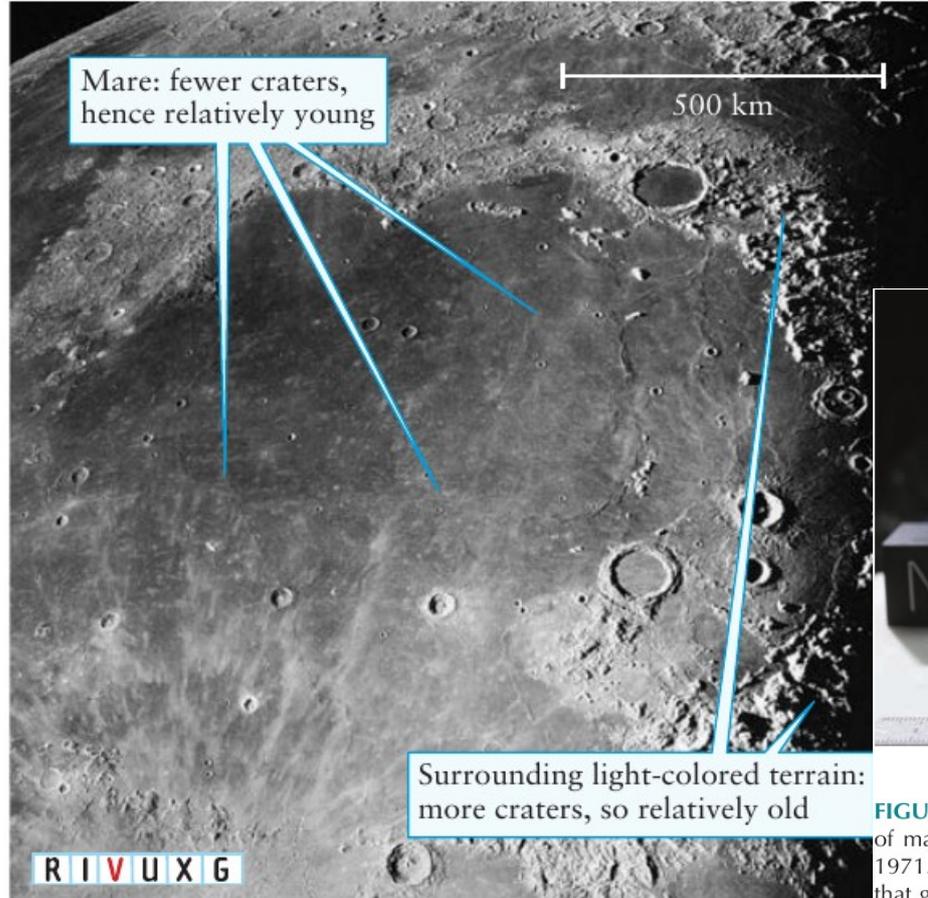
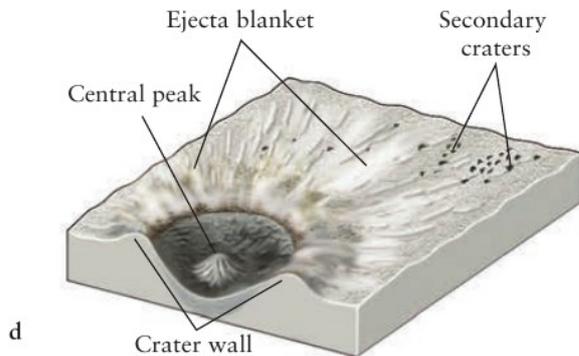
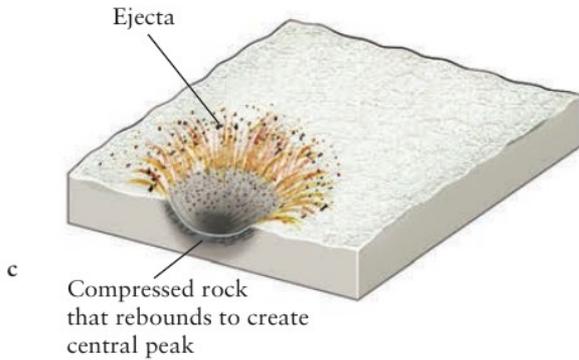
Formação: provavelmente colisão com um grande planetesimal.

Também seria a origem da obliquidade do eixo de rotação.

A órbita inicial da Lua seria muito menor que a de hoje (10x menor?)



Lua ☾



Mare: regiões de lava resfriada.

Provavelmente em decorrência do período de bombardeio tardio

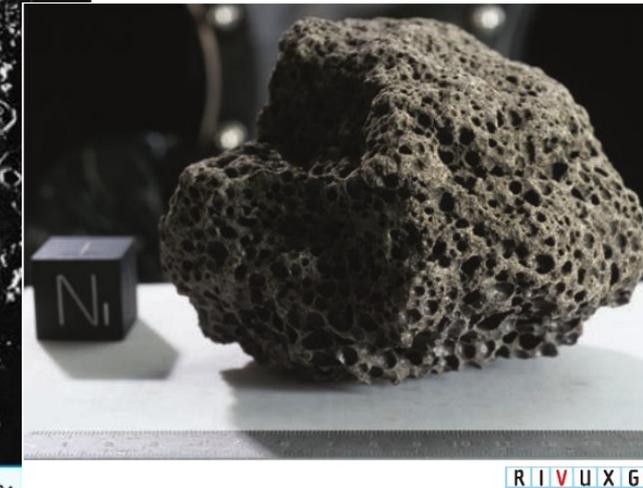


FIGURE 6-23 Mare Basalt This 1.53-kg (3.38-lb) specimen of mare basalt was brought back by *Apollo 15* astronauts in 1971. Small holes that cover about a third of its surface suggest that gas was dissolved in the lava from which this rock solidified. When the lava reached the airless lunar surface, bubbles formed as the pressure dropped and the gas expanded. Some of the bubbles were frozen in place as the rock cooled. (NASA)

Marte ♂

Distância média até o Sol: $1.52 \text{ UA} = 2.28 \times 10^8 \text{ km}$ (máx: 1.67 UA , mín: 1.38 UA)

Excentricidade: 0.093

Velocidade média orbital: 24.1 km/s

Período de revolução sideral (ano): $687 \text{ dias terrestres} = 1.88 \text{ ano terrestre}$

Período de rotação sideral: $24 \text{ h } 37 \text{ m } 22 \text{ s}$

Período de rotação Solar (dia): $24 \text{ h } 39 \text{ m } 35 \text{ s}$

Inclinação do equador em relação à órbita: 25.19° (provavelmente instável \sim milhões de anos, sem Lua)

Inclinação da órbita em relação à eclíptica: 1.85°

Diâmetro (equatorial): $6787 \text{ km} = 0.53 \text{ diâmetro terrestre}$

Massa: $6.42 \times 10^{23} \text{ kg} = 0.107 \text{ massa terrestre}$

Densidade média: $3950 \text{ kg/m}^3 = 0.716 \text{ densidade terrestre}$

Velocidade de escape: 5.0 km/s

Gravidade na superfície: $0.38 g$

Albedo: 0.15

Temperatura superficial: Máx: $35^\circ\text{C} = 310 \text{ K}$, Mín: $-53^\circ\text{C} = 220 \text{ K}$

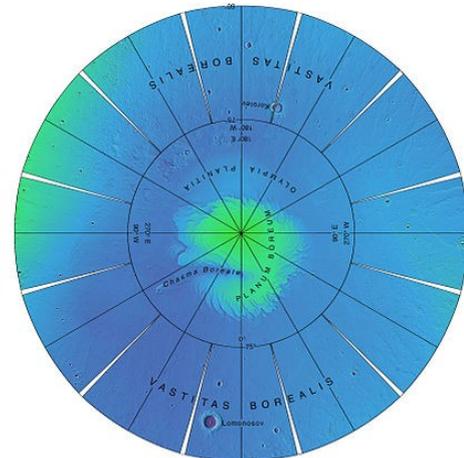
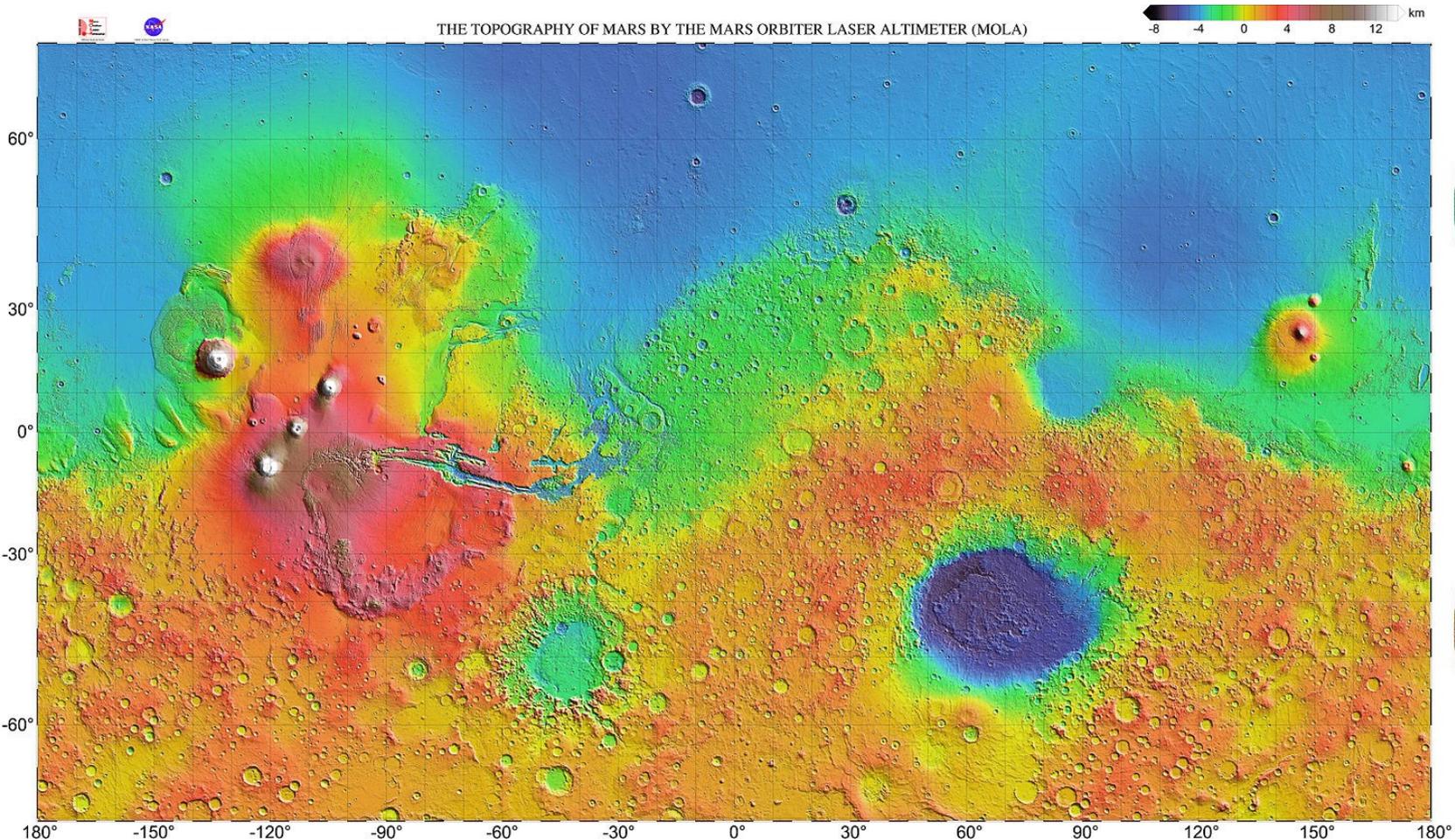
Pressão atmosférica: 0.006 atm

Atmosfera (nr. de moléculas): $95.3\% \text{ CO}_2$, $2.7\% \text{ N}_2$, $0.03\% \text{ H}_2\text{O}$, $2\% \text{ outros gases}$

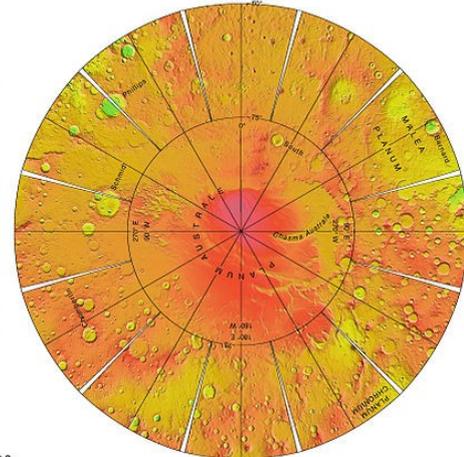
Marte ♂

Diferença entre Norte e Sul

THE TOPOGRAPHY OF MARS BY THE MARS ORBITER LASER ALTIMETER (MOLA)

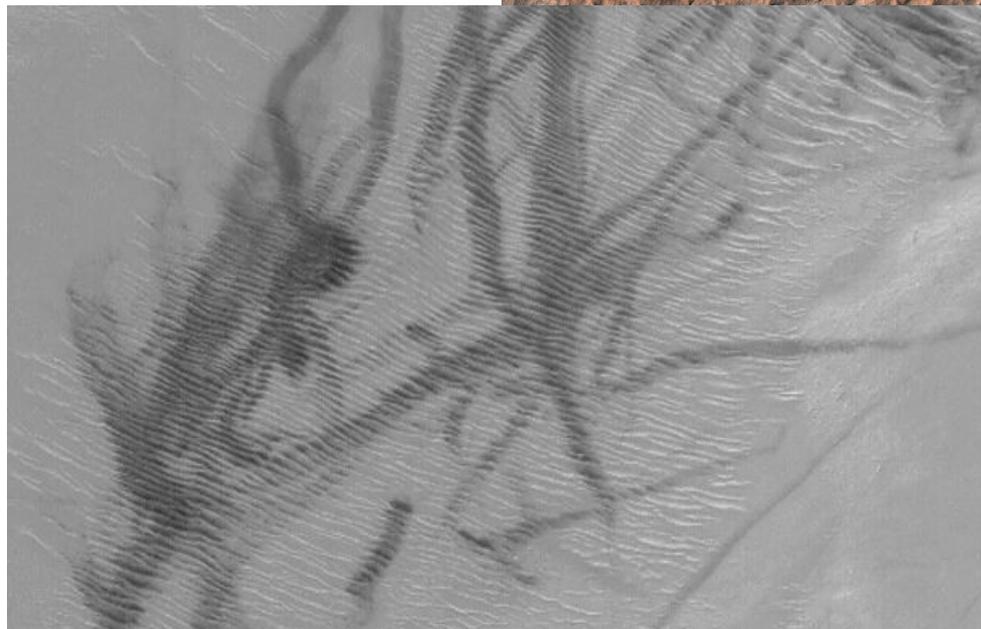
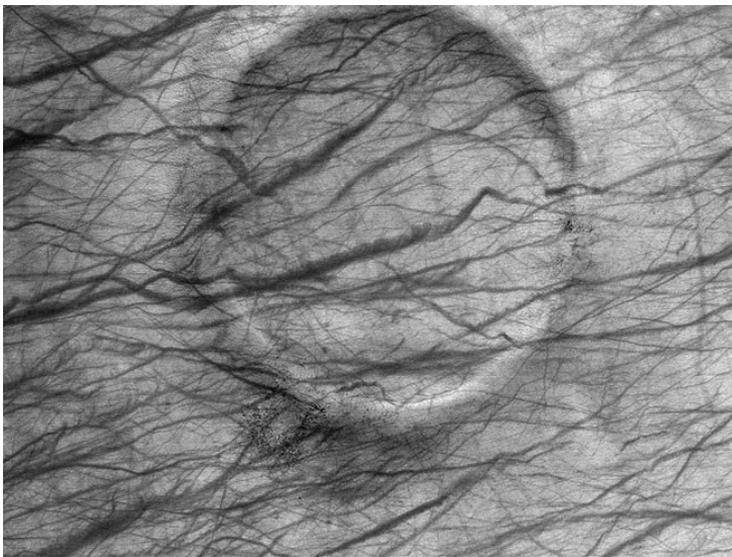
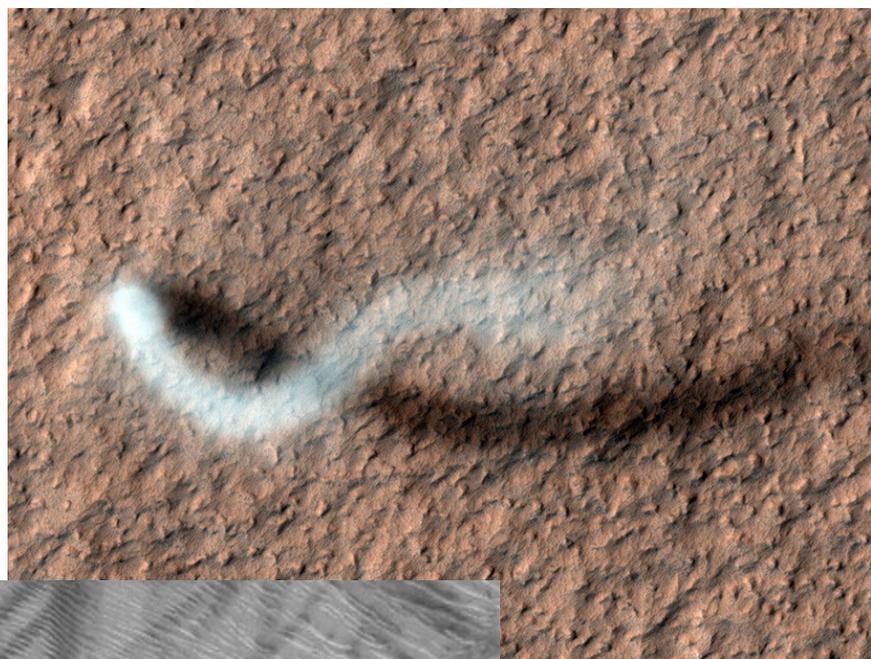


0° E or W, 60° N or S



Marte ♂

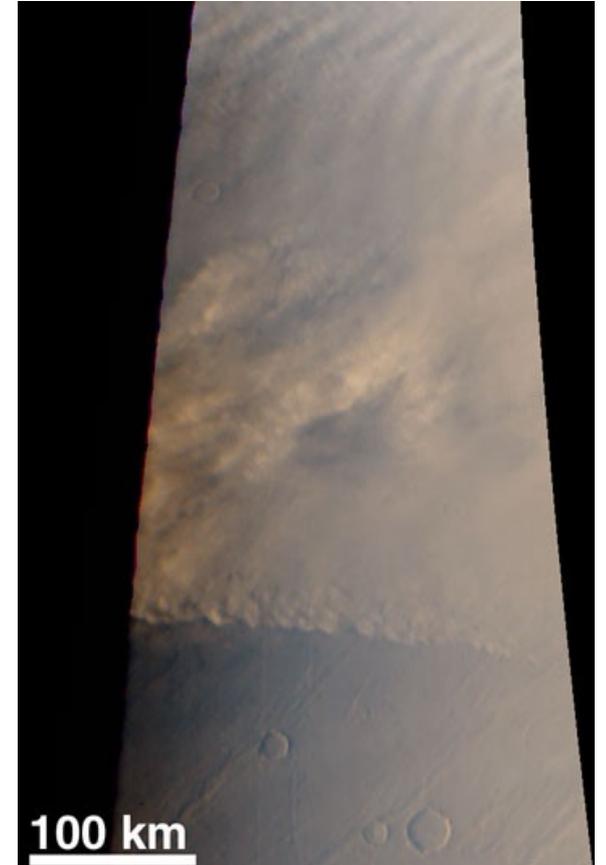
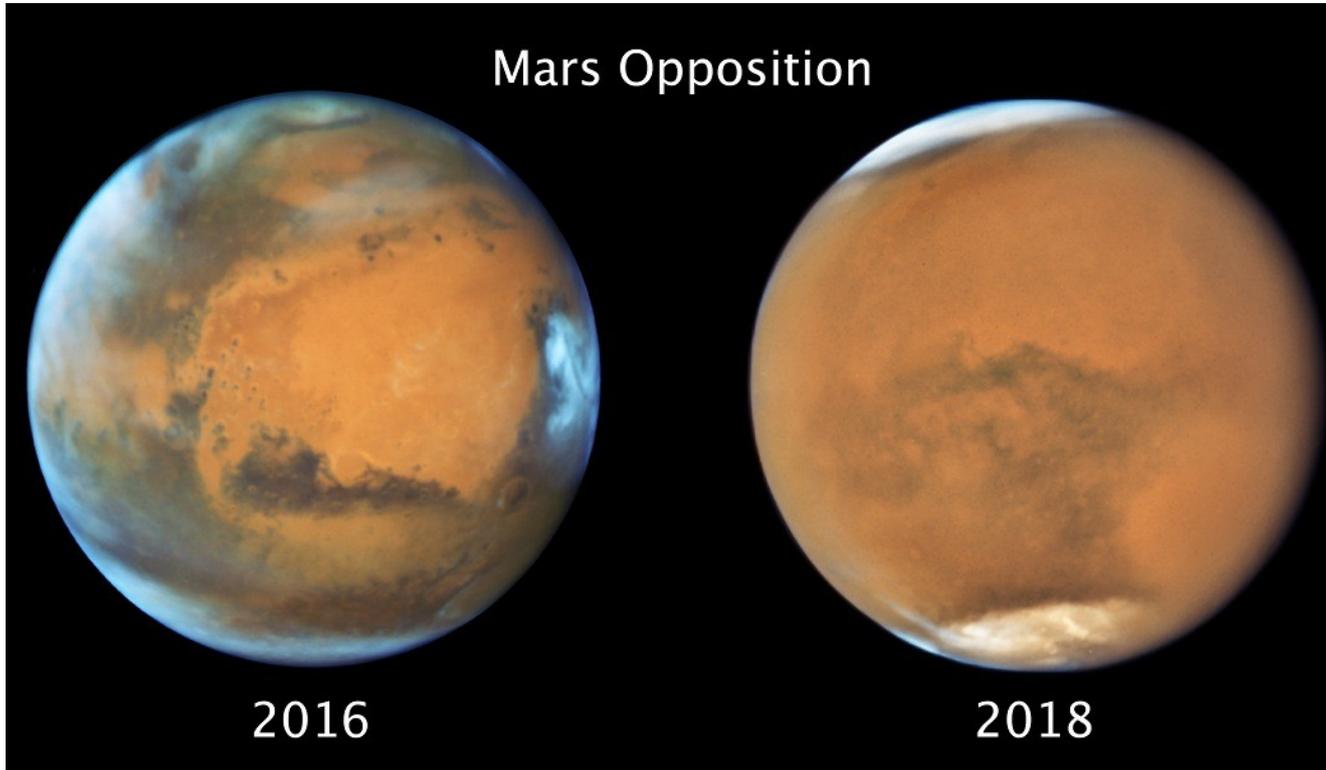
Estações climáticas:
“Dust devils”



Marte ♂

Estações climáticas:

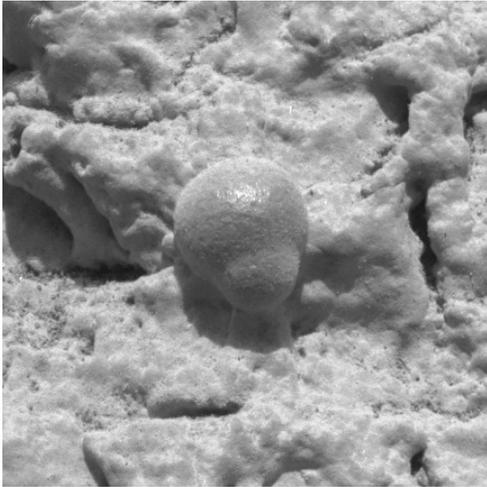
Tempestades de poeira (ventos de 160 km/h)



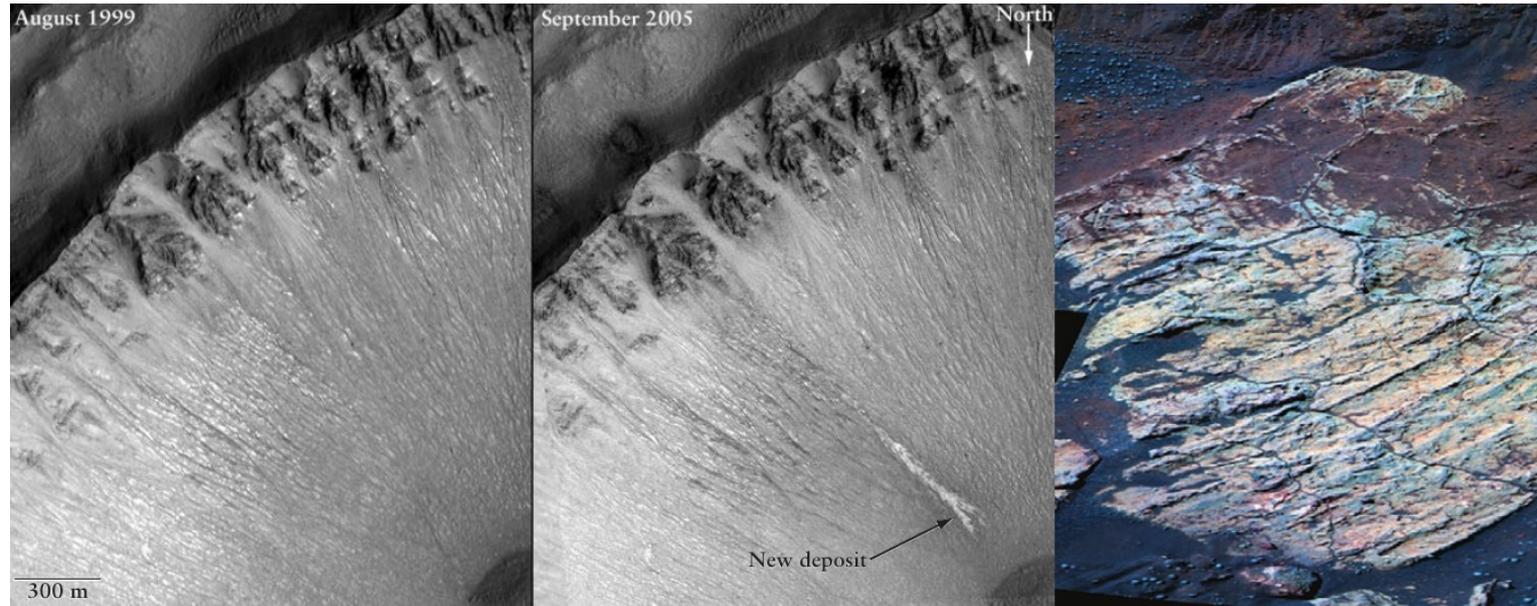
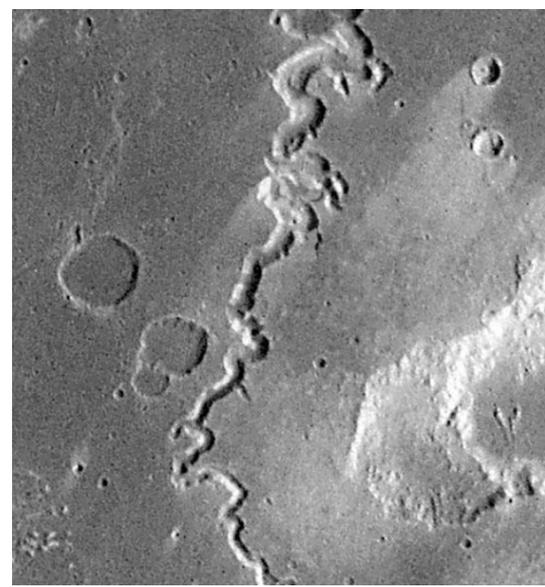
Marte ♂

Muita água no passado.

No presente, água na calota polar Sul e no subsolo



Hematita e outros
(jarozita e gipsita)



Marte ♂

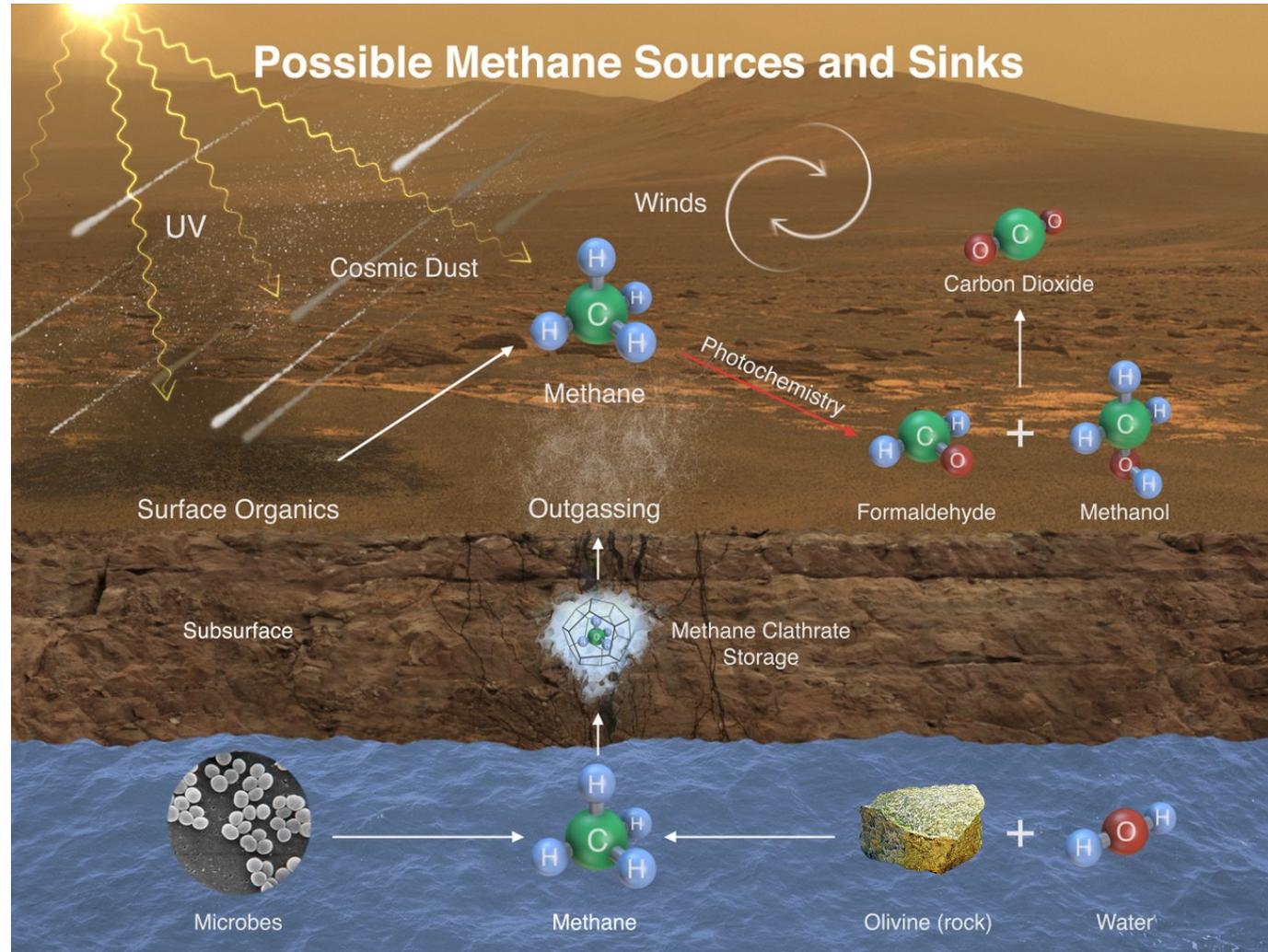
Metano na atmosfera

Concentração varia de 0.24 ppb (inverno) a 0.65 ppb (verão).

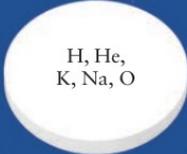
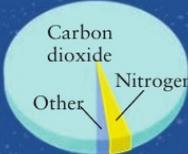
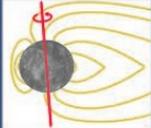
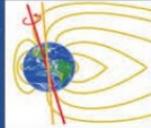
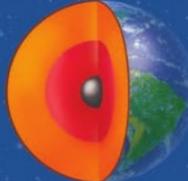
Vida-média na atmosfera:
0.6 – 4 anos

Origem:
Biológica ou não-biológica?

(fóssil de bactéria Marciana?)



Quadro comparativo dos planetas rochosos internos

700 K by day, 100 K by night	750 K	200–315 K	160–280 K
			
Mercury Heavy cratering, scarps	Venus Light cratering, hills, some volcanoes	Earth Very little cratering, continents and land at ocean floors, weathering, volcanoes, global tectonic plates	Mars Moderate cratering, weathering, dormant volcanoes, huge canyons
			
Atmosphere Transient and tenuous	Atmosphere Carbon dioxide 90 times denser than Earth's atmosphere	Atmosphere Nitrogen, oxygen	Atmosphere Carbon dioxide 0.006 times as dense as Earth's atmosphere
			
Magnetic field Weak (0.1 times Earth's field)	Magnetic field None	Magnetic field Moderate global field, due to liquid iron core	Magnetic field Weak, local fields
			
Interior Iron-nickel core, rocky shell (details unknown)	Interior Iron-nickel core, rocky shell (details unknown)	Interior Iron-nickel core, rocky shell	Interior Iron-nickel core, rocky shell (details unknown)

Júpiter 4

Distância média até o Sol: $5.20 \text{ UA} = 7.78 \times 10^8 \text{ km}$ (máx: 5.46 UA , mín: 4.95 UA)

Excentricidade: 0.048

Velocidade média orbital: 13.1 km/s

Período de revolução sideral (ano): 11.86 anos terrestres

Período de rotação sideral: $9\text{h } 50\text{m } 28\text{s}$ (equatorial)
 $9\text{h } 55\text{m } 30\text{s}$ (polar = interno)

Inclinação do equador em relação à órbita: 3.12°

Inclinação da órbita em relação à eclíptica: 1.30°

Diâmetro: $142984 \text{ km} = 11.21$ diâmetros terrestres (equatorial)
 $133700 \text{ km} = 10.48$ diâmetros terrestres (polar)

Massa: $1.90 \times 10^{27} \text{ kg} = 318$ massas terrestres

Densidade média: $1330 \text{ kg/m}^3 = 0.241$ densidade terrestre

Velocidade de escape: 60.2 km/s

Gravidade na superfície: $2.36 g$

Albedo: 0.52

Temperatura média no topo das nuvens: $-108^\circ\text{C} = 165 \text{ K}$

Atmosfera (nr. de moléculas): $89.8\% \text{ H}_2$, $10.2\% \text{ He}$, traços de H_2O , CH_4 e NH_3



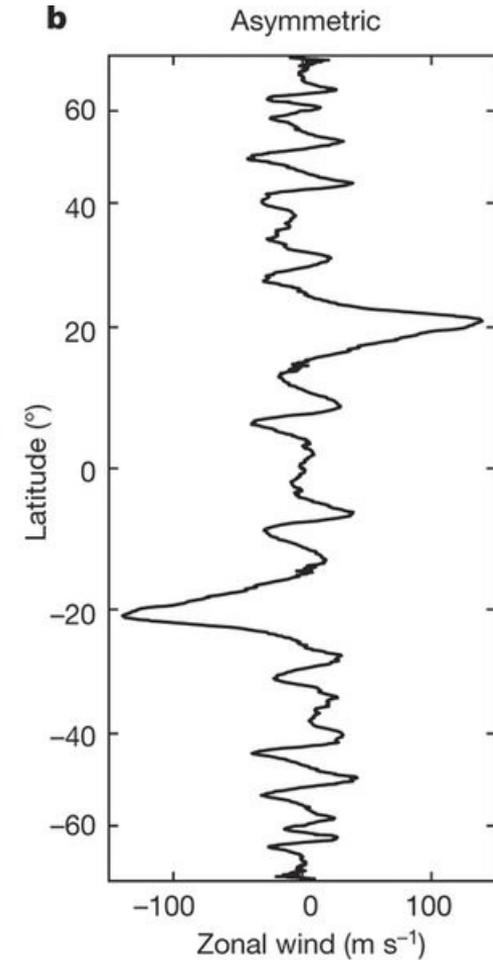
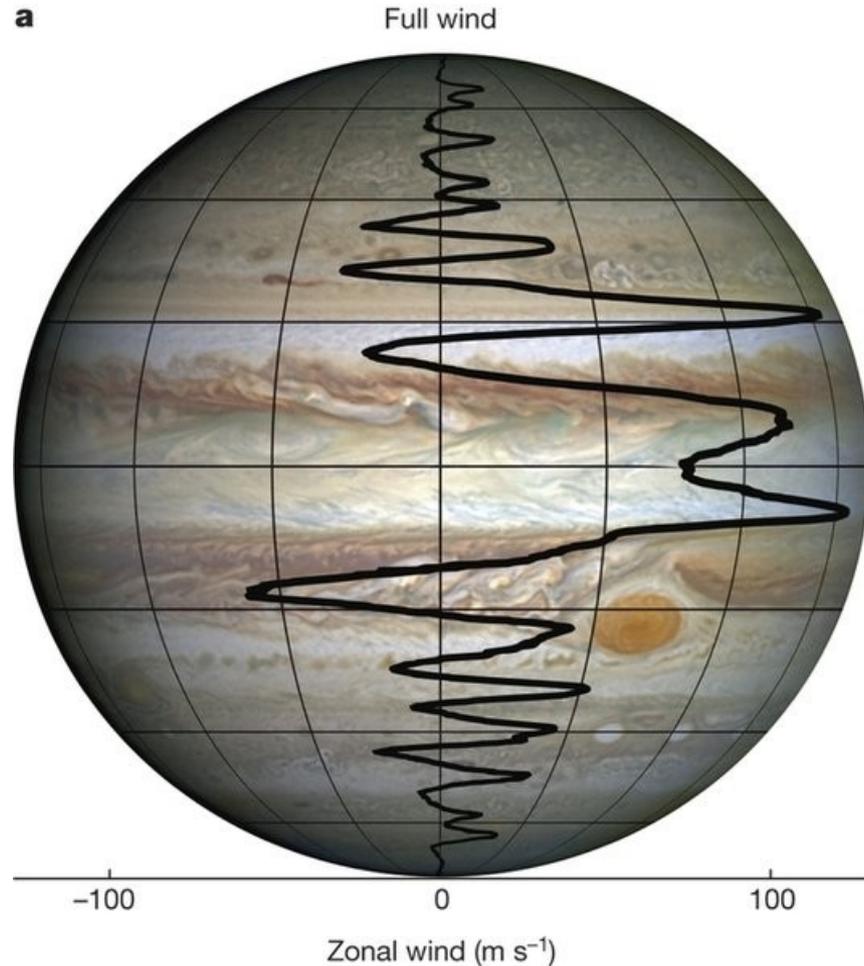
Júpiter 2

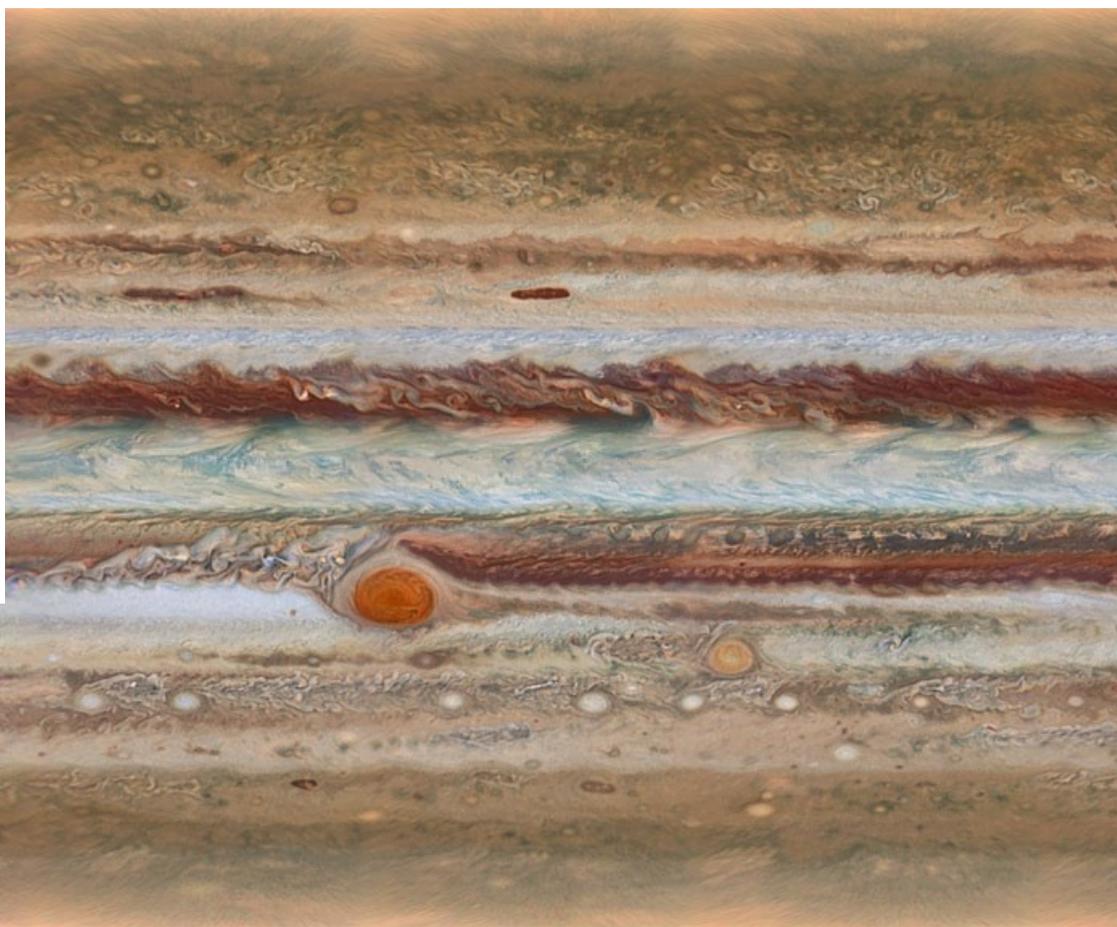
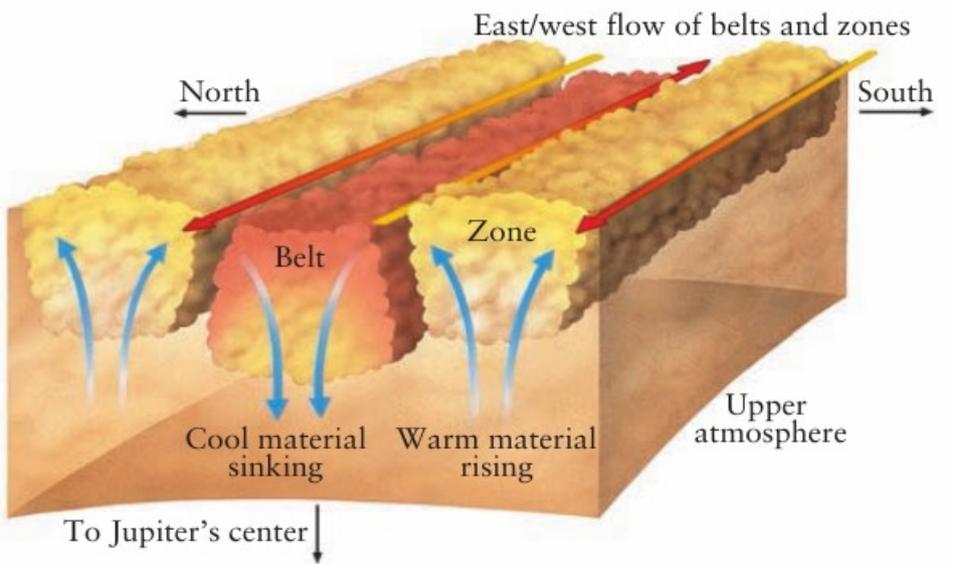
Júpiter emite $\sim 2\times$ mais energia do que recebe do Sol $\sim 7.5 \text{ W/m}^2$

Origem:

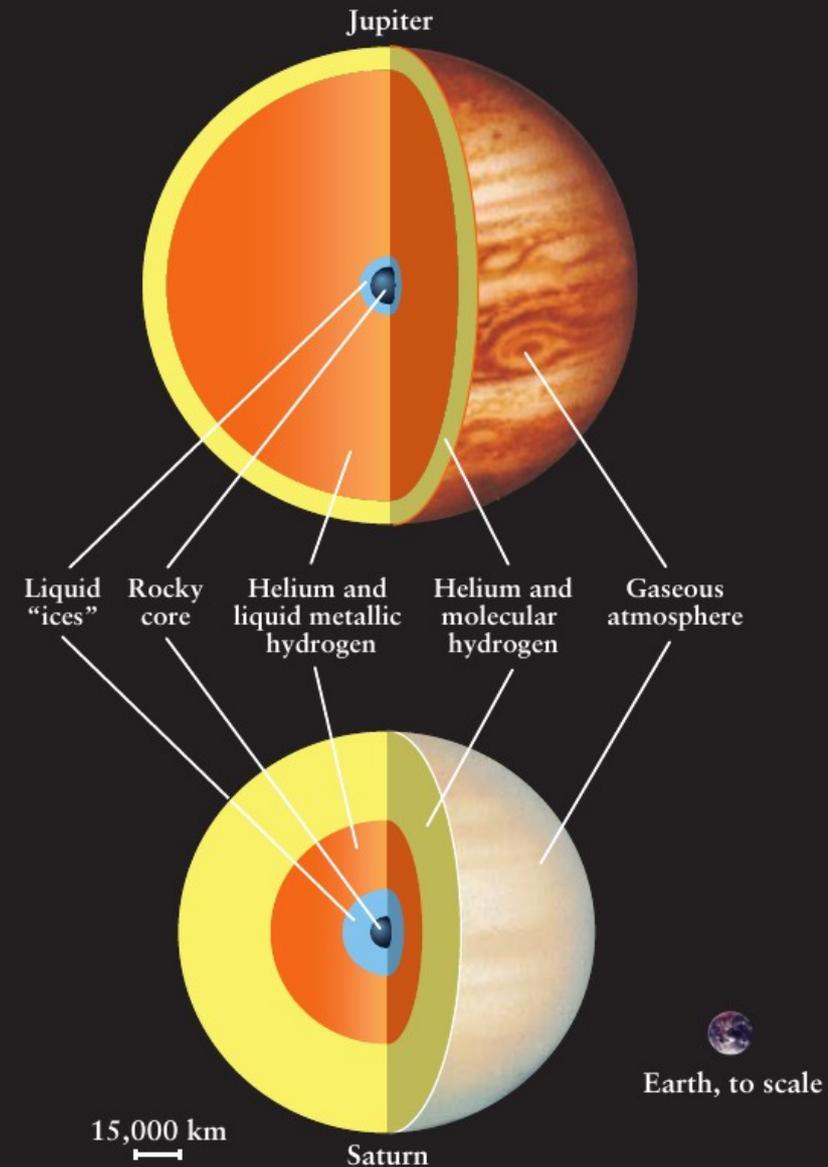
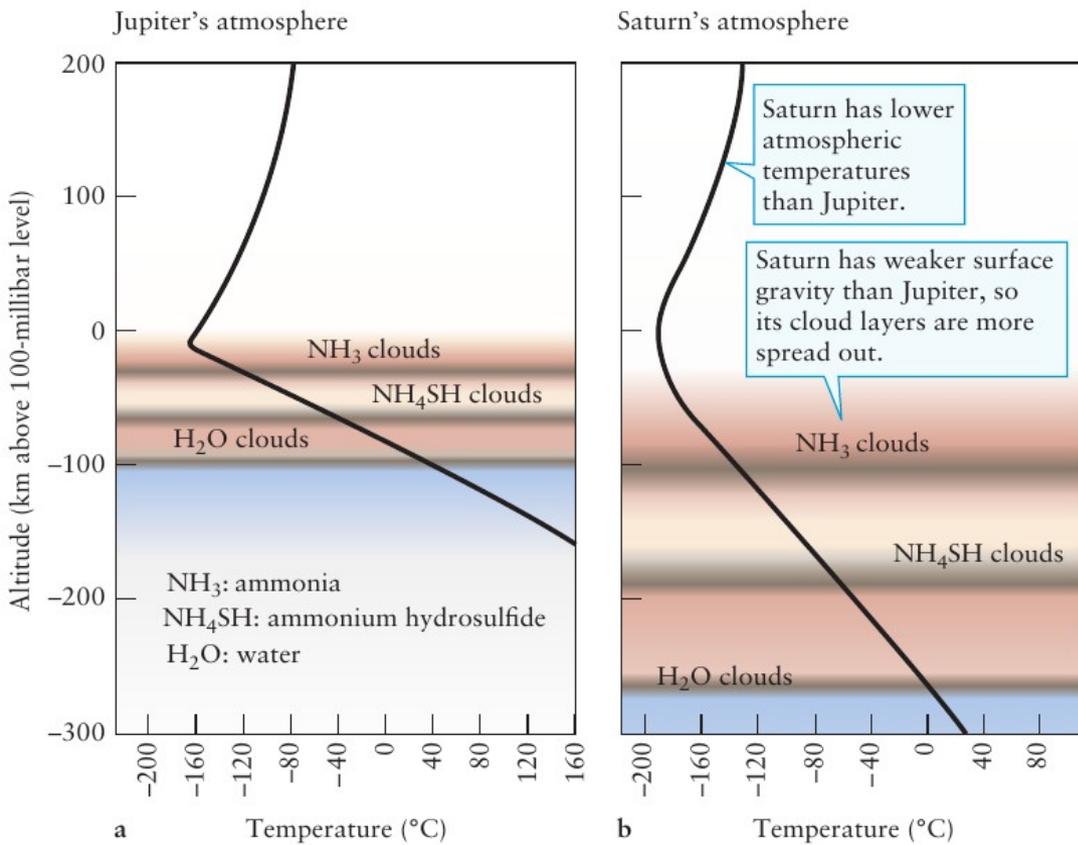
- a) Decaimento radiativo dos elementos em seu núcleo
- b) contração do gás ($\sim 10 \text{ cm/séc}$) (mecanismo de Kelvin-Helmholtz)

Com tanta energia, não é surpreendente que a atmosfera seja muito dinâmica com química complexa e tempestades longevas com ventos de $\sim 300 - 640 \text{ km/h}$





Ovais brancos: furacões/ciclones de temperaturas mais baixas e nuvens/névoas mais altas que a média.
Ovais marrons: furacões/ciclones de temperaturas mais altas e nuvens/névoas mais baixas que a média.
Grande mancha vermelha: de dimensões 25000×12000 km (2 Terras caberiam ali) e ventos de 430 km/h é uma tempestade que dura pelo menos 350 anos.



Estrutura e composição

71% H₂ , 24% He, 5% elementos pesados

Núcleo: $P \sim 7 \times 10^7$ atm, $T \sim 25000$ K (+ quente que a sup. Solar)

Matéria em condições extremas: fases exóticas?

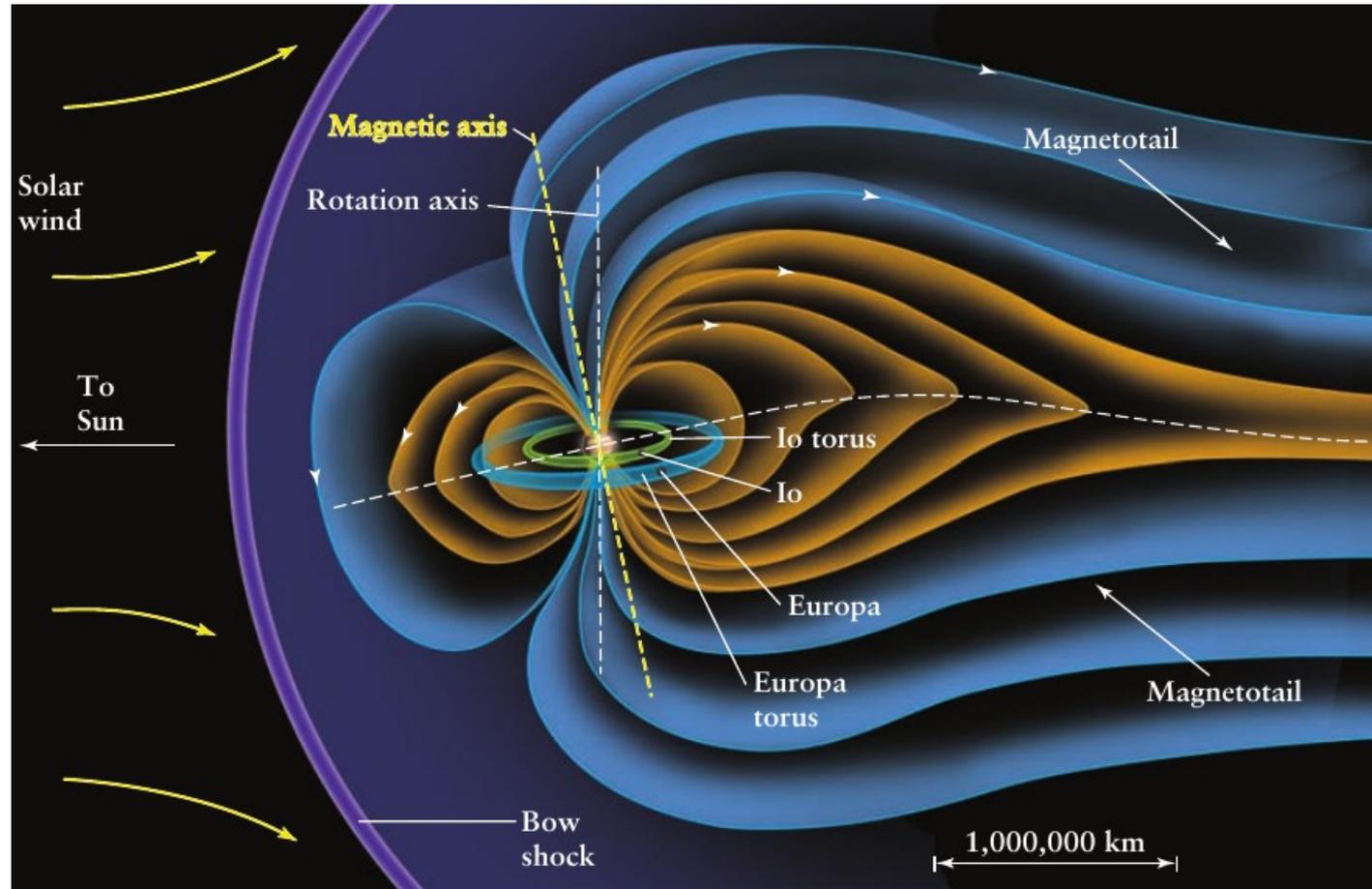
CH₈S (hidreto) a 2.5×10^6 atm são Super-Condutores em 15°C

Júpiter 2

Magnetosfera “gigante” com a cauda se aproximando da órbita de Saturno. (Se fosse visível, teria a área de 16 Luas se vista da Terra.)

Campo magnético na superfície é 14× maior que o da Terra.

A zona radiativa (em laranja) é análoga ao cinturão de Van Allen



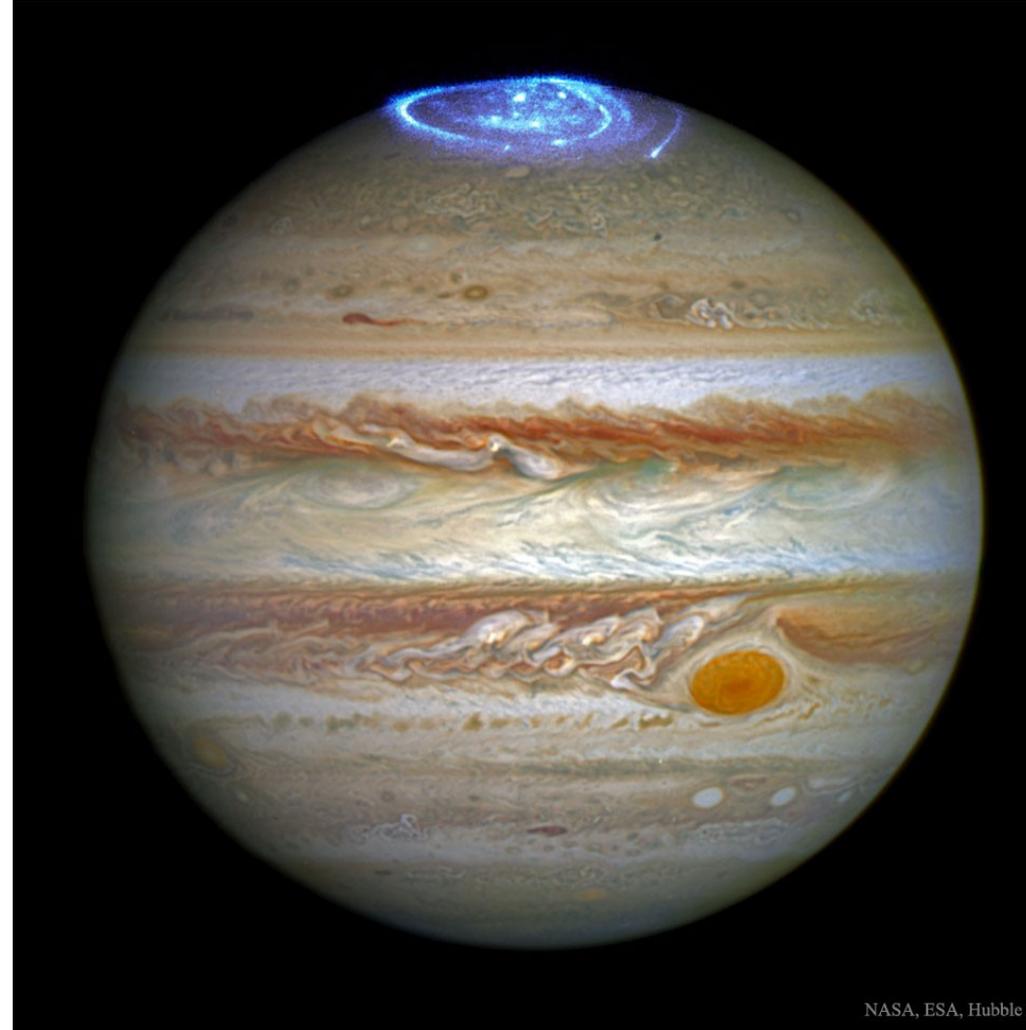
Júpiter 4

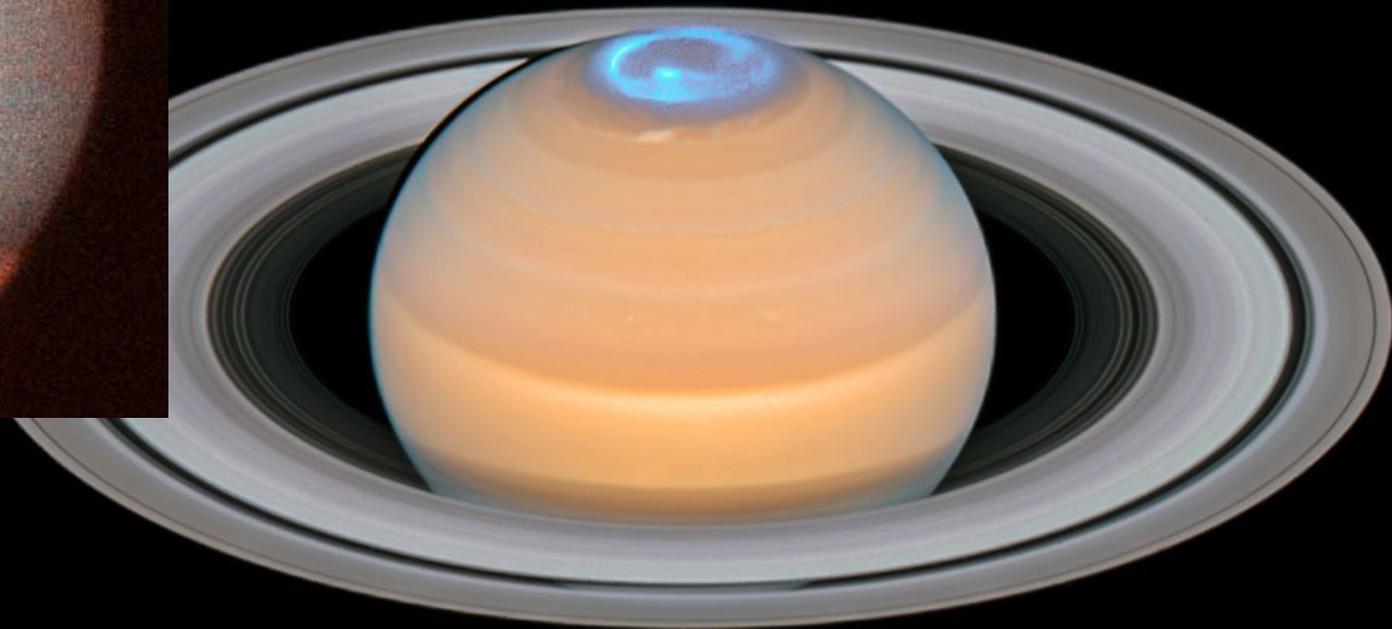
Auroras em Júpiter tem outras cores.
Ao lado, imagem combinando luz visível e UV.

Em Júpiter, as auroras são **permanentes**.

Observa-se que, como na Terra, relâmpagos também acontecem em Júpiter. Entretanto, eles são mais frequentes nos polos.

Uma hipótese para essa diferença é que a luz solar, que esquenta as nuvens do equador, diminui a diferença de temperatura entre a superfície e o interior (que é mais quente). O gradiente de Temperatura sendo maior nos polos explicaria a maior incidência de relâmpagos superficiais. Observou-se relâmpagos em Júpiter centenas de vezes mais potentes que os da Terra.





Auroras em Saturno, como em Júpiter, brilham no UV. Entretanto, não são permanentes mas duram dias.

Júpiter 4



Io



Europa



Ganymede

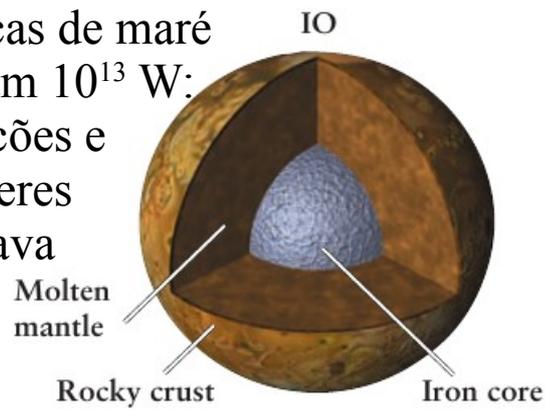


Callisto

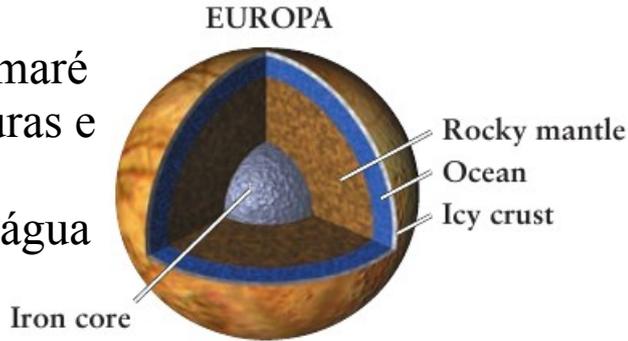
Júpiter possui 79 luas, 4 delas, as Galileanas, provavelmente se formaram junto com o planeta. As outras são planetesimais (<275 km em diâmetro) que foram capturadas posteriormente. (A maioria orbita retrogradamente.)

Júpiter também possui um conjunto de anéis fragmentos de pedras. Entretanto, são muito tênues quando comparados com os de Saturno.

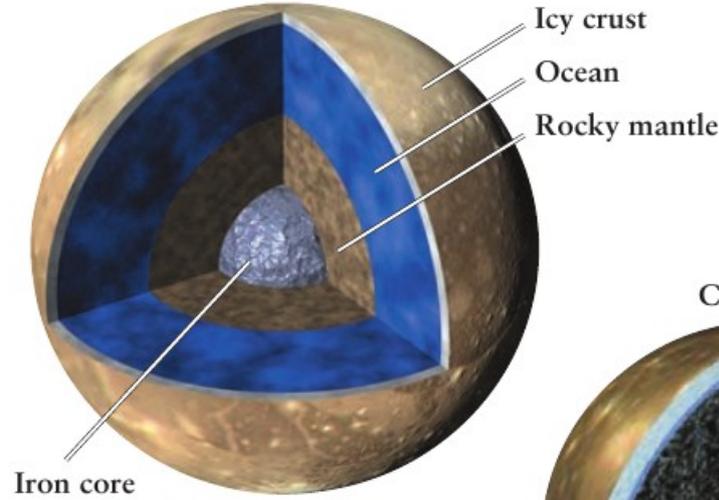
Forças de maré geram 10^{13} W: Vulcões e gêiseres de lava



Forças de maré criam fissuras e mantém o oceano de água líquida(?)



GANYMEDE



Campo magnético permanente fraco $\sim 2\% B_{\text{Terra}}$

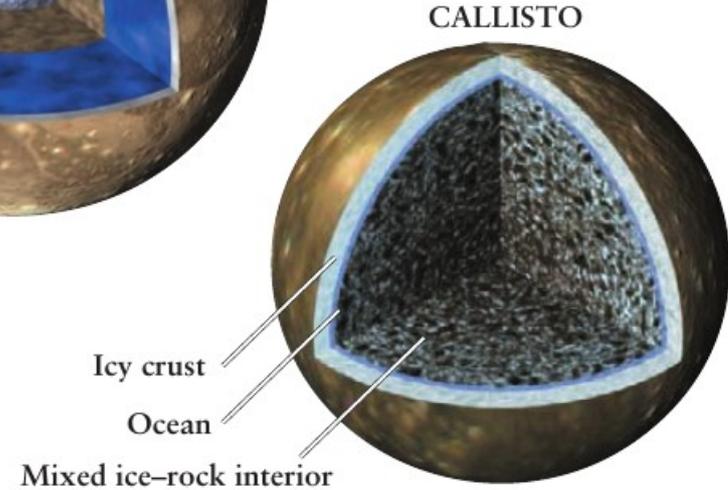


Figure 8-11 The Galilean Satellites The four Galilean satellites are shown here to the same scale. Io and Europa have diameters and densities comparable to our Moon and are composed primarily of rocky material. Ganymede and Callisto are roughly as big as Mercury, but their low average densities

indicate that each contains a thick layer of water and ice. The cross-sectional diagrams of the interiors of the four Galilean moons show the probable internal structures of the moons, based on their average densities and on information from the *Galileo* mission. (NASA and NASA/JPL)

	Mean distance from Jupiter (km)	Sidereal period (day)	Diameter (km)	Mass		Mean density (kg/m ³)
				(kg)	(Moon = 1)	
Io	421,600	1.77	3643	8.94×10^{22}	1.22	3528
Europa	670,900	3.55	3122	4.80×10^{22}	0.65	3013
Ganymede	1,070,000	7.16	5262	1.48×10^{23}	2.01	1942
Callisto	1,883,000	16.69	4820	1.08×10^{23}	1.47	1834
Mercury	—	—	4878	3.30×10^{23}	4.49	5430
Moon	—	—	3476	7.35×10^{22}	1.00	3340

Saturno ♄

Distância média até o Sol: $9.57 \text{ UA} = 1.43 \times 10^9 \text{ km}$ (máx: 10.1 UA , mín: 9.06 UA)

Excentricidade: 0.056

Velocidade média orbital: 9.64 km/s

Período de revolução sideral (ano): 29.4 anos terrestres

Período de rotação sideral: $10\text{h } 13\text{m } 59\text{s}$ (equatorial)

$10\text{h } 39\text{m } 25\text{s}$ (polar = interno)

Inclinação do equador em relação à órbita: 26.7°

Inclinação da órbita em relação à eclíptica: 2.48°

Diâmetro: $120536 \text{ km} = 9.45$ diâmetros terrestres (equatorial)

$108684 \text{ km} = 8.52$ diâmetros terrestres (polar)

Massa: $5.69 \times 10^{26} \text{ kg} = 95.2$ massas terrestres

Densidade média: $687 \text{ kg/m}^3 = 0.124$ densidade terrestre (menos denso que água)

Velocidade de escape: 35.5 km/s

Gravidade na superfície: $0.92 g$

Albedo: 0.46

Temperatura média no topo das nuvens: $-180^\circ\text{C} = 93 \text{ K}$

Atmosfera (nr. de moléculas): $96.3\% \text{ H}_2$, $3.3\% \text{ He}$, $0.4\% \text{ CH}_4$, traços de H_2O e NH_3

Saturno ♄

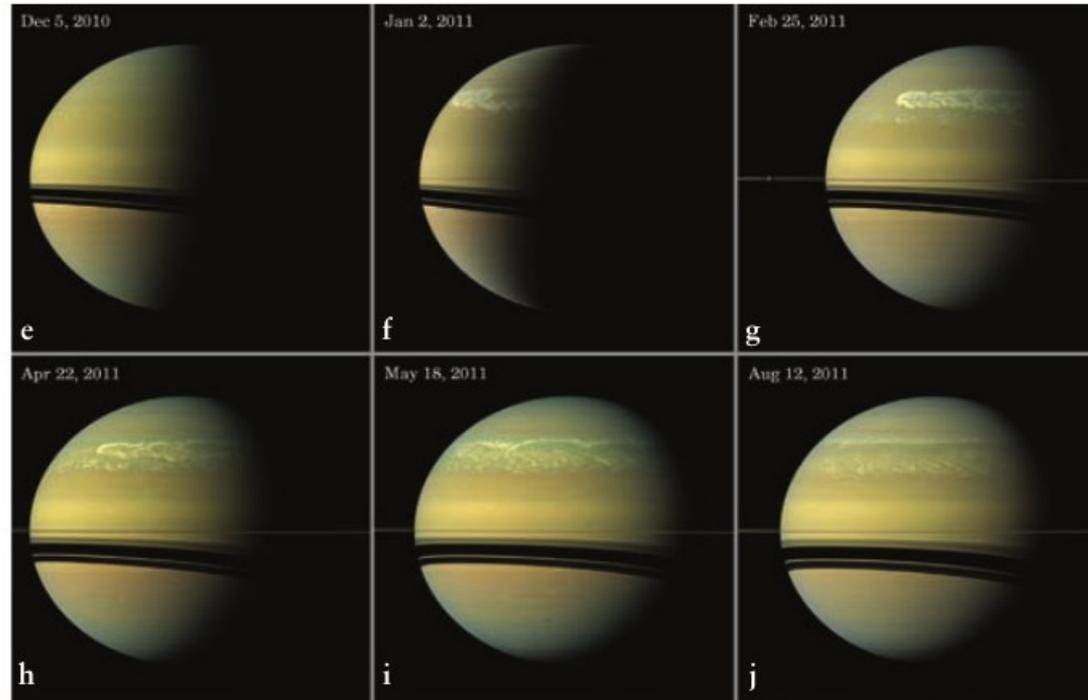
Saturno também gera energia. Entretanto, menos do que Júpiter e por outro mecanismo (chuva de Hélio).

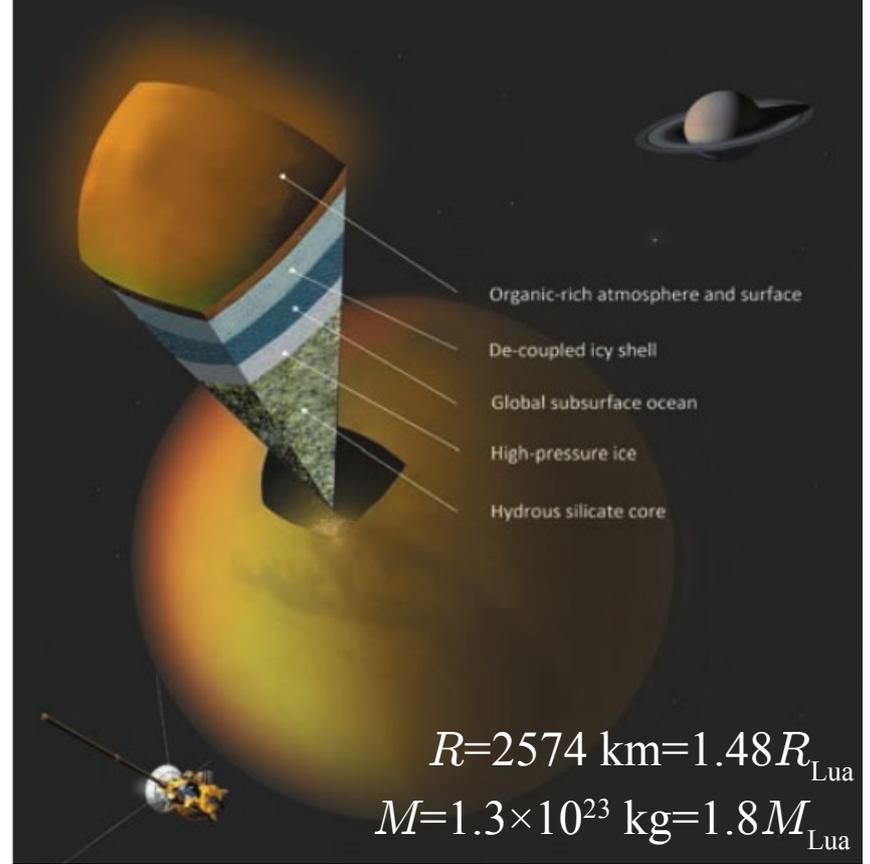
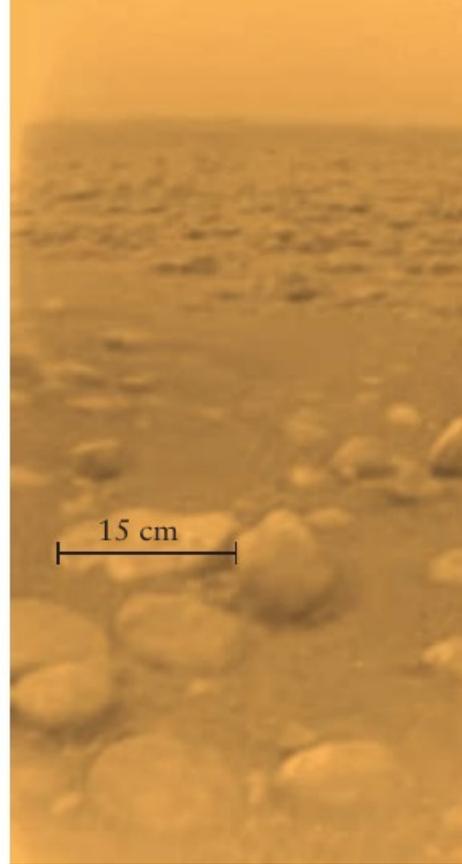
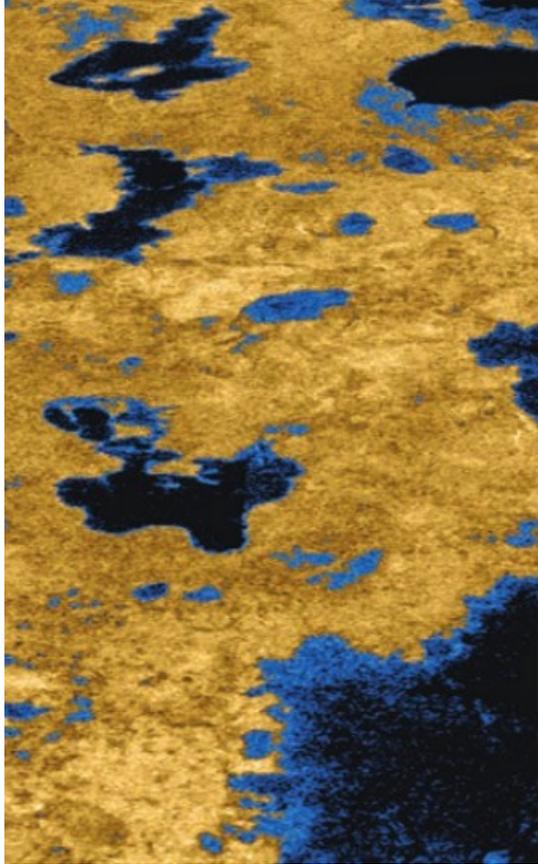
No equador, os ventos podem chegar até 1600 km/h.

Tempestades globais também ocorrem como mostra a figura ao lado.

Possui um sistema impressionante de anéis com várias lacunas e pequenas luas. A extensão é de 380 mil km (do mais interno ao mais externo) \times 10 m. (Os mais densos se estendem de 7 mil a 80 mil km acima da superfície.) São feitos de partículas de gelo (>99%) e rocha de dimensões de micrômetros até \sim 10 metros.

A massa dos anéis é estimada em $1.54(\pm 0.49) \times 10^{19}$ kg. 2 hipóteses de sua origem seriam que (i) é uma lua destroçada e (ii) é o resto da formação planetária.





Saturno possui 82 luas fora dos anéis. Apenas 13 têm diâmetros $> 50 \text{ km}$. Apenas 24 são regulares (órbitas não muito inclinadas e não-retrógradas). Titã, a segunda maior lua do sistema solar após Ganimedes, possui uma espessa atmosfera ($\sim 4\times$ mais densa que a da Terra, $P \sim 1.5 \text{ atm}$, $93.7 \text{ K} = -179.5^\circ\text{C}$). Em sua superfície há dunas, rios, lagos e oceanos (provavelmente de metano e etano líquido). O ciclo de metano deve ser similar ao da água na Terra, incluindo chuvas.

Urano Υ

Distância média até o Sol: 19.2 UA = 2.87×10^9 km (máx: 20.0 UA, mín: 18.4 UA)

Excentricidade: 0.047

Velocidade média orbital: 6.83 km/s

Período de revolução sideral (ano): 84.1 anos terrestres

Período de rotação sideral: 17h 14m 24s (**retrógrada**)

Inclinação do equador em relação à órbita: 97.9°

Inclinação da órbita em relação à eclíptica: 0.77°

Diâmetro: 57118 km = 4.01 diâmetros terrestres (equatorial)
49956 km = 3.94 diâmetros terrestres (polar)

Massa: 8.68×10^{25} kg = 14.5 massas terrestres

Densidade média: 1318 kg/m^3

Velocidade de escape: 21.3 km/s

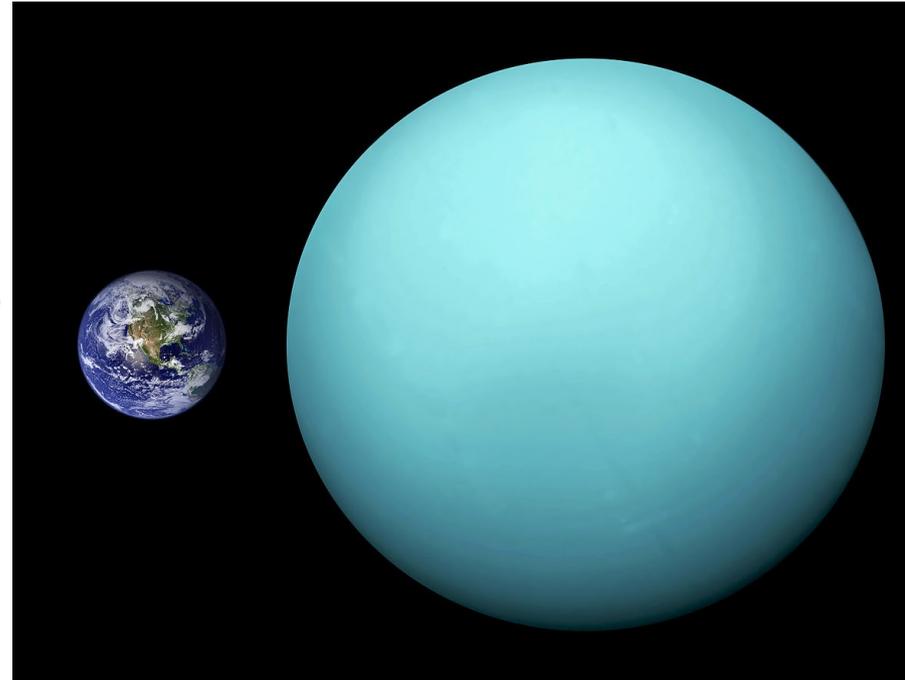
Gravidade na superfície: 0.90 g

Albedo: 0.56

Temperatura média no topo das nuvens: $-224^\circ\text{C} = 49 \text{ K}$

Atmosfera (nr. de moléculas): 82.5% H_2 , 15.2% He, 2.3% CH_4

Descoberta/reconhecimento em 1781 (W. Herschel) com o uso de telescópio (magnitude 5.83 – 6.03)



Netuno ♆

Distância média até o Sol: $30.1 \text{ UA} = 4.50 \times 10^9 \text{ km} = 4.17 \text{ horas-luz}$ (máx: 30.4 UA , mín: 29.8 UA)

Excentricidade: 0.009

Velocidade média orbital: 5.5 km/s

Período de revolução sideral (ano): $164.8 \text{ anos terrestres}$

Período de rotação sideral: $16\text{h } 6\text{m } 36\text{s}$

Inclinação do equador em relação à órbita: 29.6°

Inclinação da órbita em relação à eclíptica: 1.77°

Diâmetro: $49528 \text{ km} = 3.88 \text{ diâmetros terrestres (equatorial)}$

$48682 \text{ km} = 3.83 \text{ diâmetros terrestres (polar)}$

Massa: $1.024 \times 10^{26} \text{ kg} = 17.1 \text{ massas terrestres}$

Densidade média: 1638 kg/m^3

Velocidade de escape: 23.5 km/s

Gravidade na superfície: $1.1 g$

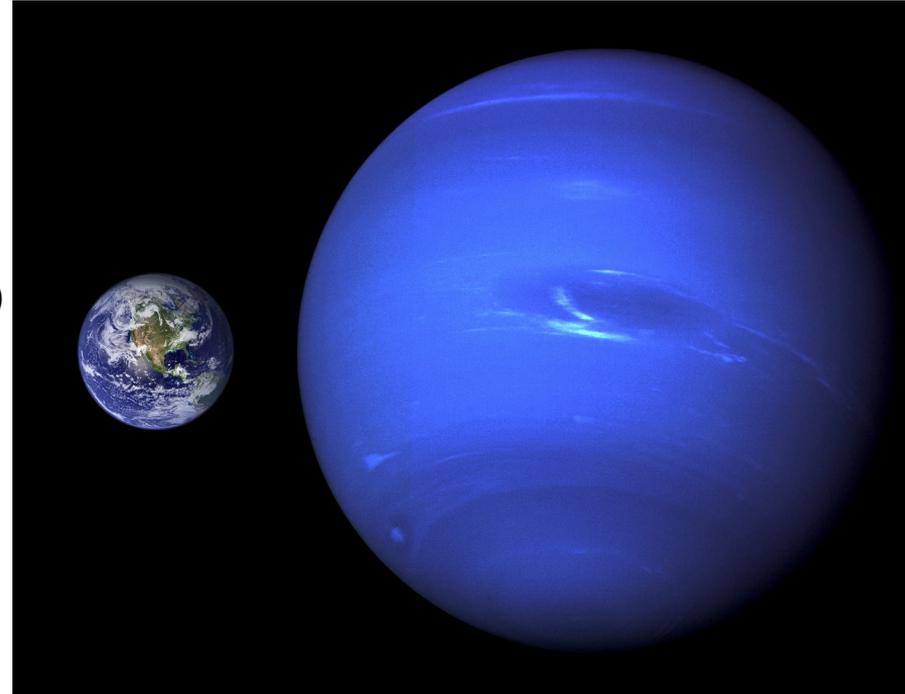
Albedo: 0.41

Temperatura média no topo das nuvens: $-218^\circ\text{C} = 55 \text{ K}$

Atmosfera (nr. de moléculas): $79\% \text{ H}_2$, $18\% \text{ He}$, $3\% \text{ CH}_4$

Observação: Galileu (confundiu com uma estrela). Hipótese (perturbações em Urano): Bouvard.

Adam/Le Verrier: [cálculos](#). Observação (1846): Galle (magnitude $7.67 - 8.00$)



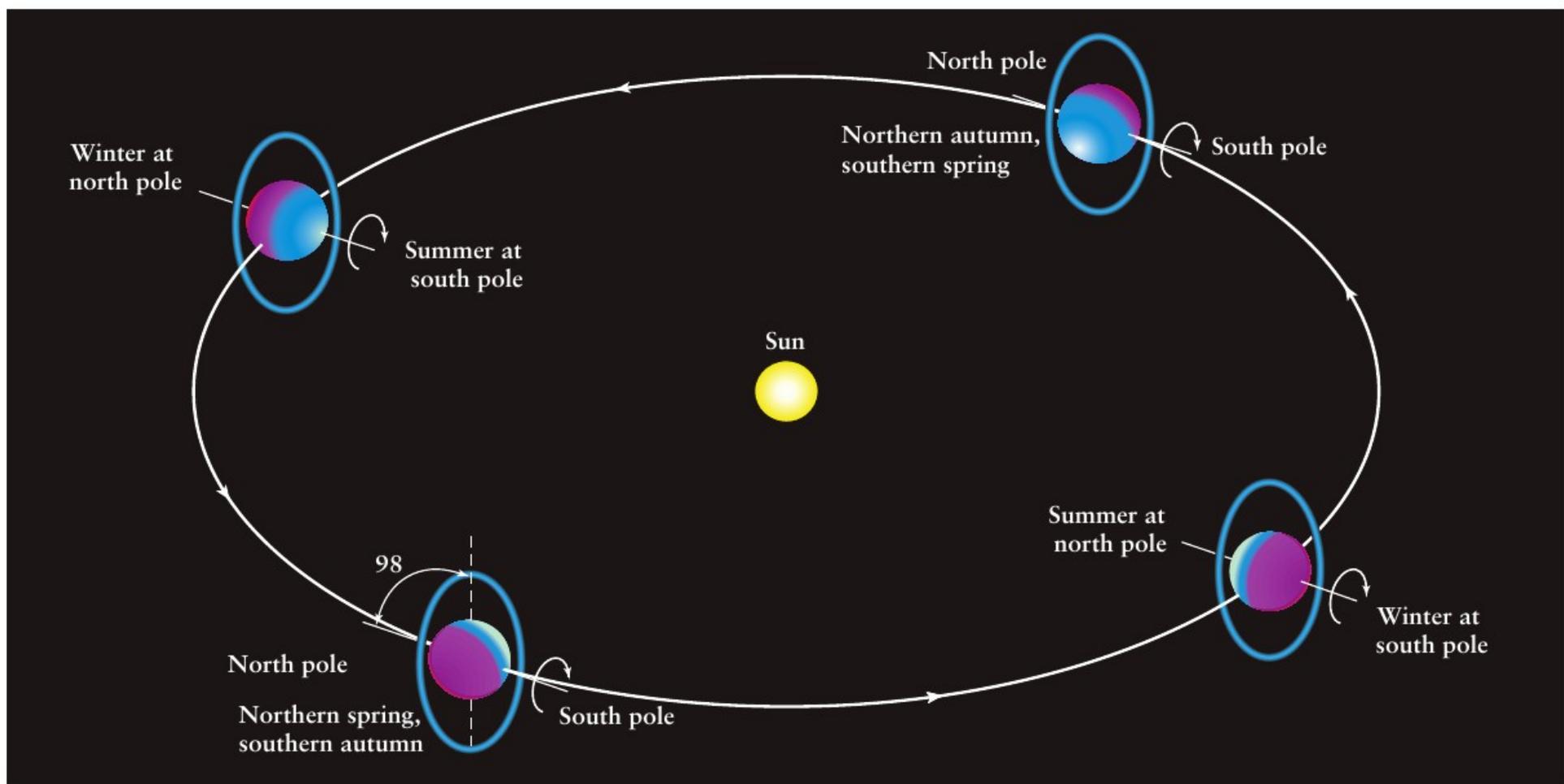
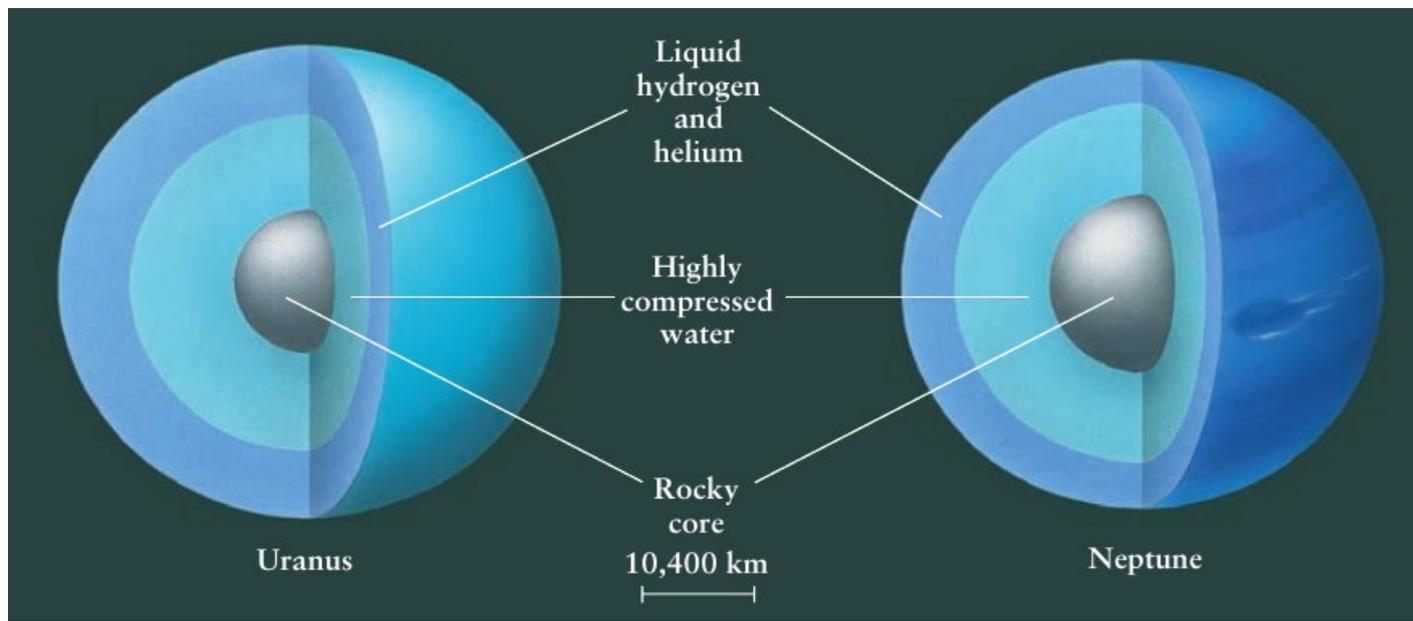


FIGURE 8-35 Exaggerated Seasons on Uranus

Uranus's axis of rotation is tilted so steeply that it lies nearly in the plane of its orbit. Seasonal changes on Uranus are thus greatly exaggerated compared to those we experience. For example, during midsummer at Uranus's south pole,

the Sun appears nearly overhead for many Earth years, during which time the planet's northern regions are subjected to a long, continuous winter night. Half an orbit later, the seasons are reversed.

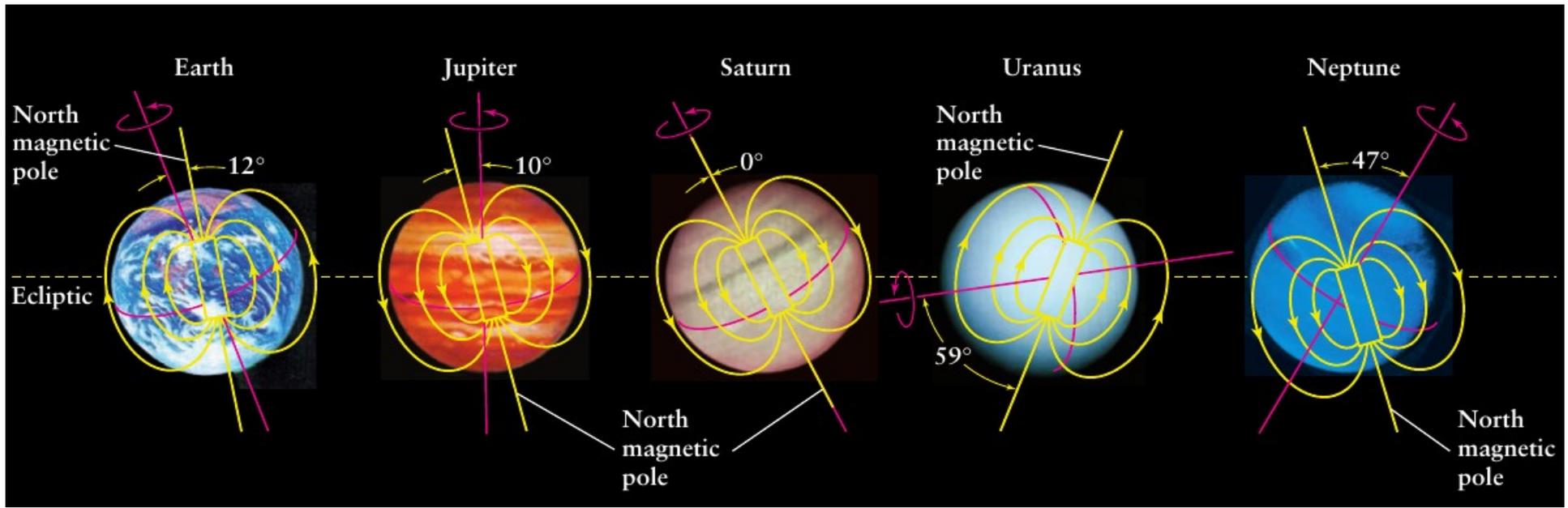


Urano e Netuno são muito similares. Em ambos, água líquida é uma parte considerável de sua massa e, por isso, são chamados de Gigantes de Gelo.

Ambos possuem anéis tênues e dezenas de luas (27 e 14, respectivamente).

A maioria das luas de Urano, assim como seus anéis, orbitam no plano do equador. Como isso aconteceu? Eles devem ter sido forçados pelas forças de marés.

Netuno tem muitas luas capturadas. Quase todas têm formas irregulares e órbitas muito elípticas. Tritão, sua maior lua, tem a órbita mais circular do sistema solar, $e=0.000016$. Entretanto, é retrógrada e, por isso, acredita-se que foi capturada. Está em rota de colisão com o planeta e será destruída quando atingir o limite de Roche em ~ 250 milhões de anos. Um novo sistema de anéis se formará a partir desses destroços.



Acredita-se que os campos magnéticos em Júpiter e Saturno são gerados por correntes de convecção na camada de hidrogênio metálico.

O que geraria os campos magnéticos de Urano e Netuno?

Esses planetas não tem amônia em suas atmosferas. Acredita-se que ela está absorvida na camada de água líquida porque amônia se dissolve muito facilmente em água. Essa molécula ionizada daria origem às correntes elétricas e, daí, o efeito de dínamo gerador de campos magnéticos.

Alguns números do Sistema Solar

Planeta	Distância média ao Sol (UA)	Período (anos)	Diâmetro (km)	Massa (M_{\oplus})	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Densidade (g/cm^3)
Mercúrio	0.3871	0.24084	4,878	0.055	250	5.4
Vênus	0.7233	0.61515	12,104	0.82	447	5.3
Terra	1	1	12,756	1	22	5.5
Marte	1.5237	1.88080	6,794	0.107	-70	3.9
Júpiter	5.2028	11.8670	142,800	317.8	-150	1.3
Saturno	9.5388	29.4610	120,540	94.3	-180	0.7
Urano	19.180	84.0130	51,200	14.6	-224	1.2
Netuno	30.061	164.793	49,500	17.2	-218	1.6
Plutão (anão)	39.440	247.700	2,200	0.0025	-226 ~ -240	1.9

