

ASTRONOMIA DO SISTEMA SOLAR

Enos Picazzio

ESTRUTURA E FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

NÃO HÁ PERMISSÃO DE USO PARCIAL OU TOTAL DESTE MATERIAL PARA OUTRAS FINALIDADES.

O objetivo de uma teoria de origem do Sistema Solar

Como o Sistema Solar foi formado?

Uma teoria aceitável deve:

- basear-se em princípios físicos (conservação de energia, momentum, lei gravitacional, leis de movimentos...),
- explicar pelo menos a maioria dos fatos observáveis com precisão razoável,
- ser aplicável a outros sistemas planetários.

Como descobrir as respostas?

- **Observando:** buscar evidências
- **Conjeturando:** obter explicações
- **Testando:** verificar o sucesso das explicações
- **Insistindo:** repetir passos 2 e 3 até obter bons resultados.

Propriedades Dinâmicas e Físicas

Nota-se uma certa regularidade entre elas:

Os sentidos de revolução e de rotação dos planetas (exceto Vênus) coincidem com o sentido de rotação do Sol; “rotação direta”

As órbitas dos planetas (exceto Mercúrio) são quase circulares e coplanares à eclíptica;

As órbitas da maioria dos satélites também são quase circulares e coplanares com o plano do equador dos seus planetas;

As distâncias heliocêntricas dos planetas, assim como as distâncias orbitais dos satélites, seguem uma lei de espaçamento regular;

Juntos, os planetas apresentam momento angular muito maior que o do Sol;

(quantidade de movimento angular = mvr ; massa, velocidade orbital, raio);

Há planetas com anéis no plano equatorial e rotação direta;

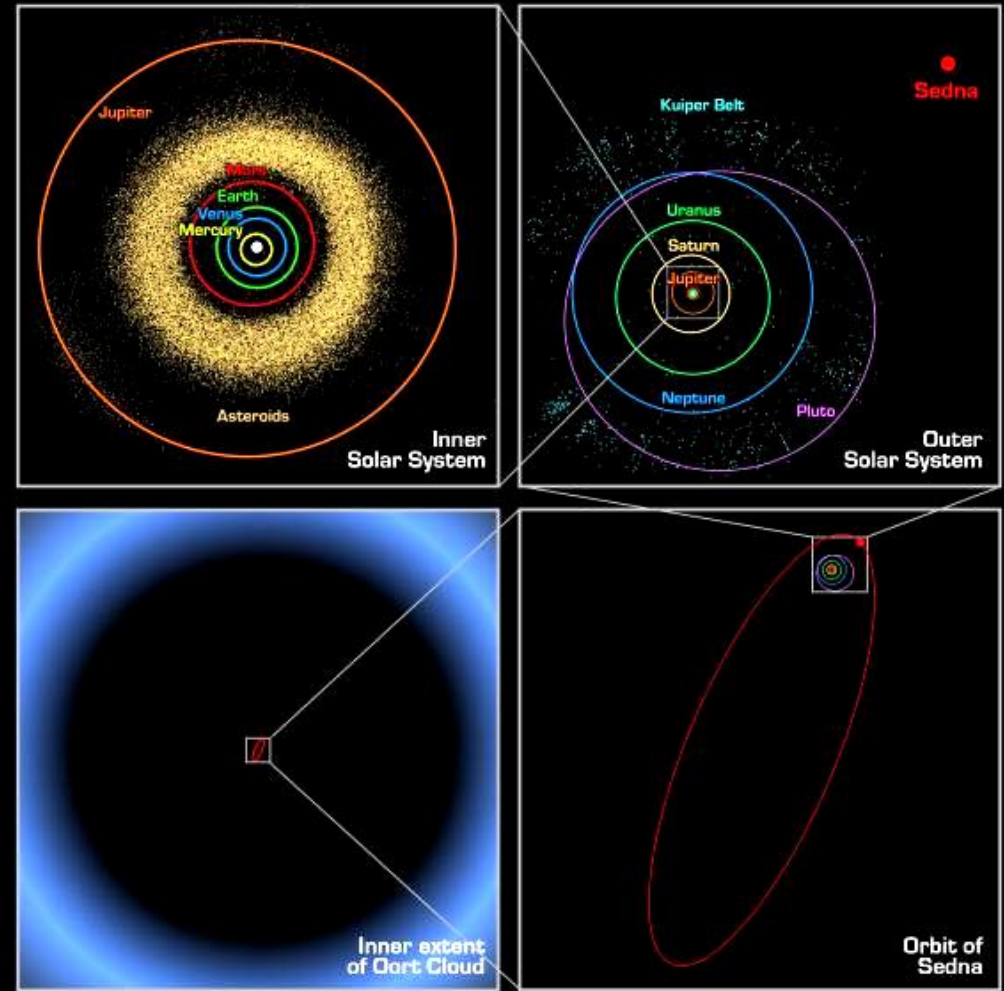
Os planetas apresentam composição química diferenciada;

Os cometas de períodos longos têm distribuição espacial quase isotrópica, ao contrário dos cometas de períodos curtos (próximos ao plano da eclíptica);

Adiante de Plutão (um *plutóide*) há uma população de corpos pequenos com órbitas quase circulares (algumas são altamente excêntricas) e coplanares à eclíptica;

O Sistema Solar visto de fora

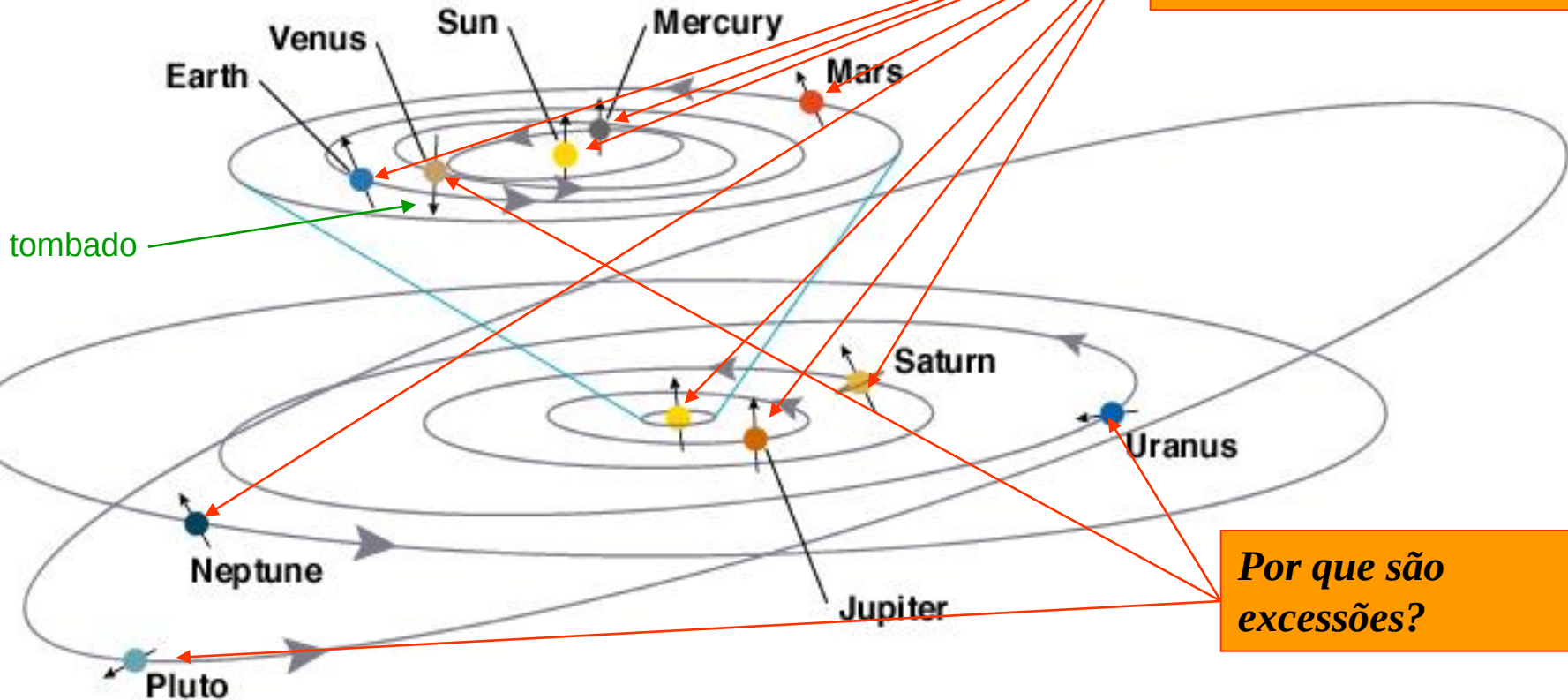
- Uma estrela (Sol) no centro
- Planetas rochosos (Mercúrio, Vênus, Terra, Marte) até 1,5 UA
- Cinturão de asteróides ~ 3 UA
- Planetas gasosos (Júpiter, Saturno, Netuno, Urano), ~ 5-40 UA
- Cinturão Kuiper e Região transnetuniana > 30 UA
- Nuvem de Oort > 1.000 UA



Configuração orbital da porção interna

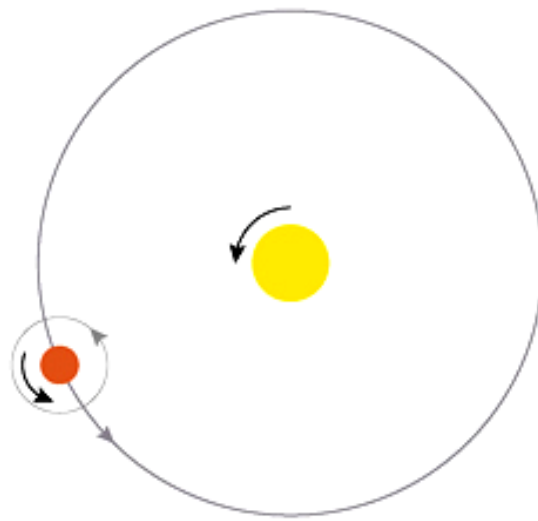
- Todos os planetas orbitam o Sol no mesmo sentido
- Os eixos de rotação da maioria dos planetas são praticamente perpendiculares aos planos de suas órbitas e quase paralelos ao eixo de rotação do Sol .
- Vênus e Urano são exceções. Na região transtuniana, as órbitas são altamente excêntricas e inclinadas.

Qual a razão da orientação dos eixos de rotação?



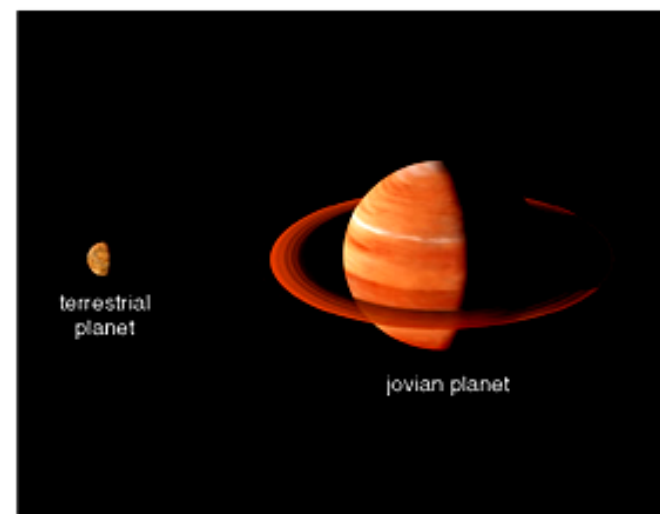
Por que são exceções?

Características e exceções

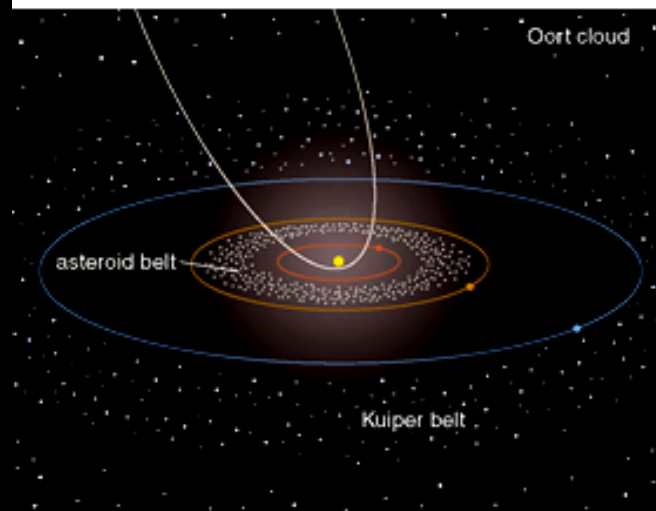


Large bodies in the solar system have orderly motions.

All planets and most satellites have nearly circular orbits going in the same direction in nearly the same plane. The Sun and most of the planets rotate in this same direction as well.

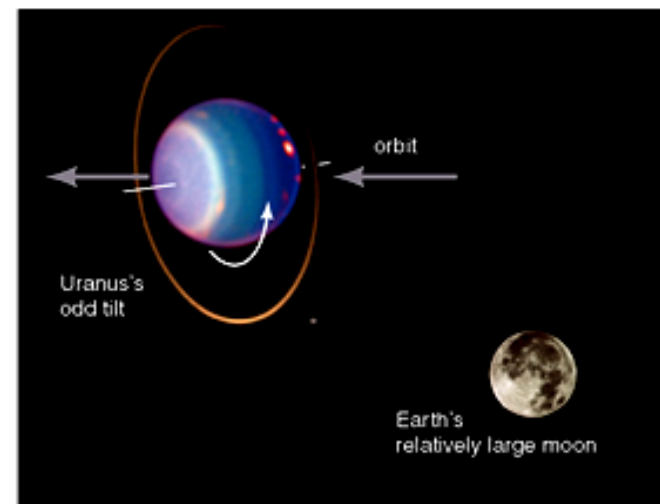


Planets fall into two main categories: small, rocky terrestrial planets near the Sun and large, hydrogen-rich jovian planets farther out. The jovian planets have many moons and rings made of rock and ice. Pluto does not fit in either category.



Swarms of asteroids and comets populate the solar system.

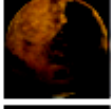
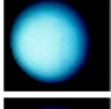
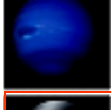
Asteroids are concentrated in the asteroid belt, and comets populate the regions known as the Kuiper belt and the Oort cloud.



Several notable exceptions to these general trends stand out, such as planets with unusual axis tilts or surprisingly large moons, and moons with unusual orbits.

Comparativo

TABLE 6.1 Planetary Data*

Photo	Planet	Relative Size	Average Distance from Sun (AU)	Average Equatorial Radius (km)	Mass (Earth = 1)	Average Density (g/cm ³)	Orbital Period	Rotation Period	Axis Tilt	Average Surface (or Cloud Tops) Temperature†	Composition	Known Moons (2004)	Rings?
	Mercury	•	0.387	2,440	0.055	5.43	87.9 days	58.6 days	0.0°	700 K (day) 100 K (night)	Rocks, metals	0	No
	Venus	•	0.723	6,051	0.82	5.24	225 days	243 days	177.3°	740 K	Rocks, metals	0	No
	Earth												No
	Mars												No
	Jupiter												Yes
	Saturn												Yes
	Uranus	●	19.2	25,559	14.5	1.32	83.8 years	17.2 hours	97.9°	60 K	H, He, hydrogen compounds [§]	24	Yes
	Neptune	●	30.1	24,764	17.1	1.64	165 years	16.1 hours	29.6°	60 K	H, He, hydrogen compounds [§]	13	Yes
	Pluto	•	39.5	1,160	0.0022	2.0	248 years	6.39 days	112.5°	40 K	Ices, rock	1	No

O que explica estas diferenças?

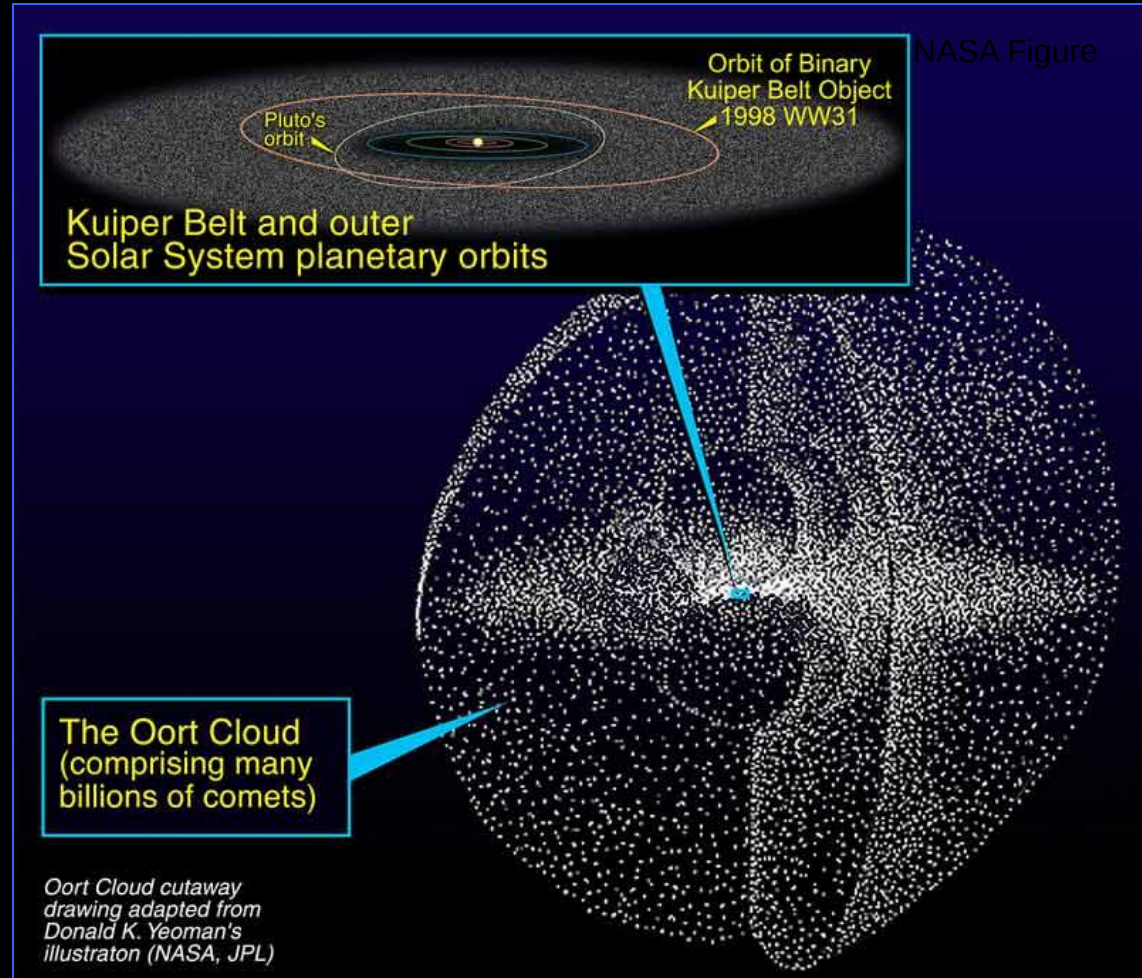
Cinturão de Kuiper e Nuvem de Oort

Cinturão de Kuiper

Conjunto de pequenos corpos congelados que orbitam o Sol em zona radial localizada entre 30 e 50 UA. Daqui vêm os cometas de curto período. Plutão é desta região.

Nuvem de Oort

Bolha esférica que circunda o Sol, entre ~ 1.000 e 100.000 UA, formada por cometas de longo ou longuíssimo período.



Origem do Sistema Solar: Nebulosa Planetária ou Encontro Próximo?

Historicamente, duas hipóteses sobreviveram:

Colapso Gravitacional de Nebulosa

Sistema Solar formou-se da contração de nuvem interestelar densa de gás e poeira

- *Fenômeno comum, há vários sistemas planetários conhecidos*

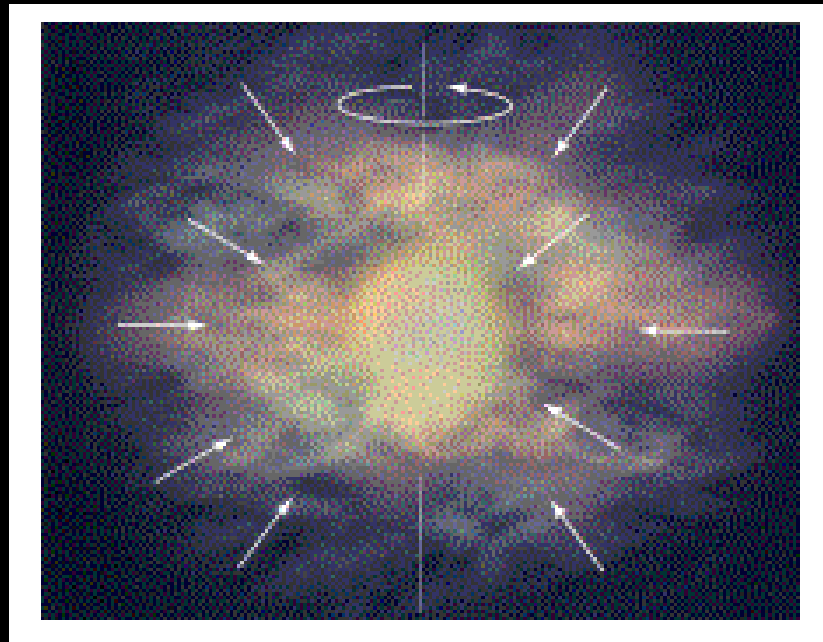
Encontro do Sol com outra estrela

Planetas formaram-se de detritos provenientes de interação gravitacional entre Sol e estrela. Dificuldades em explicar:

- *Distribuição de momento angular no Sistema Solar,*
- *Probabilidade muito baixa de ocorrência de tal evento.*

Contração Nebular e a Formação dos Planetas

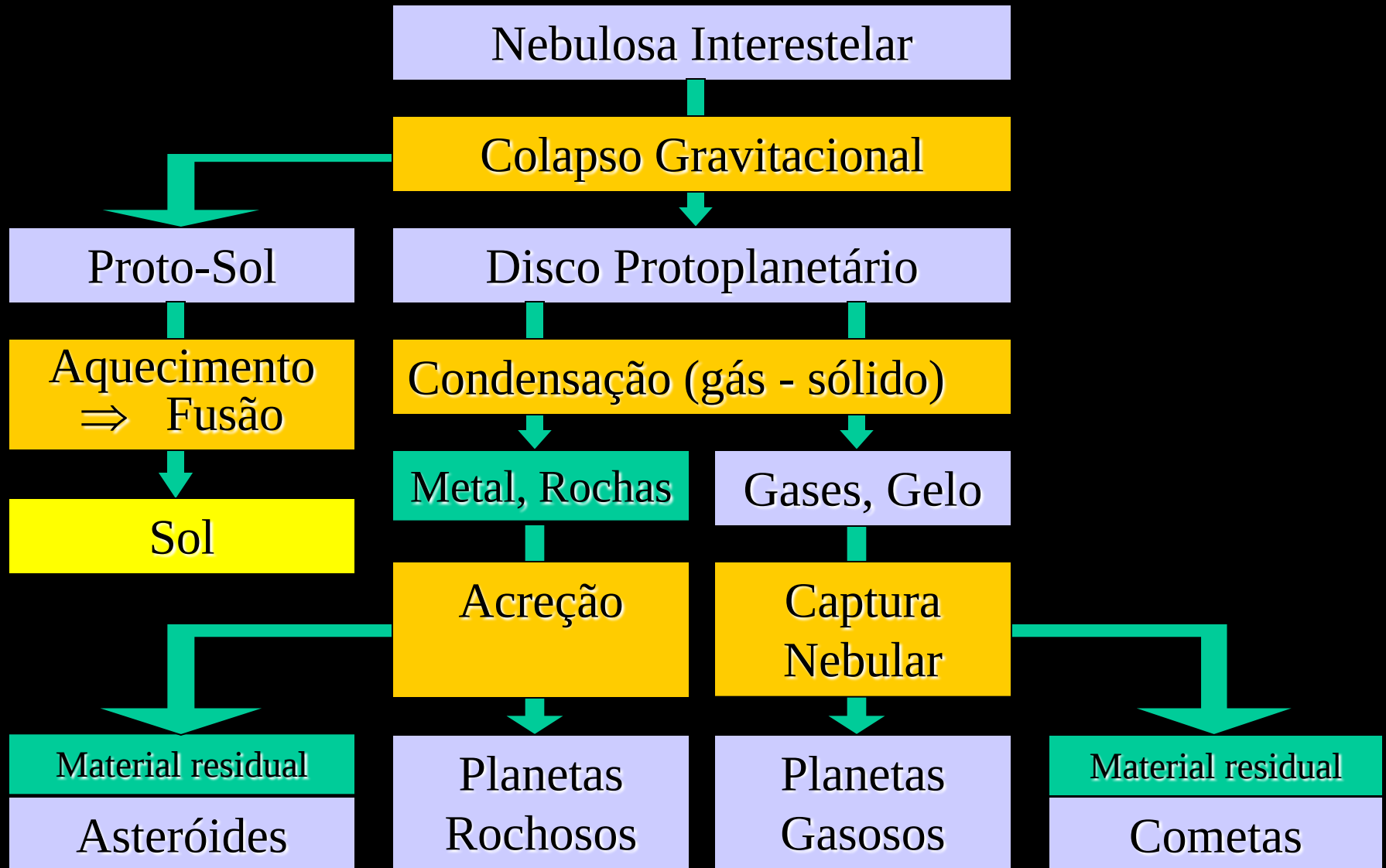
O modelo que explica melhor estes fatos é o da contração nebular, teoria evolucionária apresentada pioneiramente por René Descartes em 1644; aperfeiçoada por Immanuel Kant em 1775, e Pierre-Simon de Laplace em 1796;



<http://epswww.unm.edu/facstaff/zsharp/103/lecture%203%20origin%20of%20universe.htm>

Os melhoramentos mais significativos surgiram apenas neste século.

Teoria Nebular ou Protoplanetária



Estrelas nascem de Nuvens Moleculares Gigantes

Barnard 68



luz visível



luz infravermelha

Formação de estrela ocorre quando as nuvens moleculares gigantes colapsam. Elas são escuras, frias e densas, por isso obscurecem a luz visível vinda de trás.

Parâmetros de uma Nuvem Molecular Gigante típica

Tamanho: $r \sim 50 \text{ pc}$

Massa: $> 100.000 M_{\text{sol}}$

Temp.: poucos K

Núcleo denso:

$R \sim 0.1 \text{ pc}$

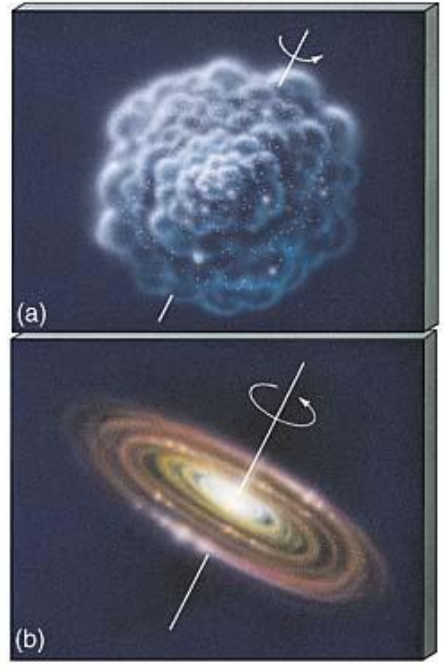
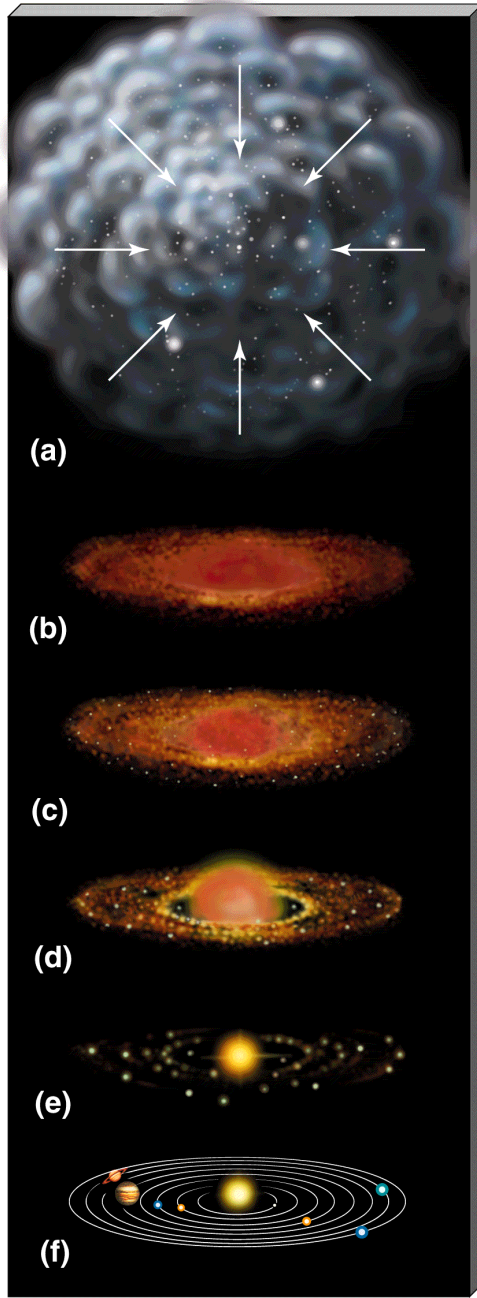
$M \sim 1 M_{\text{sol}}$

Estrelas nascem de Nuvens Moleculares Gigantes

Estrelas
formam-se
em grupos,
denominados
Aglomerados

Aglomerado aberto M7

Contração Nebular e a Formação dos Planetas



Sequência de formação do Sistema Solar, a partir do colapso da Nebulosa Solar Primordial.

O colapso induz rotação e provoca o achatamento.

No centro vai sendo formado o *Proto-Sol* (ainda não é uma estrela).

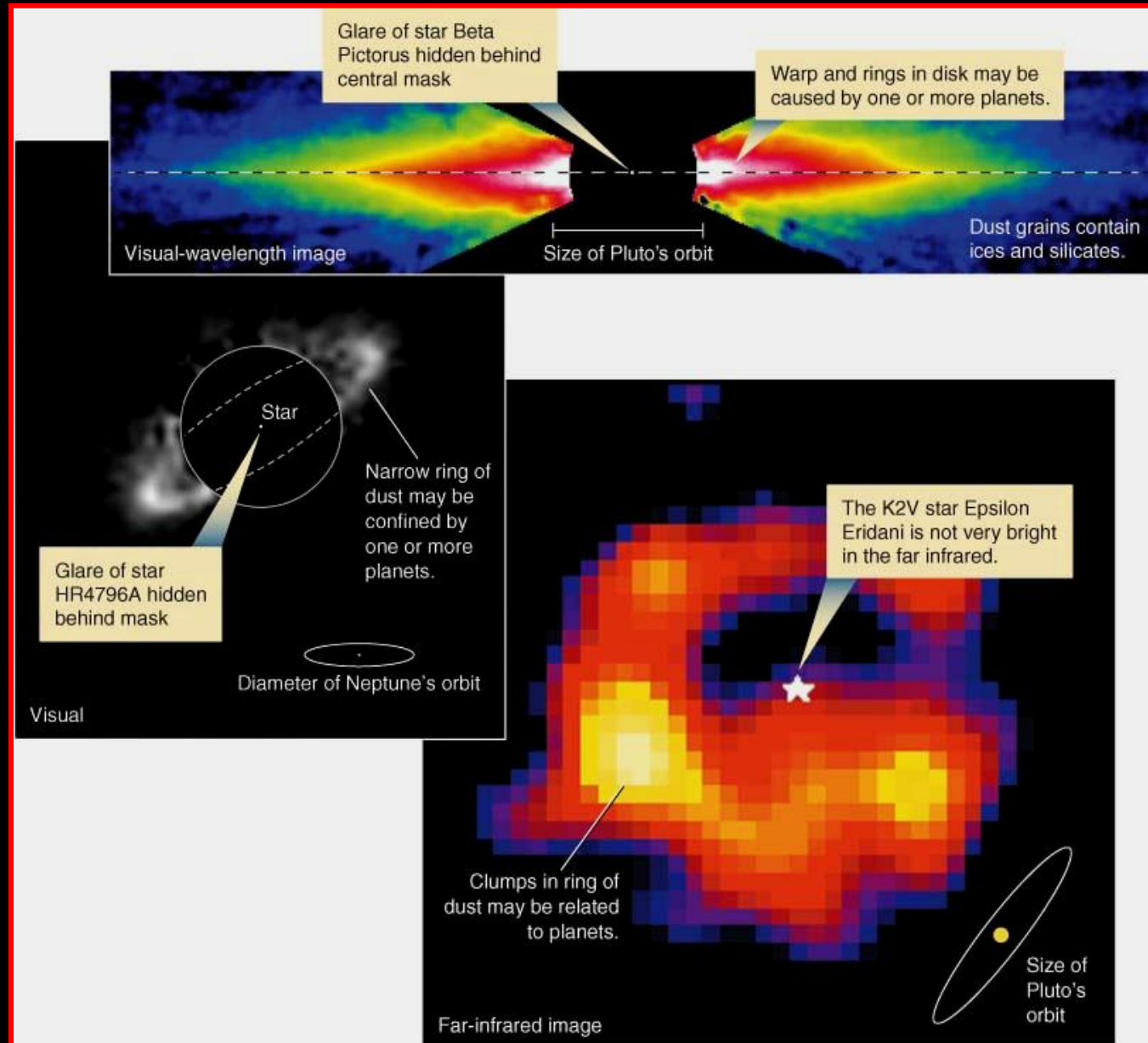
No seu plano equatorial forma-se um disco de matéria, dele surgirão planetas e demais corpos.

É nesse plano básico que se localiza a eclíptica. A quase totalidade dos corpos do Sistema Solar têm órbitas próximas a esse plano.

A rotação da nuvem primitiva é condição para formação de disco

Evidências de Contração Nebular

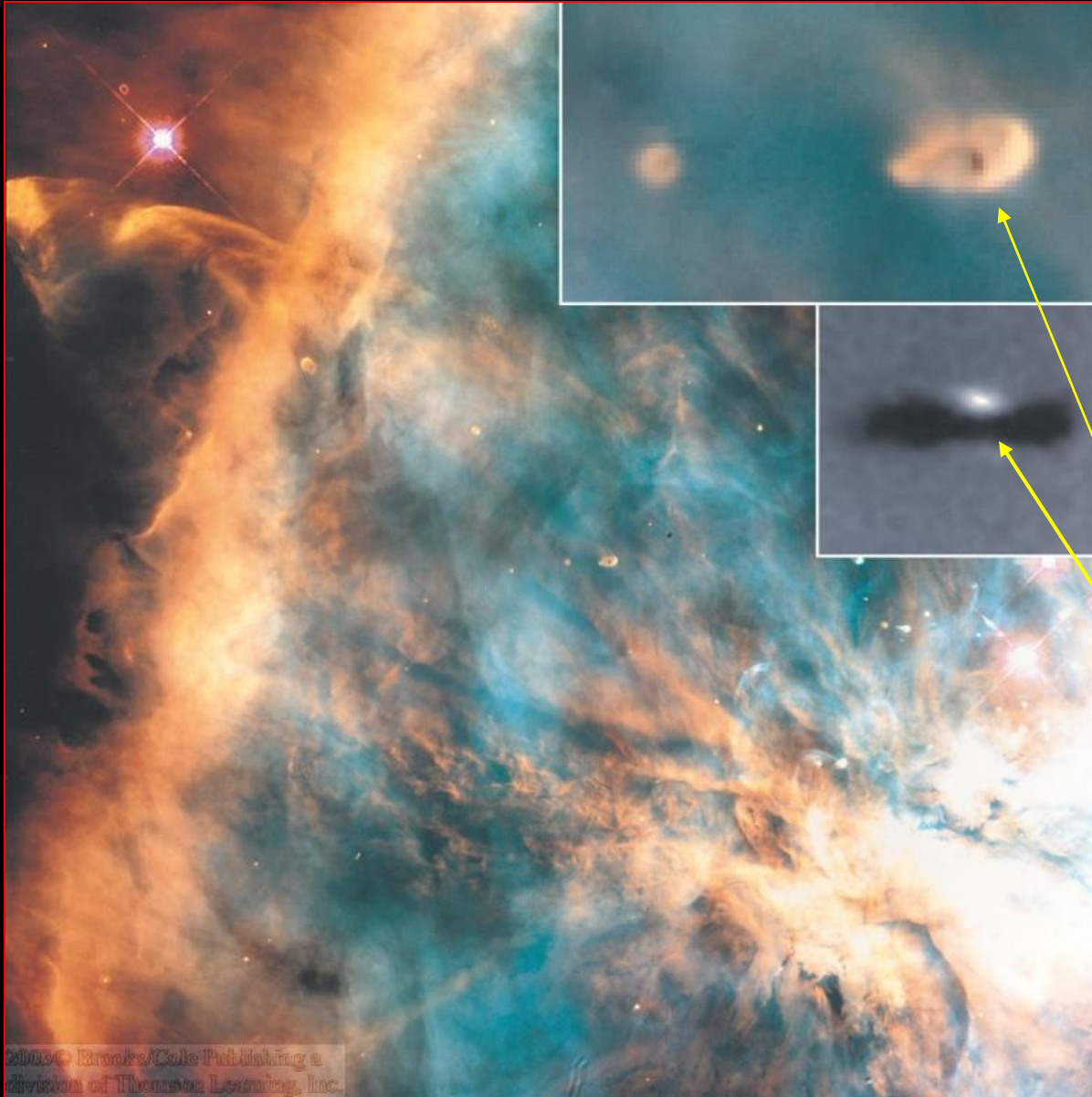
Há fortes
indícios
de que a
maioria
das
estrelas,
formam
sistemas
planetários.



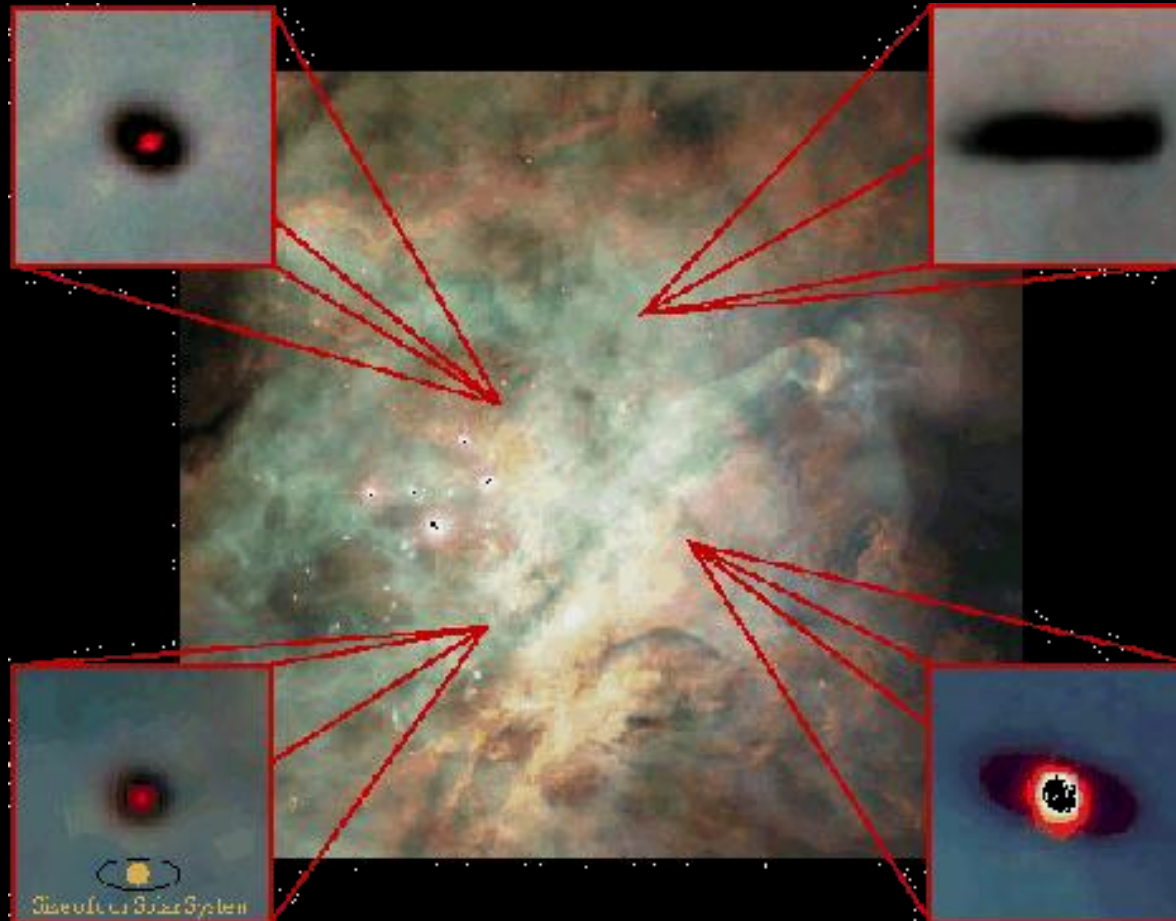
Evidências de Contração Nebular

Muitas estrelas jovens na Nebulosa de Órion estão circundadas por discos de poeira.

Locais prováveis de formação planetária.



Discos planetários: um fenômeno comum



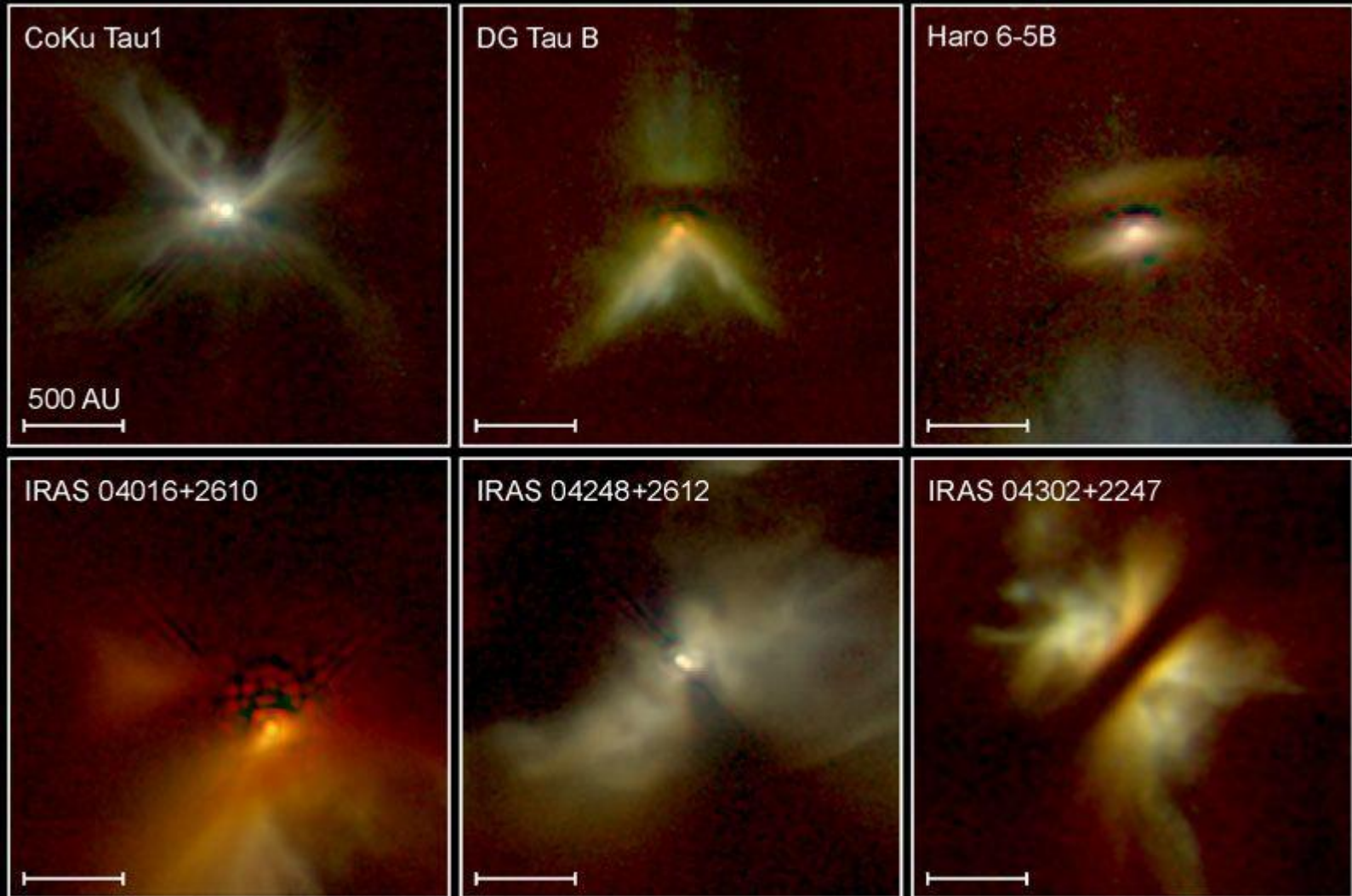
http://csep10.phys.utk.edu/astr161/lect/solarsys/orionsys_hst.gif

A Nebulosa de Órion é um cenário típico de nascimento de estrelas e sistemas planetários.

Discos de gás e poeira

Enos Picazzio
IAGUSP
Agosto 2006

Figuras típicas de objetos estelares jovens.



Young Stellar Disks in Infrared

HST • NICMOS

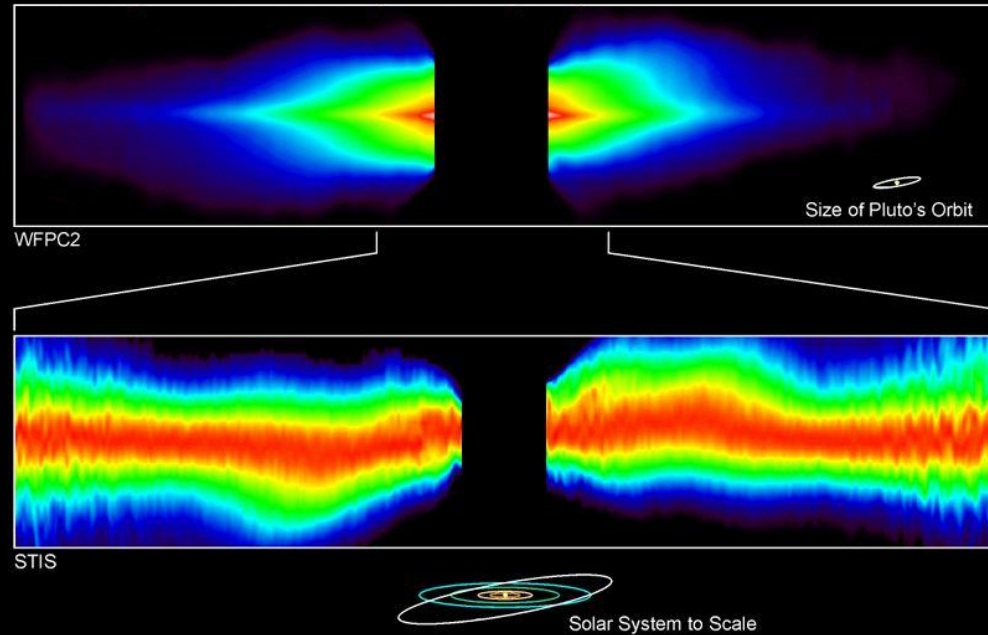
PRC99-05a • STScI OPO

D. Padgett (IPAC/Caltech), W. Brandner (IPAC), K. Stapelfeldt (JPL) and NASA

β Pictoris

Imagem da estrela beta da constelação do Pintor, obtida com coronógrafo estelar.

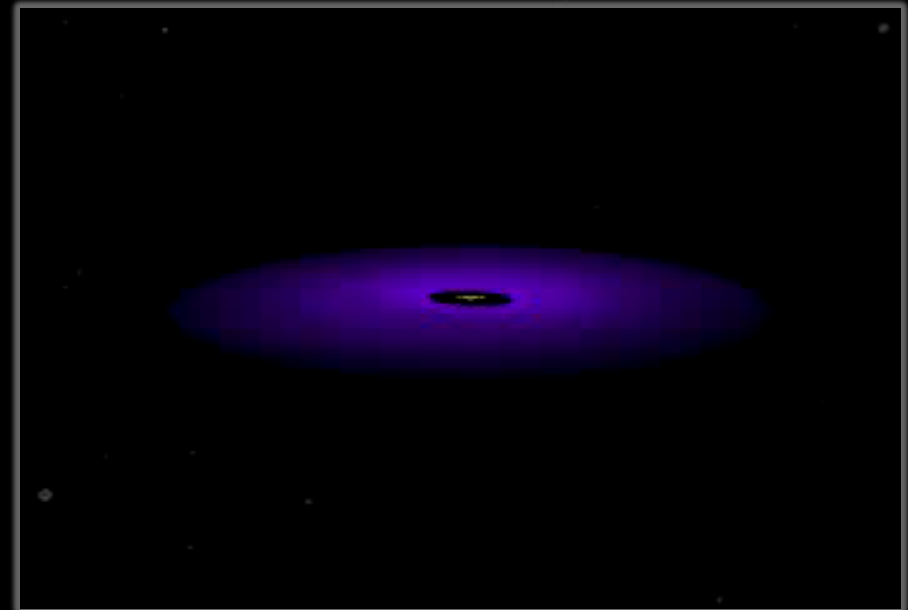
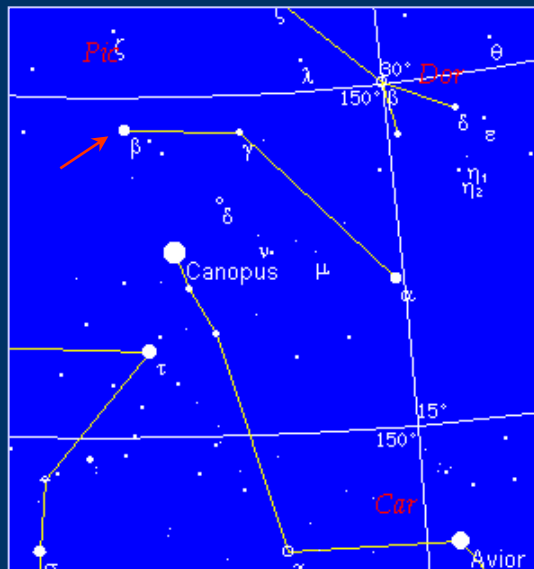
A estrela central é ocultada por um disco artificial no instrumento.
(Smith & Terrile, 1987)



Magnitude:
3,8

Distância:
61,5 anos-luz

Luminosidade:
8,2 L_{solar}

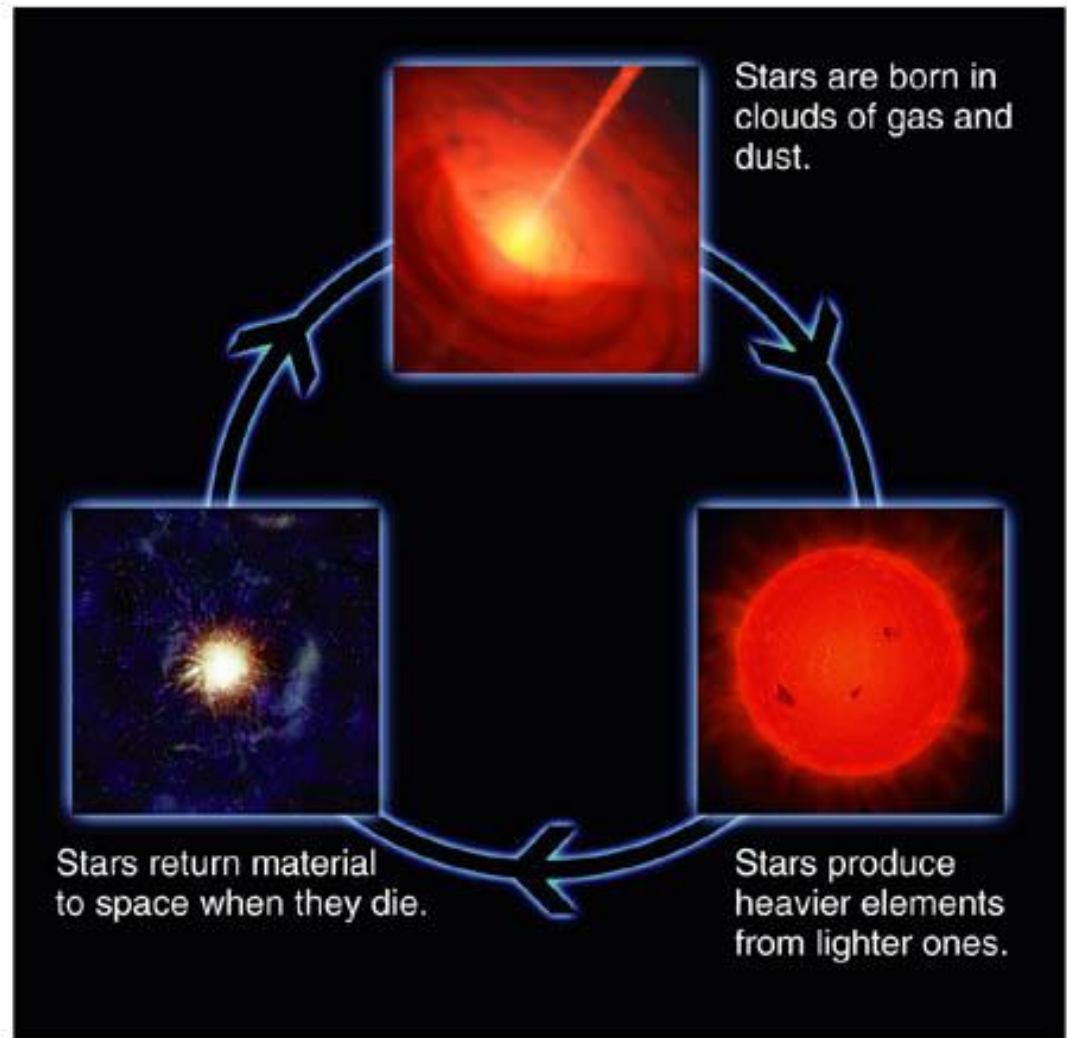


Colapso Nebular

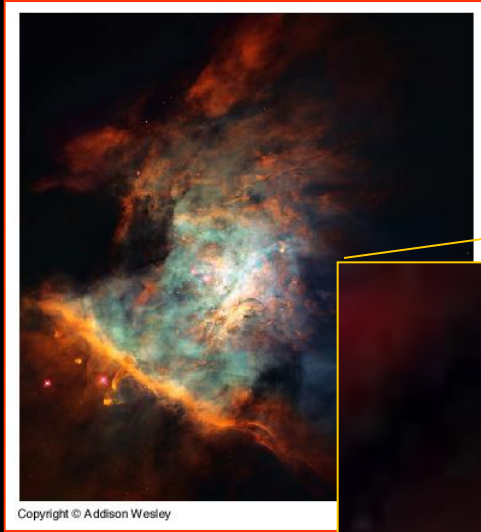


Gás primordial (após o Big Bang) era paupérrimo em elementos pesados (metálicos) .

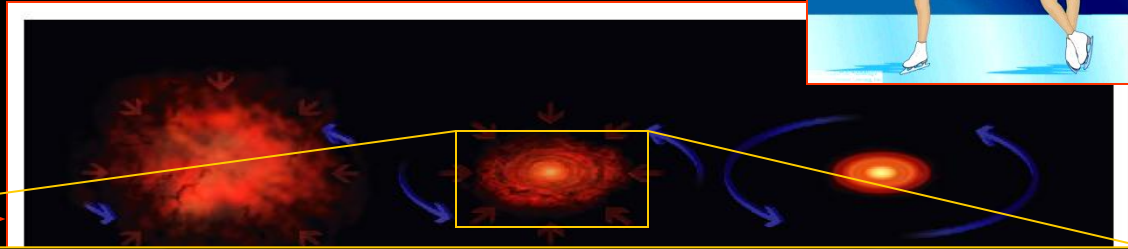
Nuvem interestelar que originou o Sol foi formada de detritos de várias gerações de estrelas.



Colapso Nebular



Colapso



1. Aquecimento

Material e energia o
aumento
pressão (o

2. Rotação

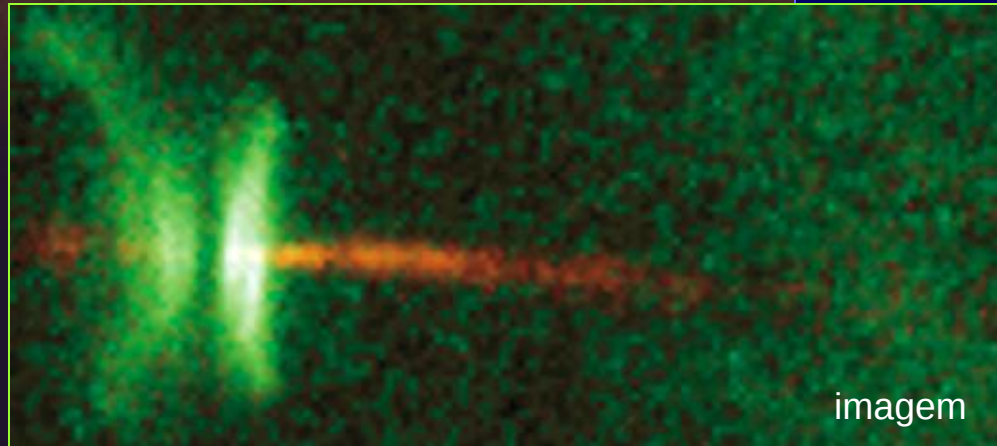
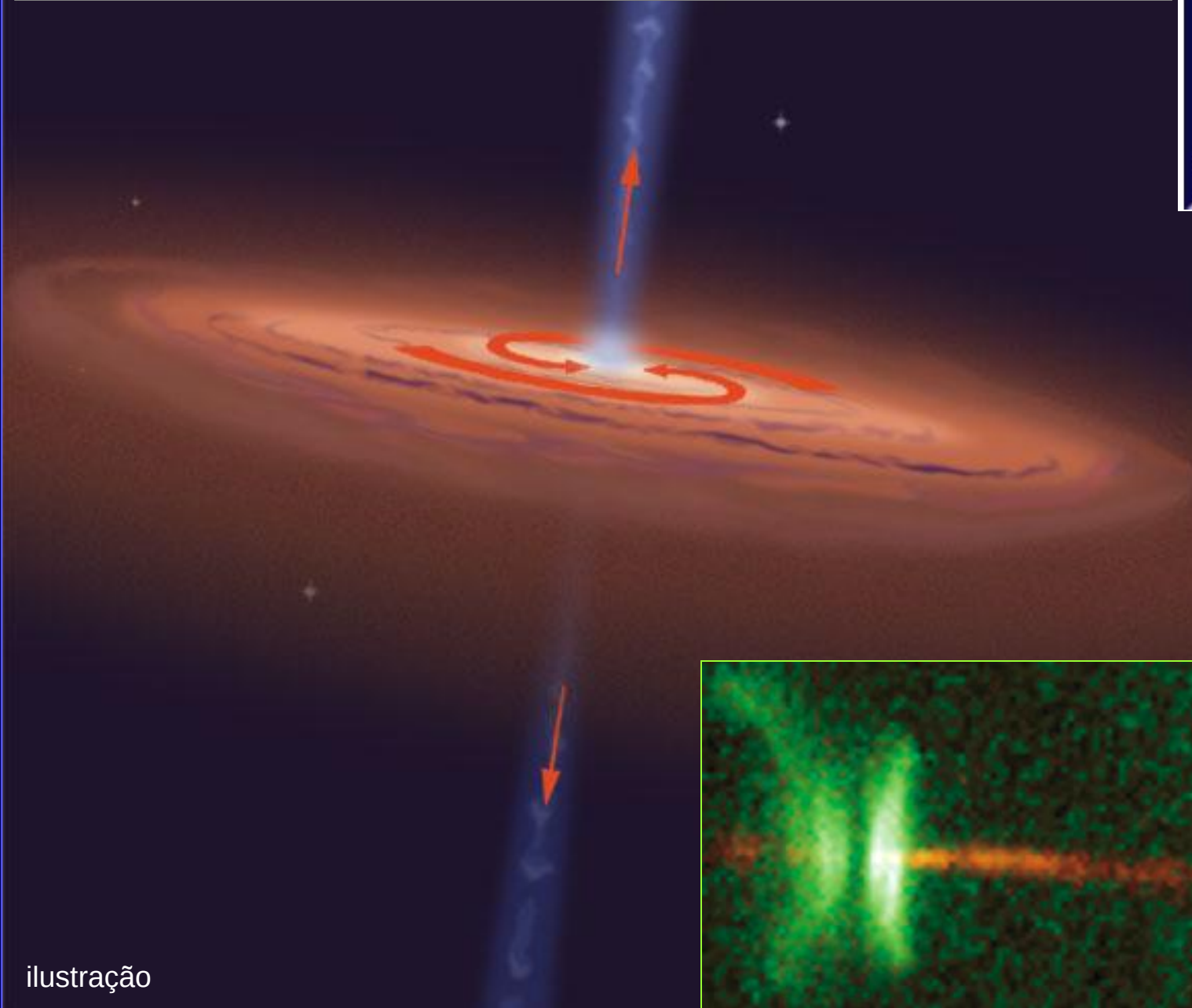
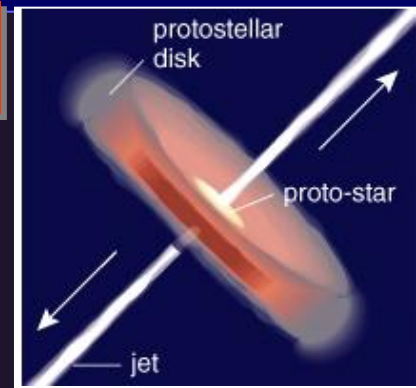
Conservação
gradativar

3. Achatam

forma de
caótico (a



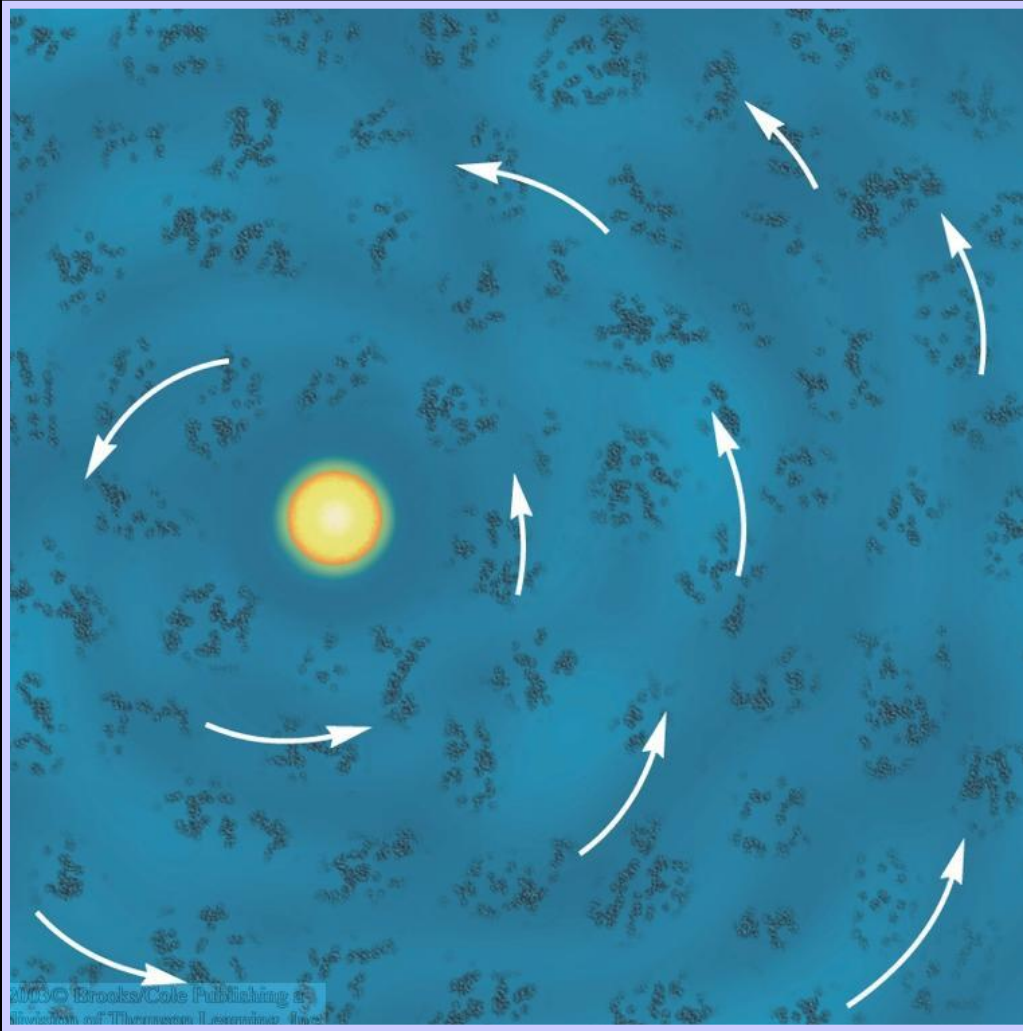
Colapso Nebular



ilustração

imagem

Formação dos planetas

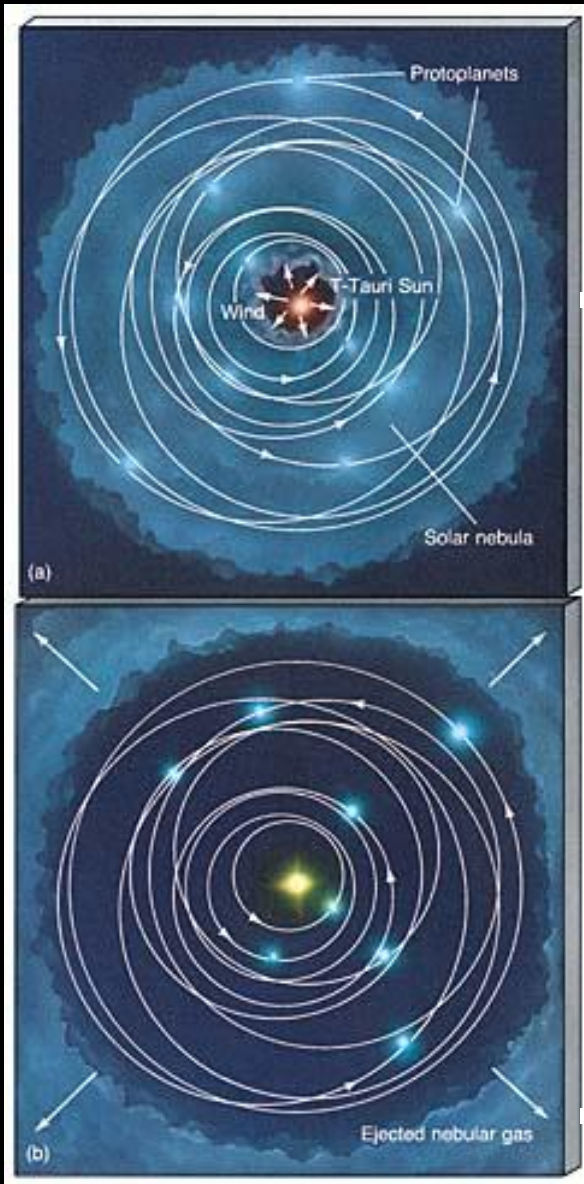


A acreção de massa começa com contínua aglutinação de grãos em blocos, formando os **planetésimos** (de cm a km).

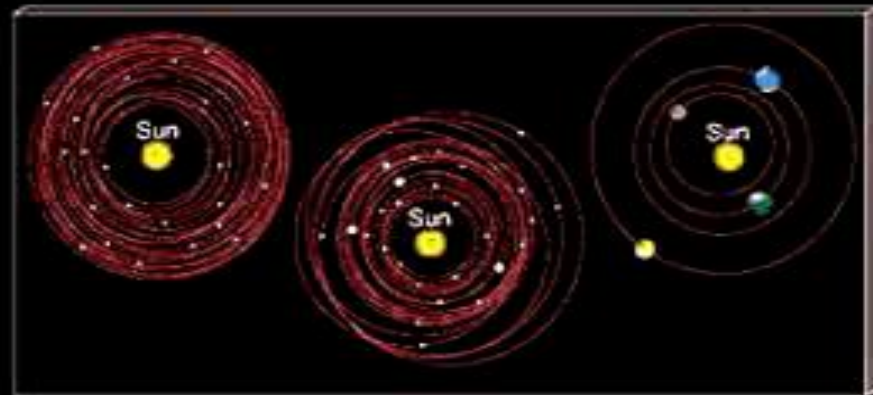
Planetésimos colidem e formam **planetas**

Formação dos planetas

A colisão é fundamental para o processo de acreção (aglutinação de matéria por atração gravitacional).



Collision of Planetesimals In A Protoplanetary Disk



Órbitas Caóticas e Colisões

Colisões foram fundamentais na fase de acreção por interação gravitacional. A força atrativa do corpo aumenta com o acúmulo da massa.

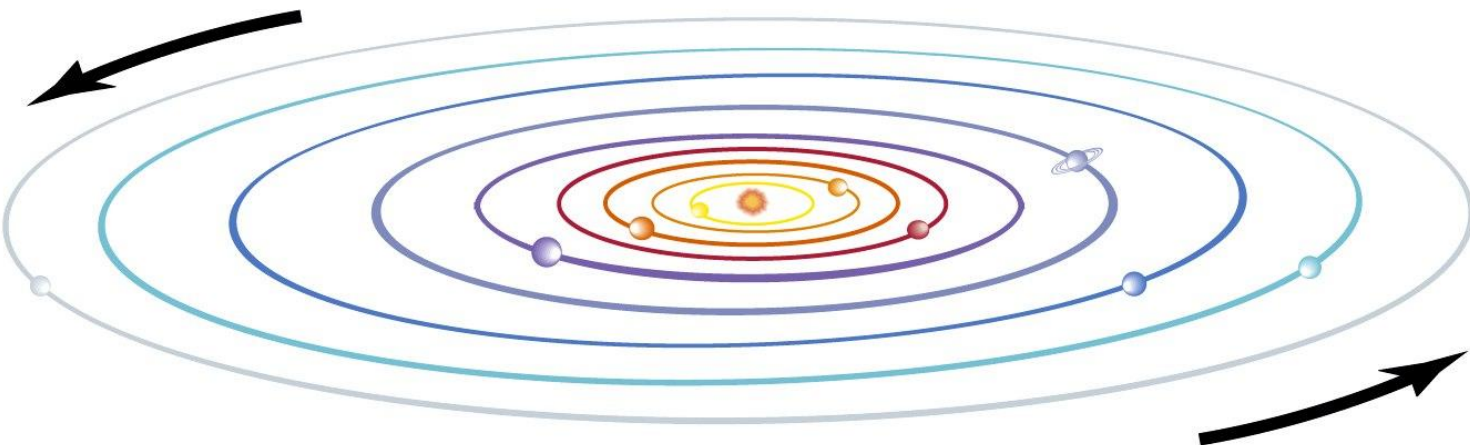
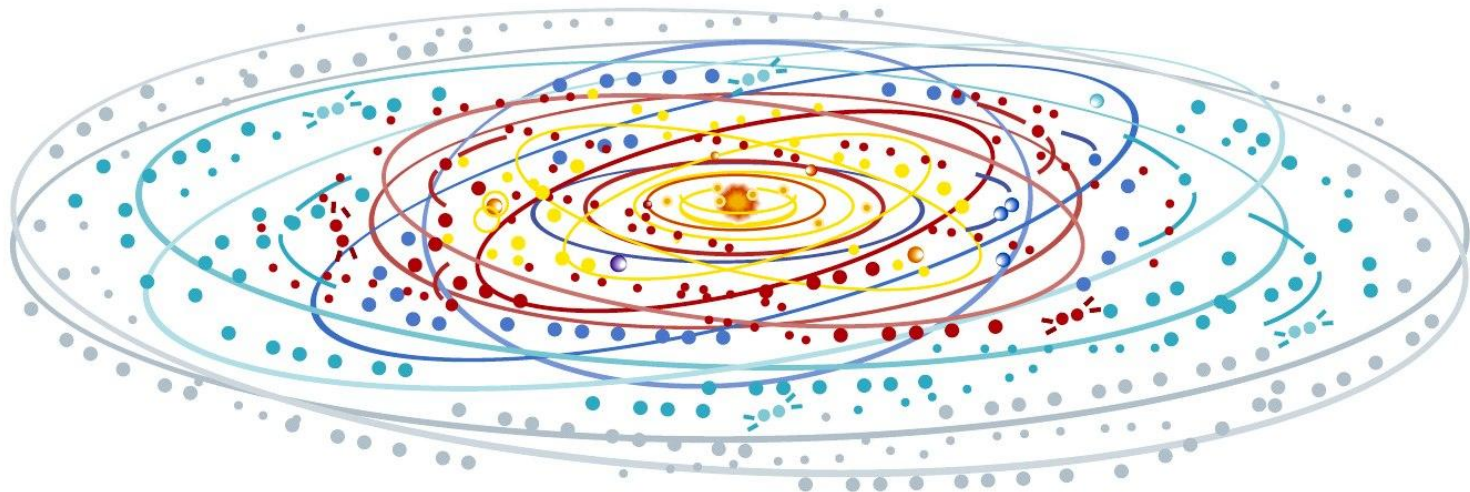


Figure 11-8d
Earth System History, Second Edition
© 2005 W. H. Freeman and Company

Formação dos planetas: o acúmulo de massa

Planetas formaram-se do mesmo material que formou o Sol.

Material rochoso formou-se por acúmulo de grãos da nuvem protoestelar.



Massa $< \sim 15 M_{\text{terra}}$

Planetas não podem crescer mais por colapso gravitacional

Planetas terrestres

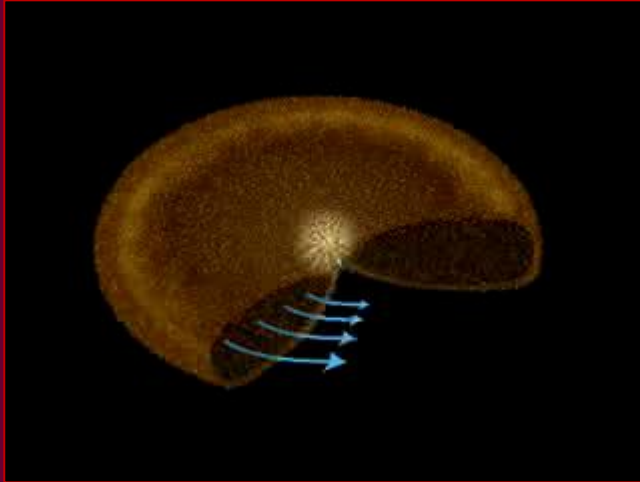
Massa $> \sim 15 M_{\text{terra}}$

Planetas podem crescer por acúmulo gravitacional de material de nuvem

Planetas gasosos

Formação dos planetas: o acúmulo de massa

Modelo de Acreção



Os grãos de poeira do disco acumulam-se em **planetésimos**. Acumulando massa continuamente, eles crescem formando corpos maiores: **embriões planetários**.

Os planetas gasosos acumulam envelopes de gás antes deste desaparecer do disco.

Planetésimos e embriões remanescentes são acrescidos a estes planetas, ou espalhados por eles.

Modelo de Colapso Gasoso



Instabilidades gravitacionais no disco formam **glóbulos de gás**, que se tornam planetas por auto-gravitação.

Grãos de poeira coagulam e sedimentam no centro do **protoplaneta**, formando um núcleo.

O planeta abre uma lacuna no disco enquanto acumula massa.

Formação dos planetas: o acúmulo de massa pelos gasosos

O disco protoplanetário tende a evaporar-se rapidamente pela ação da radiação de estrelas massivas vizinhas.

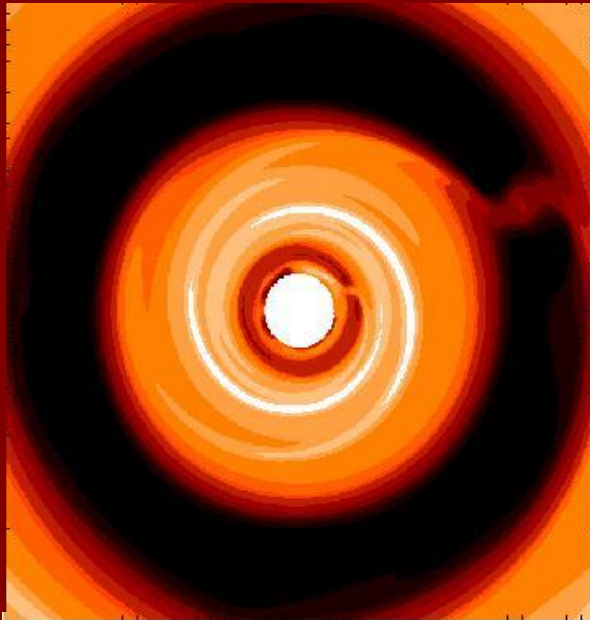
Escala de tempo típica: ~ 100.000 anos).

Esse tempo é muito curto para formar um planeta joviano através de acréscimo de planetésimos!

Alternativa:

Simulações teóricas mostram a possibilidade de crescimento através de acúmulo rápido e direto de gás (processo semelhante ao de formação estelar).

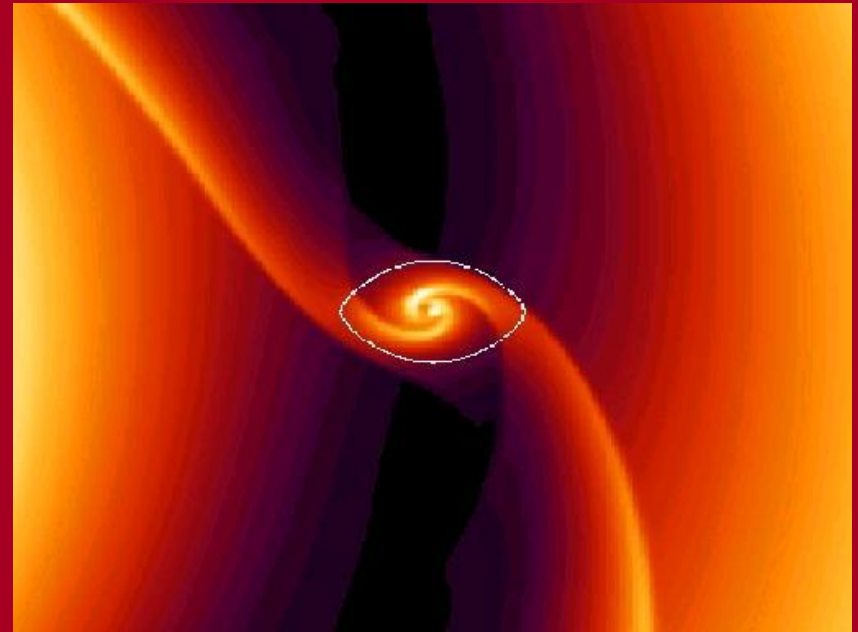
Formação dos planetas: o acúmulo de massa pelos gasosos



Ref:
Papaloizou,
Celestial
Mechanics &
Dynamical Astron.
87 (2003).

Um planeta se forma acumulando matéria de um anel circular, abrindo uma clareira anular no disco. Assim, ele pode atingir o tamanho de Júpiter.

O processo não se interrompe após o esvaziamento do anel. O planeta continua acumulando matéria do disco no bordo do anel, através de duas pontes que se formam unindo o planeta ao disco.

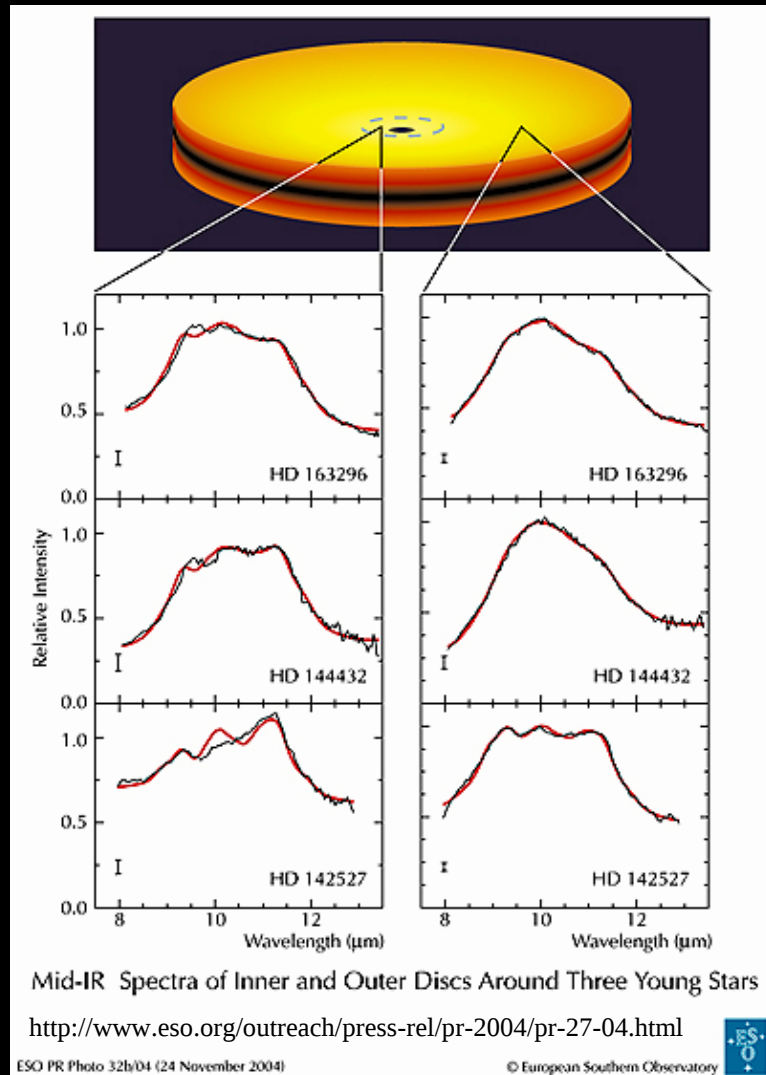


Os vértices da oval que confina a matéria do planeta são os pontos L1 e L2, descobertos por Euler no problema dos três corpos.

Este furo no disco retarda o processo da formação do planeta. Essas ondulações, tal como em torno de um barco, retardam o movimento do planeta, lenta e continuamente, deslocando-o para baixo, num movimento espiral em direção à estrela.

Interferometria no infravermelho, utilizando dois telescópios de 8,2-m (VLT – ESO-Chile), produziu imagens com precisão espacial de $\sim 0,02$ seg-arc.

A observação dos discos ao redor de 3 estrelas jovens forneceu informações espectrais sobre a composição química e tamanho da poeira.



Os discos são muito ricos em grãos de silicatos cristalinos (“areia”) com diâmetro médio de $\sim 0,001$ mm. São formados por coagulação de grãos bem menores e amorfos (átomos e moléculas que compõem o grão são agrupados de forma caótica), presentes nas nuvens. Esse tipo de silicato é basicamente o componente majoritário dos meteoritos.

Nas proximidades de estrelas jovens, temperatura e densidade são elevadas e as partículas de poeira circunstelar tendem a se unirem formando grãos maiores. Além disso, a poeira é aquecida pela radiação e as moléculas dos grãos se reagrupam em padrões (cristalinos) geométricos. Com isso, os grãos da região do disco mais próxima da estrela vão sendo transformados de **primitivos** (pequenos e amorfos) a **processados** (maiores e cristalinos).

Nesse panorama, a formação de grãos cada vez maiores, blocos rochosos, planetóides e, finalmente, planetas terrestres é apenas uma questão de tempo.

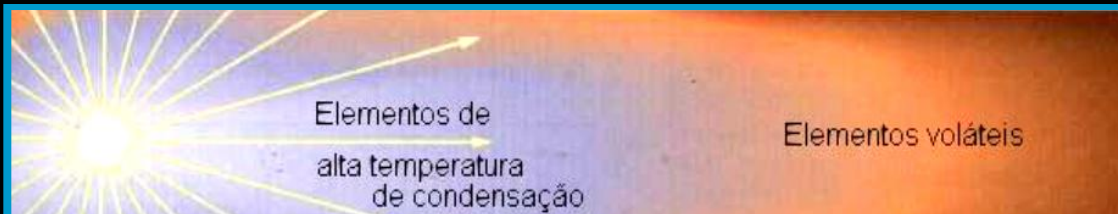
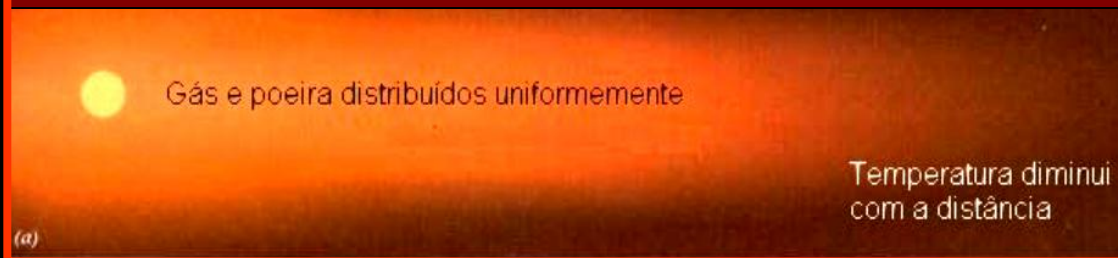
Sequência de condensação

Enos Picazzio
IAGUSP
Agosto 2006

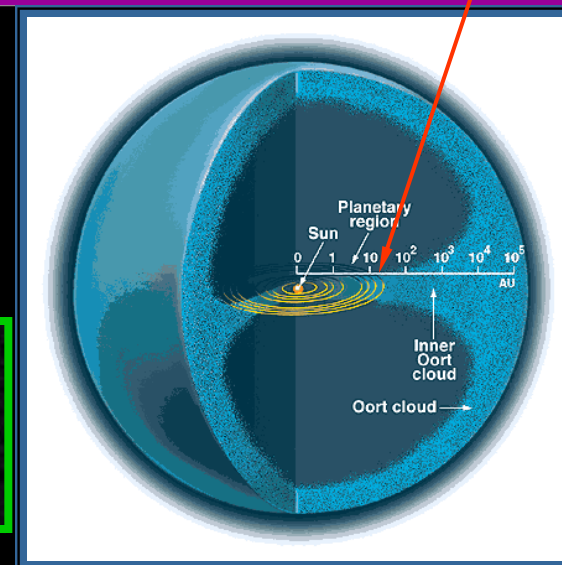
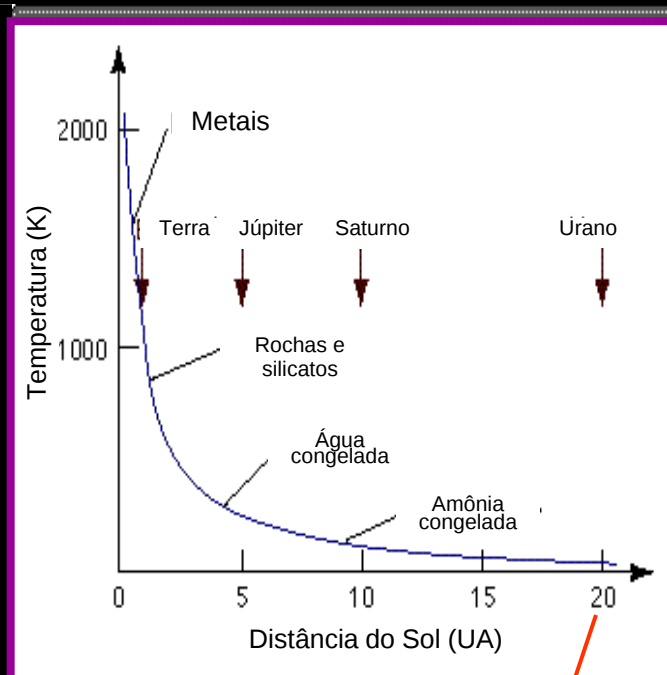
Um cenário possível para a formação do Sistema Solar.

(Adaptado de R.R.Robbins *et al.* 1995, pág.113)

No início a matéria nebular estava distribuída uniformemente na nuvem. Gradativamente, a matéria era comprimida para o centro e aquecida: assim nasceu o **proto-Sol**.



Os elementos mais voláteis foram “soprados” da região central aquecida, para as regiões afastadas mais frias: aqui formaram-se os planetas jovianos e os cometas.



Sequência de Condensação

Condensação de sólidos

Só matéria condensada podem aglutinar-se para formar planetas

Temperatura na nuvem decresce com a distância do centro.

Quanto mais longe do centro, mais fria é a região, e maior é a concentração de material mais volátil. Logo, a composição química do disco não era homogênea.

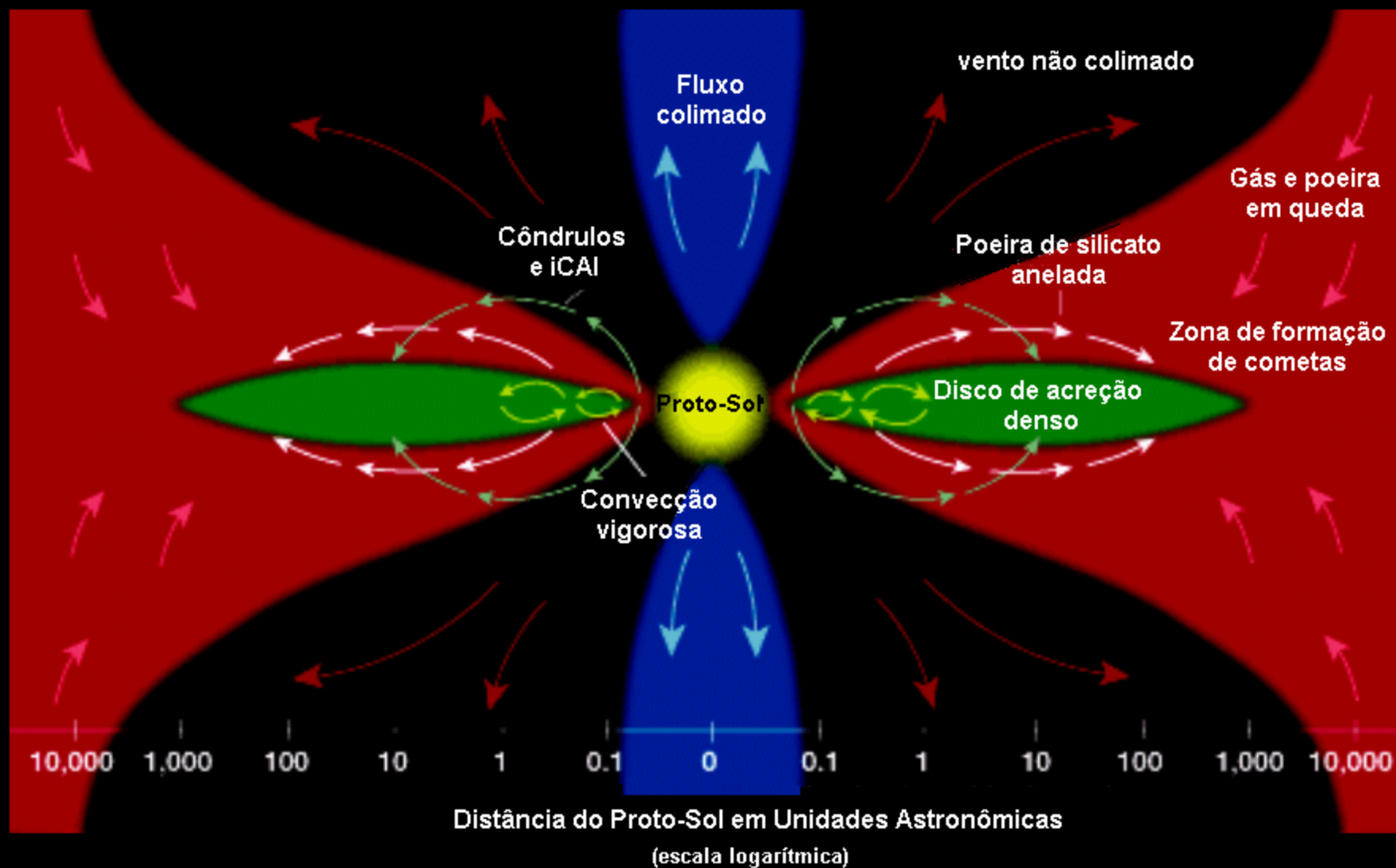
Table 19-3 The Condensation Sequence

Temperature (K)	Condensate	Planet (Estimated Temperature of Formation; K)
1500	Metal oxides	Mercury (1400)
1300	Metallic iron and nickel	
1200	Silicates	
1000	Feldspars	Venus (900)
680	Troilite (FeS)	Earth (600)
		Mars (450)
175	H ₂ O ice	Jovian (175)
150	Ammonia–water ice	
120	Methane–water ice	
65	Argon–neon ice	Pluto (65)

Substâncias menos densas condensam a baixas temperaturas.

Acreção e reprocessamento da matéria

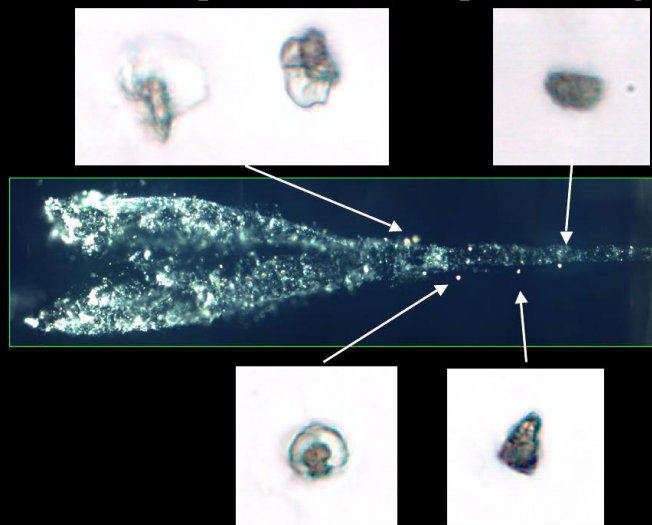
Enos Picazzio
IAGUSP
Agosto 2006



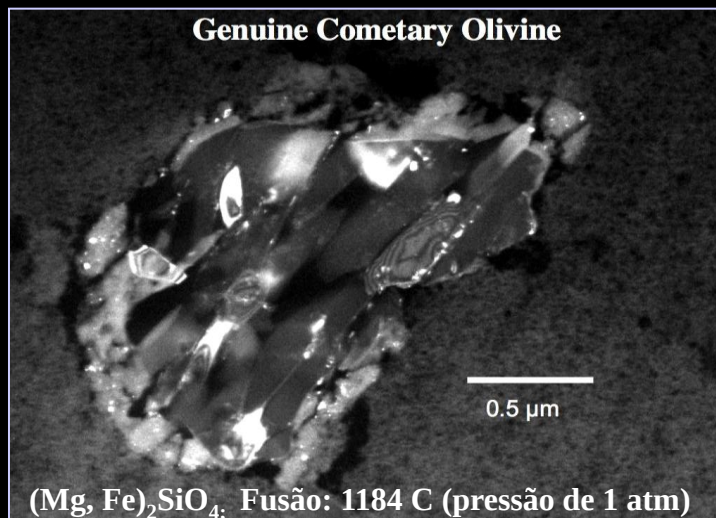
Evidência de processo de mistura

Enos Picazzio
IAGUSP
Agosto 2006

Poeira aprisionada no aparato de gel



poeira do Wild 2

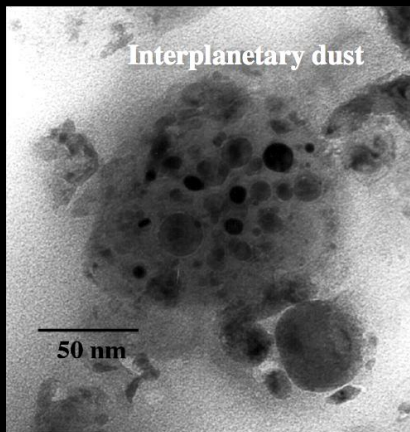
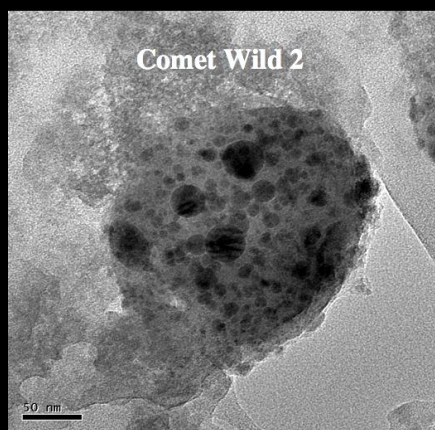


Côndrulos:

esferóides
milimétricos
de olivina
[(Mg,Fe)SiO₄],
e piroxênio
[(Mg,Fe)SiO₃]

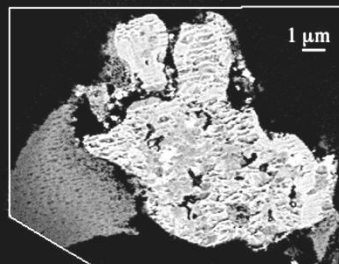
GEMS ?

(Glass with Embedded Metal and Sulfides)

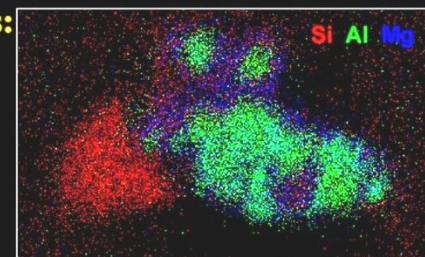


SEM-EDS X-ray Maps: overlay maps

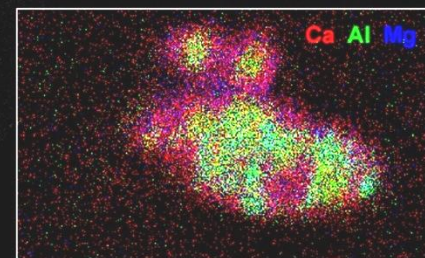
"Easter" C054.4.25.0
potted butt in acrylic



BSE image, 4.0 kV, high contrast

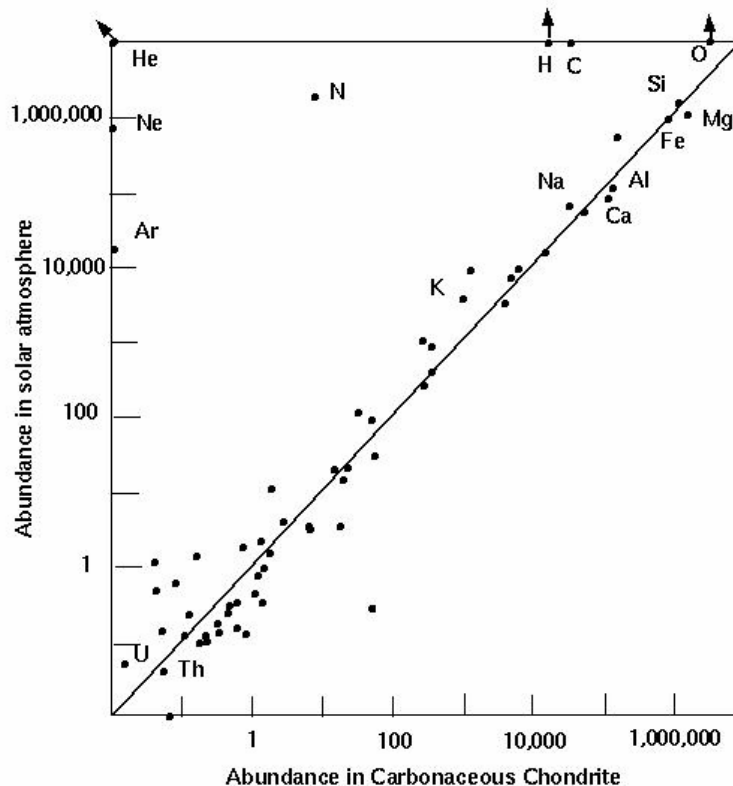
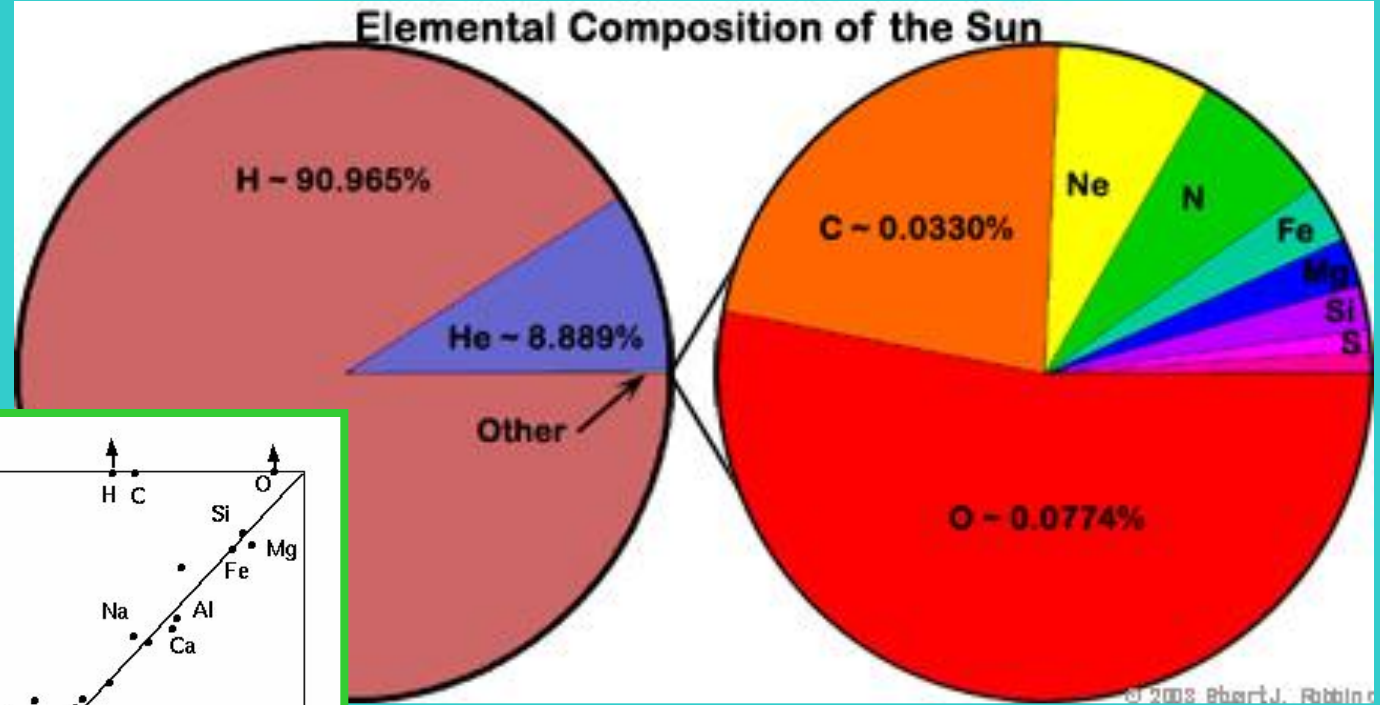


EDS X-ray maps, 10 kV



Composição química do Sistema Solar

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.

Acreção de sólidos e a formação de planetésimos

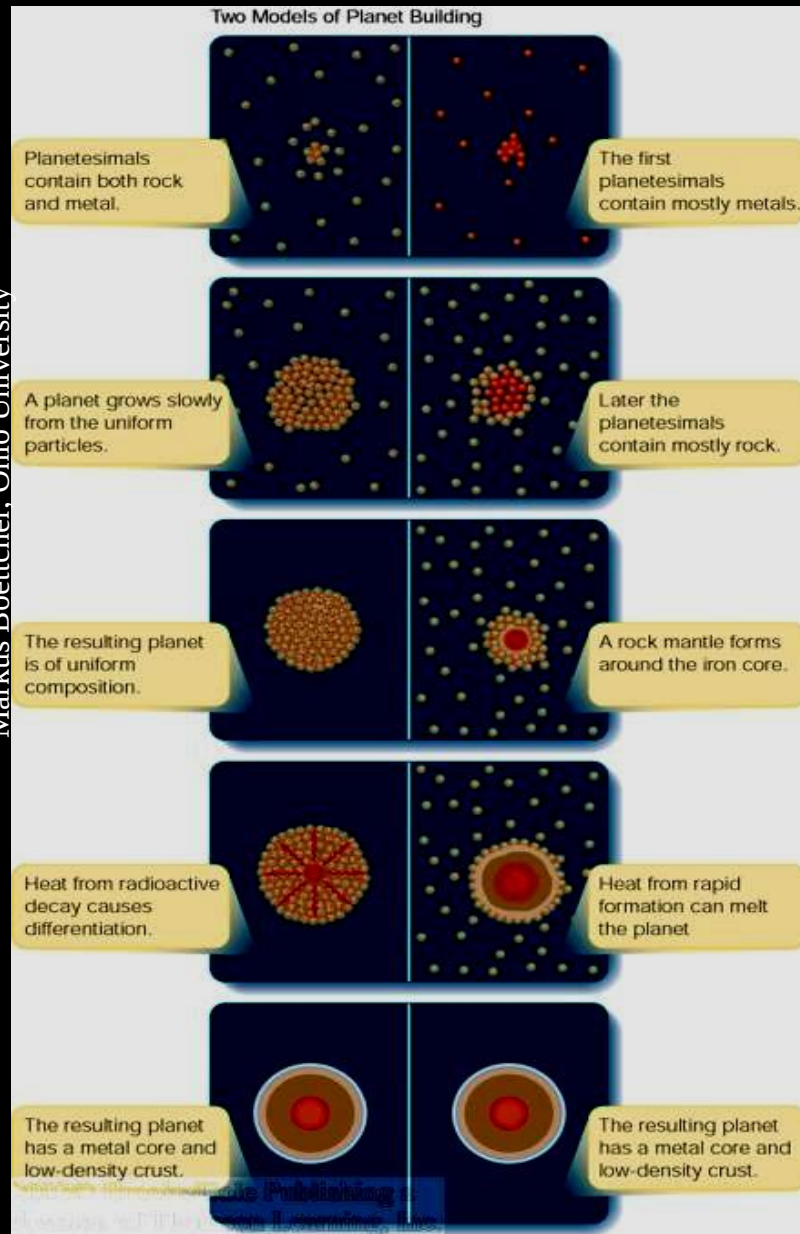
**Início:
disco protoplanetário
formando blocos
sólidos**



**Fase posterior:
planetas se formando
por acreção**



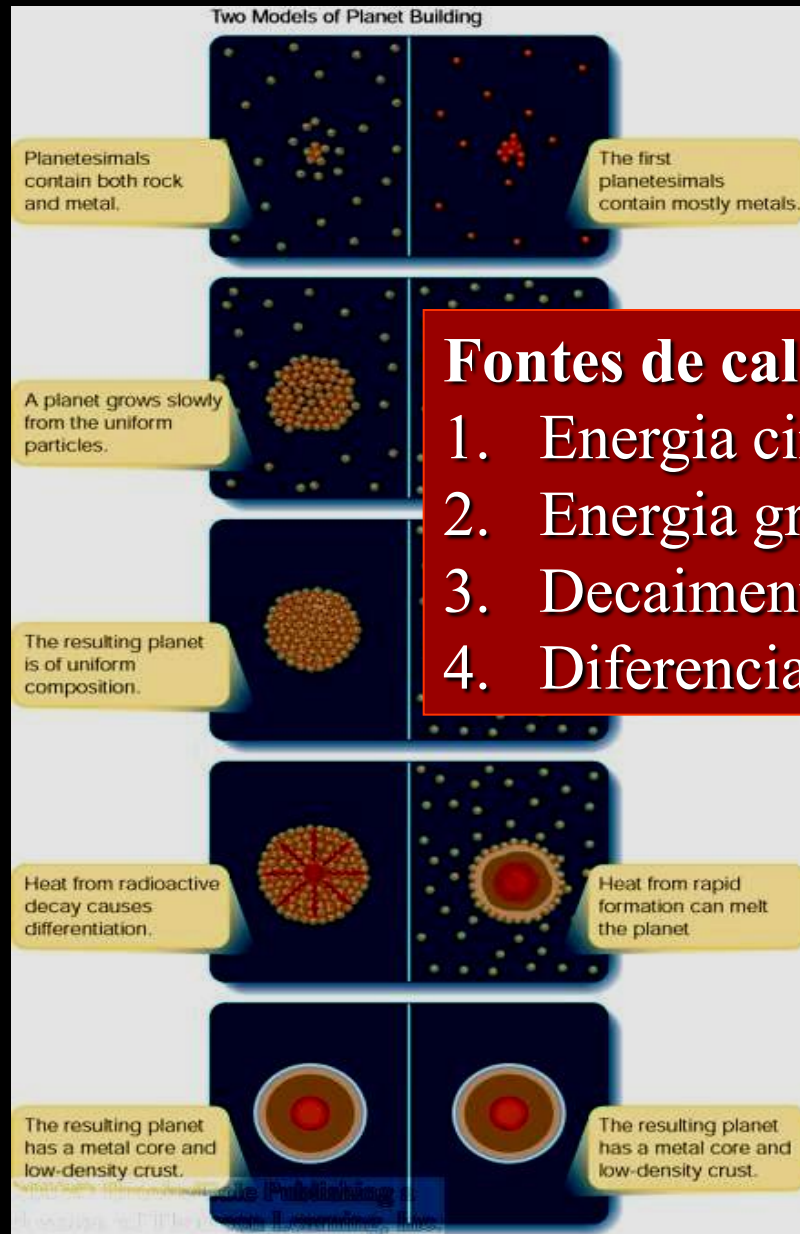
Acreção de sólidos e a formação de planetésimos



Assim que rochas derretem, o material mais denso precipita em direção ao centro → **diferenciação**

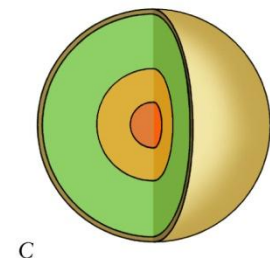
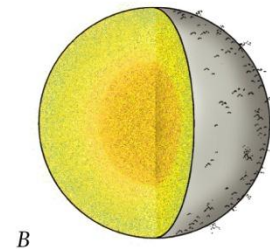
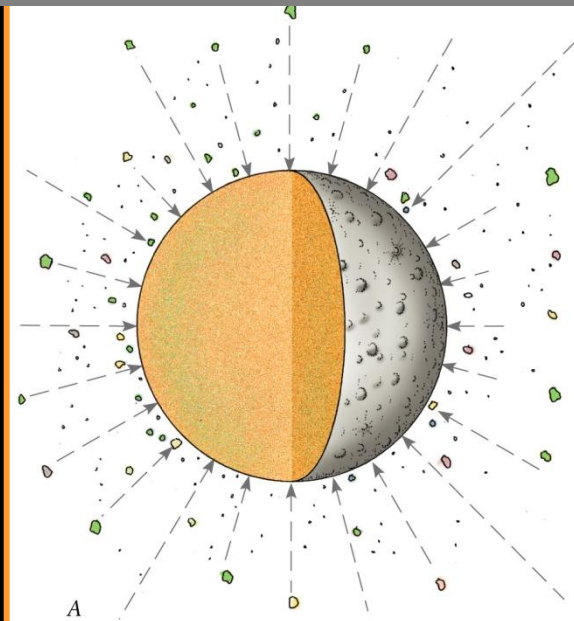
Os planetas terrestres têm metais pesados concentrados nos núcleos, e substâncias menos densas no manto.

Diferenciação dos planetas terrestres



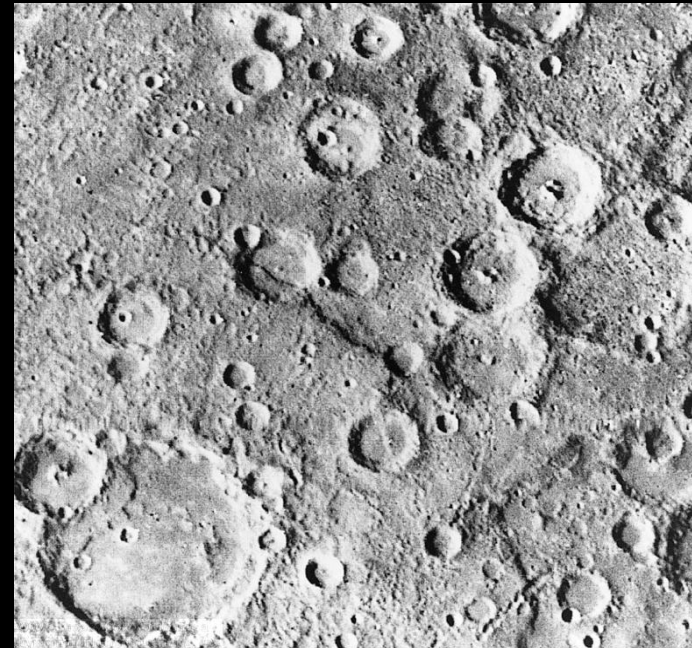
Fontes de calor:

1. Energia cinética de acreção
2. Energia gravitacional
3. Decaimento radioativo
4. Diferenciação



Onde foram para os resquícios?

- Caindo nos corpos de maior massa, sobretudo os planetas
- Ejetados por decorrência de encontros próximos com planetas
- Vento solar
- Pressão de radiação solar



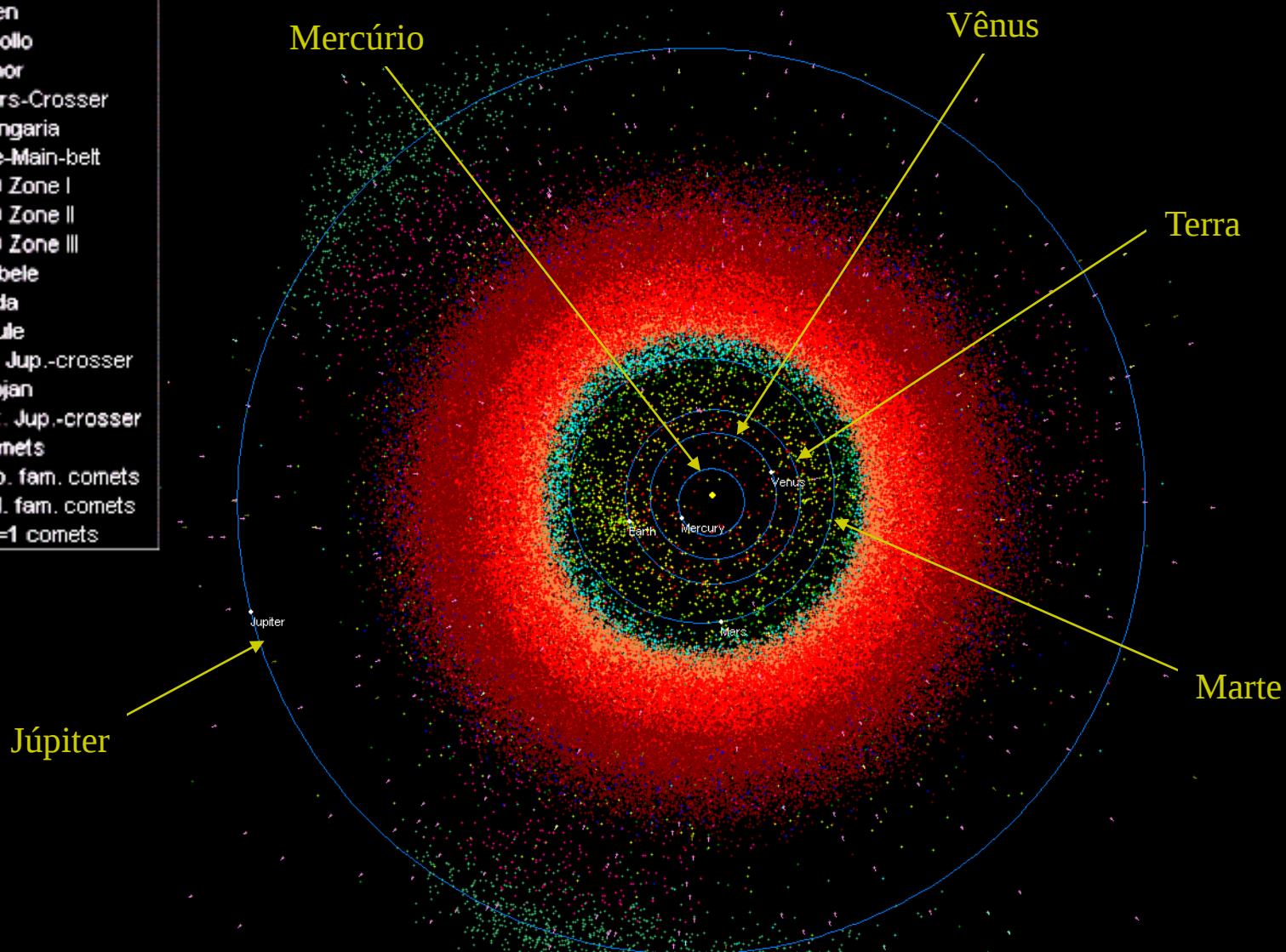
Superfícies da Lua e de Marte evidenciam forte bombardeamento por asteróides.

Asteróides

Enos Picazzio
IAGUSP
Agosto 2006

Date: 2005/04/07

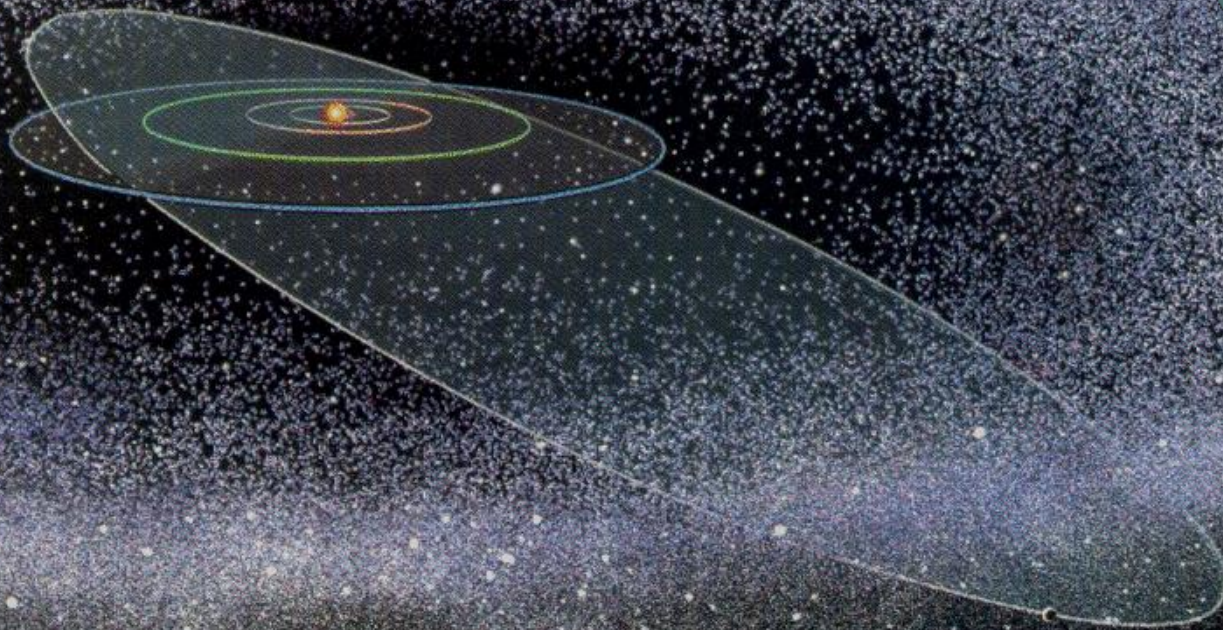
- IEA
- Aten
- Apollo
- Amor
- Mars-Crosser
- Hungaria
- Pre-Main-belt
- MB Zone I
- MB Zone II
- MB Zone III
- Cybele
- Hilda
- Thule
- Int. Jup.-crosser
- Trojan
- Ext. Jup.-crosser
- Comets
- Jup. fam. comets
- Hal. fam. comets
- $e \geq 1$ comets



Cometas e Objetos do Cinturão de Edgeworth-Kuiper

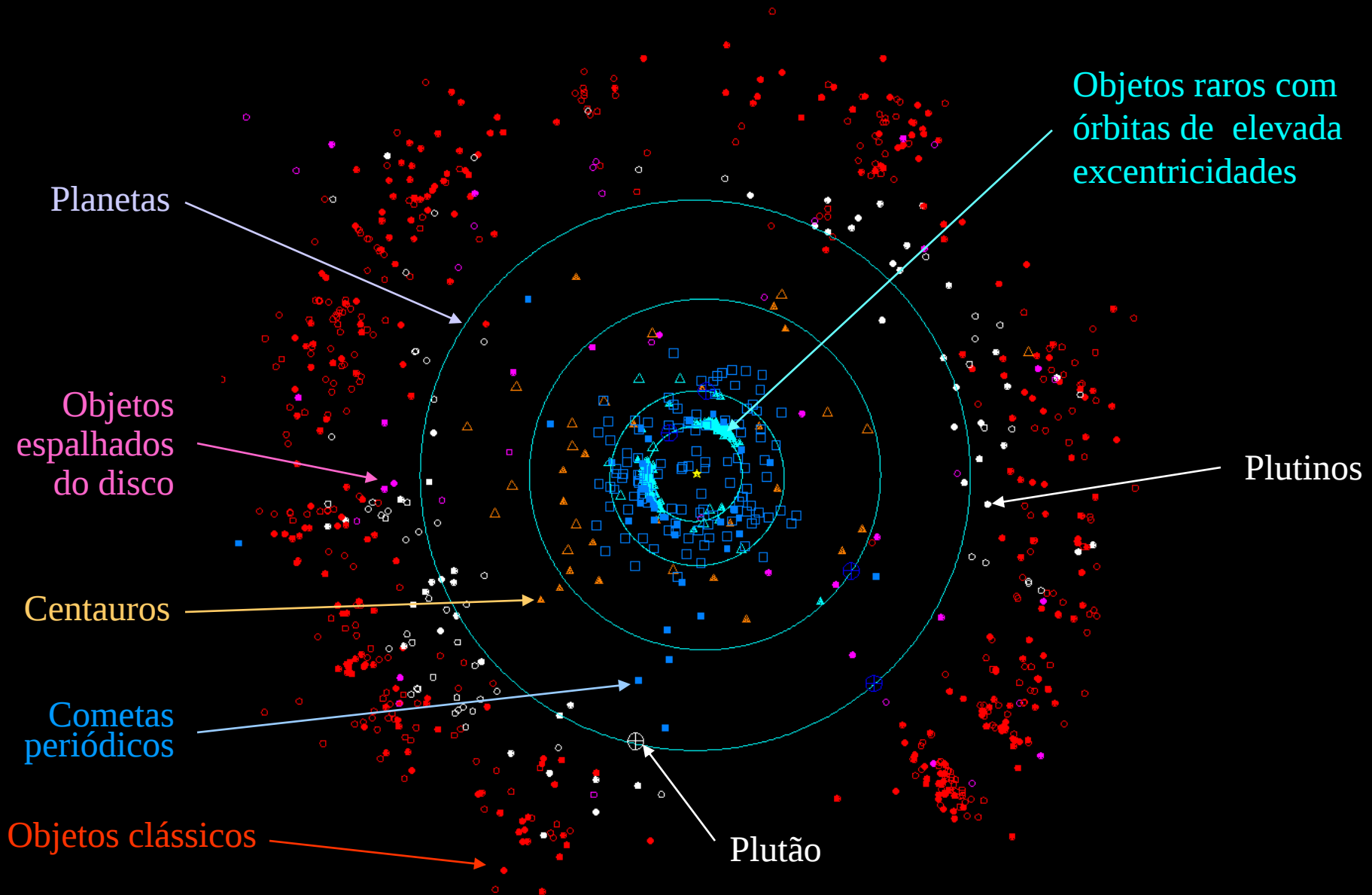
Enos Picazzio
IAGUSP
Agosto 2006

© www.harmsy.freeuk.com

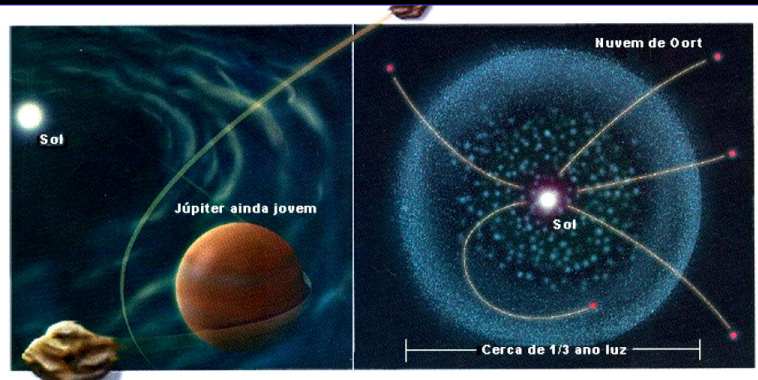


Cometas e Objetos do Cinturão de Edgeworth-Kuiper

Enos Picazzio
IAGUSP
Agosto 2006



Cometas: de onde eles vêm?



Períodos longos: formados na região dos gasosos e expelidos para cá por interação gravitacional.

Cinturão Edgeworht-Kuiper

Plutão

Nuvem de Oort
30.000 a 100.000 UA

Períodos curtos e médios:
formados nesta região



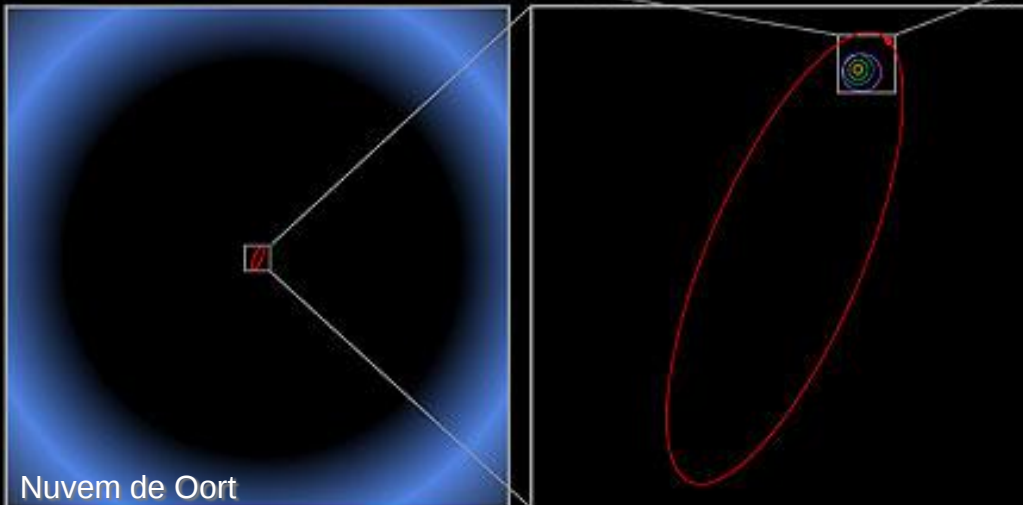
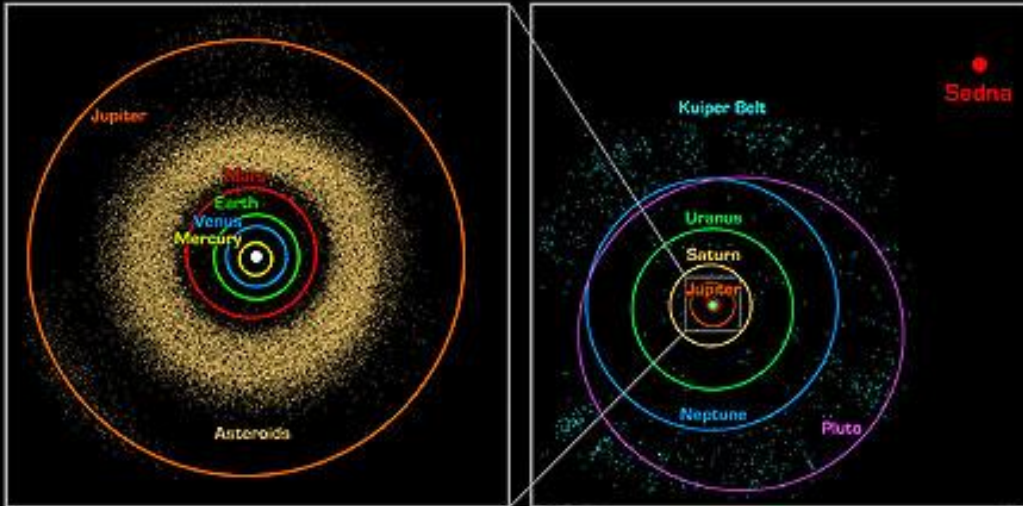
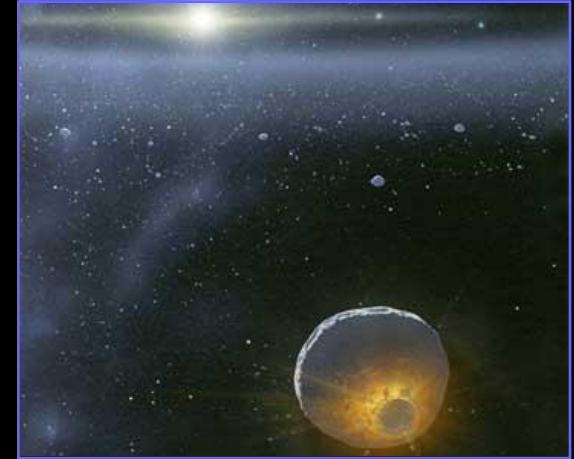
Sedna: formado adiante de Plutão?

Enos Picazzio
IAGUSP
Agosto 2006

Diâmetro ~1.600 km (2/3 de Plutão)

Período orbital: ~12.500 anos.

Órbita excêntrica: 70 UA a 900 UA



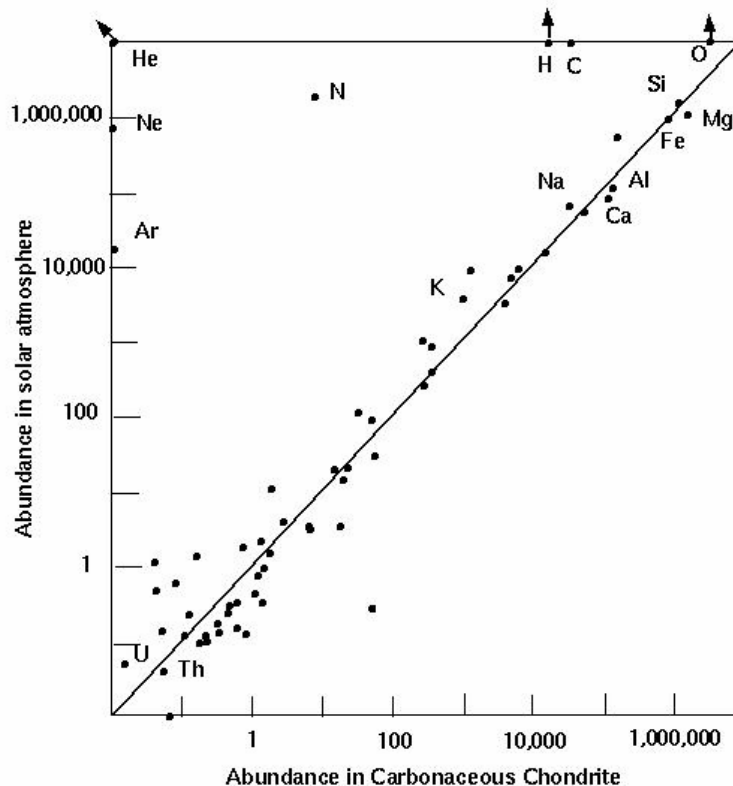
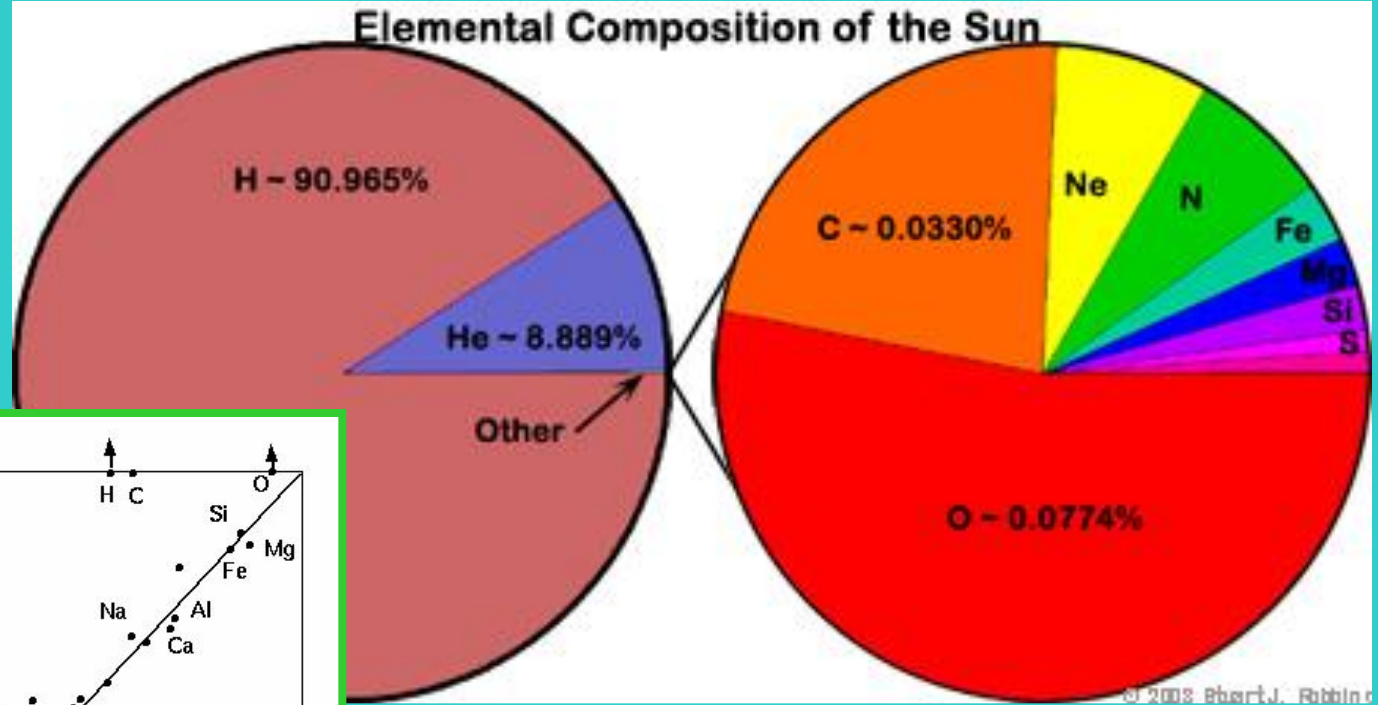
Simulações sugerem que ele foi formado bem distante de Plutão e não, como se supunha, que ele teria se formado nas proximidades dele e ejetado por perturbação gravitacional dos planetas gigantes.

Implicações:

- a zona de formação planetária estende-se bem além do limite até agora admitido,
- pode existir objetos semelhantes nas extremidades do Sistema Solar; e
- o limite de 50 UA não é o externo do cinturão de Edgeworth-Kuiper, mas o interno de uma depressão anular, ou lacuna, entalhada numa estrutura bem mais larga que o cinturão.

Composição química do Sistema Solar

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

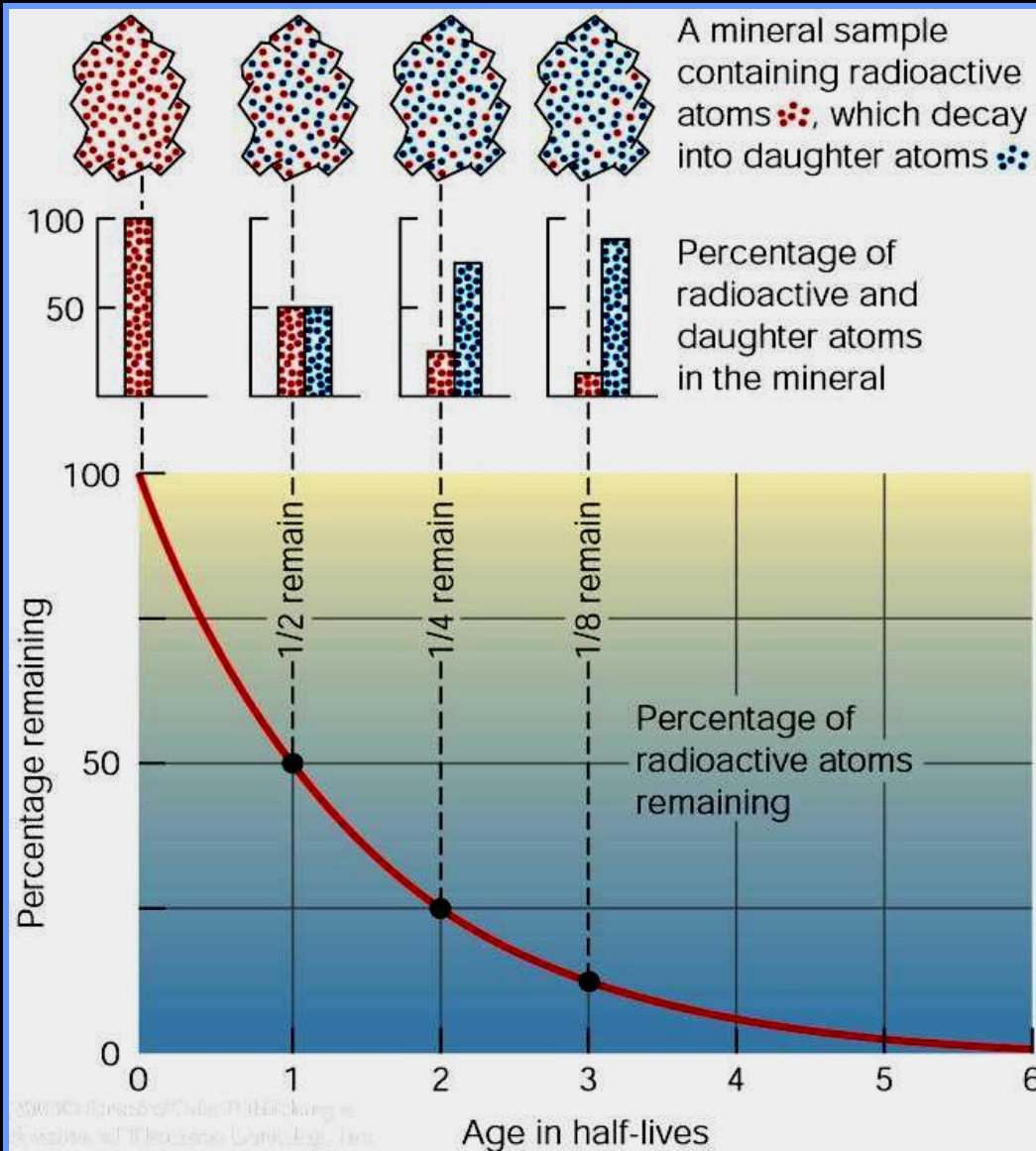


Meteorito Carbonáceo



Todos os objetos se formaram de uma mesma nuvem primordial.

Idade do Sistema Solar



Sol e planetas têm aproximadamente a mesma idade

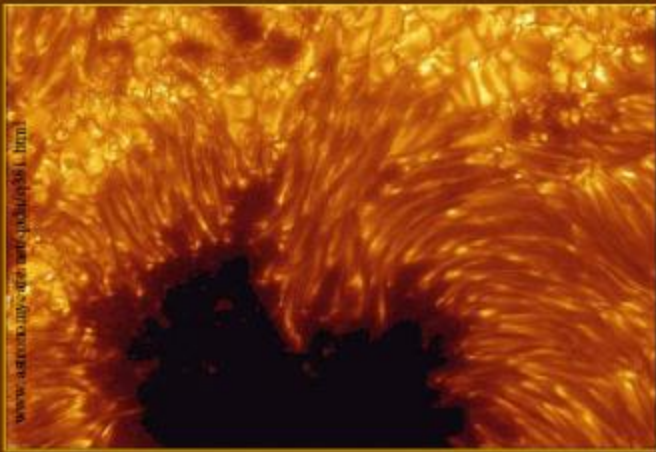
Idades das rochas são obtidas através do decaimento radioativo

Medidas de abundância relativa entre elemento instável e estável revela data de formação da rocha.

Rochas terrestres, lunares e meteoritos mais antigos revelam idades de ~ 4,6 bilhões de anos.

Há água onde não se imagina!

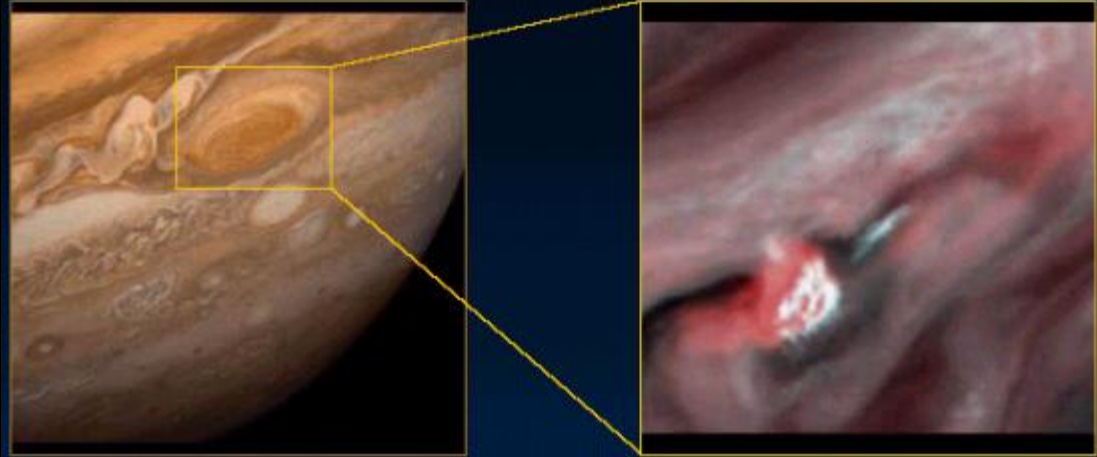
SOL



Regiões mais frias da atmosfera solar, cerca de 4.500 K

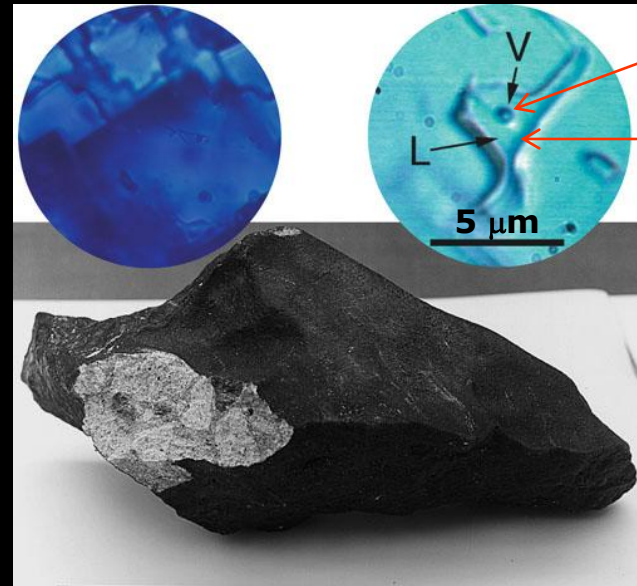
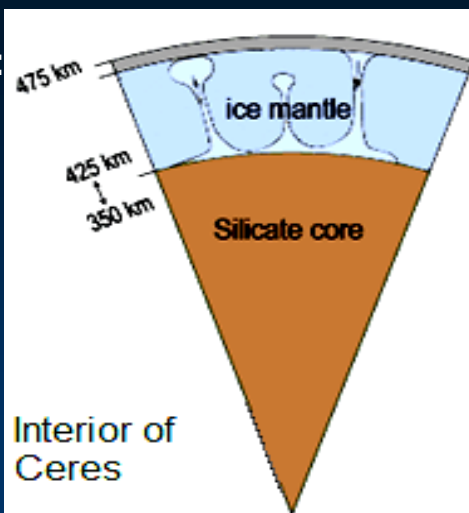
Espectro no IV marcado por linhas de absorção da água

Tempestade de nuvem d'água em Júpiter



CERES (planeta-anão):
25% do manto pode
ser água doce (200
milhões de km³)

TERRA:
total 1,4 bilhão de
km³, água doce: 41
milhões de km³



Bolha

Água
salgada

Meteorito Monahans (condrito ordinário)

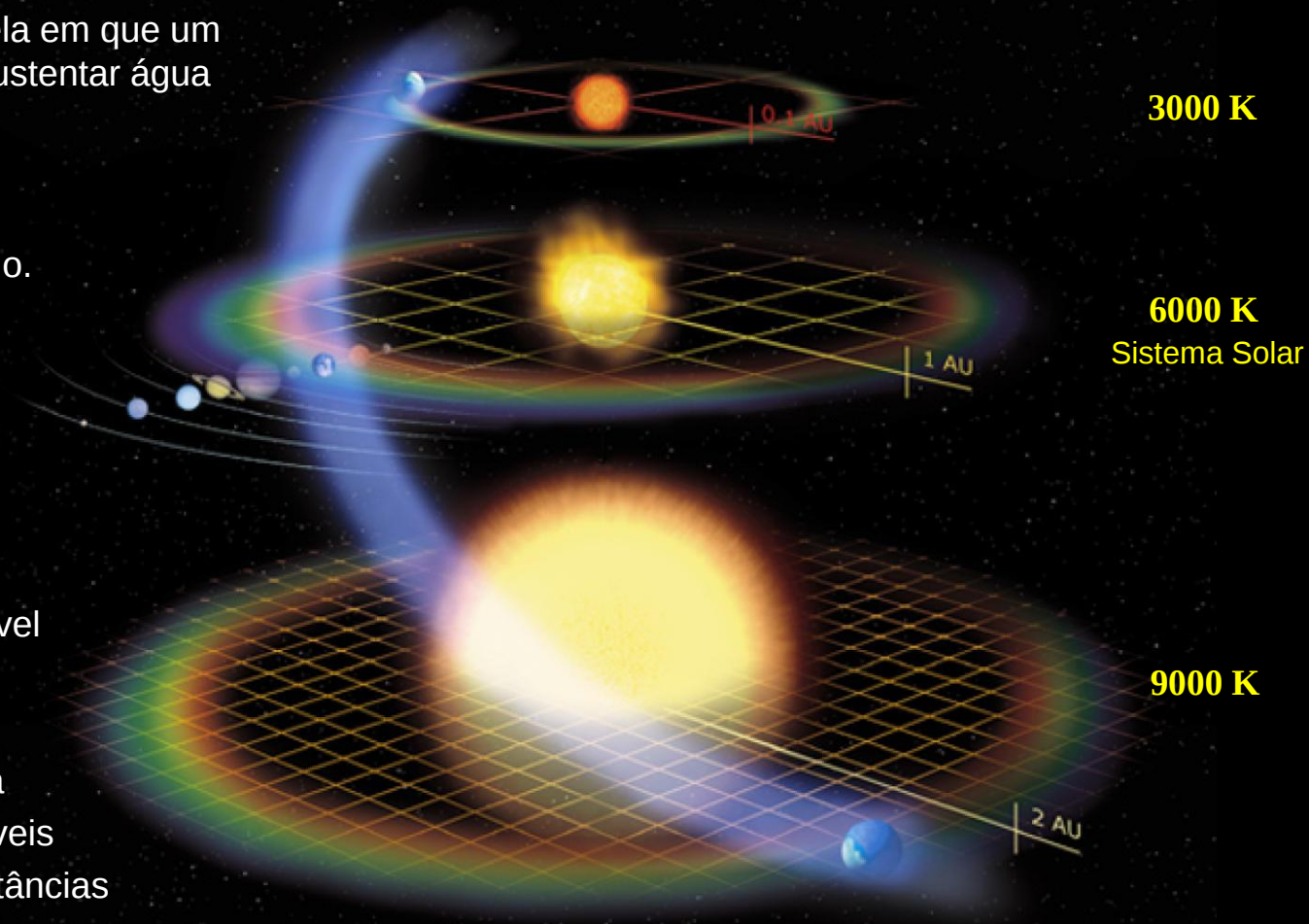
Zona Habitável

Região em torno de uma estrela em que um planeta com atmosfera pode sustentar água líquida em sua superfície.

Vênus está próximo do limite interno e Marte, do limite externo.

Atualmente o Sol brilha 30% que no passado. Portanto, sua zona habitável já esteve mais próxima dele e estará mais distante no futuro.

O limite externo da zona habitável pode se estender devido à presença de CO_2 na atmosfera pois ele favorece o efeito estufa e mantém a temperatura em níveis elevados mesmo a grandes distâncias da estrela.



Água líquida pode ainda existir fora da zona habitável, desde que haja mecanismo de aquecimento. Decaimento radioativo no núcleo e dissipação de energia por maré em Europa (satélite de Júpiter) liquefazem a água da superfície e sua capa congelada dificulta a perda de calor.

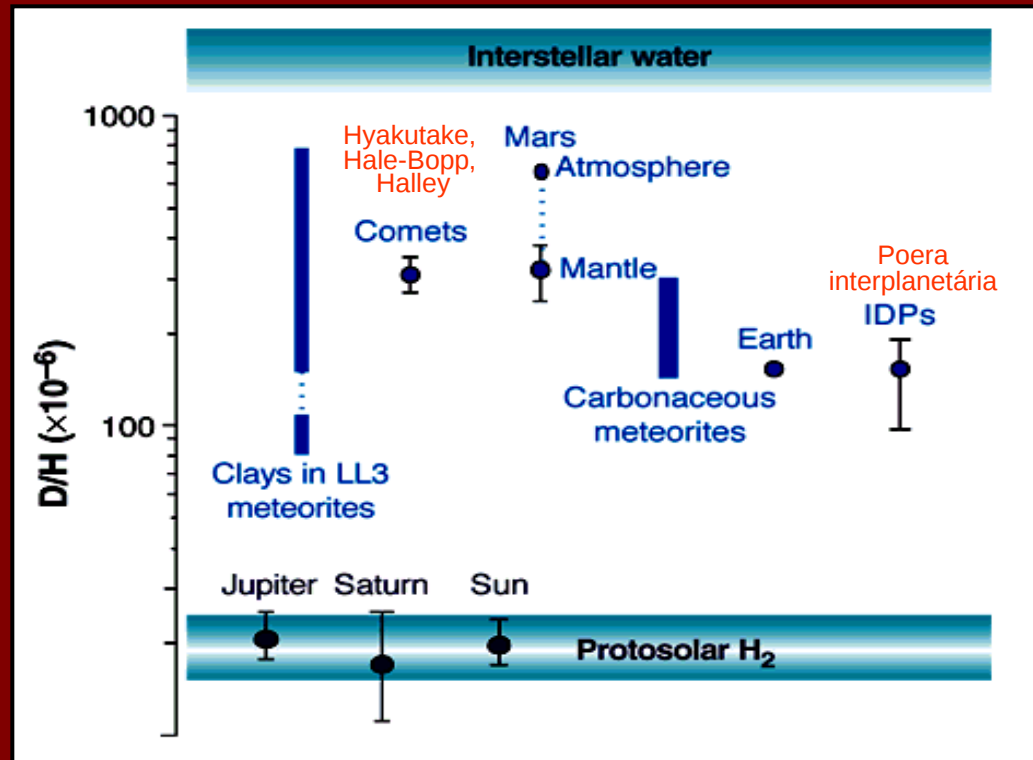
De onde veio a água da Terra?

Atualmente



Hoje a Terra é recoberta por água, mas houve época em que a temperatura era elevada demais para que isso ocorresse. De onde veio a água? A taxa de D/H mostra que esta pergunta ainda carece de resposta conclusiva.

No final da era de bombardeamento

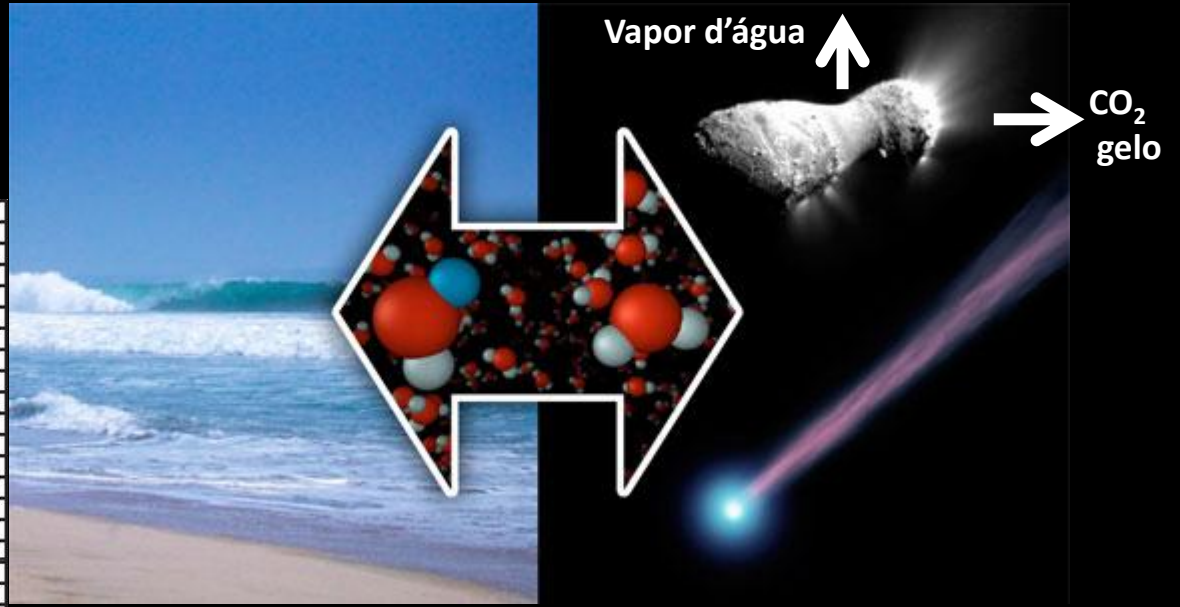
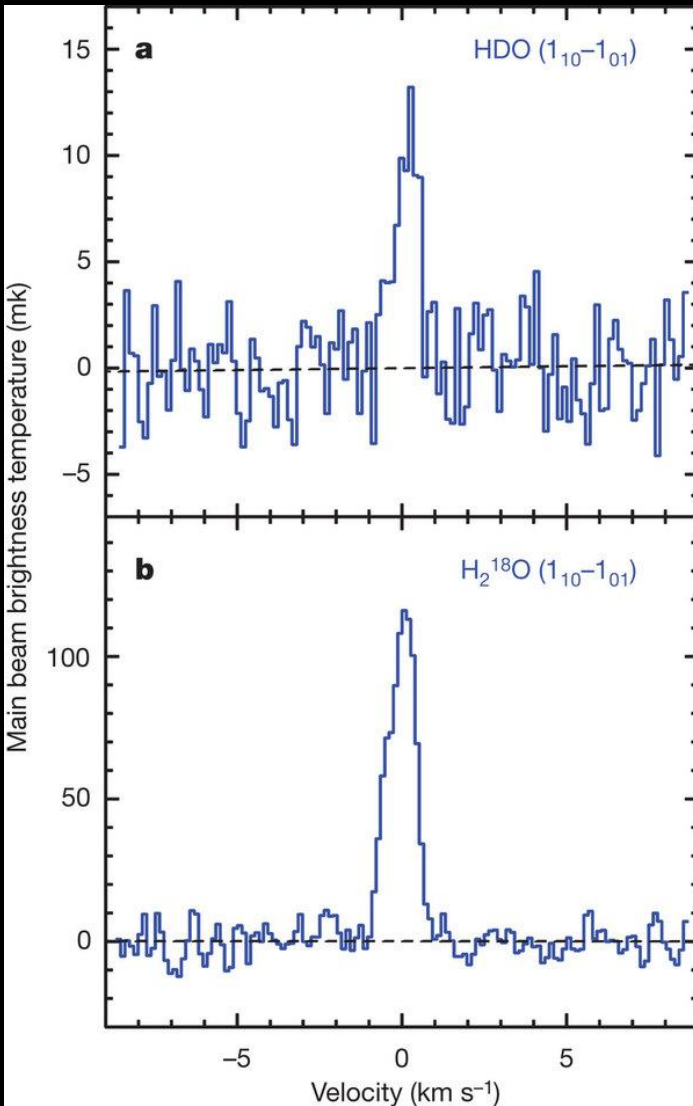


Inigma isotópico: distribuição da composição isotópica do hidrogênio.

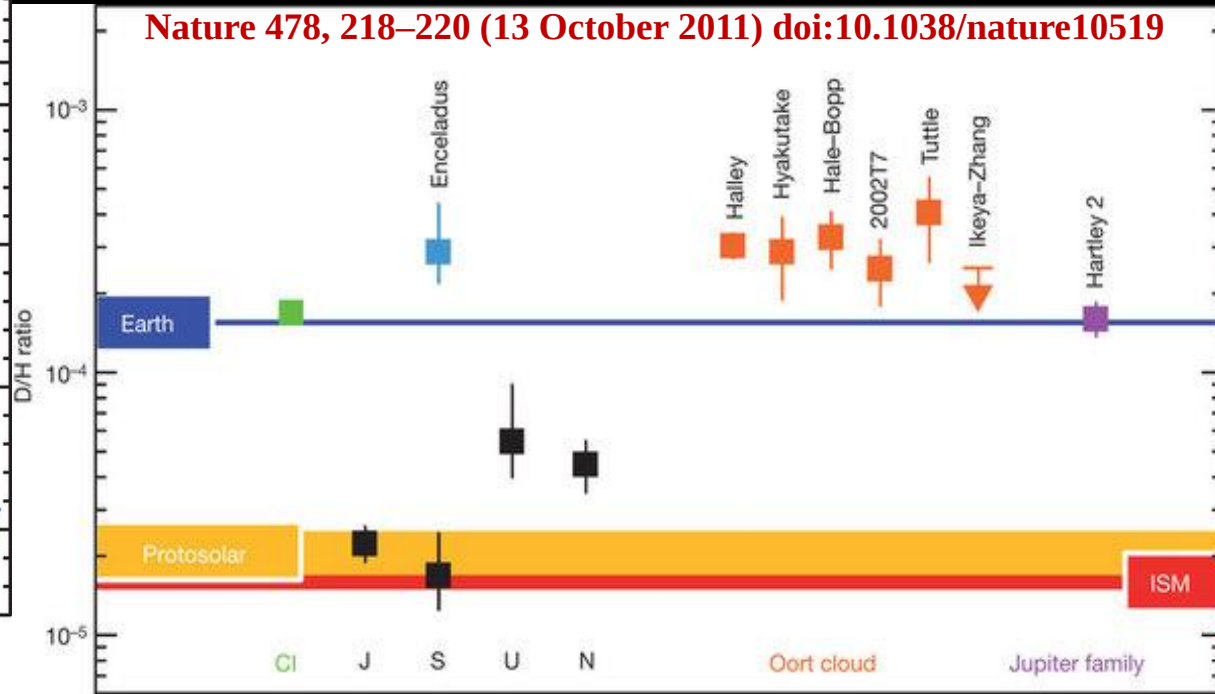
François Robert, *Science* 10 August 2001, Vol. 293, no. 5532, pp. 1056 – 1058.

De onde veio a água da Terra?

103P/Hartley 2



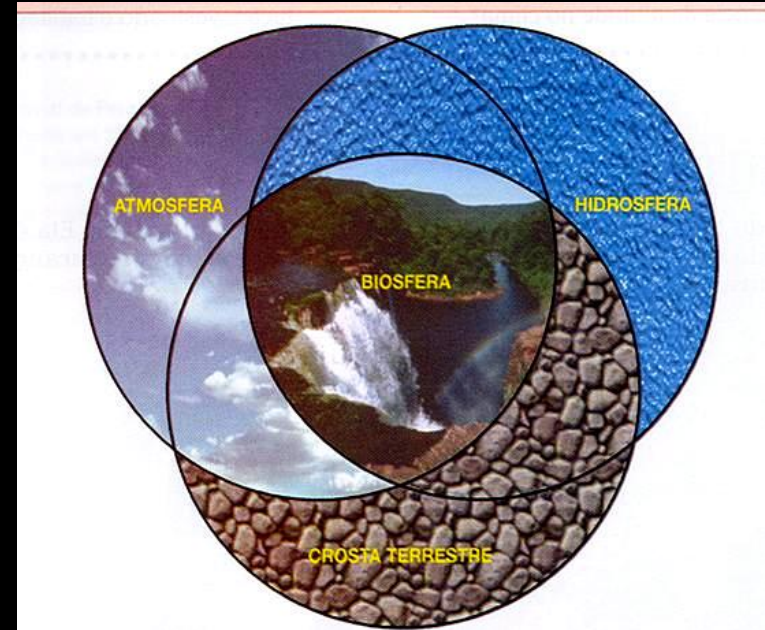
Nature 478, 218–220 (13 October 2011) doi:10.1038/nature10519



Habitabilidade e vida

Condições para desenvolvimento e sustentabilidade de vida em um planeta:

- Sua composição química deve ser favorável.
- Ele deve ter fonte interna de calor.
- Deve possuir atmosfera, que propicie efeito estufa e o proteja de radiação vida (UV, raios X).
- Deve possuir magnetosfera, para protegê-lo de radiação corpuscular da estrela – estelar).
- Sua órbita não pode ter excentricidade elevada, senão sofrerá variação acentuada de temperatura.
- A rotação e a translação não podem ser sincronizadas senão ele terá sempre a mesma face voltada para sua estrela.
- A orientação do eixo de rotação deve ser estável para evitar glaciação.
- Manter estas condições por muito tempo.



Por ora, o nosso é o único planeta que apresenta estas características.