

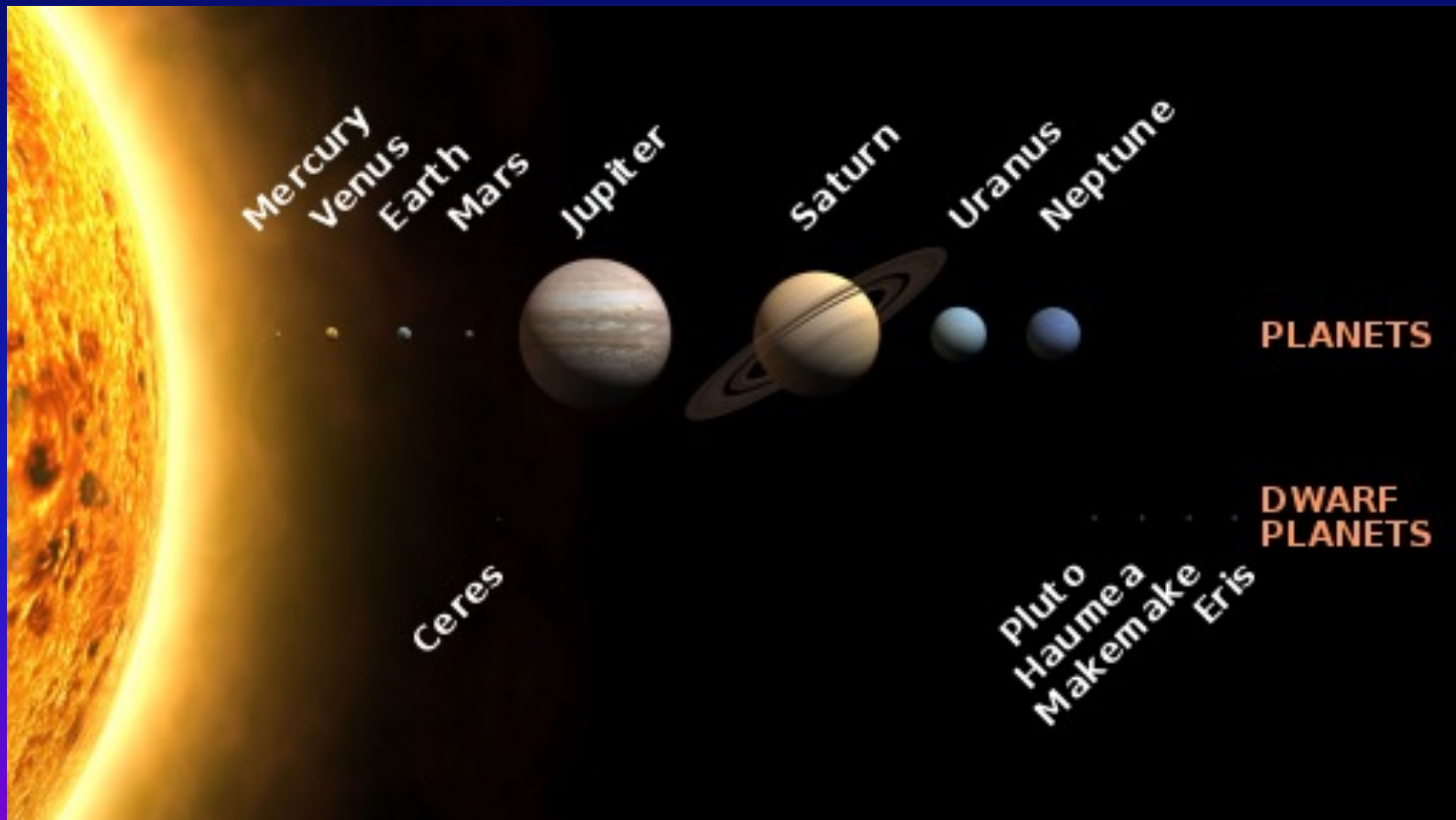
SISTEMA SOLAR

UMA VISÃO GERAL

Prof. Roberto D.D. Costa
Departamento de Astronomia
IAG/USP

O sistema solar consiste em:

- Sol
- oito planetas clássicos
- planetas anões (6 confirmados, muitos a confirmar)
- mais de 250 satélites pertencentes aos planetas
- um grande número de pequenos corpos (cometas, asteroides ou planetoides)
- meio interplanetário

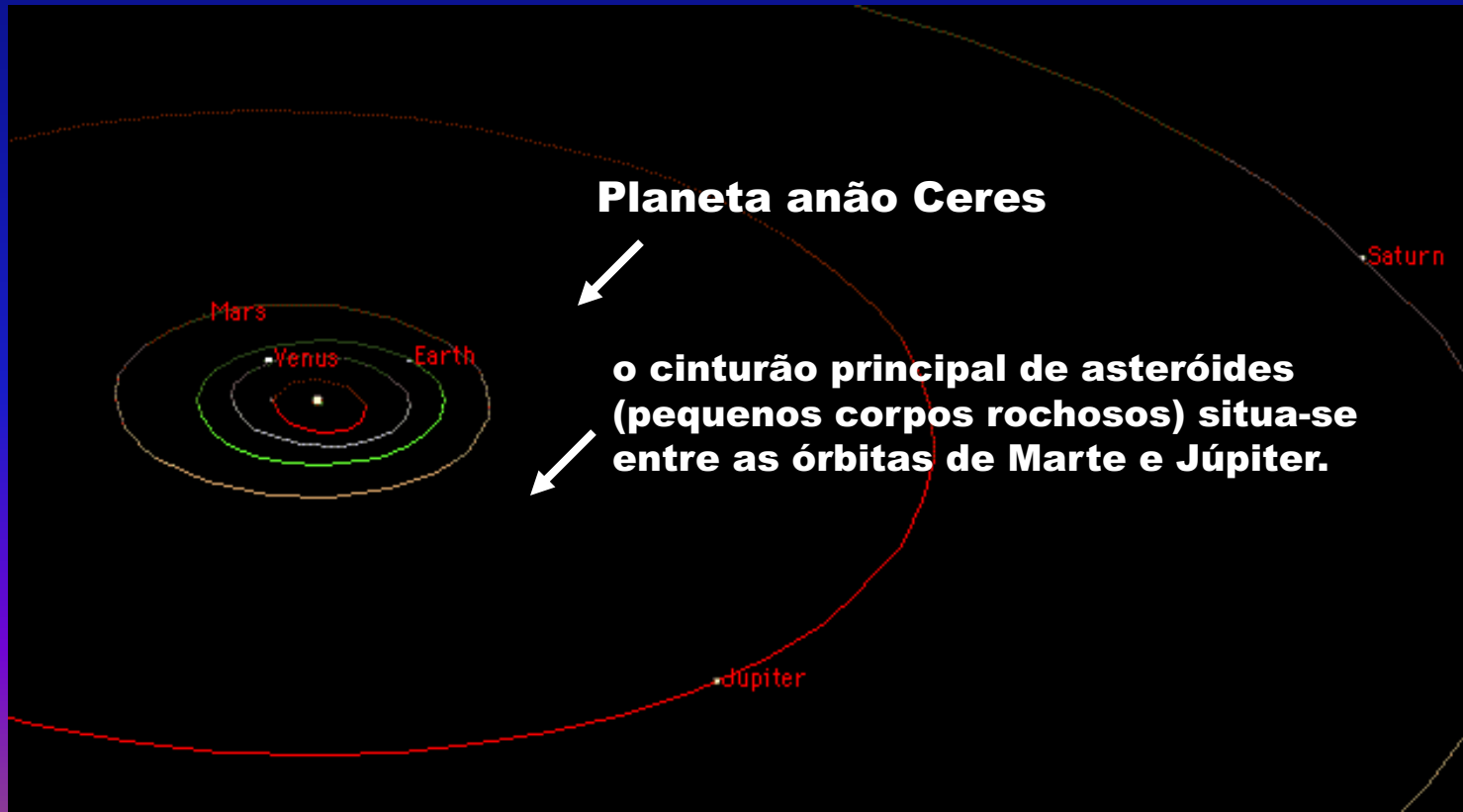


Sistema solar interno

- Sol
- Mercúrio
- Vênus
- Terra
- Marte

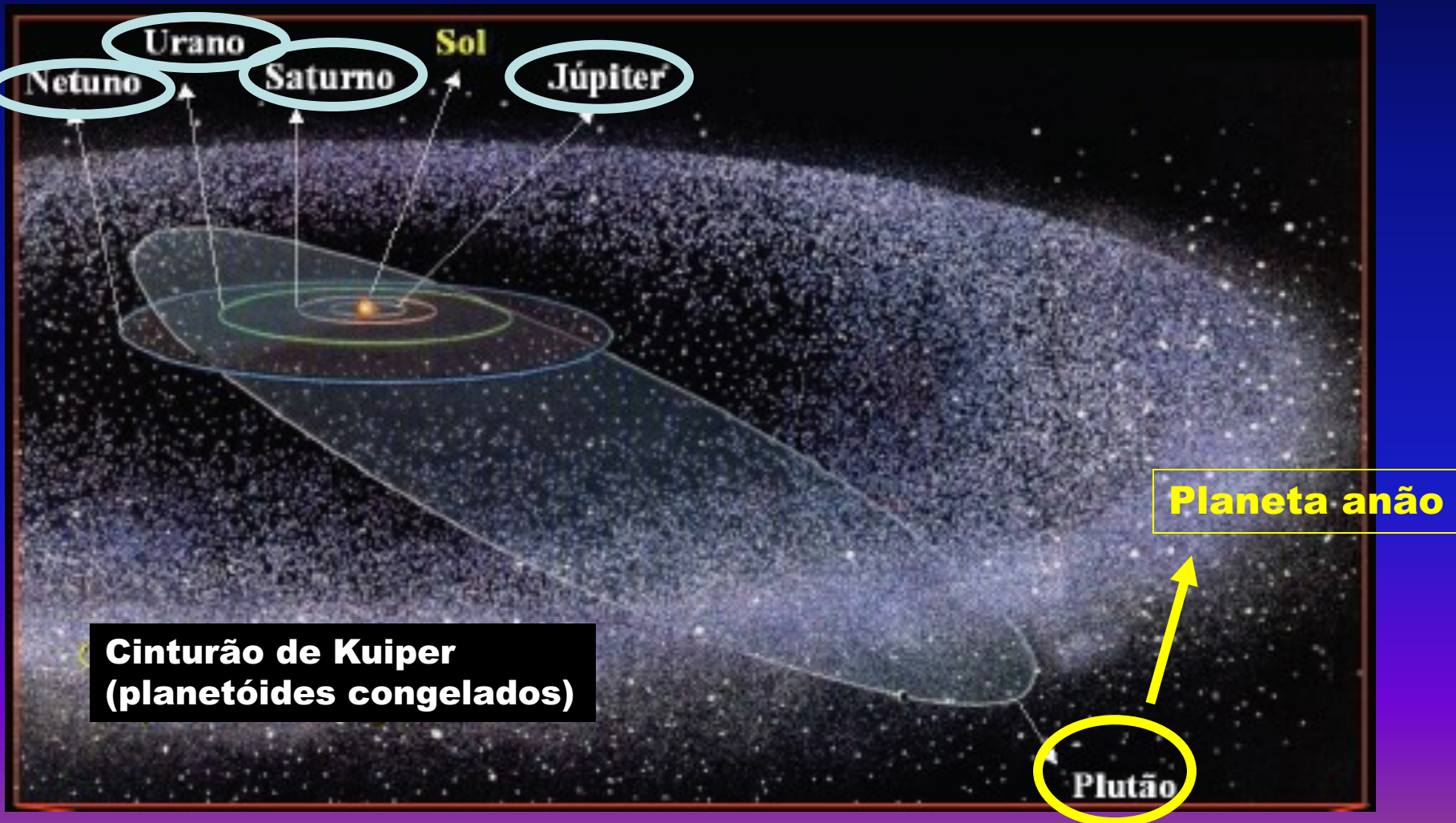


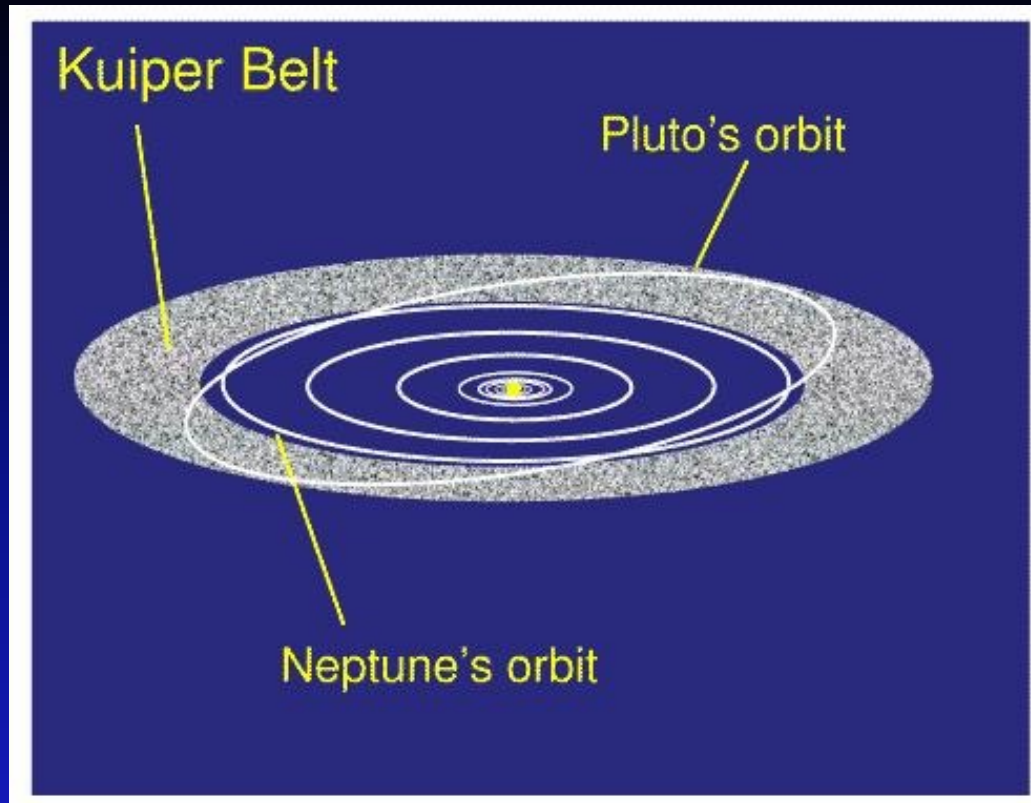
Planetas terrestres (ou telúricos)



Sistema solar externo

Planetas jovianos

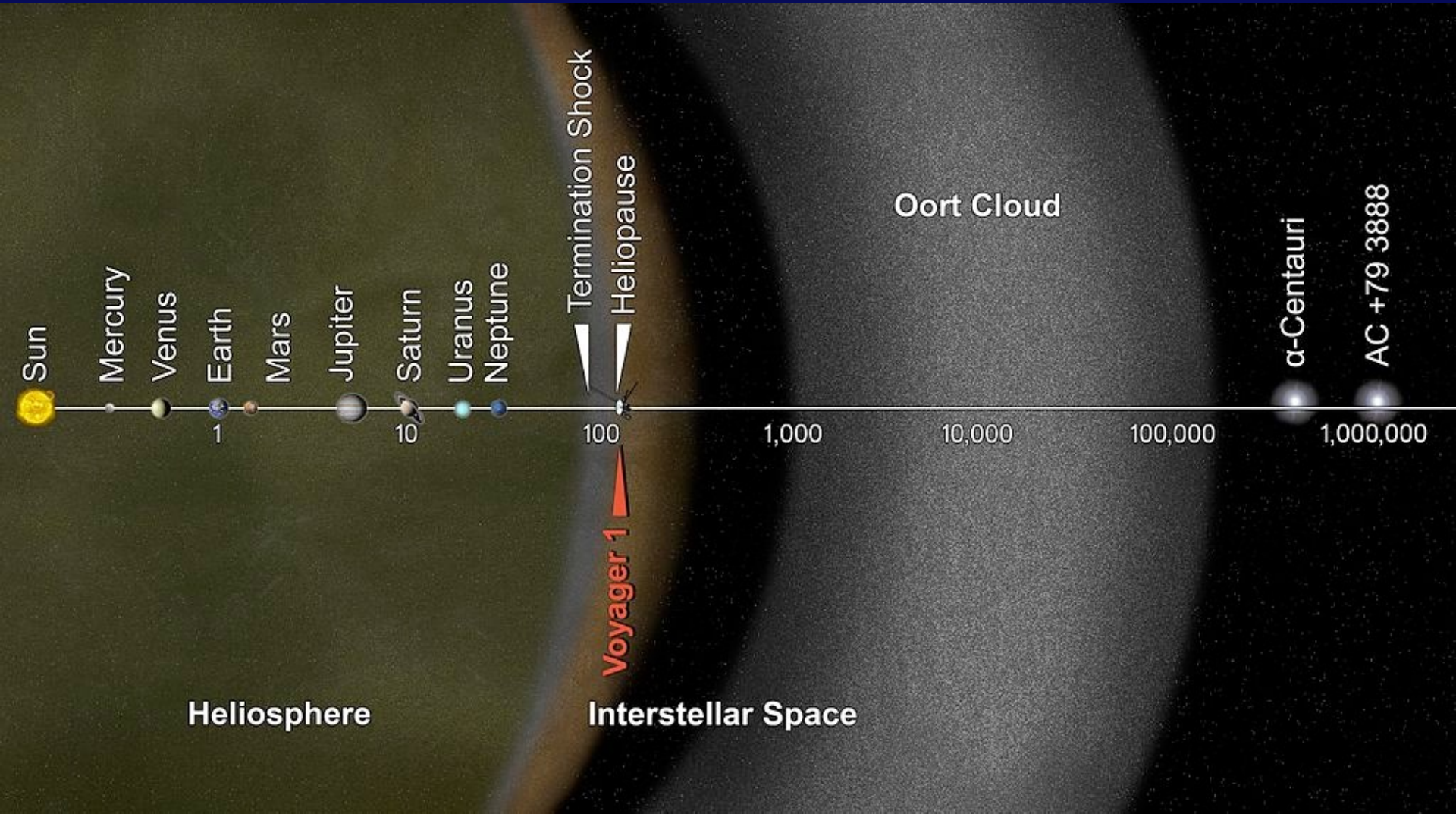




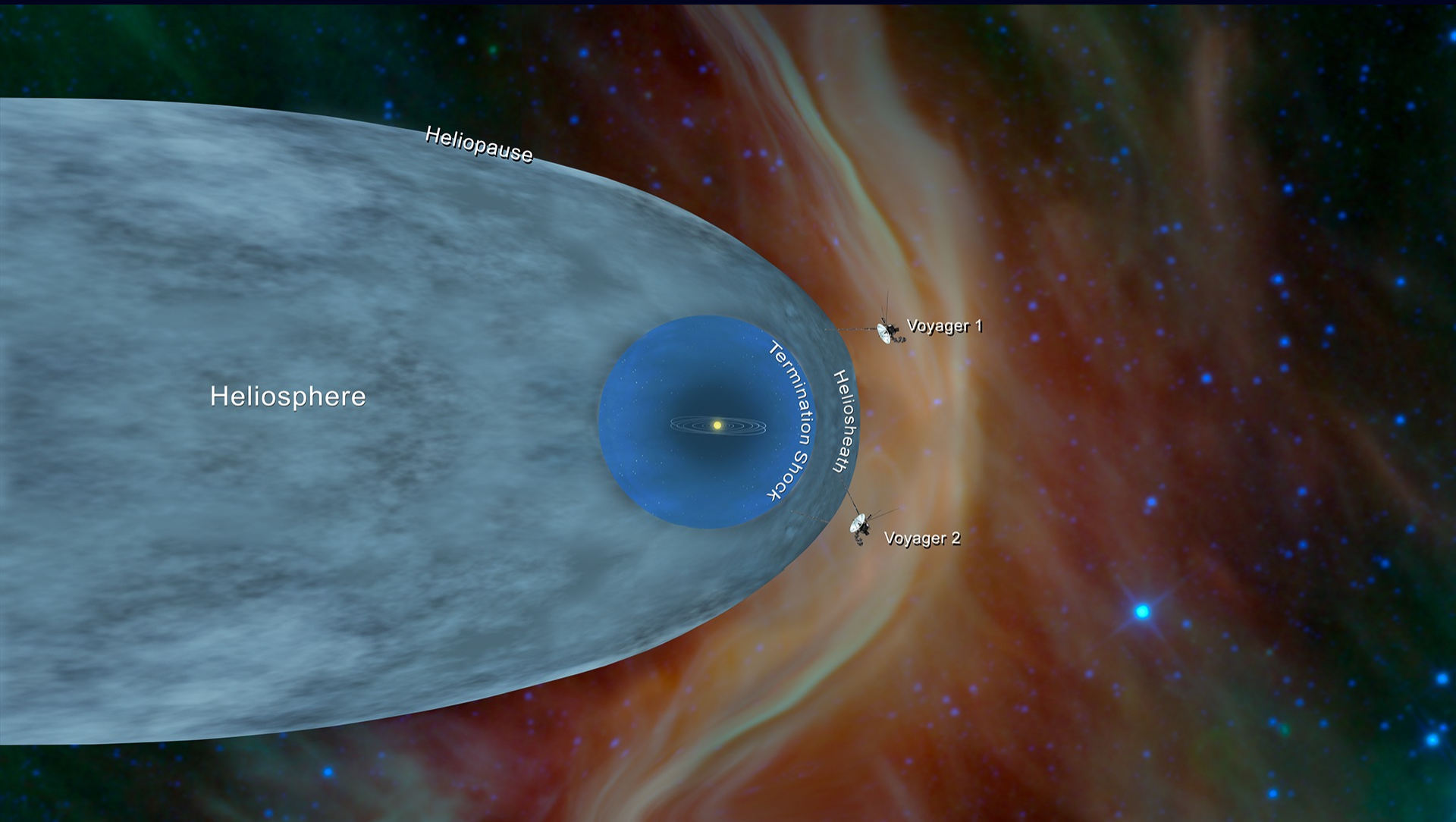
Muitos dos objetos pertencentes ao cinturão de Kuiper são encontrados em órbitas ao redor de 55 UA do Sol, mas alguns estão em órbitas bem mais distantes.

EXTENSÃO DO SISTEMA SOLAR : 50.000 a 100.000 UA (além do cinturão de Kuiper)

(63241 UA = 1 ano-luz)

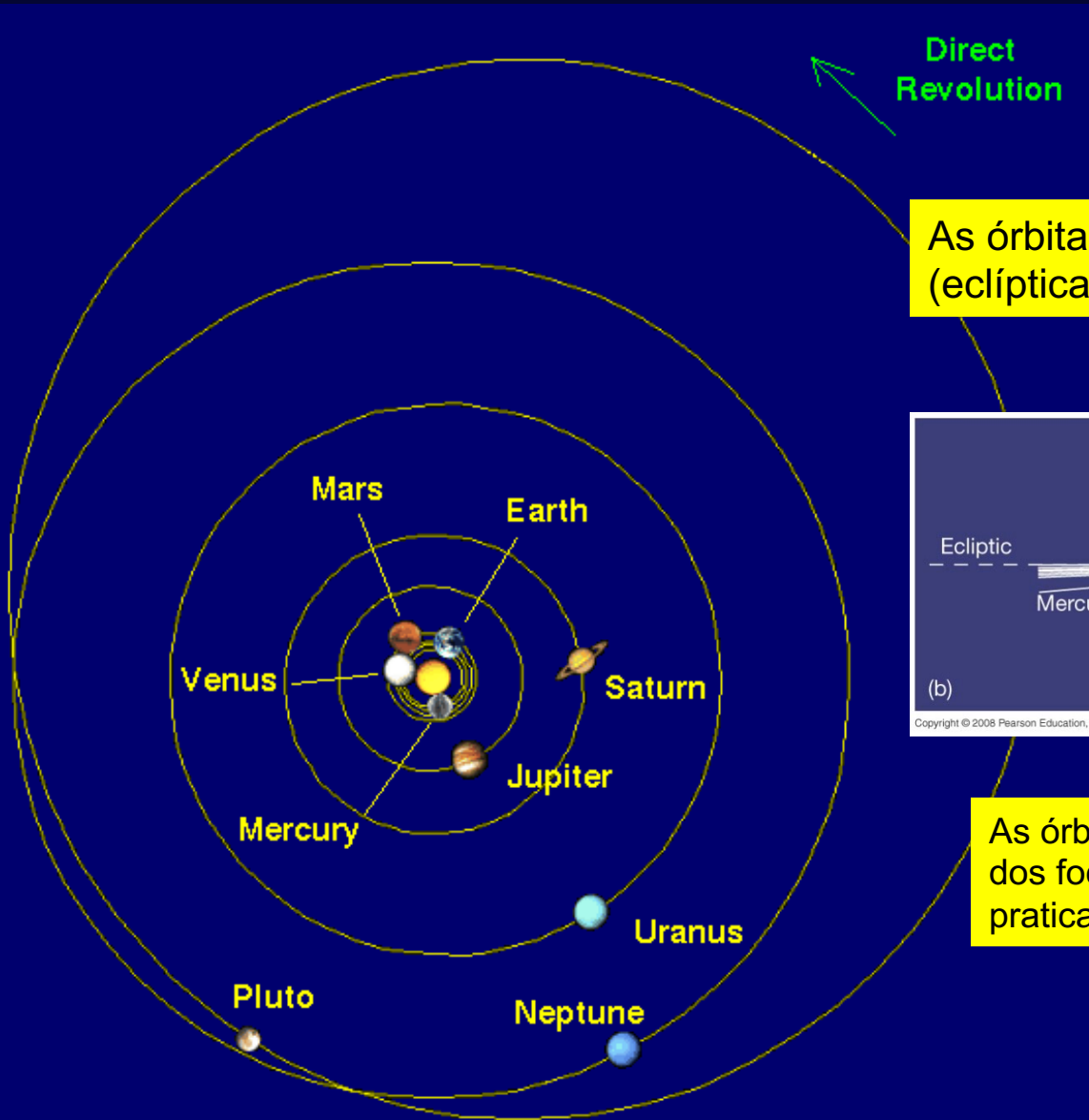


O Sistema Solar e o meio interestelar

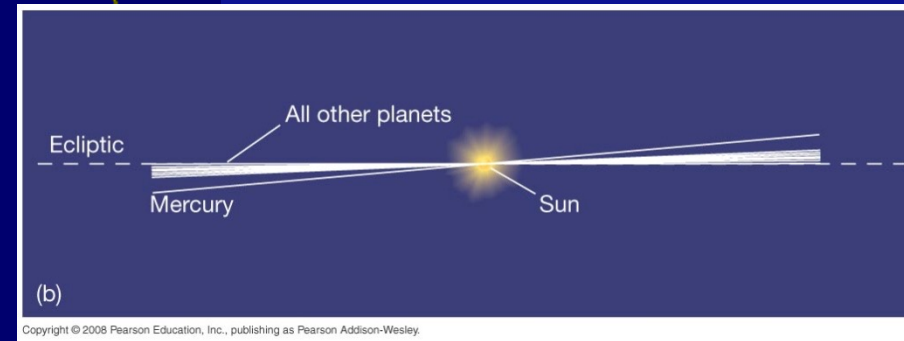


O Sistema Solar todo está imerso numa bolha de partículas ejetadas pelo Sol, o vento solar. Essa bolha termina quando as partículas desaceleram pela pressão exercida pelo meio interestelar. A assimetria se deve à rotação do SS em torno do centro galáctico.

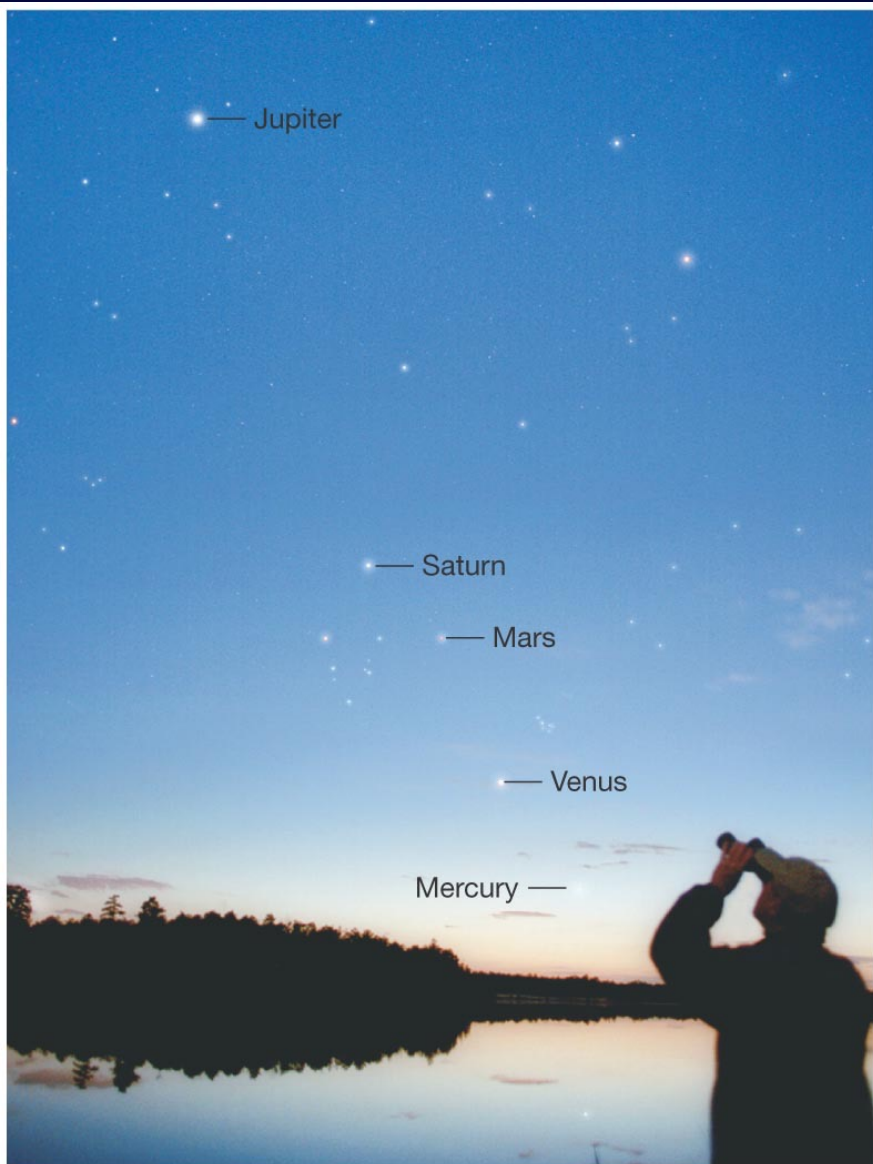
Os planetas giram ao redor do sol no sentido anti-horário (com o pólo norte solar visto de cima)



As órbitas estão ~ no mesmo plano (eclíptica), exceto Mercúrio e Plutão.

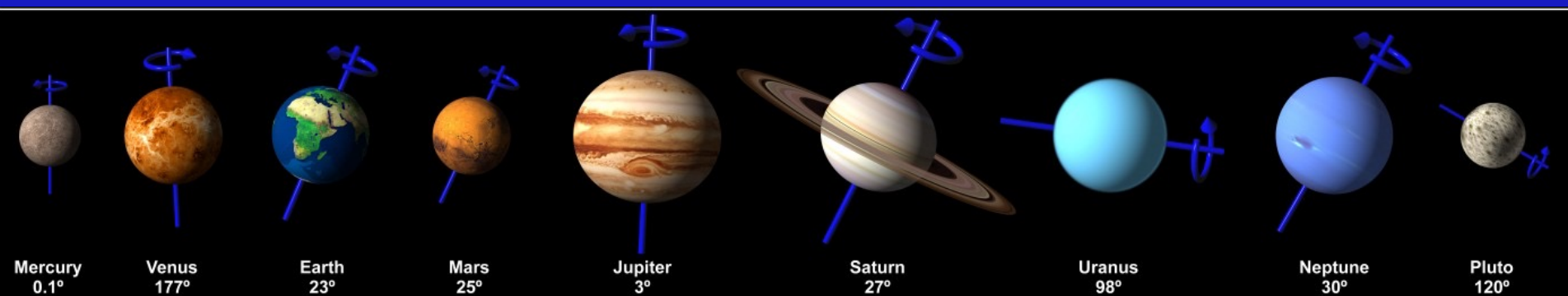
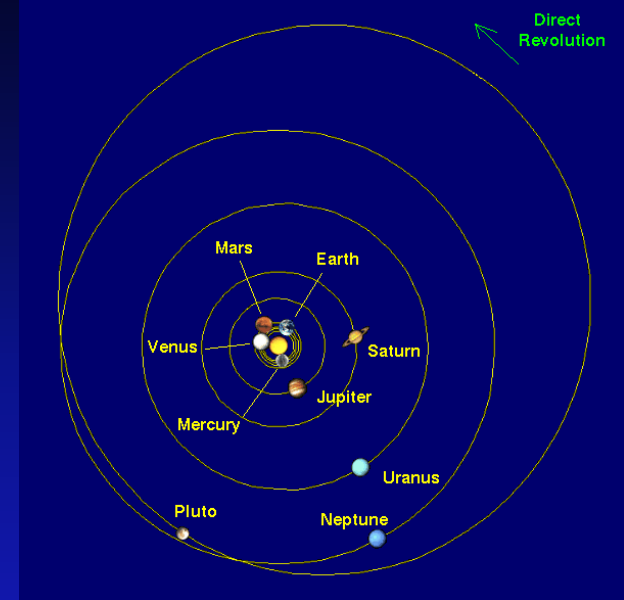


As órbitas são elipses com o Sol ocupando um dos focos. Vênus, Terra e Netuno têm órbitas praticamente circulares



Como as órbitas dos planetas estão aproximadamente no mesmo plano, às vezes é possível observá-los da Terra na mesma região do céu. São os chamados **alinhamentos planetários**

	Dist. ao Sol(UA)	Incl. Orbital	Excentr. Orbital	Eixo de Rot.
Sol	0	---	---	---
Mercúrio	0.39	7°	0.2056	0.1°
Vênus	0.72	3.394°	0.0068	177.4° (-2.6°)
Terra	1.0	0.000	0.0167	23.45°
Marte	1.5	1.850°	0.0934	25.19°
Júpiter	5.2	1.308°	0.0483	3.12°
Saturno	9.5	2.488°	0.0560	26.73°
Urano	19.2	0.774°	0.0461	97.86°
Netuno	30.1	1.774°	0.0097	29.56°
Plutão	39.5	17.15°	0.2482	119.6°



Obliquity of the Nine Planets

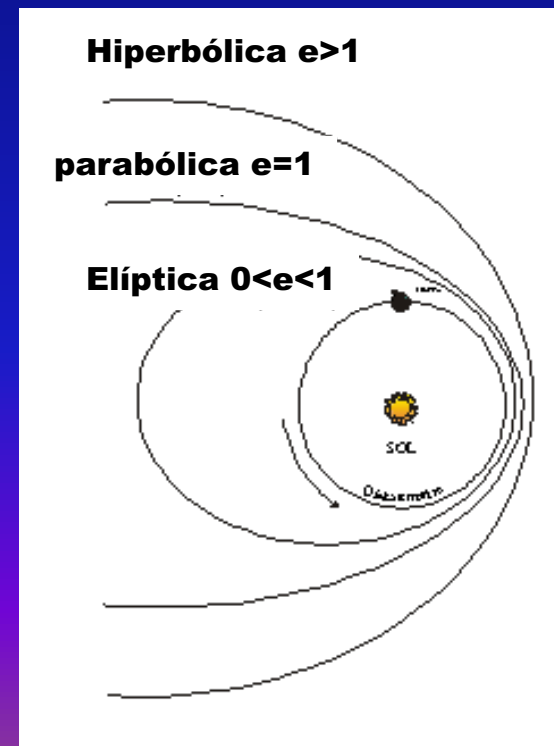
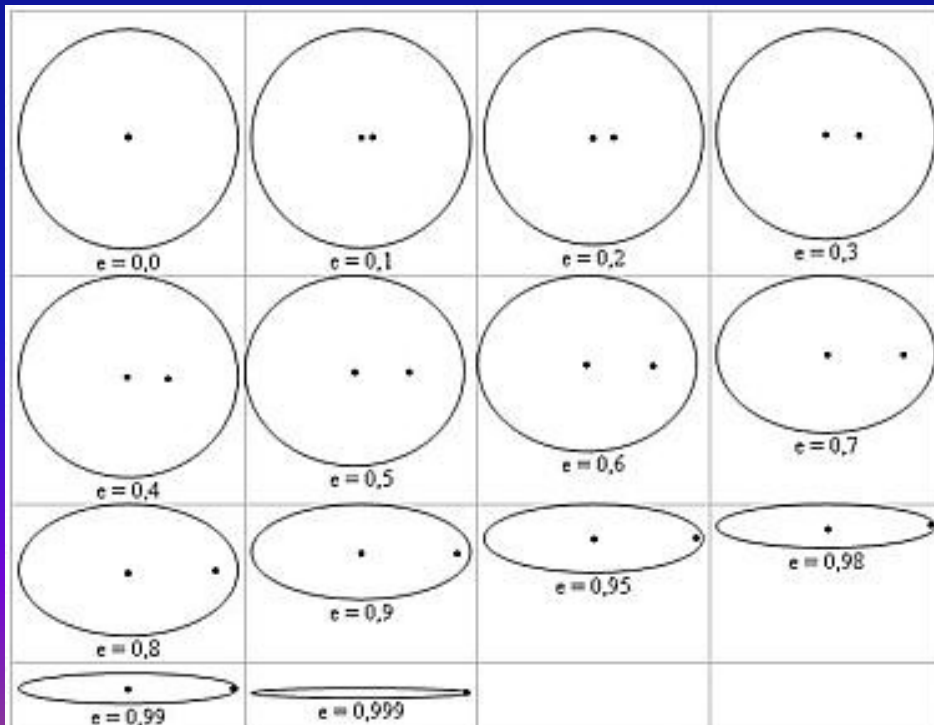
© Copyright 1999 by Calvin J. Hamilton

Notar que Vênus gira no sentido contrário aos demais

Notas

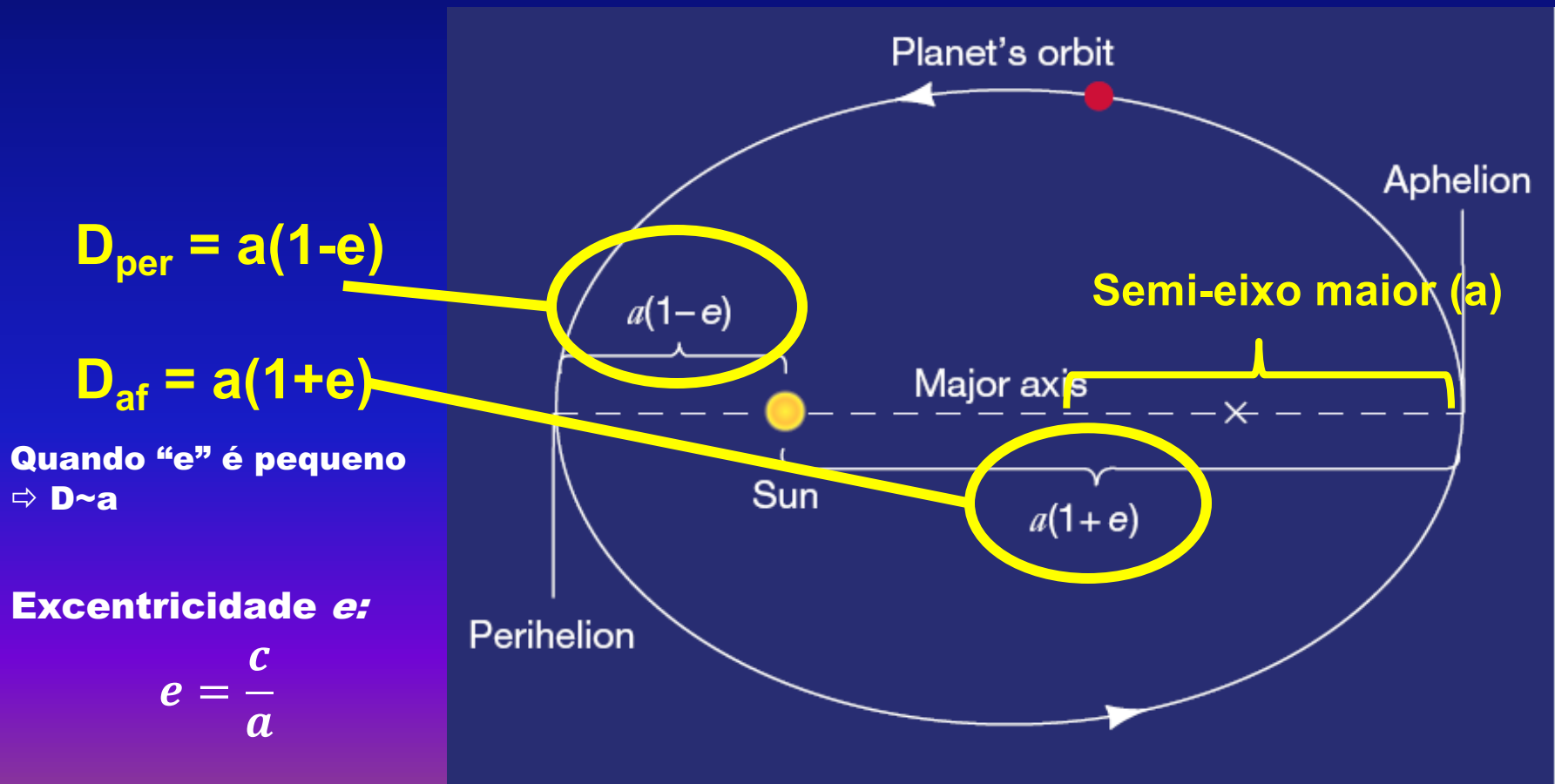
Excentricidade orbital: É uma medida de como uma órbita se desvia de ser circular. Uma órbita perfeitamente circular tem uma excentricidade zero. Números maiores que zero indicam órbitas elípticas, parabólicas e hiperbólicas. Uma excentricidade entre 0 e 1 representa uma órbita elíptica. Uma órbita parabólica tem uma excentricidade igual a 1. Uma órbita hiperbólica tem uma excentricidade maior do que 1.

Netuno, Vênus e a Terra são os planetas com as órbitas menos excêntricas em nosso Sistema Solar. Plutão e Mercúrio são os planetas com as órbitas mais excêntricas em nosso Sistema Solar.

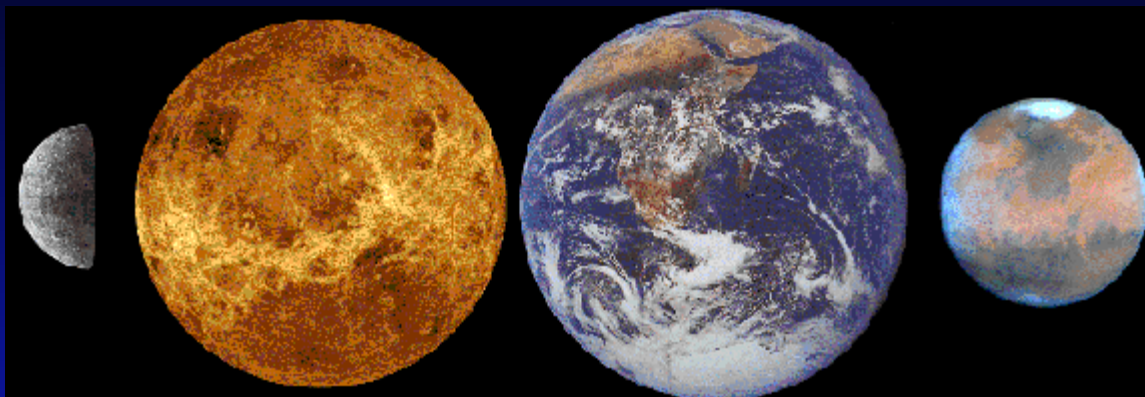


PROPRIEDADES DAS ÓRBITAS PLANETÁRIAS

- Semi-eixo maior e excentricidade descrevem totalmente o tamanho e formato da órbita.
- Periélio: mais próximo do Sol
- Afélio: mais afastado do Sol.



TAMANHOS RELATIVOS



	Raio (Terra)
Sol	109
Mercúrio	0.38
Vênus	0.95
Terra	1.00
Marte	0.53
Júpiter	11
Saturno	9
Urano	4
Netuno	4
Plutão	0.18

Propriedades dos planetas

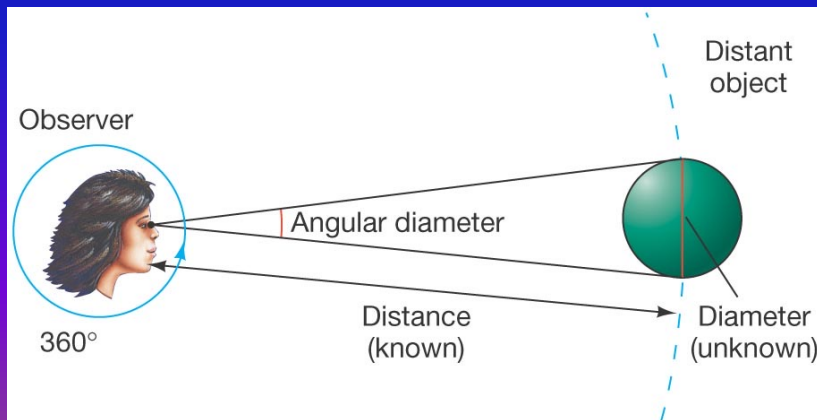
	D (UA)	R (Terra)	M (Terra)	Rot (dias Terra)	n^o Luas	Incl. Orb.	Exc. Orb.	P Orb. (anos Terra)	Obliq	Dens. g/cm³
Sol	0	109	332.800	25-36*	---	---	---	---	---	1.410
Mercúrio	0.39	0.38	0.05	58.8	0	7	0.206	0.24	0.1°	5.43
Vênus	0.72	0.95	0.89	-244	0	3.39	0.007	0.62	177.4°	5.25
Terra	1.0	1.00	1.00	1.00	1	0.00	0.017	1.0	23.45°	5.52
Lua	---	0.27	0.012	27.3	---	---	---	---	5.2°	3.3
Marte	1.5	0.53	0.11	1.029	2	1.85	0.093	1.9	25.19°	3.95
Ceres	2.8	0.073	0.0002	0.38	---	---	---	4.7	---	2.7
Júpiter	5.2	11	318	0.411	95	1.31	0.048	11.9	3.12°	1.33
Saturno	9.5	9	95	0.428	146	2.488	0.0560	29.4	26.73°	0.69
Urano	19.2	4	17	0.748	27	0.77	0.046	84	97.86°	1.29
Neptuno	30.1	4	17	0.802	14	1.77	0.010	164	29.56°	1.64
Plutão	39.5	0.18	0.002	0.267	5	17.1	0.248	248	119.6°	2.03

*** O período de rotação do Sol na sua superfície varia de aproximadamente 25 dias no equador até 36 dias nos polos.**

MEDINDO OS PLANETAS

- **DISTÂNCIA AO SOL** : a distância relativa pode ser obtida a partir das leis de Kepler, com a escala dada pela medida da distância de Vênus por radar.
- **PERÍODO ORBITAL**: observações das posições dos planetas em relação às estrelas de fundo ao longo do tempo.
- **RAIO DO PLANETA**: diâmetro angular

Ex. Diâmetro angular de Júpiter = 46.8 segundos de arco



$$\frac{\text{diâmetro}}{2\pi \times \text{distância}} = \frac{\text{diâmetro angular}}{360^\circ}$$

Diâmetro = 143.000 km

MEDINDO OS PLANETAS

- MASSA : leis de Newton (movimento e gravidade) observando o movimento das luas em torno do planeta

Ex. Júpiter : o período observado de Europa em torno de Júpiter é de 3,55 dias. A órbita é circular com um raio angular de 3,66 minutos de arco (visto da Terra).

Convertendo em km como feito anteriormente:

R = 671.000 km, o que dá uma velocidade orbital de:

$$V = \frac{2\pi r}{P} = 13.7 \text{ km / s}$$

Aplicando as leis de Newton:

$$\frac{mV^2}{r} = \frac{GmM}{r^2} \Rightarrow M = \frac{rV^2}{G}$$



$$M = 1,9 \times 10^{27} \text{ kg}$$

Aplicando a 3ª lei de Kepler:

$$(M_J + m) = \frac{a^3}{P^2}$$

$$M_J = \left(\frac{671.000}{150 \times 10^6}\right)^3 / \left(\frac{3,55}{365}\right)^2 = 0.0009 M_\odot \\ \sim 1,9 \times 10^{27} \text{ kg}$$

Sendo $M_J \gg m$

$$M_J \sim \frac{a^3}{P^2}$$

MEDINDO OS PLANETAS

- MASSA DE PLANETAS SEM SATÉLITES: através de perturbações nas órbitas de objetos próximos (estimativa do potencial gravitacional).

Ex.

Mercúrio e Vênus produzem perturbações nas órbitas um do outro assim como na da Terra.

Lua produz perturbação da órbita da Terra (dois corpos orbitando em torno de seu CM).

Descoberta de Netuno: perturbações na órbita de Urano

- PERÍODO DE ROTAÇÃO: observações

- DENSIDADE:

$$D = \frac{M}{\frac{4}{3} \pi R^3}$$

Ex. Júpiter $D=1240 \text{ kg/m}^3$
ou 1.24 g/cm^3

CLASSIFICAÇÃO DOS 8 PLANETAS DO SISTEMA SOLAR

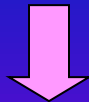
Por COMPOSIÇÃO QUÍMICA :

- Planetas terrestres ou rochosos : Mercúrio, Vênus, Terra e Marte



são compostos por rochas e metais, possuindo altas densidades relativas, rotação mais lenta, superfícies sólidas, sem anéis e poucas luas.

- Planetas jovianos ou gasosos : Júpiter, Saturno, Urano e Netuno



são compostos basicamente por H e He, possuem baixas densidades, rotação rápida, camadas atmosféricas espessas, anéis e muitos satélites

CLASSIFICAÇÃO DOS 8 PLANETAS DO SISTEMA SOLAR

Por TAMANHO:

- Planetas pequenos : Mercúrio, Vênus, Terra e Marte



possuem diâmetros < 13.000 km

- Planetas gigantes ou gigantes gasosos : Júpiter, Saturno, Urano e Netuno



possuem diâmetros > 48.000 km

CLASSIFICAÇÃO DOS 8 PLANETAS DO SISTEMA SOLAR

Pela sua **POSIÇÃO RELATIVA AO SOL:**

- **Planetas internos** : Mercúrio, Vênus, Terra e Marte
- **Planetas externos** : Júpiter, Saturno, Urano e Netuno

O cinturão principal de asteróides situado entre Marte e Júpiter marca os limites do sistema solar interno e externo

CLASSIFICAÇÃO DOS 8 PLANETAS DO SISTEMA SOLAR

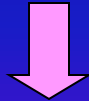
Pela sua POSIÇÃO RELATIVA À TERRA:

- **Planetas inferiores** : Mercúrio e Vênus



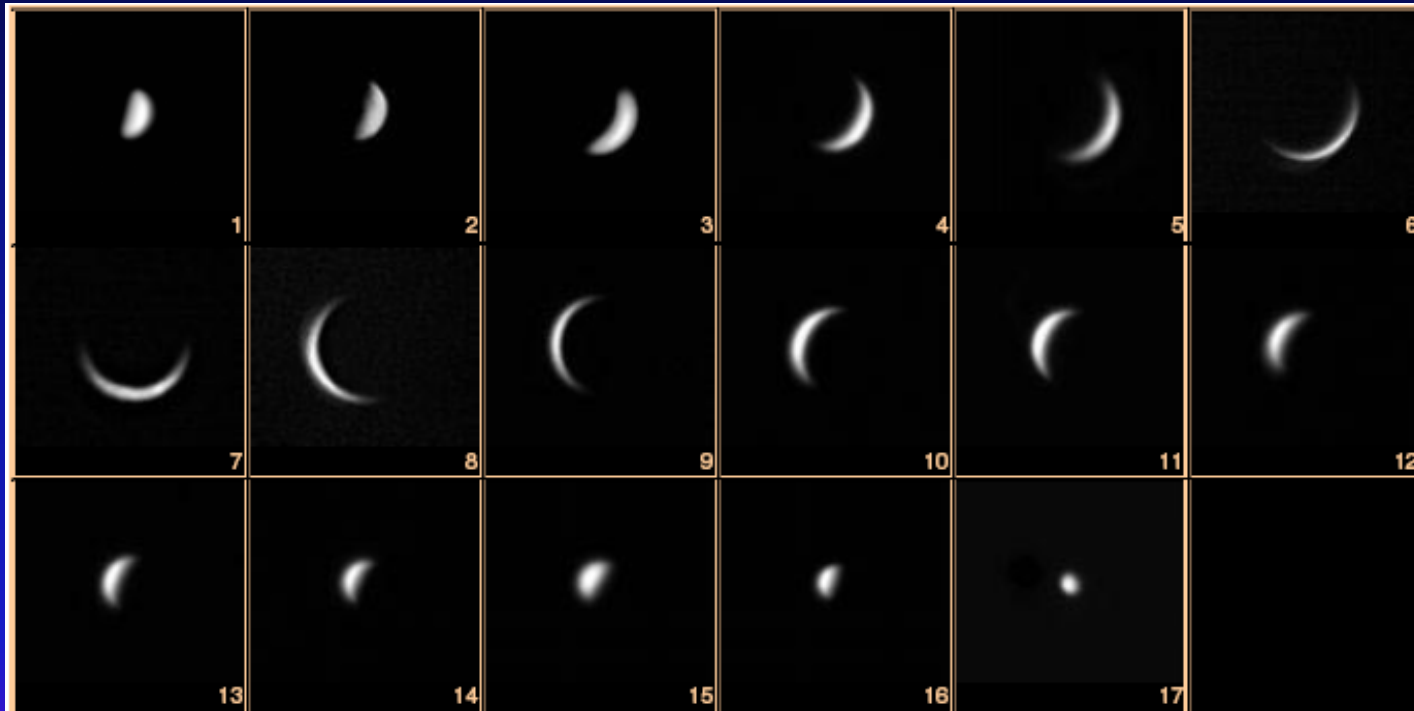
- mais perto do Sol do que a Terra
- mostram fases como a Lua quando vistos da Terra

- **Planetas superiores** : Marte, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno



- mais longe do Sol do que a Terra
- os planetas superiores sempre aparecem na “fase cheia”

Vênus nas suas diversas fases



Nas fotos 1 a 6, nessa ordem, Vênus está se aproximando da Terra e por essa razão seu diâmetro aumenta à medida que sua fase evolui de minguante para nova.

A partir da foto 7 tem início a fase crescente e, conseqüentemente, o afastamento do planeta que será máximo na fase cheia.

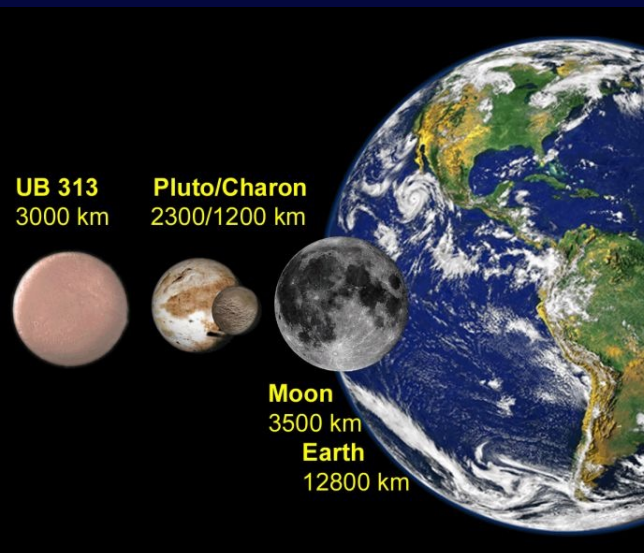
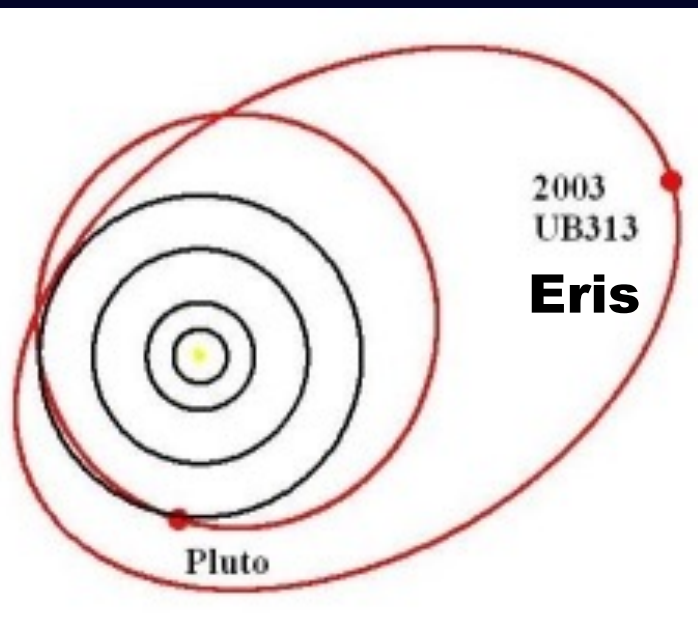
PLANETAS ANÕES

(confirmados e candidatos)

Largest known trans-Neptunian objects (TNOs)



PLANETAS ANÕES

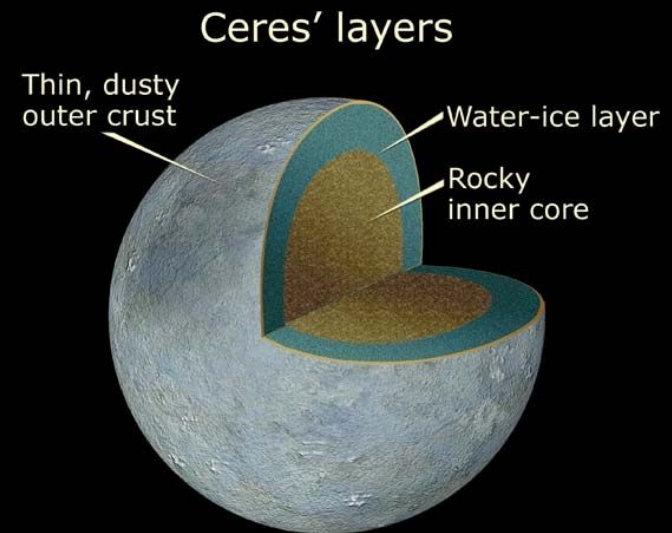


Nome	Distância do Sol (UA)	Região do Sistema Solar	Diâmetro	Massa (Lua= 7.36×10^{22} kg)
Ceres	2,766	Cinturão de asteróides	975×909 km	9.5×10^{20} kg
Plutão	39,482	Cinturão de Kuiper	2306±20 km	1.303×10^{22} kg
Eris	67,668	Disco disperso	2400 km ± 100 km	1.66×10^{22} kg

PLANETAS ANÕES no cinturão de asteróides

Ceres é um planeta anão que se encontra no cinturão de asteróides, entre Marte e Júpiter. Ceres tem um diâmetro de cerca de 950 km e é o corpo mais maciço dessa região do sistema solar, contendo cerca de 1/3 do total da massa do cinturão.

25% de gelo



Composição parecida com planetas terrestres

DEFINIÇÃO DE PLANETA ANÃO segundo a União Astronômica Internacional (IAU - 2006)

Planeta anão é um corpo celeste situado dentro do sistema solar e que satisfaz 4 condições:

[1] orbitar ao redor do Sol

[2] tenha massa suficiente para assumir uma situação de equilíbrio hidrostático que o leve a ter forma aproximadamente esférica.

[3] compartilhar sua órbita com outros corpos de massa semelhante (não são dominantes na sua órbita)

[4] não é um satélite

EXOPLANETAS OU PLANETAS EXTRASSOLARES

Planetas fora do domínio do Sol

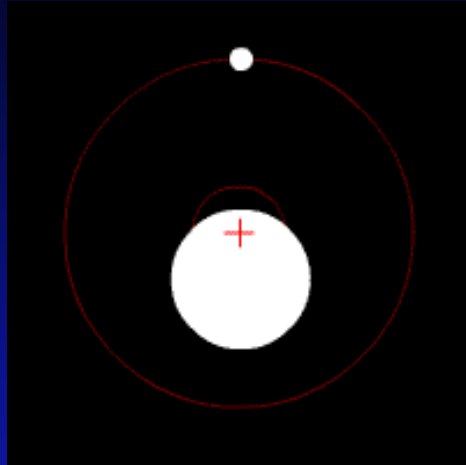
Já foram identificados tipos planetários, como:

- **Superterras (1,1 a 10 M_{\oplus})** – planetas rochosos maiores do que o nosso.
- **Júpiters** – planetas da ordem de grandeza de júpiter
- **Júpiters quentes** – gigantes gasosos cujas órbitas situam-se muito próximas de sua estrela-mãe, o que torna suas atmosferas turbulentas e aquecidas.

Segundo os dados do satélite Kepler, ~100% das estrelas têm planetas

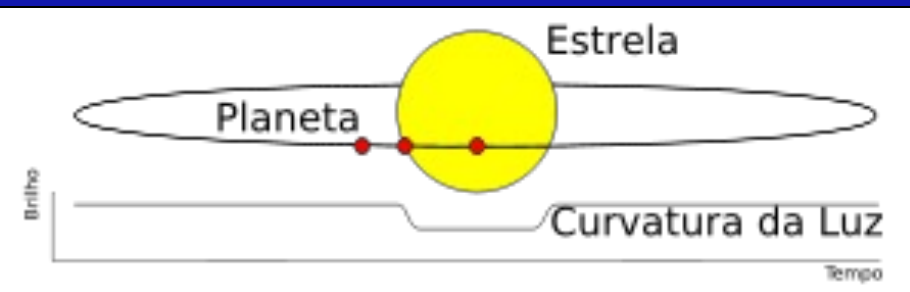
O número de exoplanetas não para de aumentar. Atualmente (março de 2024) está em ~ 5600, com cerca de 9300 candidatos a confirmar.

EXEMPLOS DE MÉTODOS PARA DETECÇÃO DE EXOPLANETAS



Variações na velocidade radial de estrelas

Trânsitos



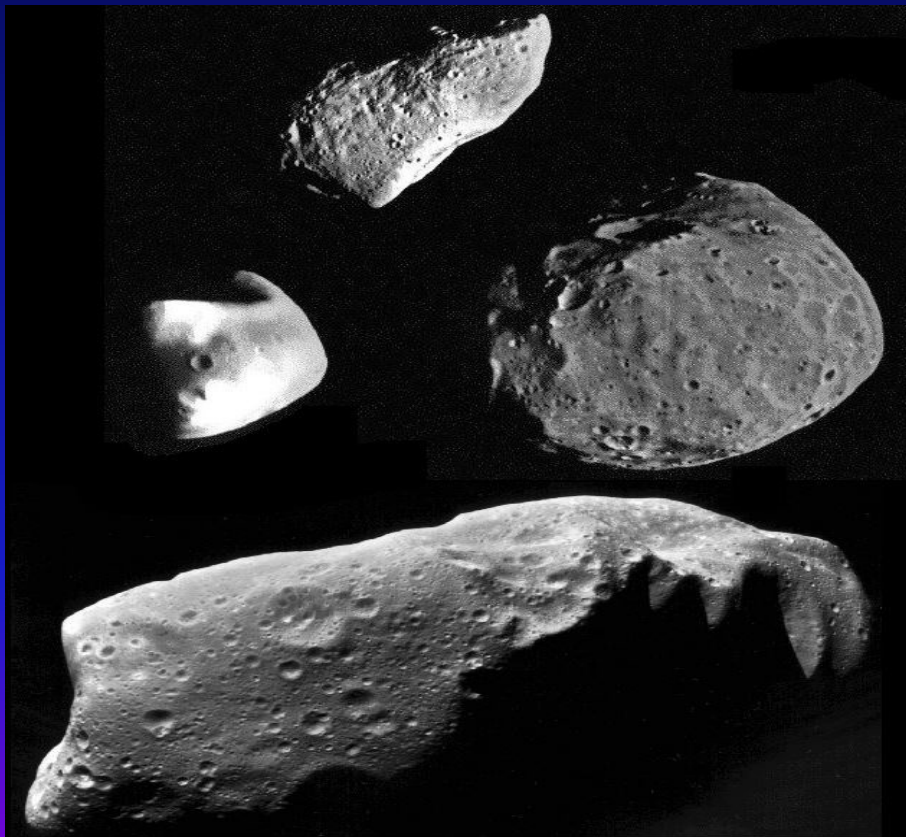
O método consiste em detectar a sombra do planeta quando este **transita** diante da estrela hospedeira. Este método funciona apenas com uma pequena porcentagem de planetas cujos planos orbitais estejam perfeitamente alinhados com nossa linha de visada, mas pode ser aplicado mesmo a estrelas muito distantes

Numerosos pequenos corpos também pertencem ao sistema solar :

- satélites dos planetas (luas)
- asteroides (pequenos corpos rochosos)
- cometas (pequenos corpos de gelo)
- planetoides ou asteroides congelados do cinturão de Kuiper (além da órbita de Netuno = objetos transnetunianos)

Com poucas exceções, os satélites planetários orbitam no mesmo sentido dos planetas e aproximadamente no plano da eclíptica (não é geralmente verdadeiro para asteroides e cometas).

Asteroides



- Piazzi (1801) descobriu pela determinação de sua órbita o asteroide **Ceres** (atualmente classificado de planeta anão).

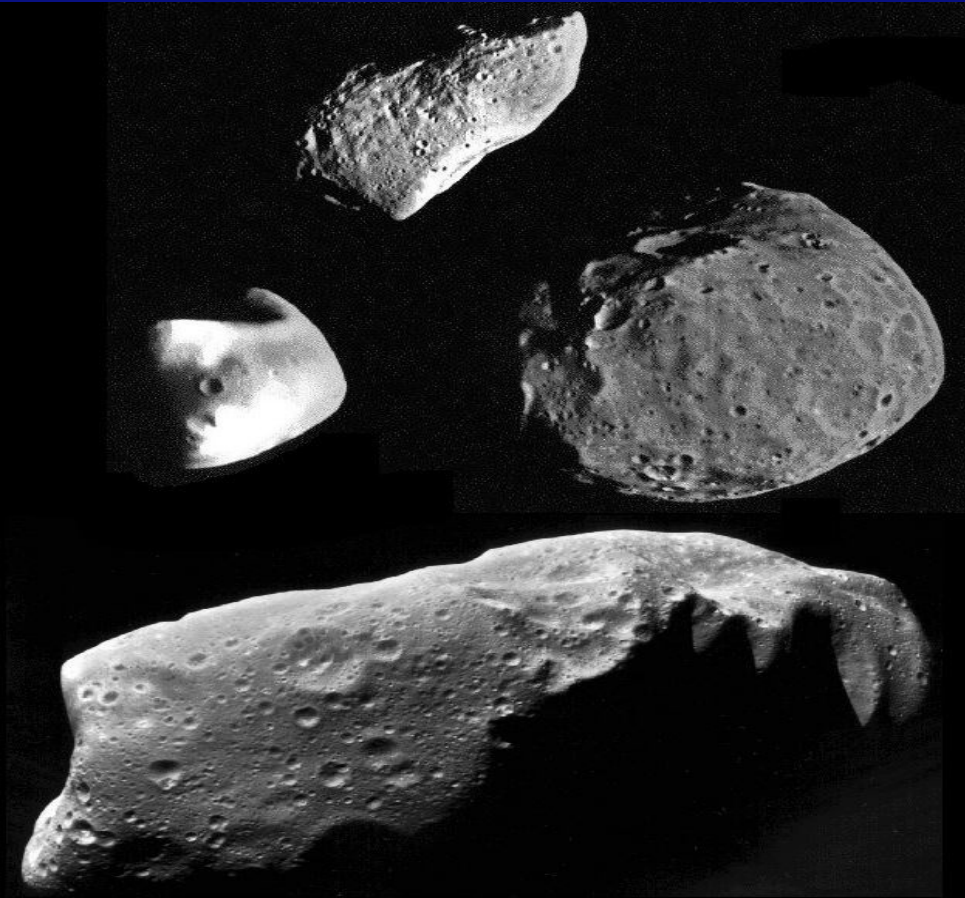
- Anos depois foram descobertos **Pallas, Vesta e Juno**. Final do século XIX havia algumas centenas de asteróides identificados

- Hoje : alguns milhares são descobertos a cada ano, muitos são pequenos demais para serem vistos da Terra

Asteroides

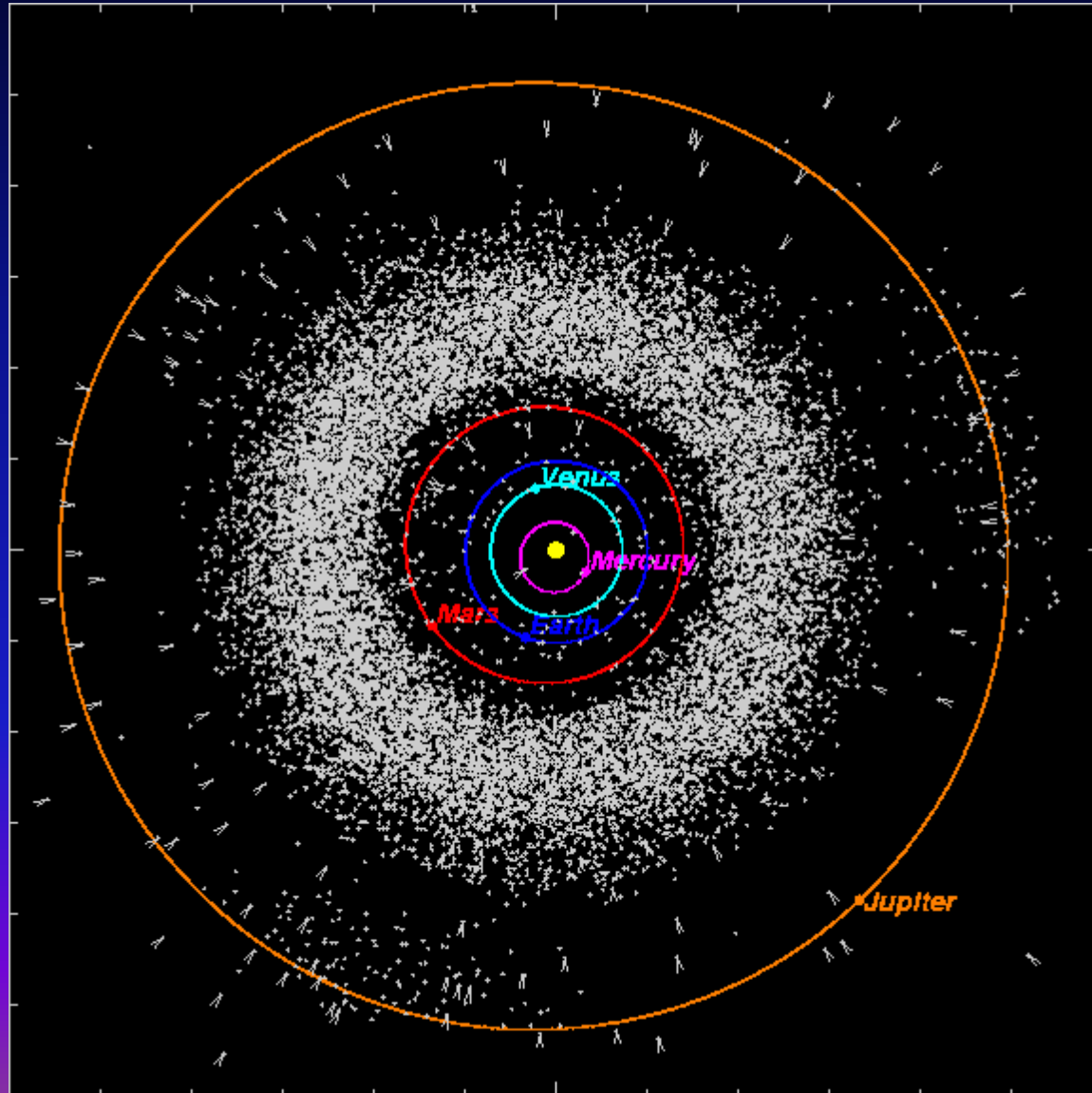
Tamanhos (diâmetro):

- 26 maiores do que 200 km
- são bem catalogados os que têm entre 100 e 200 km (99%)
- metade daqueles entre 10 e 100 km estão catalogados
- abaixo de 1 km uma fração pequena é conhecida (estima-se que a sua quantidade é da ordem de milhões)



- massa total de todos os asteroides reunidos não ultrapassa a massa da Lua.

Órbitas dos maiores asteroides, comparadas com as órbitas dos planetas



[Órbitas dos principais grupos de asteroides \(link\)](#)

[Evolução das descobertas de asteroides \(1970-2010\) \(link\)](#)

Asteroides

Composição química:

- semelhante à solar (porém sem H, He e outros materiais mais voláteis) **75% dos asteróides conhecidos**
- mistura de níquel-ferro, magnésio e silicatos **17% dos asteróides conhecidos**
- níquel-ferro puro **o restante**

Posição no sistema solar

- Cinturão principal = entre Marte e Júpiter (cerca de 2-4 UA do Sol)
- Próximos a Terra = cerca de 0,98 a 1,3 UA
- Troianos = próximos a Júpiter (algumas centenas)

Cometas

Movimentam-se até as partes mais internas do sistema solar em órbitas bem alongadas e com qualquer inclinação em relação a eclíptica.



Cometas



São Conhecidos desde a antiguidade ⇒
notas sobre a passagem do Cometa Halley
feitas pelos Chineses em 240 AC

O número de cometas já descobertos e catalogados é de aproximadamente 6600, mas o número potencial de objetos da **Nuvem de Oort** que podem vir a se transformar em cometas é de ~ um trilhão.

**Composição química:
mistura de água + gases congelados + poeira**

Cometas

Hyakutake 1996



PARTES :

- **NÚCLEO** : região central, é formado por gases congelados, gelo e restos de rochas. Tamanho de aproximadamente uma grande montanha da Terra.
- Quando está bastante afastado do Sol, o cometa só possui o núcleo.

- **COMA** : nuvem de gás aproximadamente esférica que circunda o núcleo. Esta nuvem é produzida quando o cometa se aproxima do Sol, e o calor vaporiza o material congelado.
- É formada por vapor d'água, CO_2 e outros gases neutros que sublimaram a partir do núcleo sólido. Estes gases brilham bastante (luz solar refletida nas moléculas do gás).
- Pode se estender até cerca de meio milhão de km a partir do núcleo.

Cometas

- **CAUDA** : é formada quando o núcleo começa a se desintegrar, produzindo uma trilha com material que é arrancado da sua superfície.

Os cometas possuem duas caudas:

- 1) **cauda de poeira** : trilha de poeira arrancada do cometa que é deixada para trás a medida que ele se desloca (situa-se ao longo da sua trajetória orbital). Parte mais visível a olho nú.
- 2) **Cauda de íons ou gás**: aponta sempre para a direção contrária ao Sol por interação com o vento solar.

As caudas podem se estender por milhões de km.

Hale-Bopp 1997



Cometas

Hale-Bopp 1997

Os gases presentes na coma são ionizados pelas partículas do vento solar, e carregadas pelo campo magnético solar .

- O íon mais comum é o CO^+ , que espalha a luz azul melhor do que a vermelha, o que geralmente dá uma cor azulada à cauda de íons.
- O vento solar atinge o cometa a uma velocidade de aproximadamente 500 km/s, fazendo com que a cauda ionizada seja direcionada na direção oposta ao Sol.



Cometas extintos e cometas adormecidos

Os cometas não possuem um material inesgotável para ser volatilizado. Durante cada aproximação do Sol, os cometas perdem material.

Cometa extinto: aquele que esgotou o material que pode ser volatilizado. Como consequência, este cometa não consegue mais formar a coma e o cauda tão características deste tipo de objeto.

Cometa adormecido: aquele que durante as suas viagens interplanetárias acumulou uma espessa crosta de grãos de poeira interestelar sobre a sua camada de material volátil de modo que, agora, a radiação proveniente do Sol não consegue mais atingir e arrancar seu material volátil para formar a cauda e a coma.

Este manto espessa de poeira acumulada sobre sua superfície volátil dá ao cometa uma **aparência externa de asteroide**, mas debaixo dele está o núcleo de um cometa. Acredita-se que o "asteróide" **Phaeton** possa ser um objeto deste tipo, um cometa extinto ou mesmo adormecido, que apresenta características de asteróide.

Exemplos de Cometas

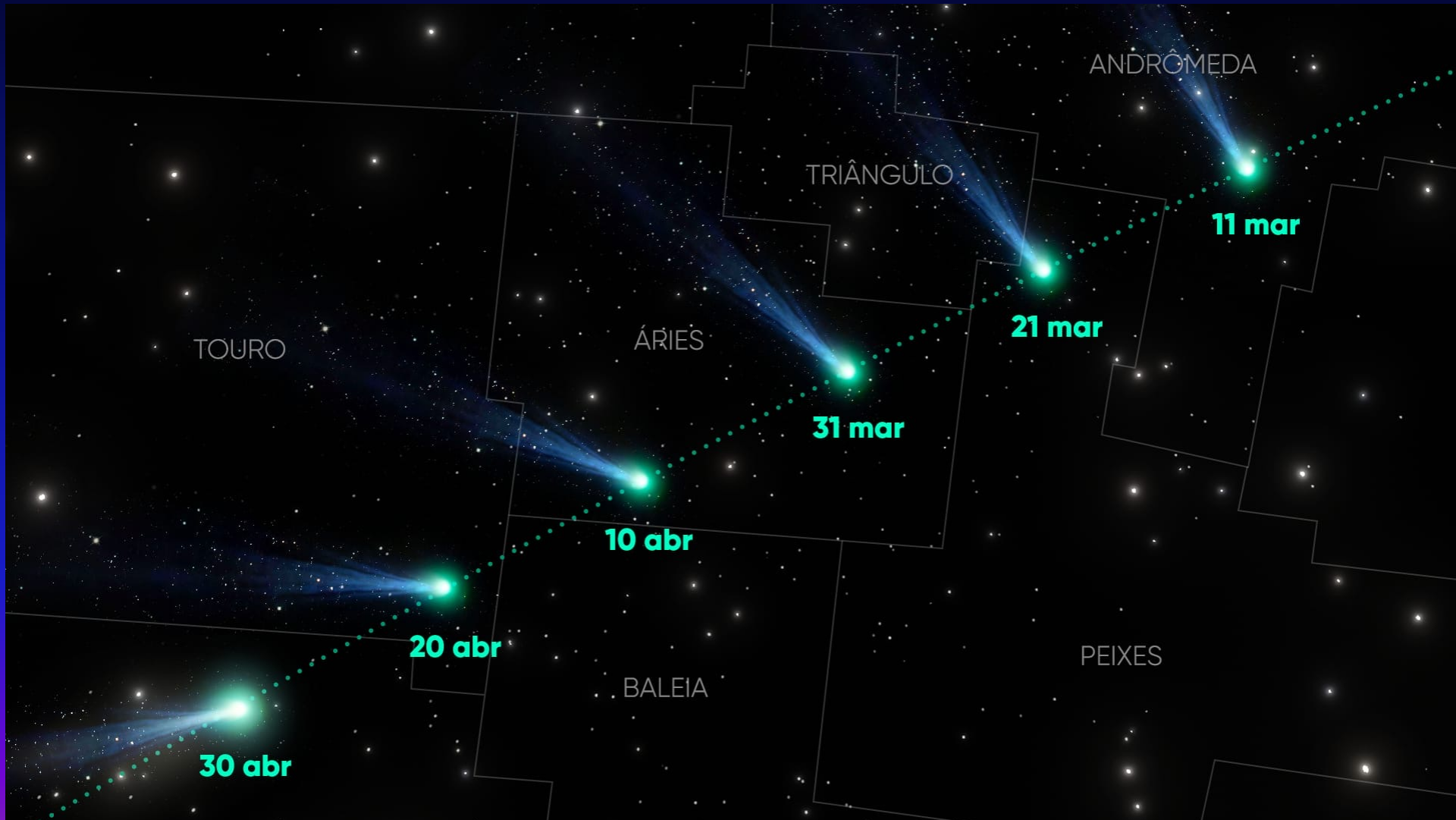
Alguns cometas	Data da descoberta	Período (anos)
Ikeya-Seki	1965	~880
Halley	240 A.C.	~76
Encke	1786	3,28
Biela	1772	6,62

Cometas mais brilhantes dos últimos 50 anos

Comets Reaching At Least Magnitude +1.0: 1969-2019

Designation	Name	Perihelion Date	Peak Magnitude	Tail Length
C/1969 V1	Bennett	March 20, 1970	+0.5	20 degrees
C/1970 K1	White-Ortiz-Bolelli	May 14, 1970	+1.0	10 degrees
C/1973 E1	Kohoutek	Dec. 28, 1973	-3.0	25 degrees
C/1975 V1	West	Feb. 25, 1976	-3.0	30 degrees
C/1996 B2	Hyakutake	May 1, 1996	0.0	100 degrees
C/1995 O1	Hale-Bopp	April 1, 1997	-0.5	40 degrees
C/2006 P1	McNaught	Jan. 12, 2007	-6.0	35 degrees
C/2011 W3	Lovejoy	Dec. 16, 2011	-1.0	35 degrees

O cometa Pons-Brooks poderá ser observado do hemisfério sul em poucas semanas, talvez a olho nu!



FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

(a) Uma nuvem de gás que tem uma rotação inicial, começa a se contrair devido à sua própria massa (colapso gravitacional).

(b) Quanto mais uma nuvem interestelar se contrai, mais rápido ela gira (conservação de momentum angular $L=mvr$). À medida que gira, vai se "achatando" em um plano (formação de um disco).

10⁷ anos

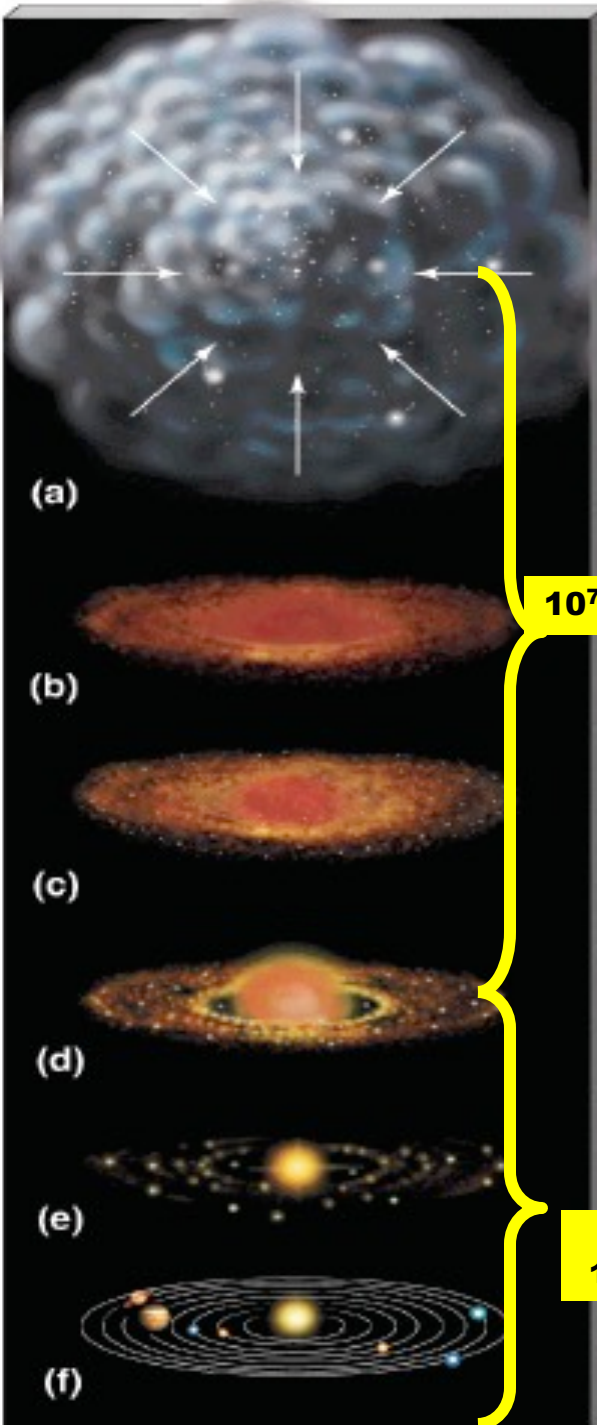
(c) Colisões formam pequenos corpos chamados "planetesimais" a partir do disco de poeira e gás.

(d) A sequência das colisões forma corpos cada vez maiores (aglutinação de pequenos corpos que colidem), no centro forma-se o proto-sol

(e) A ignição termonuclear do Sol (torna-se uma estrela) aquece o disco, fazendo com que os corpos mais próximos, menores e mais voláteis evaporem

(f) O sistema solar é formado com a configuração observada atualmente

**alguns
10⁶ anos**



Idade do sistema solar = 4.6×10^9 anos

Comprovações do modelo de formação do sistema solar:

- as órbitas dos planetas e satélites **seguem o sentido de rotação original** da mesma nuvem de gás e poeira que os formou.
- as órbitas dos planetas estão aproximadamente **no mesmo plano** (formação do disco)
- A datação de meteoritos e das rochas mais antigas da Terra com técnicas da geologia e geofísica confirmam a **idade de 4,6 bilhões de anos**

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

