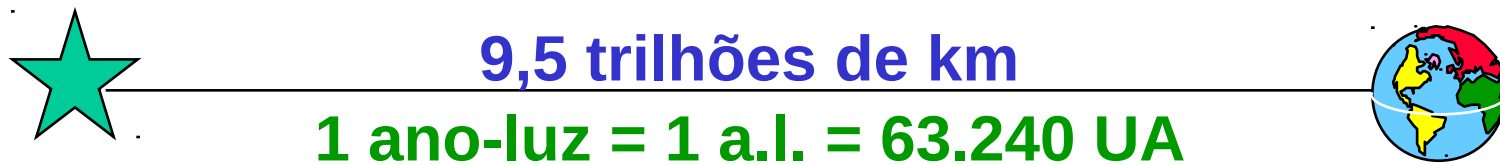
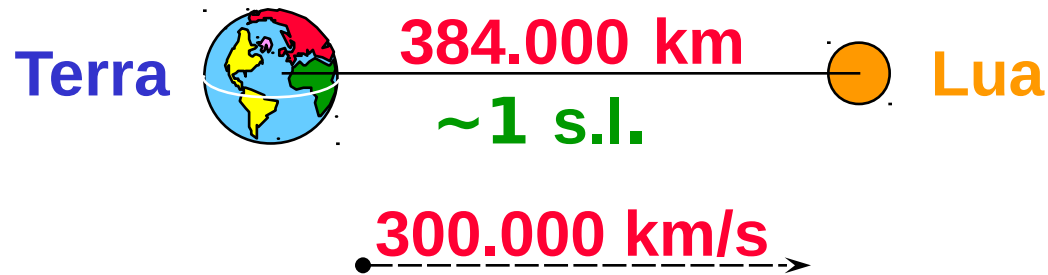


Sistema Solar e Cosmogonia

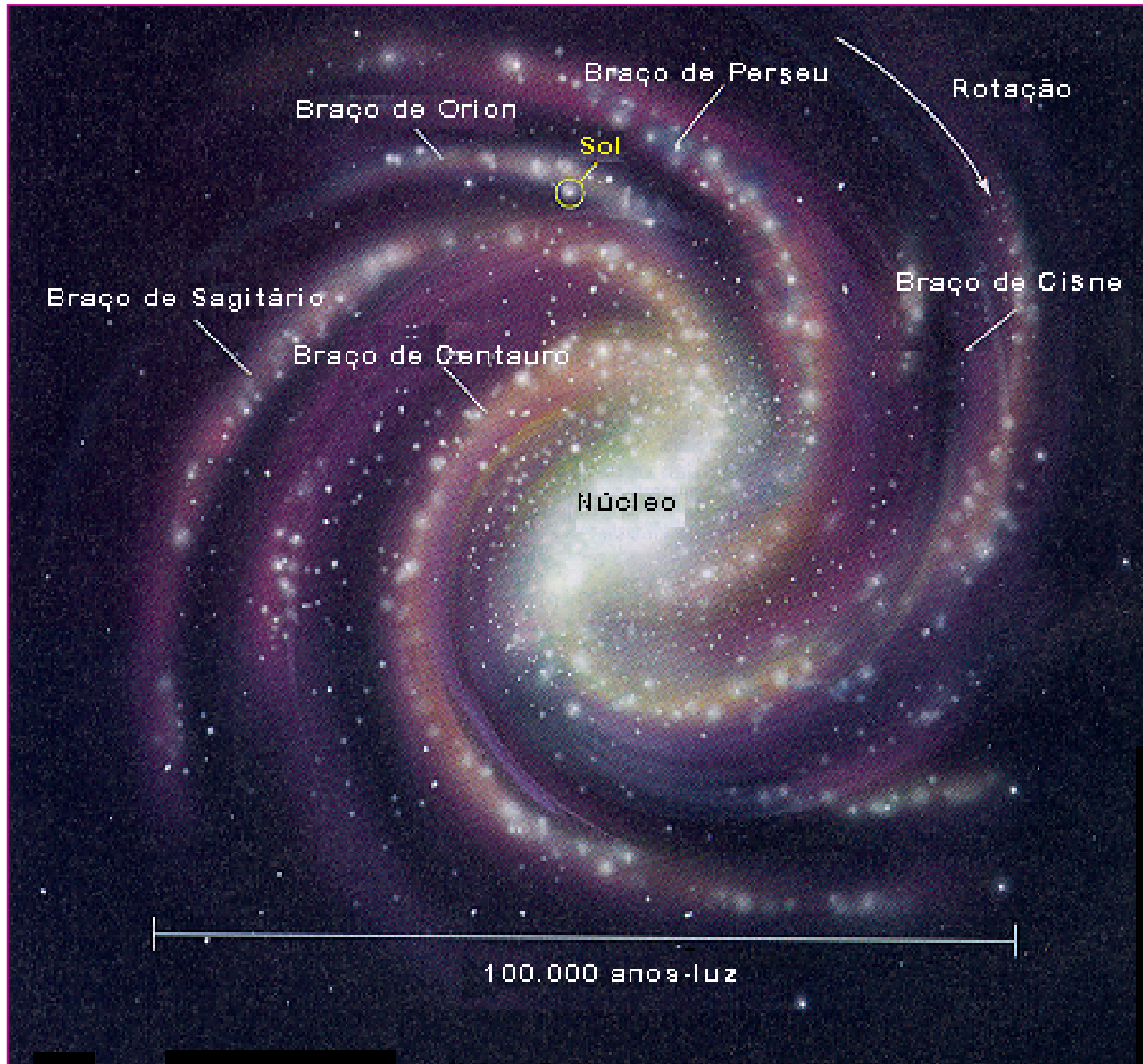
Cap. 3

- **Introductory Astronomy & Astrophysics, M. Zeilek, S. A. Gregory & E. v. P. Smith (Caps. 5, 6, e 7)**
- **Apostila, J. Gregorio-Hetem, V. Jatenco-Pereira, C. Mendes de Oliveira
(www.iag.usp.br/~dalpino/aga215)**
- **Agradecimentos: E. M. de Gouveia Dal Pino**

Unidades de distância



O Sistema Solar na Galaxia

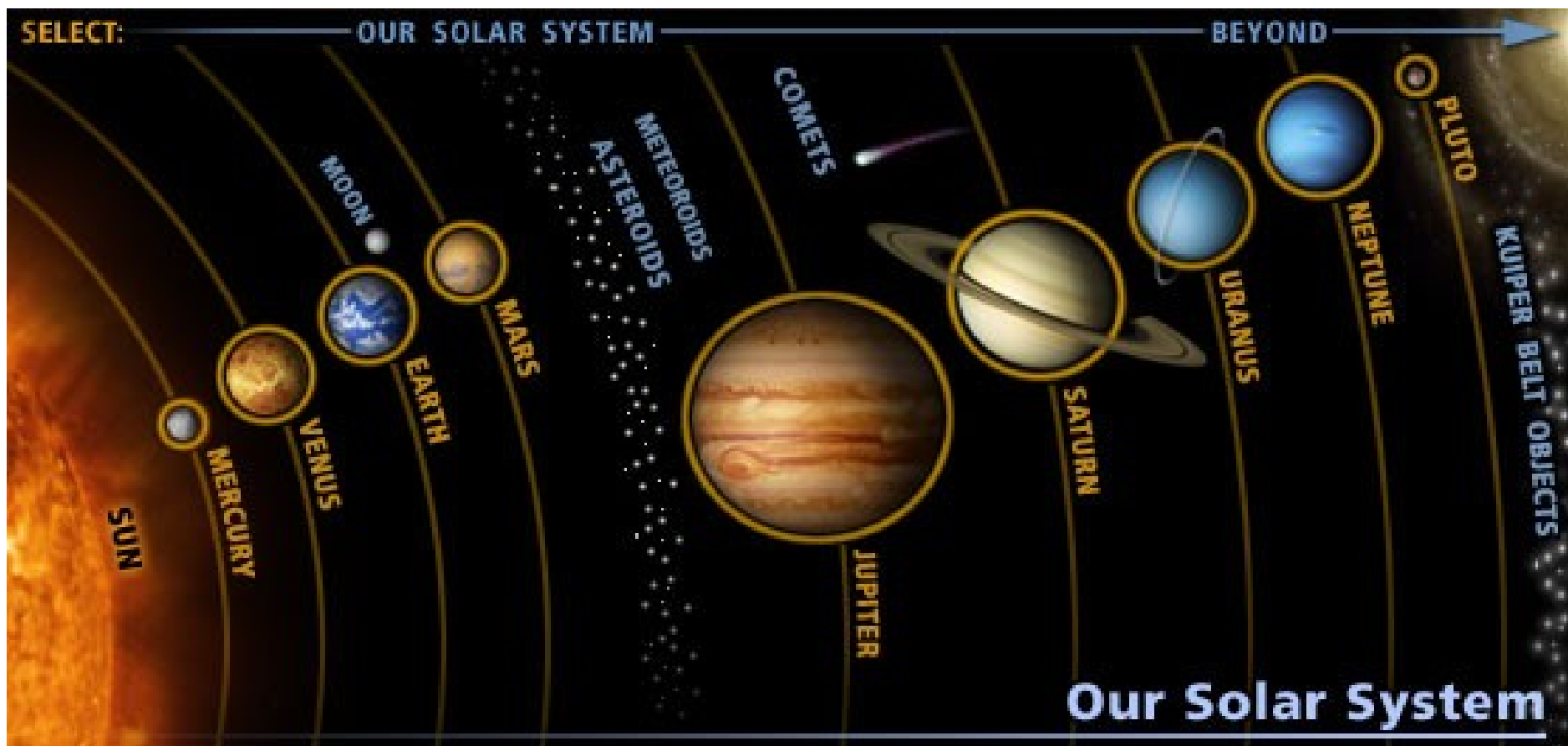


1 ano-luz

= $9,46 \times 10^{12}$ km

Componentes do sistema solar

Sol, 8 Planetas + Plutão, Corpos Menores (63 Satélites, Anéis, Asteróides, Cometas, Meteoritos e Meteóros, Gás e Poeira Zodiacal).



Propriedades dos Planetas

- **Distâncias**

determináveis pelas leis de Kepler: $P^2 = k d^3$

- sabemos a ESCALA do SS:

$$1 \text{ UA} = d(\text{T-S}) = 1,496 \times 10^8 \text{ km}$$

outro método: medidas de ida-volta de sinal de radar

distancia Terra-Venus:

$$d(\text{T-V}) = c \Delta t / 2$$

Propriedades dos Planetas

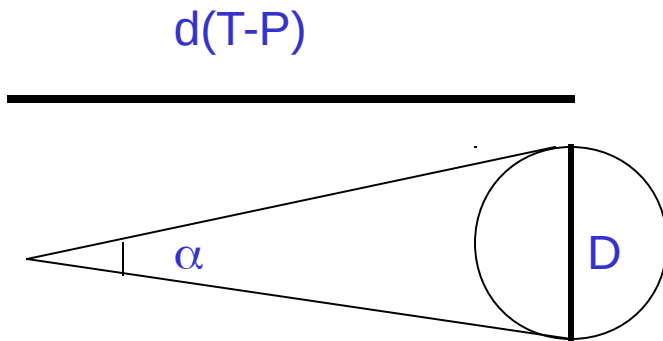
Diâmetros dos Planetas (D)

Sabendo $d(T-P)$ e medindo diâmetro angular aparente do planeta:

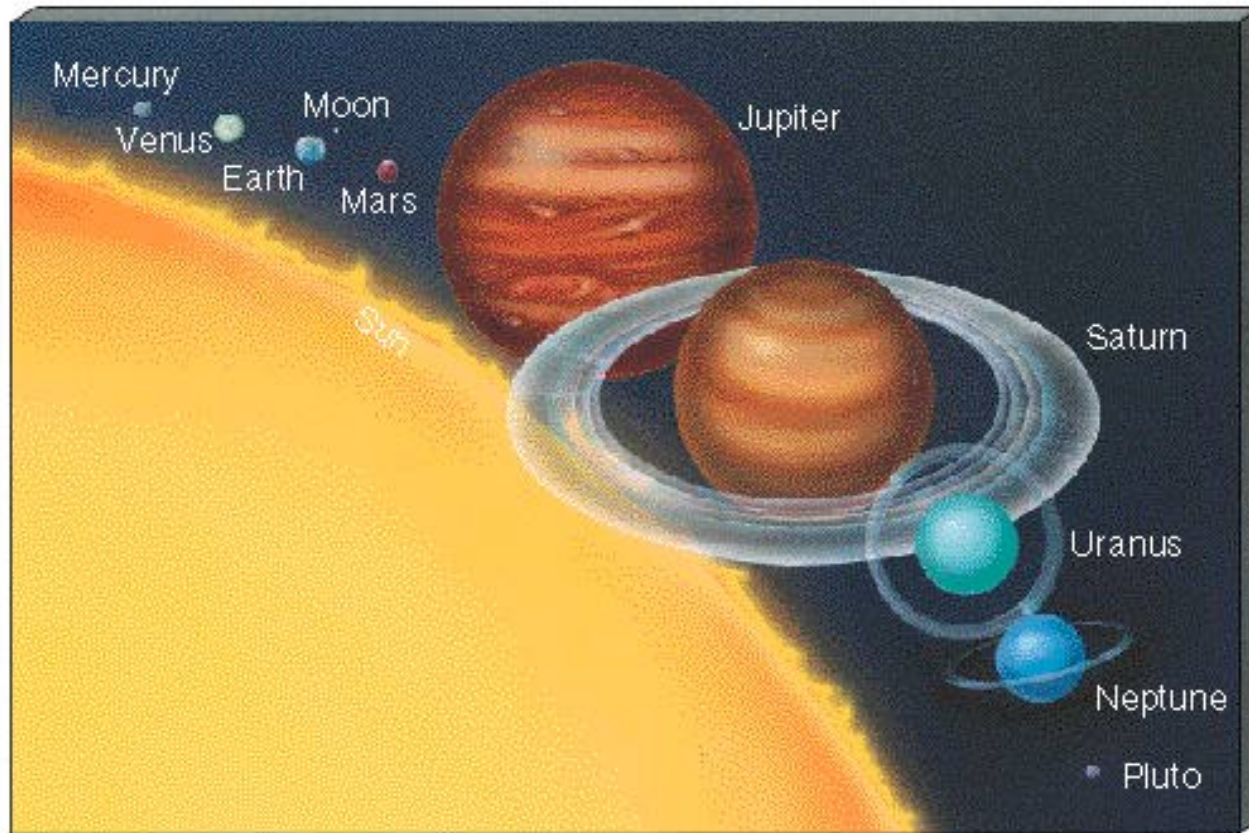
$$D / d(T-P) = \alpha(\text{rad})$$

$$D = d(T-P) \alpha(\text{rad})$$

$$R(L) = D/2$$



Tamanhos relativos dos Planetas



Propriedades dos Planetas

Massas:

- Medindo-se força gravitacional do planeta sobre 1 satélite seu ou artificial (**Lei de Kepler**)
- medindo distorções que planeta causa nas orbitas de outros (ex. Mercurio e Venus que nao possuem satelites)

$$F_G = \frac{G m M_p}{d^2} = \frac{m v^2}{d}$$

v: velocidade orbital

m : massa do satellite

d: distancia planeta-satelite

Massa (Sol) = 1000 Massa(Jupiter)

Massa do SS: M(Sol) = 99,87% M (total do SS)

Propriedades Gerais dos Planetas

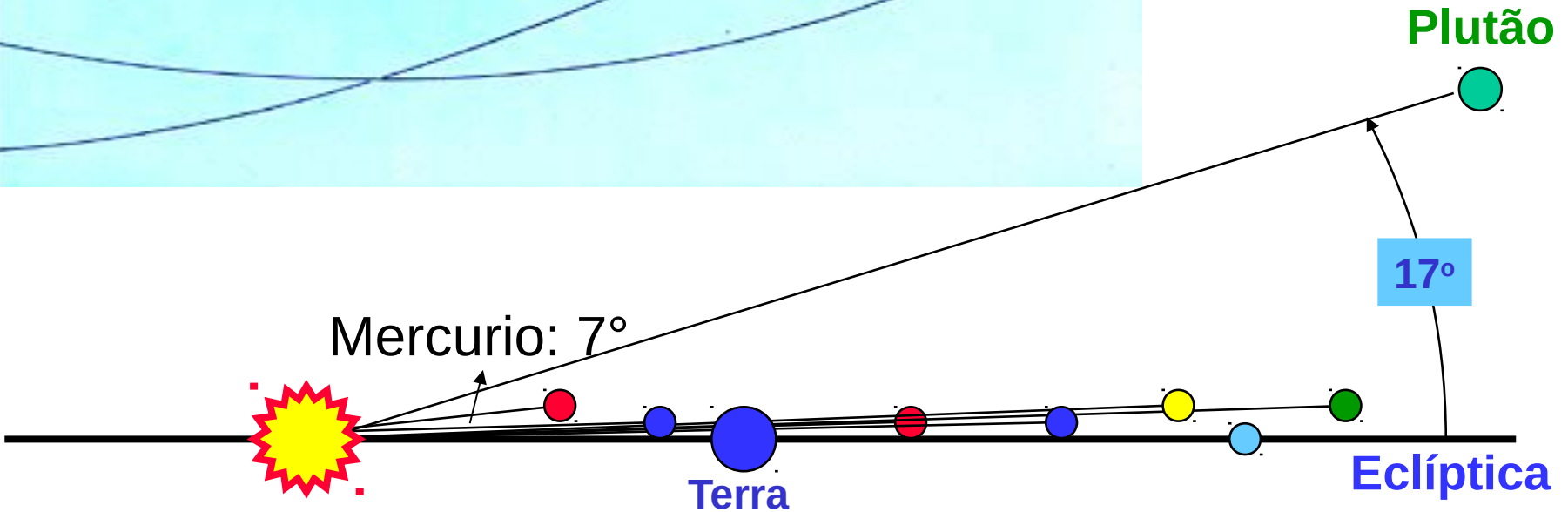
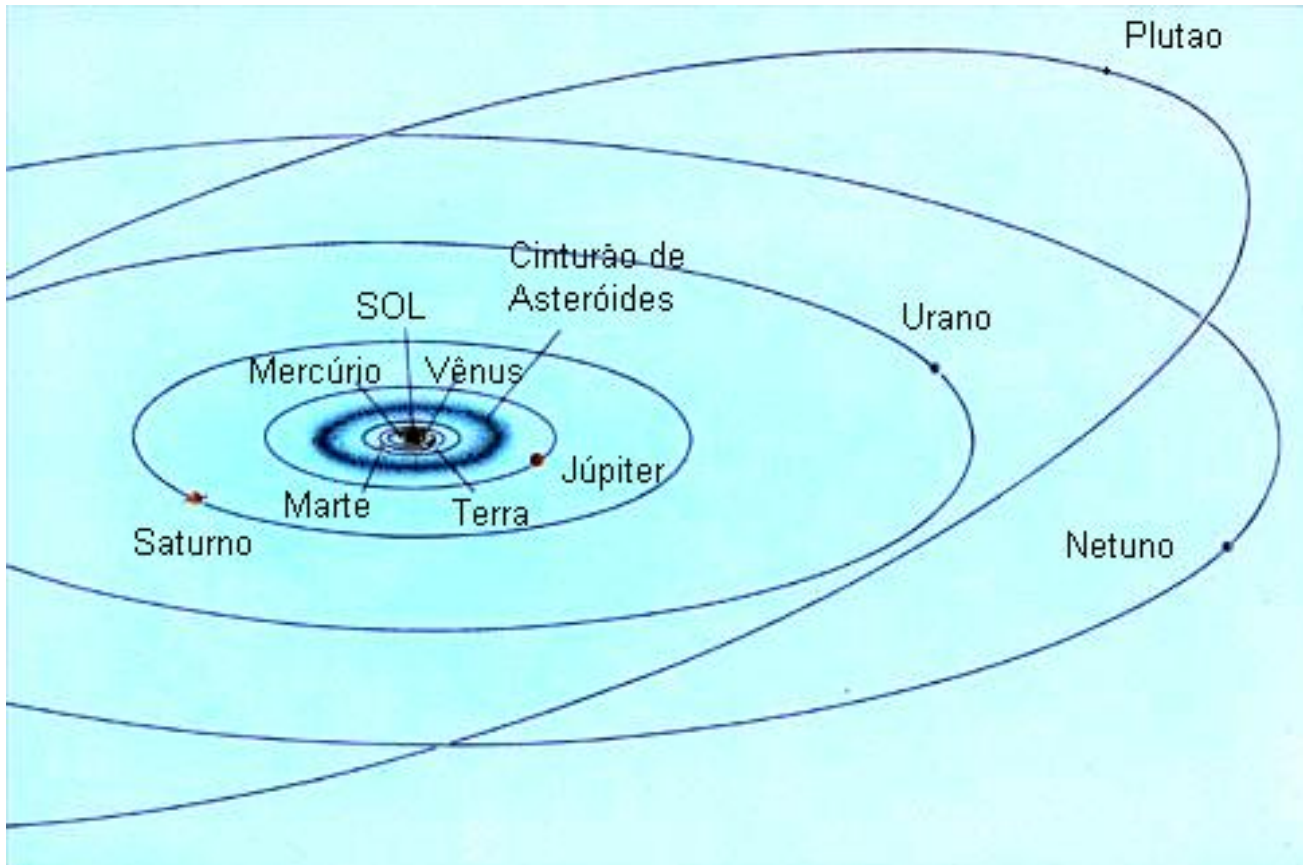
	<i>Orbit</i>	<i>Orbit</i>				
	<i>Semi-Major</i>	<i>Period</i>	<i>Mass</i>	<i>Radius</i>	<i>Number</i>	<i>Average</i>
	<i>Axis</i>	(Earth	(Earth	(Earth	<i>of Known</i>	<i>Density</i>
<i>Object</i>	(A.U.)	years)	masses)	radii)	<i>Moons</i>	(kg/m ³)
Mercury	0.39	0.24	0.055	0.38	0	5400
Venus	0.72	0.62	0.81	0.95	0	5200
Earth	1.0	1.0	1.0	1.0	1	5500
Moon	1.0	--	0.012	0.27	--	3300
Mars	1.5	1.9	0.11	0.53	2	3900
Jupiter	5.2	11.9	318	11.2	16	1300
Saturn	9.5	29.5	95	9.5	20	700
Uranus	19.2	84	15	4.0	15	1200
Neptune	30.1	165	17	3.9	8	1700
Pluto	39.5	249	0.003	0.2	1	2300
Sun	--	--	332,000	109	--	1400

Órbitas não coplanares

Com exceção de Mercúrio e Plutão, as órbitas dos planetas estão ~ no mesmo plano (Eclíptica).

Dimensão total do sistema solar:

~ 80 U.A = 11 h.l..

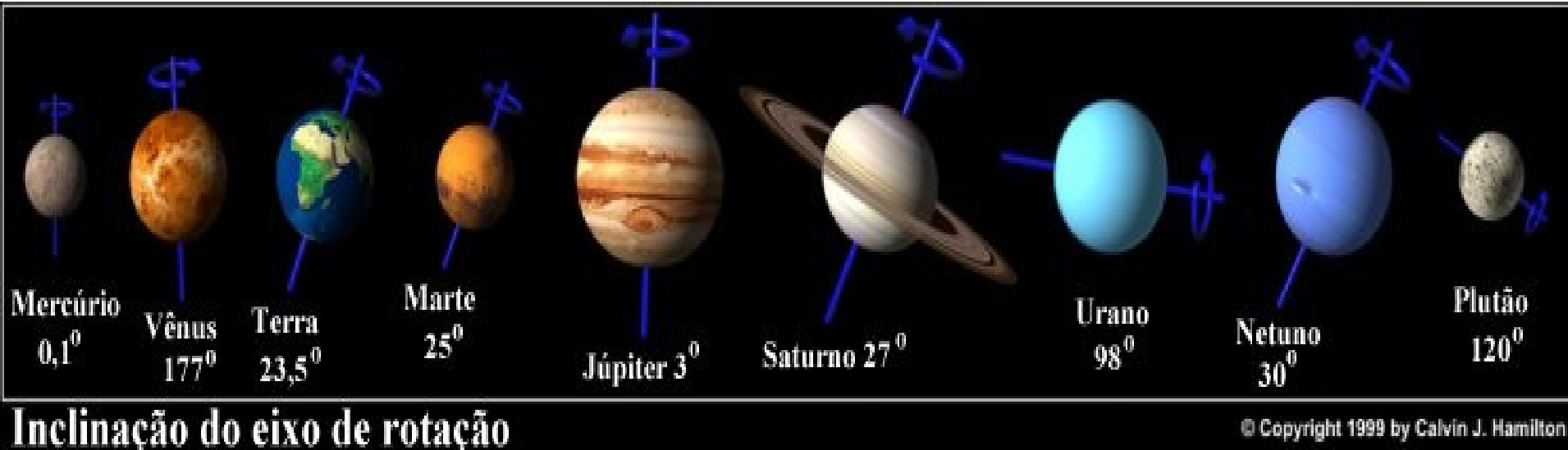


Classificação dos planetas

Terrestres (telúricos): Mercúrio, Vênus, Terra e Marte.

Jovianos: Júpiter, Saturno, Urano e Netuno.

Plutão não se enquadra bem em nenhuma das categorias.



Propriedades dos planetas Terrestres e Jovianos

Características	Terrestres	Jovianos
Massa	pequena ($\leq 1M_{\oplus}$)	grande ($\geq 14M_{\oplus}$)
Tamanho	pequeno	grande
Densidade	grande (5000 kg/m ³)	pequena (~ 1000 kg/m ³)
Distância ao Sol	pequena	grande
Composição Química	rochas e metais pesados silicatos, óxidos, Ni, Fe	elementos leves H, He, água, CO ₂ , metano, amônia
N.º de satélites	poucos ou nenhum	muitos

Lembrete - densidades: água: 1000 kg/m³ = 1 g/cm³

Terra (media): 5500 kg/m³

ferro: 8000 kg/m³

atmosfera Terra: alguns 1 kg/m³

PLANETAS TELÚRICOS

- Rotação de Mercúrio
- Atmosfera de Vênus e Marte
- Superfícies
- Água em Marte?
- Efeito Estufa em Vênus
- As Luas de Marte

Propriedades Físicas e Orbitais

Algumas propriedades dos planetas telúricos e da Lua

	<i>Massa</i>		<i>Raio</i>		<i>Densidade</i>	<i>Gravidade Superficial</i>
	<i>(kg)</i>	<i>Terra=1</i>	<i>(km)</i>	<i>Terra=1</i>	<i>(kg/m³)</i>	<i>Terra=1</i>
Mercúrio	$3,3 \cdot 10^{23}$	0,055	2400	0,38	5400	0,38
Vênus	$4,9 \cdot 10^{24}$	0,82	6100	0,95	5300	0,90
Terra	$6,0 \cdot 10^{24}$	1,00	6400	1,00	5500	1,00
Marte	$6,4 \cdot 10^{23}$	0,11	3400	0,53	3900	0,38
Lua	$7,3 \cdot 10^{22}$	0,012	1700	0,27	3300	0,17

Algumas propriedades dos planetas telúricos e da Lua

	<i>Velocidade de Escape</i>	<i>Periodo de Rotação</i>	<i>Temperatura Superficial</i>	<i>Pressão Atmosférica</i>
	<i>(km/s)</i>	<i>dias</i>	<i>(K)</i>	<i>Terra=1</i>
Mercúrio	4.3	59	100 700	--
Venus	10.4	-243*	730	90
Terra	11.2	1.00	290	1.0
Marte	5.0	1.03	180 270	0.007
Lua	2.4	27.3	100 400	--

* O sinal negativo indica rotação retrógrada.

Escala Kelvin (K) = graus Celsius + 273

0 K (todos os movimentos cessam)

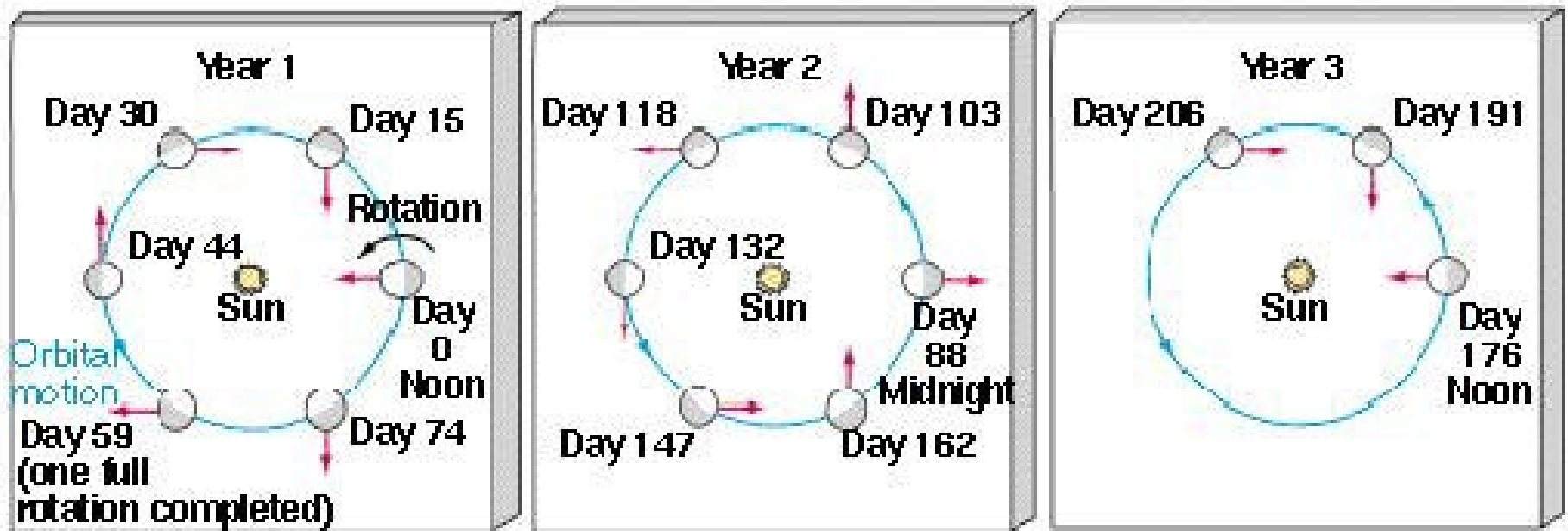
273 K (a água congela)

373 K (a água ferve)

A curiosa rotação de Mercúrio

Os movimentos orbital e de rotação combinados para produzir 1 dia que dura 2 anos.

$1 \text{ ano}_{\text{Mercúrio}} = 88 \text{ dias}_{\text{Terra}}$; $1 \text{ d}_{\text{Mercúrio}} = 176 \text{ dias}_{\text{Terra}}$

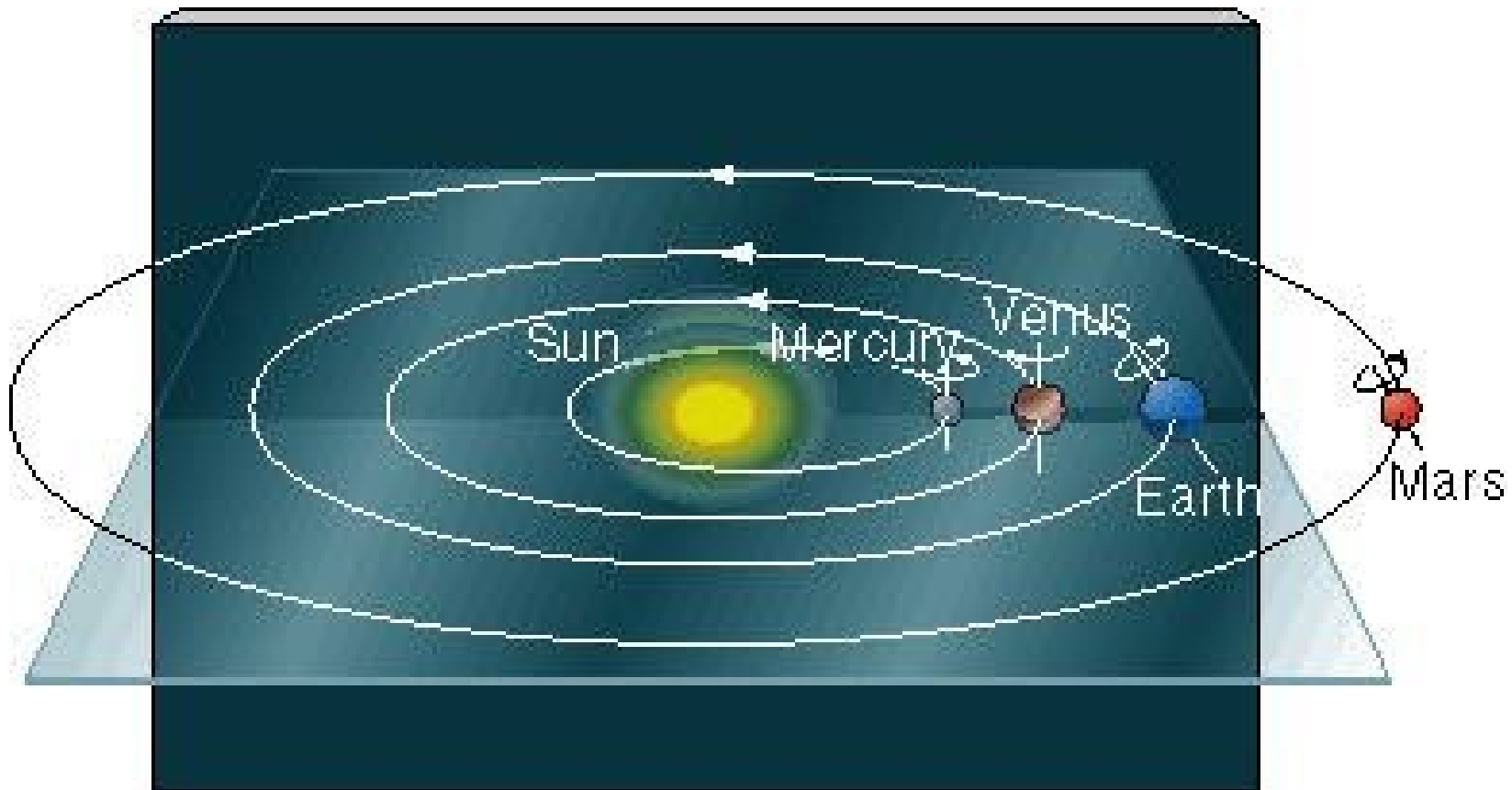


A seta indica a posição de um observador na superfície do planeta. O período de rotação “real” é de 59 dias.

Rotação e Revolução dos planetas telúricos

Marte tem dia e estações ~ Terra, inclinação $25,2^\circ$.

Planeta	Rotação	Sentido
Mercúrio	lenta	Direto
Vênus	rápida	Retrógrado
Terra	rápida	Direto
Marte	rápida	Direto



Atmosferas

- **Mercúrio:** $T \uparrow$ e $M \downarrow \Rightarrow$ nenhuma atmosfera.
Não retém calor $\Rightarrow T \downarrow$ a noite ($\sim 100\text{K}$).



Mercúrio visto a partir da Terra (grande telescópio).
Dificuldades de se observar, devido à proximidade do Sol.

Atmosferas



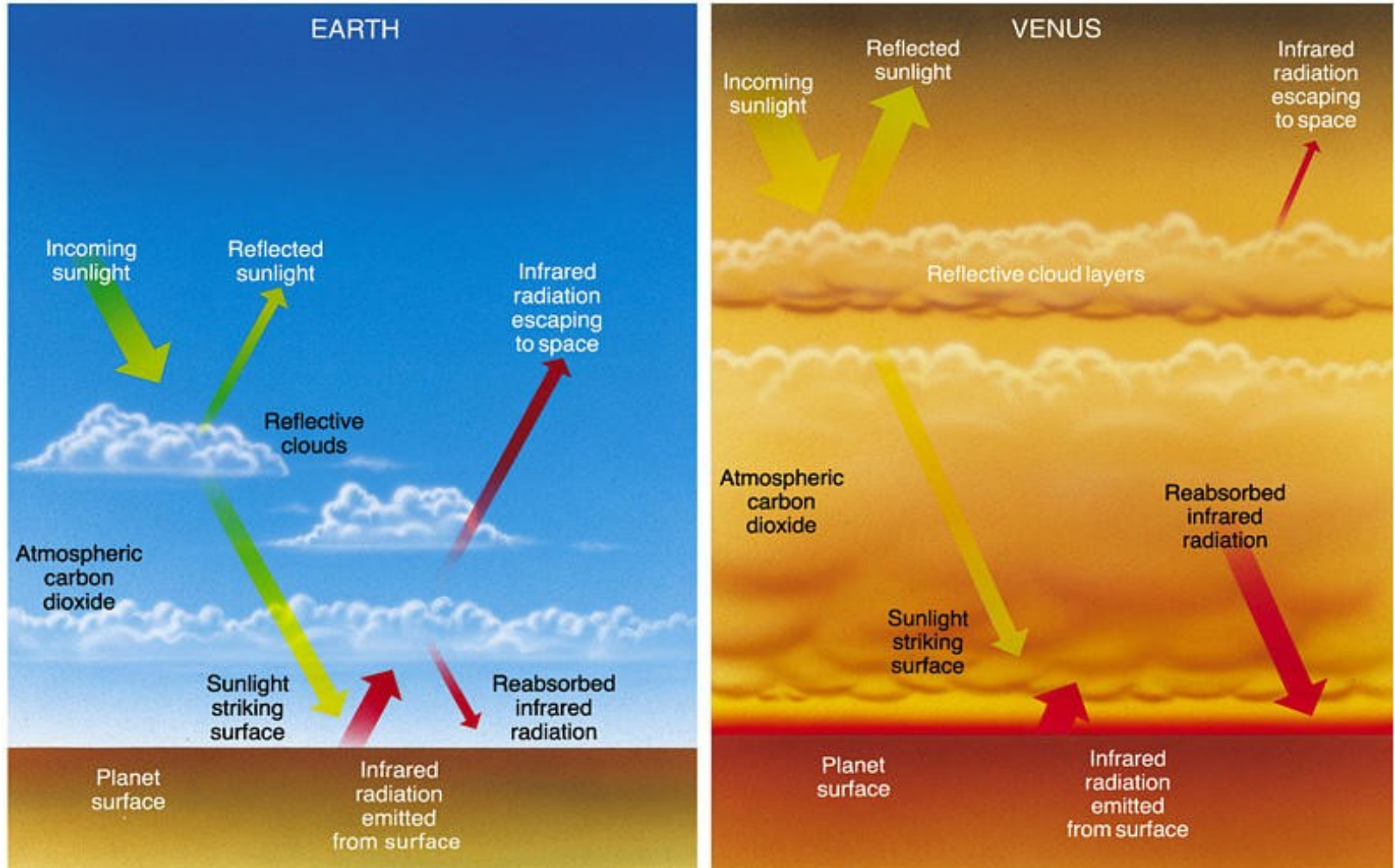
Vênus: atmosfera mais alta e de maior massa que a da Terra.

- Pressão = $90 P_{\text{terra}}$
- $T_{\text{superficial}} = 730 \text{ K}$
- CO_2 (96,5%) e N_2 (3,5%)
- Nuvens c/ gotas de ácido sulfúrico.

Foto obtida pela sonda Pioneer a uma distância de 200.000 km de Vênus.

Efeito Estufa em Vênus

Grande concentração de CO_2 impede o escape da radiação infravermelha causando o efeito estufa que provoca o aumento da temperatura no planeta. Efeito mais forte em Vênus que na Terra.



Atmosferas



Imagem obtida em agosto de 2003
pelo HST.

Marte: atmosfera 13.000 vezes mais fina do que em Vênus.

- Pressão = $1/150 P_{\text{Terra}}$
- $T_{\text{superficial}} = 50\text{K} < T_{\text{Terra}}$
- CO_2 (95,3%) , N_2 (2,7%) ,
Ar (1,6%), CO, O_2 , H_2O .

Superfície - Mercúrio

Muito similar à Lua. Crateras não tão altas. Não mostra grandes extensões de lavas (mares lunares).

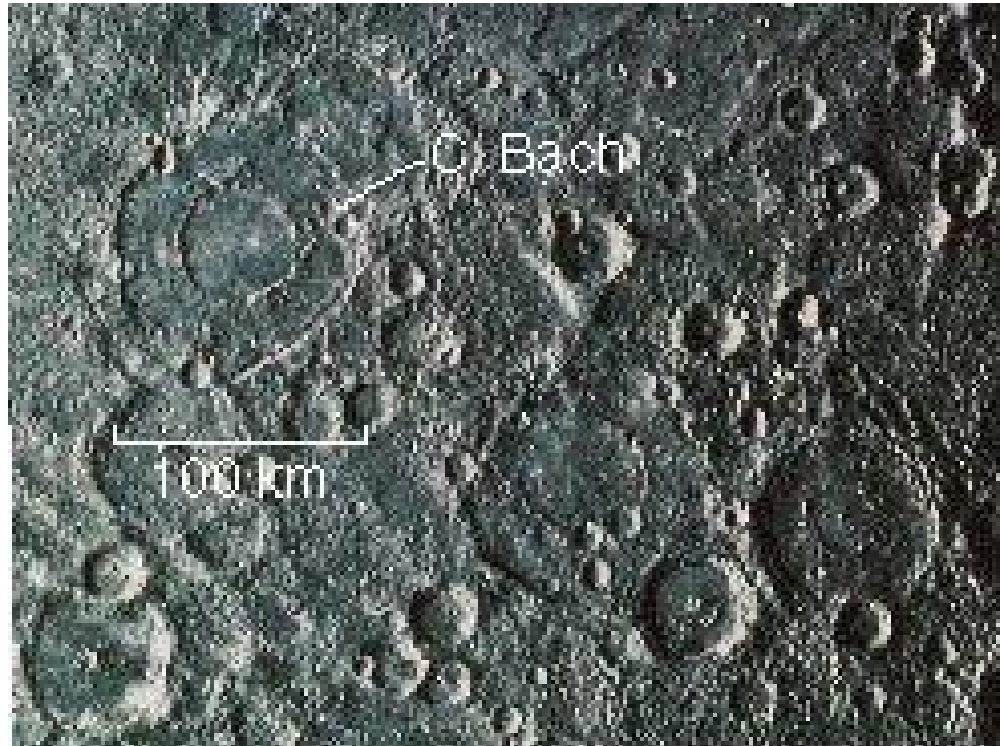
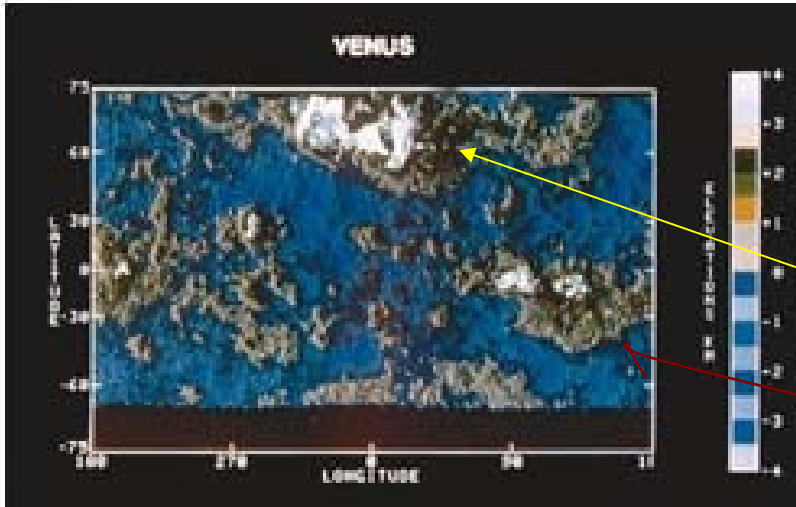
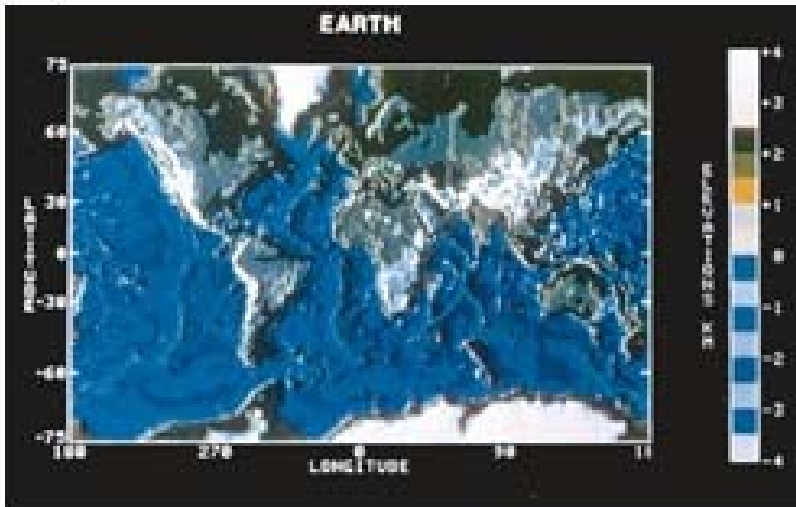


Foto Mariner 10: distante a 200.000 km e a 20.000 km de Mercúrio.

Superfície - Vênus



(a)



(b)

Duas estruturas principais (“continentes”):
Ishtar e Afrodite.

(a) Imagem de radar, com base nos dados da sonda Pionner. (b) Mapa similar da Terra.



Superfície - Vênus



O maior
“continente”
Afrodite.

Mosaico obtido em
1995 pela sonda
Magalhães.

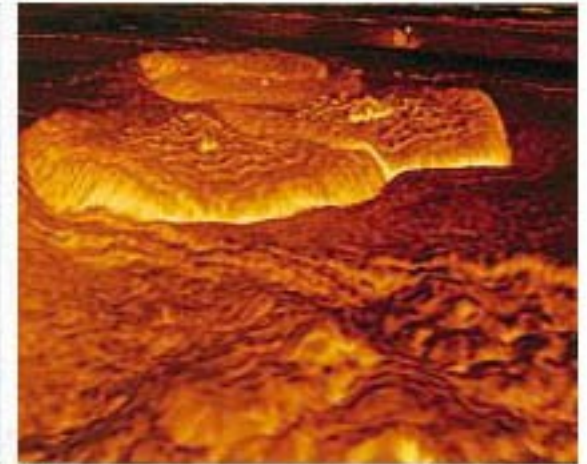
Superfície - Vênus (Vulcanismo e Crateras)

(a) Estruturas em forma de domo resultantes de rocha derretida, resfriada, com rachaduras.



(a)

(b) Simulação de computador reproduzindo os domos



(b)

(c) imagem do vulcão Gula visto pela Magalhães.



(c)

Superfície - Marte



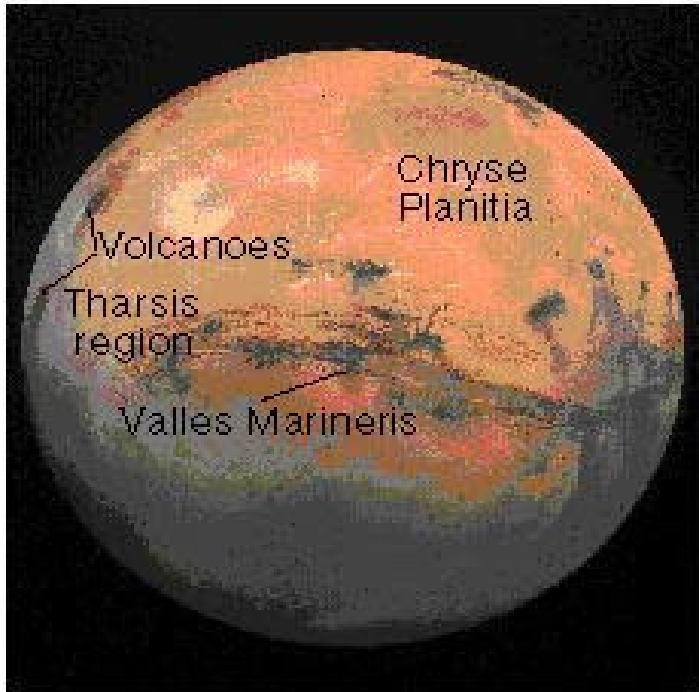
(a)



(b)

(a) Imagem do telescópio Espacial Hubble (1995). (b) Marte visto pela Viking (1976). Capas polares CO_2 congelado.

Superfície - Marte



Região Tharsis (extensão 5.000 km, altura ~10 km) e seus dois vulcões (Monte Olimpo 700 x 25 km). No centro domina o vale Mariner (4000 x 120 x 7 km).



Vista sob a perspectiva da sonda Viking 1: terreno **rochoso avermelhado (óxido de ferro)**. Céu rosa pálido.

Água em Marte?

(a,b) Imagens de canais interpretados como sendo causados por fluxo de água há 4 bilhões de anos.



(a) 



(b) 

Água em Marte?

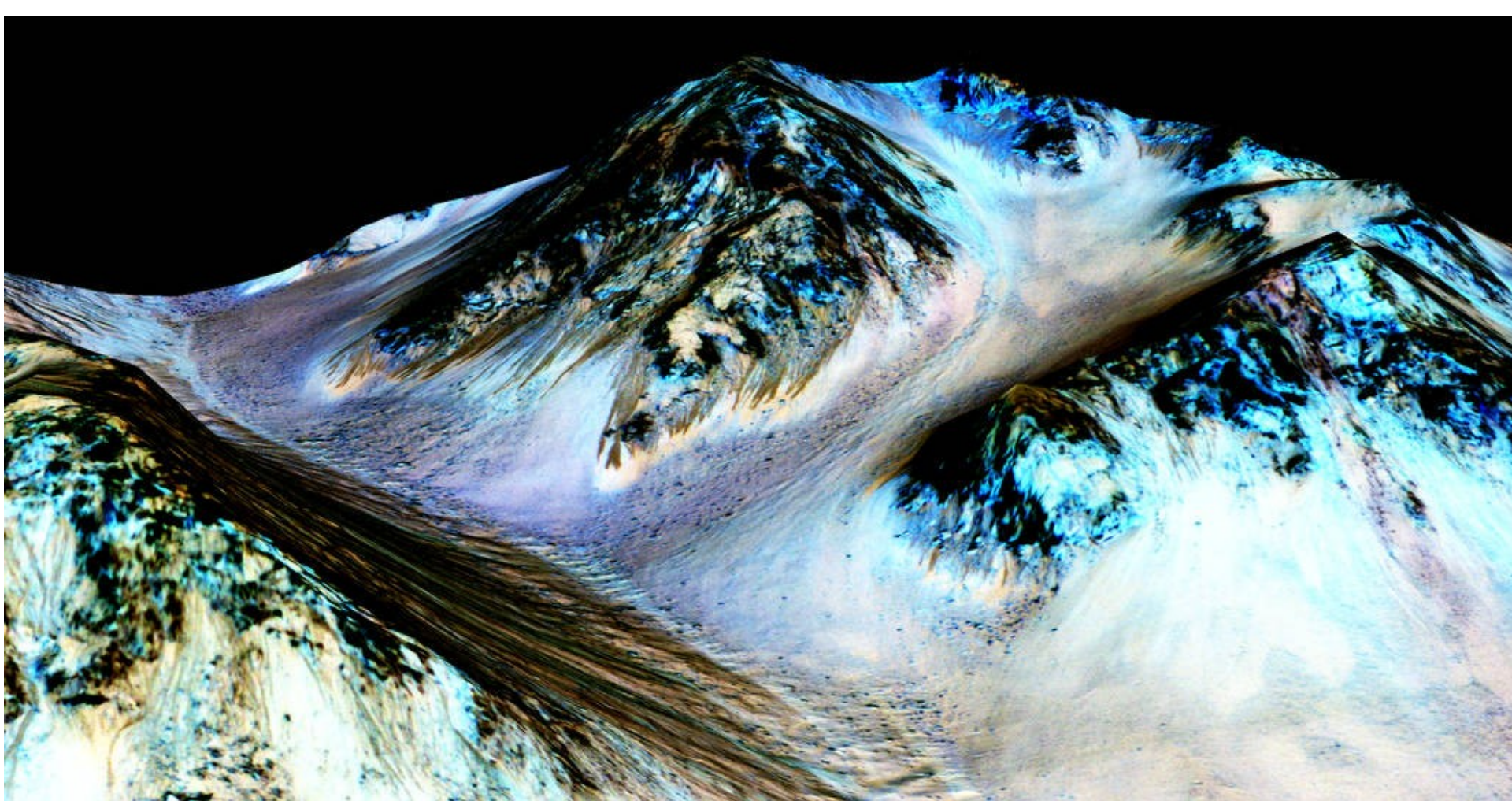


(a) Cratera lunar Copernicus.



(b) Yuty (18km de diâmetro) cratera do tipo “splash”.

Imagem da cratera de Yuty indica que o impacto de um meteorito teria derretido *uma camada de gelo (permafrost) onde estaria aprisionada a água de Marte.*



High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) camera on NASA's Mars Reconnaissance Orbiter.

As regiões escuras: "recurring slope lineae" ou RSL, são formadas por correntes de água em algumas estações.

Observações com o Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer, encontraram sais hidratados nessas regiões.

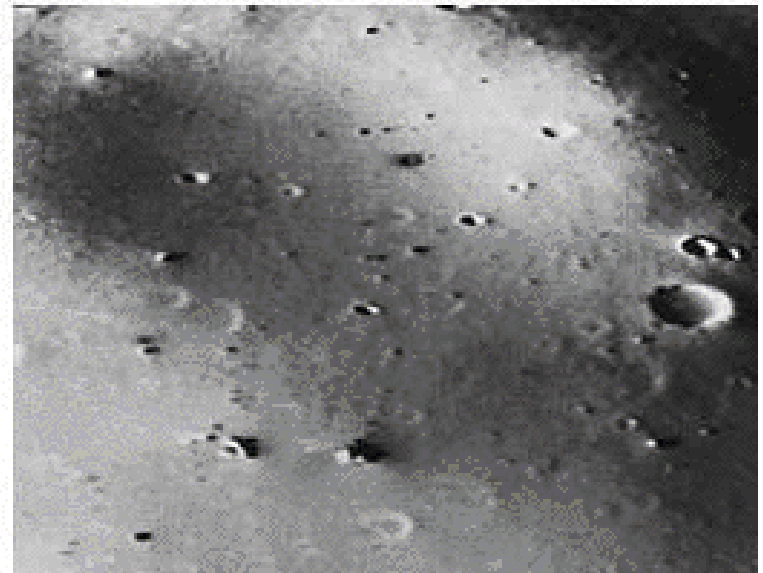
As Luas de Marte

Phobos e Deimos foram descobertas em 1877 por A. Hall. São irregulares e marcadas por crateras.



(a)

(a) Phobos (28 x 20 km),
Mariner 9.



(b)

(b) Deimos (16 x 10km).
Vista de 2 km, Viking.



PLANETAS JOVIANOS

- Júpiter e Saturno vistos a partir da Terra e vistos a partir de sondas espaciais
- A descoberta de Urano e Netuno
- Propriedades Gerais
- Atmosferas

Observações a partir da Terra

Júpiter



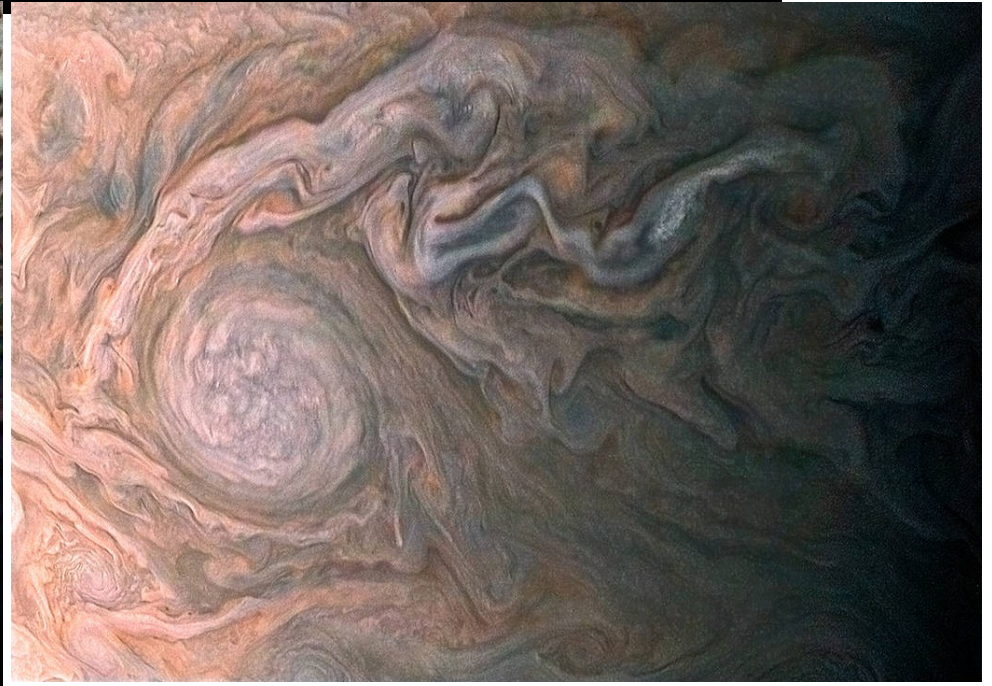
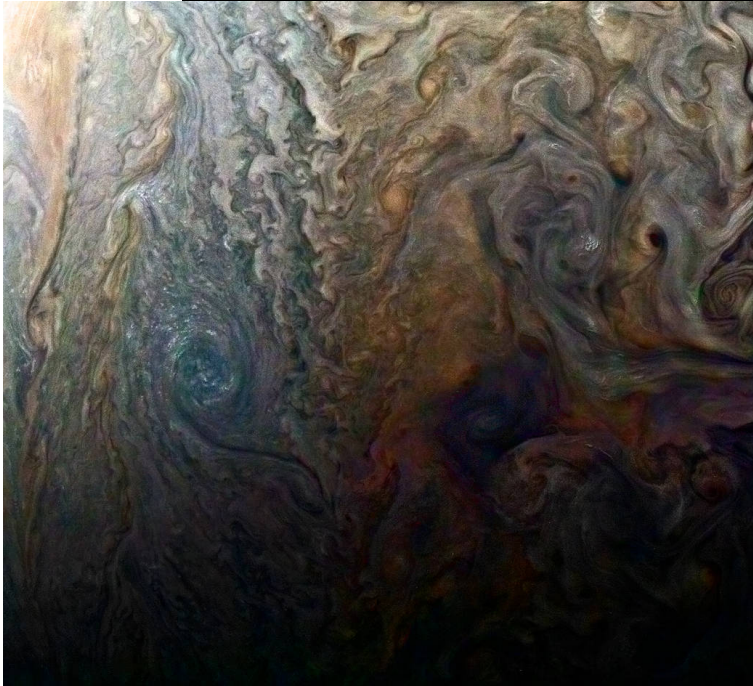
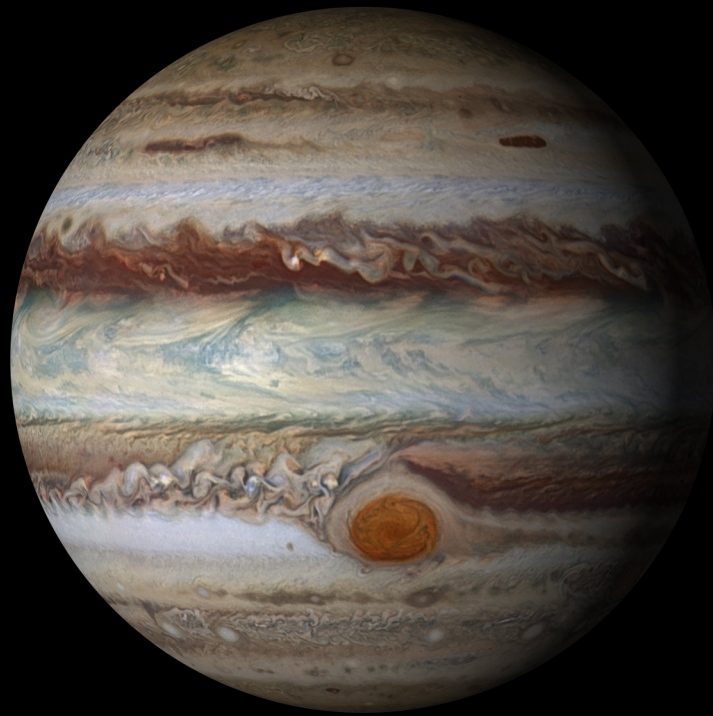
(a)



(b)



(a) Fotografia obtida com telescópio no solo mostrando Júpiter e as 4 luas Galileanas; (b) Imagem do HST em cores verdadeiras. Estruturas de \sim centenas de km são observáveis.



Observações a partir da Terra

Saturno



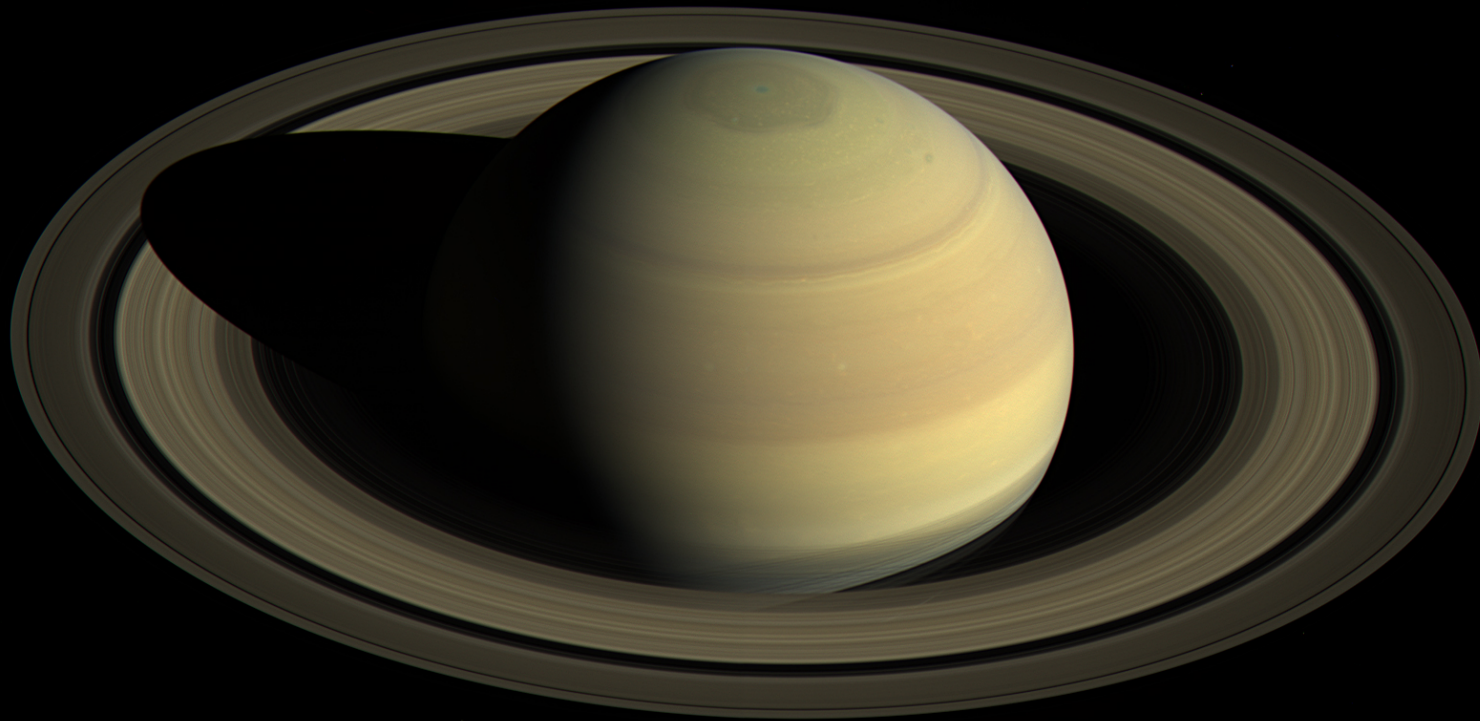
(a)



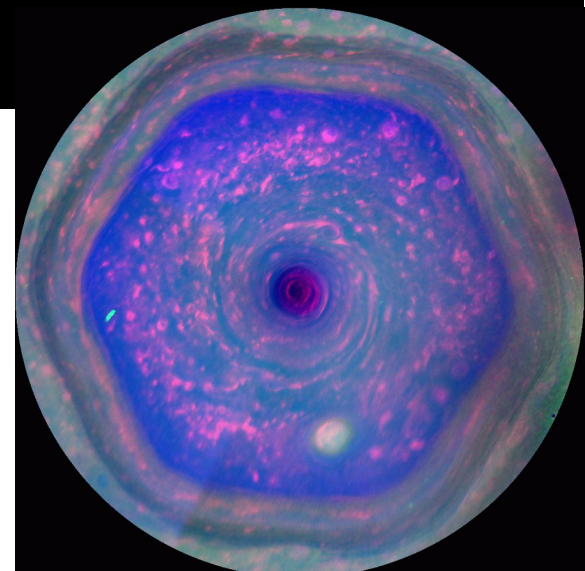
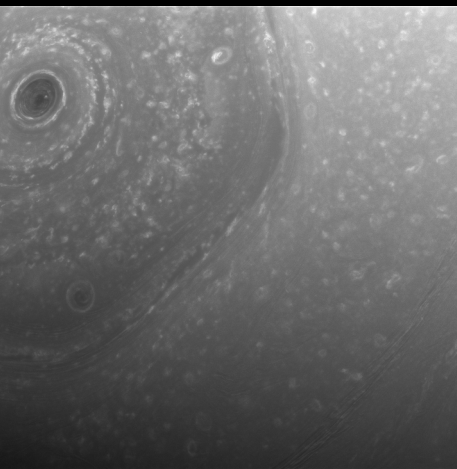
(b)



(a) Uma das melhores fotos de Saturno, obtida a partir de telescópio na superfície da Terra; (b) imagem HST, com 700 km de resolução.



Imagens da sonda Cassini
Lançada em 1997
Chegou a Saturno em 2004



Descoberta de Urano

Herschel descobriu Urano em 1781.

Visto da Terra, mesmo com grande telescópio, aparece como pálido **disco esverdeado**. A partir de sonda espacial, uma atmosfera “lisa” pode ser observada.



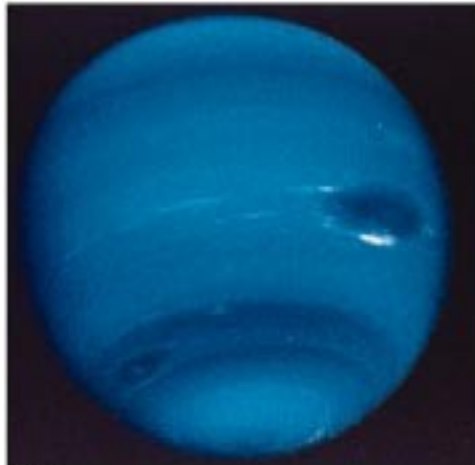
Descoberta de Netuno

- Verificou-se que a órbita de Urano não correspondia àquela prevista → um outro corpo, além do Sol exercia ação gravitacional (mais fraca) sobre Urano
- 1845: o matemático J. Adams resolveu o problema determinando a massa e o tamanho do novo planeta
- 1846: U. Leverrier independentemente chegou à mesma resposta.

Descoberta Netuno



(a)



(b)



(c)



Netuno não pode ser visto a olho nu. Com um grande telescópio, pode ser visto como um disco azulado.

(a) Netuno e duas de suas luas (setas); (b) visto pela Voyager2 a 1 milhão de km; (c) nuvens de 50 a 200 km.

Propriedades Gerais dos Planetas Jovianos

☿	<i>Massa</i> ☿		<i>Raio</i> ☿		<i>Densidade</i> ☿
	<i>(kg)</i> ☿	<i>Terra = 1</i> ☿	<i>(km)</i> ☿	<i>Terra = 1</i> ☿	<i>(kg/m³)</i> ☿
Terra☿	$6,0 \times 10^{24}$ ☿	1☿	6.400☿	1☿	5500☿
Jupiter☿	$1,9 \cdot 10^{27}$ ☿	318☿	71.000☿	11☿	1330☿
Saturno☿	$5,7 \cdot 10^{26}$ ☿	95☿	60.000☿	9,5☿	710☿
Urano☿	$8,7 \cdot 10^{25}$ ☿	15☿	26.000☿	4,0☿	1240☿
Netuno☿	$1,0 \cdot 10^{26}$ ☿	17☿	25.000☿	3,9☿	1670☿

Densidades médias

- **Júpiter e Saturno:**

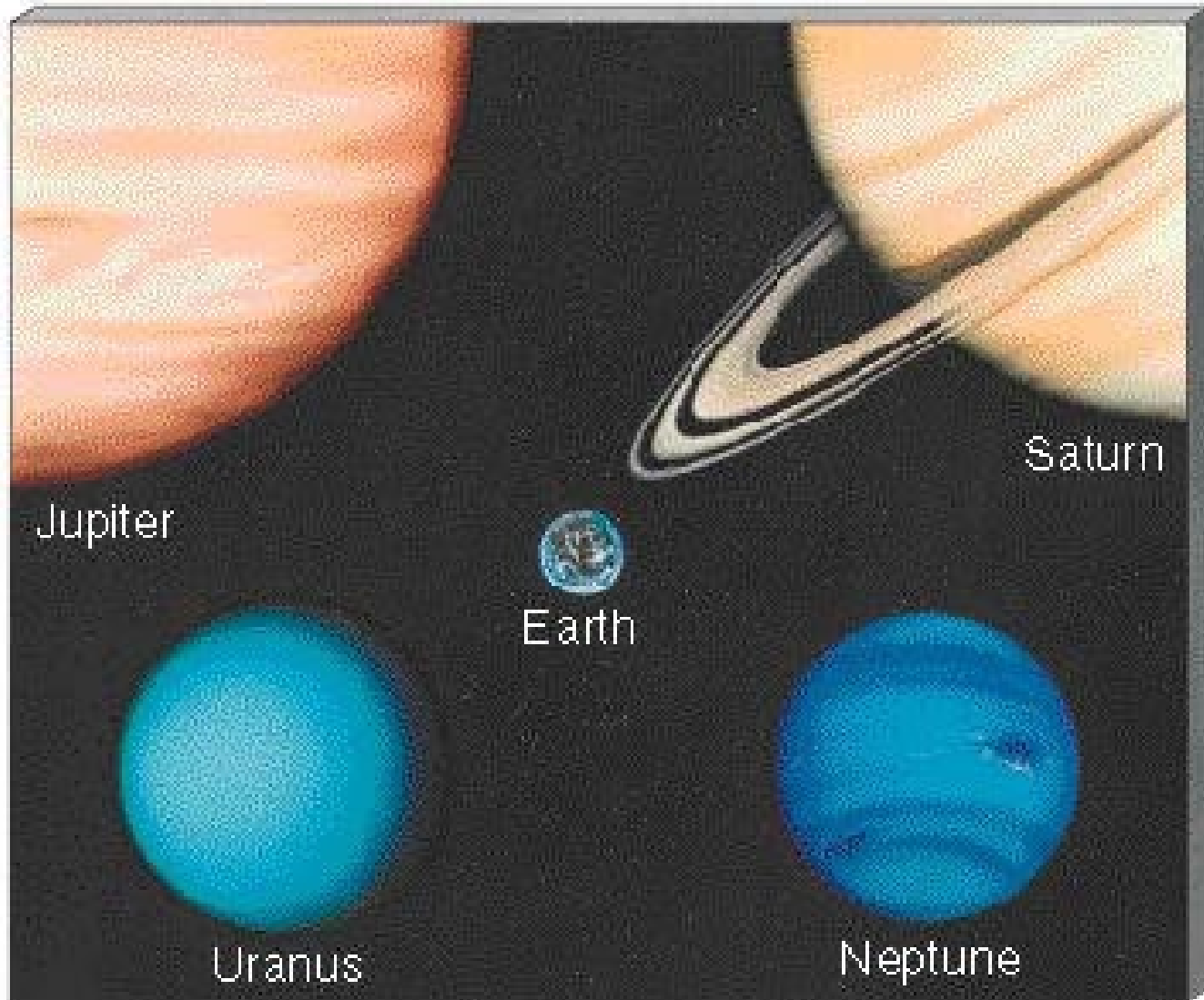
Os maiores em raio e massa

- **Urano e Netuno:**

A alta densidade média (\sim Jupiter) pode ser explicada pela presença de núcleo grande com material rochoso: 10 vezes mais massivo que Terra inteira.

Em **Júpiter e Saturno**: tais núcleos seriam similares mas comparativamente menores.

Escalas de Tamanhos dos Planetas Jovianos comparados com a Terra



Propriedades Gerais dos Planetas Jovianos

	<i>Velocidade de Escape</i>	<i>Período de Rotação</i>	<i>Inclinação Axial</i>	<i>Temperatura Superficial</i>	<i>Campo Magnético Superficial</i>
	<i>(km/s)</i>	<i>(dias)</i>	<i>(graus)</i>	<i>(K)</i>	<i>(Terra = 1)</i>
Terra	11	1	23	290	1
Júpiter	60	0,41	3	124	14
Saturno	36	0,43	27	97	0,7
Urano	21	-0,69*	98	58	0,7
Netuno	24	0,72	30	59	0,4

* Sinal negativo indica rotação retrógrada.

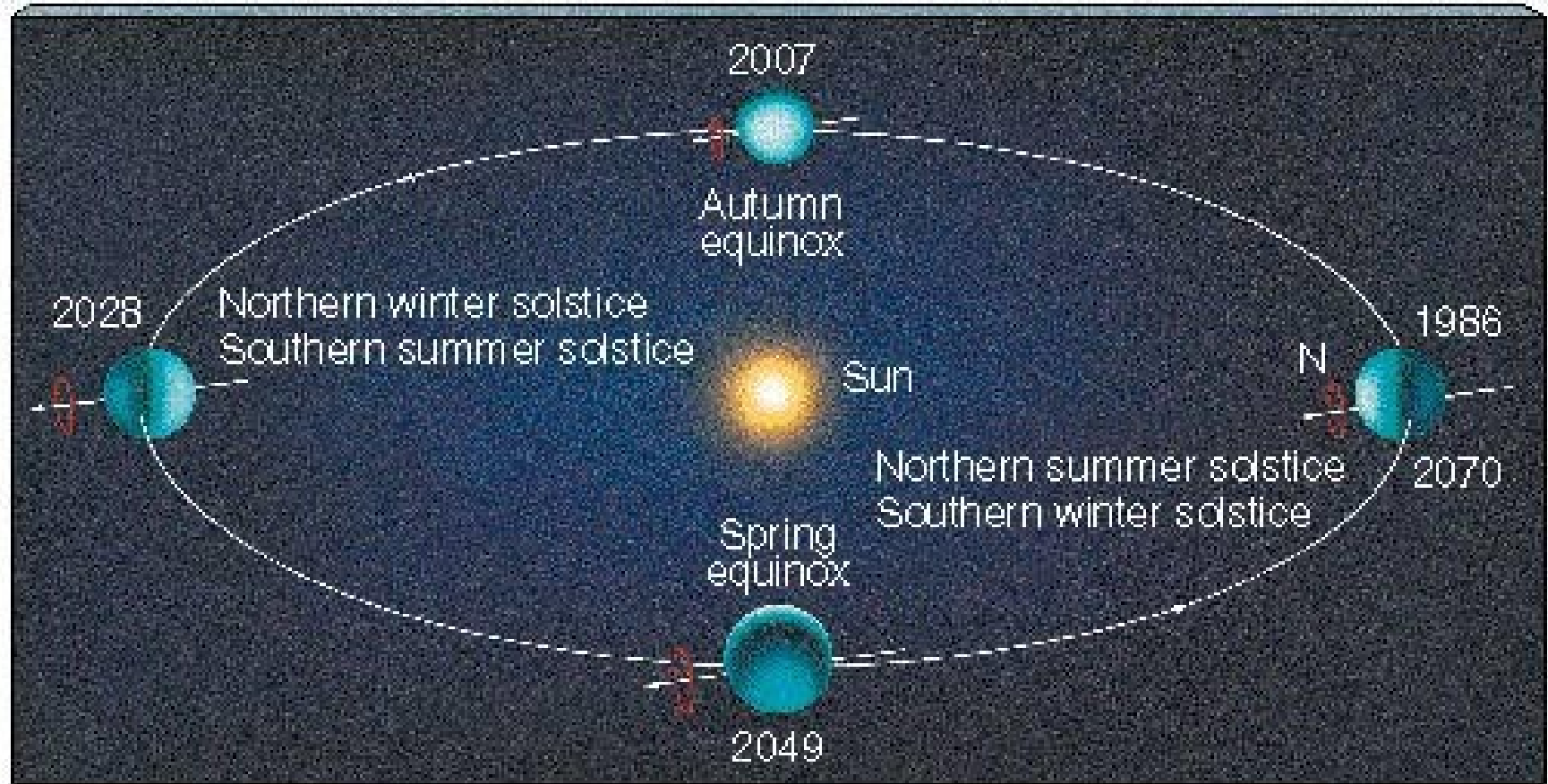
Rotação

- **Como medir rotação de planetas que não apresentam superfície sólida?**
- **Utiliza-se: rotação de estruturas da atmosfera (como mancha em Jupiter por ex.) - diferentes regiões giram a diferentes taxas \Rightarrow rotação diferencial**

Rotação

- **Júpiter:** $P_{\text{equador}} = 9^{\text{h}} 50^{\text{m}}$; latitudes polares: 6^m a mais.
- **Saturno:** polo \Rightarrow 26^m mais lento que equador
- **Urano e Netuno:** ~ 2h de diferença entre equador e polo, mas o polo gira mais rápido ! (devido a fluxos de ventos em grandes escalas na atmosfera desses planetas)
- **Medidas da rotação dadas na tabela (internas):** dadas pela variação periódica de emissão rádio da magnetosfera

Inclinação do eixo de Urano



- O eixo de rotação de Urano é quase coincidente com o plano da órbita. Como ficam as estações do ano em Urano?

Atmosfera de Júpiter

Júpiter tem 67 satélites naturais
ATUALIZADO

Mancha: furacao (~ centenas de anos)

Composição:

- gás hidrogênio (90% da matéria do planeta)
 - hélio (10%)
 - traços de gás metano
 - gás amônia
- pouco de vapor d' água



Atmosfera de Saturno

Composição:

- gás hidrogênio (97% da matéria do planeta)
- hélio (3%)
- traços de gás metano
- gás amônia
- pouco de vapor d' água

**Saturno tem
62 satélites naturais**



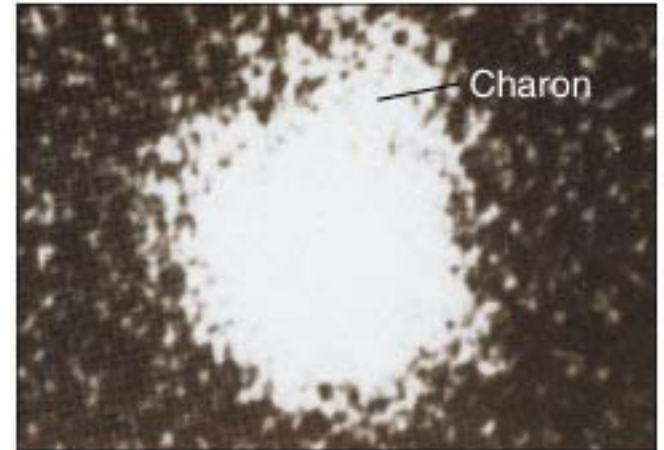
Composição atmosférica em Urano e Netuno

- Estudos espectroscópicos indicam similaridades com Júpiter e Saturno.
- H_2 (84%), He (14%), CH_4 (2%, 3%).
- **NH_3 (amónio: ausente).**
- **CH_4 (metano) \uparrow , NH_3 \downarrow coloração azulada (Netuno), azul-esverdeada (Urano).**

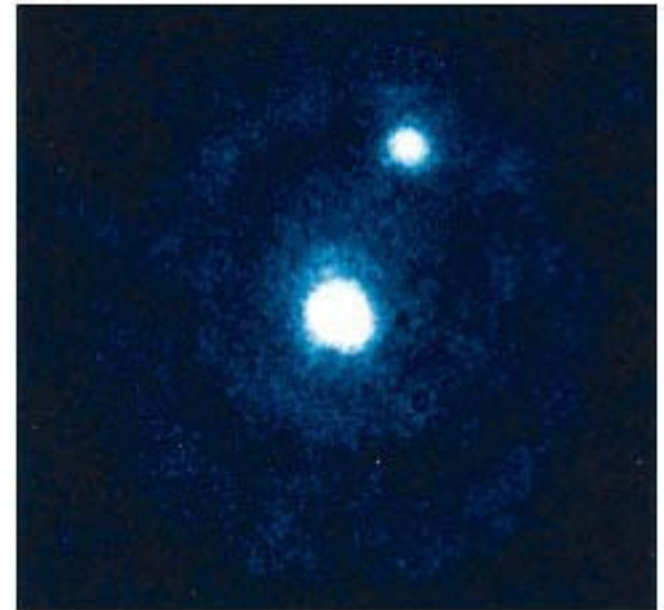
Plutão e Caronte

Descoberto Tombaugh 1930

A imagem HST mostra Plutão e
Caronte.



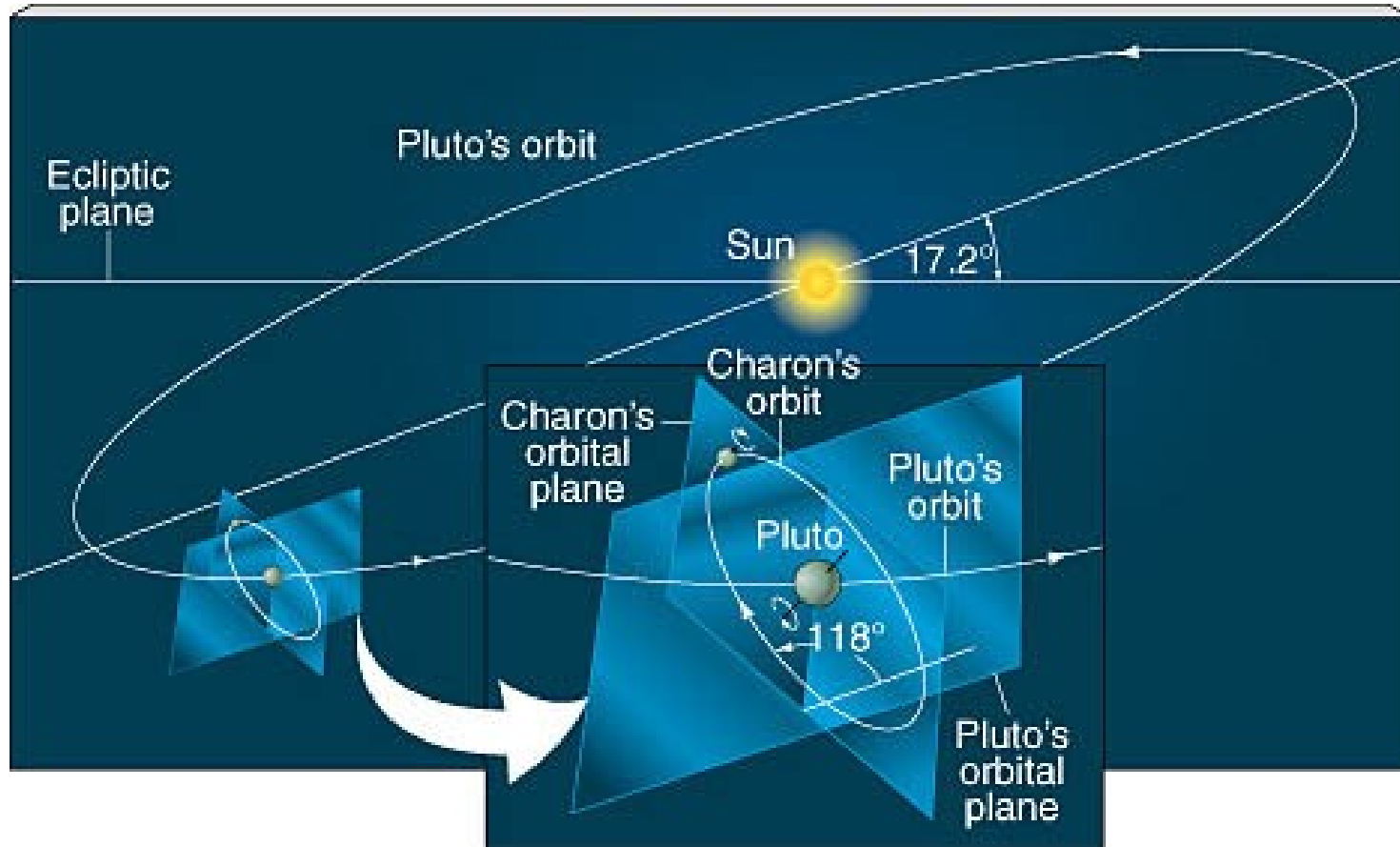
(a)



(b)



Plutão e Caronte



A órbita de Caronte ao redor de Plutão é circular, síncrona e inclinada a 118° com relação ao plano da órbita de Plutão. O plano da órbita de Plutão, por sua vez tem uma inclinação de $17,2^\circ$ com relação a eclíptica.

New horizons
Lançamento 2006
Chegada a Plutao 2015



Meio Interplanetario

Entre os planetas: varios corpos menores com $D = 100$ km até graos de poeira interplanetaria:

→ Importantes no estudo da formacao do SS: sofreram pouco metamorfismos decorrentes de fusao e fracionamento gravitacionais – FOSSEIS do SS

- Satelites e aneis
- Asteroides
- Meteoros e meteoritos
- Cometas
- Poeira zodiacal

4 Luas Galileanas de Jupiter (>s)

Io (esquerda), Europa (direita)



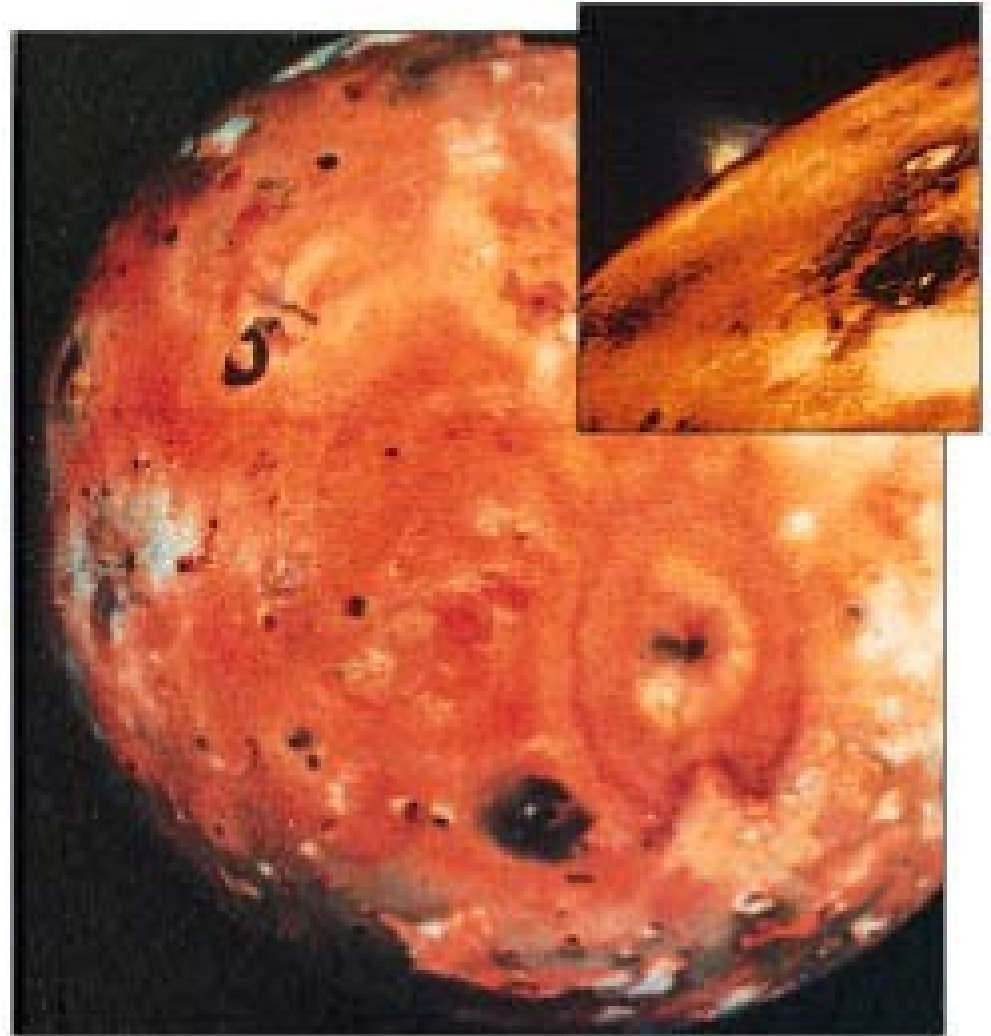
Calisto (esq.), Ganimede (dir.): > lua do SS

Vulcanismo em Io

As partes escuras
são os vulcões.

Aspecto laranja
incandescente:
compostos de S

No quadro em destaque
aparece a erupção de
um vulcão 100 km de
altura, 300km de largura



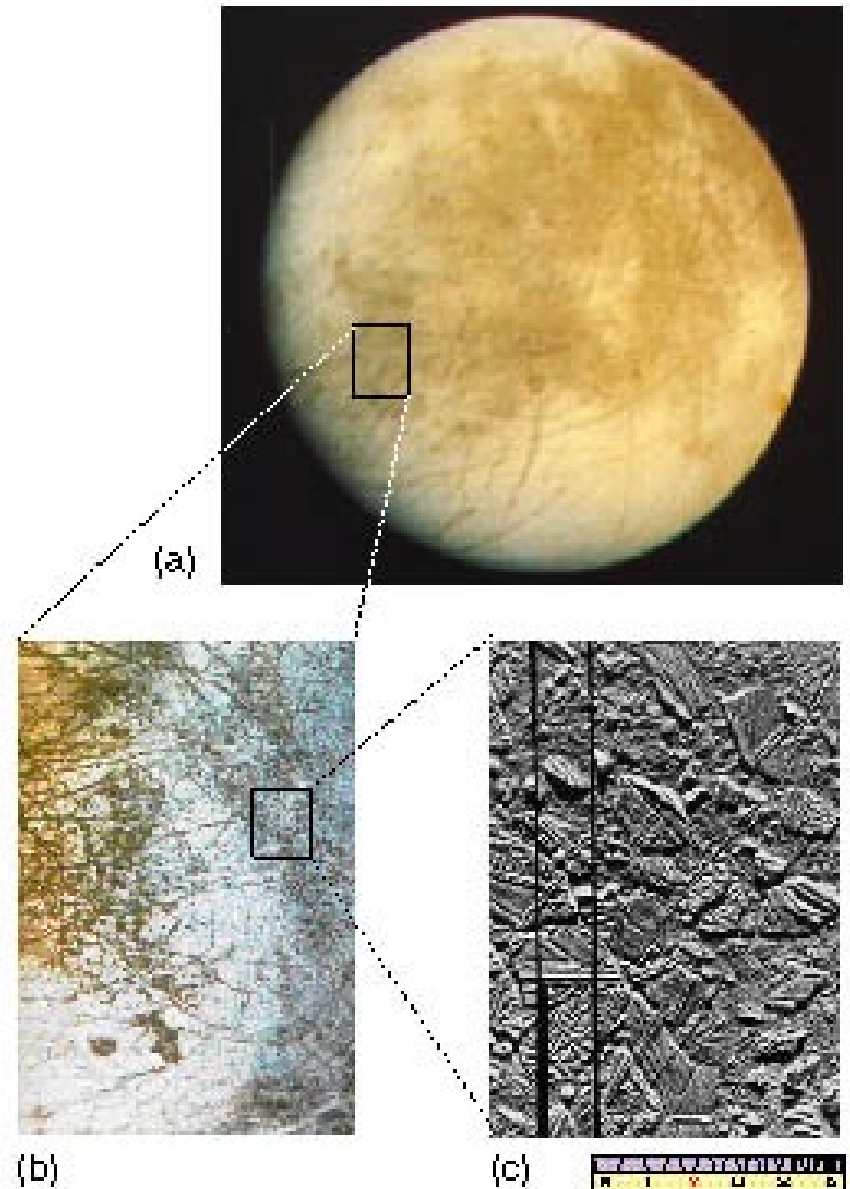
- Erupção de um vulcão na lua Io captada pela sonda New Horizons
- Ver video: <https://svs.gsfc.nasa.gov/11455>



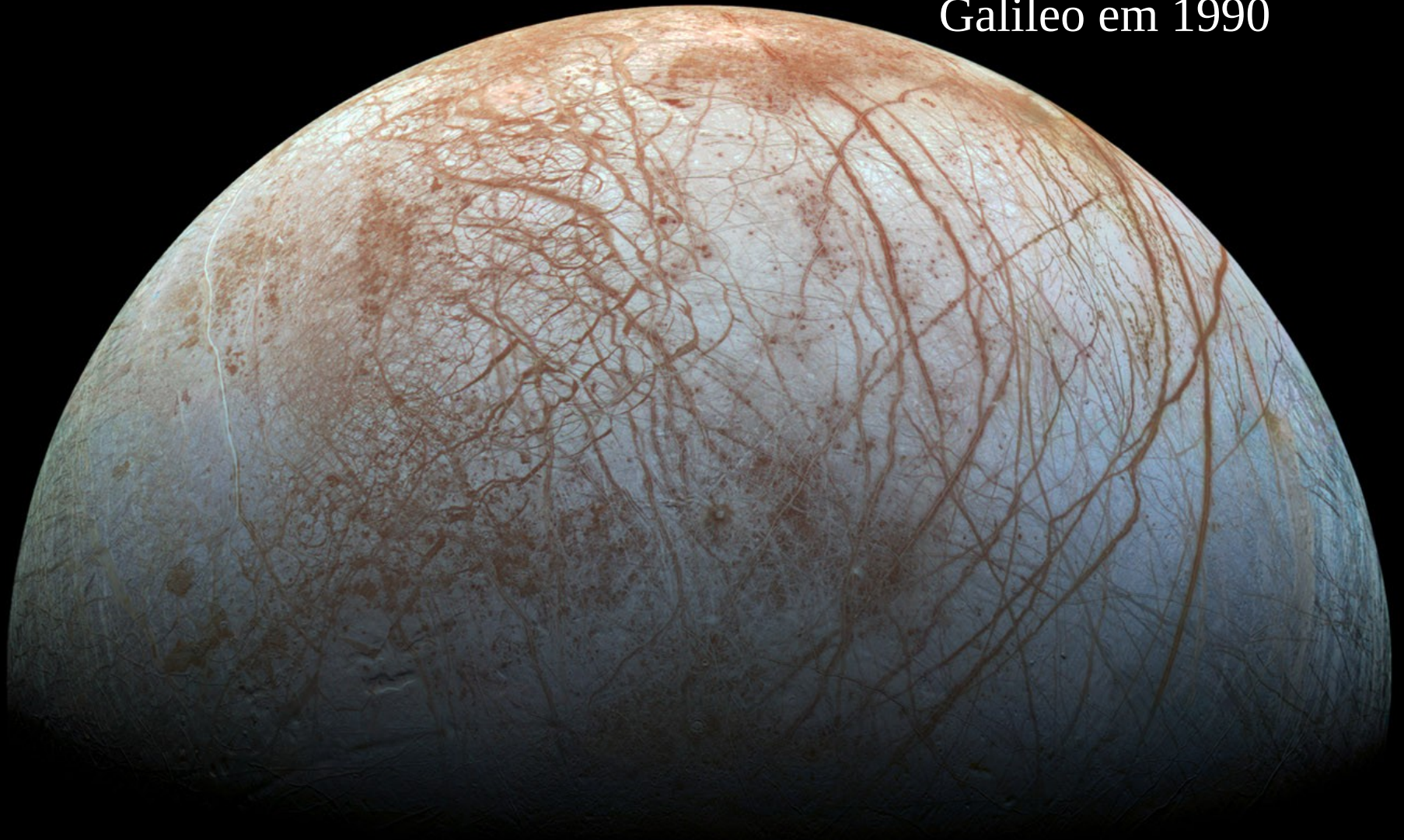
Superfície de gelo em Europa

**Sob crosta de gelo:
Oceano líquido!**

Mosaico obtido pela
Voyager 1, com resolução
de ~ 5 km.

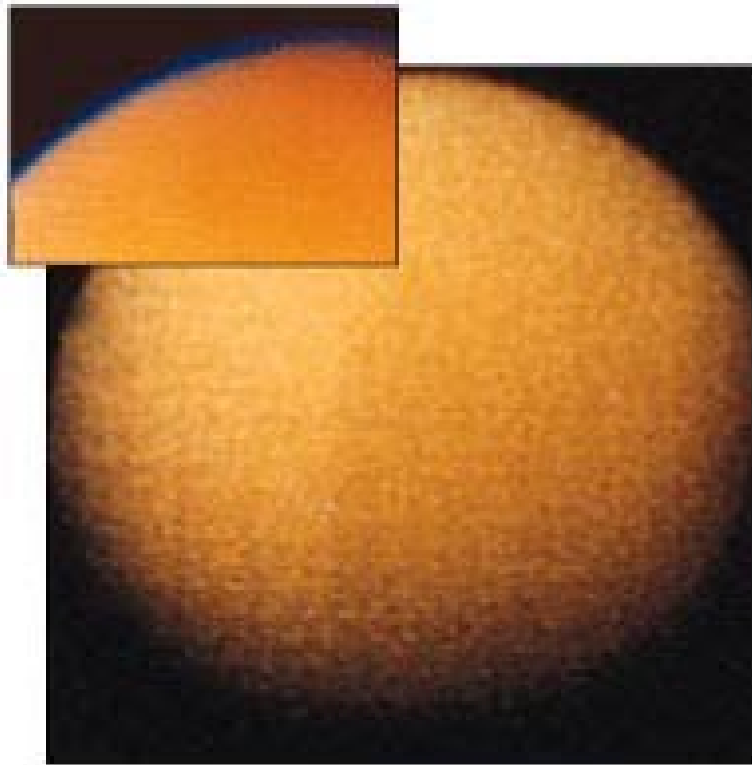


Europa vista pela sonda
Galileo em 1990



Titan, a maior lua de Saturno

Dimensão maior que Mercúrio. Imagem infravermelha mostra região mais brilhante ~ 400 km de extensão.



(a)



(b)



Tritão: a maior lua de Netuno

Região polar Sul c/
variedade de terreno,
aparentando lagos
congelados.

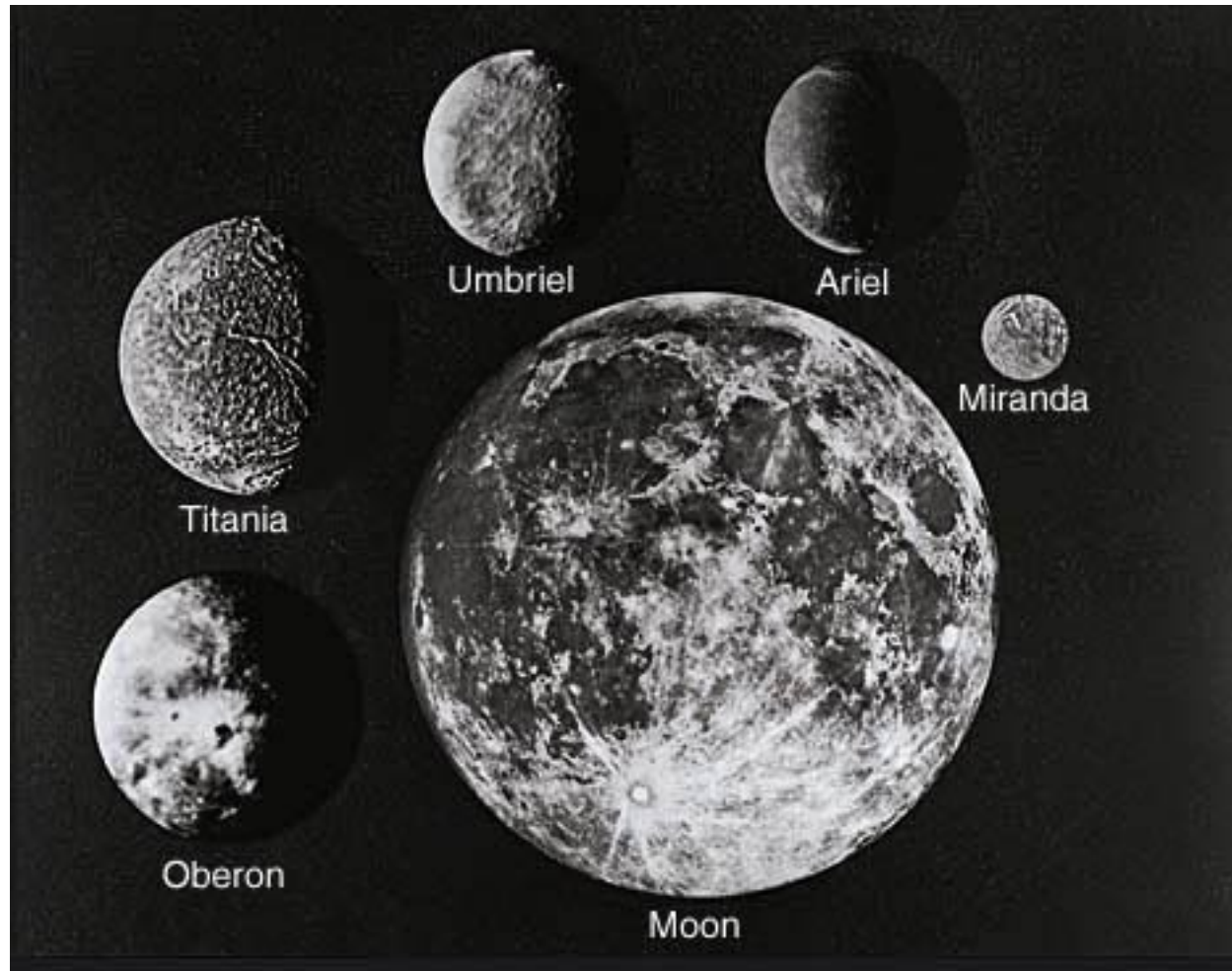
Parte rosada é de
nitrogênio líquido.

No detalhe superior: Lago
~ 200 km de diâmetro,
provável origem de
erupção de lava.



Luas de Urano

Cinco satélites de Urano em escala de tamanho (comparadas com a Lua), e em ordem crescente de distância até o planeta: Miranda, Ariel, Umbriel, Titania e Oberon.



Anéis de Saturno

Aneis:

partículas de poeira de material (ex. gelo em Saturno): formadas por **interações de maré que levaram a fragmentação** de corpo menor (ex. Satellite) em encontro próximo com o planeta



A lua Tritão de Netuno:

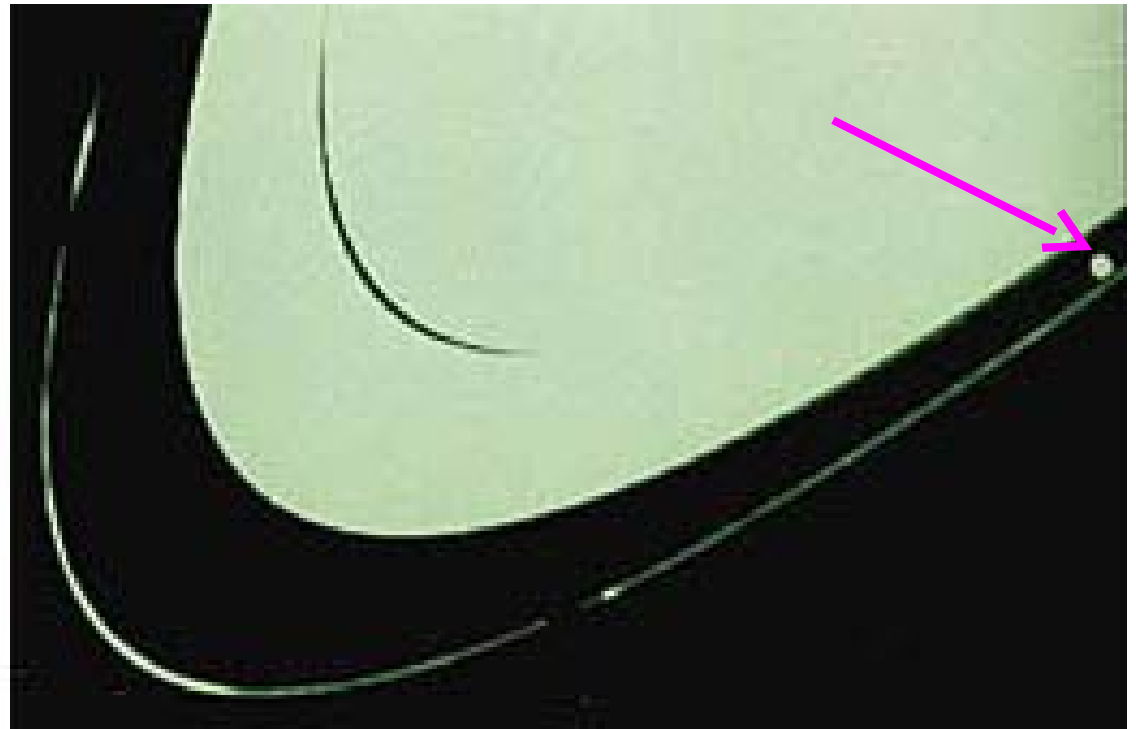
podera vir a se tornar um anel!

Anéis de Saturno

Duas luas pastoras orbitam o anel F (mais externo) de Saturno, uma a poucas centenas de km na parte interna e outra na parte externa do anel



(a)



(b)

Asteróides



Asteróides

Fragmentos de material rochoso (>4000):

composição química:

75%: + escuros:
contem carbono

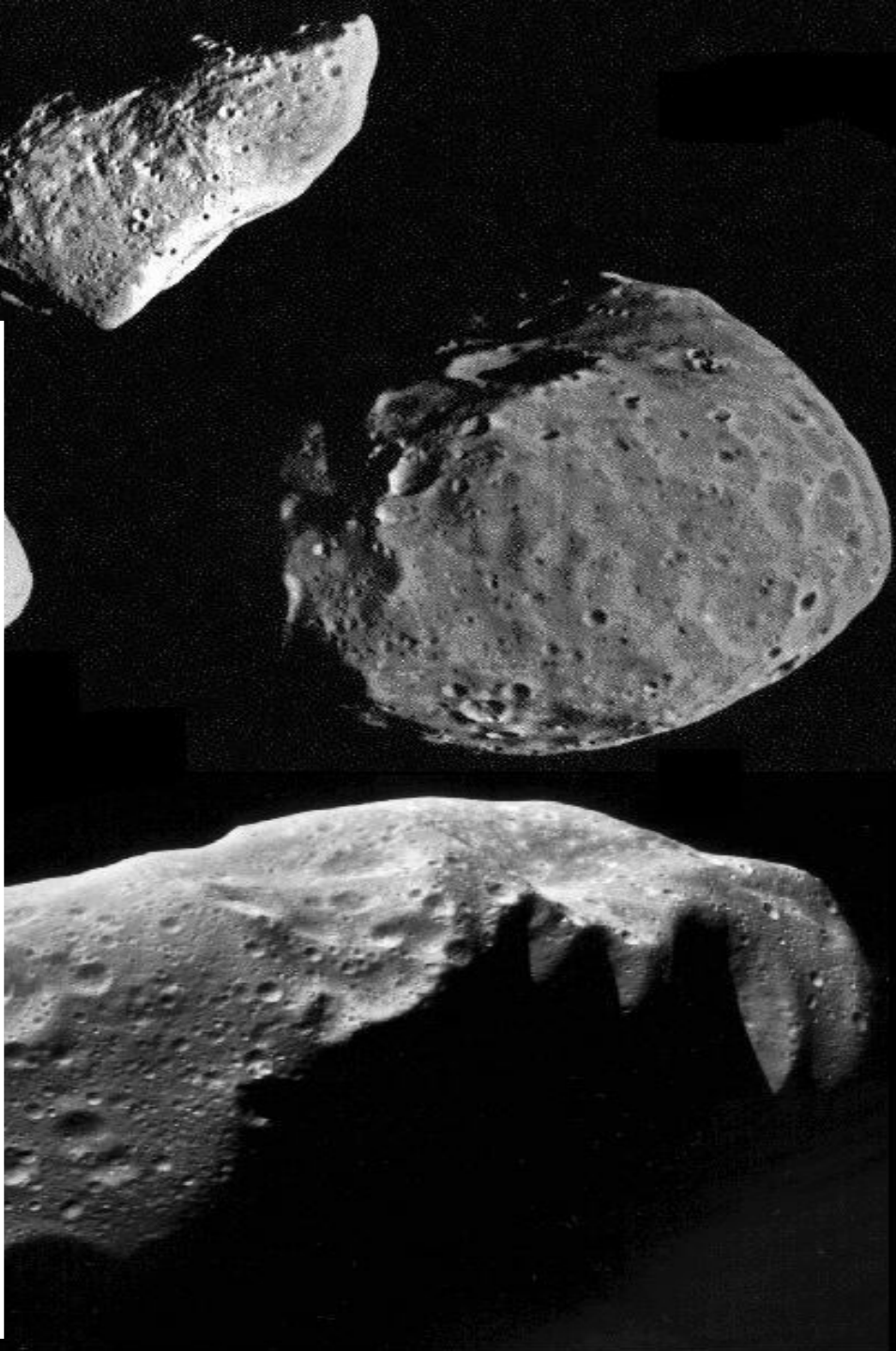
15%: + refletores:
contem silicatos

Diferentes dos meteoros so
em tamanho (>s)

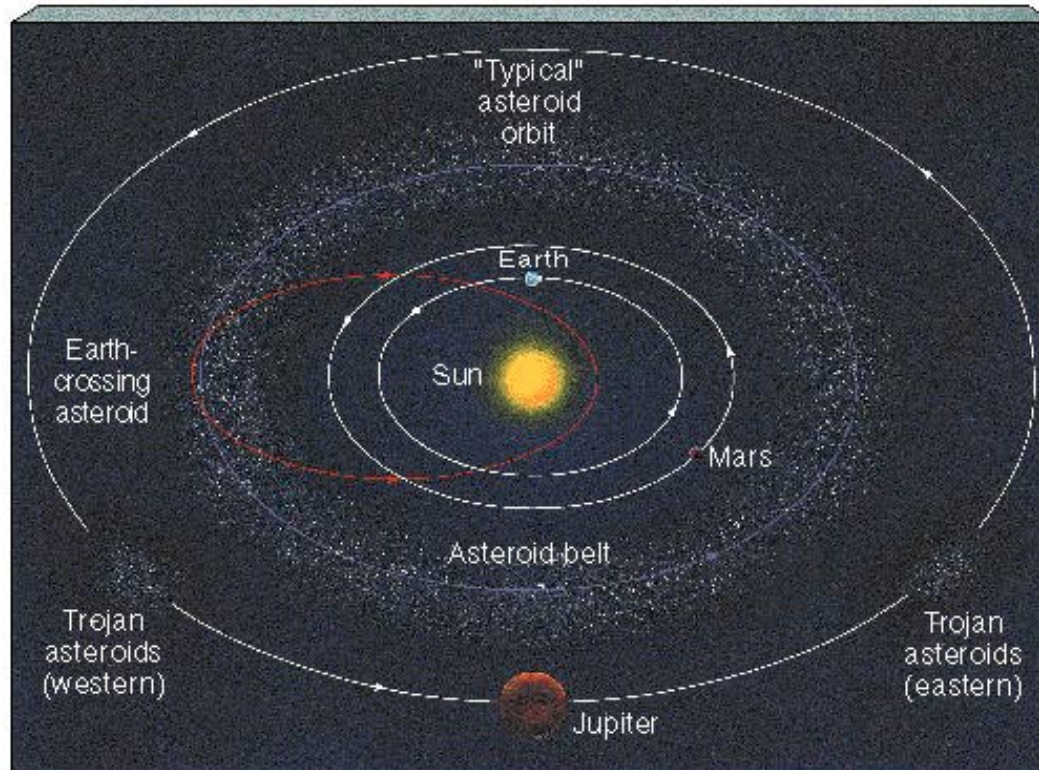
D ~ 100 m até 200 km

Massa ~ 10.000 ton.

Massa total dos asteroides:
1/10 M(Lua)



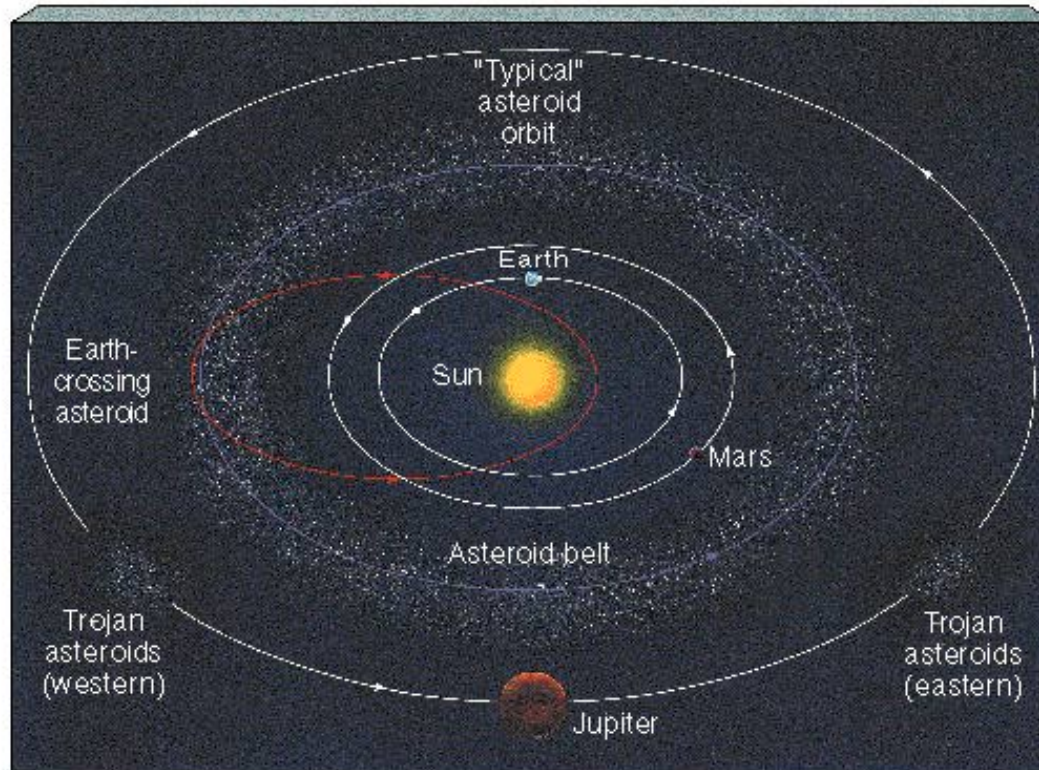
Asteroides



Maioria: cintura entre orbitas de Marte (a 1.5 A.U.) e Jupiter (a 5.2 A.U.): teriam se formado de fragmentos que nunca chegaram a agregar para formar planeta devido ao forte campo gravitacional de Jupiter

Asteroides Trojanos: dividem orbita com Jupiter!

Asteroides



Orbitas ao redor do Sol: bem excentricas: $e = 0,05 - 0,3$

Poucos com $e > 0,4$: possibilidade de colisao com a Terra; foram defletidos para suas orbitas atuais por campos gravit. de Marte e Jupiter (ex. Asteroide Icarus na Figura: 1968 passou a 6 mi. km da Terra, em 1991 a 170.000 km !)

Ida e Dactyl

55 km



1,6 x 1,2 km

**Asteróide
com satélite**

Meteoritos e Meteoros

Objetos menores ainda, que podem colidir entre si ou com os planetas, satélites e asteróides.

Meteoróides consistem em restos de cometas ou fragmentos de asteróides.

Quando um meteoróide entra na atmosfera terrestre: aquece-se – vira bola de fogo - gera um **traço de luz no céu** chamado **meteoro**. Se parte **sobrevive** e atinge o chão temos um **meteorito**.

Cratera deixada por METEORITO no Arizona

Diâmetro inicial
do meteorito:
50 m

Impacto há
50.000 anos

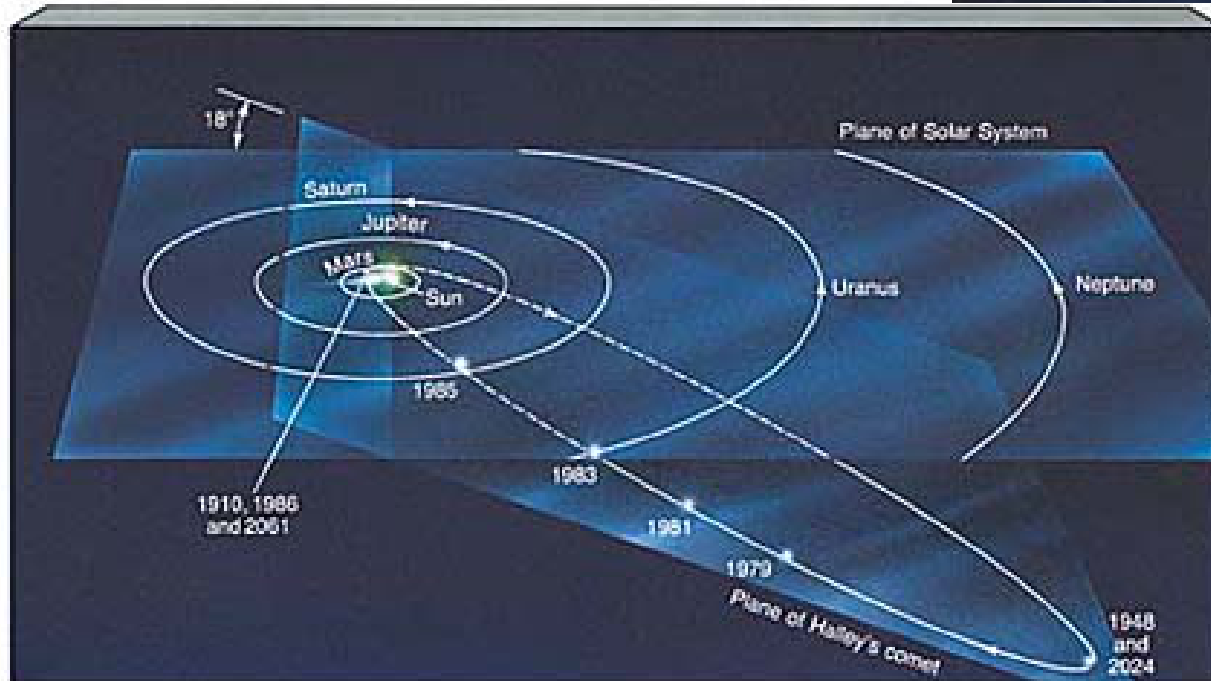
1,2 km

David J. Roddy, United States Geological Survey

Cometas

Brilham e desenvolvem cauda quando se aproximam do Sol

Voltam a forma esferica quando se afastam



Orbitas bem elipticas em torno do Sol, com Sol em um dos focos

Cometas



Brilham por reflexão ou re-emissão da luz solar

Núcleo (D = poucos km): parte sólida que persiste quando longe do Sol (gelo + impurezas)

Quando se aproxima do Sol (algumas U.A.): superfície aquece – expande formando **COMA** = halo de poeira + gas

Perto do Sol:

D (Coma) = 100.000 km

Cauda: pode estender-se por 1 U.A. na direção oposta ao Sol (empurrada pelo vento solar)

Cauda retilínea: gas ionizado

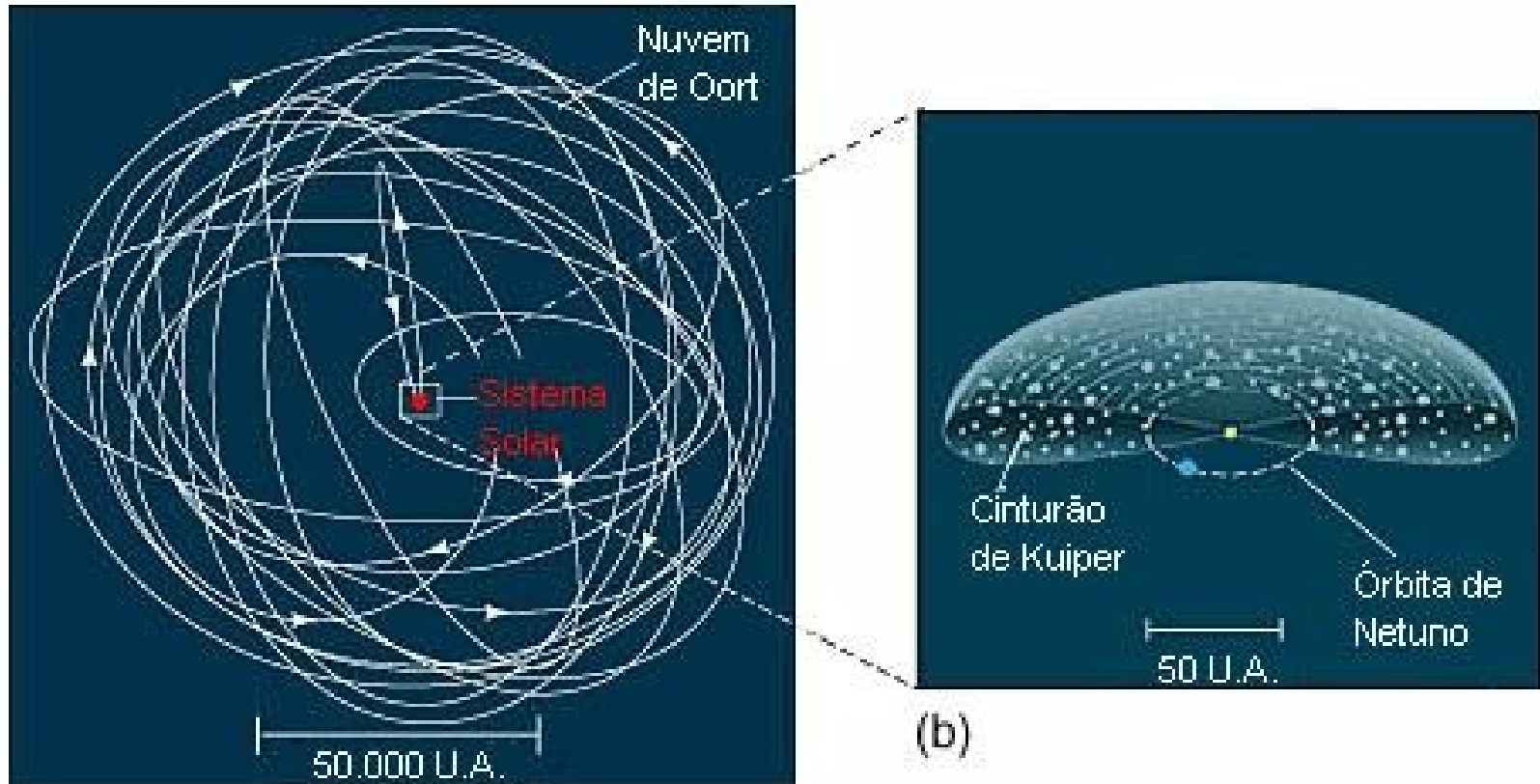
Cauda recurvada: grãos de poeira empurrados pela pressão da radiação solar

Cometas

Jan H. Oort: propôs existência de **nuvem hipotética (nuvem de Oort)**: com raio ~ **100 mil UA**, envolvendo todo o **Sistema Solar**.

Cerca de 100 bilhões de cometas: estariam orbitando em todas as direções; movimento do Sol pela galáxia: perturbações que podem jogar alguns para fora do SS ou trazer para orbitas + internas

Cometas de pequeno período (~200 a.): acredita-se que se originam acima da órbita de Netuno em orbitas próximas da Eclíptica: **Cinturão de Kuiper**



Gás e Poeira Zodiacal

Nuvem de grãos de ~ 1 a 10 μm .

Concentrados no plano da eclíptica, descrevendo órbitas \sim circulares.

refletem a luz solar: produzindo **luz zodiacal** \rightarrow faixa no céu ao longo da eclíptica (não confundir com Via Lactea!).



Daniel López
Observatorio del Teide, IAC

Formacao do Sistema Solar:

Cosmogonia

Propriedades dinâmicas indicam:

- (i) órbitas coplanares (exceto Mercúrio e Plutão);
- (ii) Separação entre orbitas cresce geometricamente (Lei de Bode, 1766): 0.4 – 0.7 – 1 – 1.6 – 2.8 – 5.2 – 10 – 19.6 – 38.8 – 77.2 (de Mercurio a Urano incluindo cinturao de asteroides a 2.8 UA)
- (iii) movimento orbital dos planetas e rotação do Sol num mesmo sentido (anti-horario visto do HN da T);
- (iv) a rotação dos planetas: mesmo sentido do movimento orbital (exceto Vênus, Urano e Plutao);
- (v) Satelites e aneis dos planetas gigantes tambem orbitam em torno do planeta na mesma direcao que planeta gira em torno de si;

- (vi) Propriedades diferenciadas: planetas telúricos (alta densidade, atmosferas moderadas, baixa taxa de rotação, poucas ou nenhuma lua) e planetas jovianos (baixa densidade, atmosferas espessas, alta rotação, muitas luas);
- (vii) diferenças sistemáticas de composição química entre planetas internos (telúricos) e externos (jovianos);
- (viii) Asteroides: bem velhos – parecem ser feitos de material primitivo – não evoluído
- (ix) cometas de longo período tem órbitas excêntricas com inclinações quaisquer
- (x) 99,87% da massa do SS: no Sol e apenas 0,13% nos planetas, mas 99% do momento angular: nos planetas e apenas 0,5% no Sol.

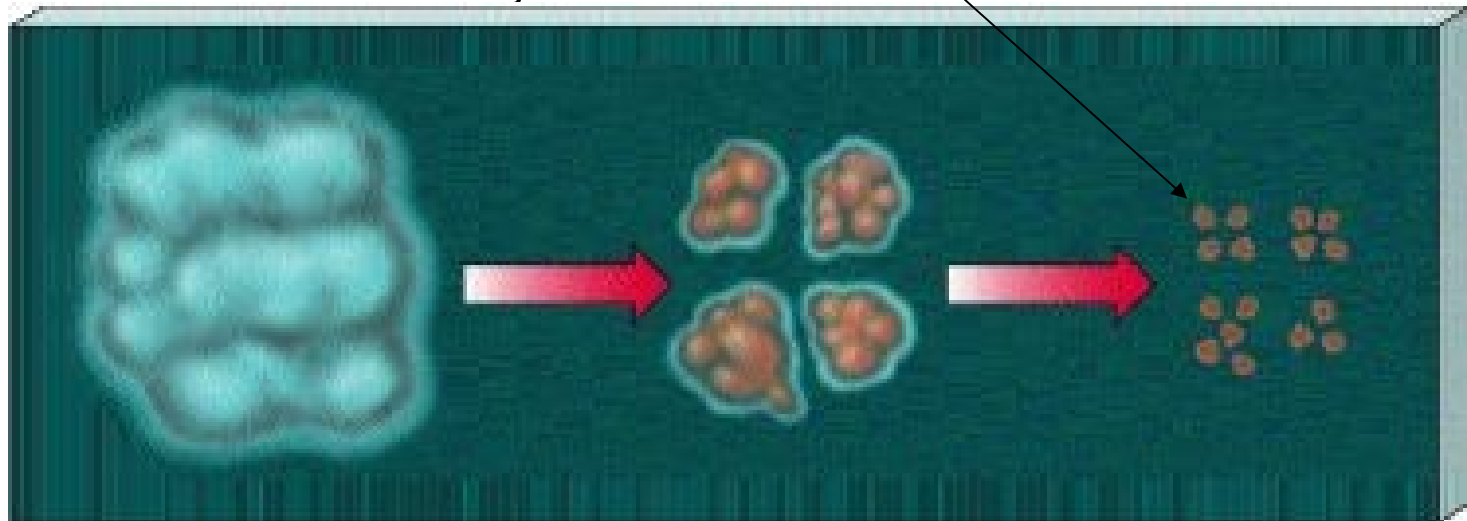
Cosmogonia: Formacao

Explicacao mais aceita: **Nebulosa Solar Primitiva (NSP)**, primeiramente proposta por Laplace, em 1796:

Sistema Solar: teria se formado a partir de **colapso e fragmentacao de nuvem interestelar**

Colapso de 1 única nuvem: pode resultar em varias estrelas

Um fragmento teria originado Sol e planetas seriam subprodutos da formação do Sol



Nuvem no meio interestelar



Imagem de nuvem escura
Barnard 86, obtida por
Australian Astronomical
Observatory.

A imagem ao lado
apresenta uma região de
formação de estrelas.

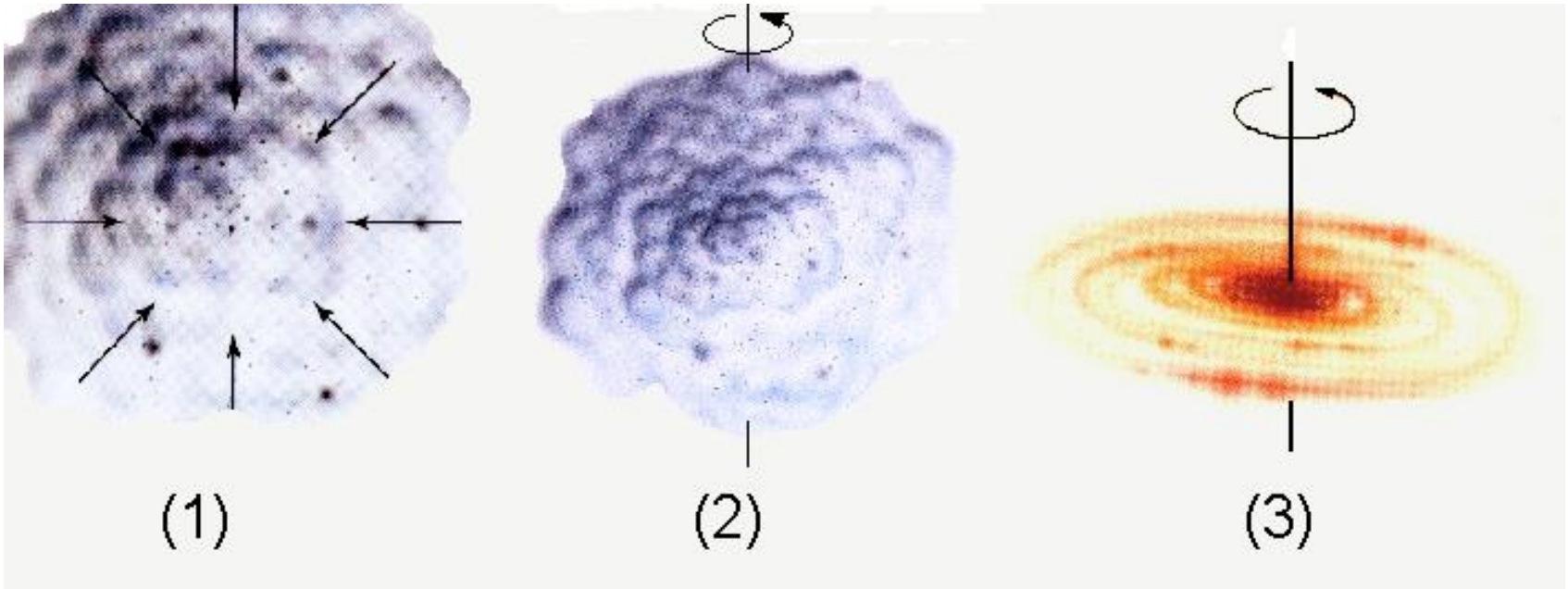
À direita: **nuvem escura
interestelar de gás e
poeira**, chamada Barnard
86.

À esquerda aparece o
**aglomerado estelar
jovem** NGC6520.

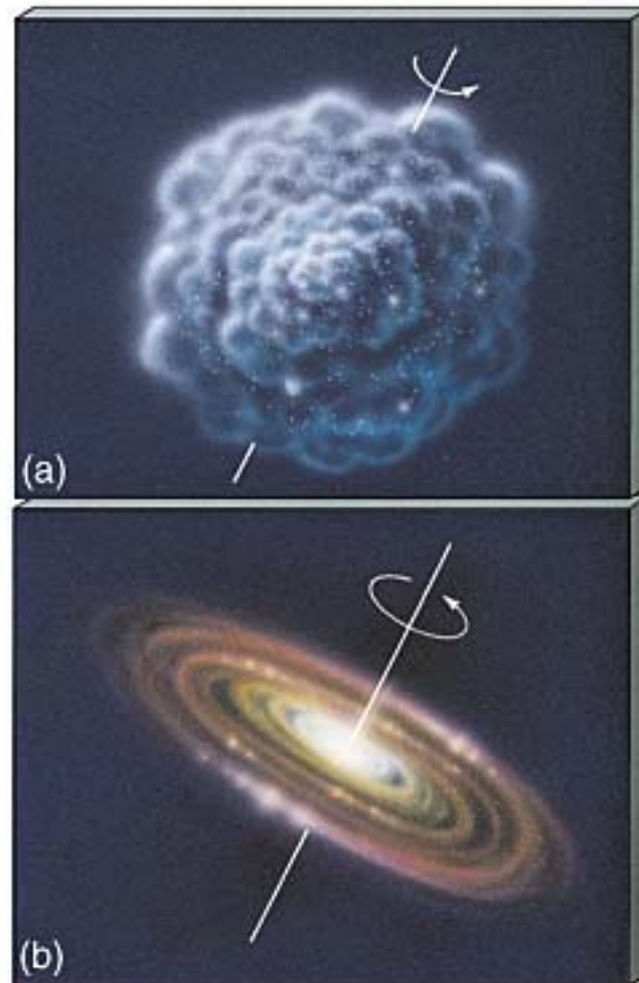
Cosmogonia

(1), (2) A **conservação do momento angular** → uma nuvem em rotação e em contração: deve girar cada vez mais rápido à medida que seu tamanho diminui (**$L = M V R$**)

(3) Com o passar do tempo: matéria se **deposita em um disco** (por causa da componente tangencial da força centrífuga): que pode se tornar o sistema solar primitivo.



Colapso da NSP ($D \sim 1$ a.l.) e formacao do disco proto-planetario

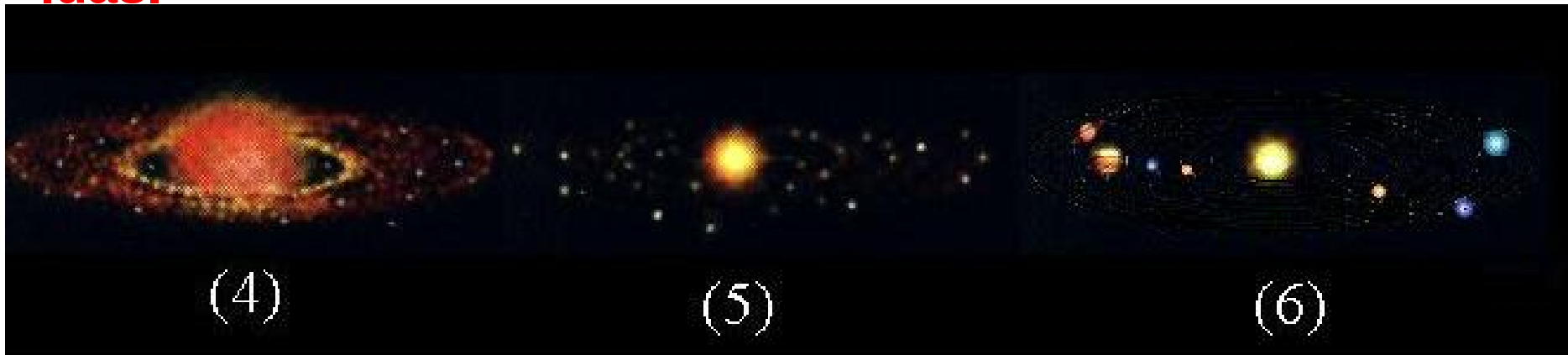


Cosmogonia

(4) A parte central: vai tornar-se **o Sol** e os pequenos glóbulos na parte + externa do disco: os **planetas jovianos**: grãos de poeira colidem entre si e aglutinam: formando → **planetesimais**

(5) **Fortes ventos saem do Sol** em formação: expelem o gás da nebulosa primordial desobstruindo o meio para a passagem da luz solar. Os **planetesimais continuam a colidir e a crescer**.

(6) Passados ~ **100 milhões de anos**, os planetesimais formam **proto-planetas** em órbita ao redor do Sol + dezenas de **proto-luas**.

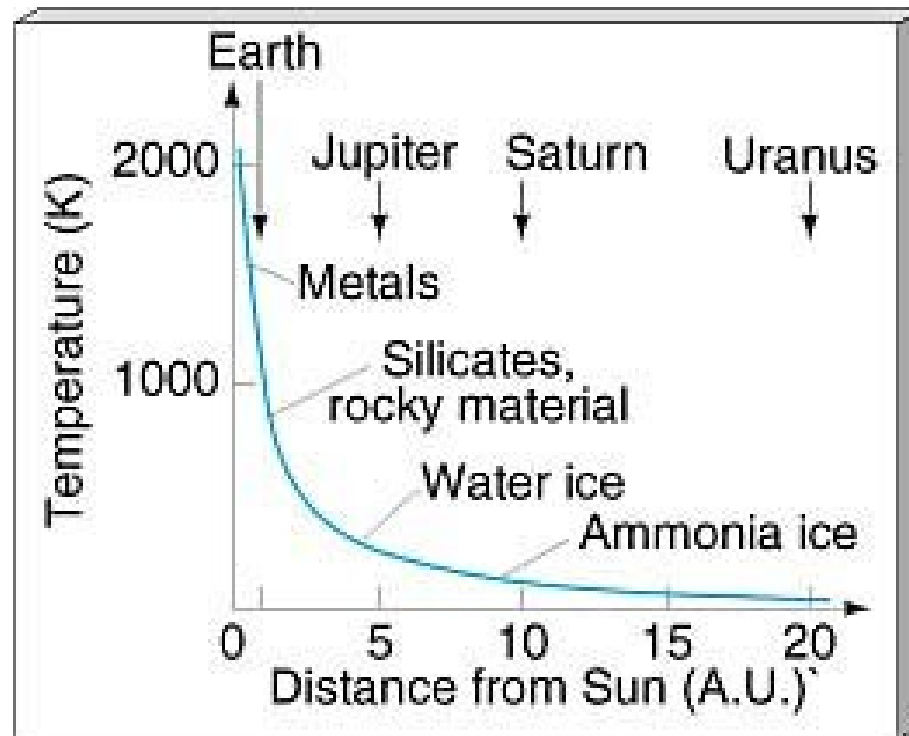


4 Planetas Jovianos (+ externos)

- **Formaram-se a >s distancias:** onde temperaturas + baixas permitiam formacao de gelos → sua aglutinacao + rapida → planetesimais → proto-planetas → seguiram capturando grandes quantidades de gas da NSP: formando planetas **gigantes JOVIANOS** – material + leve, rico em H
- **Alternativamente:** formaram-se direto de fragmentos + frios da NSP
- **Planetesimais restantes:** apos repetidos chutes dos planetas gigantes:
 - Defletidos para partes mais internas do SS **ajudando formacao dos planetas Teluricos**
 - Lançados em orbitas distantes e podem ter formado **cometas da NUVEM de OORT** (50 mil U.A.)
 - Podem ter formado **cometas do CINTURAO de KUIPER** (acima da orbita de Netuno – 30 a 35 U.A.)

Planetas Teluricos (+ internos)

- **Condensação do gás começou + tarde nas regiões internas (quando T abaixou para $T=1000$ K):** mas muito quente para gelos (água e substâncias + leves) sobreviverem
- **Somente materiais + pesados (Si, Fe, Mg, Al) + O: materiais rochosos → planetesimais na região interna do SS:** + material rochoso e pobre em elementos leves
- Regiões internas do SS: esperar T cair para começar a aglutinar grãos rochosos; enquanto regiões + externas (Jovianos) acreção começou assim que NSP colapsou em disco
- **Bombardamento por meteoros de gelo de cometas defletidos: supriram em parte planetas Teluricos com água e gases** após sua formação
- **Cinturão de Asteróides (entre Marte e Jupiter):** não conseguiram formar proto-planeta por causa da forte gravidade de Jupiter
- **Venus: rotação retrograda** atribuída a colisão frontal do proto-planeta com outro proto-planeta de massa similar



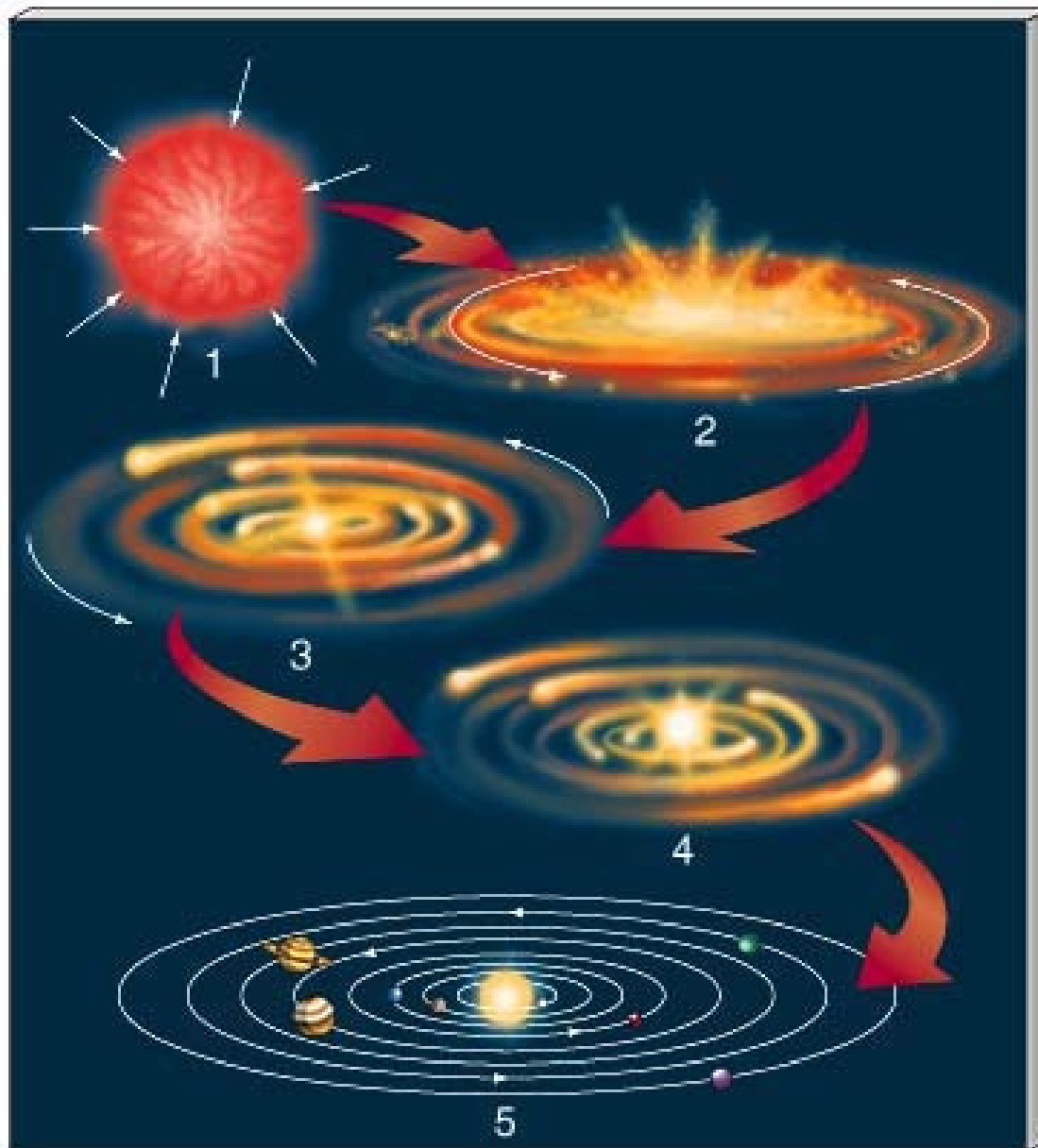
Variacoes da T na NSP em funcao da distancia ao centro:

Traços indicam: distancia minima na qual graos podiam condensar a partir do gas da NSP

Regioes centrais quentes: somente metais condensavam para formar graos

A distancias maiores: temperatura (T) era menor e graos de gelos e rochas puderam se formar.

Início do SS há 4,6 bilhões de anos



Modelo

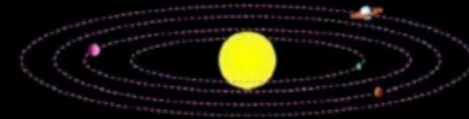
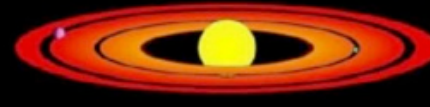
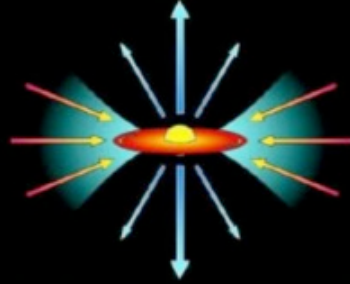
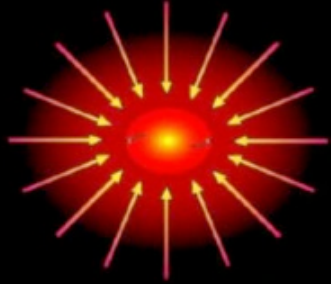


Fig. McCaughrean



10 000 UA

$t=0$

colapso gravitacional



500 UA

$t=10^5 - 10^6$ anos

Estrela T Tauri, disco e ventos



200 UA

$t=10^6 - 10^7$ anos

Estrela Pós-T Tauri, disco remanescente



100 UA

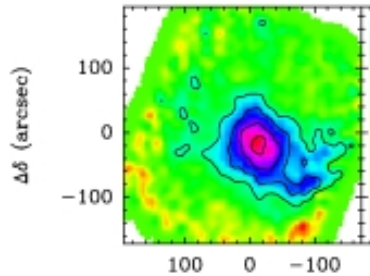
$t > 10^7$ anos

Estrela formada, sistema planetário

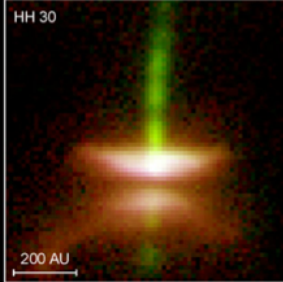
Observação

L1517B (E. Bergin)

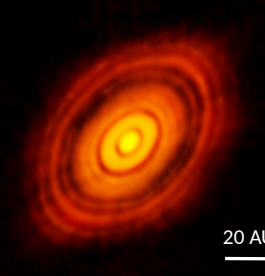
1.2mm



HH 30 - HST - óptico (Burrows)



HL Tau - ALMA - 1.3 mm



HR 8799 - Keck nIR (Marois)

