

Sistema Solar Exoplanetas

PARTE 1



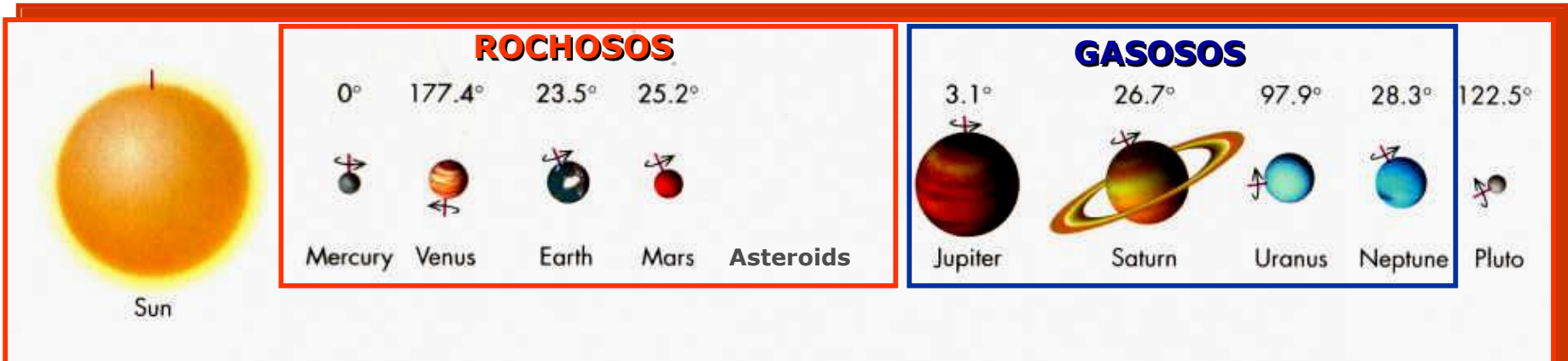
solarsystem.nasa.gov

Conceitos Básicos no Ensino de Astronomia - MPA5001

Enos Picazzio - IAGUSP

Notas de aula. Não é autorizada reprodução total ou parcial deste material para outras finalidades

Planetas - classificação



* valores normalizados para a Terra

Telúricos ou Terrestres

Jovianos ou Gigantes

	<i>Mercúrio</i>	<i>Vênus</i>	<i>Terra</i>	<i>Marte</i>	<i>Júpiter</i>	<i>Saturno</i>	<i>Urano</i>	<i>Netuno</i>
<i>Raio*</i>	0,38	0,95	1	0,53	11,21	9,45	4	3,88
<i>Massa*</i>	0,055	0,814	1	0,104	317,7	99,66	14,53	17,06
<i>Densid.</i>	5,4	5,2	5,5	3,9	1,3	0,7	1,3	1,6
<i>Atmosf.</i>		CO ₂ (96) N(3)	N(78) O(21)	CO ₂ (95) N(3)	H(73) He(20)	H(78) He(20)	H,He(15) H ₂ O,CH ₄ NH ₃ (60)	H,He(10) H ₂ O,CH ₄ NH ₃ (60)
<i>Satélites</i>			1	2	63	56	27	13
<i>Distânc*.</i>	0,39	0,72	1	1,52	5,2	9,55	19,19	30,11

Os parâmetros físicos dos planetas permitem dividi-los em dois grupos básicos bem distintos.

Planetas- anões



Largest known trans-Neptunian objects (TNOs)



Orbital attributes of dwarf planets^[34]

Name	Region of Solar System	Orbital radius (AU)	Orbital period (years)	Mean orbital speed (km/s)	Inclination to ecliptic (°)	Orbital eccentricity	Planetary discriminant
Ceres	Asteroid belt	2.77	4.60	17.882	10.59	0.080	0.33
Pluto	Kuiper belt	39.48	248.09	4.666	17.14	0.249	0.077
Haumea	Kuiper belt	43.34	285.4	4.484	28.19	0.189	?
Makemake	Kuiper belt	45.79	309.9	4.419	28.96	0.159	?
Eris	Scattered disc	67.67	557	3.436	44.19	0.442	0.10

Physical attributes of dwarf planets

Name	Equatorial diameter relative to the Moon	Equatorial diameter (km)	Mass relative to the Moon	Mass ($\times 10^{21}$ kg)	Density ($\times 10^3$ g/m ³)	Surface gravity (m/s ²)	Escape velocity (km/s)	Axial inclination	Rotation period (days)	Moons	Surface temp. (K)	Atmosphere
Ceres ^{[35][36]}	28.0%	974.6 $\pm$ 3.2	1.3%	0.95	2.08	0.27	0.51	~3°	0.38	0	167	none
Pluto ^{[37][38]}	68.7%	2306 $\pm$ 30	17.8%	13.05	2.0	0.58	1.2	119.59°	-6.39	3	44	transient
Haumea ^{[39][40]}	33.1%	1150 $\pm$ ²⁵⁰ ₁₀₀	5.7%	4.2 $\pm$ 0.1	2.6–3.3	~0.44	~0.84			2	32 $\pm$ 3	?
Makemake ^{[39][41]}	43.2%	1500 $\pm$ ⁴⁰⁰ ₂₀₀	~5%?	~4?	~2?	~0.5	~0.8			0	~30	transient?
Eris ^{[42][43]}	74.8%	2400 $\pm$ 100	22.7%	16.7	2.3	~0.8	1.3		~0.3	1	42	transient?

Planetary discriminants^[28]

Body	Mass (M_E^*)	Λ/Λ_E^{**}	μ^{***}
Mercury	0.055	0.012 6	9.1×10^4
Venus	0.815	1.08	1.35×10^6
Earth	1.00	1.00	1.7×10^6
Mars	0.107	0.006 1	1.8×10^5
Ceres	0.000 15	8.7×10^{-9}	0.33
Jupiter	317.7	8 510	6.25×10^5
Saturn	95.2	308	1.9×10^5
Uranus	14.5	2.51	2.9×10^4
Neptune	17.1	1.79	2.4×10^4
Pluto	0.002 2	1.95×10^{-8}	0.077
Haumea	0.000 67	1.72×10^{-9}	0.02
Makemake	0.000 67	1.45×10^{-9}	0.02 ^[29]
Eris	0.002 8	3.5×10^{-8}	0.10

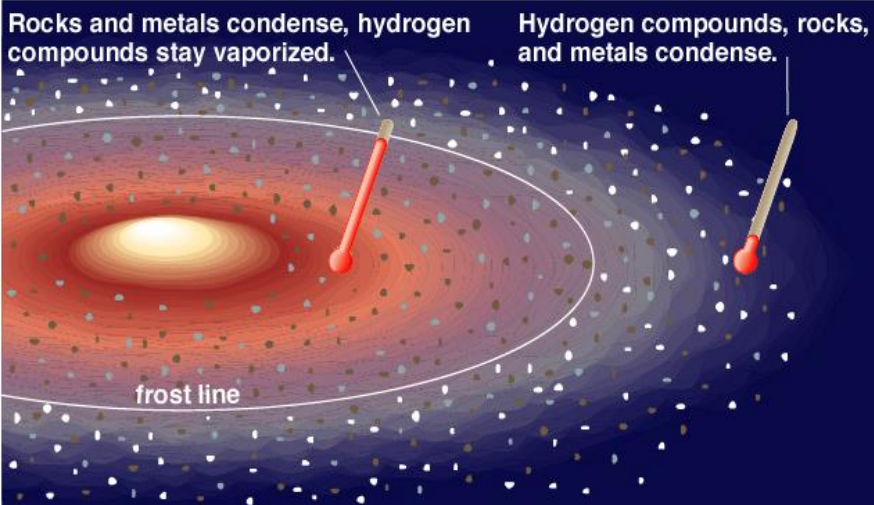
* M_E in Earth masses.

** $\Lambda/\Lambda_E = M/P \times P_E/M_E^2$.

*** $\mu = M/m$, where M is the mass of the body,

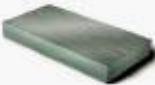
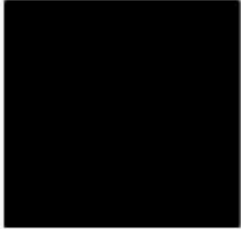
and m is the aggregate mass of all the other bodies that share its orbital zone.

Química primordial



Copyright © Addison Wesley

Matéria da Nebulosa S

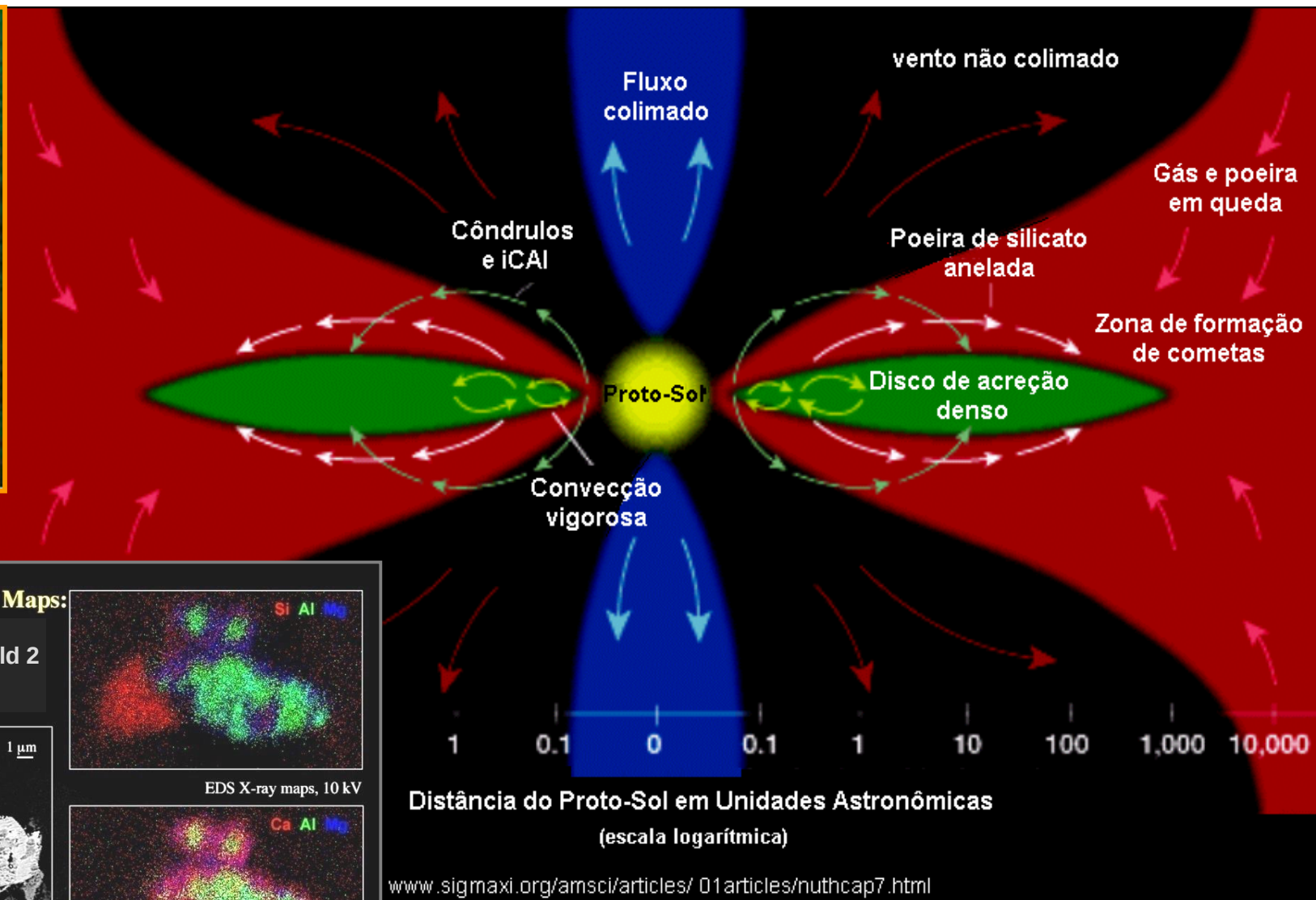
	Metals	Rocks	Hydrogen Compounds	Light Gases
Examples	 iron, nickel, aluminum	 silicates	 water (H ₂ O) methane (CH ₄) ammonia (NH ₃)	 hydrogen, helium
Typical Condensation Temperature	1,000– 1,600 K	500– 1,300 K	<150 K	(do not condense in nebula)
Relative Abundance (by mass)	▪ (0.2%)	▪ (0.4%)	■ (1.4%)	 (98%)

Copyright © Addison Wesley

Our Solar System and Its Origin, Haosheng Lin

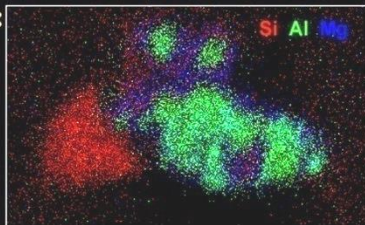
Acreção e Reprocessamento

Imagem de uma estrela em formação

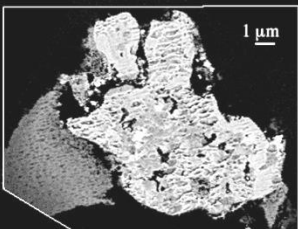
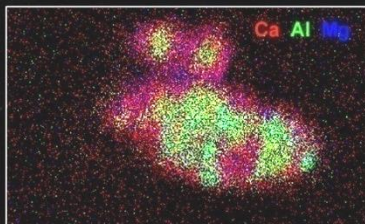


SEM-EDS X-ray Maps:

Cometa 81P/Wild 2 Stardust



EDS X-ray maps, 10 kV



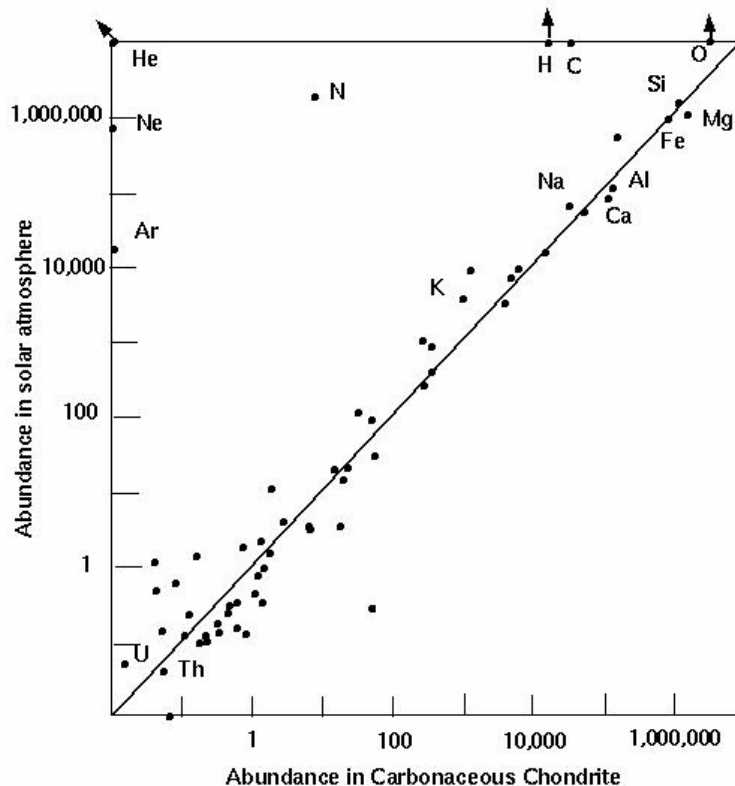
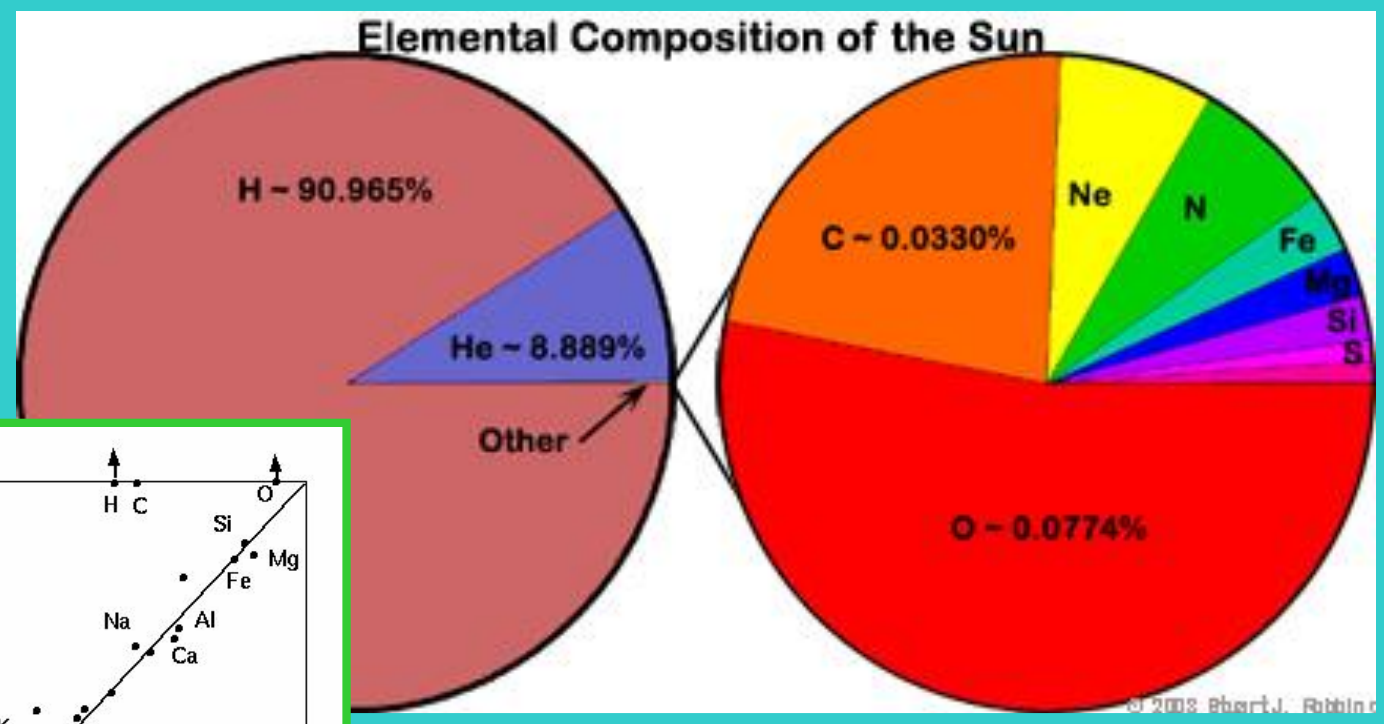
BSE image, 4.0 kV, high contrast



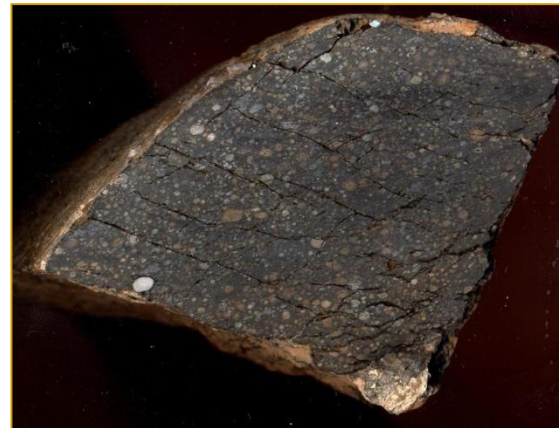
Constituição da poeira do cometa Wild 2 corrobora este mecanismo

Composição química predominante

A composição química relativa entre os elementos químicos mais pesados é preservada entre s diferentes objetos do Sistema Solar.



Meteorito Carbonáceo



Todos os objetos se formaram de uma mesma nuvem primordial.

Estrutura Interna – Equacionamento

Pressão, densidade e temperatura - determinam o estado da matéria.

Equações de estado relacionam esses parâmetros:

Equilíbrio hidrostático:

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM(r)}{r^2} \rho(r)$$

Conservação da massa:

$$\frac{dM(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)$$

Equação de gás:

$$P = nkT = \frac{\mathfrak{R}T}{\mu} \rho$$

P- pressão, G- cte. universal de gravitação, M- massa, r- raio, ρ - densidade, n- número de mols ($n=N/N_A$ com N- no. moléculas e N_A - no. de Avogadro), k- cte. de Boltzman, $\mathfrak{R}$ - cte. dos gases, μ - peso molecular médio, T- temperatura

Para rocha as equações de estado são bem mais complicadas e imprecisas. Materiais rochosos de diferentes *composições químicas* e *fases* (sólido, líquido) têm diferentes equações de estado (em contraste com o caso do interior estelar, onde o equacionamento é mais simples).

Parâmetros adicionais: *Precessão* e *momento de inércia* (distribuição de massa), *aquecimento* (acrecção, diferenciação e decaimento radioativo), *fluxo de energia* (radiação, condução, convecção).

Quadro Comparativo

COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Mercúrio



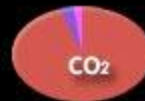
Vênus



Terra



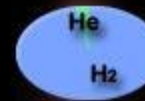
Marte



Júpiter



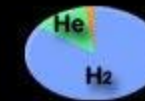
Saturno



Urano



Netuno



atmosphere

visible 'surface'



vertical scale
is adjusted
for each
planet



Mercury, Venus and Mars have solid metal cores surrounded by rocky mantels similar to Earth's, but lack any active tectonic plate activity of the crust as seen on Earth.

solid Fe

solid Fe

crust
Si, Al, O,
Ca, Mg

Si, Al
O, Ca, Mg
Fe

S, O
molten Fe

Ni
solid Fe

solid Fe

H2 & He
gas

liquid H2

'metallic
liquid' H

metal & rock
solid core

H2 & He
gas

liquid H2

'metallic
liquid' H

ice H2O
NH3, CH4

H2, He,
CH4 gas

liquid
H2, He, CH4

increasing
ice CH4
at lower
depths

'metallic
liquid' H

H2, He,
CH4 gas

liquid H2O,
CH4, NH3

ice H2O
CH4, NH3

metal & rock
solid core

planet center

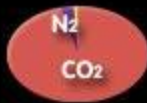
Quadro Comparativo

COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Mercúrio



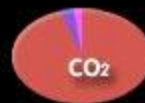
Vênus



Terra



Marte



Júpiter



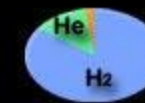
Saturno



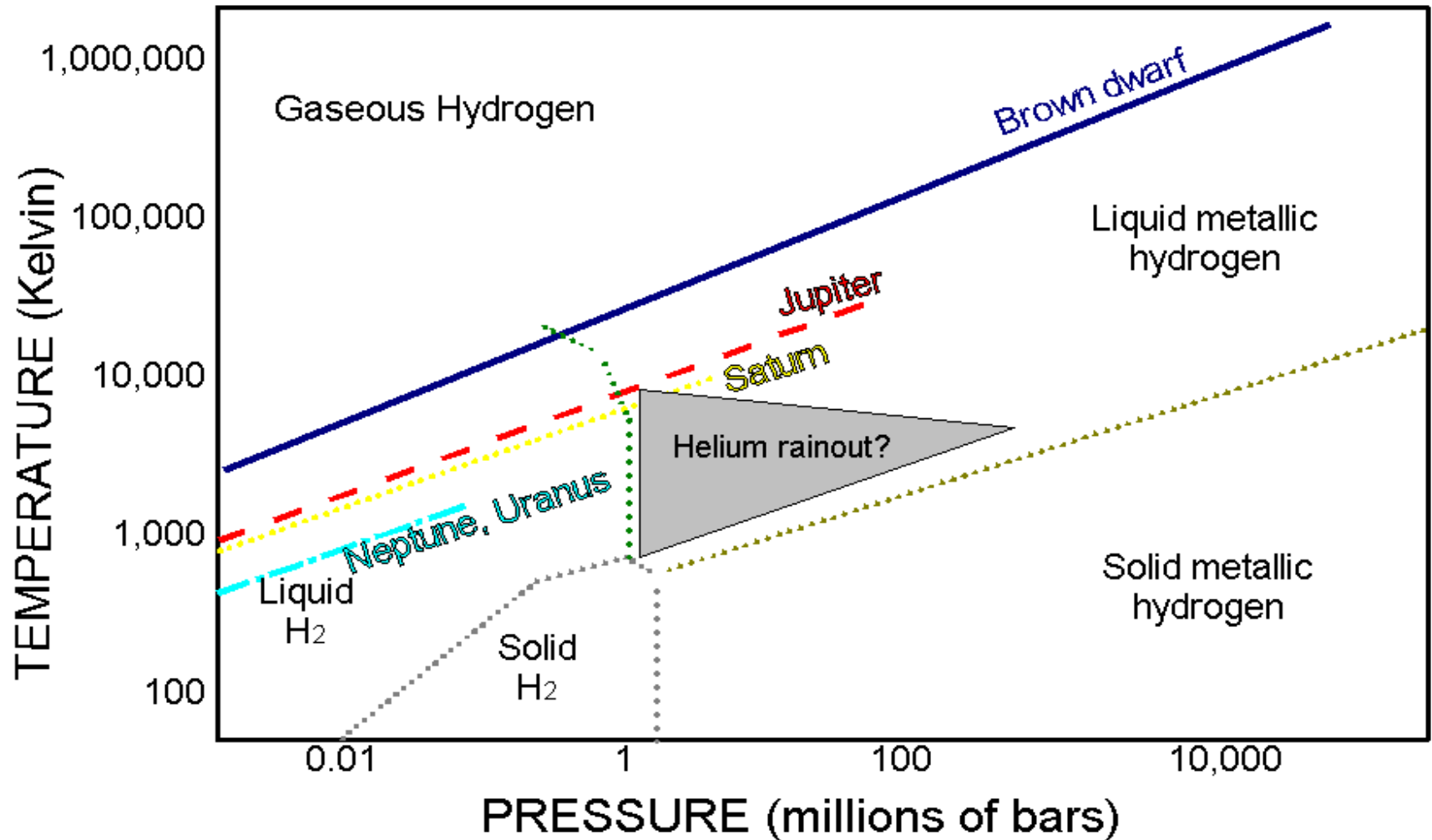
Urano



Netuno

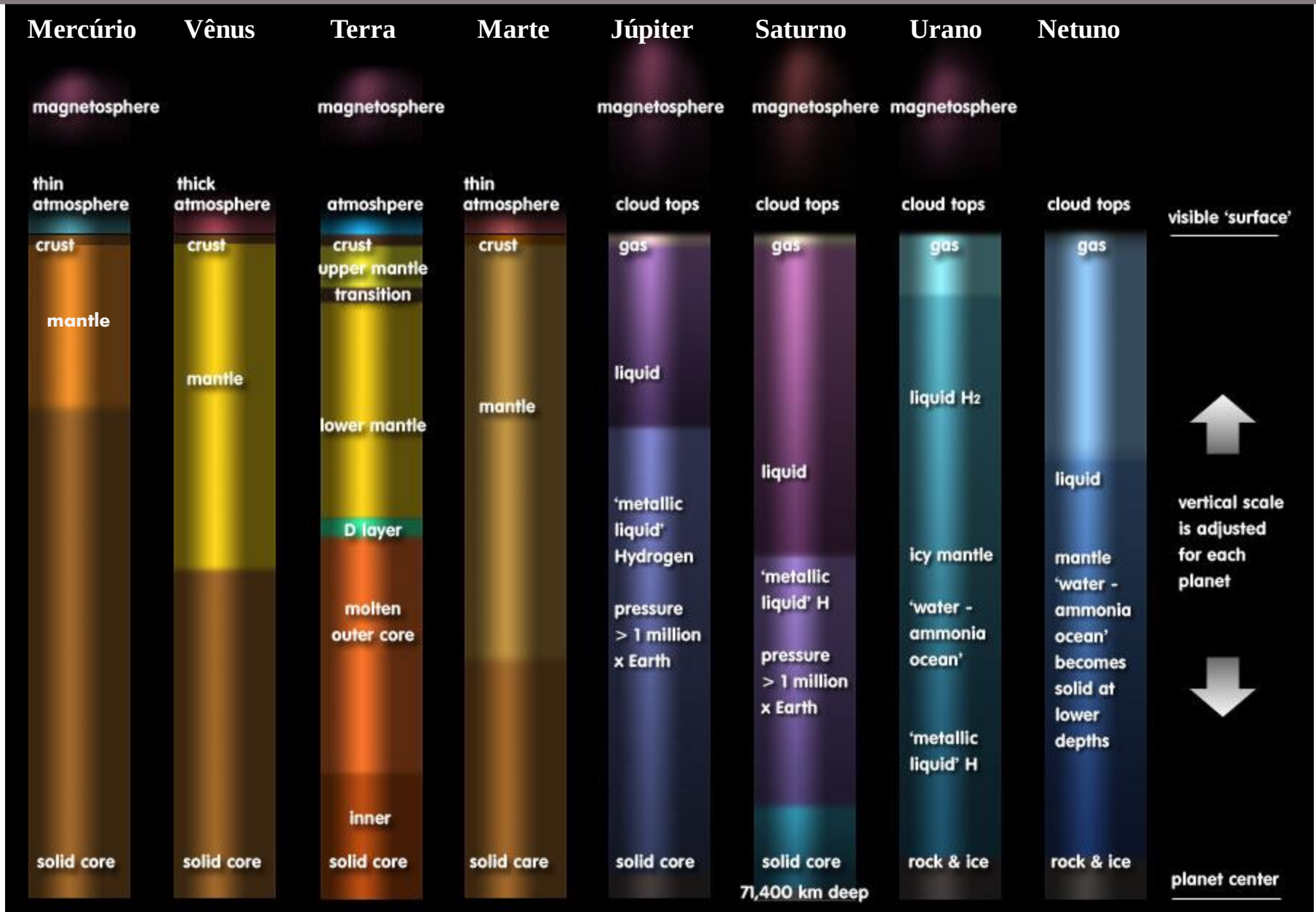


atmosphere



Quadro Comparativo

ESTRUTURA INTERNA



Quadro Comparativo

PRESSÃO

Mercúrio

Vênus

Terra

Marte

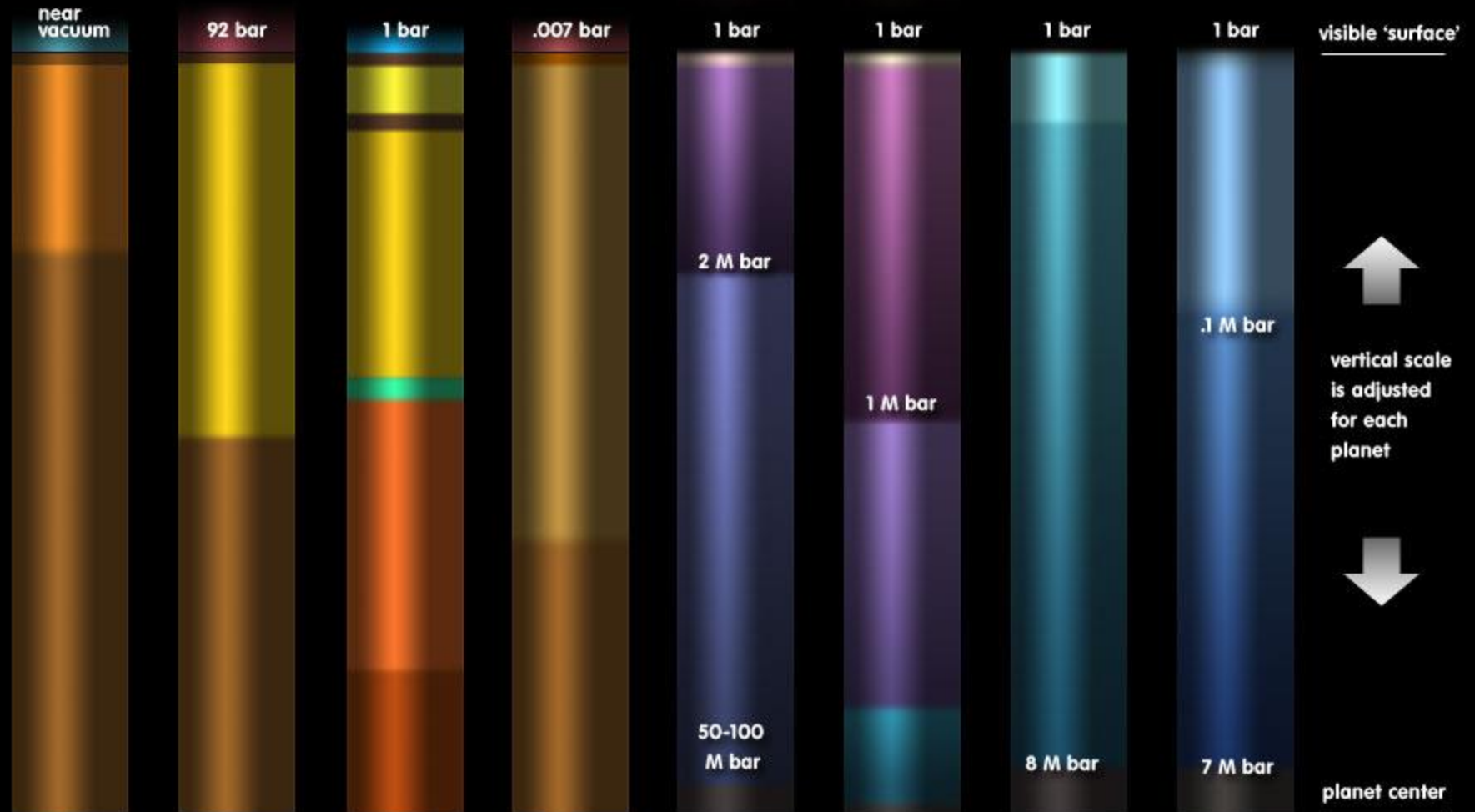
Júpiter

Saturno

Urano

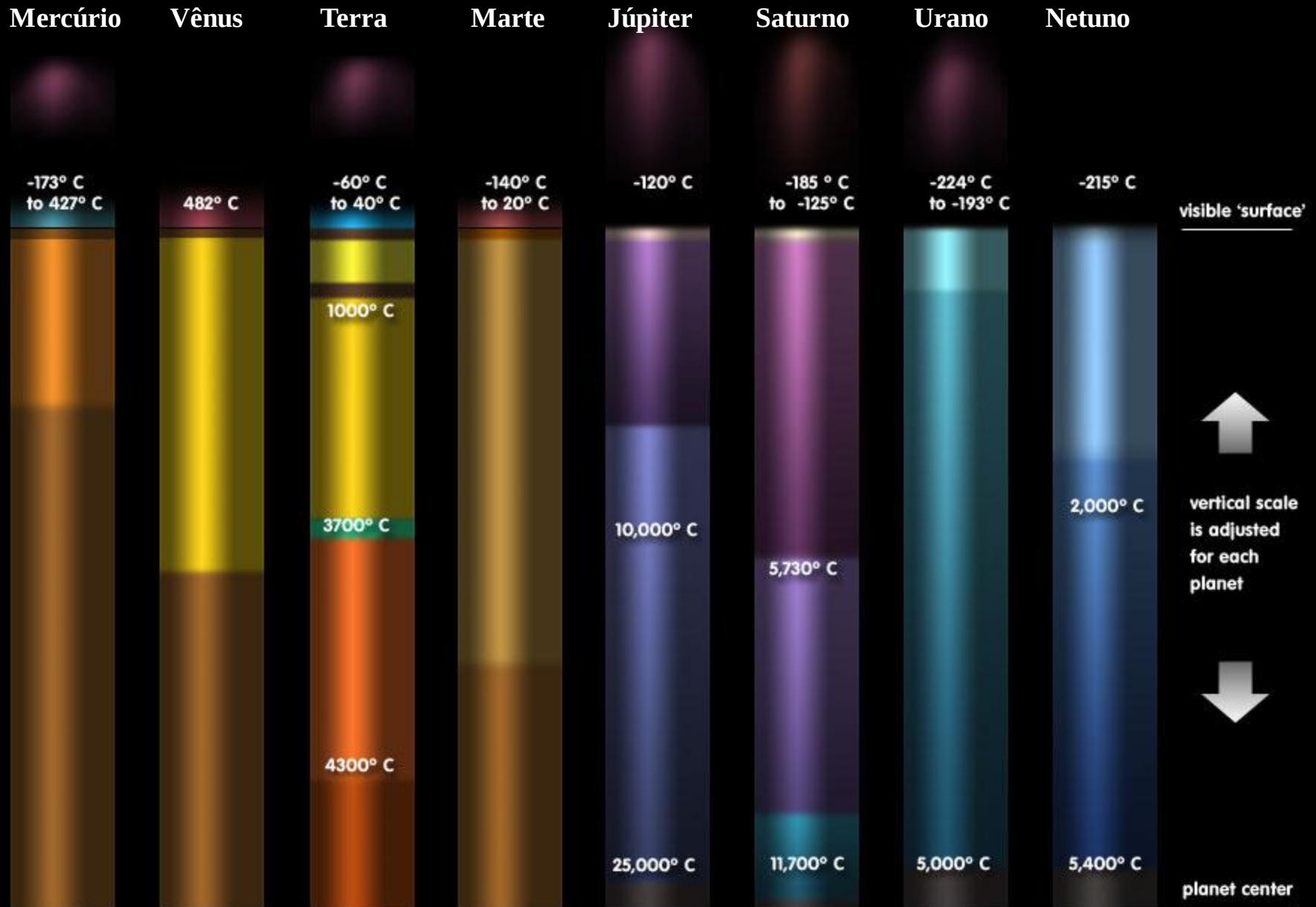
Netuno

1 bar = 0,987 atm

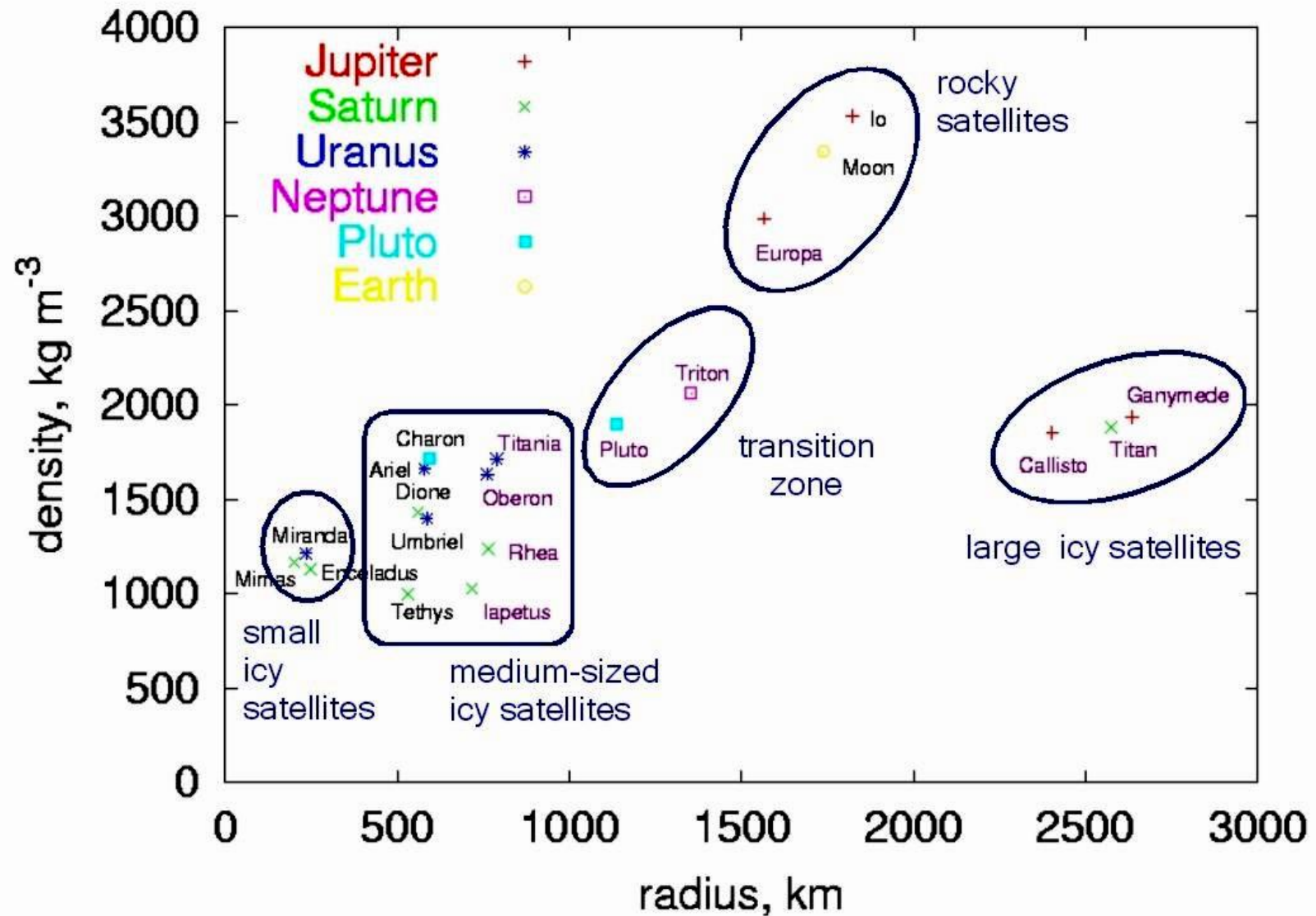


Quadro Comparativo

TEMPERATURA

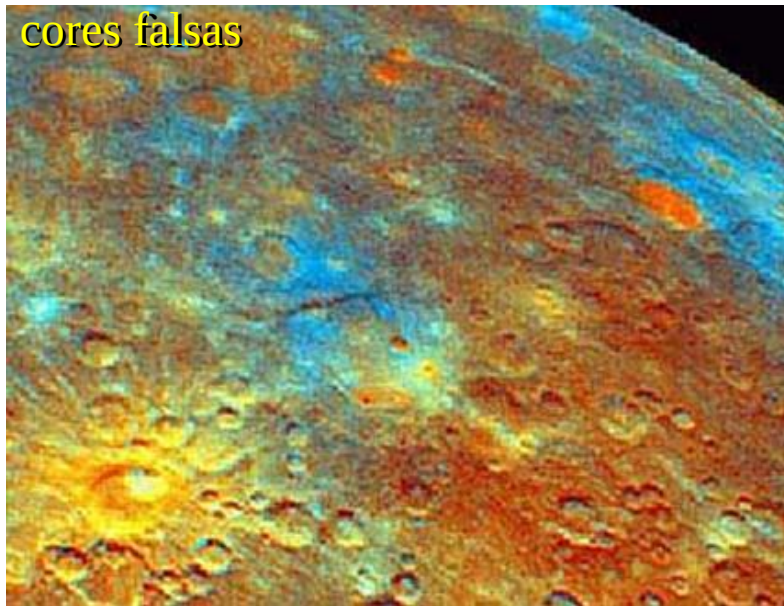


Quadro Comparativo



Superfícies planetárias

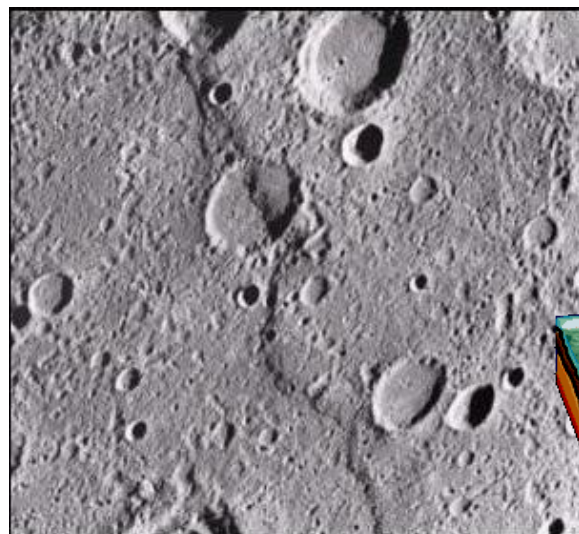
cores falsas



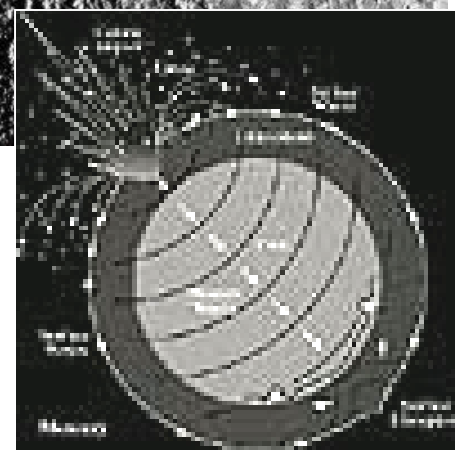
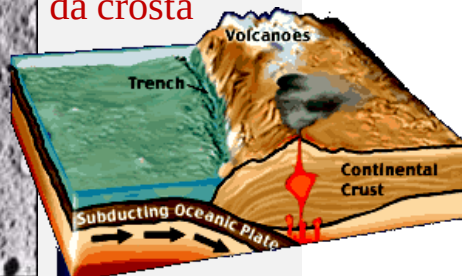
Contraste evidencia diferenças em
composição química

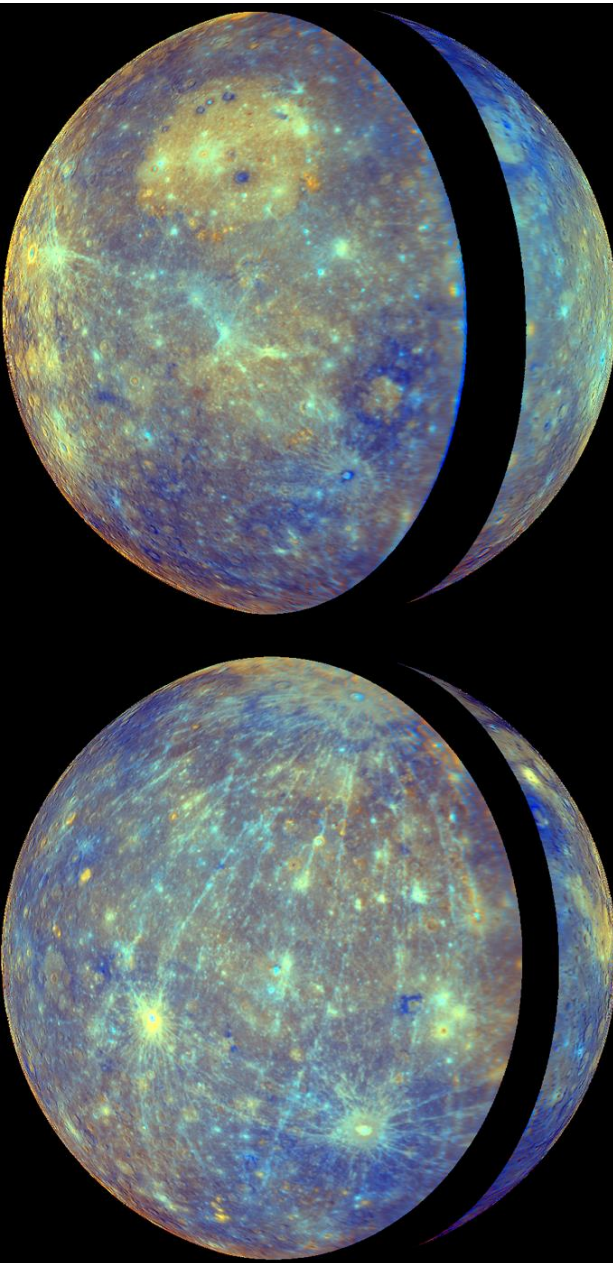
Base “Caloris”
Colisão violenta
produziu bordos
múltiplos.

Terreno na direção
Antipodal é
“enrugado”
(posição de encontro
de ondas de choque)



Falhas
Resfriamento
do planeta
provoca
enrugamento
da crosta





QUESTÕES EM ABERTO

- Por que ele é tão denso?

Núcleo é 60% da massa, na Terra é ~30%

- Estrutura do núcleo?

- História geológica?

Apenas 45% de sua superfície é conhecida.

- Natureza do campo magnético pouco conhecida

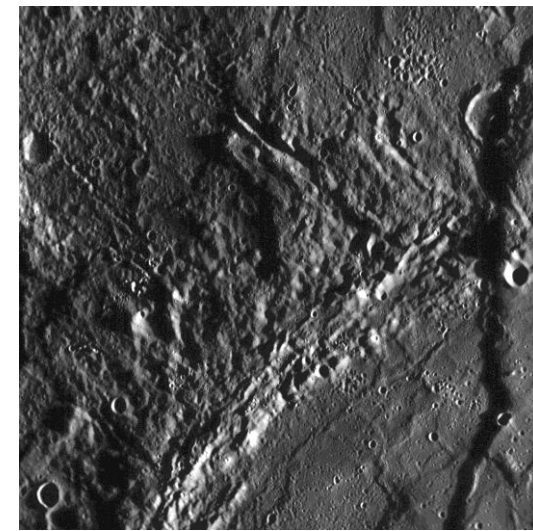
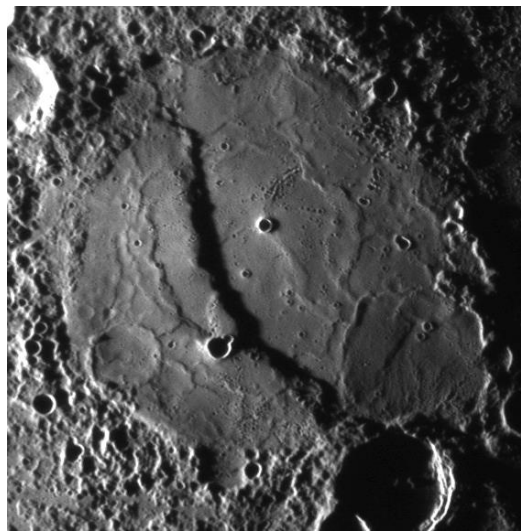
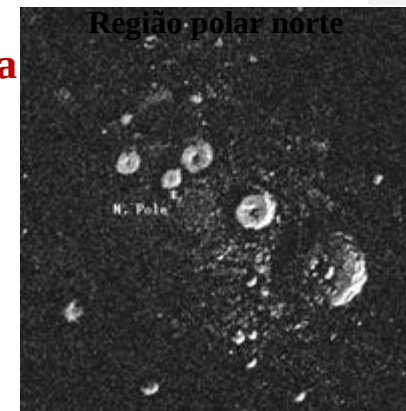
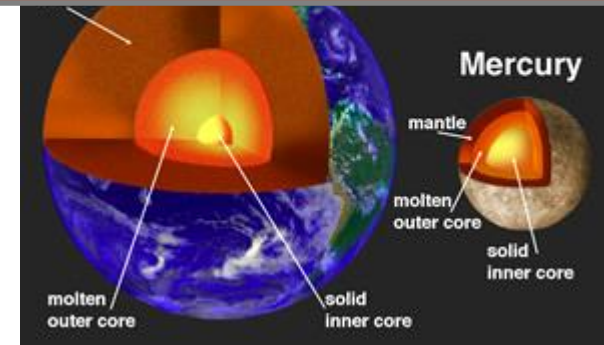
Mercúrio tem campo magnético global, como a Terra, mas Vênus e Marte não!

- O que é aquele material brilhante nos pólos?

- Que voláteis são importantes ?

H e He provém do Sol, mas e O, Na, K, Ca, Mg?

- Excesso de Na na superfície: de onde veio?



PARÂMETROS ORBITAIS

	Vênus	Terra	Vênus/Terra
Semieixo maior (106 km)	108,21	149,60	0,723
Período orbital sidereal (dias)	224,701	365,256	0,615
Periélio (106 km)	107,48	147,09	0,731
Afélio (106 km)	108,94	152,10	0,716
Período sinódico (dias)	583,92	-	-
Velocidade orbital média (km/s)	35,02	29,78	1,176
Período de rotação sideral (hrs)	-5832,5	23,9345	243,686
Comprimento do dia (hrs)	2802,0	24,0000	116,750
Inclinação do eixo (grau)	177,36	23,45	(0,113)



Luz visível

PARÂMETROS FÍSICOS

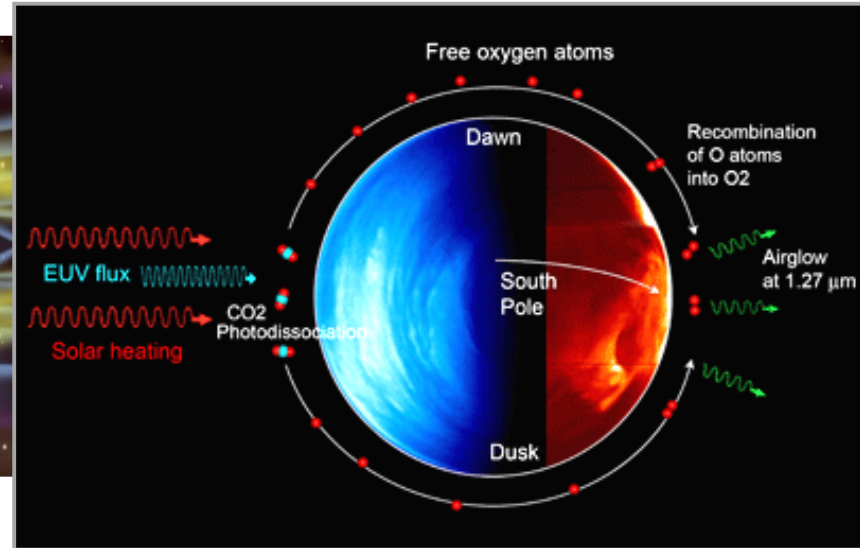
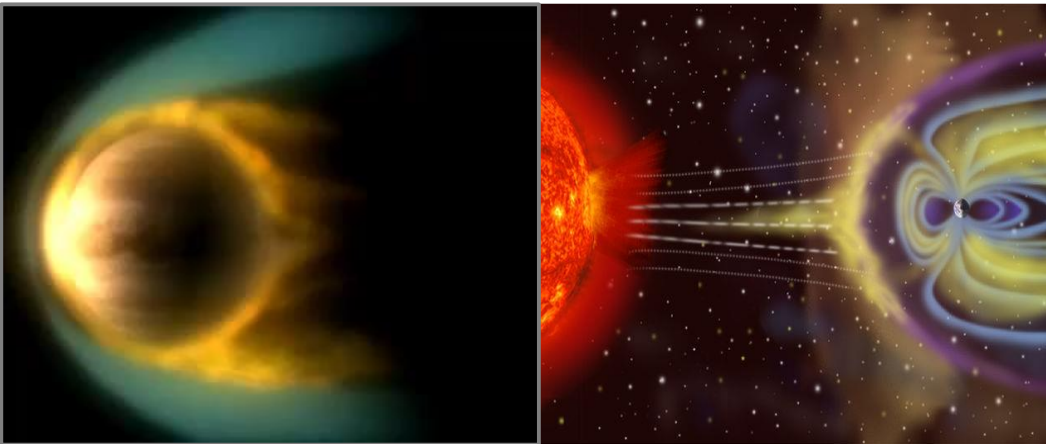
	Vênus	Terra	Vênus/Terra
Massa (10 ²⁴ kg)	4.8685	5.9736	0,815
Volume (10 ¹⁰ km ³)	92.843	108.321	0,857
Raio Equatorial (km)	6051,8	6378,1	0,949
Raio Polar (km)	6051,8	6356,8	0,952
Densidade (kg/m ³)	5243	5515	0,951
Gravidade na Superf. (m/s ²)	8,87	9,78	0,907
Irradiância Solar (W/m ²)	2613,9	1367,6	1,911
Intervalo Topográfico (km)	15	20	0,750
Satélites	0	1	



A atmosfera de Vênus é tão espessa que esconde sua superfície.

Luz ultravioleta

Vênus e Terra



A

magnetosfera

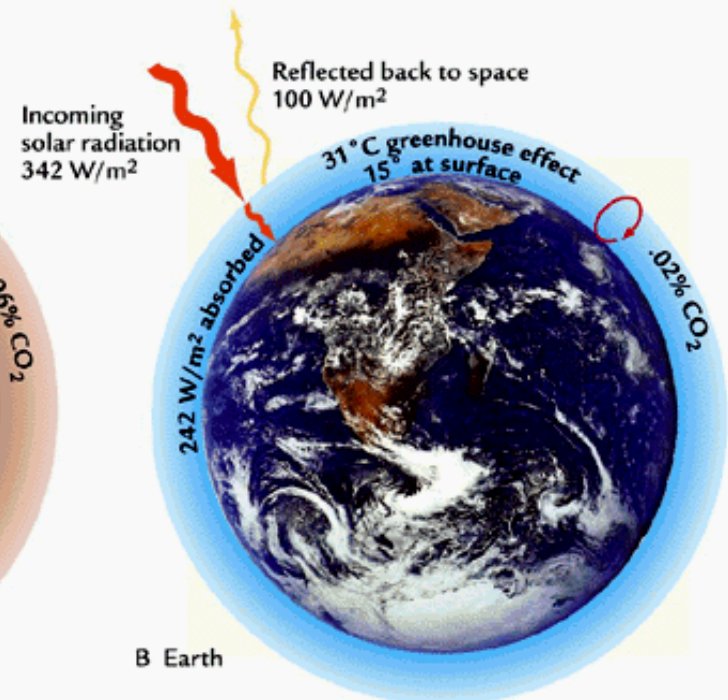
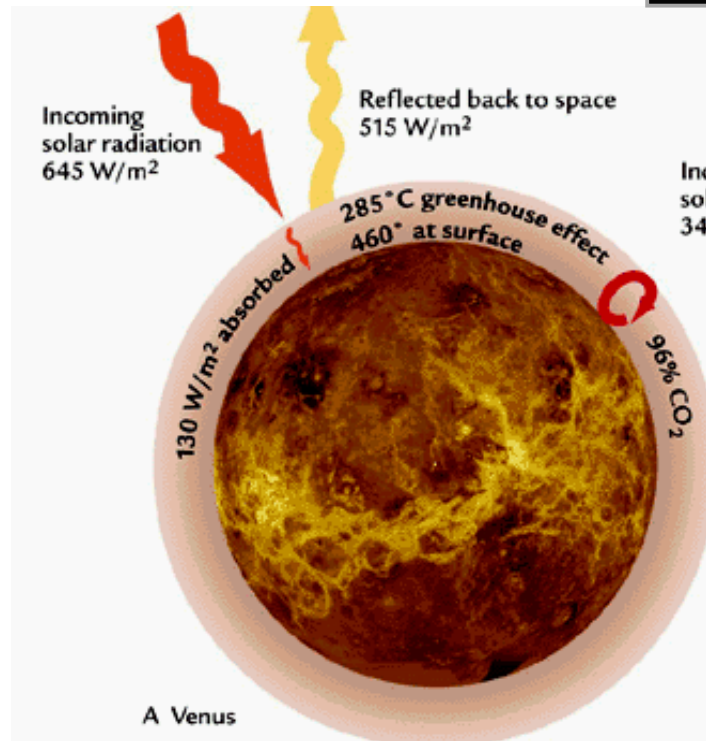
protege a

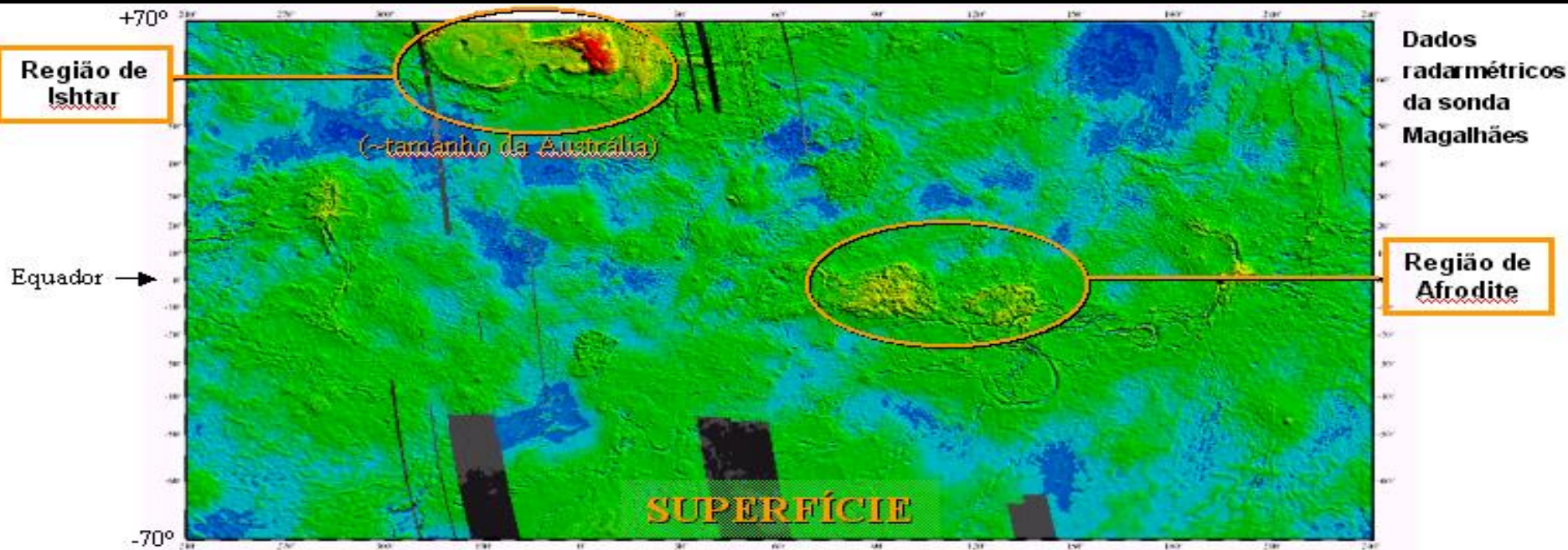
atmosfera do

arrastamento

pelo vento

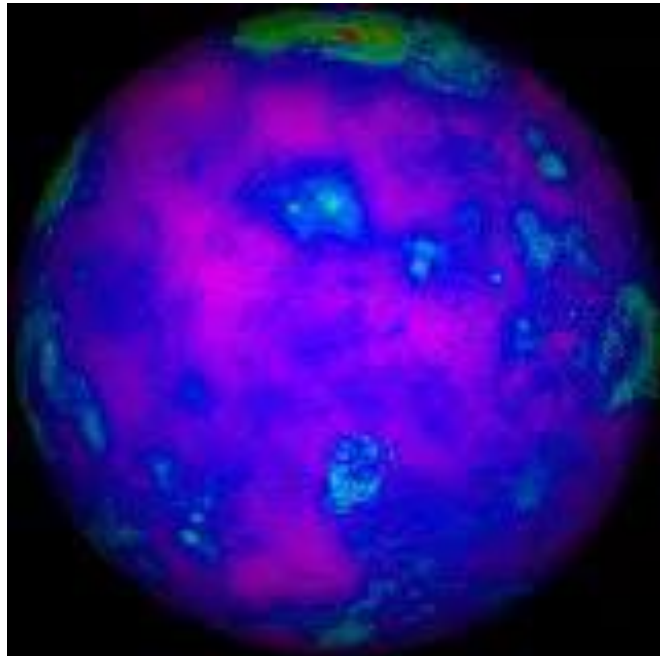
solar.



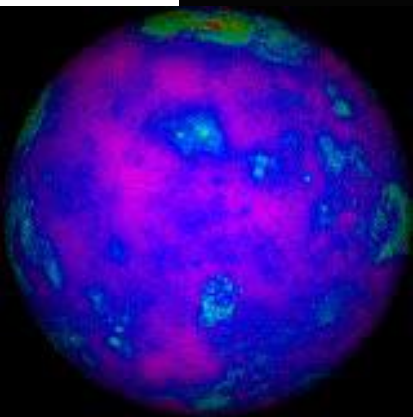
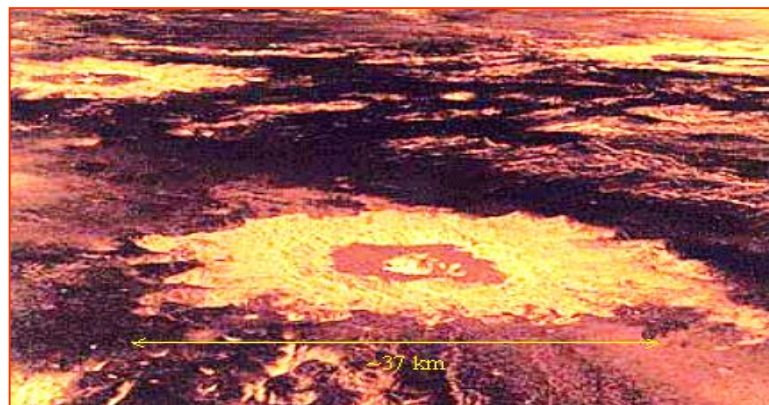
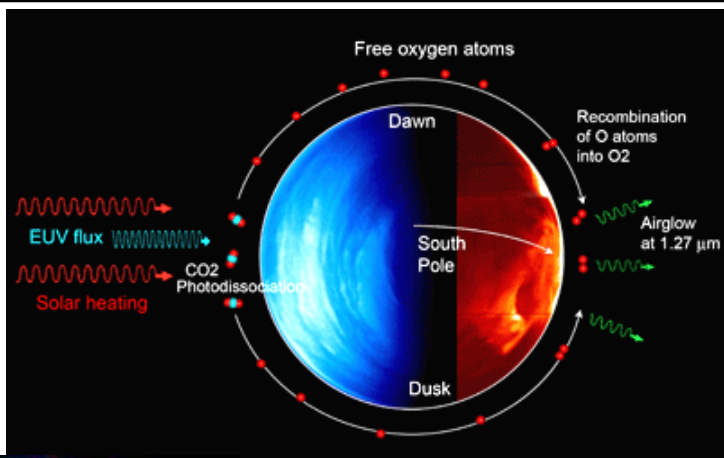


$T = 460^{\circ}\text{C}$

- 80% do terreno é basáltico
- não há indícios de vulcanismo
- idade ~ 500 milhões de anos



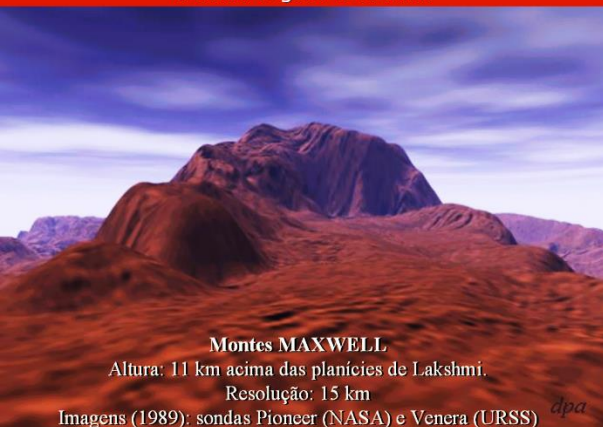
Vênus: o vizinho quente e inóspito



Vênus: região de Ishtar

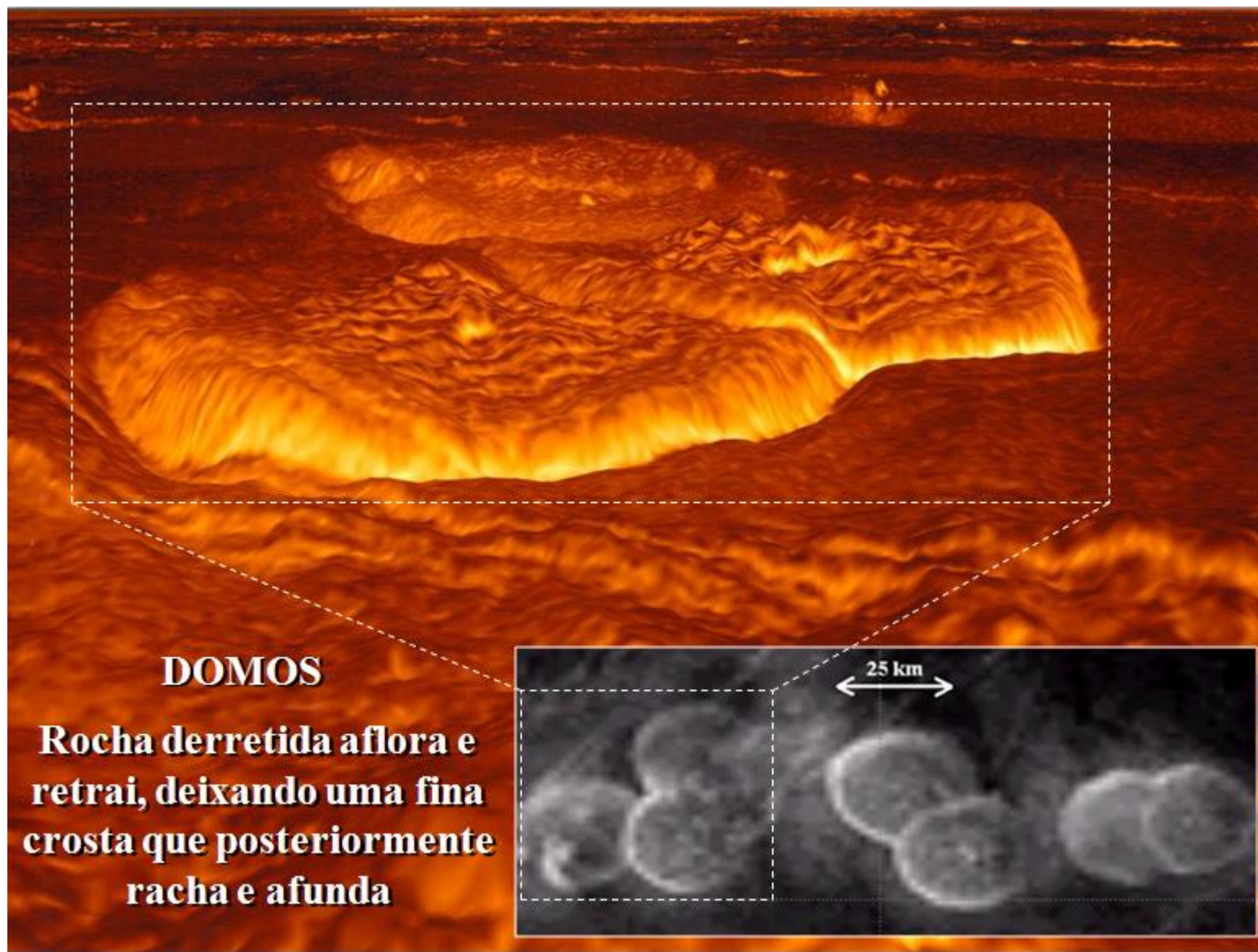


Vênus: região de Afrodite

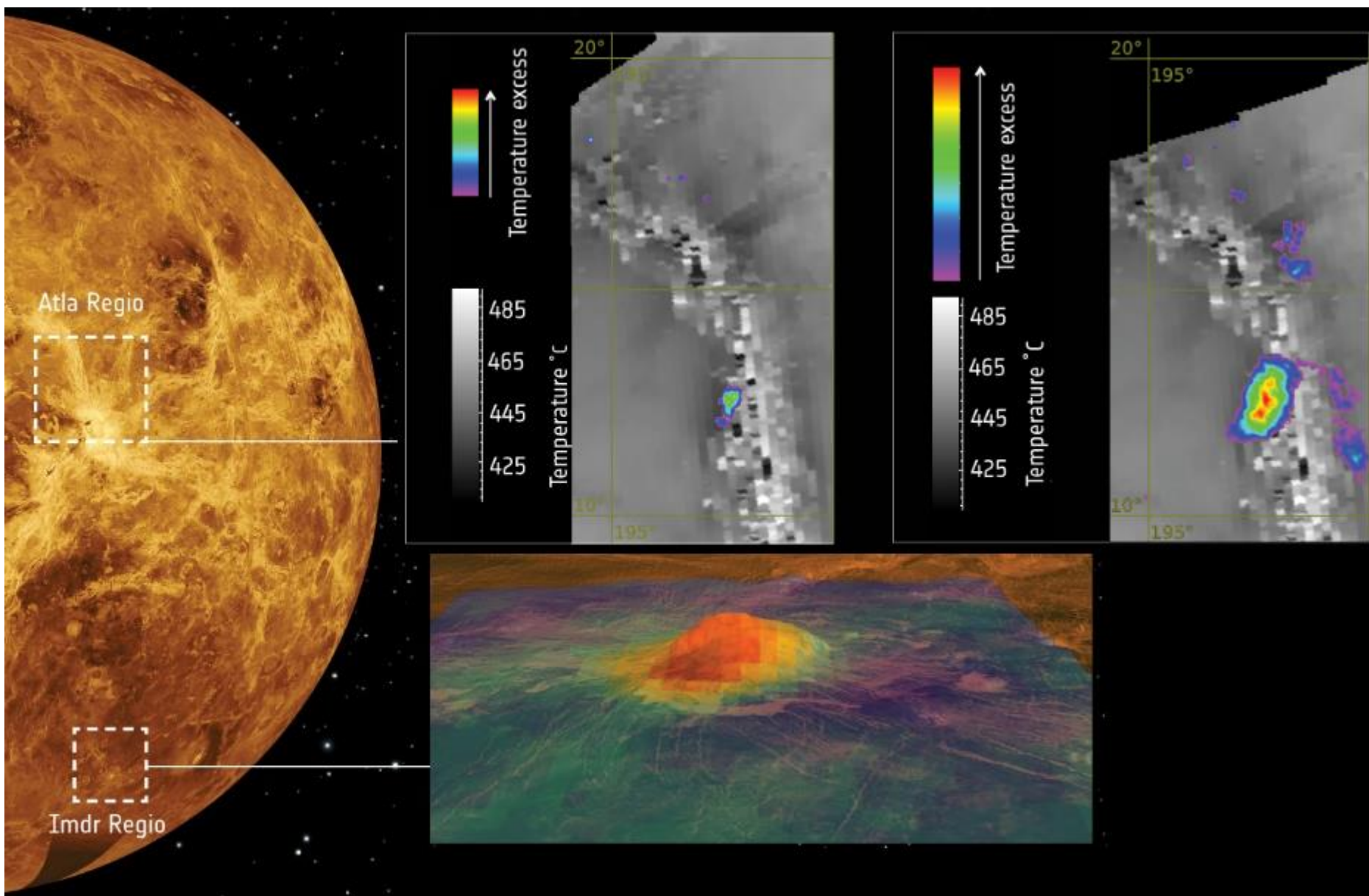


$T = 460^{\circ}\text{C}$
80% do terreno é basáltico
não há indícios de vulcanismo
idade ~ 500 milhões de anos





Vênus: sinais de vulcanismo ativo?



Região de Ishtar

Montes MAXWELL

Altura: 11 km acima das planícies de Lakshmi.

Resolução: 15 km

Imagens (1989): sondas Pioneer (NASA) e Venera (URSS)

dpa

Região de Afrodite

Monte MAAT

Maior vulcão (ativo?) local.

Altura: ~ 8 km acima do raio médio de Vênus.

Resolução: 75 metros!

dpa

Região de Afrodite

Monte OZZA
Vista de Ozza e Maat, do sudoeste.
Região de Alta Regio.

dpa



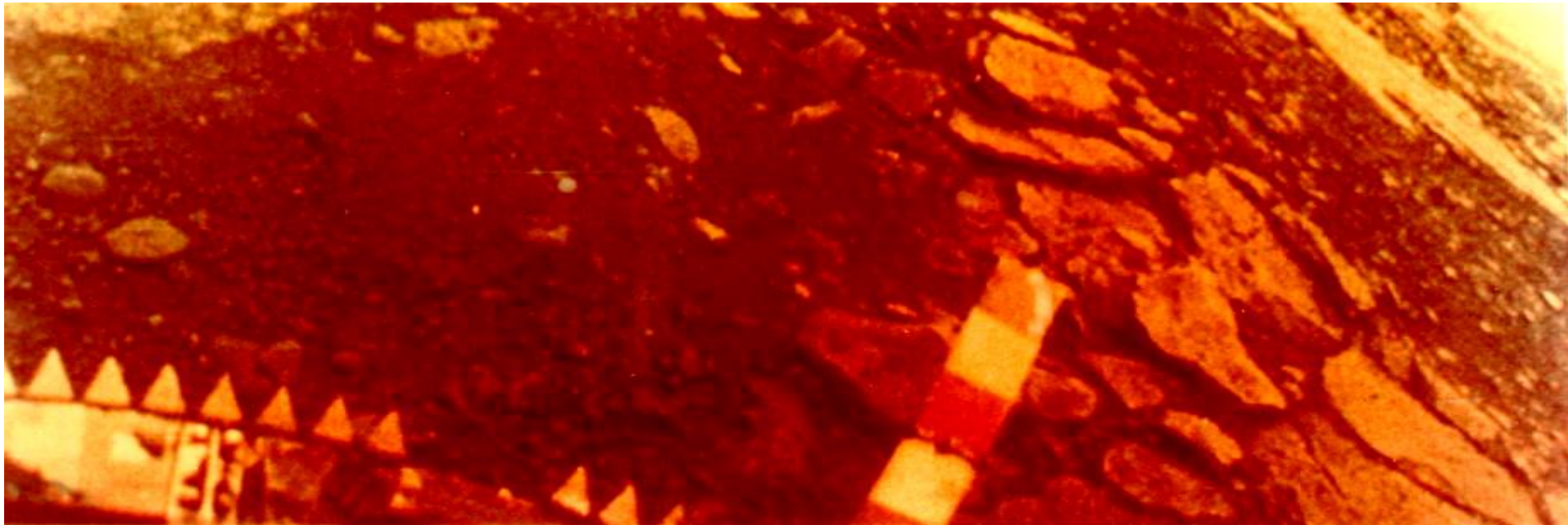
Imagens sintetizadas de dados de radar



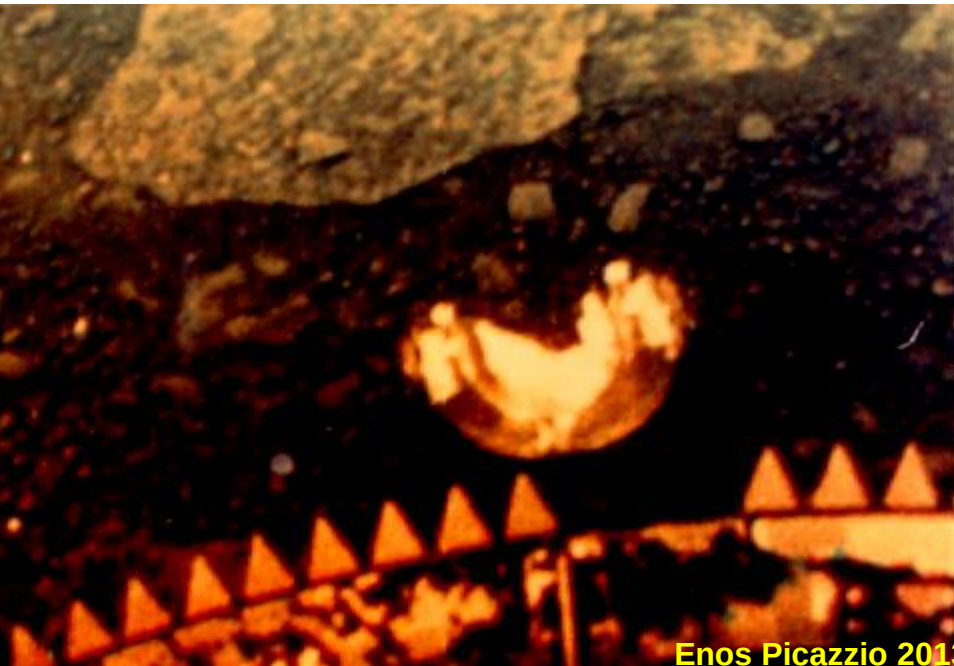
CRATERAS DE IMPACTO

Imagem artificial construída com dados radarmétricos de 1991.

Sonda Magalhães - NASA



Imagens raras e detalhadas da superfície venuziana, obtidas pela sonda russa Venera. Os contornos pontiagudos das rochas são resultantes da rachadura por aquecimento, e denunciam a ausência de erosão eólica.



Principais resultados científicos da sonda radarmétrica Magalhães (1990).

Tectônica: não há evidências de placas.

Matéria vulcânica: presente em 85% da superfície

Erosão: processo lento e pouco eficiente

Topografia: 80% da superfície é plana; variação

Idade da superfície: ~ 500 milhões anos

Processo responsável: lento e contínuo ou série de eventos maciços ?

Gravidade superficial: altamente correlacionada com topografia

→ houve controle do processo por
mecanismos internos

ROCHOSOS

0° 177.4° 23.5° 25.2°



Mercury Venus Earth Mars

3.1°



Jupiter

26.7°



Saturn

97.9°



Uranus

28.3°

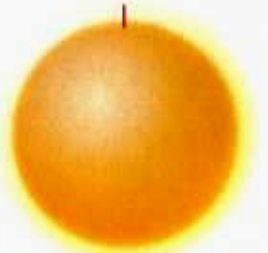


Neptune

122.5°



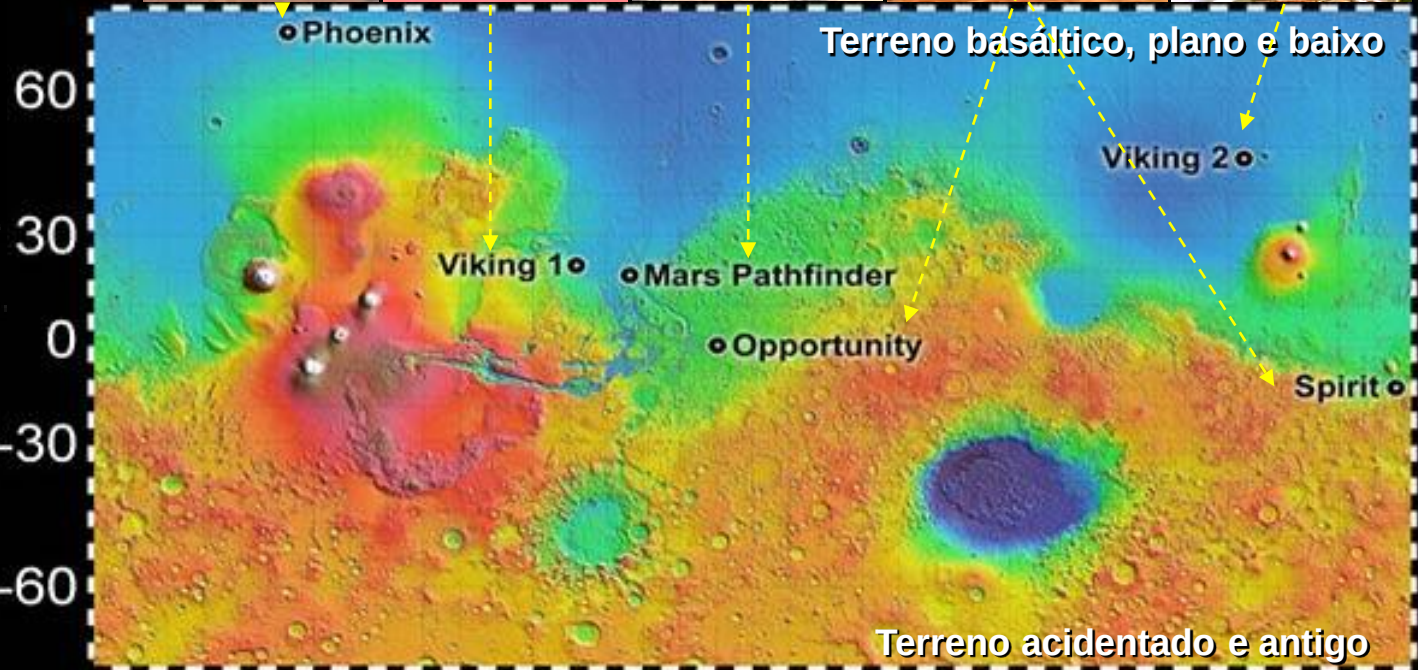
Pluto



Sun

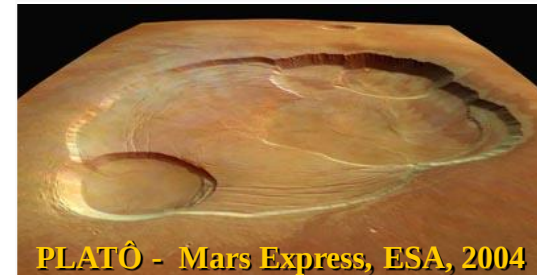
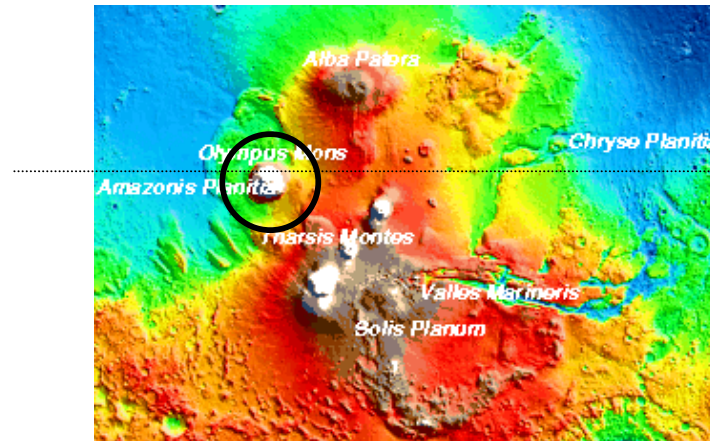


Phoenix



Monte Olimpo: o maior vulcão (extinto) do Sistema Solar

- base: 600 km
- altura: 27 km



PLATÔ - Mars Express, ESA, 2004



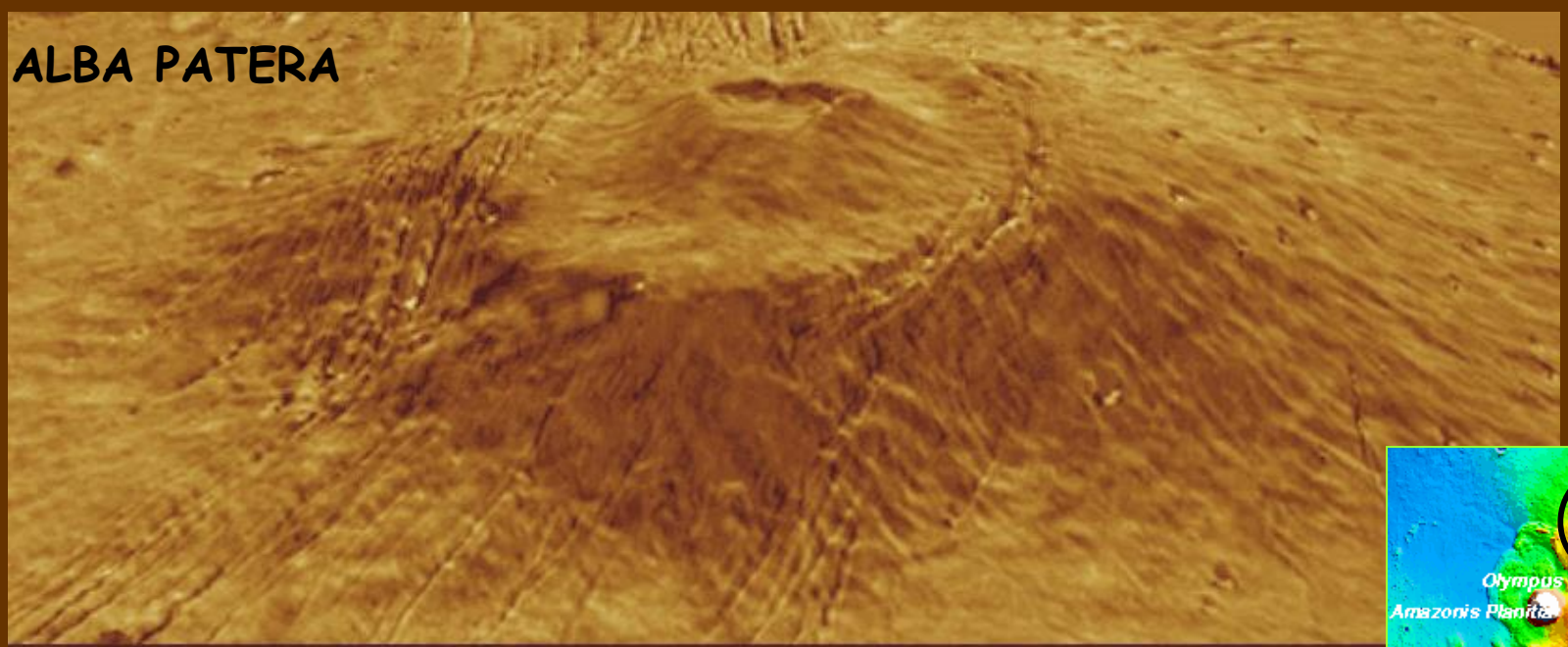
ESCARPAS - Mars Express, ESA, 2004



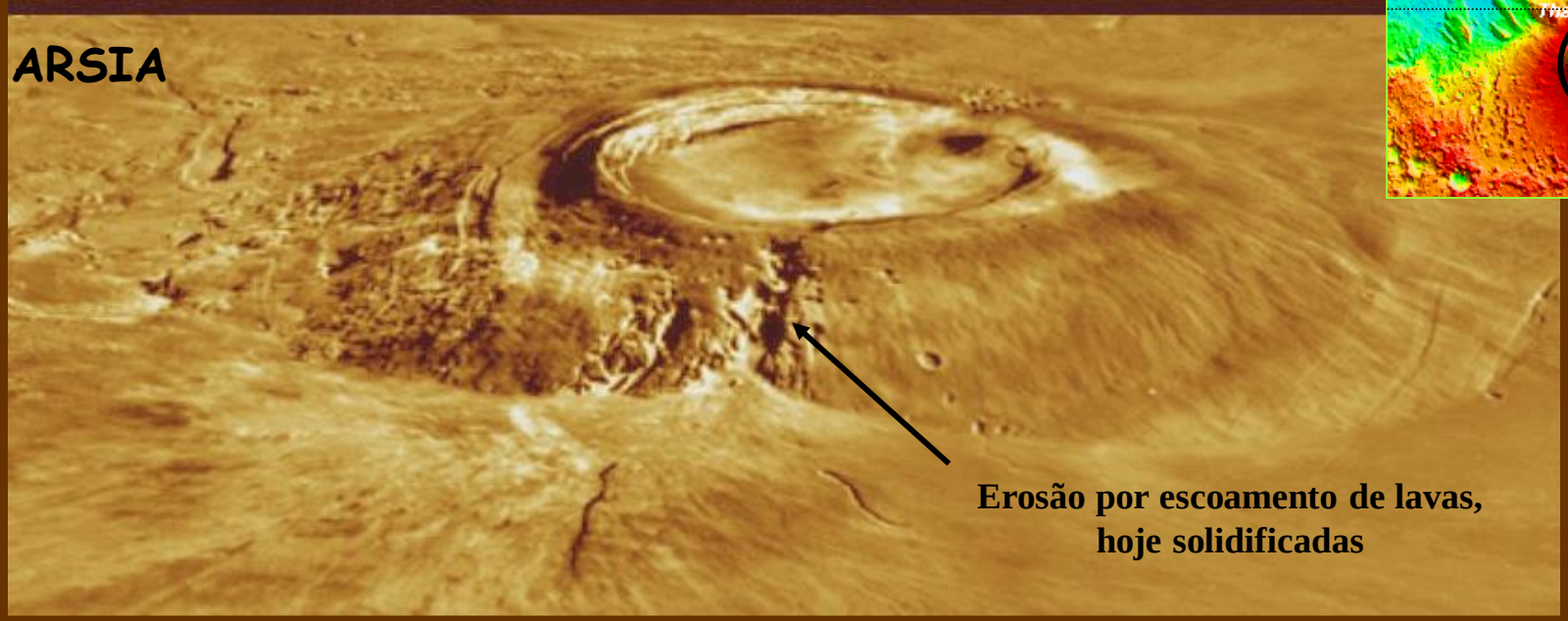
ESCARPAS - Mars Express, ESA, 2004



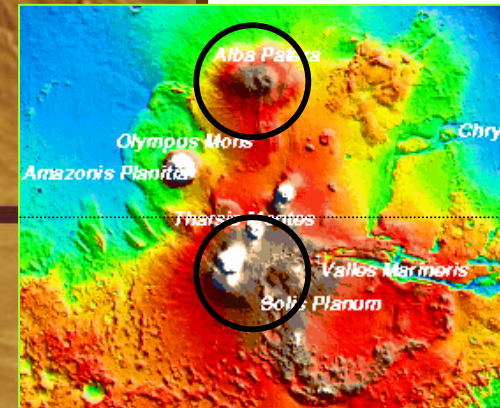
ALBA PATERA

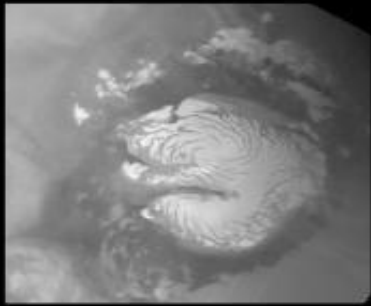


ARSIA



Erosão por escoamento de lavas,
hoje solidificadas

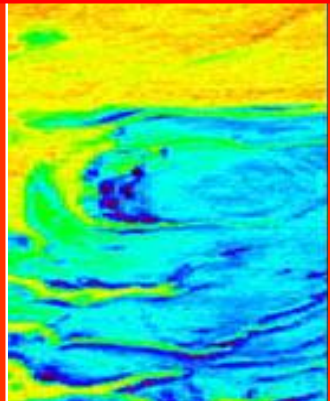




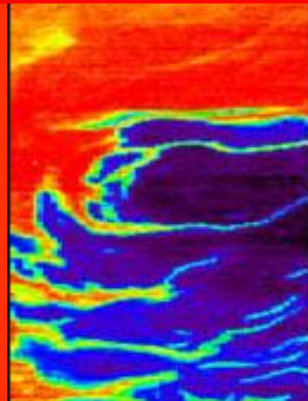
North Polar Cap, May 1, 1999



South Polar Cap, Feb. 25-26, 2000



Luz integral visível



Banda do CO_2



Banda do gelo de H_2O

Capa Polar Sul
Mars Express (ESA)



Mars Express (ESA) - 28/07/2005

luz

gelo na parte sombreada

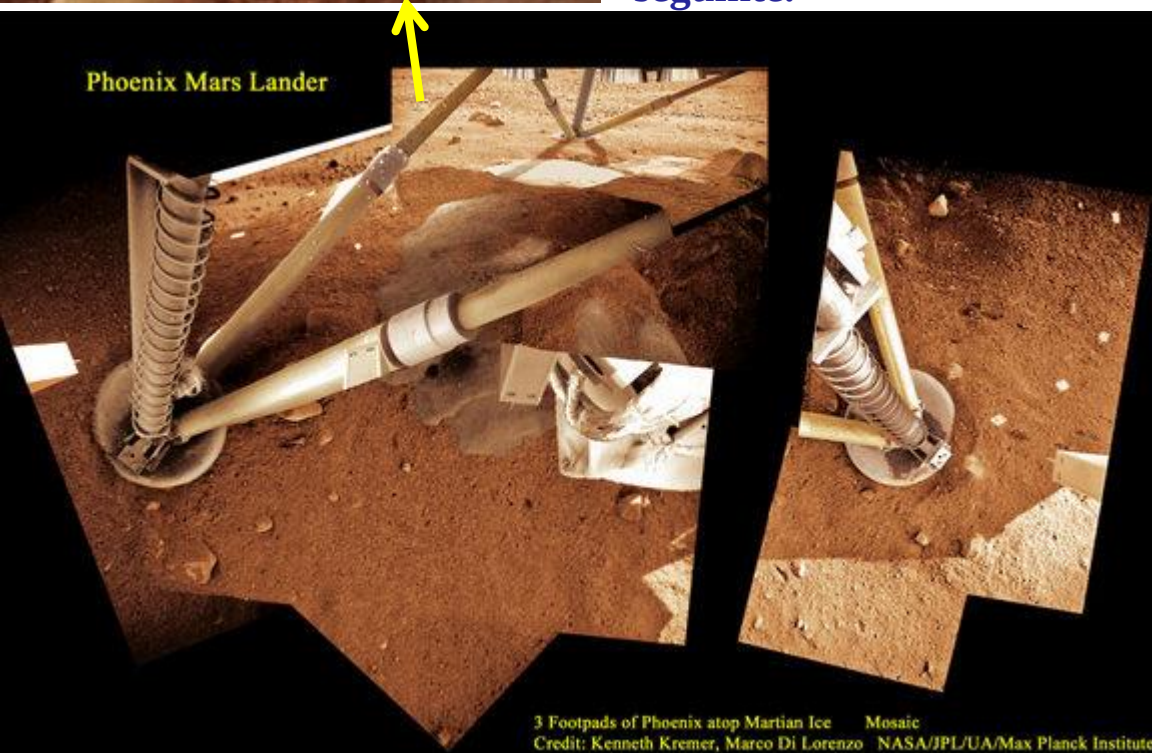
O fundo da cratera localizada na região Vastitas Borealis (70.5° N , 103° L), de 35 km de diâmetro e 2 km de profundidade está parcialmente coberta de gelo.

Cavando o subsolo, a sonda Spirit (NASA) expôs material rico em sílica (SiO_2) possivelmente formada por concentração de água (como costuma surgir na Terra)

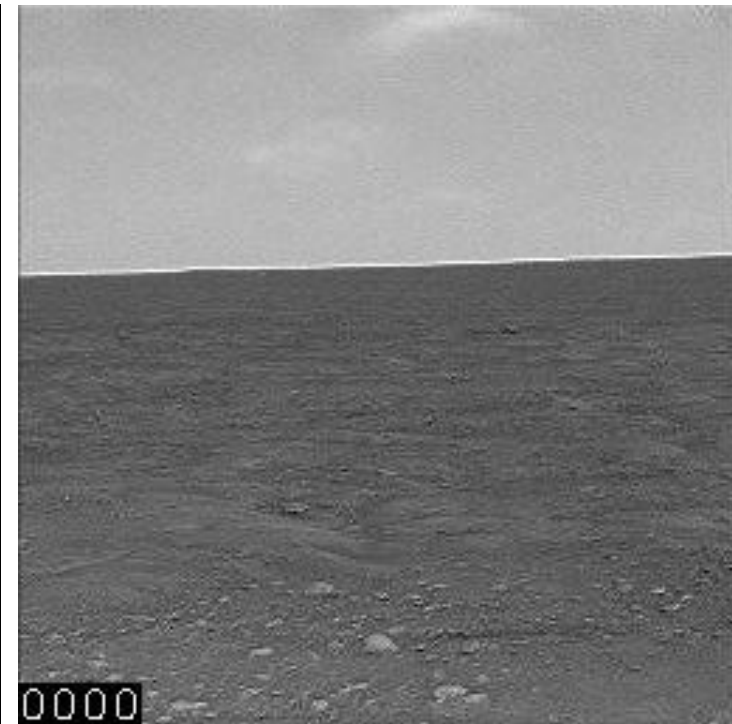


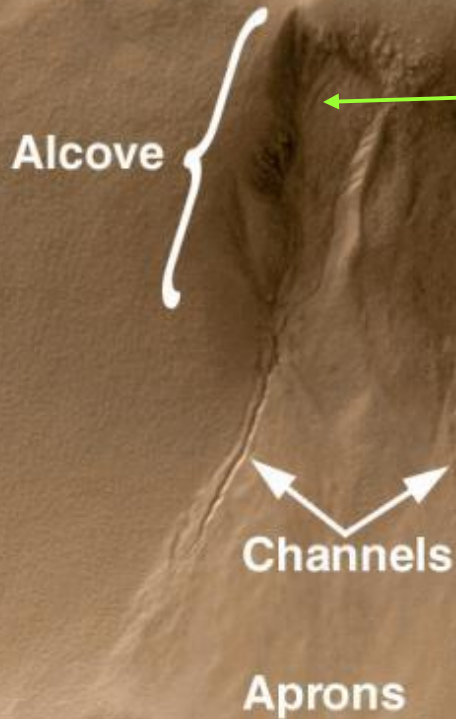
Cristais de gelo precipitam à noite e sublimam pela manhã. O vapor de água é misturado e lançado novamente para a atmosfera por turbulência e convecção diurna, alcança altura de 4 km, formam nuvens à noite e precipita.

Cristais de gelo caem das nuvens sobre o ártico. Eles evaporam antes de tocar ao solo, e saturam atmosfera de água. Essa neblina espessa produz uma geada que vira vapor ao amanhecer, devolvendo a água à atmosfera. Por volta da meia-noite, as nuvens formam-se outra vez, nutrindo os cristais que cairão na madrugada seguinte.



3 Footpads of Phoenix atop Martian Ice Mosaic
Credit: Kenneth Kremer, Marco Di Lorenzo NASA/JPL/UA/Max Planck Institute

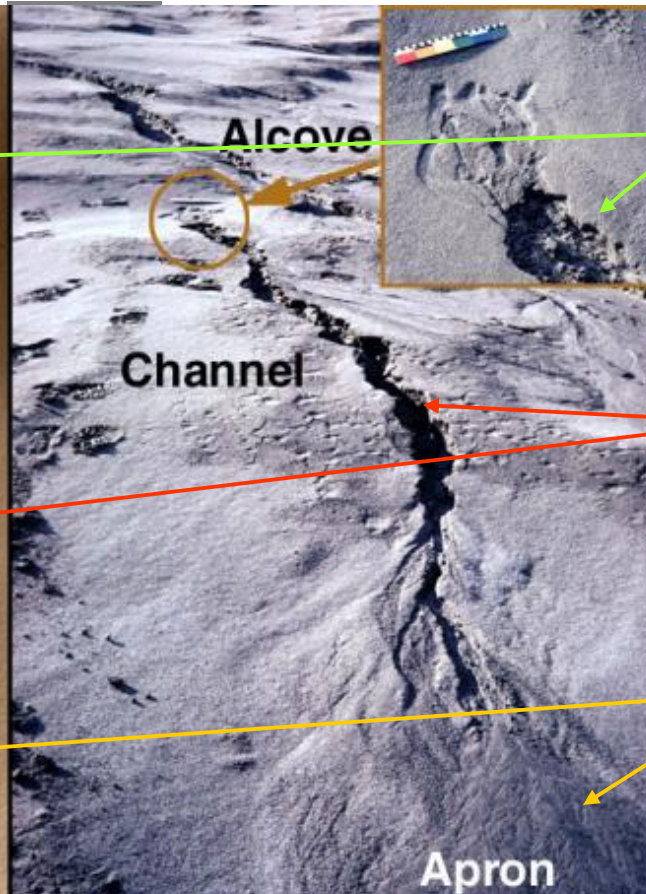




Alcove

Channels

Aprons



A alcóva forma-se acima do local do escoamento enquanto a água emerge e mina o material do qual está escoando.

Canal formado pela ação do fluxo de água e detritos

Depósitos de gelo e detritos provindos das regiões mais elevadas do canal

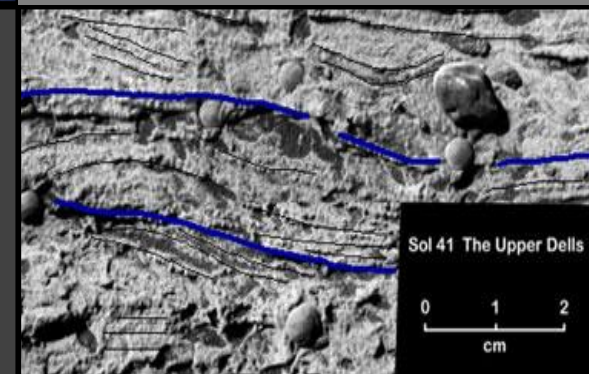
Sedimentos formados em água corrente?

Água em Marte

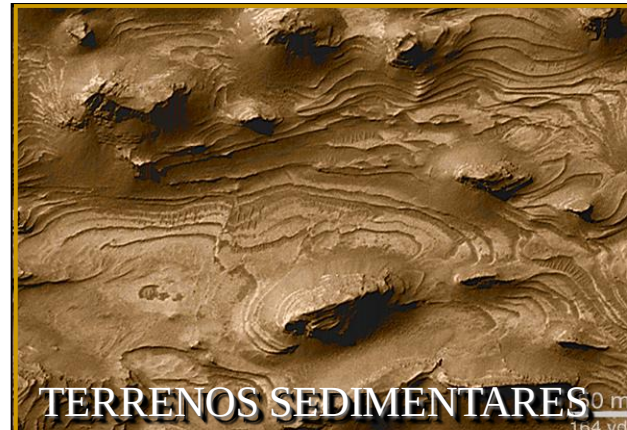
- ⇒ mais seco e frio
- ⇒ líquida não pode existir por muito tempo
- ⇒ não é vista, mas inferida de figuras e similaridades com a Terra

Água na Terra:

- ⇒ é o agente principal de intemperismo e erosão
- ⇒ de chuva flui, infiltra e cria vala



Já houve clima favorável à existência de água líquida na superfície.

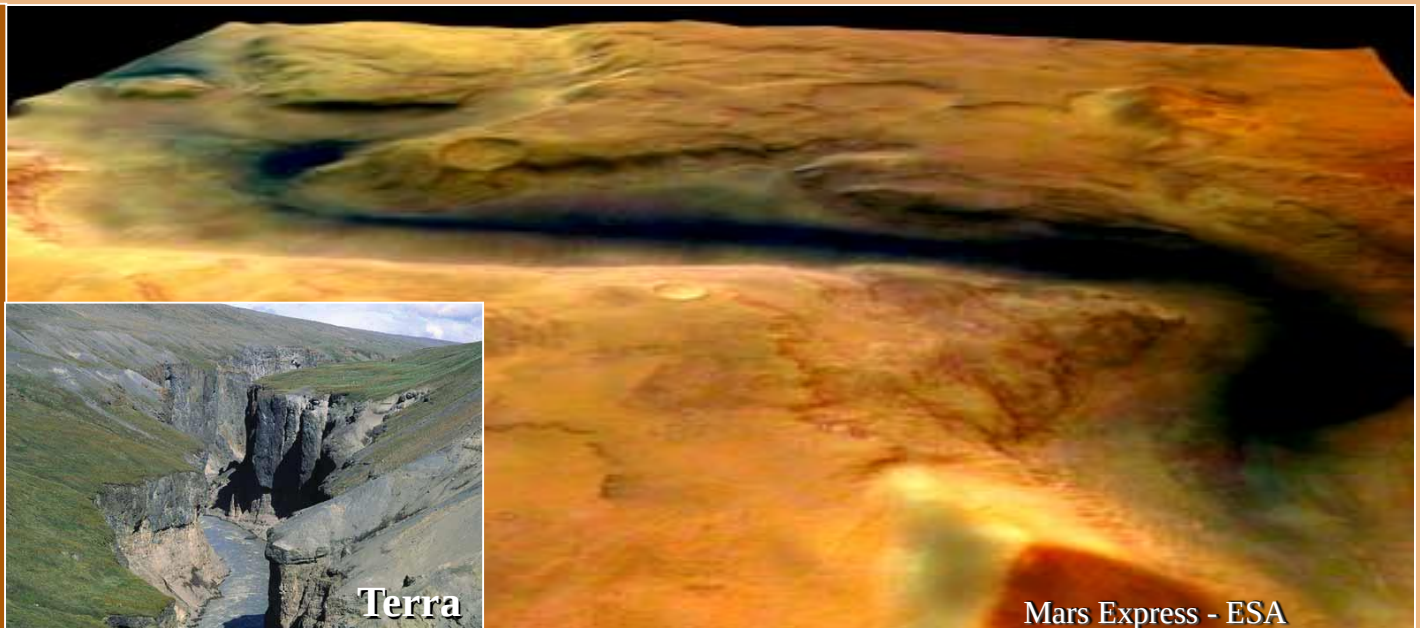
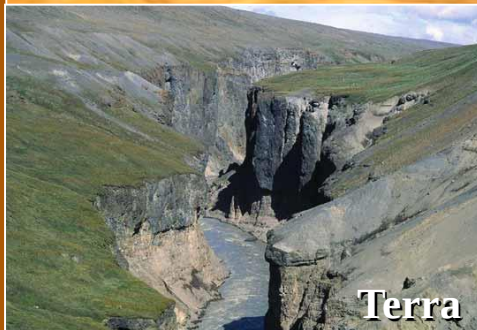


Erosão Fluvial

Evidência de escoamento

**Vale Reull
(41° S, 101° L),
visto de 273 km
acima do solo.
Canal formado
no passado por
água corrente**

15/01/2004 - Mars
Express ESA/DLR/FU
Berlin (G. Neukum)



Fluxos de lama na Terra

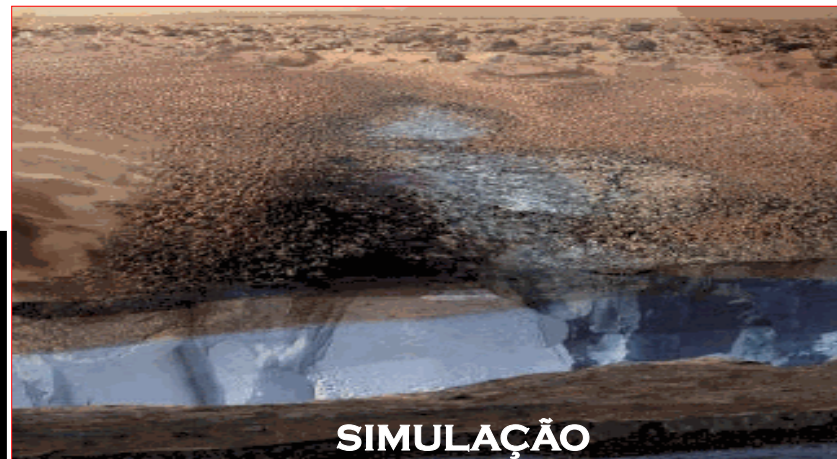


A água restante deve estar congelada nas capas polares, juntamente com CO₂ congelado, e no subsolo. Aflorando na superfície, ela sublima por conta da baixa pressão atmosférica.

Newton Basin on Mars. Malin Space Science Systems, MGS, JPL, NASA



Água salgada do sub-solo, escorre para a base e vaporiza. Presença de sais hidratados, provavelmente uma mistura de perclorato de magnésio [Mg(ClO₄)₂], clorato de magnésio [Mg(ClO₃)₂] e perclorato de sódio [NaClO₄].



CRATERA JOVEM

Derretido pelo calor do impacto e arremessado como lama, o material do solo resfria e adquire forma típica.



Superfícies congeladas

Terra



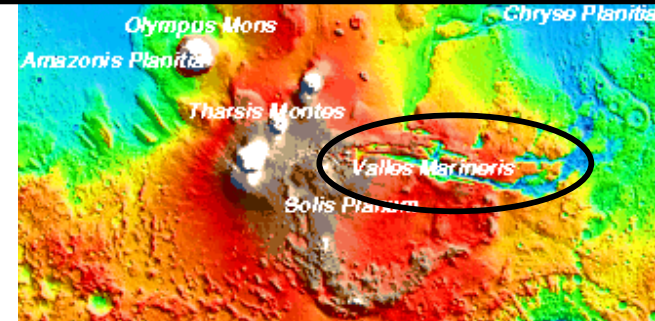
Islândia

Marte



Cratera Gusev
(SPIRIT)

Image processed by U.S. Geological Survey

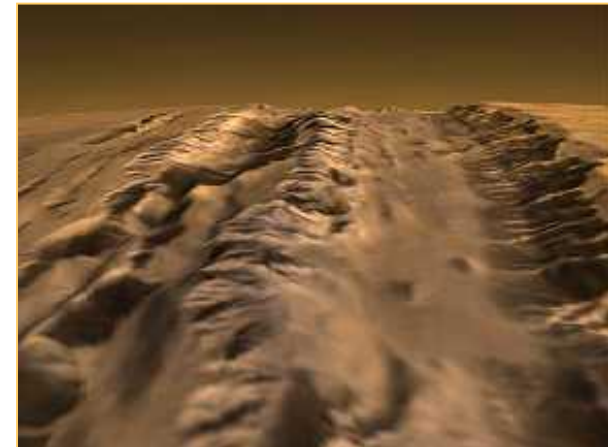
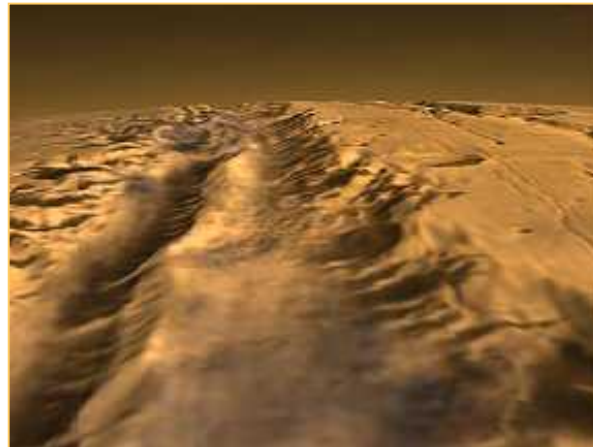


VALES “MARINERIS”

Nome dado em homenagem à sonda *Mariner 9*

Os “canyons” estendem-se por cerca de 1/5 da circunferência de Marte.

Eles surgiram das falhas da crosta logo no início da história marciana, e foram moldados por longo período de erosão eólica.



As atmosferas planetárias

As atmosferas planetárias

Quando a velocidade térmica média superar a velocidade de escape, ocorre a perda

Velocidade Escape

$$V_{\text{escape}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

massa do planeta (pointing to G)

dist. do centro (pointing to R)

Velocidade molecular

e temperatura

$$\frac{1}{2}mv_{\text{med}}^2 = \frac{3}{2}kT$$

temp. eq. radiativo (pointing to T)

ou

$$v_{\text{med}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} = \text{Cte de Boltzmann}$$

NOME	Massa	Raio	Peso de pesoa de 70 kg	Velocidade de escape
	(kg)	(km)	(kg)	km/s
SOL	2E+30	695990	1903	617,439
MERCÚRIO	3E+23	2440	26	4,248
VÊNUS	5E+24	6052	62	10,358
TERRA	6E+24	6378	68	11,174
Lua	7E+22	1737	11	2,376
MARTE	6E+23	3397	26	5,017
JÚPITER	2E+27	71492	172	59,524
Io	9E+22	1820	13	2,557
Europa	5E+22	1570	9	2,034
Ganimedes	1E+23	2630	10	2,749
Callisto	1E+23	2400	8,6	2,450
SATURNO	6E+26	60268	72,5	35,473
Titan	1E+23	2670	8,6	2,597

Presença e espessura dependem de:

- Temperatura local $\Leftrightarrow$ distância do Sol (+ atividade interna)
- Tamanho do objeto $\Leftrightarrow$ velocidade de escape

Planetas gigantes mantêm atmosferas mesmo próximos do Sol (há exoplanetas mais próximos de suas estrelas que Mercúrio do Sol)

Planetas pequenos só mantêm atmosferas longe do Sol

Quanto menor for o corpo, maior a dificuldade de retenção; quanto maior a distância heliocêntrica, mais fácil é manter atmosfera

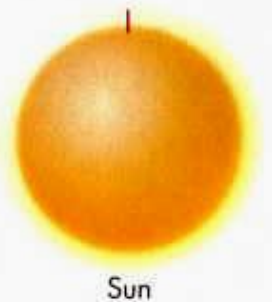
Composição química depende do tamanho do objeto:

Os grandes planetas mantêm gases leves (H)

Os planetas pequenos retêm gases mais densos (N₂, O₂, CO₂)

$$T_{\text{escape}} = \frac{2}{3} \left(\frac{GM_{\text{objeto}}}{R_{\text{objeto}}} \right) \left(\frac{m_{\text{molécula}}}{k} \right)$$

As atmosferas planetárias



Sun

ROCHOSOS

0° 177.4° 23.5° 25.2°



Mercury

Venus

Earth

Mars

3.1°



Jupiter

26.7°



Saturn

97.9°



Uranus

28.3°



Neptune

122.5°



Pluto

$$V_{\text{escape}} = 11,2 \text{ km/h}$$

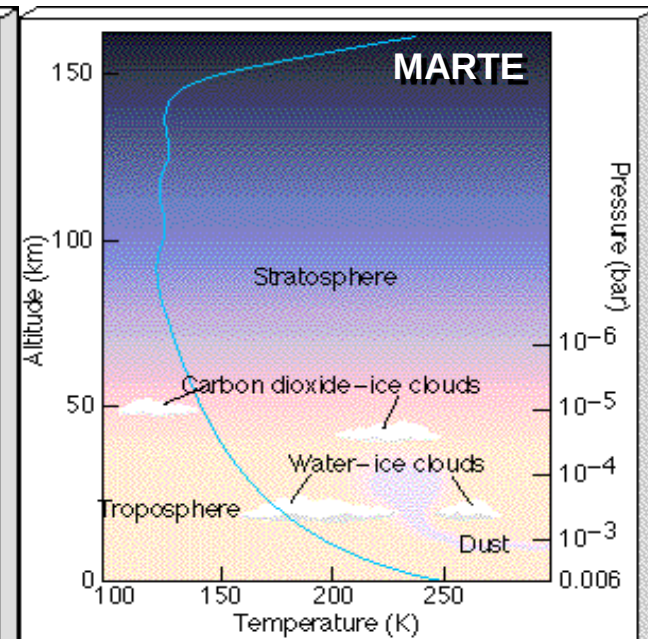
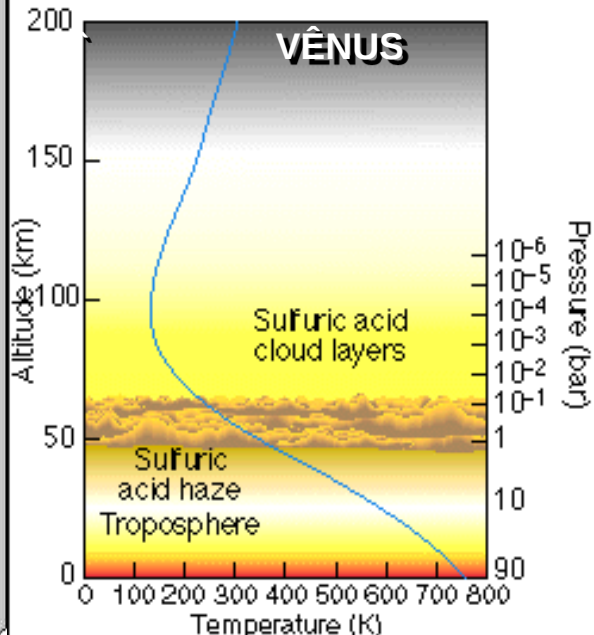
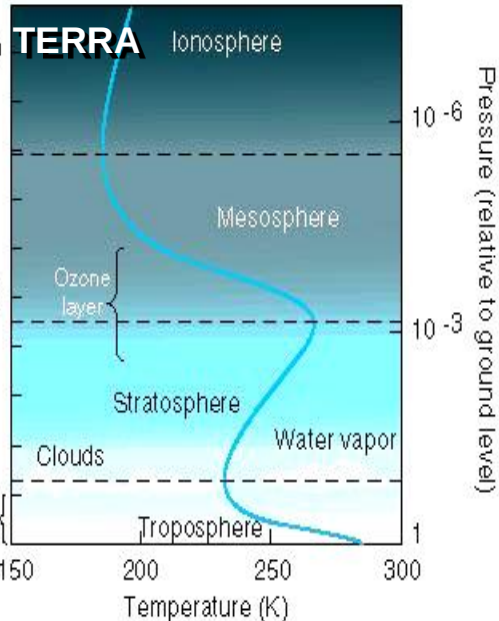
N (78%), O (21%),
Ar (0,9%) CO₂ (0,03%)

$$V_{\text{escape}} = 10,4 \text{ km/h}$$

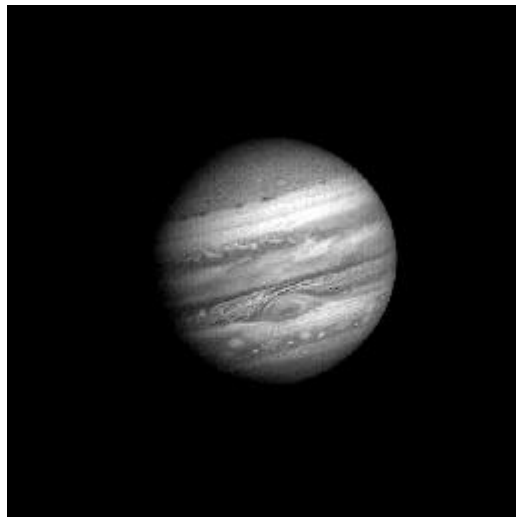
CO₂ (~96%), N (~3,5%), traços
de H₂O (vapor), CO, SO₂, Ar.

$$V_{\text{escape}} = 5 \text{ km/h}$$

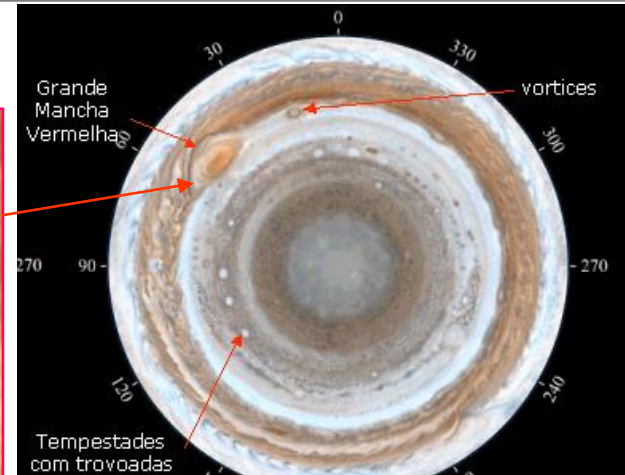
CO₂ (~95%), N (~2,7%),
traços de Ar, O, CO, H₂O.



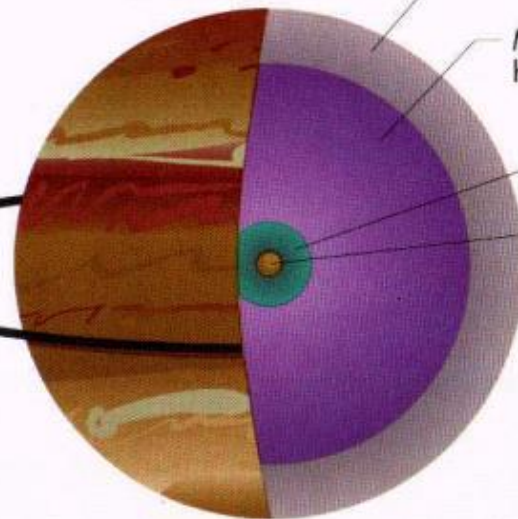
As atmosferas planetárias



Grande Mancha Vermelha

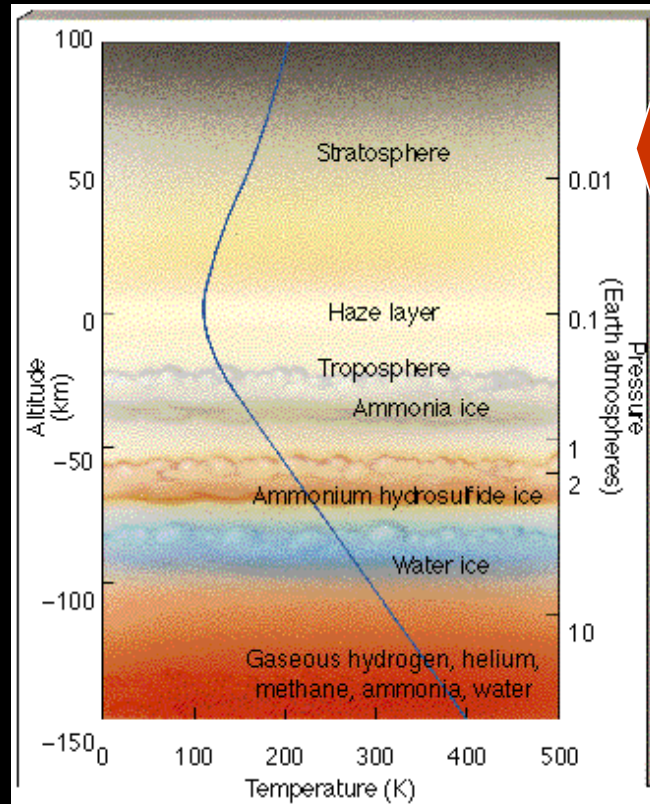


Molecular hydrogen gas
changing to liquid at base



Jupiter
 $M = 318 M_T$

núcleo: $< 10 M_t$



JÚPITER

$V_{\text{escape}} = 59,5 \text{ km/s}$

H (~86,1), H_e (~13,8), traços
de CH_4 , NH_3 e vapor de H_2O

SATURNO

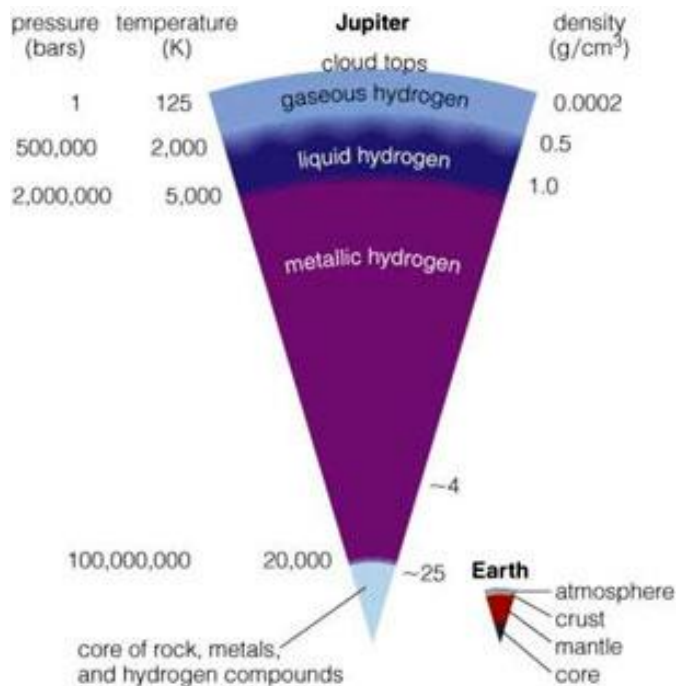
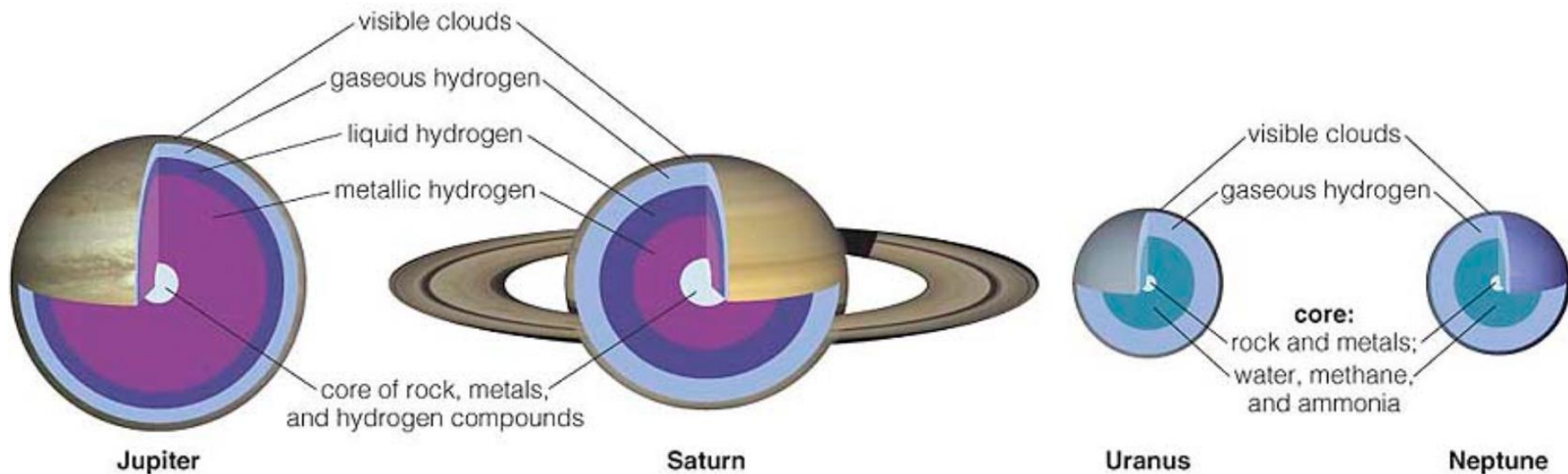
$V_{\text{escape}} = 35,5 \text{ km/s}$

H (~92,4), H_e (~7,4), traços
de CH_4 (~0,2), NH_3 (~0,02).

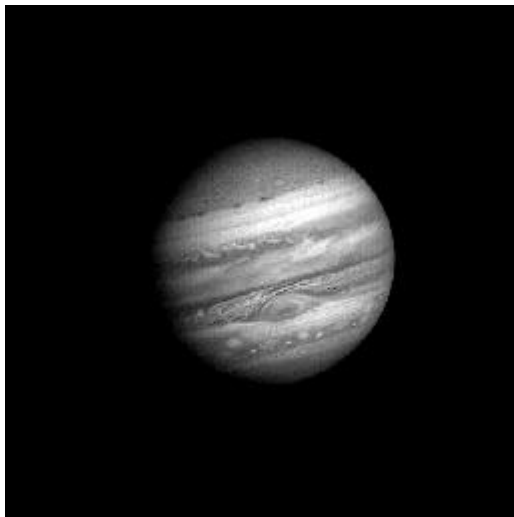
URANO E NETUNO

H (~84), He (~14) e
 CH_4 (Urano: ~2%
Netuno ~3%)
Traços de NH_3 .

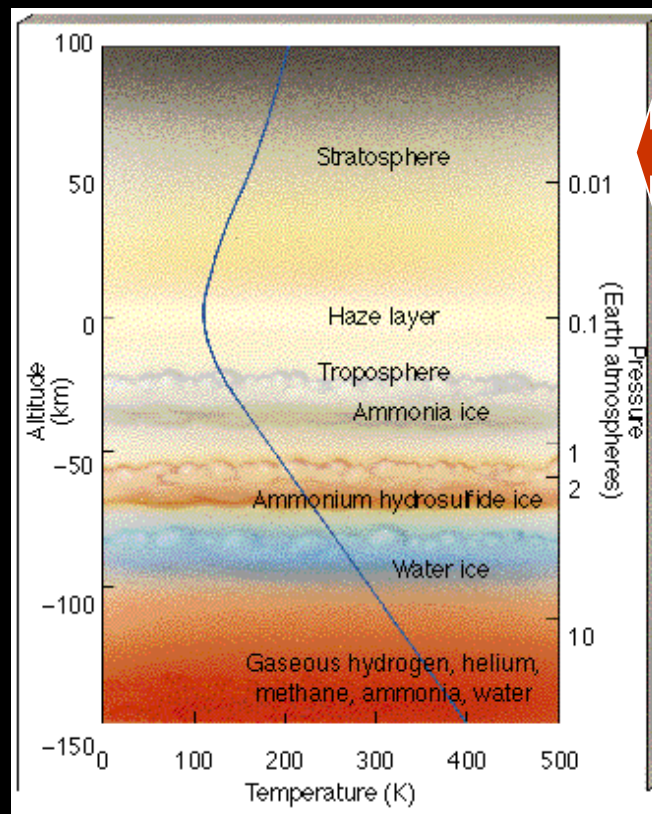
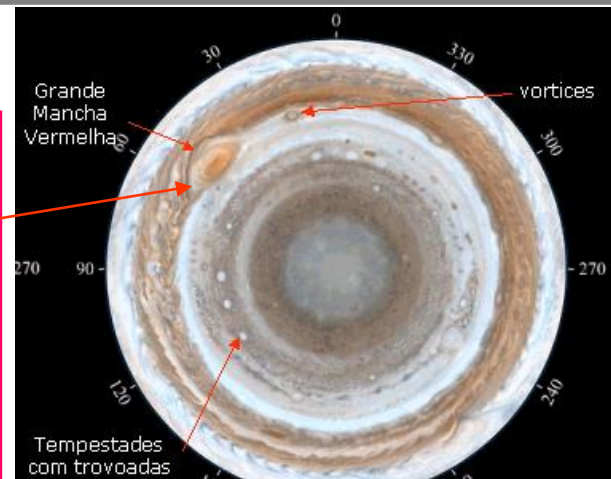
As atmosferas planetárias



As atmosferas planetárias



Grande Mancha Vermelha



JÚPITER

$$V_{\text{escape}} = 59,5 \text{ km/s}$$

H (~86,1), H_e (~13,8), traços de CH₄, NH₃ e vapor de H₂O

SATURNO

$$V_{\text{escape}} = 35,5 \text{ km/s}$$

H (~92,4), H_e (~7,4), traços de CH₄ (~0,2), NH₃ (~0,02).

URANO E NETUNO

H (~84), He (~14) e
CH₄ (Urano: ~2%
Netuno ~3%)
Traços de NH₃.