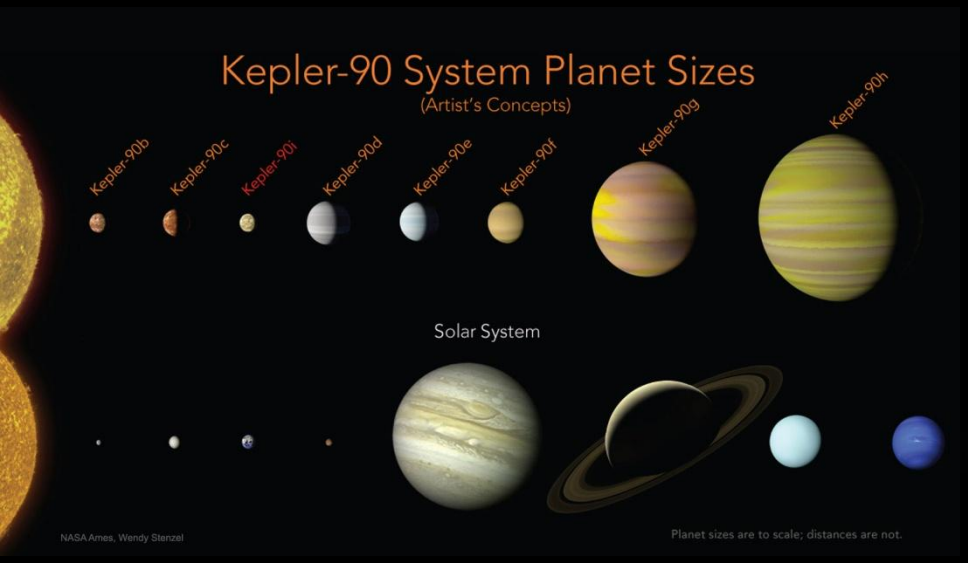
Conceitos Fundamentais da Física do Sistema Solar (MPA5004)

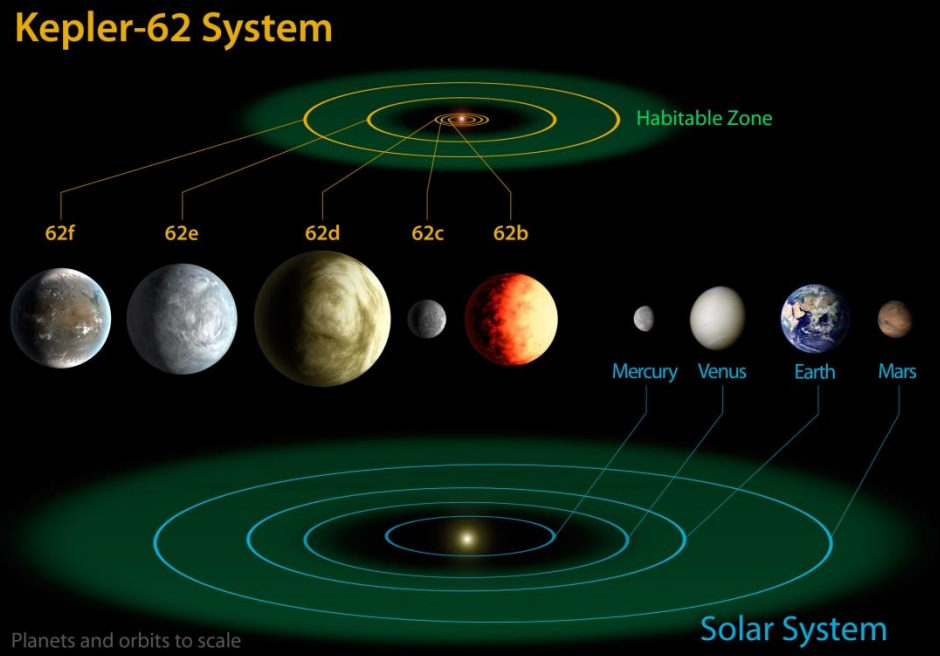
Enos Picazzio (IAGUSP)

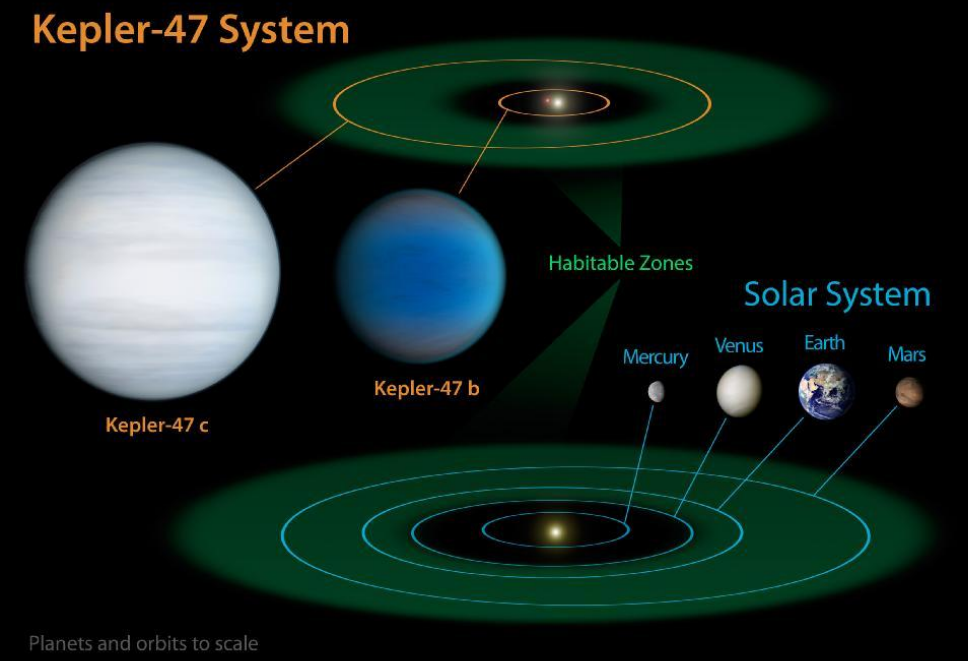
http://www.nasa.gov/vision/universe/starsgalaxies/betapic.html

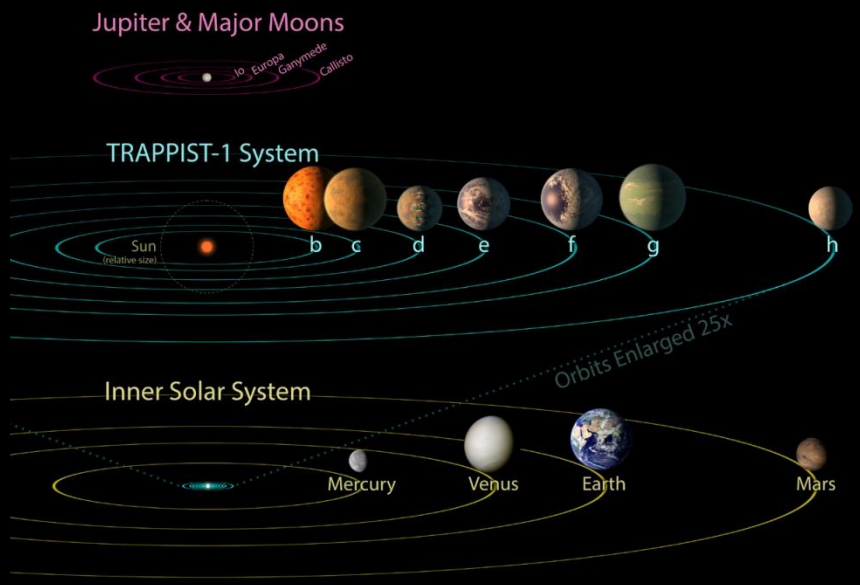
FORMAÇÃO E ESTRUTURA DO SISTEMA SOLAR

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

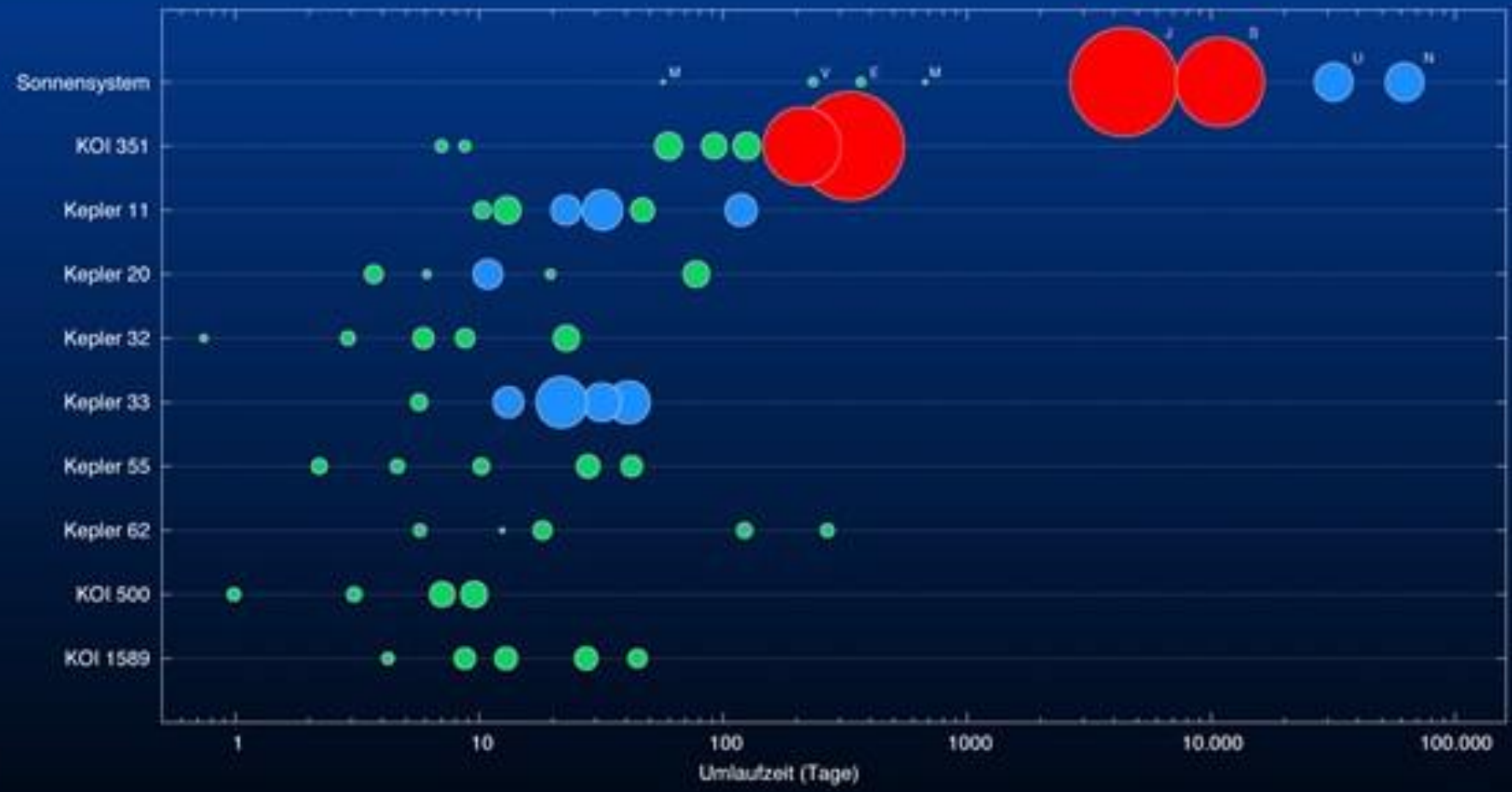

Kepler-90 System Planet Sizes
(Artist's Concepts)
Kepler-90b
Kepler-90c
Kepler-90i
Kepler-90d
Kepler-90e
Kepler-90f
Kepler-90g
Kepler-90h
Solar System
NASA Ames, Wendy Stenzel
Planet sizes are to scale; distances are not.


Kepler-62 System
Habitable Zone
62f
62e
62d
62c
62b
Mercury
Venus
Earth
Mars
Solar System
Planets and orbits to scale


Kepler-47 System
Habitable Zones
Solar System
Mercury
Venus
Earth
Mars
Kepler-47 b
Kepler-47 c
Planets and orbits to scale


Jupiter & Major Moons
Io
Europa
Ganymede
Callisto
TRAPPIST-1 System
Sun
(relative size)
b
c
d
e
f
g
h
Orbits Enlarged 25x
Inner Solar System
Mercury
Venus
Earth
Mars

Kepler-186
System


Sonnensystem
KOI 351
Kepler 11
Kepler 20
Kepler 32
Kepler 33
Kepler 55
Kepler 62
KOI 500
KOI 1589
1
10
100
1000
10.000
100.000
Umlaufzeit (Tage)

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
- **Aperfeiçoando:** 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;

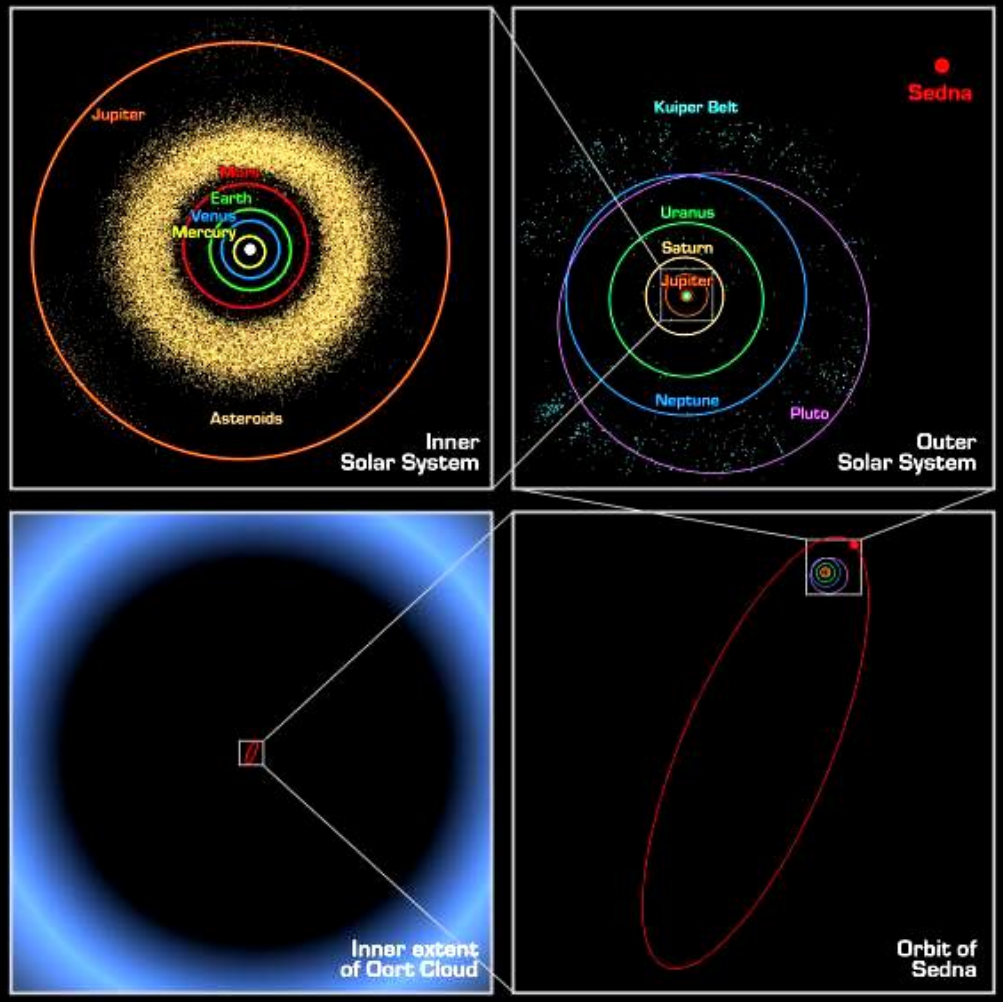
Os planetas apresentam composição química diferenciada;

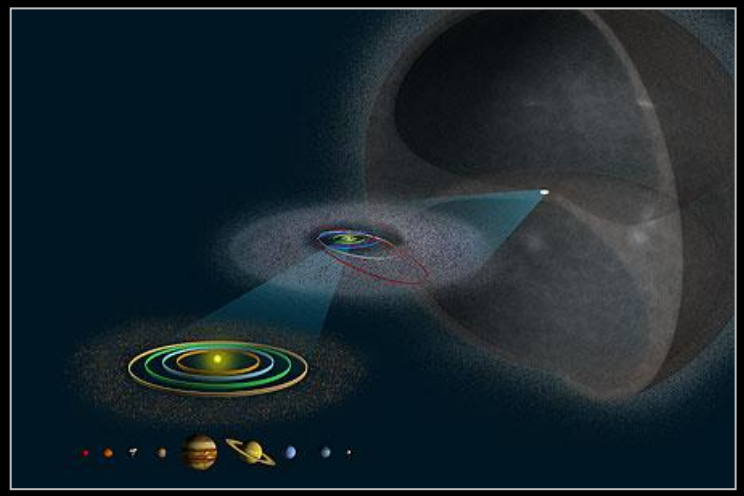
Os cometas de períodos longos têm distribuição espacial quase isotrópica, ao contrário dos cometas de períodos curtos (próximos ao plano da eclíptica);

Adiante de Plutão (*planeta-anão*) há uma população de corpos pequenos com órbitas quase circulares (algumas são altamente excêntricas) e coplanares à ecliptica;

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





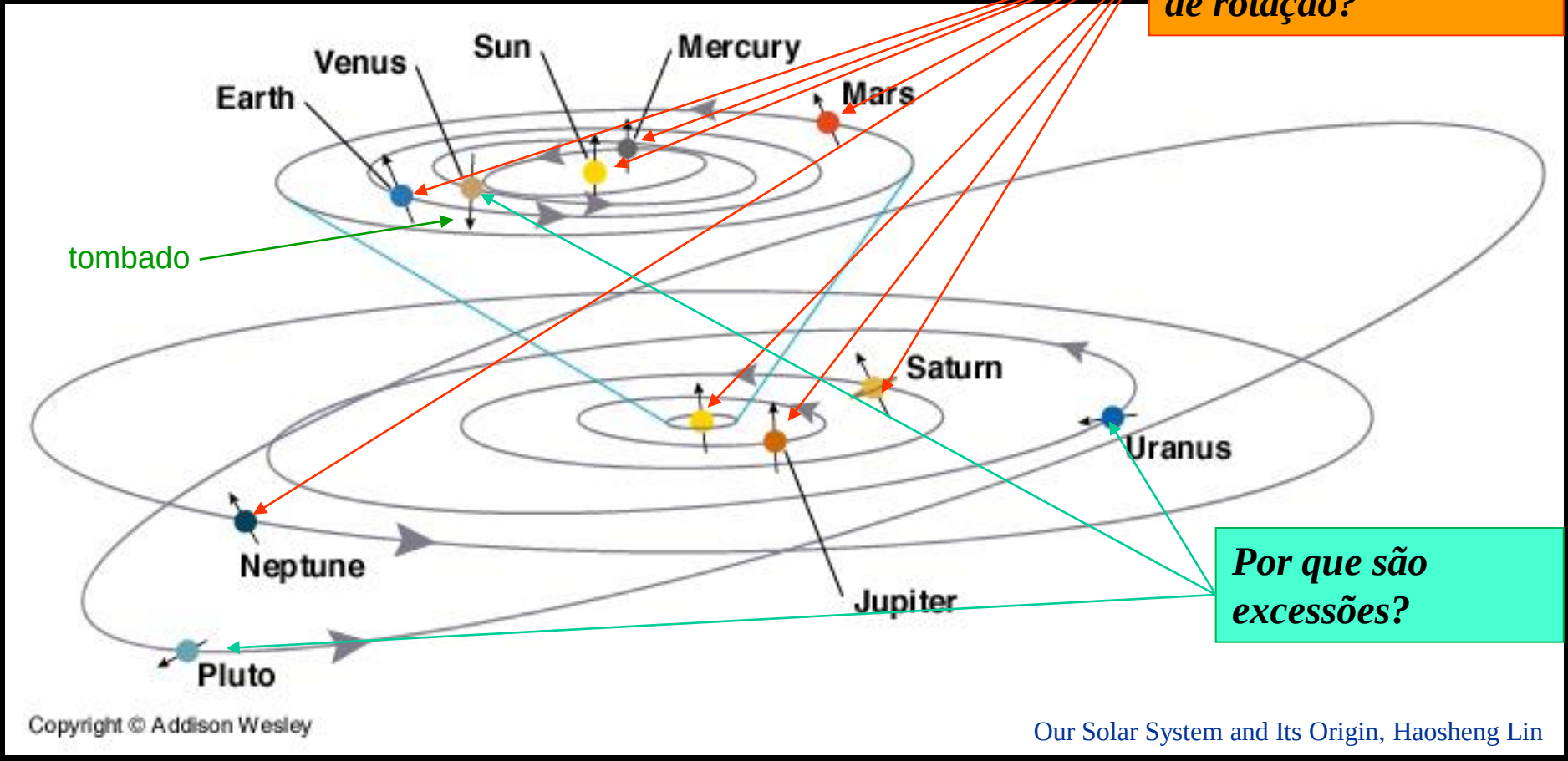
Our Solar System and Its Origin, Haosheng Lin

Interessante: http://liftoff.msfc.nasa.gov/academy/space/solarsystem/solarsystemjava.html

Configuração orbital da porção interna

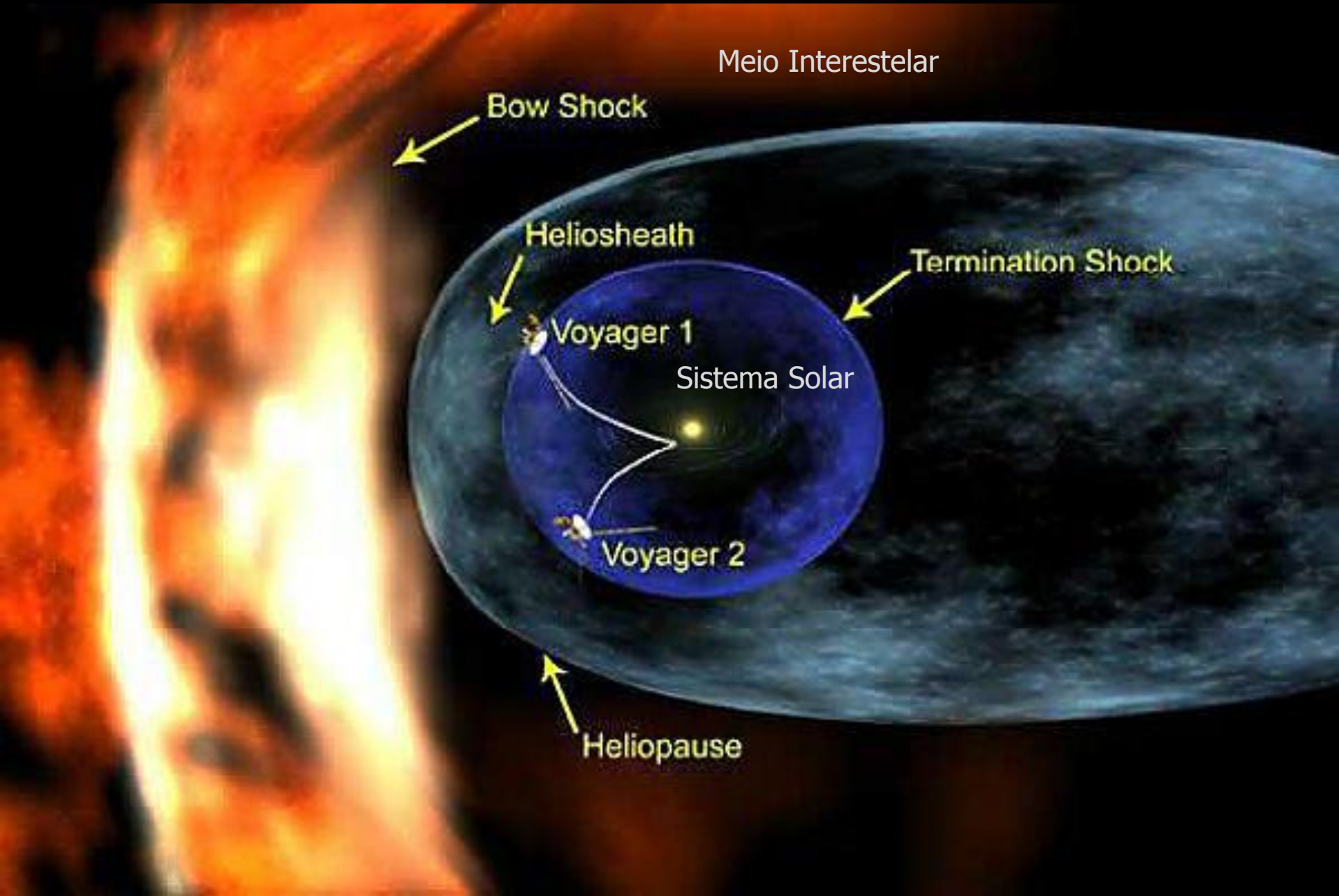
- Todos os planetas orbitam o Sol no mesmo sentido
- Os eixos de rotação da maioria dos planetas são praticamente perpendiculares aos planos de suas órbitas e quase paralelos ao eixo de rotação do Sol .
- Vênus e Urano são exceções. Na região transetuniana, as óbitas são altamente excêntricas e inclinadas.

Qual a razão da orientação dos eixos de rotação?

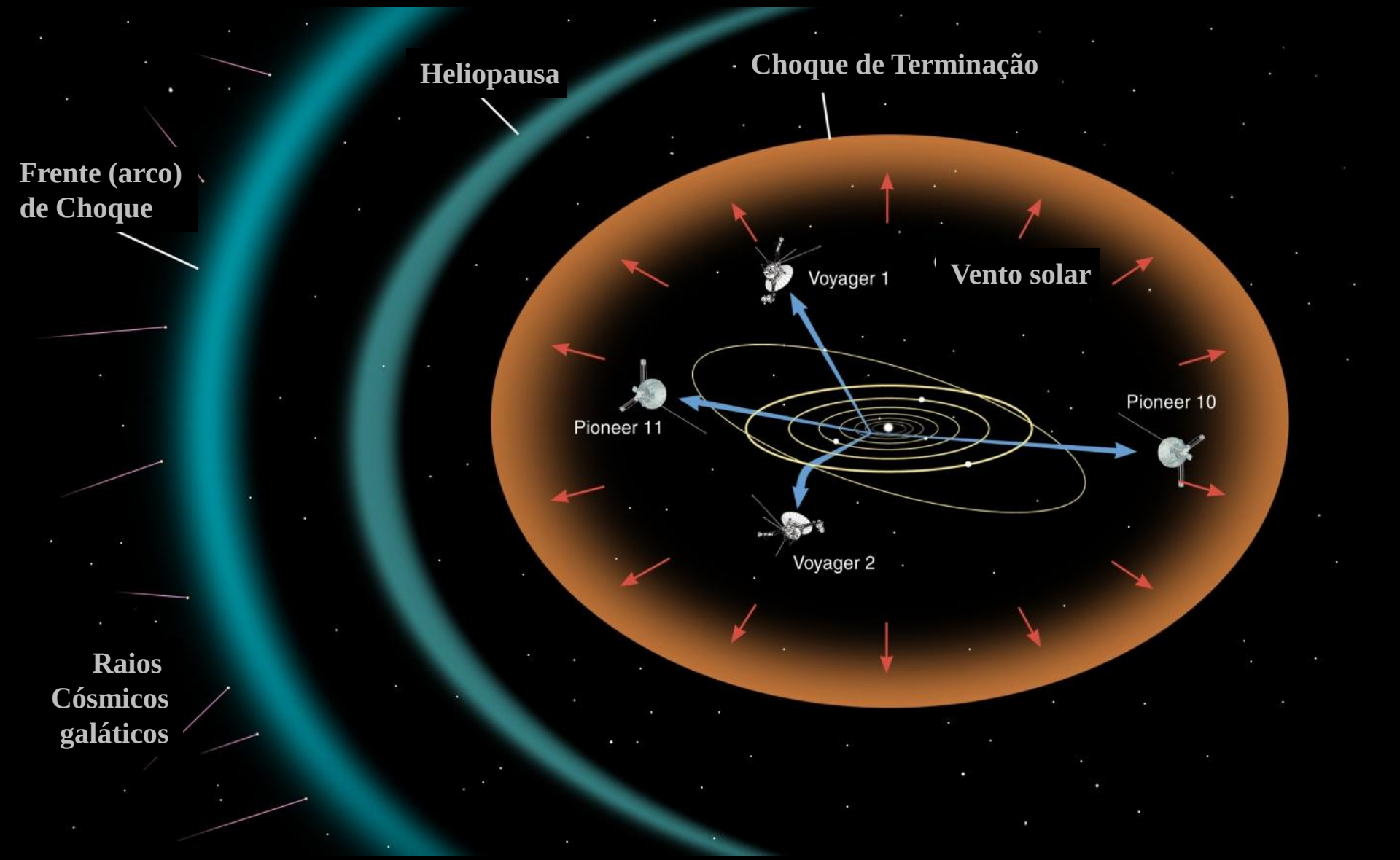


Por que são excessões?

Dimensão “parcial” do Sistema Solar

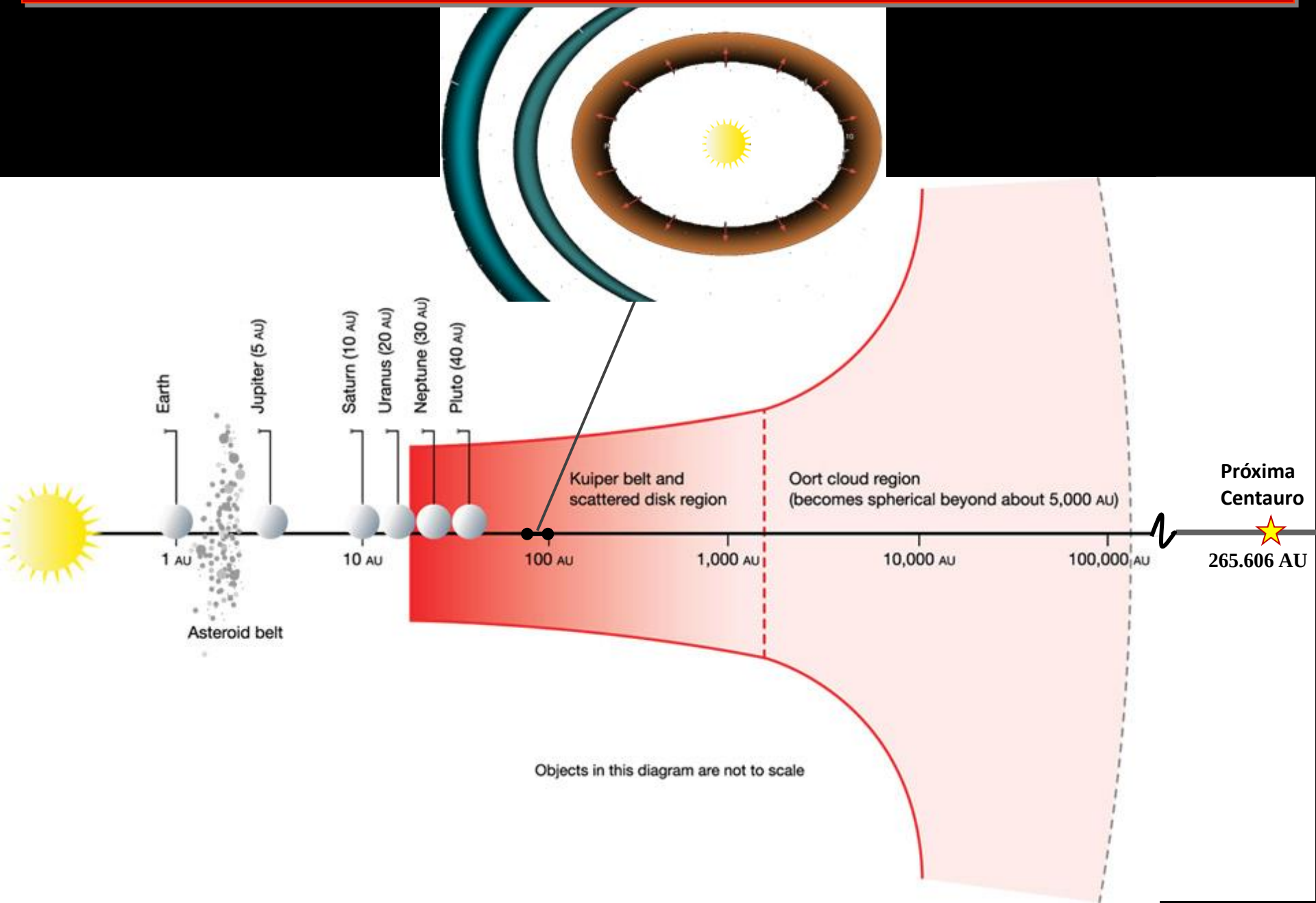


Dimensão “parcial” do Sistema Solar

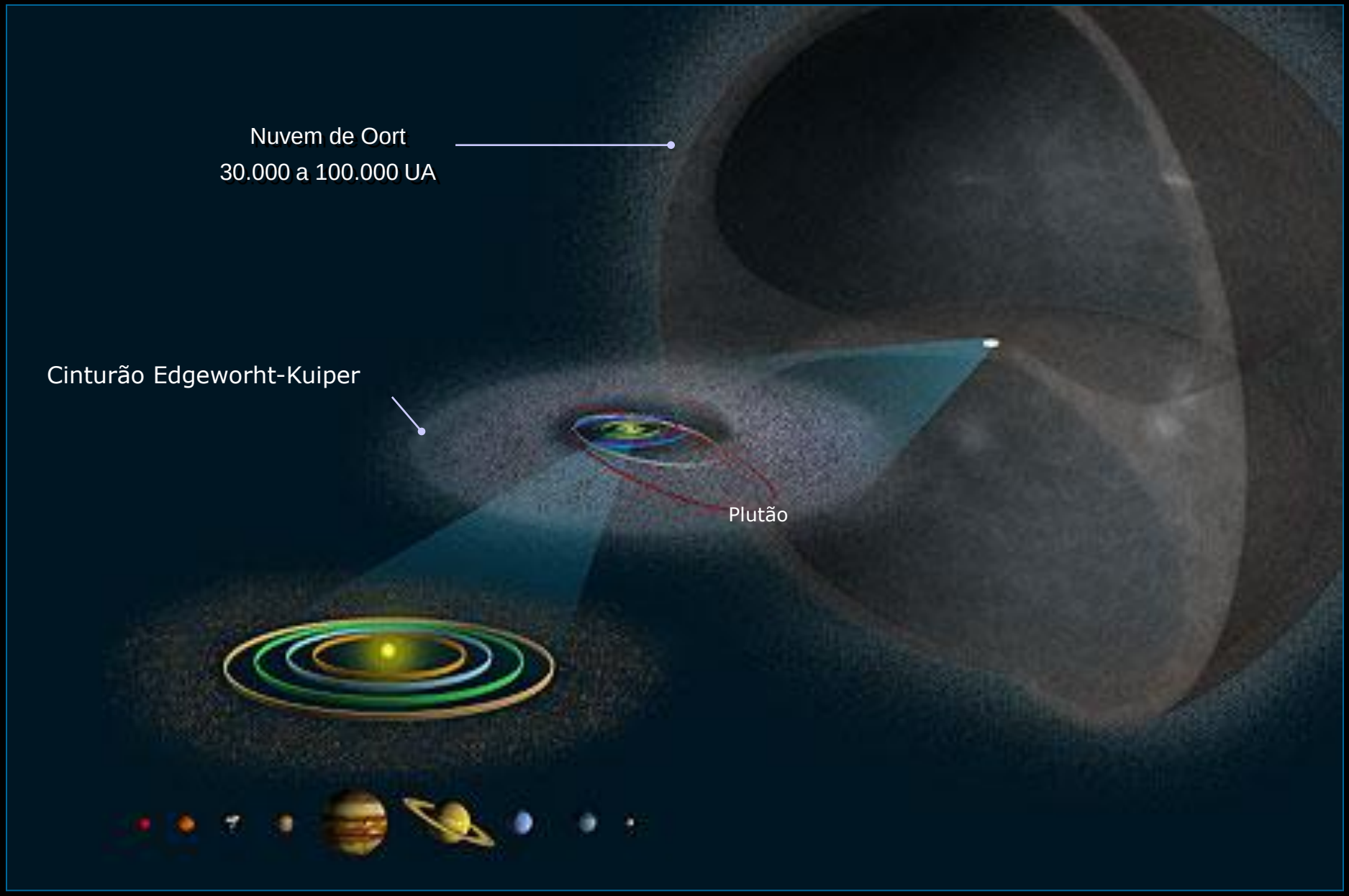


Vivemos na bolha solar

Dimensão “parcial” do Sistema Solar

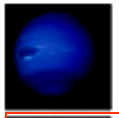


Dimensão física do Sistema Solar



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	•	1.00	6,378	1.00	5.52	1.00 year	23.93 hours	23.5°	290 K	Rocks, metals	1	No
	Mars	·	1.52	3,397	0.11	3.93	1.88 years	24.6 hours	25.2°	240 K	Rocks, metals	2	No
	Jupiter		5.20	71,492	318	1.33	11.9 years	9.93 hours	3.1°	125 K	H, He, hydrogen compounds[§]	61	Yes
	Saturn		9.54	60,268	95.2	0.70	29.4 years	10.6 hours	26.7°	95 K	H, He, hydrogen compounds[§]	31	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

© 2005 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley

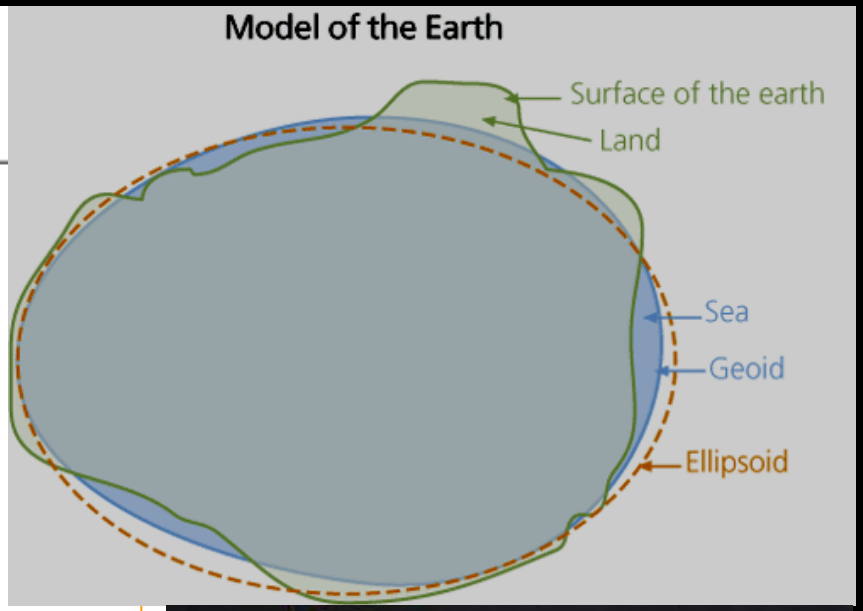
Our Solar System and Its Origin, Haosheng Lin

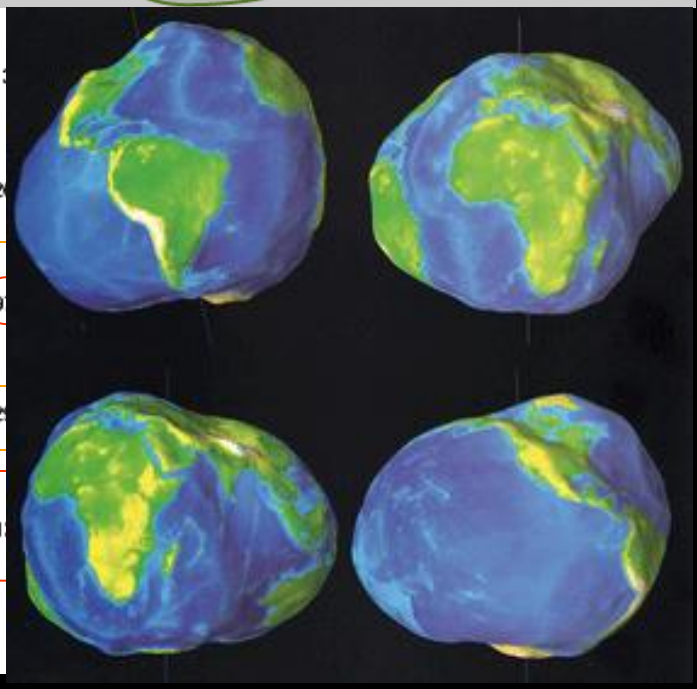
Comparativo

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	
	Mercury	·	0.387	2,440	0.055	5.43	87.9 days	
	Venus	•	0.723	6,051	0.82	5.24	225 days	
	Earth	•	1.00	6,378	1.00	5.52	1.00 year	
	Mars	·	1.52	3,397	0.11	3.93	1.88 years	
	Jupiter	●	5.20	71,492	318	1.33	11.9 years	9.93 hours
	Saturn	●	9.54	60,268	95.2	0.70	29.4 years	10.6 hours
	Uranus	●	19.2	25,559	14.5	1.32	83.8 years	17.2 hours
	Neptune	●	30.1	24,764	17.1	1.64	165 years	16.1 hours
	Pluto	·	39.5	1,160	0.0022	2.0	248 years	6.39 days

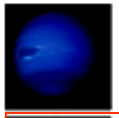
© 2005 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley





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	•	1.00	6,378	1.00	5.52	1.00 year	23.93 hours	23.5°	290 K	Rocks, metals	1	No
	Mars	·	1.52	3,397	0.11	3.93	1.88 years	24.6 hours	25.2°	240 K	Rocks, metals	2	No
	Jupiter		5.20	71,492	318	1.33	11.9 years	9.93 hours	3.1°	125 K	H, He, hydrogen compounds[§]	61	Yes
	Saturn		9.54	60,268	95.2	0.70	29.4 years	10.6 hours	26.7°	95 K	H, He, hydrogen compounds[§]	31	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

O que explica estas diferenças?

© 2005 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley

Formação do Sistema Solar

Historicamente, há 5 hipóteses básicas:

Turbulência

Teoria Nebular (Antiga e Moderna)

Forças de Maré

Acreção

Fundamentos de Astronomia e Astrofísica

Formação do Sistema Solar
COSMOGONIA

Prof. Tibério B. Vale

http://www.if.ufrgs.br/~tiberio/disciplinas/fis02010/aula13.pdf

Várias teorias

Ao longo dos séculos foram desenvolvidos vários modelos para descrever o Sistema Solar. Os principais são:

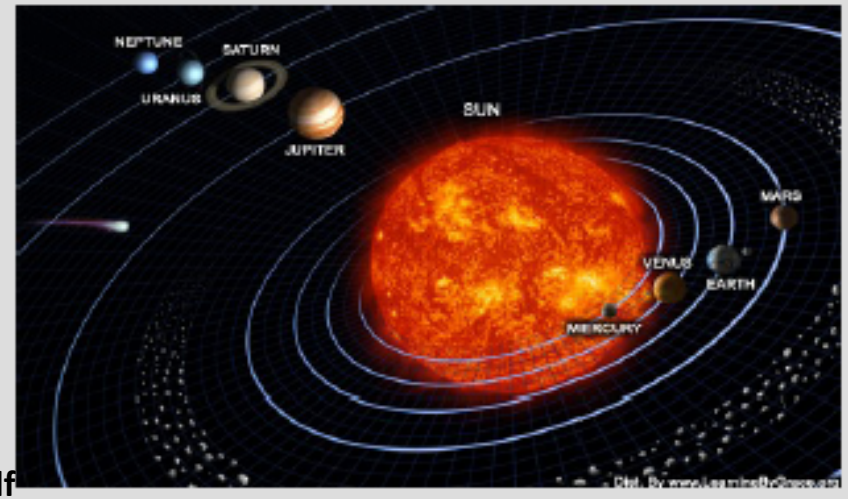
1- Modelos baseados em turbulência;

2- Teoria Nebular (antiga);

3- Teoria de Forças de Maré;

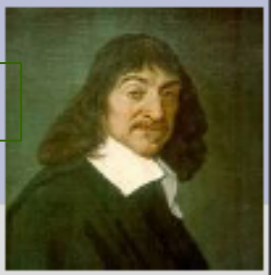
4- Teorias de Acreção;

5- Teoria Nebular (moderna).



http://www.if.ufrgs.br/~tiberio/disciplinas/fis02010/aula13.pdf

Modelos baseados em turbulência



René Descartes

- Proposto por Decartes (1596-1650)
  - Primeira pessoa a propor um modelo científico para a existência do sistema solar;

- Em 1644, Decartes propôs uma teoria onde o universo é então cheio de éter e matéria, era cheio de vórtices de todos os tamanhos.
- Apenas qualitativo;
- Não explica o plano da eclíptica;
- Abandonado após a descoberta das leis de Newton.

http://www.if.ufrgs.br/~tiberio/disciplinas/fis02010/aula13.pdf

Teoria Nebular - Antiga

- Proposto por Kant & Laplace em 1755;
- O conceito primitivo de nebulosa, de onde o Sol e o sistema solar nasceram;
- De acordo com Laplace a nebulosa contrai-se sob a influência da gravidade e sua velocidade rotacional aumenta até que ela colapse em um disco.
- Subseqüentemente anéis de gás são ejetados e condensam em planetas e satélites.
- Este modelo explica todos os fenômenos observados durante o século XVIII.

http://www.if.ufrgs.br/~tiberio/disciplinas/fis02010/aula13.pdf

Teoria Nebular - Antiga

- Vários problemas no Século XIX;
- É difícil explicar a acreção de um planeta a partir de um anel de planetóides;
- O momento angular do sistema solar deveria estar em sua maioria no Sol, mas não é isso que se observa.
- A maior parte do momento angular está nos planetas (Júpiter – 60% e Saturno – 25%);
- Como a maior parte da massa do sistema solar está no Sol (99.8%) o Sol deveria ter retido a maior parte do momento angular do Sistema Solar;

http://www.if.ufrgs.br/~tiberio/disciplinas/fis02010/aula13.pdf

Teorias de Força de Maré

- O primeiro a propor uma teoria catastrófica foi Buffon (1707-1788);
- Sugeriu que o sistema solar surgiu de uma ejeção de material do Sol, causado por uma colisão com um cometa;
- Esta teoria que não tem base científica foi abandonada (na época não se conhecia o material dos cometas);

- Como haviam muitos problemas nas teorias de nebulosas (século XIX);

http://www.if.ufrgs.br/~tiberio/disciplinas/fis02010/aula13.pdf

Teorias de Força de Maré - Revisitada

- Como haviam muitos problemas nas teorias de nebulosas (século XIX);
- Colisão entre o Sol e outra estrela e os planeta se formaram de material condensado perdido pelo Sol (evento raro);
- Segundo está hipótese, no momento do encontro (ponto + próximo) um filamento do Sol foi arrancado e passou a circundar o Sol com momento angular alto;

- A condensação destes filamentos em grandes planetas é difícil de explicar.

Teorias de Força de Maré - Revisitada

- Na década de 30 surgiram modelos que sugerem que o Sol inicialmente fazia parte de um sistema binário e que os planetas se originaram da companheira;

- Na década de 60 Wolfson sugeriu que o encontro entre o Sol e uma proto-estrela e um filamento da proto-estrela condensou em planetas;
- Este tem a vantagem de levar em conta a composição química e isotrópica dos planetas vem de um meio frio e não de um filamento quente.

Mas não explica a semelhança na composição química do Sol e dos planetas **(IAG)**

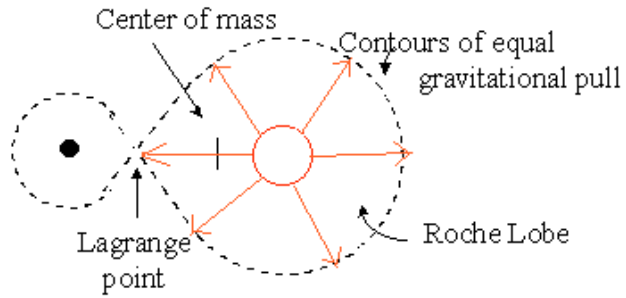
http://www.if.ufrgs.br/~tiberio/disciplinas/fis02010/aula13.pdf

Teorias de Acreção

- São divididas basicamente em dois grupos que consideram a possibilidade do Sol acretar material interestelar;

Necessidade de ter outra estrela próxima;

Este arranjo permite que o material interestelar condense em planetas (Ponto de Lagrange)



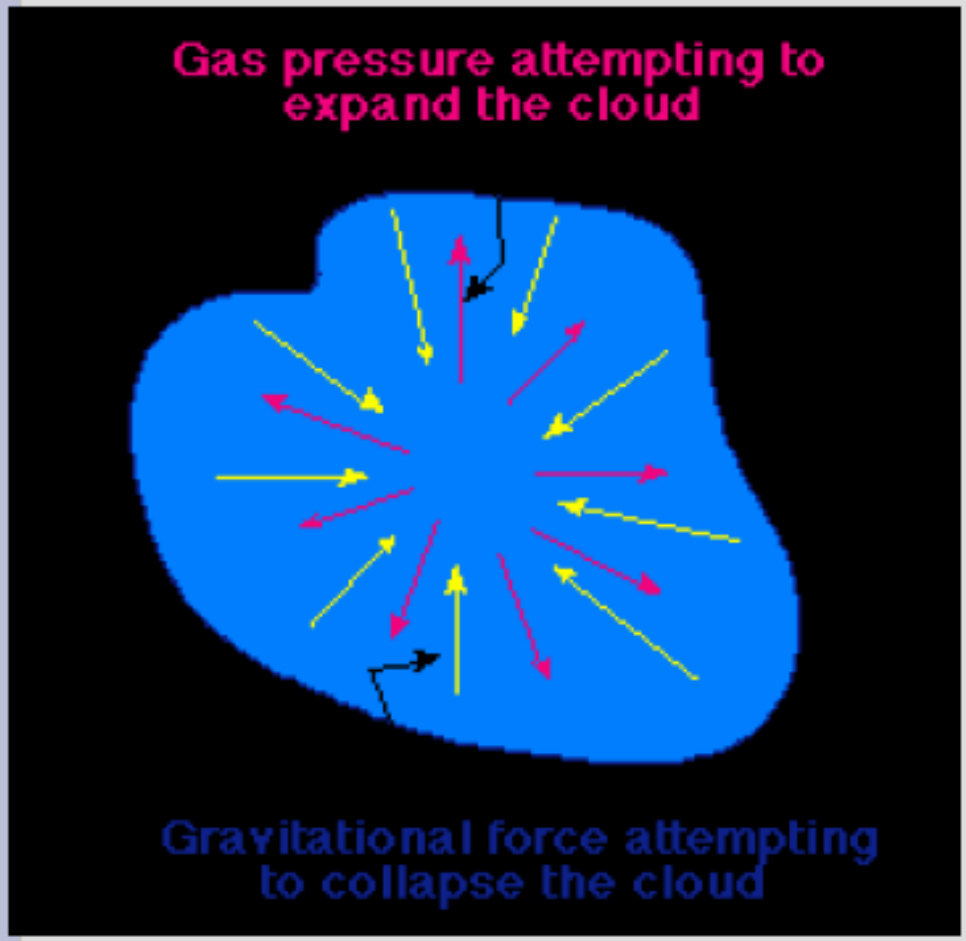
Segundo Arrhenius & Alfén.

O Sol passou por duas nebulosas:
-Uma formada por grãos não voláteis (sólidos) – Planetas terrestres;
- Outra formada por H – Planetas Gigantes

http://www.if.ufrgs.br/~tiberio/disciplinas/fis02010/aula13.pdf

Teoria nebular moderna

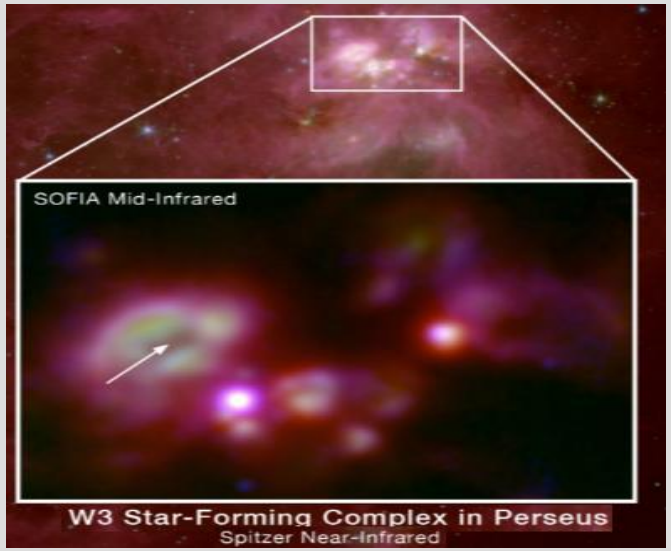
Baseada na Teoria Original de Laplace – Sol e Planetas foram formados quase simultaneamente.



Massa da nuvem primordial = Massa de Jeans > 10^5 Msol

A nuvem colapsa gravitacionalmente.

Força gravitacional x pressão



http://www.if.ufrgs.br/~tiberio/disciplinas/fis02010/aula13.pdf

Teoria nebular moderna

A questão do momento angular é explicada pela perda de massa do Sol;

Uma estrela em rotação perde massa através do fluxo de partículas ao longo das linhas de força associadas ao centro de atividade magnética;

As partículas são transportadas a uma distância **a** muito maior que o raio **R** da estrela;

Uma pequena perda de massa é suficiente para levar o momento angular do Sol ao valor observado hoje (a/R=10 e dM/dt = 0.003)

$$L \sim \left(\frac{a}{R}\right)^2$$

http://www.if.ufrgs.br/~tiberio/disciplinas/fis02010/aula13.pdf

Momento angular

Momento angular - quantidade de movimento associado a um objeto que executa um movimento de rotação em torno de um ponto fixo:

$$L = Q \cdot d \cdot \text{sen}\theta$$

L – momento angular**;**
Q – quantidade de movimento linear do corpo **(Q = m . v)**
v – velocidade
d – distância do corpo à origem do referencial (ponto fixo).
θ – ângulo entre a força e o braço de alavanca **d.**

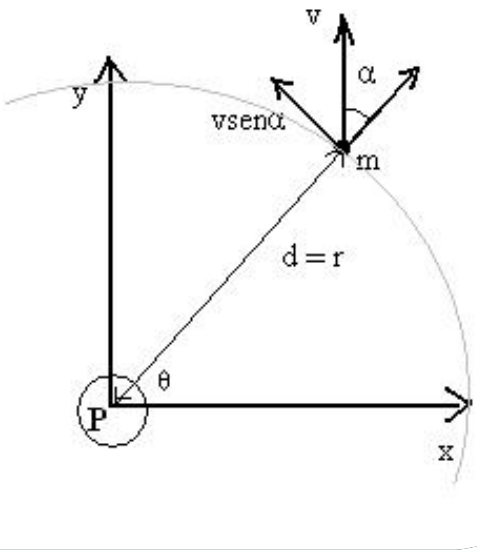
Quando **θ** = 90º, **sen θ = 1,** a equação se reduz a:

$$L = Q \cdot d = m \cdot v \cdot d \Longrightarrow L = m \cdot v \cdot r$$

Mas **v = ω . r** **(ω -** velocidade angular **):**

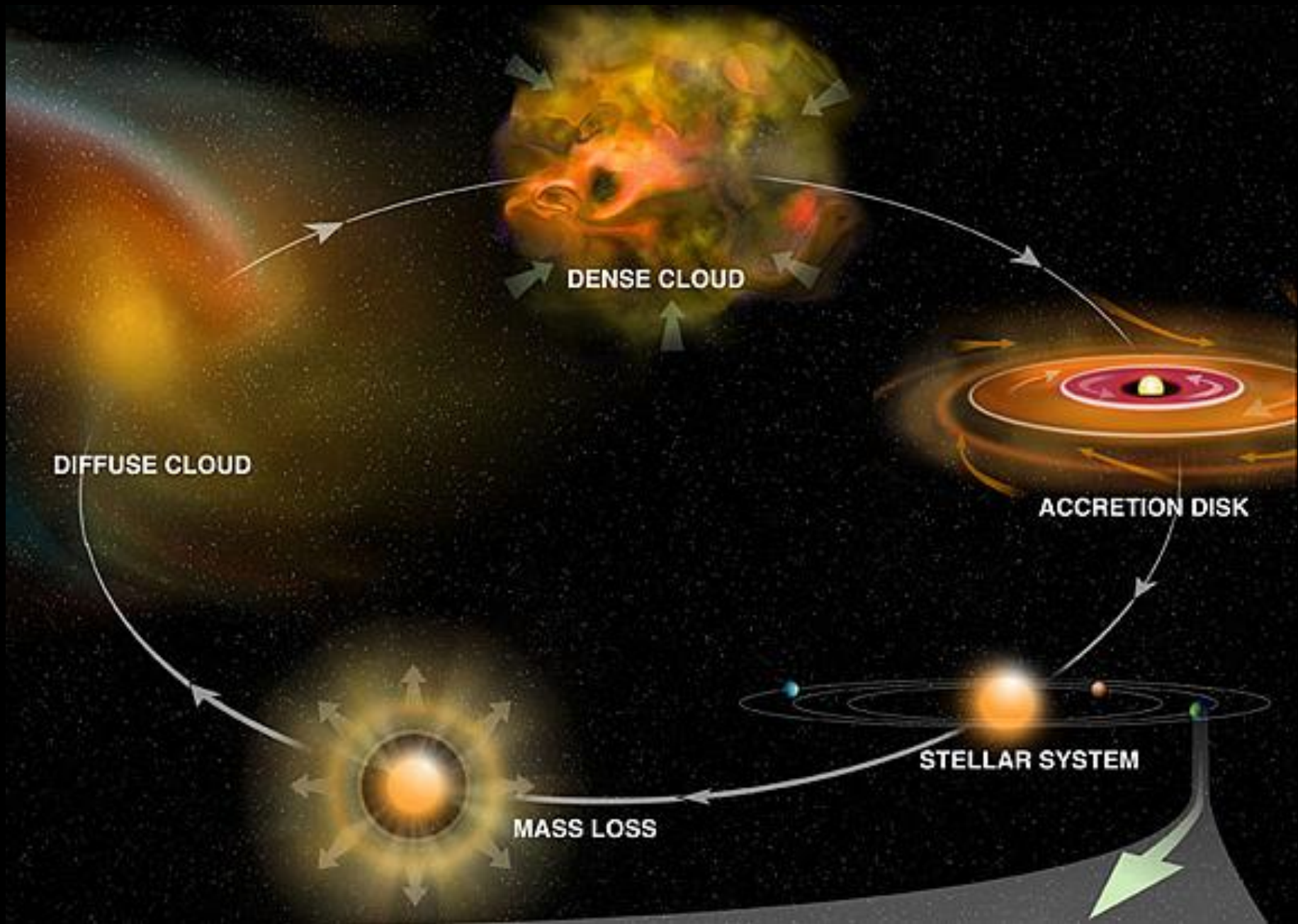
Então **L = m . ω . r² ou L = I . ω**

sendo **I -** momento de inércia



Momento angular total é a soma do momento angular do corpo em torno de seu próprio eixo e do corpo em torno de um eixo imaginário, situado no centro de massa do sistema.

Processo cíclico e a evolução química



Nascimento de estrelas

UK Astrophysical Fluids Facility

Matthew Bate

University of Exeter

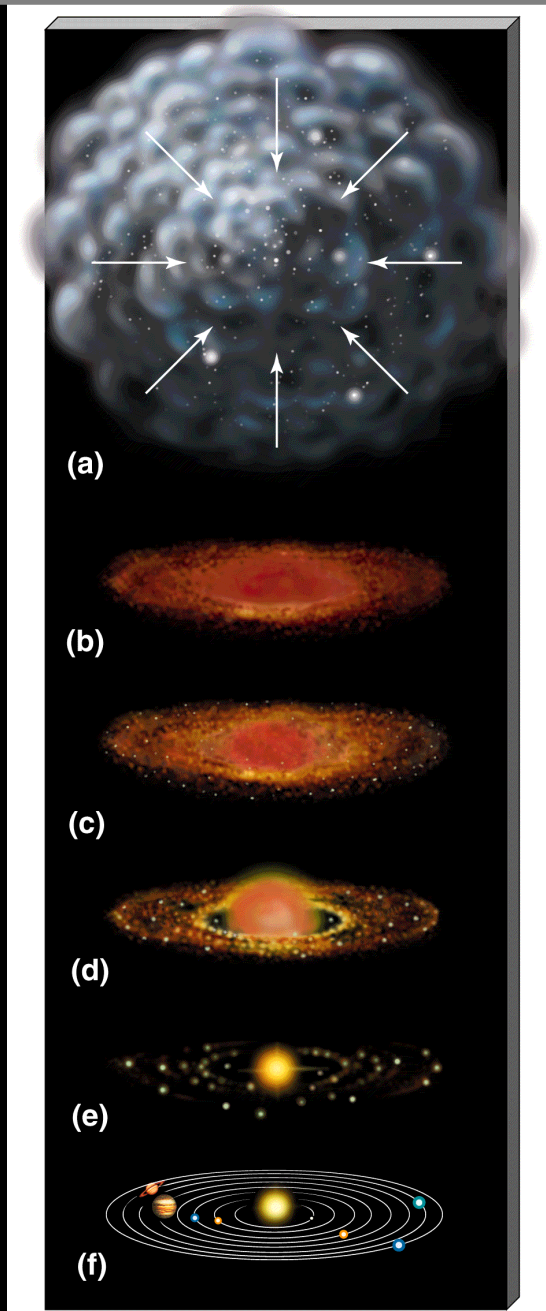
Estrelas: do nascimento à morte

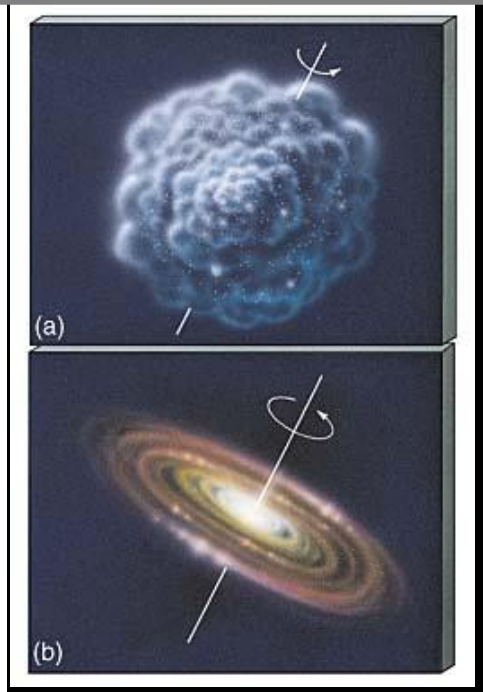
O tempo que uma estrela leva do nascimento à fase de geração de energia por fusão nuclear (Seqüência Principal) depende da massa.

Massa		Tipo espectral	Tempo para chegar à SP
30 M_{SOL}		O6	30.000 anos
10		B3	300.000
4		B8	1.000.000
2		A4	8.000.000
1	Sol	G2	30.000.000
0.5		K8	100.000.000
0.2		M5	1.000.000.000

Massa		***Tempo de vida na SP*** ($\approx 10^{10} / M^2$ anos)
60 M_{SOL}		*2 milhões anos*
30		*5 milhões*
10		*25 milhões*
3		*350 milhões*
1,5		*1,6 bilhão*
1	*Sol*	*9 bilhões*
0,1		*Trilhões*

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 achamento.

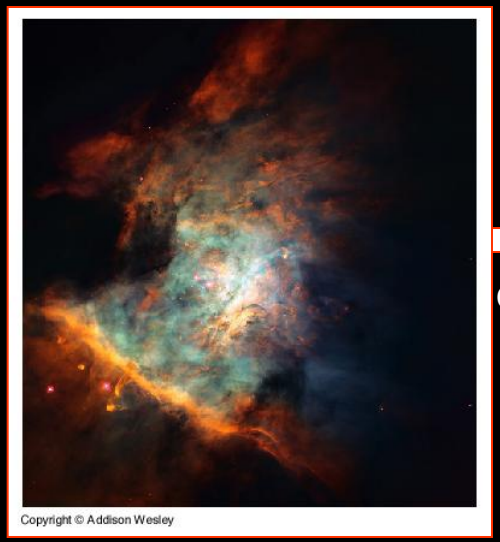
No centro vai sendo formado o *Proto-Sol* (ainda não é uma estrela).

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.

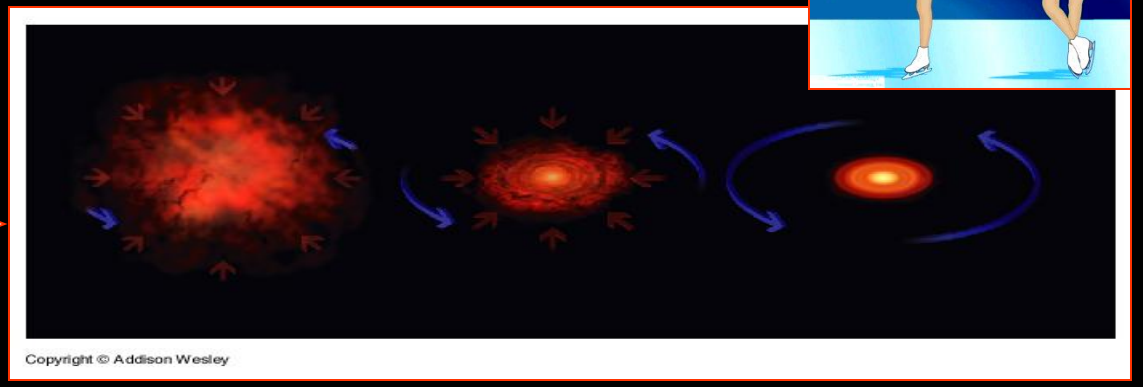
A rotação da nuvem primitiva é condição para formação de disco

Colapso Nebular



Colapso

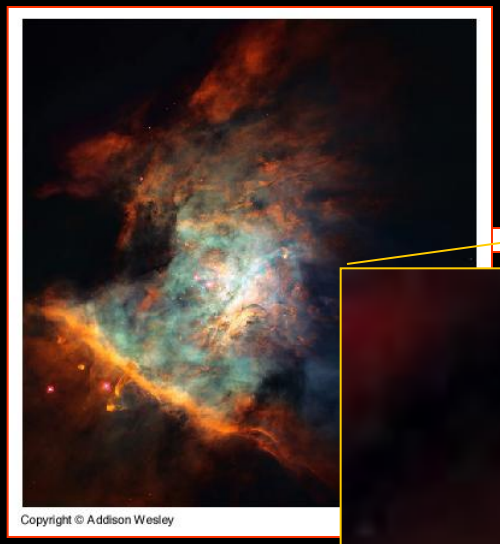
Gravitacional



Região mais densa da nuvem pode ser comprimida por ondas de choque de supernovas vizinhas, desestabilizando a nuvem e provocando seu colapso

1. **Aquecimento** ⇒ Proto-Sol ⇒ Sol
   Material em queda perde energia potencial gravitacional, que é convertida em energia cinética. Material de região mais densa sofre colisão e provoca aumento da temperatura do gás. Valores adequados de temperatura e pressão (densidade) detonam fusão nuclear – Sol torna-se uma estrela.
2. **Rotação** ⇒ uniformiza movimentos aleatórios
   Conservação do momento angular faz material em queda aumentar gradativamente a rotação quanto mais se aproxima do centro da nuvem.
3. **Achatamento** ⇒ cria disco protoplanetário. A nebulosa solar é achatada na forma de um disco. Colisão entre blocos de matéria transforma movimento caótico (ao acaso) em ordenado do disco em rotação.

Colapso Nebular

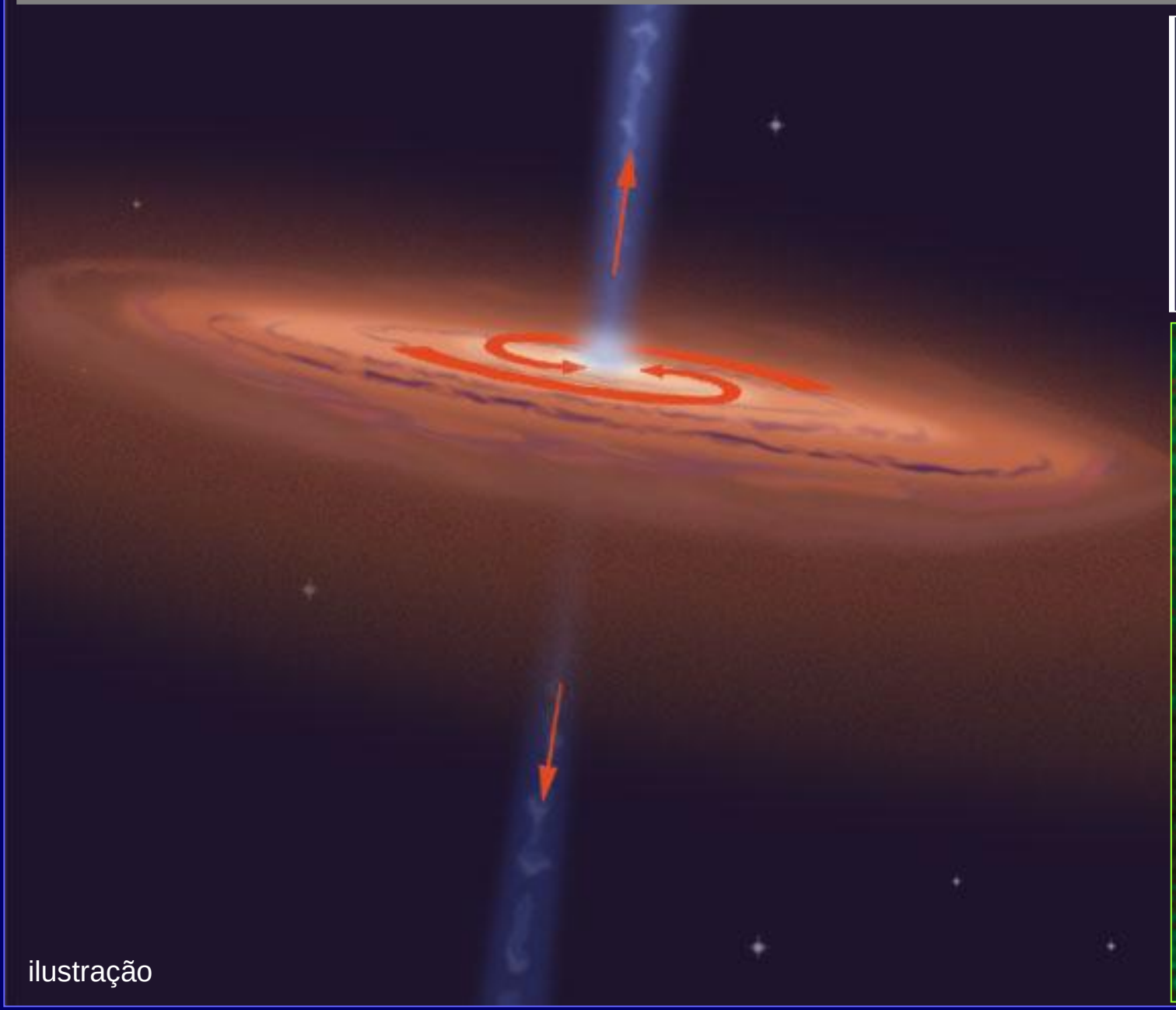


Colapso

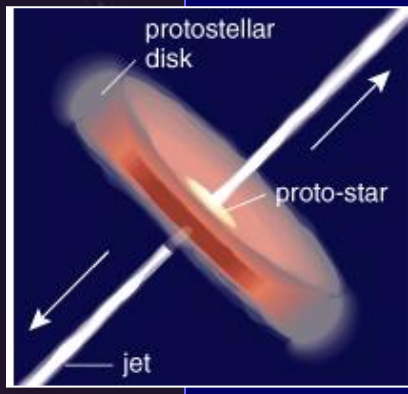
1. **Aquecim**
   Material e
   energia c
   aumento
   pressão (c
2. **Rotação**
   Conservaç
   gradativar
3. **Achatam**
   forma de
   caótico (a

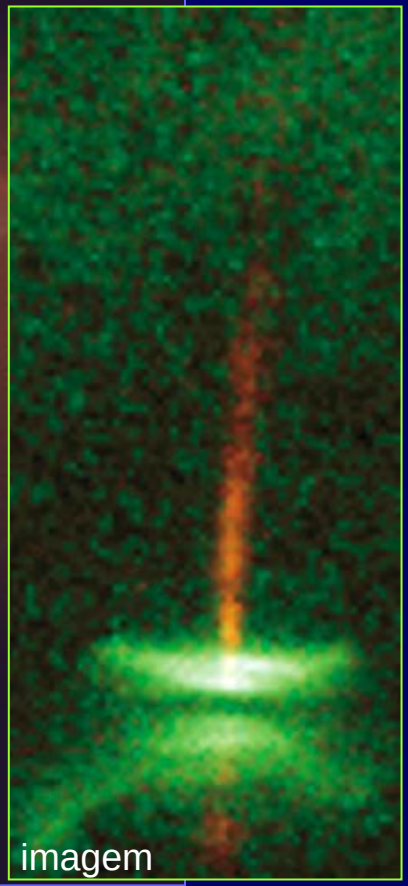
Our Solar System and Its Origin, Haosheng Lin

Colapso Nebular



ilustração

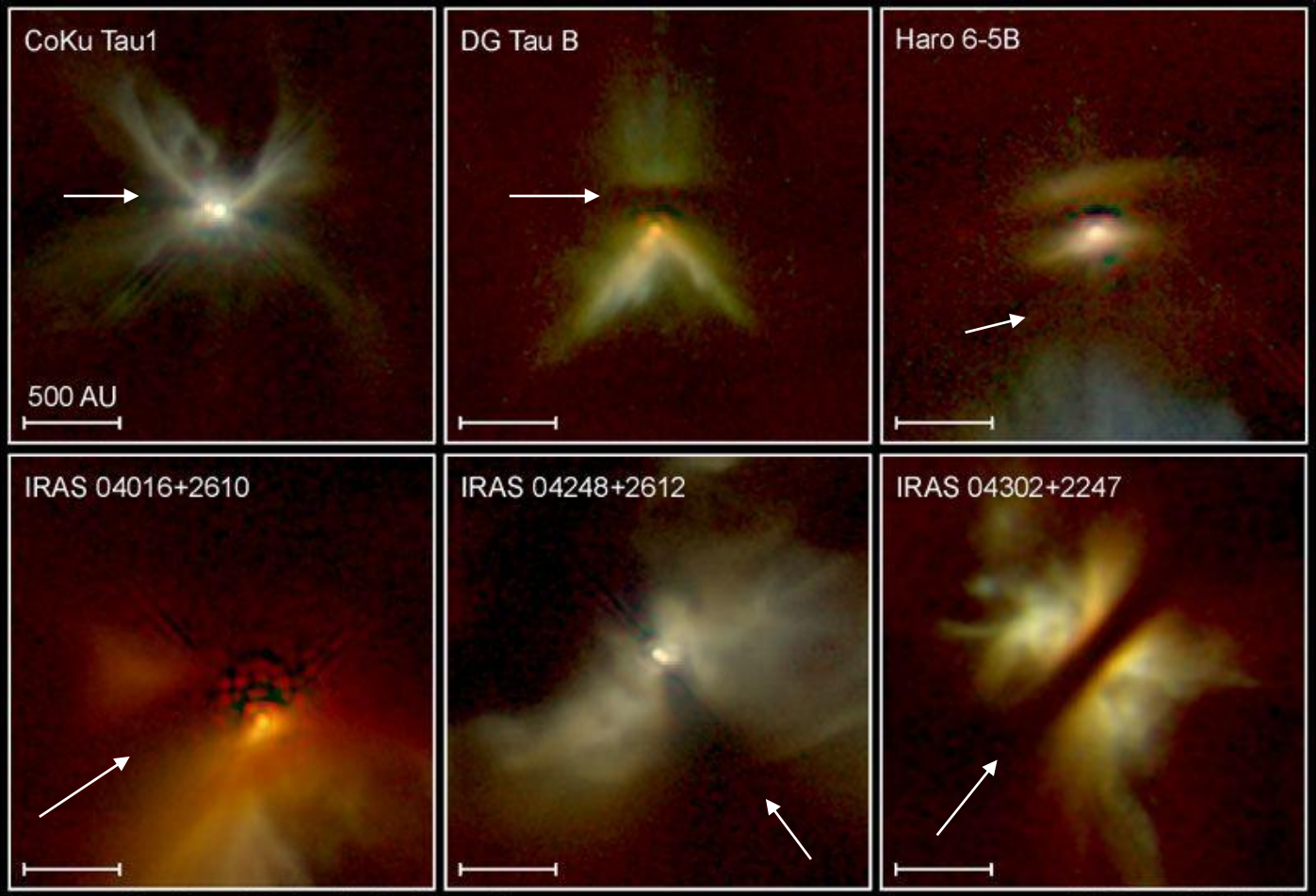




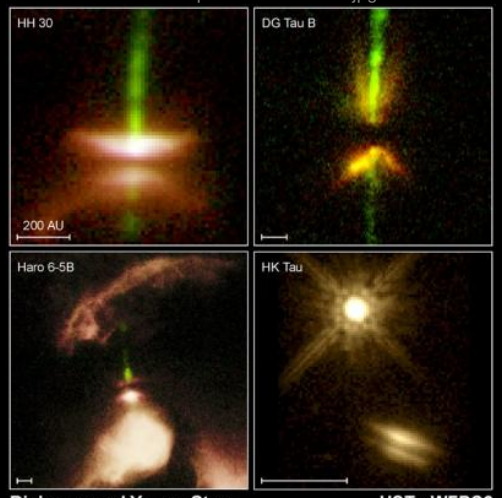
imagem

Sistemas planetários em formação

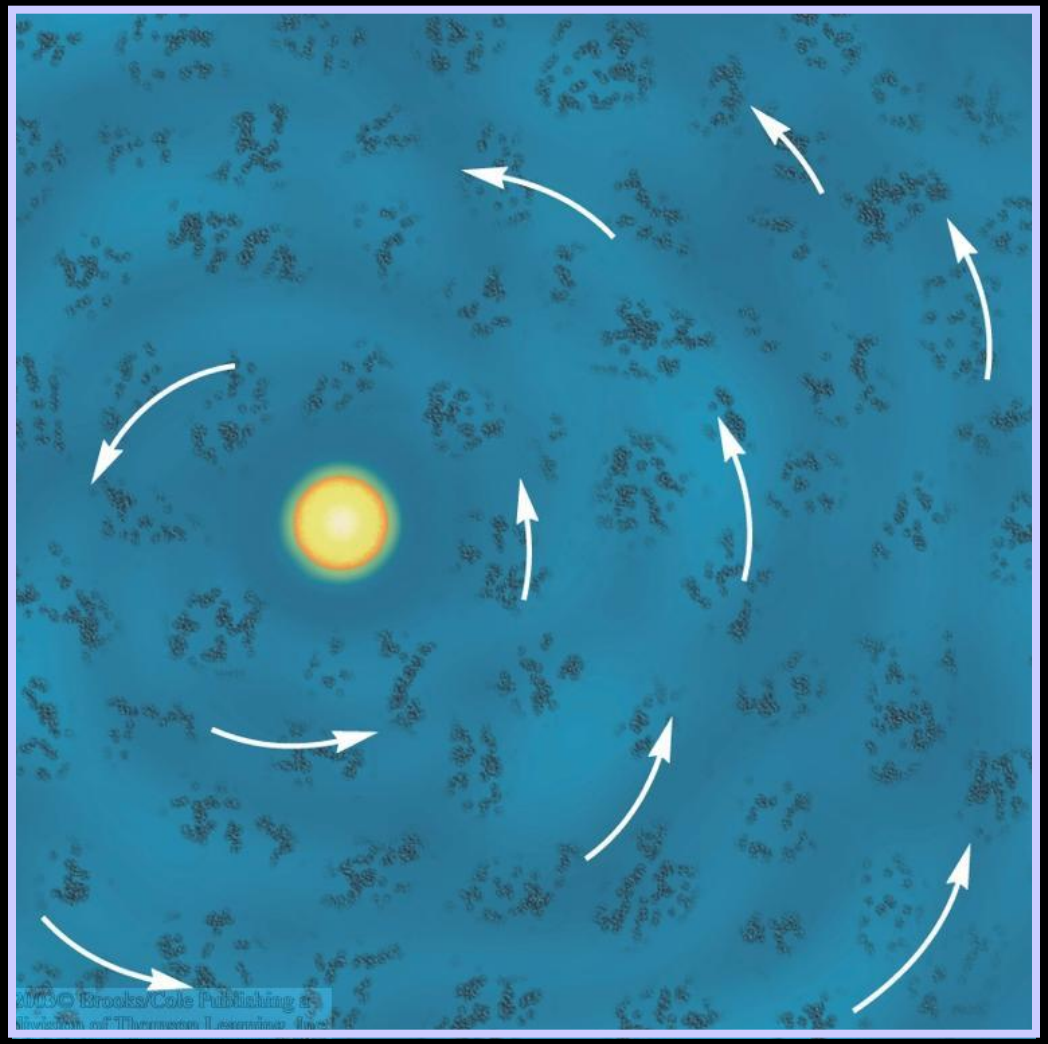
Formação de disco protoplanetário durante a contração nebular também é observada em estrelas em formação. A posição do disco é indicada nas imagens.



http://2.bp.blogspot.com/-xAZLQ4Y1-Ak/ToHtwLGBHaI/AAAAAAAAACM/il-nSSbq-iU/s1600/protostar-440x339.jpg



Formação dos planetas

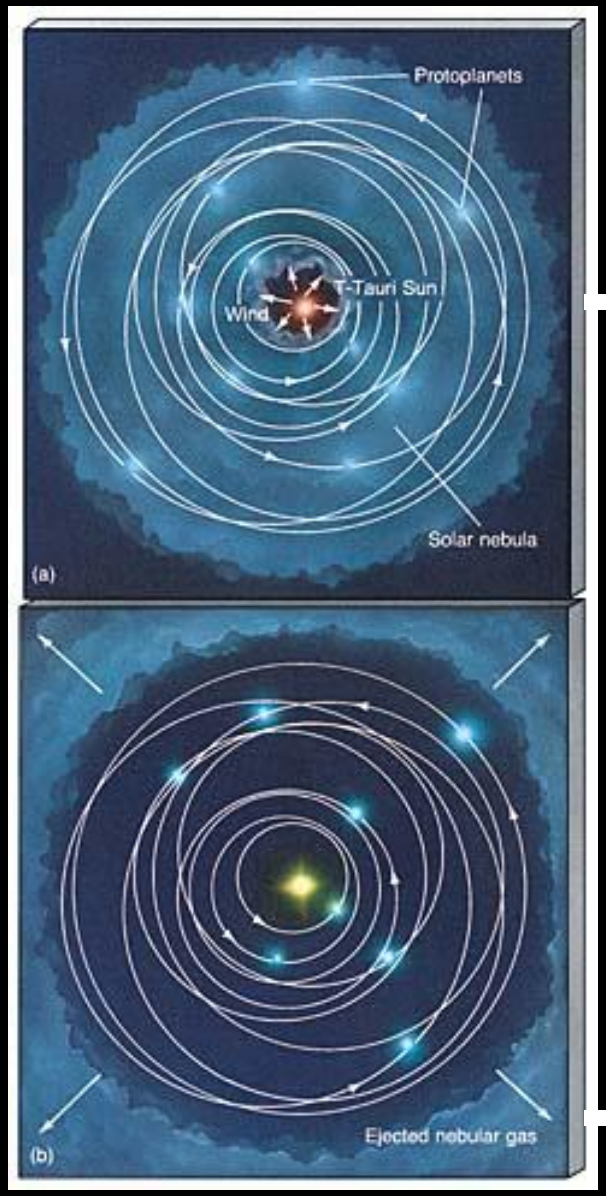


Markus Boettcher, Ohio University

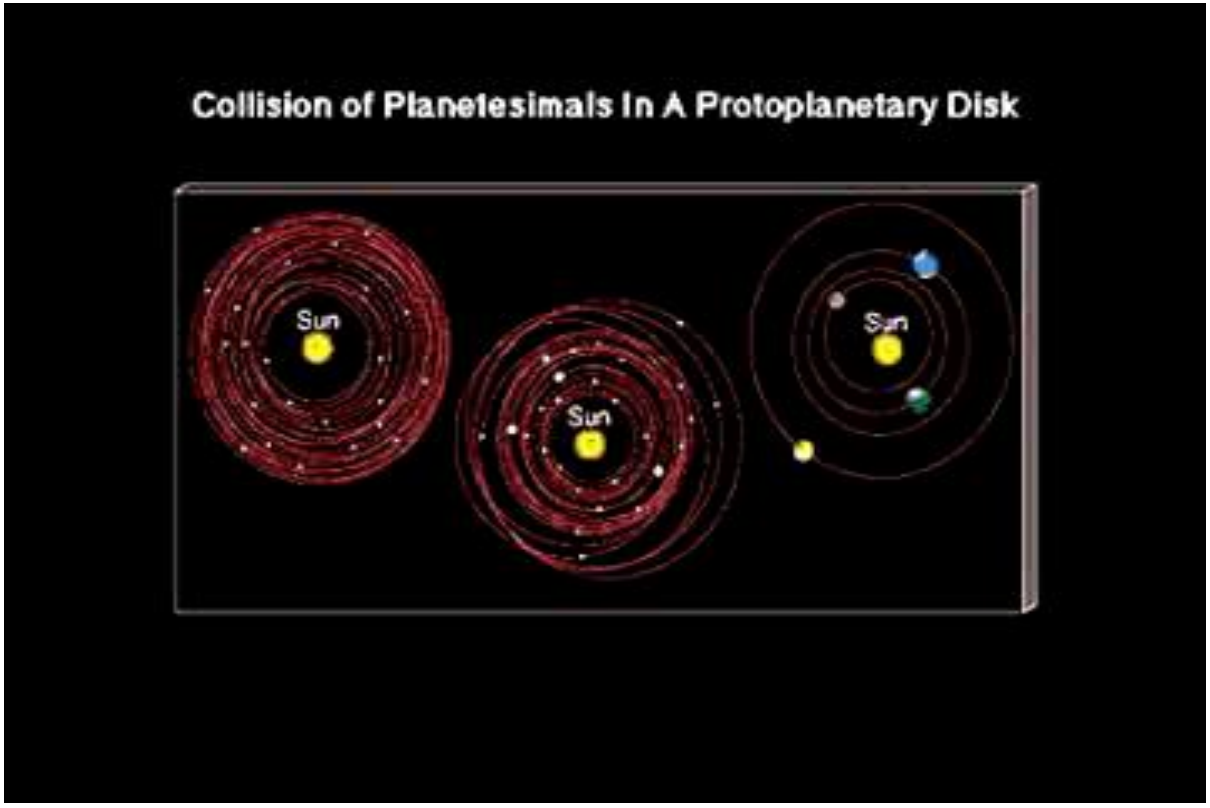
A acreção de massa começa com contínua aglutinação de grãos em blocos, formando os planetésimos (de cm a km).

Planetésimos colidem e formam planetas

Formação dos planetas



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



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.

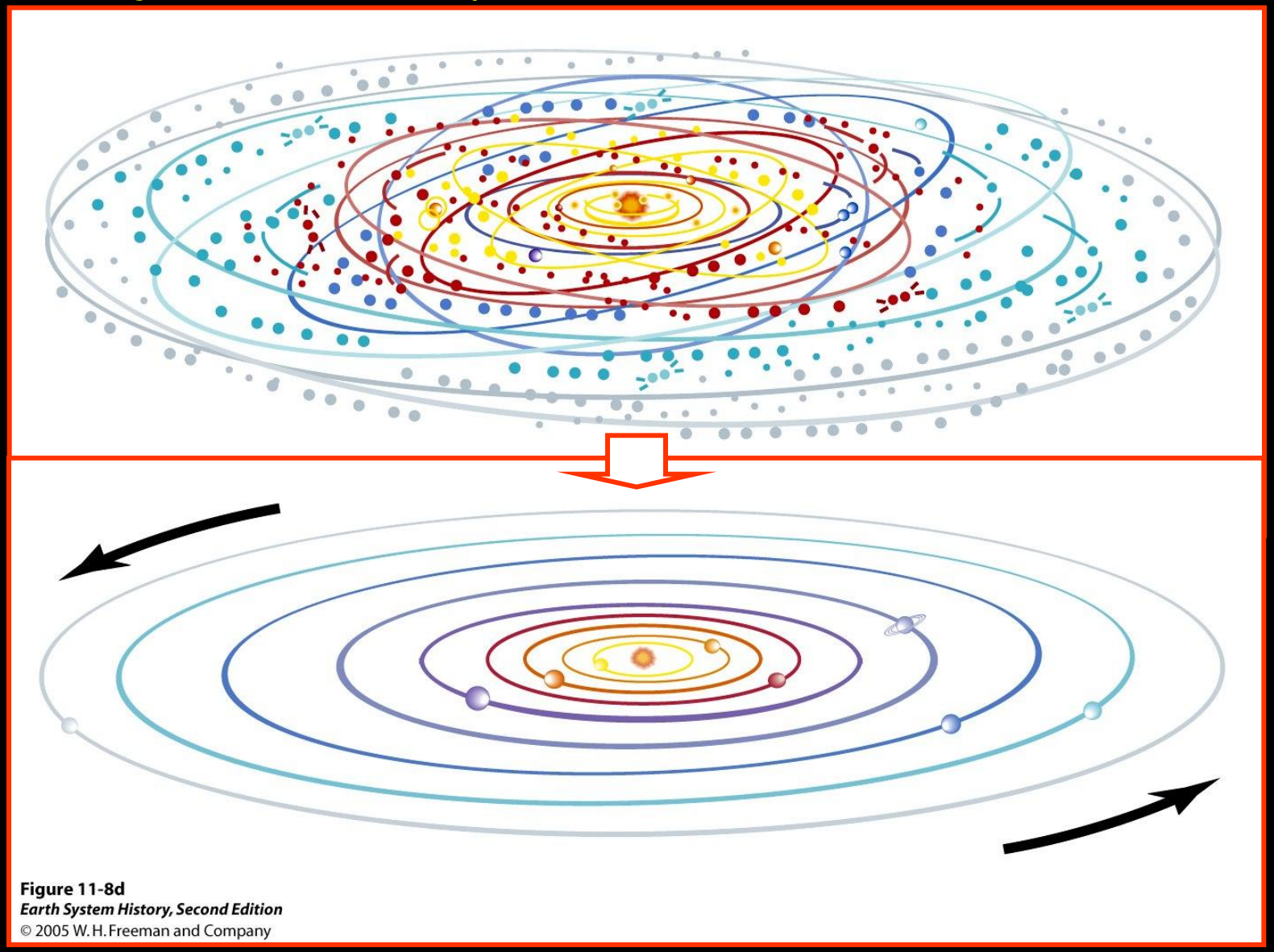


Figure 11-8d
Earth System History, Second Edition
© 2005 W. H. Freeman and Company

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 < ~ 15 M_{Terra}

Planetas não podem crescer mais por colapso gravitacional

Planetas terrestres

Massa > ~ 15 M_{Terra}

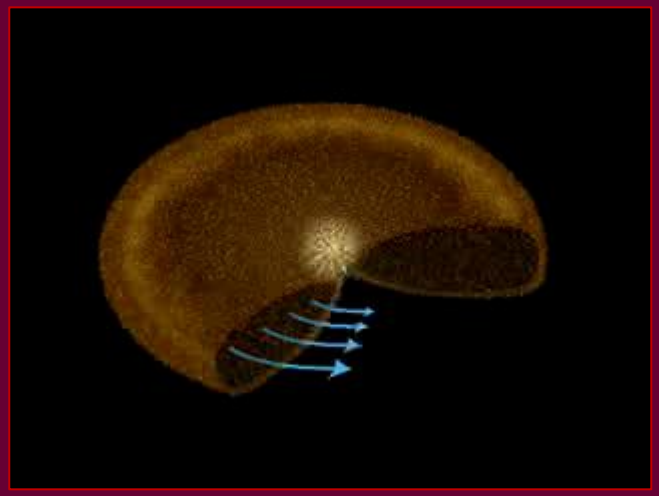
Planetas podem crescer por acúmulo gravitacional de material de nuvem

Planetas gasosos

Markus Boettcher, Ohio University

Formação dos planetas: o acúmulo de massa

Modelo de Acreção

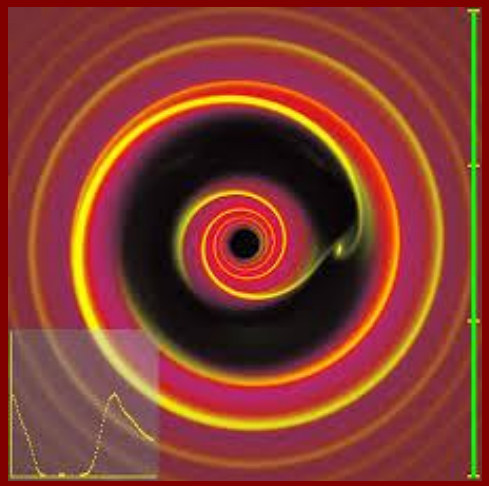


Os grãos de poeira do disco acumulam-se em planetésimos. Acumulando massa continuamente, eles crescem formando corpos maiores: embriões planetários.

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



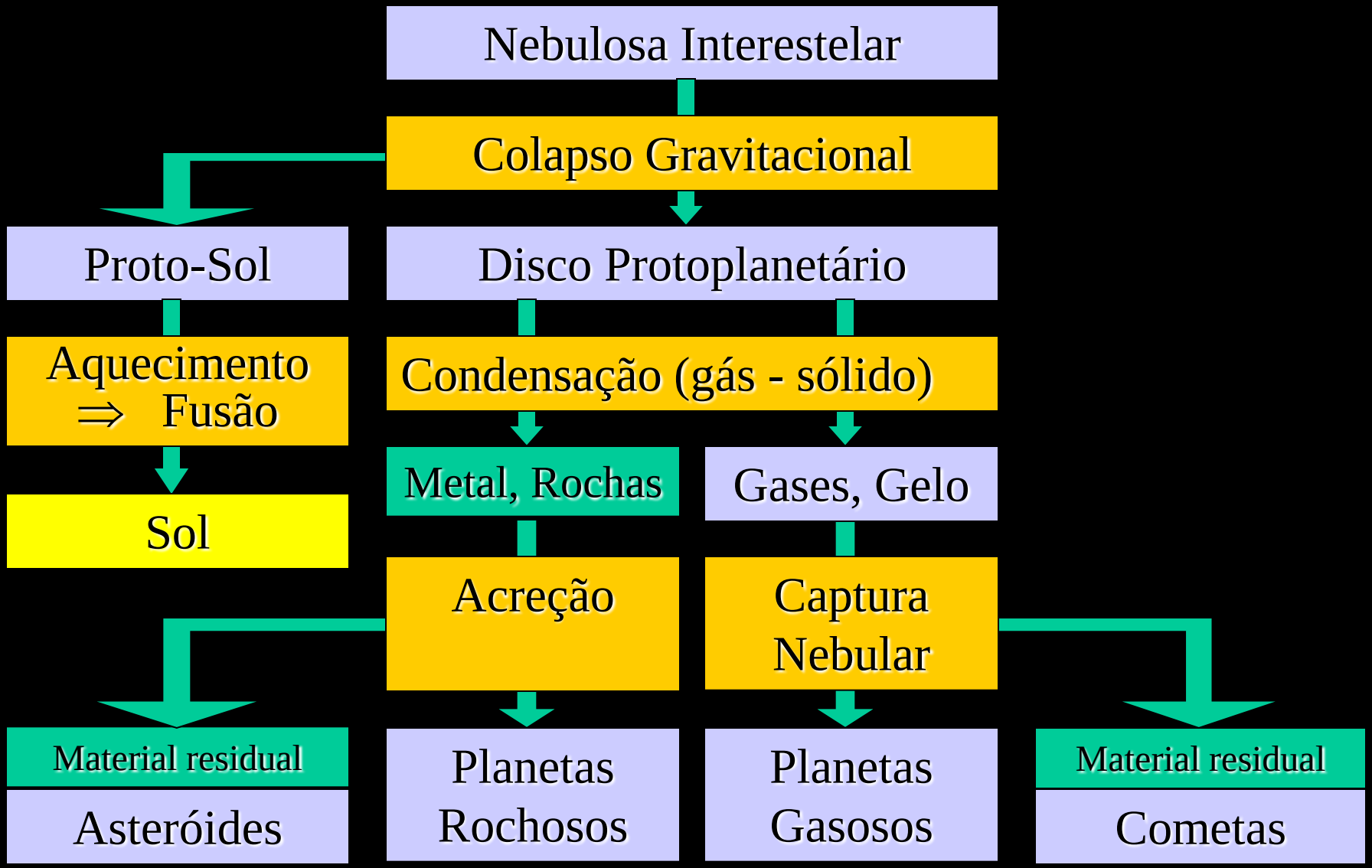
Instabilidades gravitacionais no disco formam glóbulos de gás, que se tornam planetas por auto-gravitação.

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

O planeta abre uma lacuna no disco enquanto acumula massa.

Video Credit: NASA, L. Barranger, and A. Feild (STScI)

Teoria Nebular ou Protoplanetária



Our Solar System and Its Origin, Haosheng Lin

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).

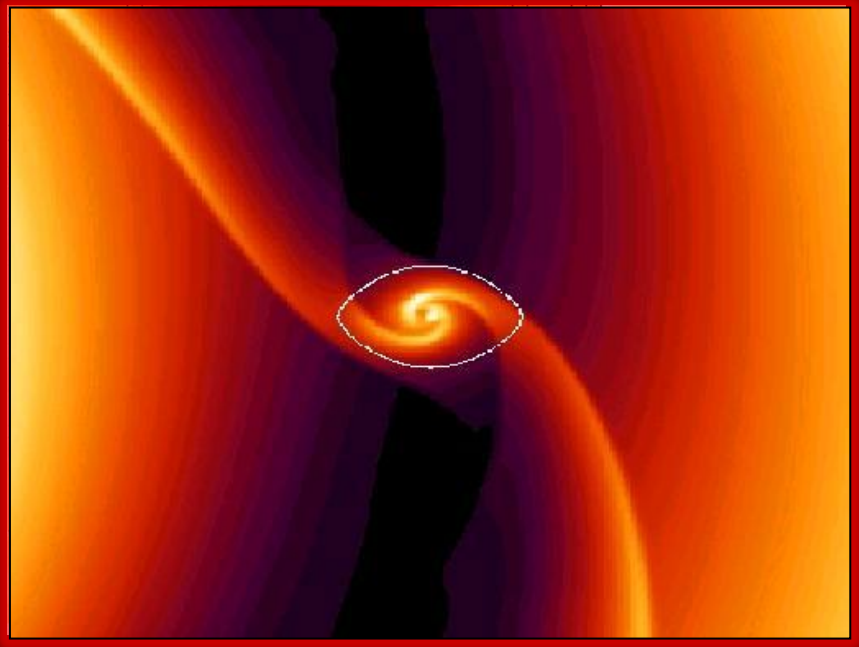
Esse tempo é muito curto para formar um planeta joviano através de acréscimo de planetésimos!

Alternativa:

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

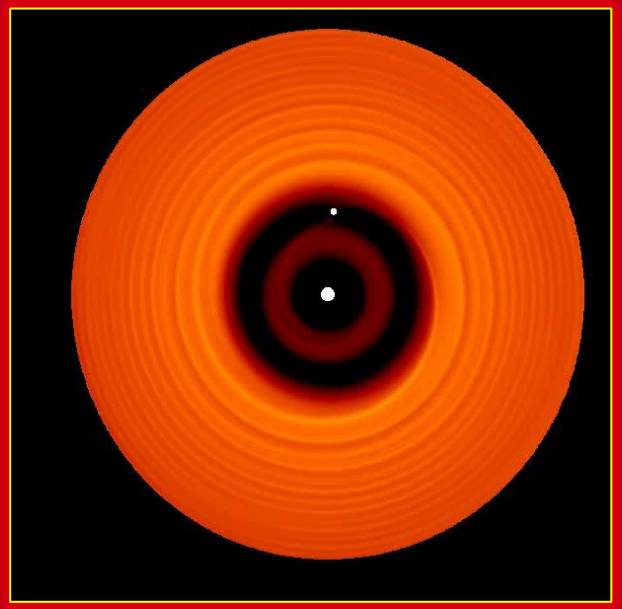
Markus Boettcher, Ohio University

Formação dos planetas: o acúmulo de massa pelos gasosos



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 o centro do disco, num movimento espiral em direção à estrela.

http://www.astro.iag.usp.br/~sylvio/

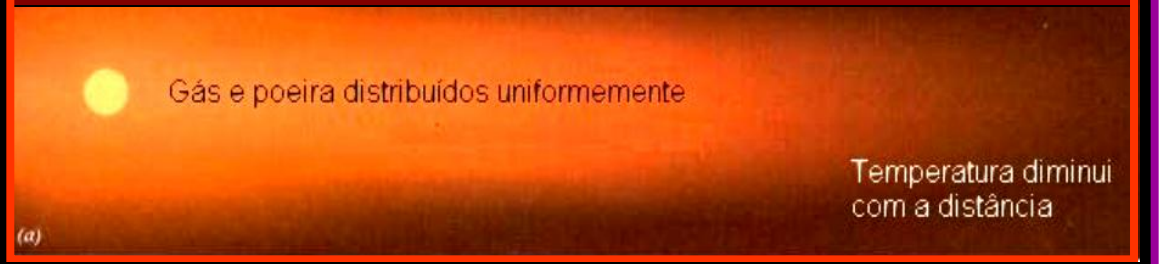
Sequência de condensação

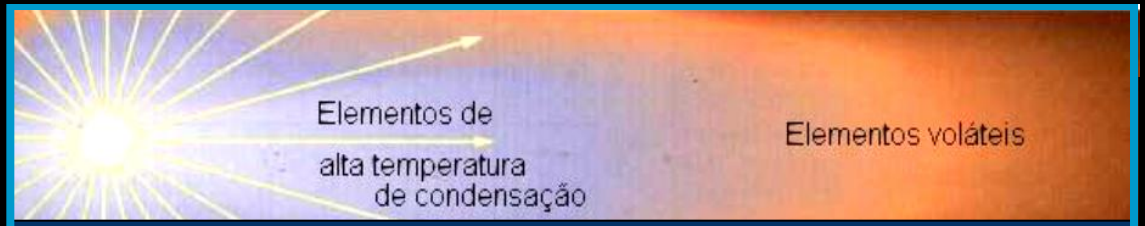
Enos Picazzio
IAGUSP
Agosto 2006

Um cenário possível para a formação do Sistema Solar.

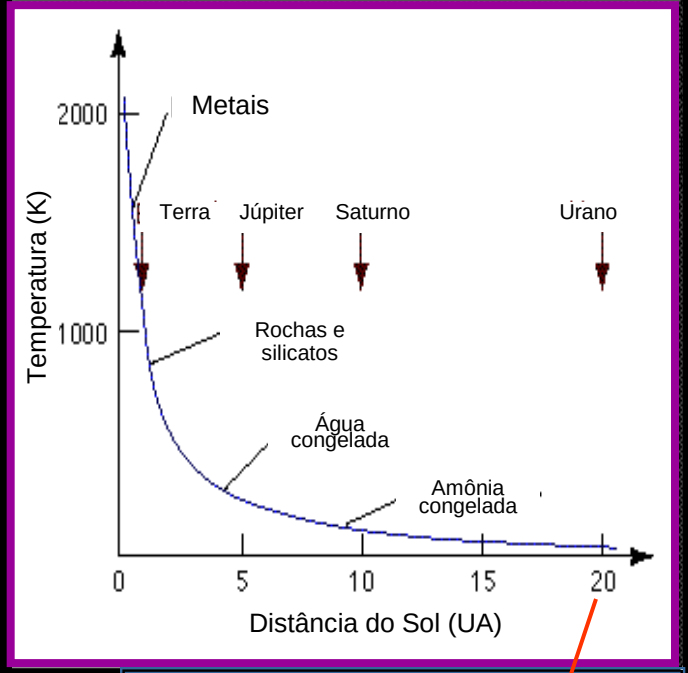
(Adaptado de R.R.Robbins *et al.*1995, pág.113)

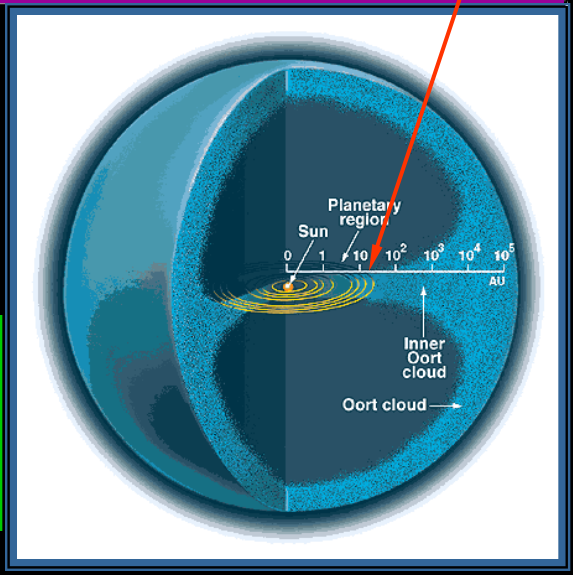
No início o matéria nebular estava distribuída uniformemente na nuvem. Gradativamente, a matéria era comprimida para o centro e aquecida: assim nascia o proto-Sol.





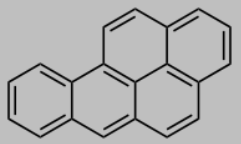
Os elementos mais voláteis foram "soprados" da região central aquecida, para as regiões afastadas mais frias:
aqui formaram-se os planetas jovianos e os cometas.





Sequência de condensação

Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos



Benzo(a)pireno - $C_{20}H_{12}$

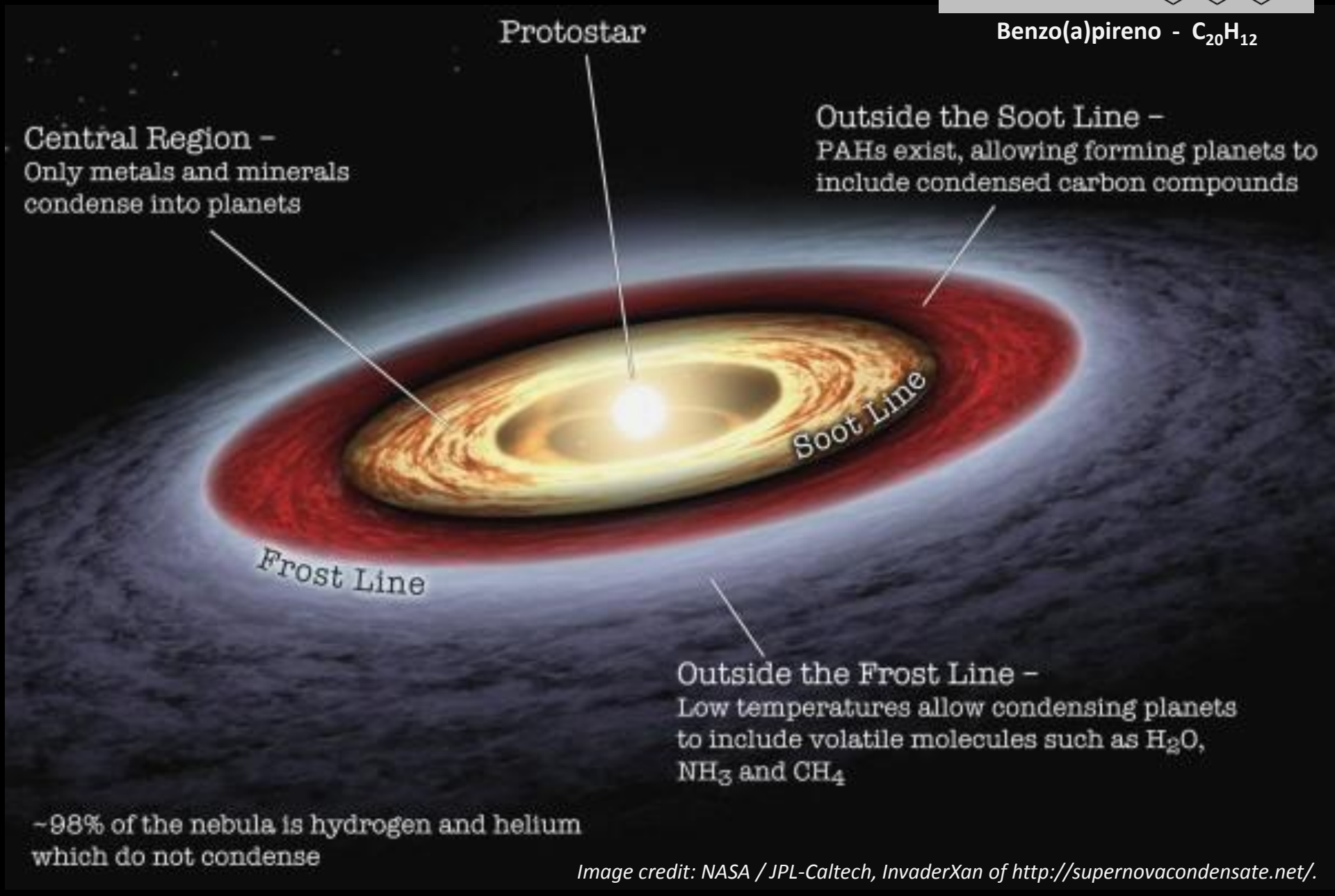
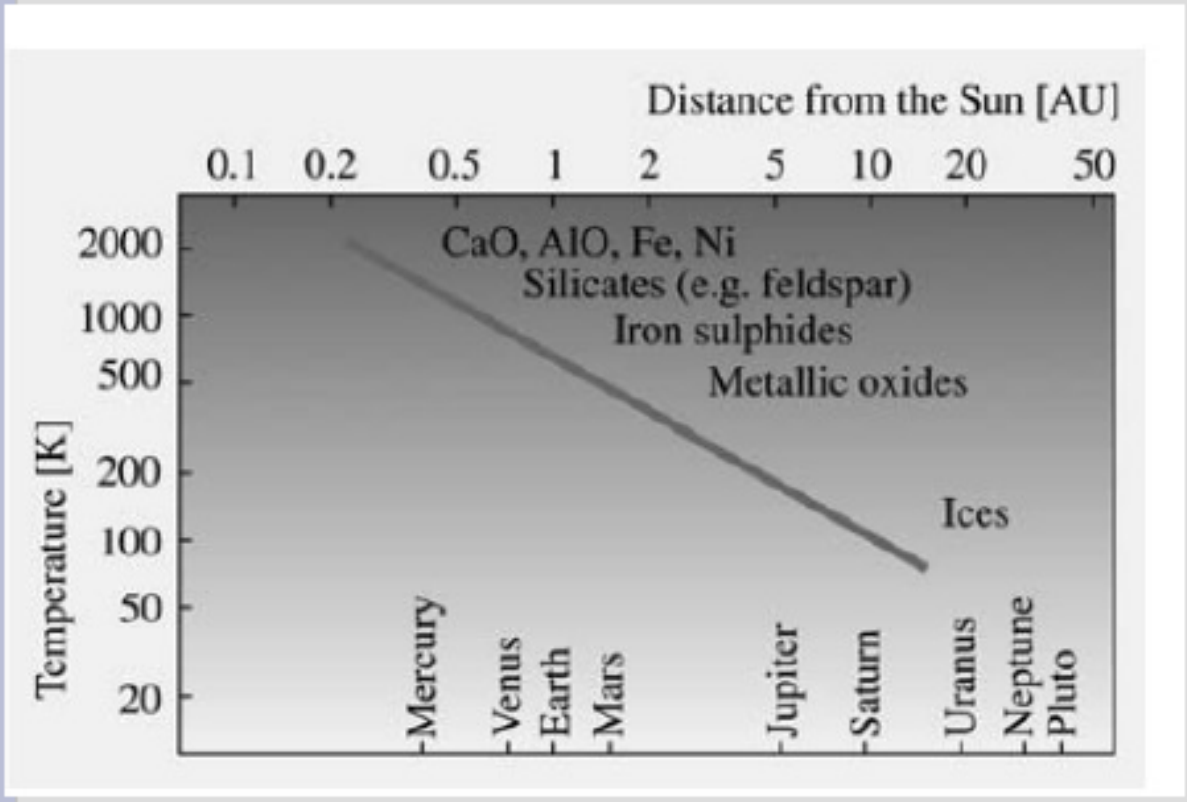


Image credit: NASA / JPL-Caltech, InvaderXan of http://supernovacondensate.net/.

Teoria nebular moderna

A distribuição de temperatura da nuvem primordial explica as diferentes composições químicas dos planetas.



Elementos voláteis (H; He e gelo) estão ~ ausentes nos planetas interiores

Estes planetas são compostos basicamente por rochas, material que condensa a ~500K.

http://www.if.ufrgs.br/~tiberio/disciplinas/fis02010/aula13.pdf

Sequência de Condensação

Condensação de sólidos

Só matéria condensada pode aglutinar-se para formar planetas

Temperatura na nuvem descresce 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

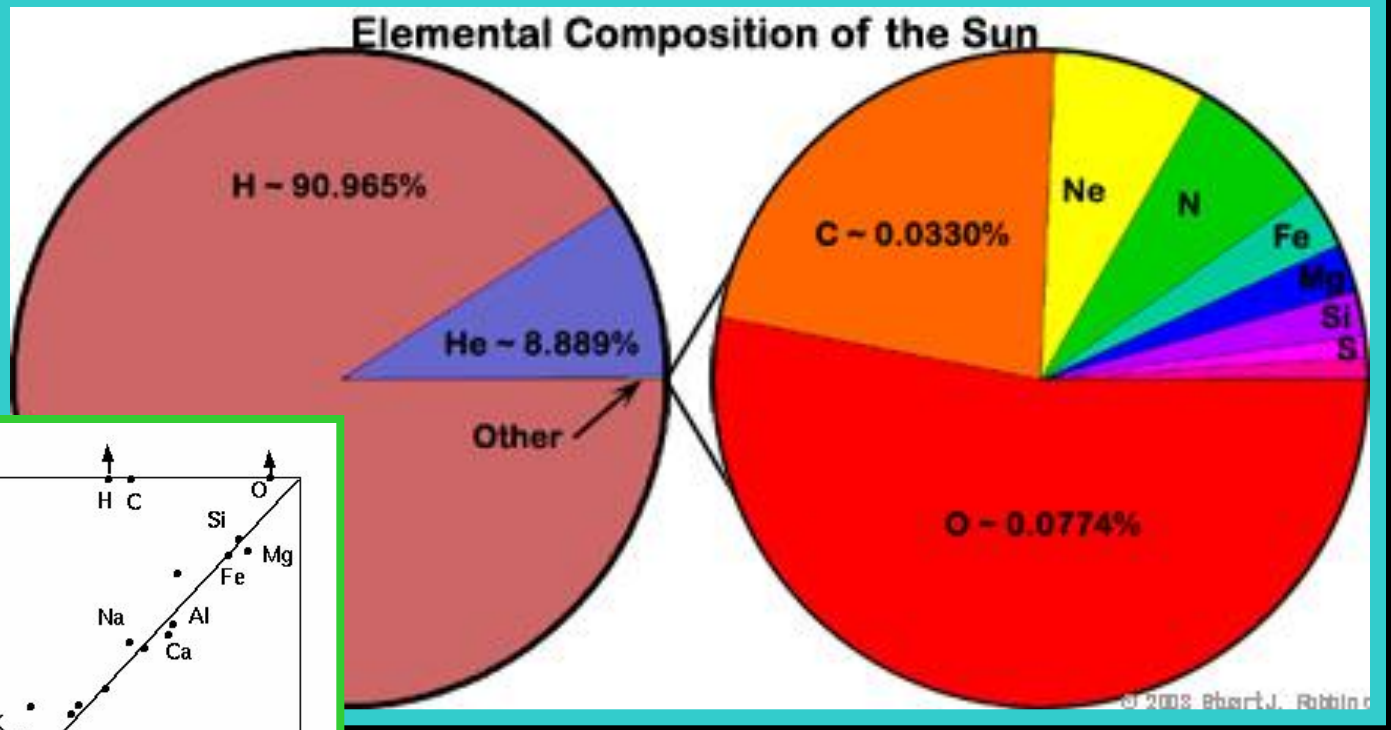
Temperature (K)	Condensate	Planet (Estimated T emperature of Formation; K)
1500	Metal oxides	Mercury (1400)
1300	Metallic iron and nickel	
1200	Silicates	
1000	Feldspars	Venus (900)
680	Troilite (FeS)	Earth (600)
		Mars (450)
175	H_2O ice	Jovian (175)
150	Ammonia–water ice	
120	Methane–water ice	
65	Argon–neon ice	Pluto (65)

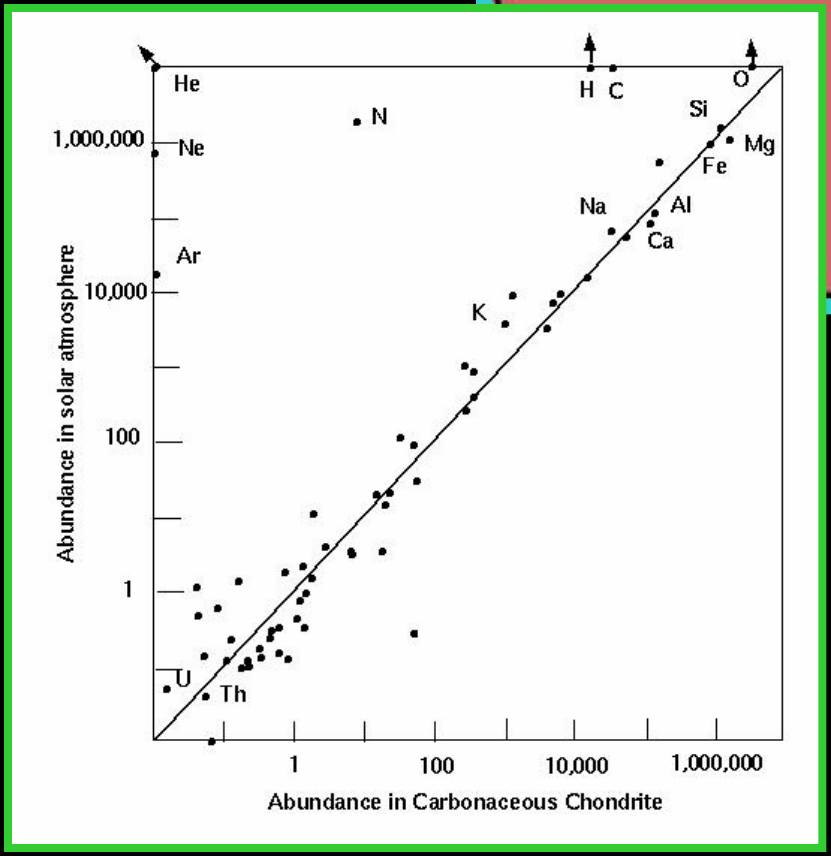
Substâncias menos densas condensam a baixas temperaturas.

Markus Boettcher, Ohio University

Composição química do Sistema Solar

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

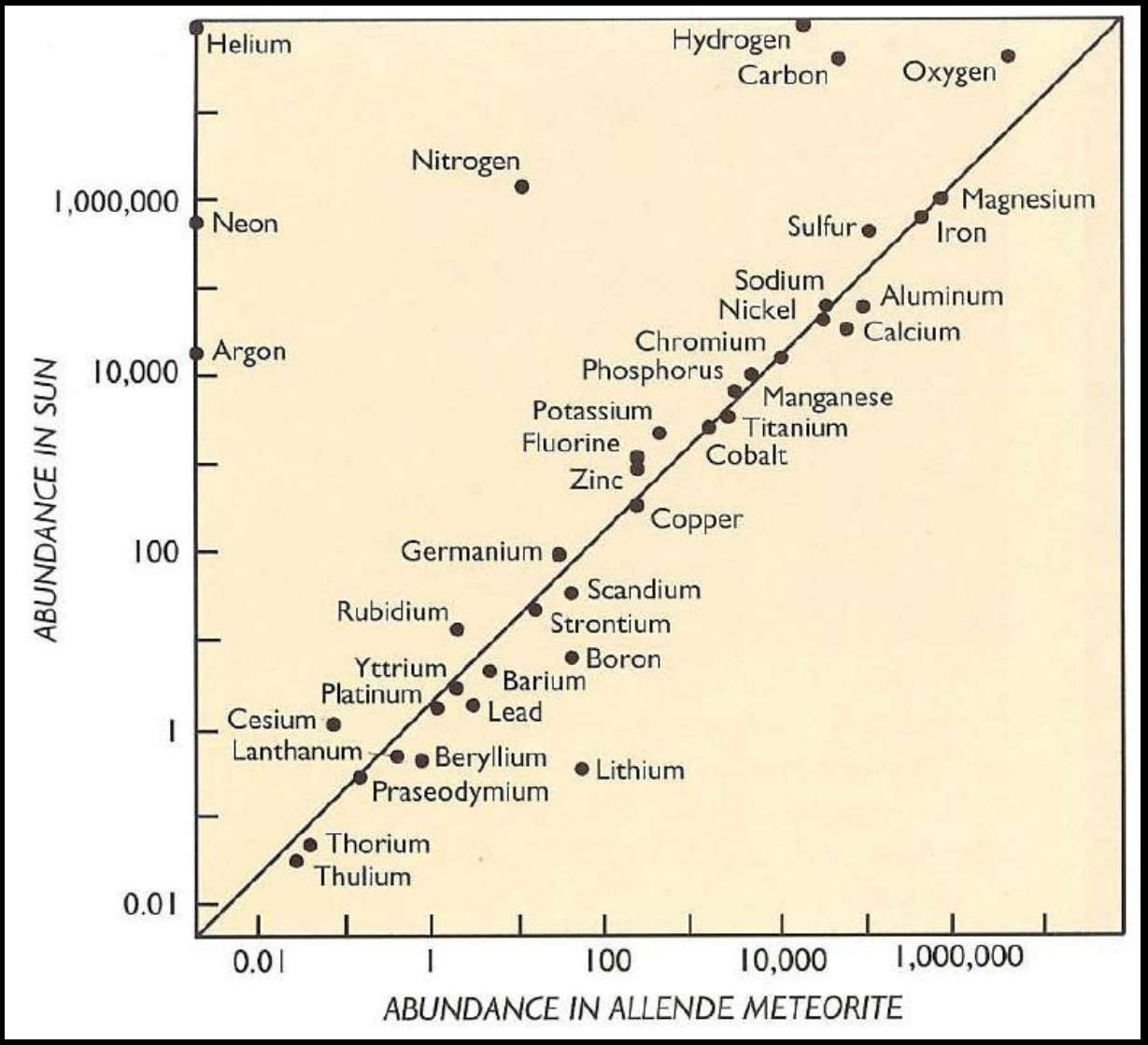


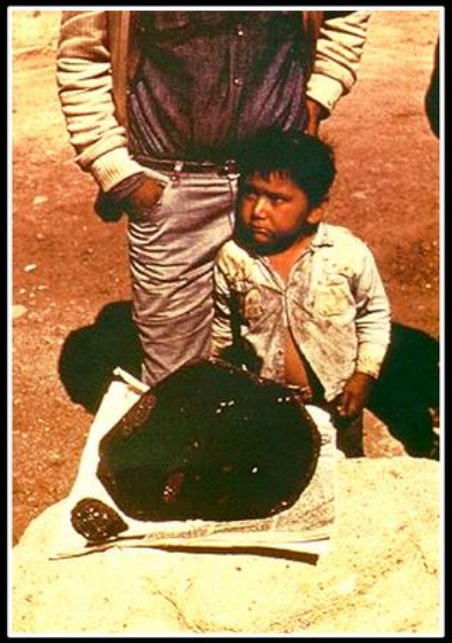


Meteorito Carbonáceo

Todos os objetos se formaram de uma mesma nuvem primordial.

Composição química do Sistema Solar

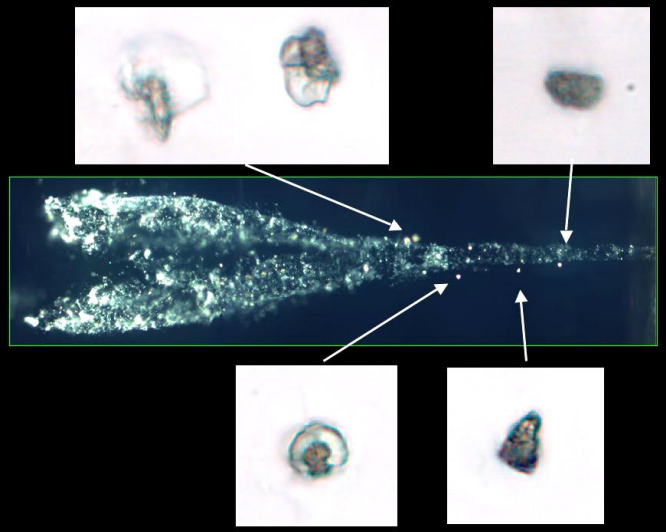




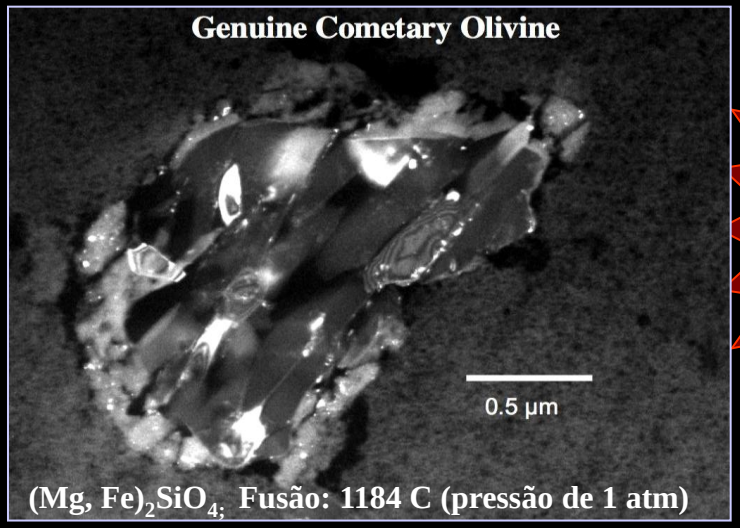
Evidência de processo de mistura

Enos Picazzio
IAGUSP
Agosto 2006

Poeira aprisionada no aparato de gel



poeira do Wild 2

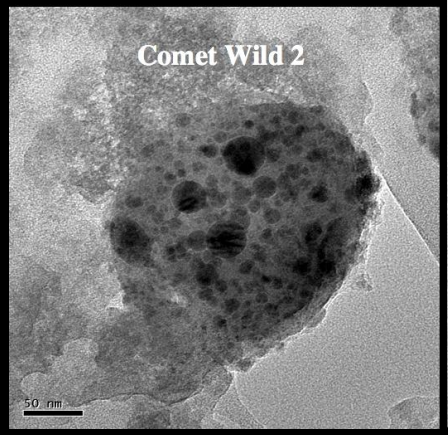


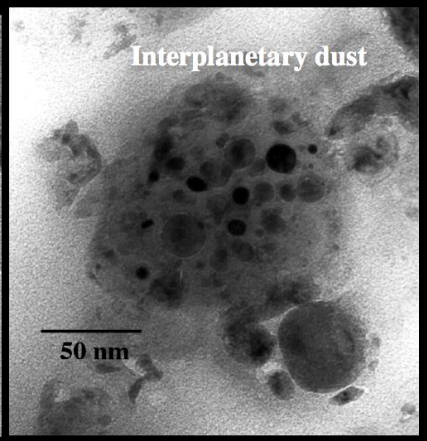
Cônd rulos:

esferóides milimétricos de olivina [$(Mg,Fe)SiO_4$], e piroxênio [$(Mg,Fe)SiO_3$]

GEMS ?

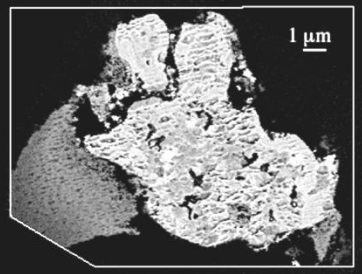
(Glass with Embedded Metal and Sulfides)



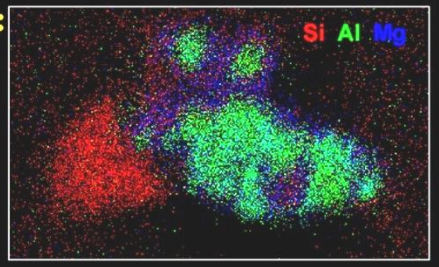


SEM-EDS X-ray Maps: overlay maps

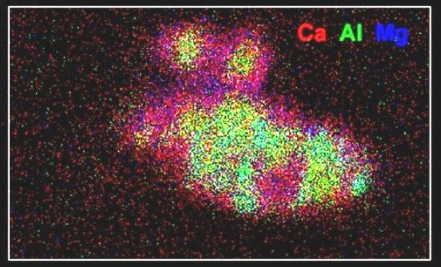
"Easter" C054.4.25.0
potted butt in acrylic



BSE image, 4.0 kV, high contrast

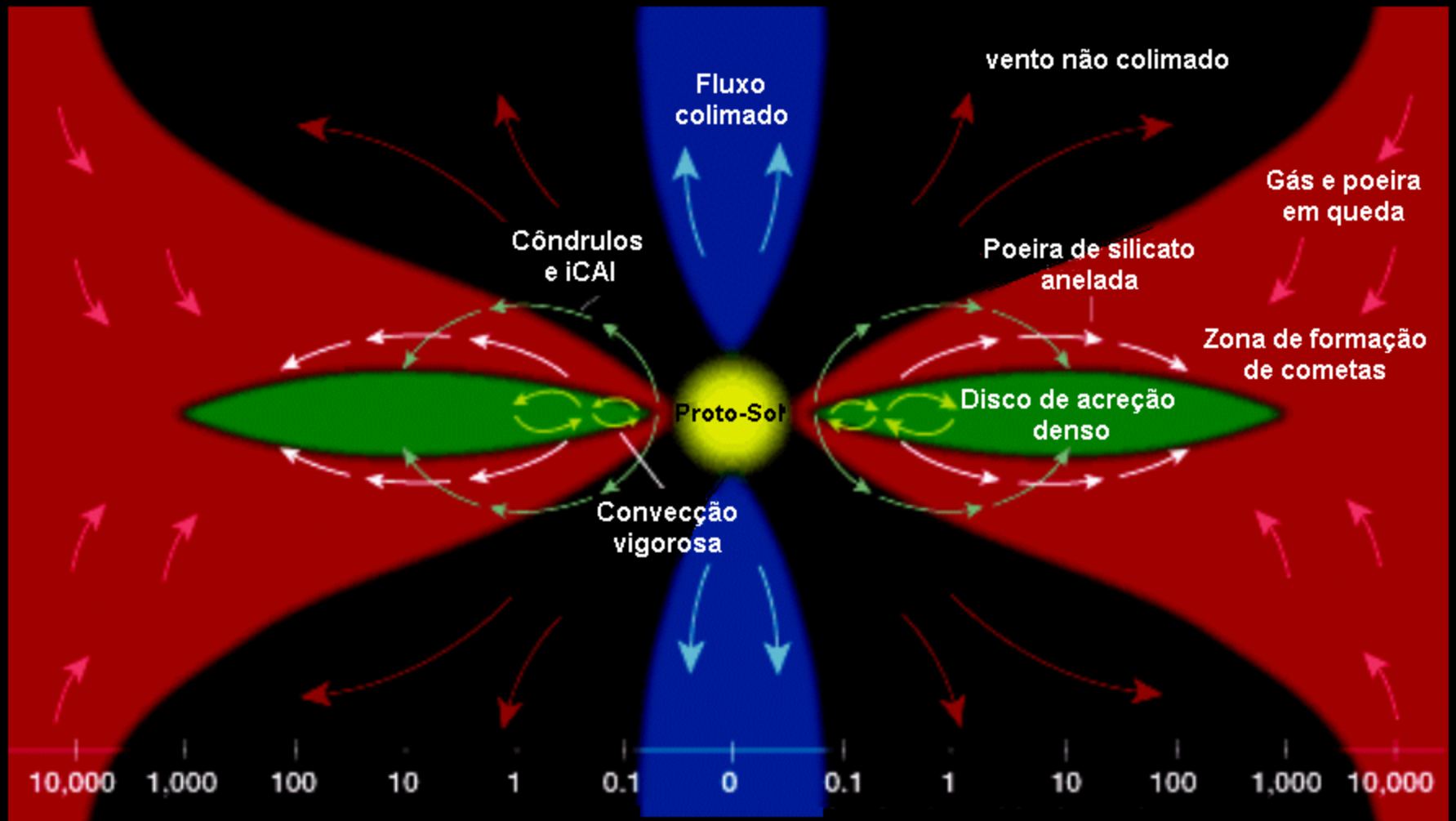


EDS X-ray maps, 10 kV



Acreção e reprocessamento da matéria

Enos Picazzio
IAGUSP
Agosto 2006

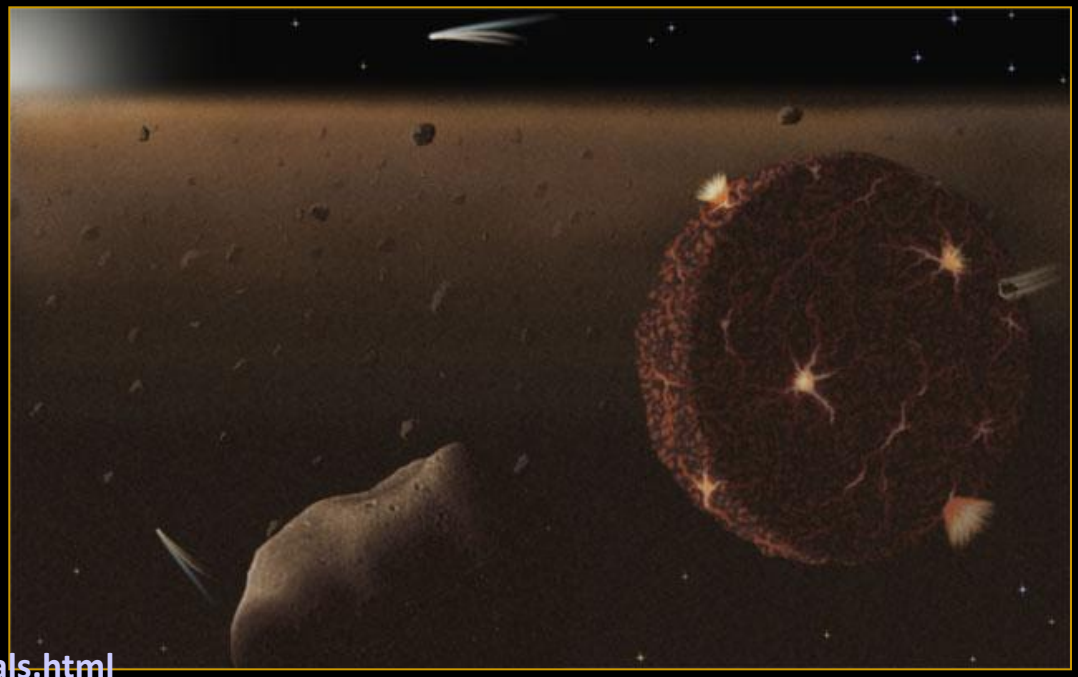


www.sigmaxi.org/amsci/articles/ 01articles/nuthcap7.html

Acreção de sólidos e a formação de planetésimos

Início:
disco protoplanetário formando blocos sólidos

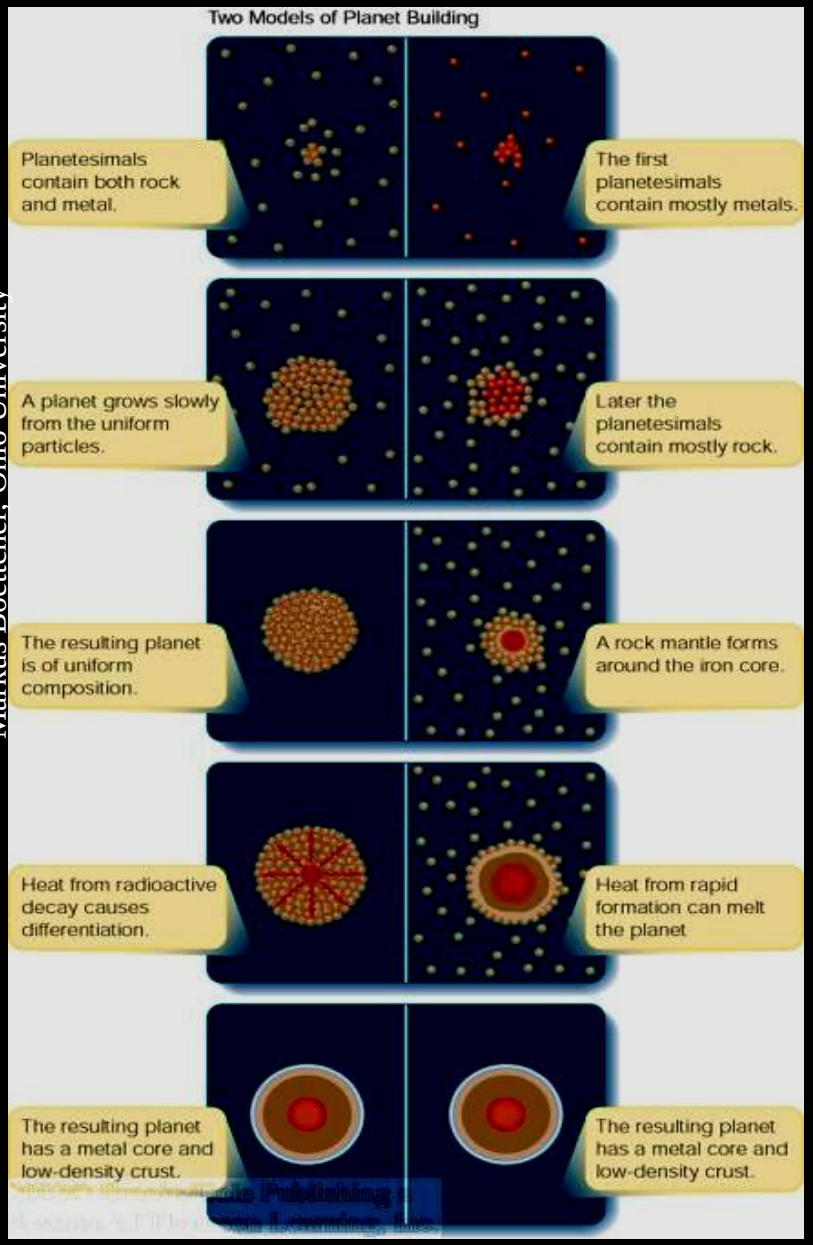
Fase posterior:
planetas se formando por acreção



http://www.maths.otago.ac.nz/~gregt/planetesimals.html

Acreção de sólidos e a formação de planetésimos

Acreção de sólidos e a formação de planetésimos

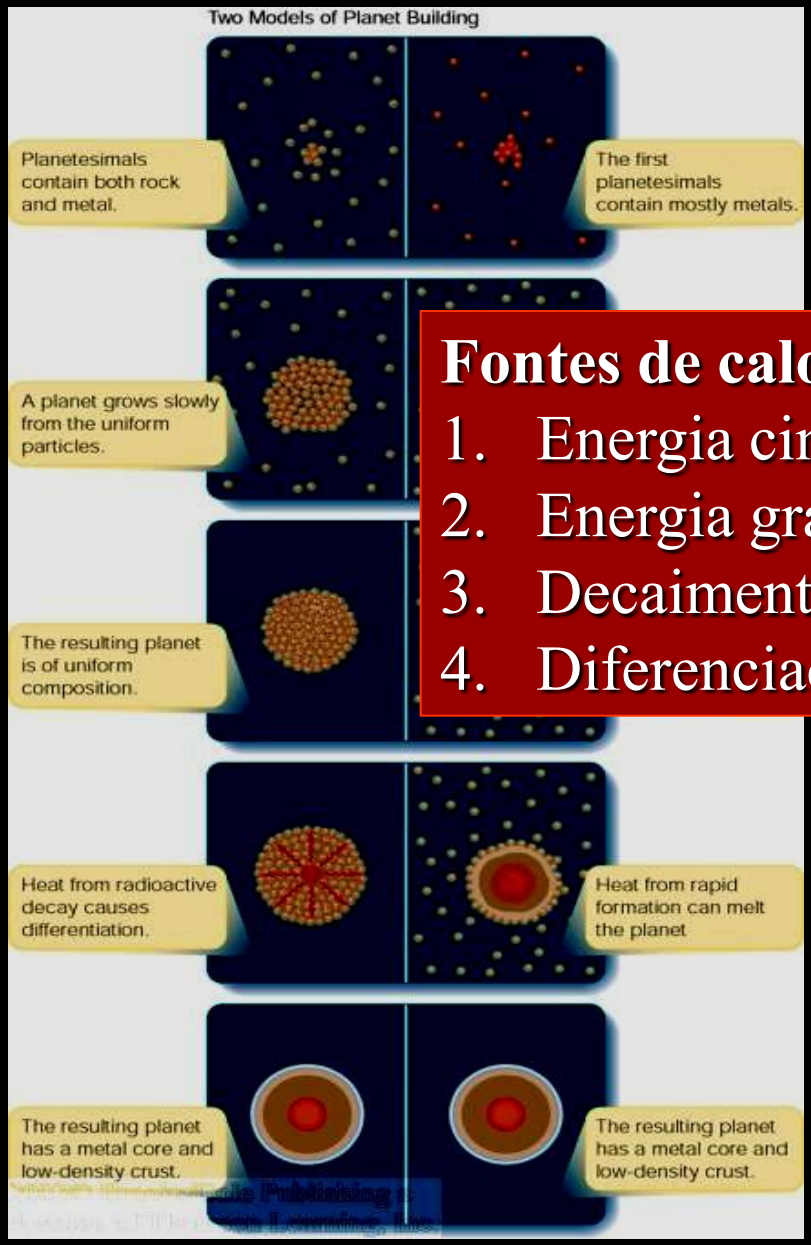


Markus Boettcher, Ohio University

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

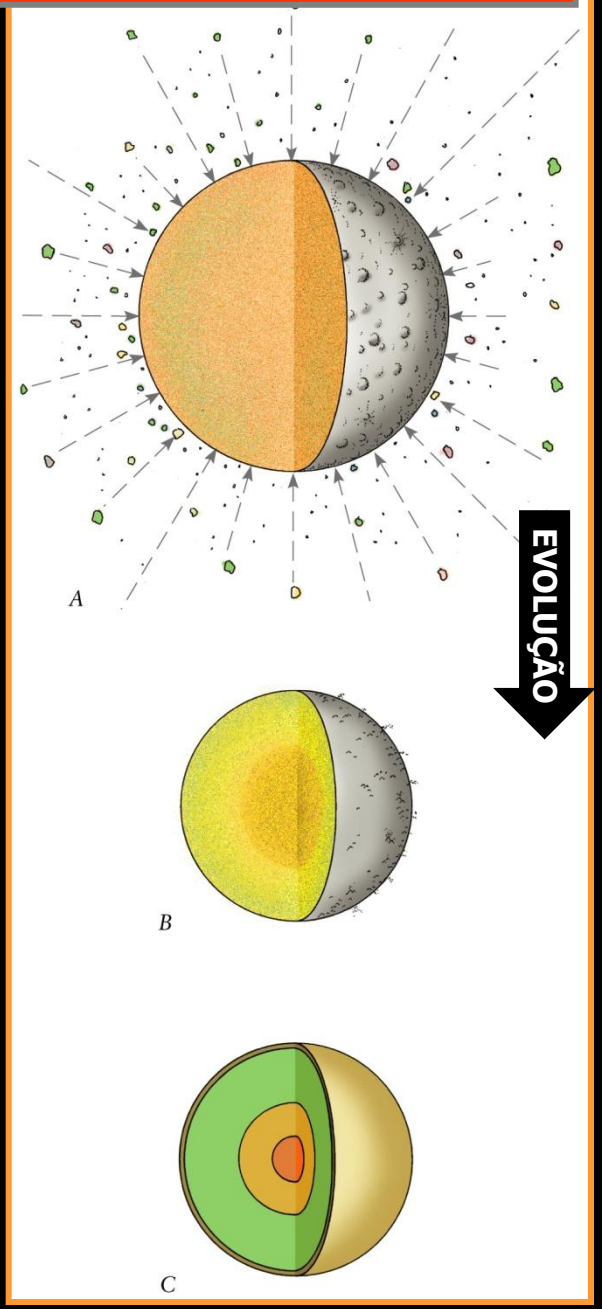
Os planetas terrestres têm metais pesados concentrados nos núcleos, e substâncias menos densas no manto.

Diferenciação dos planetas terrestres



Fontes de calor:

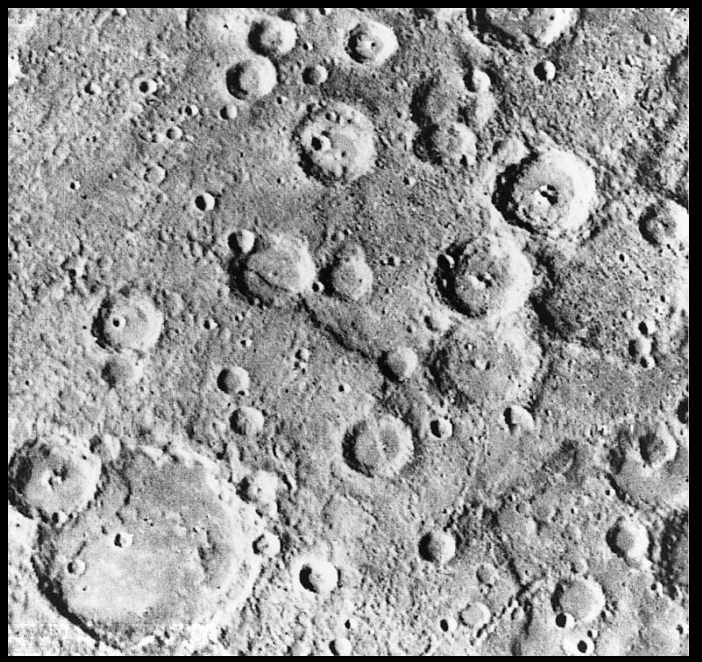
1. Energia cinética de acreção
2. Energia gravitacional
3. Decaimento radioativo
4. Diferenciação



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

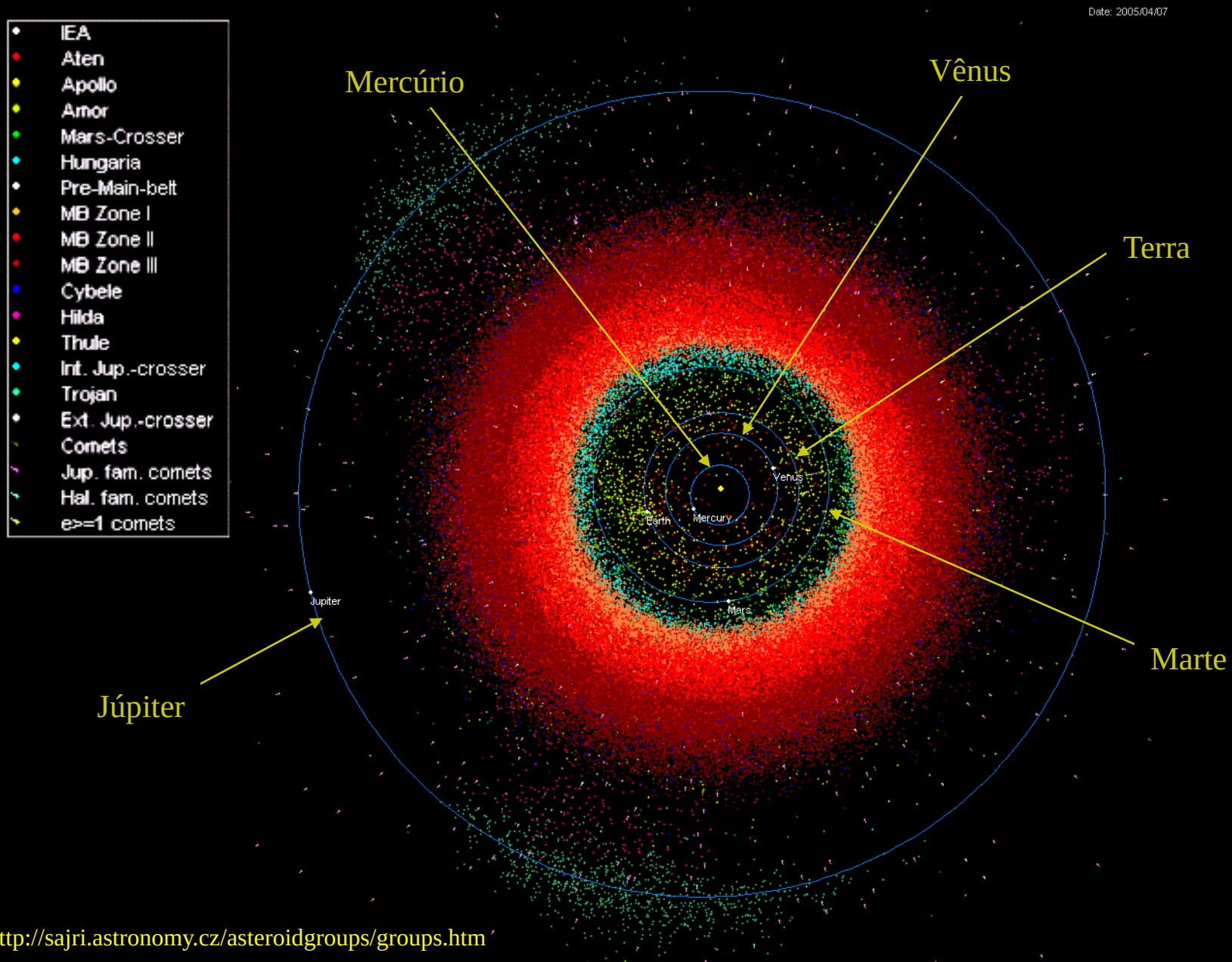
Markus Boettcher, Ohio University



Superfícies da Lua de de Marte evidênciam forte bombardeamento por asteróides.

Asteróides

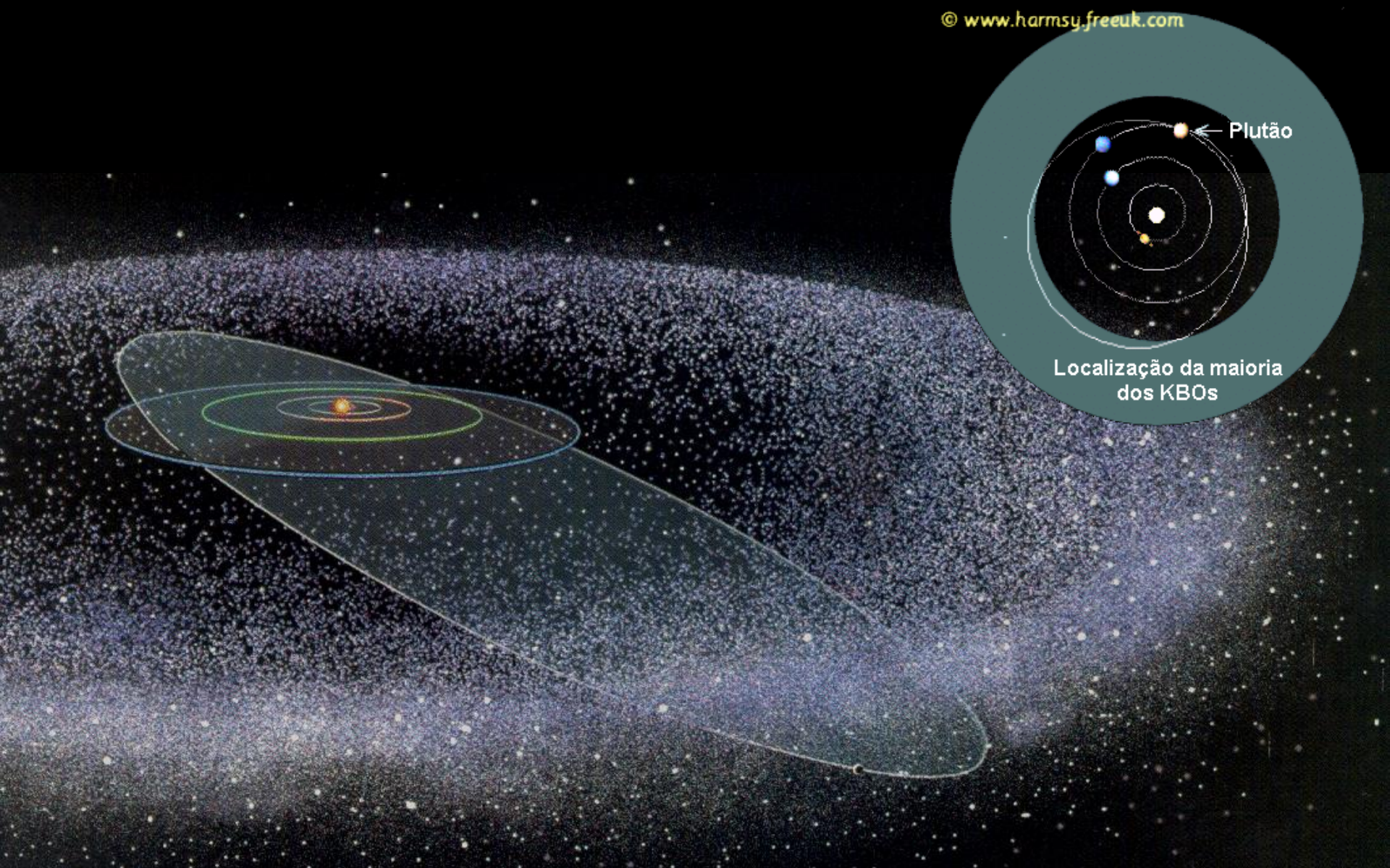
Enos Picazzio
IAGUSP
Agosto 2006



http://sajri.astronomy.cz/asteroidgroups/groups.htm

Cometas e Objetos do Cinturão de Edgeworth-Kuiper

Enos Picazzio
IAGUSP
Agosto 2006



Consequências da migração de um planeta massivo

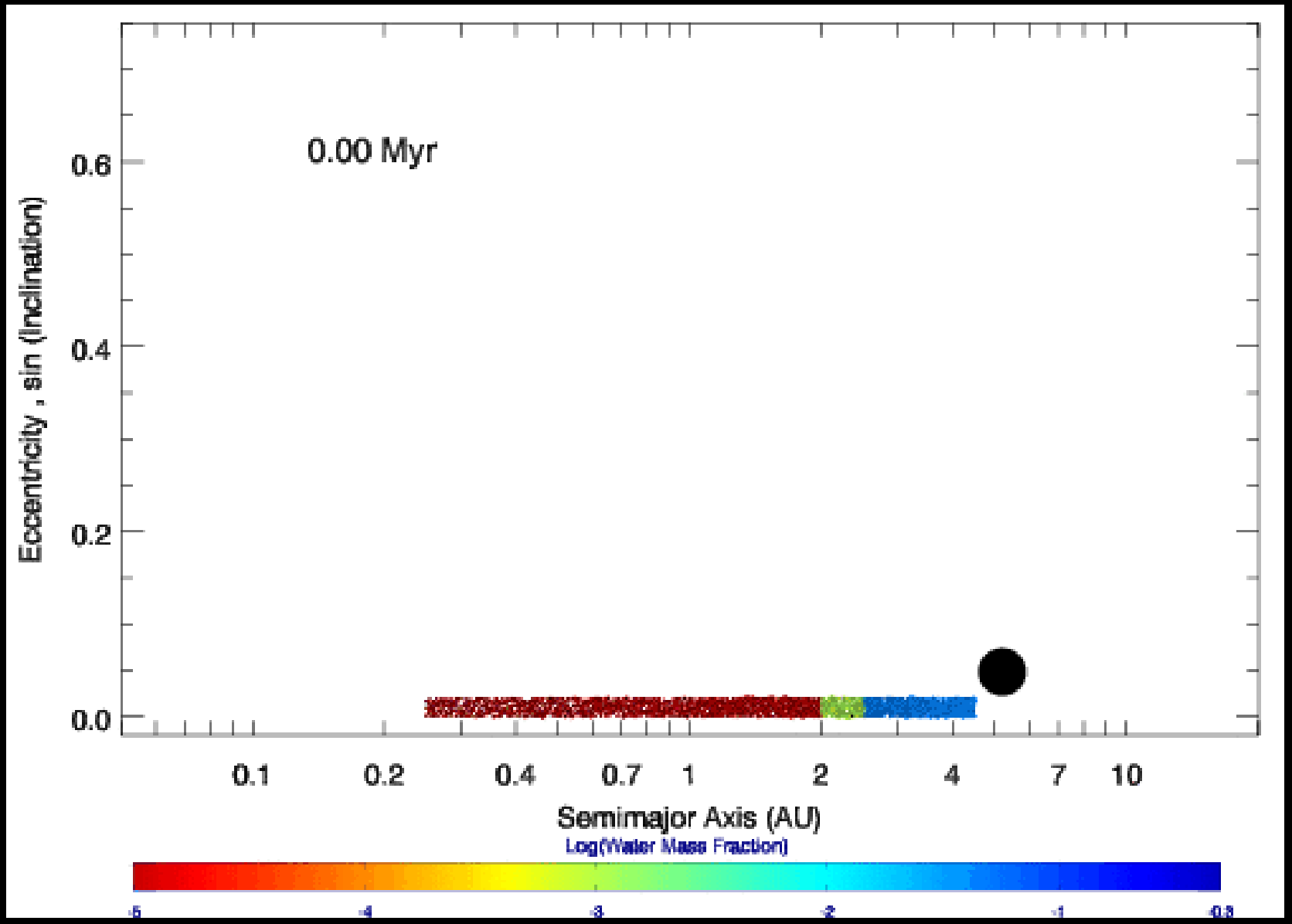
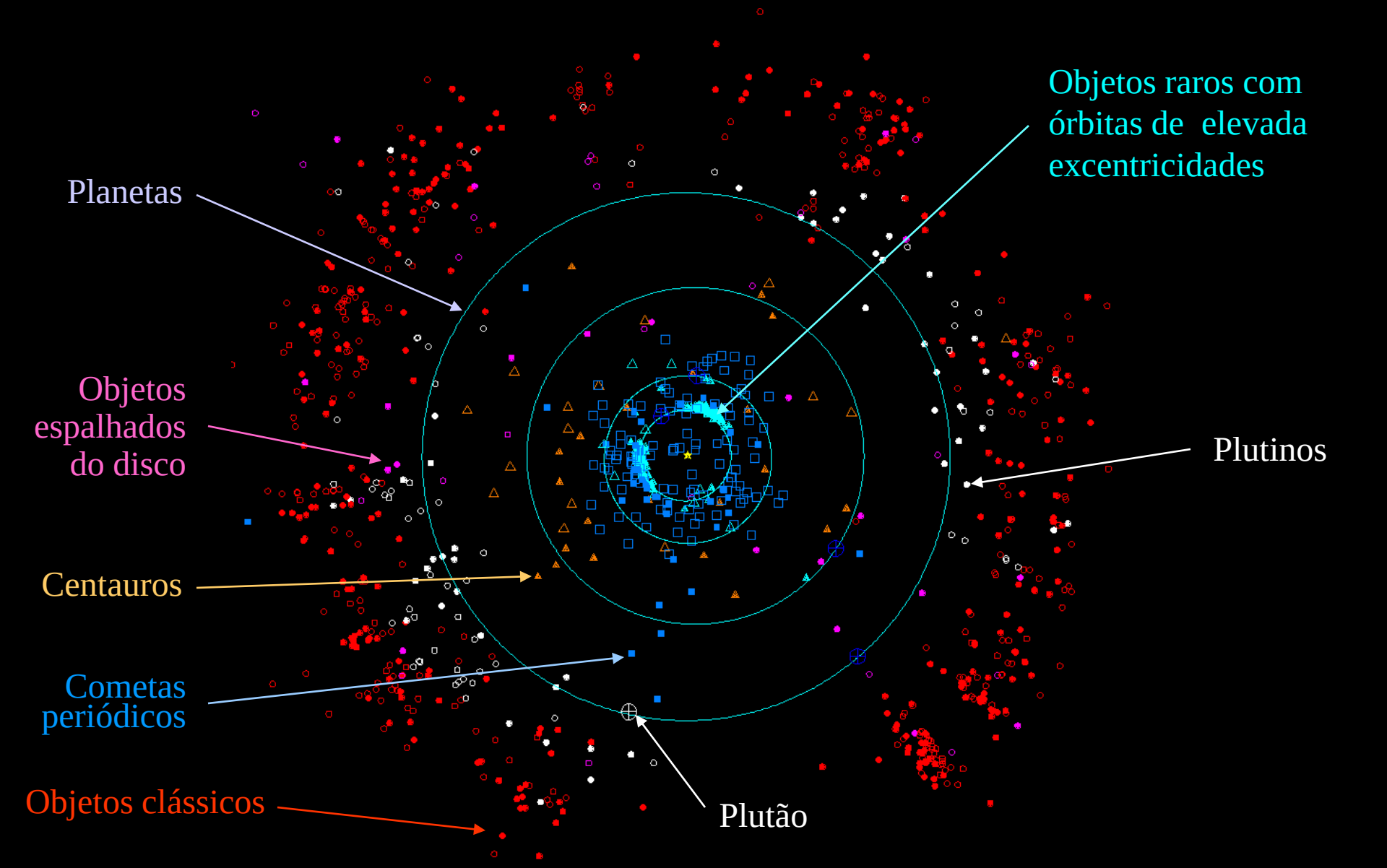


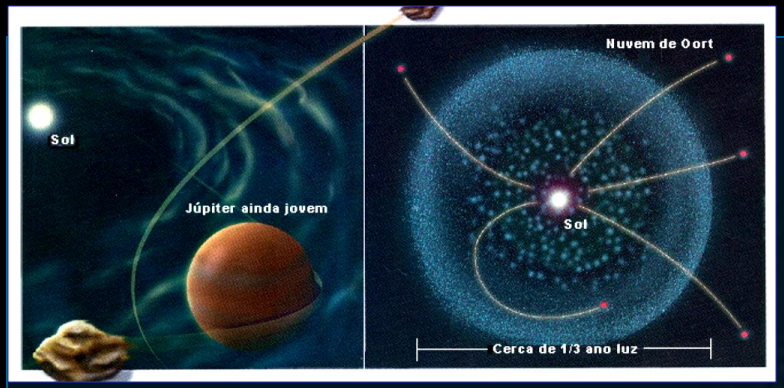
Image credit: Dr. Avi M. Mandell, NASA / Goddard Space Flight Center.

Cometas e Objetos do Cinturão de Edgeworth-Kuiper

Enos Picazzio
IAGUSP
Agosto 2006



Cometas: regiões de acúmulo



Nuvem de Oort
30.000 a 100.000 UA

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

Cinturão Edgeworht-Kuiper

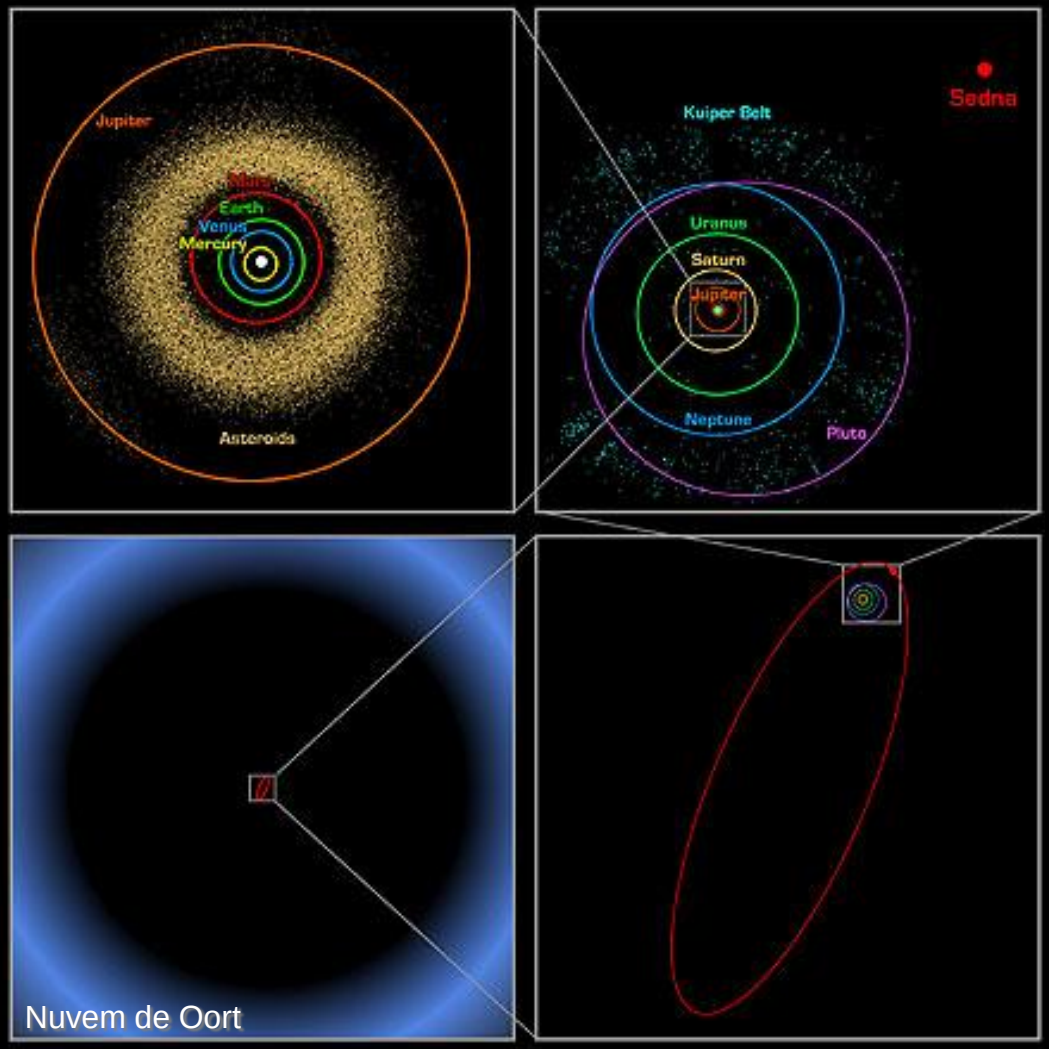
Plutão

Períodos curtos e médios: formados nesta região

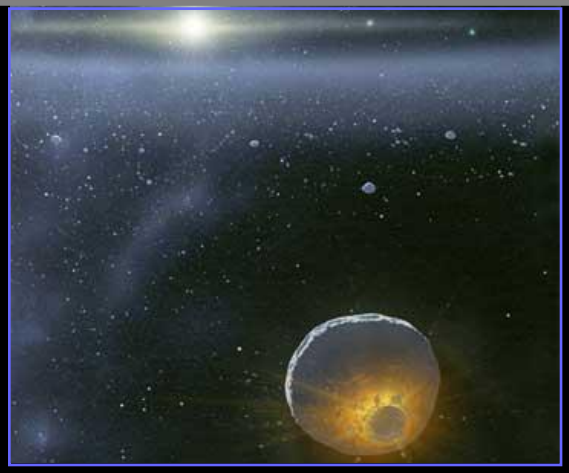
Sedna: formado adiante de Plutão?

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



The Astronomical Journal, Alan Stern, Jan/2005, Space Science and Engineering Division at Southwest Research Institute

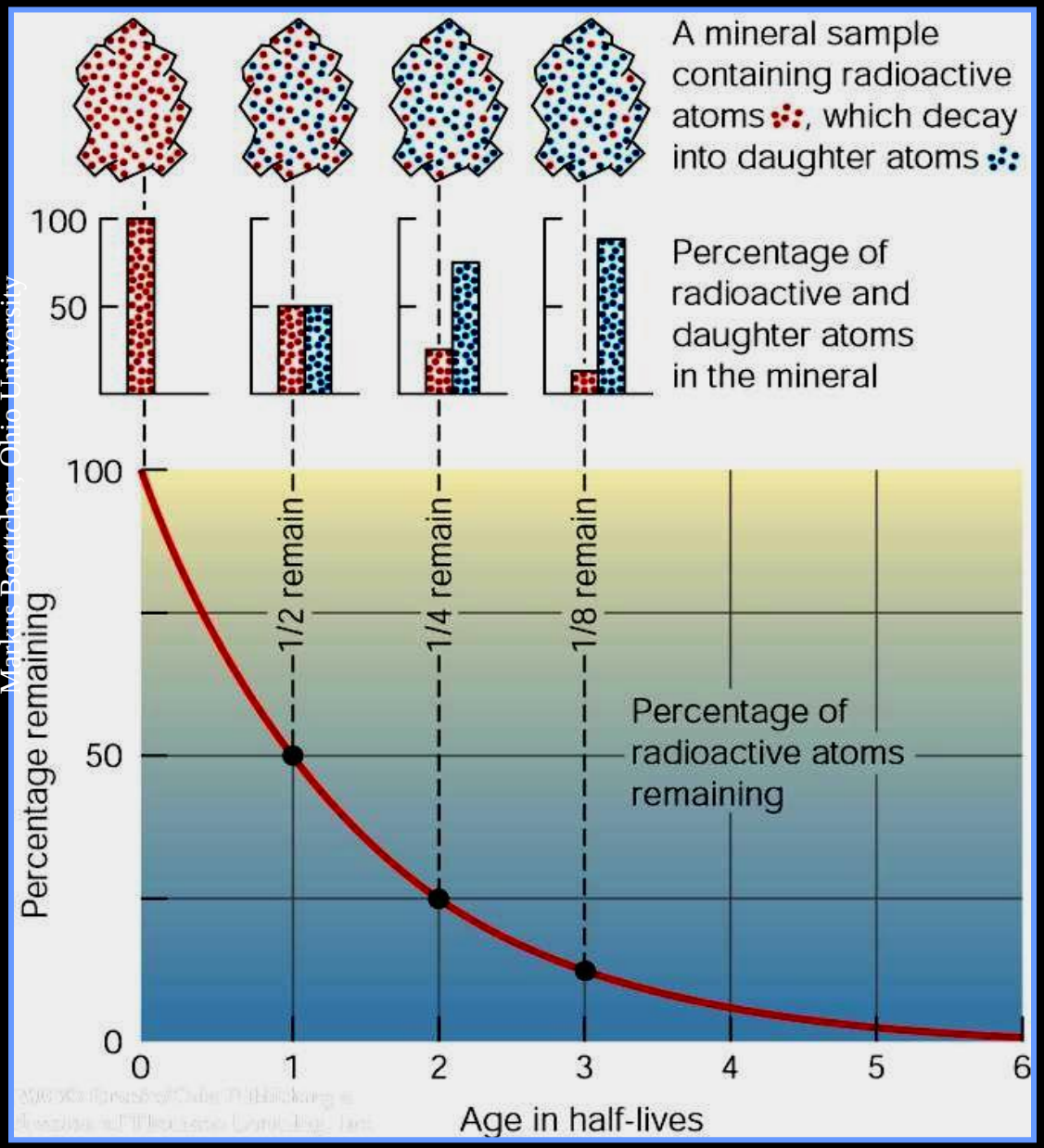


Simulações sugerem que ele foi formado bem distante de Plutão e não, como se supunha, que ele teria se formado nas proximidades dele e ejetado por perturbação gravitacional dos planetas gigantes.

Implicações:

- a zona de formação planetária extende-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.

Idade do Sistema Solar



Sol e planetas têm aproximadamente a mesma idade

Idades das rochas são obtidas através do decaimento radioativo

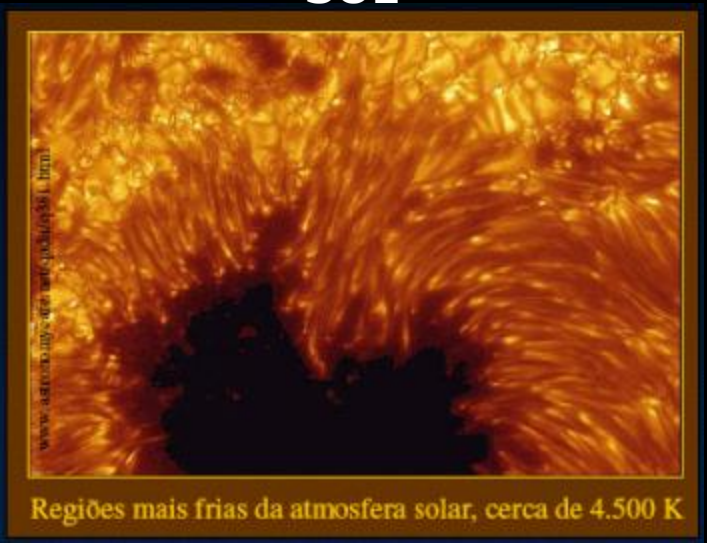
Medidas de abundância relativa entre elemento instavél e estável revela data de formação da rocha.

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

Radioisótopo	Meia-vida
Carbono-15	2,4 s
Xenônio-135	9h
Fósforo-32	32 dias
Enxofre—35	87 dias
Cobalto-60	5,26 anos
Estrôncio-90	28,1 anos
Césio-137	30,17 anos
Rádio-226	$1,6 \cdot 10^3$ anos
Plutônio-239	$2,44 \cdot 10^4$ anos
Urânio-235	$4,5 \cdot 10^9$ anos

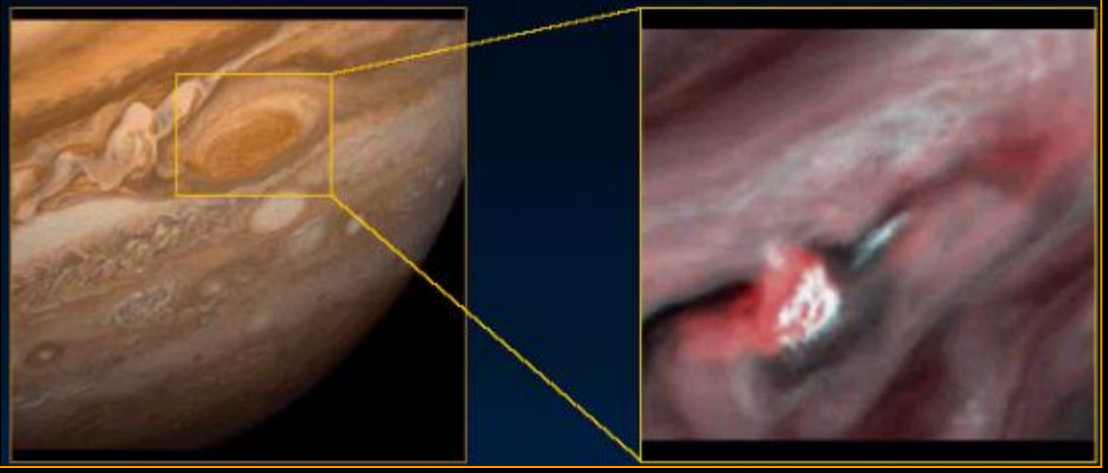
A presença da água

SOL



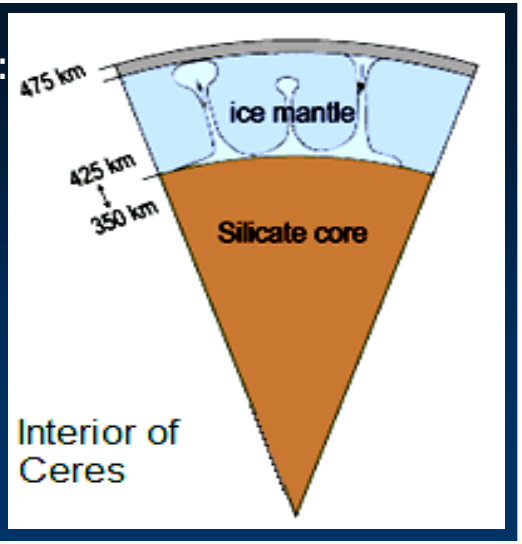
Espectro no IV marcado por linhas de absorção da água

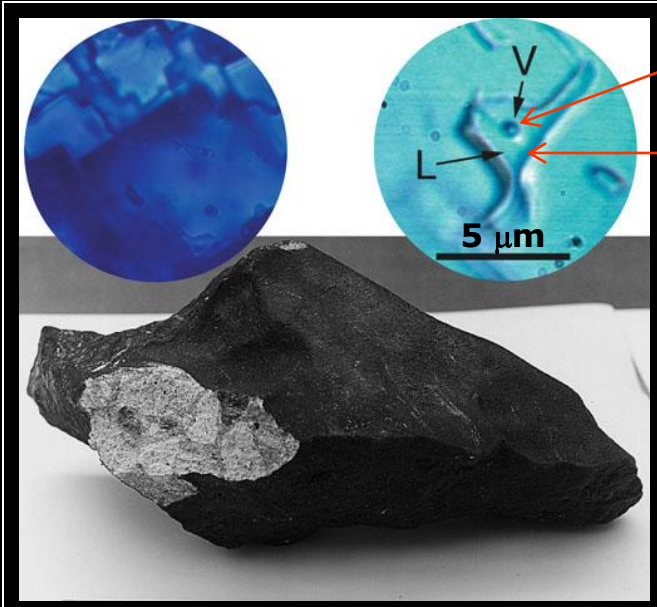
Tempestade de nuvem d'água em Júpiter



CERES (planeta-anão): 25% do manto pode ser água doce (200 milhões de km^3)

TERRA:
total 1,4 bilhão de km^3, água doce: 41 milhões de km^3





Meteorito Monahans (condrito ordinário)

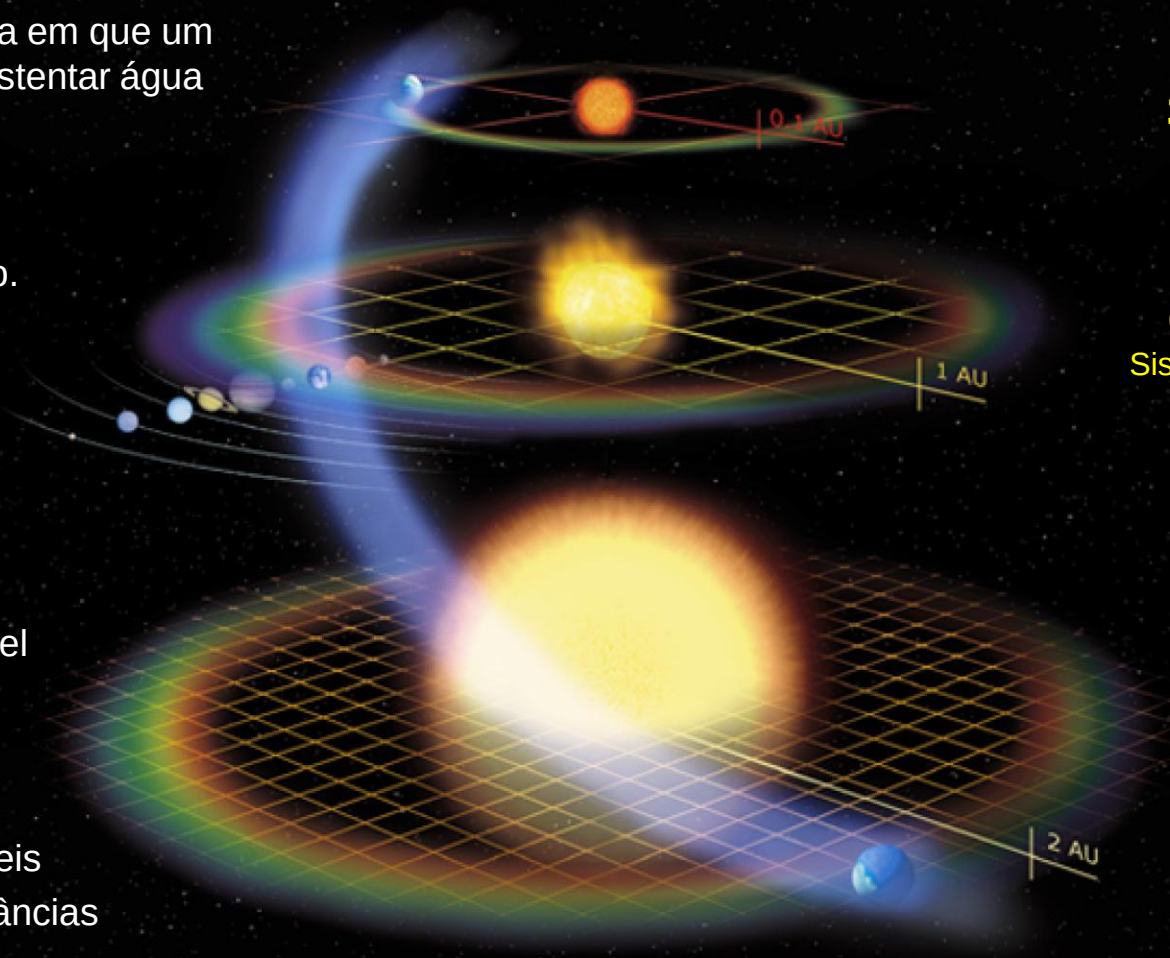
Zona Habitável

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.



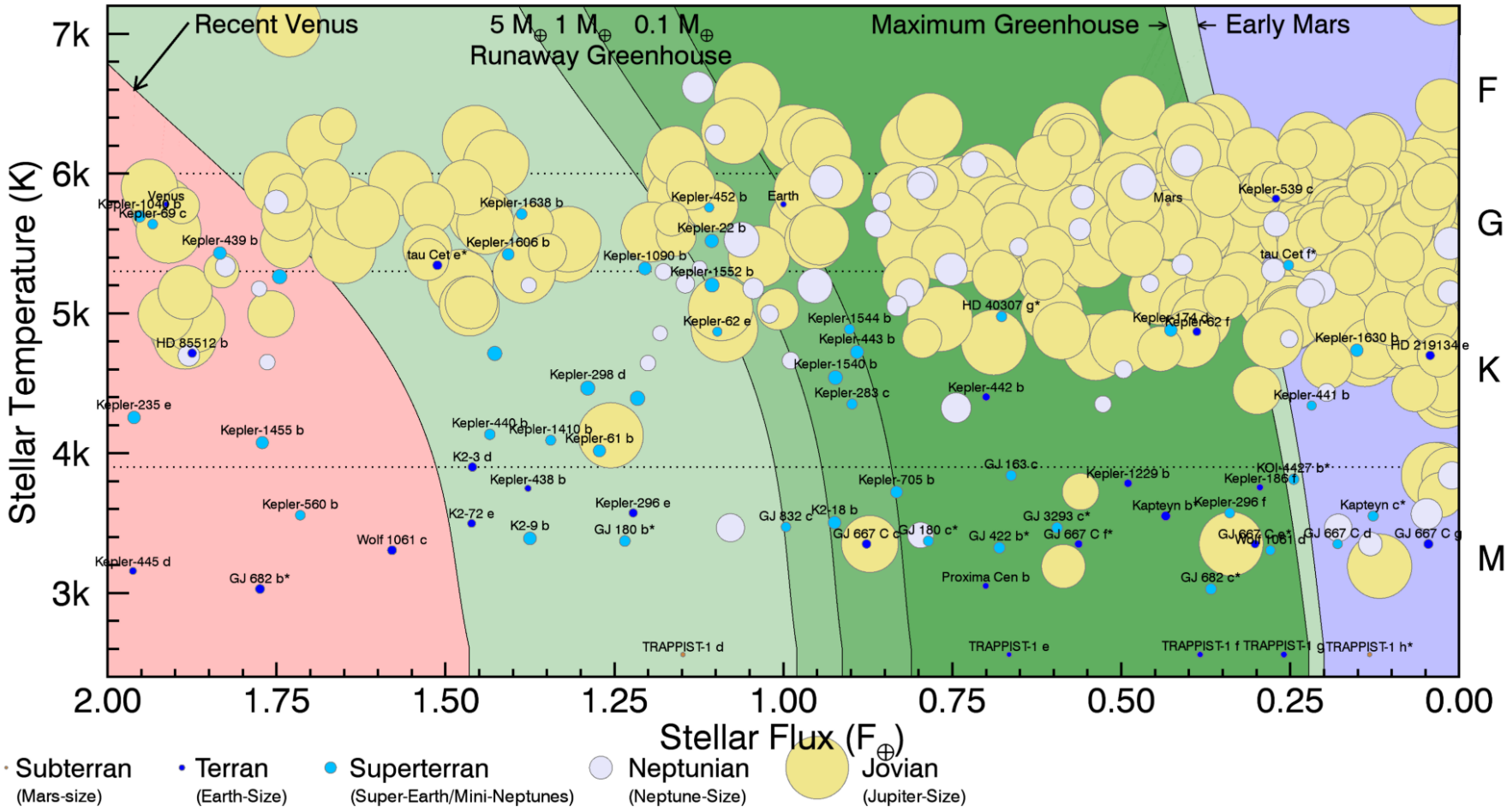
3000 K

6000 K
Sistema Solar

9000 K

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.

Zona Habitável: exoplanetas candidatos

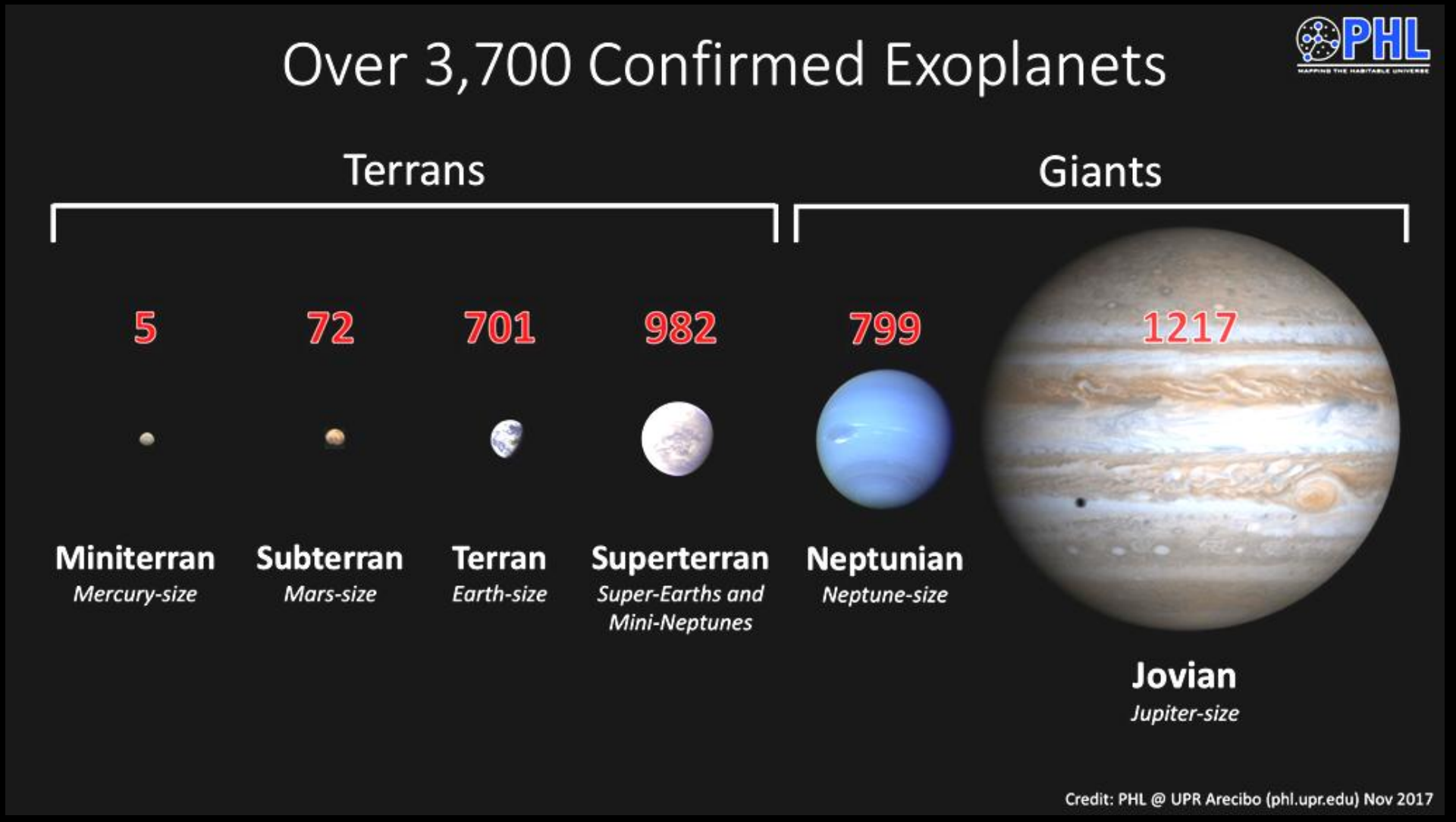


Known exoplanets near the habitable zone (darker green shade is the conservative habitable zone and the lighter green shade is the optimistic habitable zone). Only exoplanets less than 10 Earth masses or 2.5 Earth radii are labeled. Some are still unconfirmed (* = unconfirmed). Size of the circles corresponds to the radius of the planets (estimated from a mass-radius relationship when not available). Credit: PHL @ UPR Arecibo

HABITABLE EXOPLANETS CATALOG

http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog

Amostragem de 3.700 exoplanetas confirmados



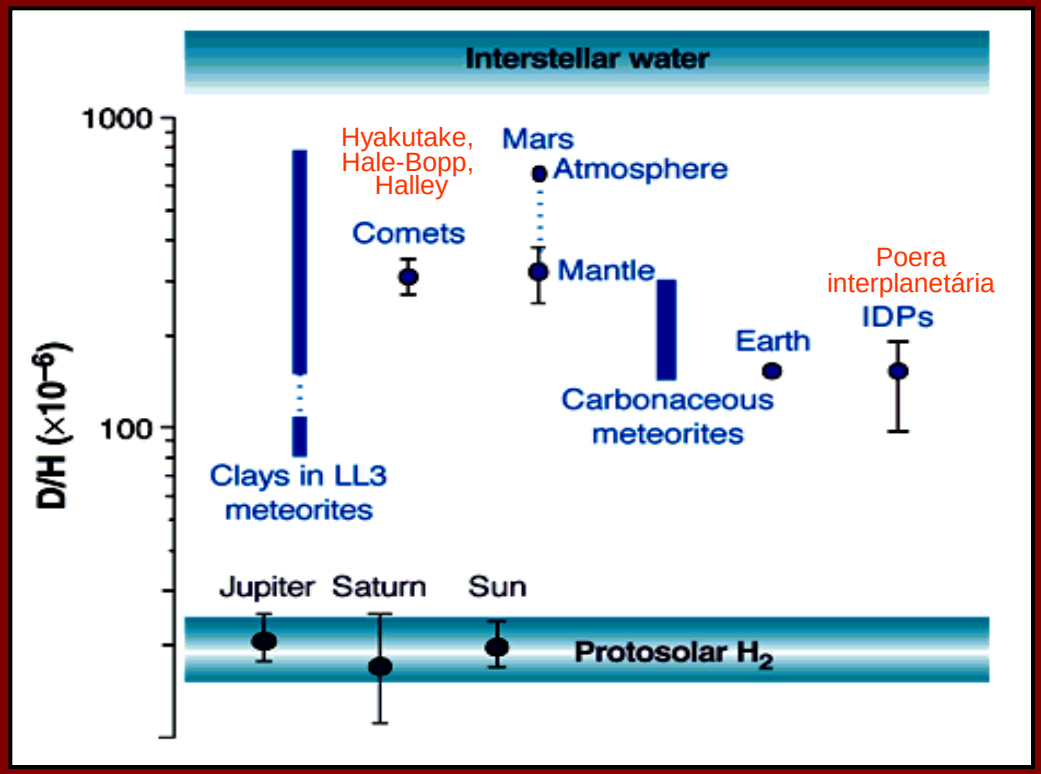
Terrans Group				Giants Group	
Miniterrans (Mercury Size)	**Subterrans** (Mars Size)	**Terrans** (Earth Size)	**Superterrans** (Super-Earths & Mini-Neptunes)	**Neptunians** (Neptune Size)	**Jovians** (Jupiter Size)
10^{-5} – 0.1 M_E or 0.03 – 0.4 R_E	0.1 – 0.5 M_E or 0.4 – 0.8 R_E	0.5 – 5 M_E or 0.8 – 1.5 R_E	5 – 10 M_E or 1.5 – 2.5 R_E	10 – 50 M_E or 2.5 – 6.0 R_E	> 50 M_E or > 6 R_E

De onde veio a água da Terra?

Atualmente

No final da era de bombardeamento

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.

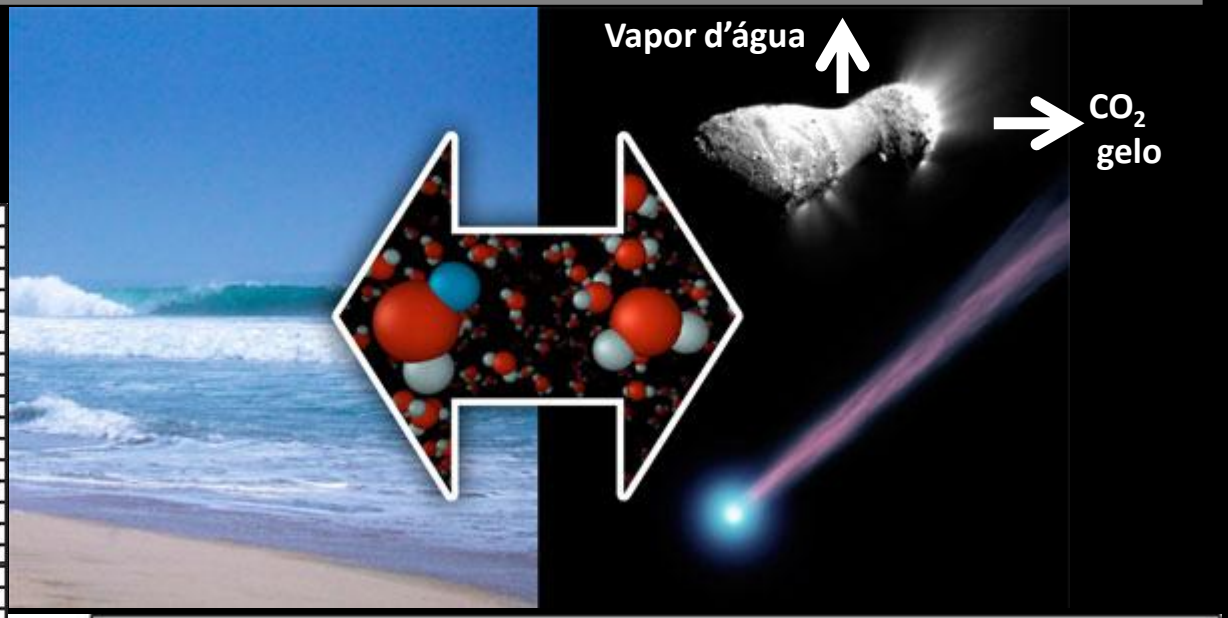


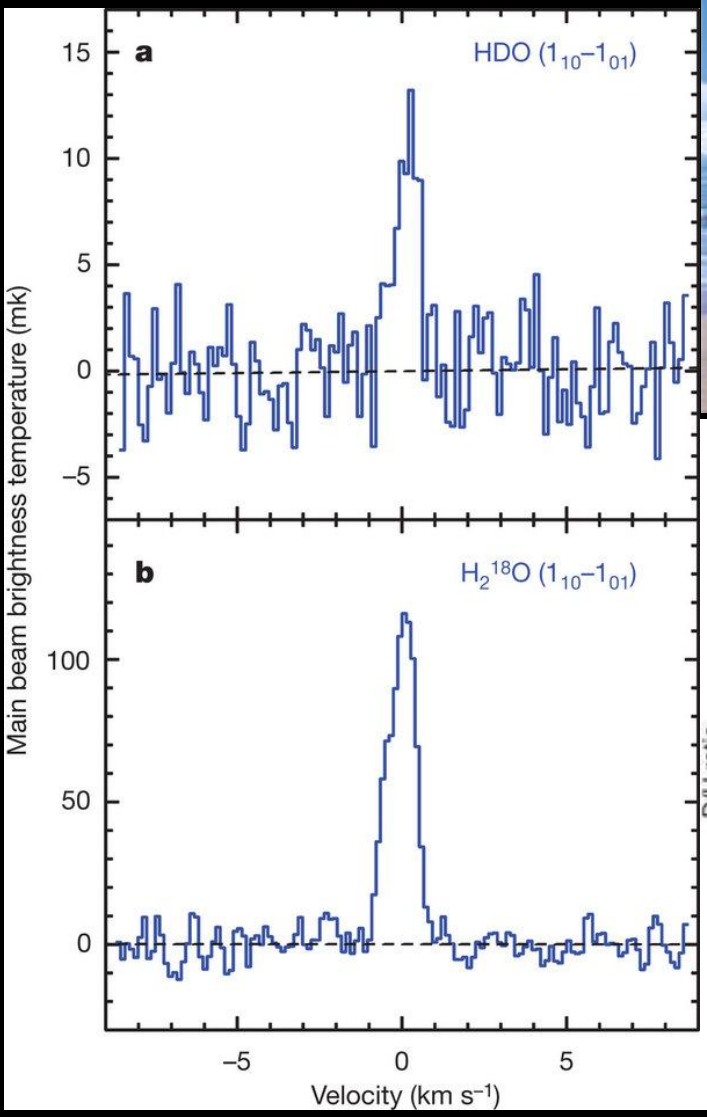
Inigma isotópico: distribuição da composição isotópica do hidrogênio.

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

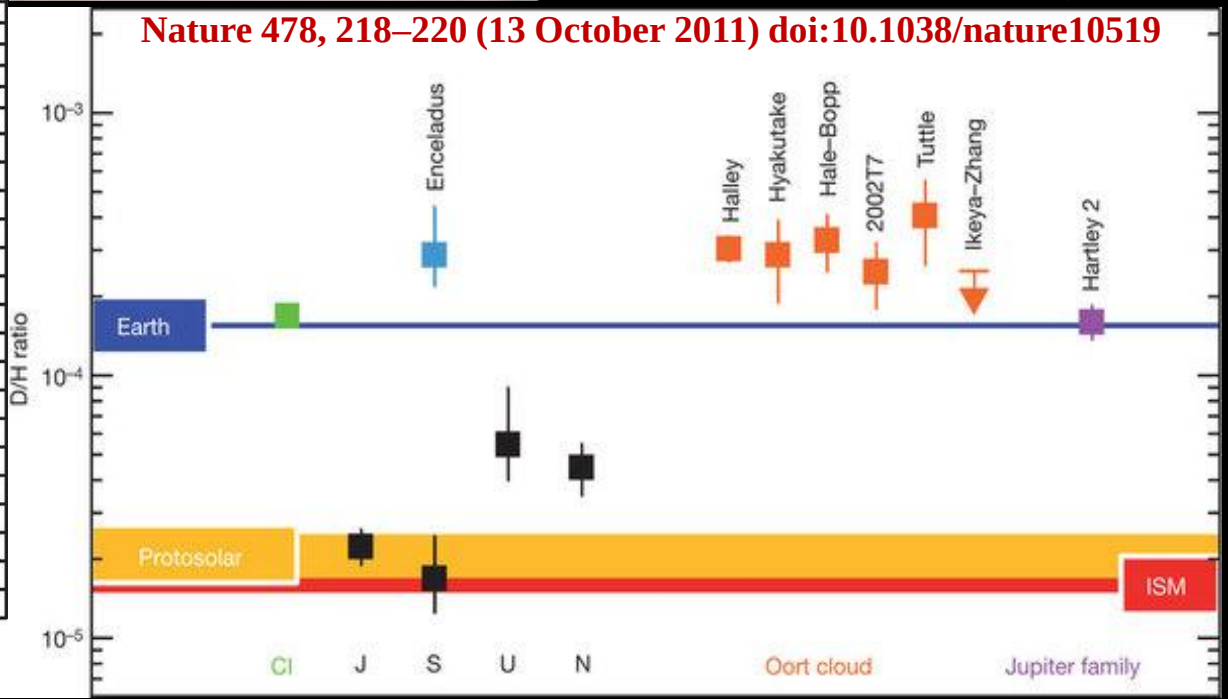
De onde veio a água da Terra?

103P/Hartley 2



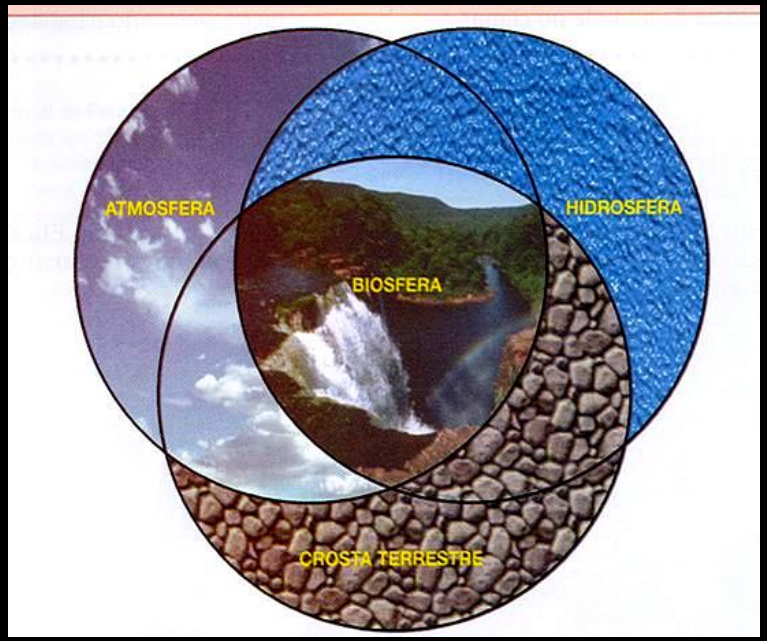


Nature 478, 218–220 (13 October 2011) doi:10.1038/nature10519



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 controlado e o proteja de radiação maléfica à vida (UV, raios X).
- Deve possuir magnetosfera intensa para protegê- lo do vento estelar (radiação corpuscular da estrela).
- Sua órbita não pode ter excentricidade elevada, senão sofrerá variação acentuada de temperatura e climática.
- 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 glaciações severas.
- Precisa manter estas condições por muito tempo.

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