

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

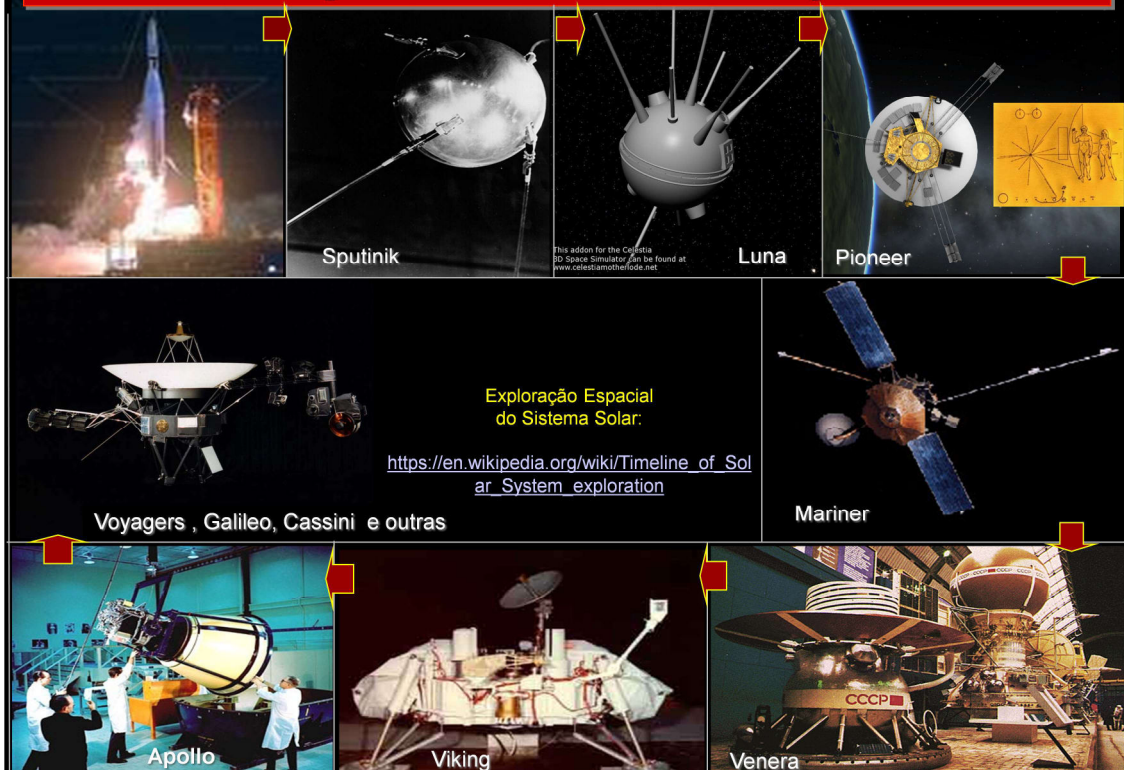
*NÃO HÁ PERMISSÃO DE USO PARCIAL OU TOTAL DESTES MATERIAL PARA OUTRAS FINALIDADES.*

## Dois marcos importantes: século 17



Dois marcos importantes nos estudos do Sistema Solar foram a utilização do telescópio como instrumento astronômico, uma iniciativa de Galileo Galilei, e os instrumentos espaciais que permitiram melhores observações e exploração in loco.

## Dois marcos importantes: 1957... Era espacial



Dois marcos importantes nos estudos do Sistema Solar foram a utilização do telescópio como instrumento astronômico, uma iniciativa de Galileo Galilei, e os instrumentos espaciais que permitiram melhores observações e exploração in loco a partir dos anos finais da década de 1950..

Desde então, inúmeras sondas foram enviadas a vários corpos celestes, algumas delas explorando fisicamente as superfícies de planetas, satélites, asteroides e cometas.

## 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.

Our Solar System and Its Origin, Haosheng Lin

Para se entender as características de cada objeto planetário é preciso conhecer o processo global que deu origem a todos eles, ou seja, saber como o Sistema Solar (SS) foi formado. Por ser muito extensa, é de esperar que cada região da nuvem primordial da qual o SS foi formado tenha sofrido processos físicos característicos das regiões (composição química, temperatura, pressão, turbulência e outros). As diferenças entre os corpos do SS devem ser consequência desses processos localizados.

## 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);

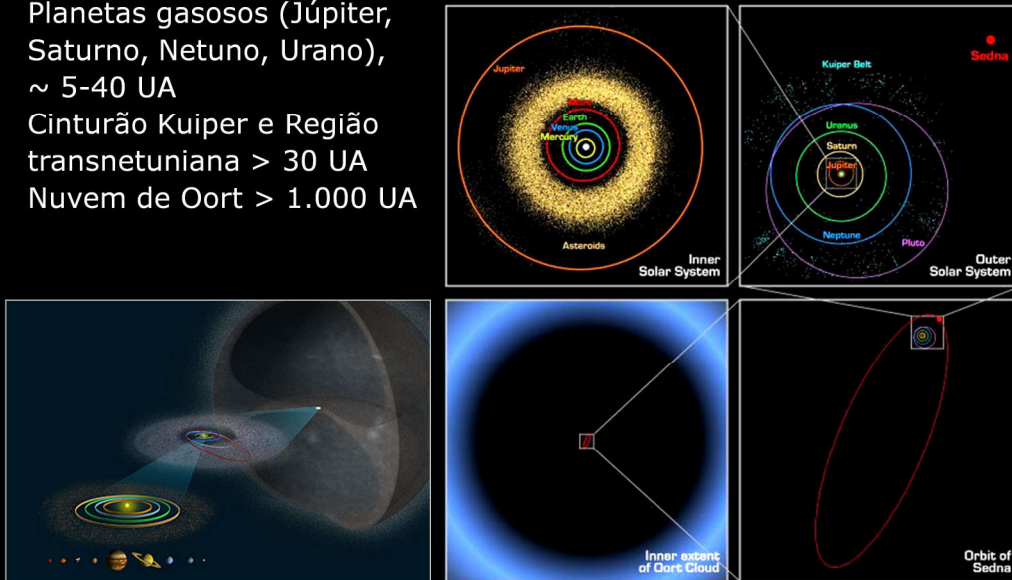
Adiante de Plutão (*planeta-anão*) há uma população de corpos pequenos com órbitas quase circulares (algumas são altamente excêntricas) e coplanares à eclíptica;

Uma das primeiras observações das características globais do SS são as particularidades relatadas neste slide. O SS tem um plano básico e deve haver uma razão para isso. As órbitas dos planetas e de muitos outros objetos estão bem próximo a ele. As órbitas dos planetas são bem diferentes das orbitas da maioria dos demais objetos. As taxas de rotação também são muito diversificadas, assim como a composição química e as distâncias heliocêntricas.

## 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



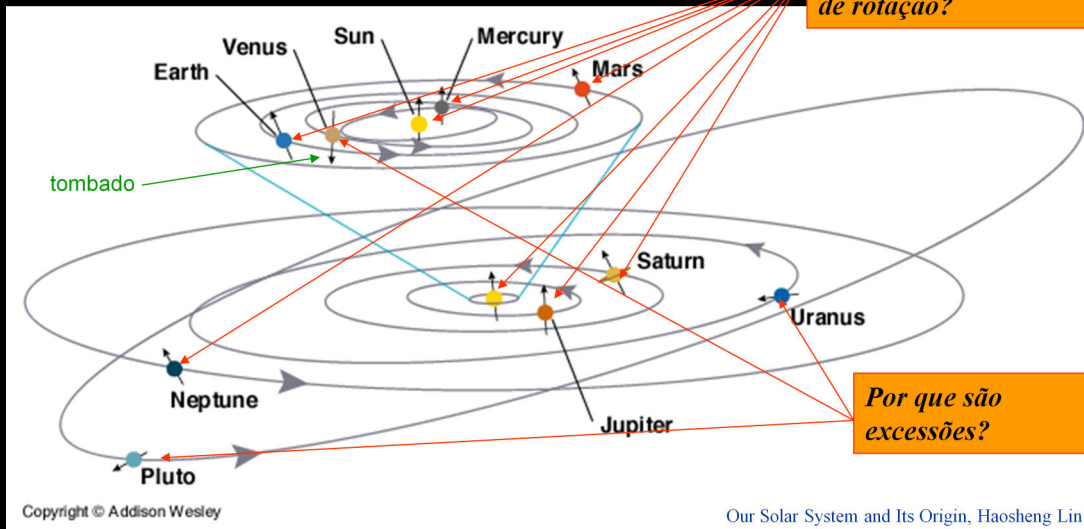
Interessante: <http://liftoff.msfc.nasa.gov/academy/space/solarsystem/solarsystemjava.html>

O SS é bem maior que a região que podemos enxergar, mesmo c. om todos os recursos tecnológicos atuais. Partindo-se da posição do Sol, a região até Marte é dominada por planetas rochosos, com densidades médias altas. Entre Marte e Júpiter ainda predomina os objetos rochosos menores que planetas; são os asteroide do Cinturão principal, com densidades típicas de rochas. De Júpiter até Netuno existem planetas gasosos, de baixa densidade média, todos com satélites sólidos e superfícies expostas, exceto Titã, satélite de Saturno. Adiante de Netuno existe outro cinturão, Cinturão Kuiper, mas composto de corpos sólidos de densidade média intermediária entre as dos planetas rochosos e a dos gasosos. Nas regiões ainda mais distantes encontramos muitos planetas anões e corpos menores que eles, além de uma infinidade de cometas.

## 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.

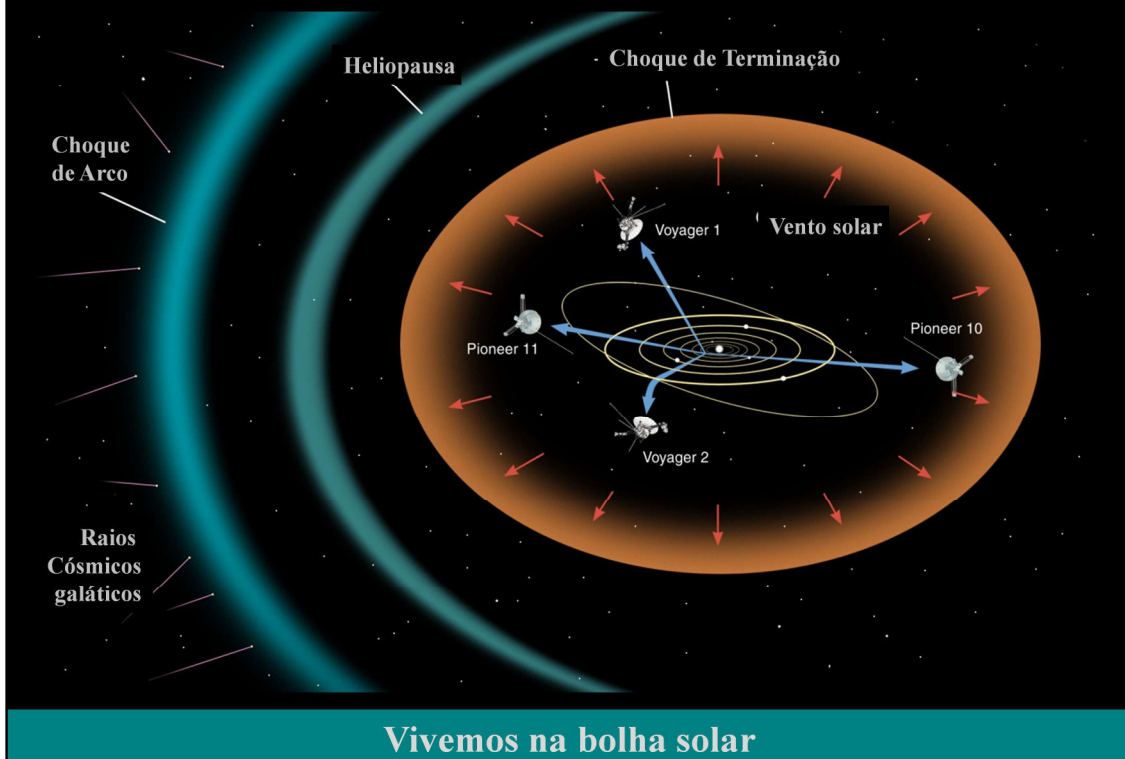
*Qual a razão da orientação dos eixos de rotação?*



*Por que são exceções?*

Vemos aqui uma ilustração fora de escala das órbitas dos planetas com setas indicando as direções dos respectivos eixos de rotação. Repare que excetuando Plutão, todas as demais órbitas são quase coplanares com o plano da órbita da Terra (a eclíptica). Essas órbitas planetárias são quase circulares, menos a de Plutão. Ou seja, Plutão é pequeno, tem órbita elíptica e fora do plano básico. Essas características pesaram muito no momento de classificar, ou reclassificar, Plutão. Deixou de ser planeta e passou a ser planeta anão. As setas indicam as direções dos respectivos eixos de rotação. Repare no eixos de Vênus (tombado em  $180^\circ$ ) e Netuno (tombado em  $90^\circ$ ). Deve haver uma razão para isso.

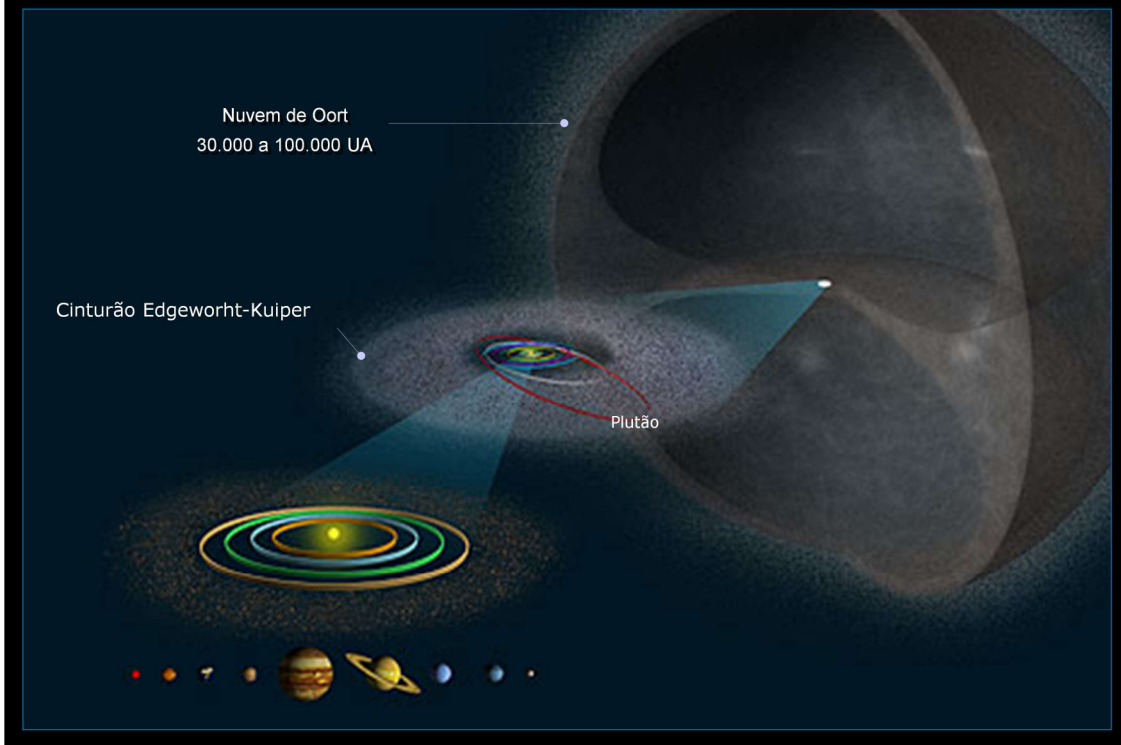
## Dimensão “parcial” do Sistema Solar



Todos os planetas estão envolvidos por uma bolha de plasma (gás quente e magnetizado) oriunda do Sol. Essa bolha protege a região interna do SS dos raios cósmicos galácticos (partículas de elevada energia que se movem em velocidades próximas a da luz). Com o movimento do Sol em torno do núcleo da Via Láctea, essa bolha é deformada pela choque entre ela e a matéria do meio interestelar. As sondas Pioneer 11 e as Voyagers 1 e 2 detectaram essa divisão quando passaram por essa região de transição.

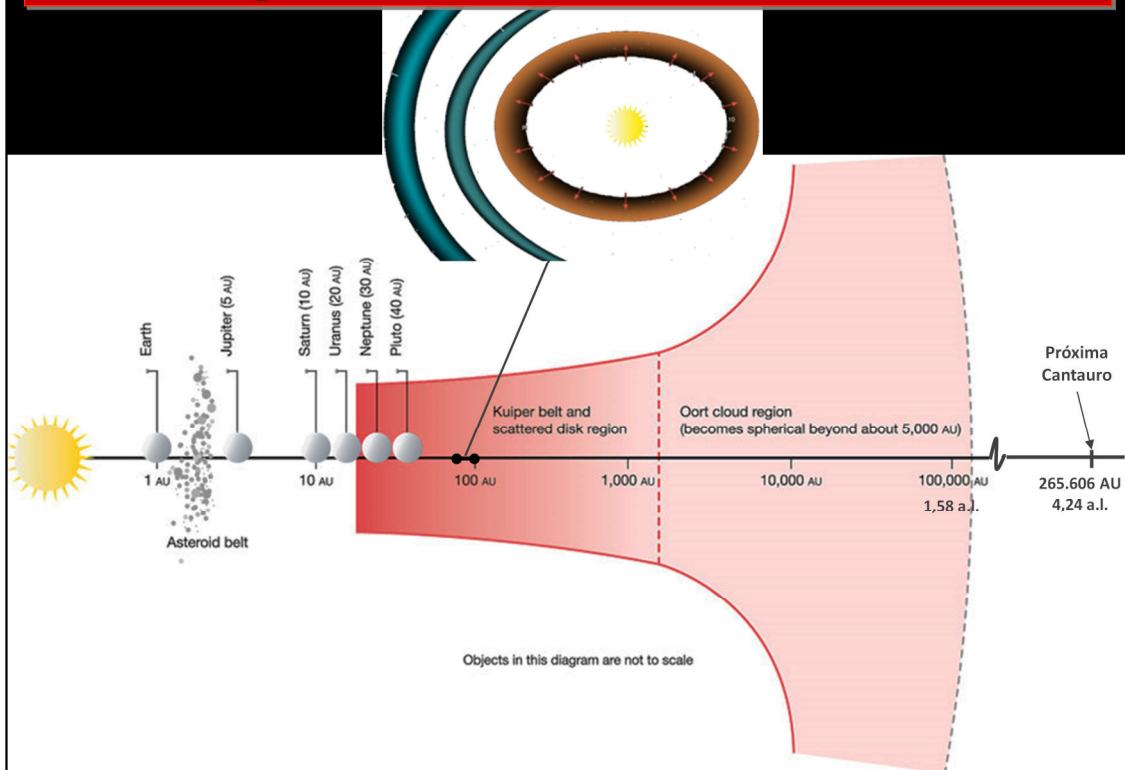


## Dimensão física do Sistema Solar



A fronteira do SS é a Nuvem Oort (ou de Oort), formada por núcleos de cometas. Ela tem a forma esférica e chega até cerca e  $\frac{1}{4}$  da distância entre o Sol e a estrela Próximo Centauro. Por que ela é esférica e que processo a originou? Discutiremos esse assunto mais adiante.

## Dimensão “parcial” do Sistema Solar












Neste slide vemos um outro tipo de representação, com valores numéricos e fora de escala.

# Comparativo

Our Solar System and Its Origin, Haosheng Lin

**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 <sup>3</sup> )	Orbital Period	Rotation Period	Axis Tilt	Average Surface (or Cloud Tops) Temperature <sup>b</sup>	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 <sup>b</sup>	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 <sup>b</sup>	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 <sup>b</sup>	24	Yes
	Neptune	●	30.1	24,764	17.1	1.64	165 years	16.1 hours	29.6°	60 K	H, He, hydrogen compounds <sup>b</sup>	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

A tabela acima reúne os parâmetros principais físicos dos planetas. É fácil notar que os planetas podem ser divididos em dois grupos, bem distintos. Os rochosos (Mercúrio, Vênus, Terra e Marte) são pequenos, densos, sólidos, têm poucos ou nenhum satélites e suas atmosferas, quando existem, são compostas de gases densos. Os planetas gasosos (Júpiter, Saturno, Urano e Netuno) são grandes, de baixa densidade, têm muitos satélites e suas atmosferas são compostas de gases mais leves. Júpiter e Saturno são compostos essencialmente de hidrogênio e hélio. Plutão, planeta anão, é pequeno, densidade intermediária entre os rochosos e os gasosos, mas tem cinco satélites. Deve haver explicação para tanta diferença, certamente são decorrentes dos processos que formaram o SS.

## Formação do Sistema Solar

Historicamente, há 5 hipóteses básicas:

*Turbulência*

*Teoria Nebular Antiga*

*Forças de Maré*

*Acreção*

*Teoria Nebular Moderna*

A discussão mais técnica do mecanismo que formou o SS inicia no século 18. Os modelos principais são, essencialmente, esses citados acima. Vamos discutir brevemente cada um deles, aproveitando o material didático do Prof. Tibério B. Vale, da UFRG.

# Fundamentos de Astronomia e Astrofísica

## Formação do Sistema Solar COSMOGONIA

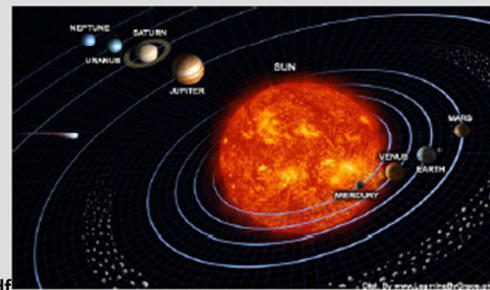
Prof. Tibério B. Vale

<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



- 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 e 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);
- **Suguiu 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 planetas se formaram de material condensado perdido pelo Sol (evento raro);
- Segundo esta 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.

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

## 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*** (Enos Picazzio, IAG)

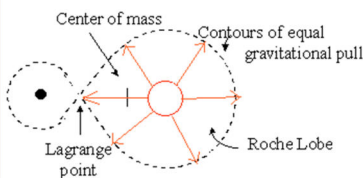
<http://www.if.ufrgs.br/~tiberio/disciplinas/fis02010/aula13.pdf>

## 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:

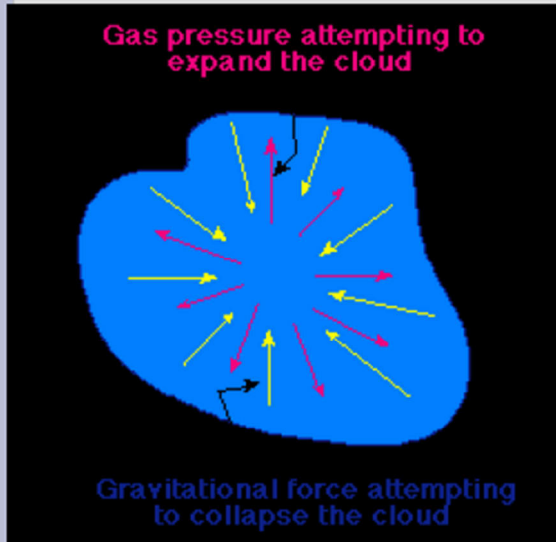
- Uma formada por grãos não voláteis (sólidos) – Planetas terrestres;
- Outra formada por H – Planetas Gigantes

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

Quando dois corpos interagem e trocam massa, a transferência de massa se dá através do Ponto de Lagrange, que é o contato entre os dois discos de matéria, o do corpo que perde massa e o do corpo que ganha massa. A troca de massa é um fenômeno muito comum entre estrelas binárias.

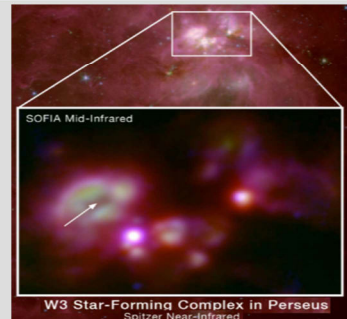
# Teoria nebular moderna

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



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

Massa da nuvem primordial =  
Massa de Jeans  $> 10^5$  Msol  
A nuvem colapsa gravitacionalmente.  
Força gravitacional  $\times$  pressão



A massa de Jeans é o valor limite acima do qual ocorre o colapso gravitacional da nuvem. Ela é obtida através das equações de equilíbrio hidrostático (que relaciona massa, densidade e raio) e da equação de pressão (que relaciona temperatura e densidade).

## 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;

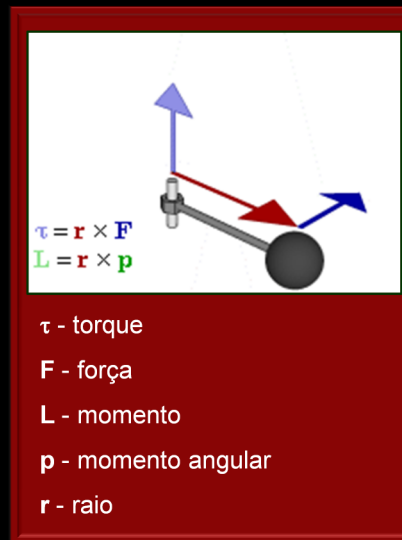
Uma pequena perda de massa é suficiente para levar o momento angular do Sol ao valor observado hoje ( $a/R=10$  e  $dM/dt = 0.003$ )

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

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

## Momento angular

Relação entre grandezas vetoriais em um sistema em rotação:



[en.wikipedia.org/wiki/Angular\\_momentum](https://en.wikipedia.org/wiki/Angular_momentum)



## Momento angular

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

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

$L$  - momento angular;

$Q$  - quantidade de movimento linear do corpo

$$Q = m \cdot v$$

$v$  - velocidade

$r$  - distância do corpo à origem do referencial (ponto fixo).

$\theta$  - ângulo entre a força e o braço de alavanca  $d$ .

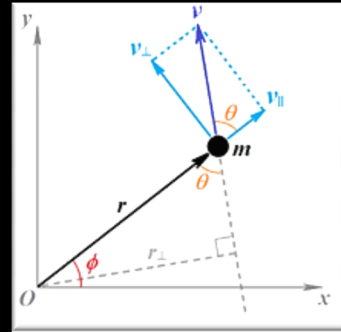
Quando  $\theta = 90^\circ$ ,  $\text{sen } \theta = 1$ , a equação se reduz a:

$$L = Q \cdot r = m \cdot v \cdot r \quad \Rightarrow \quad L = m \cdot v \cdot r$$

Mas  $v = \omega \cdot r$  ( $\omega$  - velocidade angular):

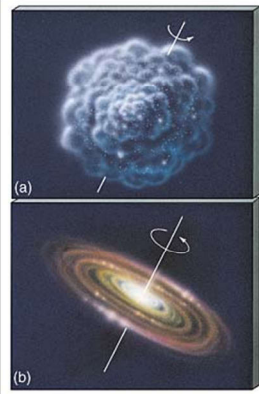
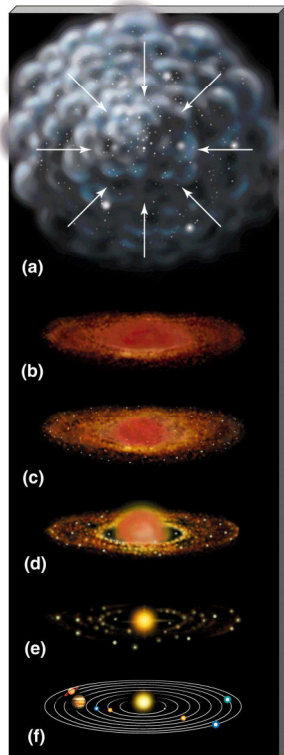
$$\text{Então } L = m \cdot \omega \cdot r^2 \text{ ou } L = I \cdot \omega$$

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.

## 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).

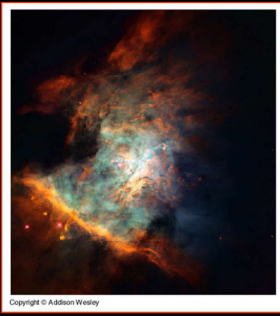
No seu plano equatorial forma-se um disco de matéria, dele surgirão planetas e demais corpos.

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*

Essencialmente, estas são as fases de formação de uma estrela e seu sistema planetário.

# 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

Our Solar System and Its Origin, Haosheng Lin

## 1. **Aquecimento** ⇒ Proto-Sol ⇒ Sol

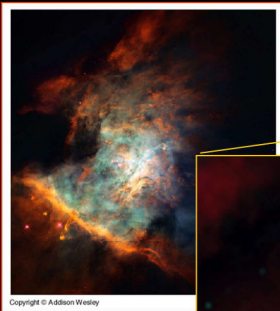
Material em queda perde energia potencial gravitacional, que é convertida em energia cinética. Material de região mais densa sofre colisão e provoca aumento da temperatura do gás. Valores adequados de temperatura e pressão (densidade) detonam fusão nuclear – Sol torna-se uma estrela.

## 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

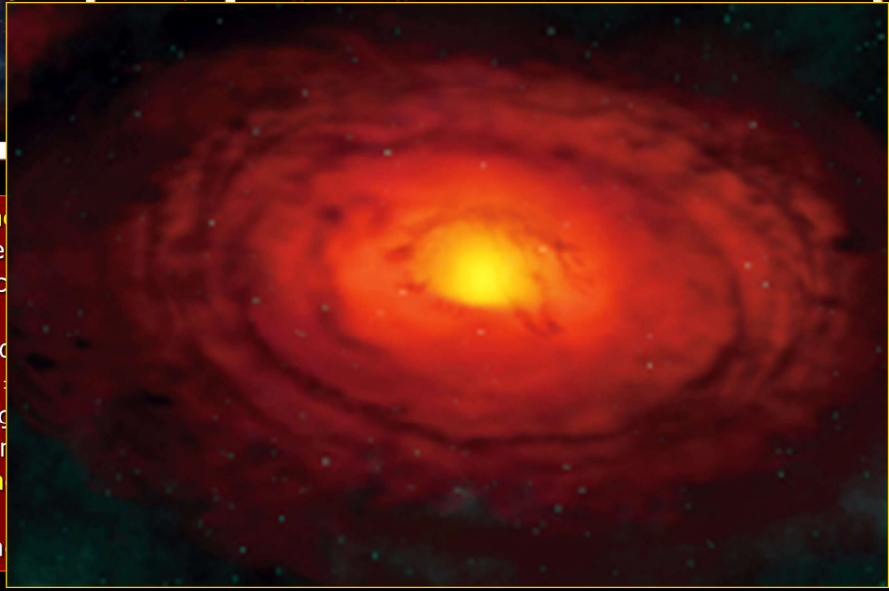


Colapso

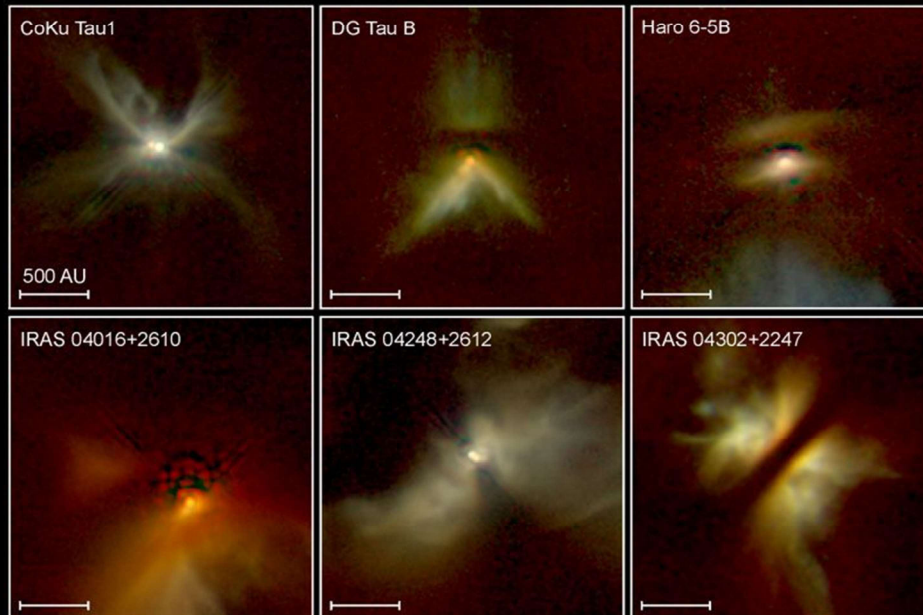


Our Solar System and Its Origin, Haosheng Lin

- 1. Aquecimento**  
Material e energia colapsam, aumentando a temperatura e a pressão (colapso gravitacional).
- 2. Rotação**  
Conservação do momento angular, aumentando a velocidade de rotação gradativamente.
- 3. Achatamento**  
A forma da nuvem muda de esférica para uma forma de disco achatado (a



## Figuras típicas de objetos estelares jovens.



Young Stellar Disks in Infrared

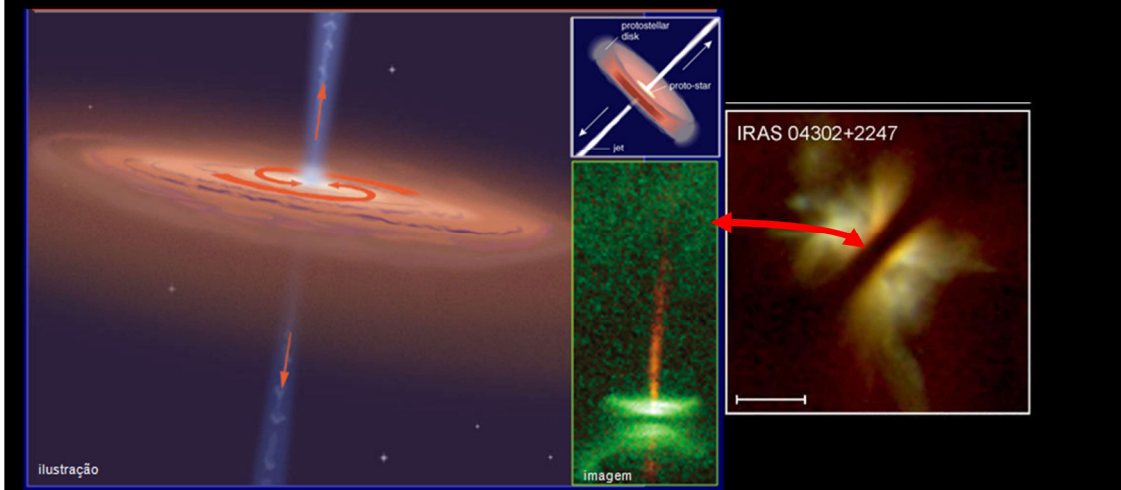
HST • NICMOS

PRC99-05a • STScI OPO

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

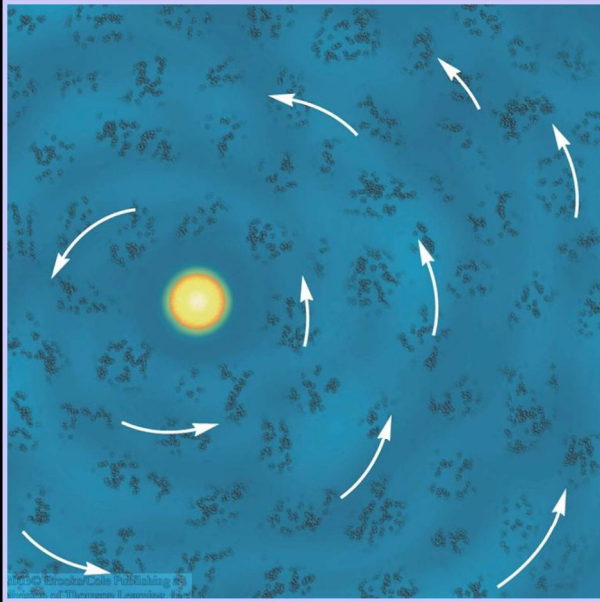
Vemos aqui vários casos conhecidos de nascimento de estrelas com o disco protoplanetário. A protoestrela está no centro. Ainda não é visível porque a matéria circundante bloqueia a luz estelar. O disco em torno da estrela (disco protoplanetário) aparece como zona escura (posição da setas). O modelo teórico de formação estelar é ilustrado pela imagem no canto superior direito. A protoestrela (ou objeto estelar jovem) forma um jato bipolar (norte e sul da estrela) perpendicular ao disco. A imagem no canto inferior direito são casos reais observados. O SS nasceu dessa forma. O sentido de rotação do disco protoplanetário se manteve na dinâmica dos objetos: a rotação em torno do eixo e a translação em torno do Sol seguem o mesmo sentido, salvos algumas exceções explicadas por eventos gravitacionais. O plano da eclíptica é o plano do disco protoplanetário.

## Figuras típicas de objetos estelares jovens.



Vemos aqui vários casos conhecidos de nascimento de estrelas com o disco protoplanetário. A protoestrela está no centro. Ainda não é visível porque a matéria circundante bloqueia a luz estelar. O disco em torno da estrela (disco protoplanetário) aparece como zona escura (posição da setas). O modelo teórico de formação estelar é ilustrado pela imagem no canto superior direito. A protoestrela (ou objeto estelar jovem) forma um jato bipolar (norte e sul da estrela) perpendicular ao disco. A imagem no canto inferior direito são casos reais observados. O SS nasceu dessa forma. O sentido de rotação do disco protoplanetário se manteve na dinâmica dos objetos: a rotação em torno do eixo e a translação em torno do Sol seguem o mesmo sentido, salvo algumas exceções explicadas por eventos gravitacionais. O plano da eclíptica é o plano do disco protoplanetário.

## Formação dos planetas

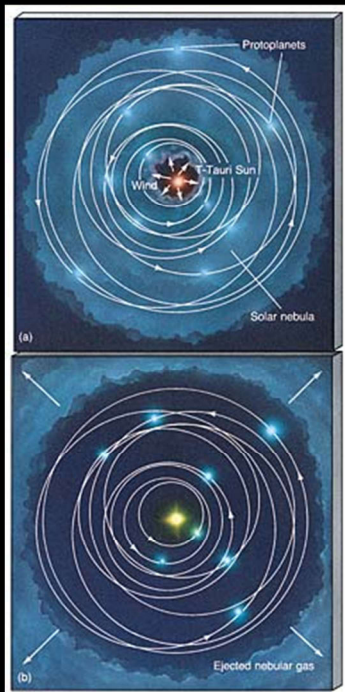


A acreção de massa começa com contínua aglutinação de grãos em blocos, formando os **planetésimos** (de cm a km).

Planetésimos colidem e formam **planetas**

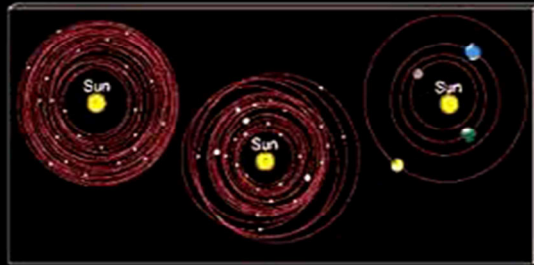
O movimento caótico das partículas do disco protoplanetário propicia encontros e colisões, facilitando o acúmulo de matéria. Gradativamente a matéria vai se aglomerando em unidades que acabam atraindo outras através da gravitação mútua.

## 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

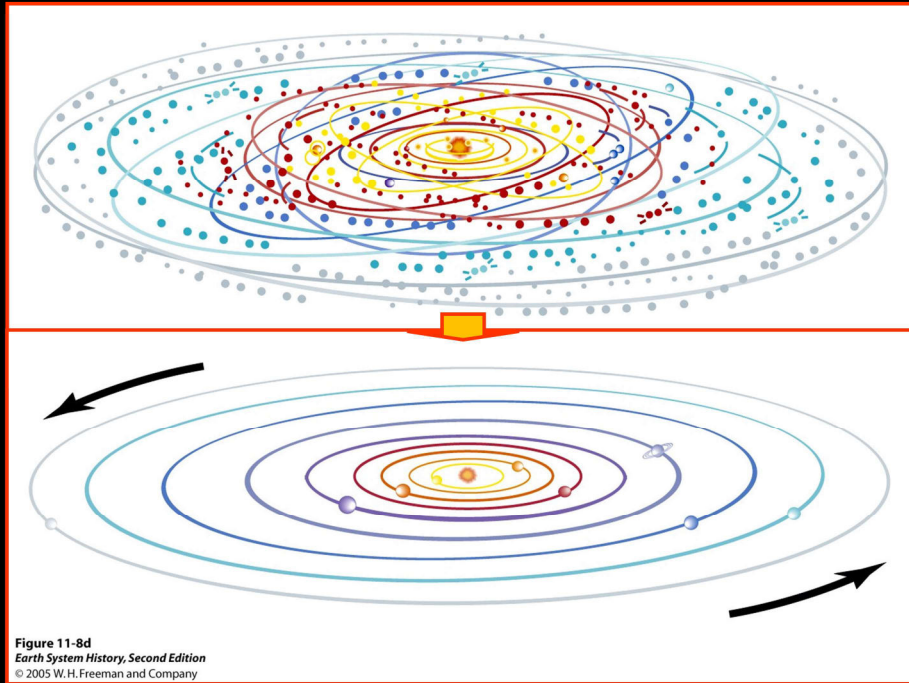


Ao longo do tempo, grandes blocos se atraem por gravitação mútua provocando colisões construtivas (a massa aumenta) ou destrutivas (o corpos se fragmenta), formando planetas, satélites, asteroides e cometas.



## 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.



Os planetas assim formados seguem em órbita ao redor do Sol, atraindo ou repelindo os corpos que restaram em seu caminho. Ou seja, os planetas “limpam” a trajetória, mantendo-se como o corpo predominante. Esta é uma das condições que a União Astronômica Internacional adotou na definição de planeta.

## 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**

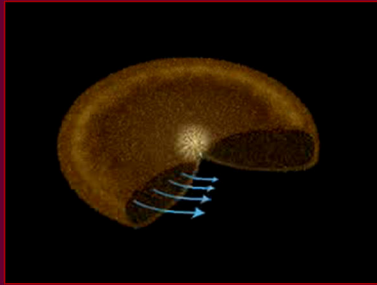
Massa  $> \sim 15 M_{\text{Terra}}$

Planetas podem crescer por acúmulo gravitacional de material de nuvem

**Planetas gasosos**

## Formação dos planetas: o acúmulo de massa

### Modelo de Acreção

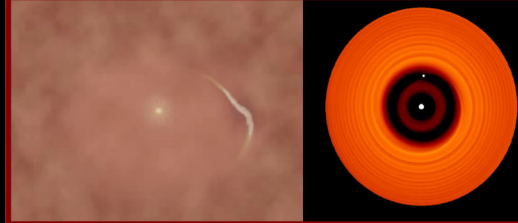


Os grãos de poeira do disco acumulam-se em **planetésimos**. Acumulando massa continuamente, eles crescem formando corpos maiores: **embriões planetários**.

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



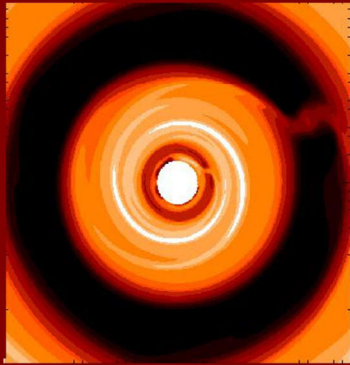
Instabilidades gravitacionais no disco formam **glóbulos de gás**, que se tornam planetas por auto-gravitação.

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

O planeta abre uma lacuna no disco enquanto acumula massa.

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

## Formação dos planetas: o acúmulo de massa pelos gasosos

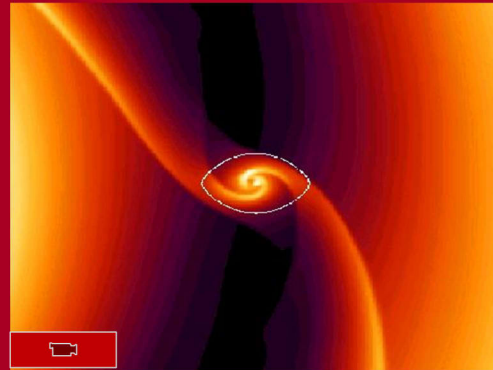


Ref:  
Papaloizou,  
Celestial  
Mechanics &  
Dynamical Astron.  
87 (2003).

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.

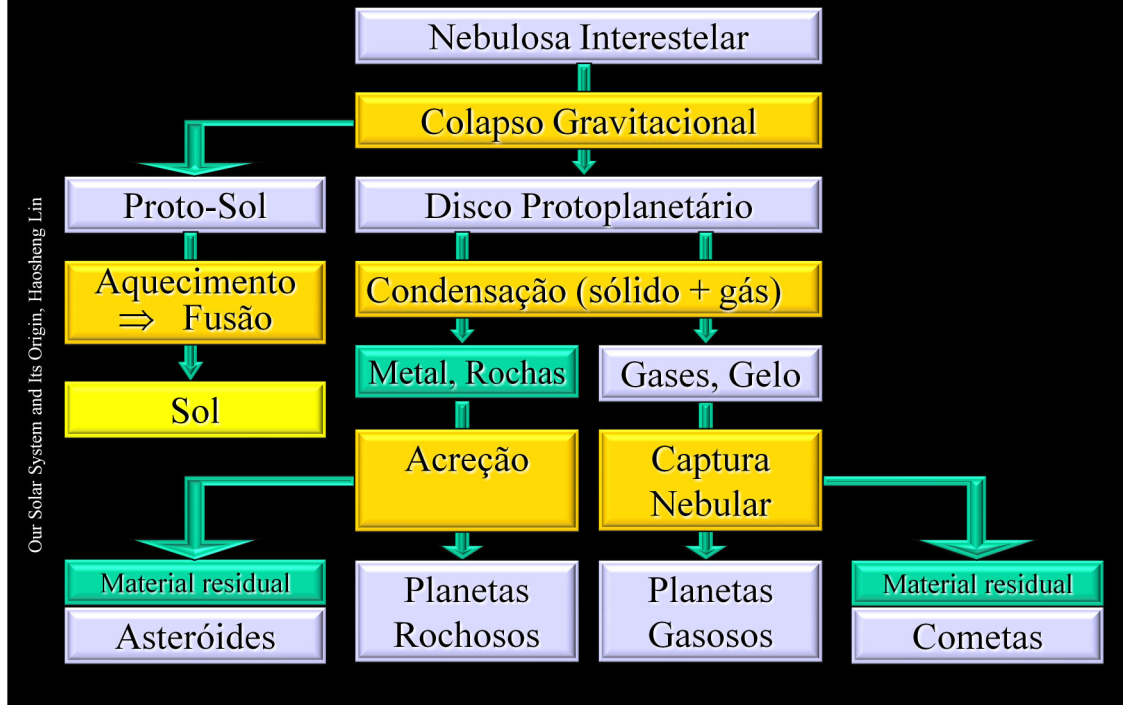
<http://www.astro.iag.usp.br/~sylvio/>



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

Esta lacuna 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.

## Teoria Nebular ou Protoplanetária



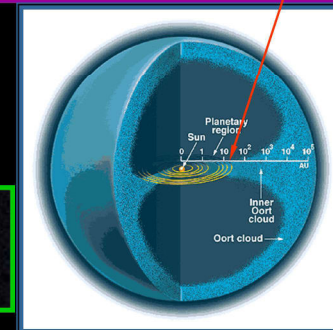
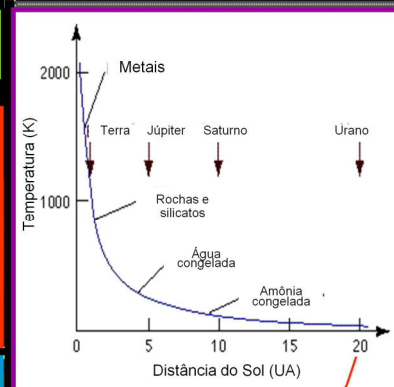
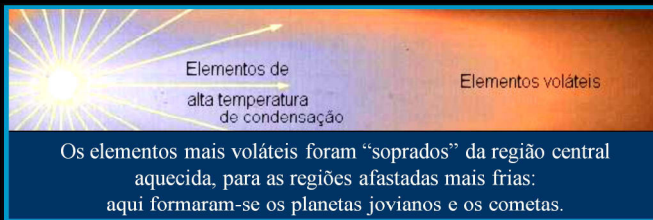
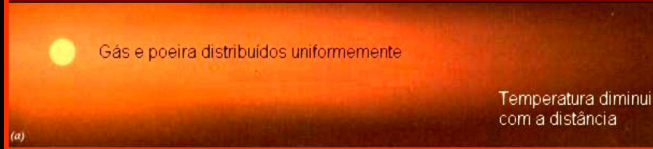
Resumo das fases e processo mais significativos da formação do SS.

# 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)

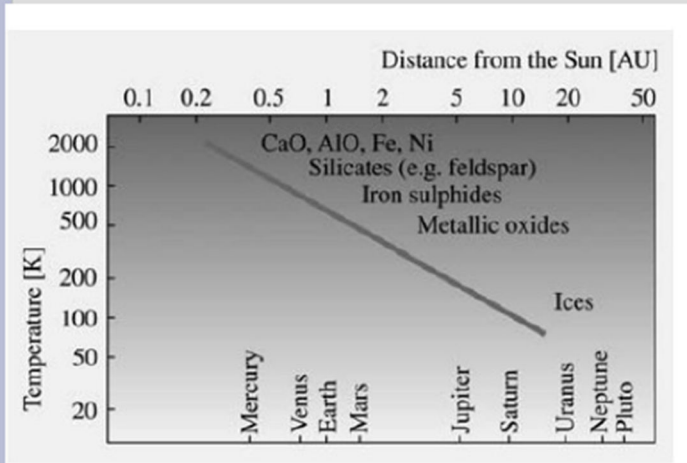
No início a matéria nebular estava distribuída uniformemente na nuvem. Gradativamente, a matéria era comprimida para o centro e aquecida: assim nasceu o **proto-Sol**.



Desde os primórdios da formação do Sol, a região circunvizinha era aquecida. Quanto mais quente o proto-sol se tornava, mais aquecida era essa região. A matéria volátil (gases) não sobrevivia nas regiões quentes, mas a matéria rochosa (grãos) sim. Essa é a explicação para a diferença de composição química entre os planetas. Os planetas rochosos estão próximos do Sol e os planetas gasosos estão mais distantes. O gráfico no canto superior direito ilustra a temperatura local em função da distância heliocêntrica e os materiais que resistem à temperatura e caracterizam a química do meio.

# 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 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.

Markus Boettcher, Ohio University

**Table 19-3** The Condensation Sequence

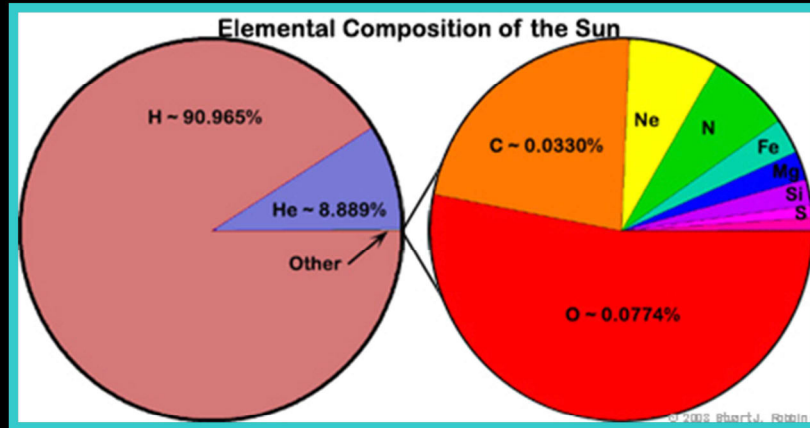
Temperature (K)	Condensate	Planet (Estimated Temperature of Formation; K)
1500	Metal oxides	Mercury (1400)
1300	Metallic iron and nickel	
1200	Silicates	
1000	Feldspars	Venus (900)
680	Troilite (FeS)	Earth (600) Mars (450)
175	H <sub>2</sub> O ice	Jovian (175)
150	Ammonia-water ice	
120	Methane-water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

Substâncias menos densas condensam a baixas temperaturas.

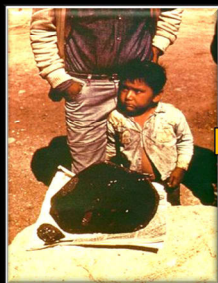


## Composição química do Sistema Solar

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



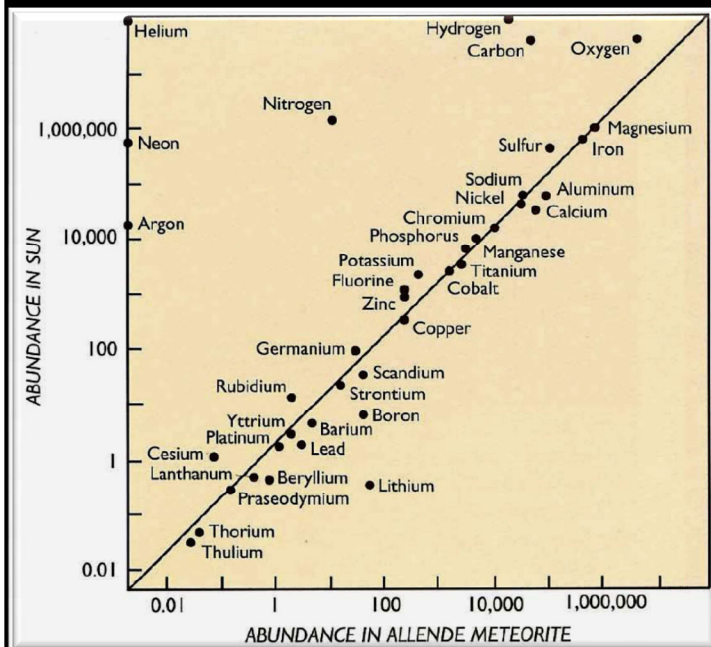
Meteoritos Carbonáceos



Todos os objetos se formaram de uma mesma nuvem primordial.

O Sol é feito de gás, assim como os planetas gasosos. Os planetas rochosos, assim como os satélites e asteroides são feitos de rocha. Os cometas contém rochas e gases congelados. Então, como podemos afirmar que todo o material do sistema planetário surgiu de uma única nuvem primordial? Os meteoritos da imagem são rochosos, ricos em carbono, mas não contém gases. Então, como compará-lo ao Sol?

## Composição química do Sistema Solar

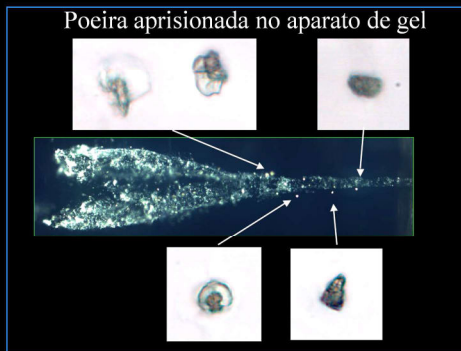


Condrito carbonáceo (23,85% de ferro), Pueblito de Allende, Allende, Chihuahua (México)

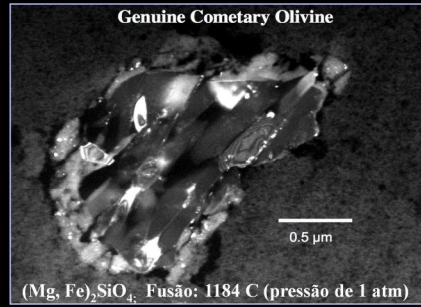
O meteorito Allende não contém gases como hidrogênio, hélio, argônio, neônio, nitrogênio, oxigênio e outros, que estão presentes no Sol. Mas o Sol contém elementos químicos densos como magnésio, cálcio, cobre, boro, berílio, tório e outros, que estão presentes no meteorito. Então, basta fazer a comparação entre as abundâncias desses elementos densos no Sol e no meteorito. Essa comparação é ilustrada na figura da esquerda, e o que se observa é um ajuste linear entre as abundâncias. Isso significa que todos esses elementos químicos vieram da mesma fonte. O que difere é a abundância. Se fizermos algo semelhante com planetas, satélites, asteroides e cometas chegaremos à mesma conclusão.

# Evidência de processo de mistura

Enos Picazzio  
IAGUSP  
Agosto 2006



## poeira do Wild 2

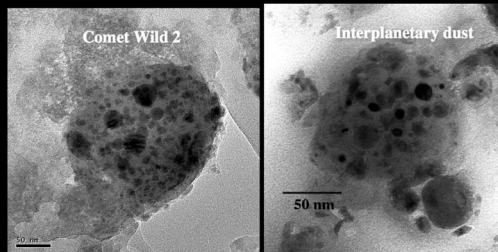


### Côndrulos:

esferóides  
milimétricos  
de olivina  
[(Mg,Fe)SiO<sub>4</sub>],  
e piroxênio  
[(Mg,Fe)SiO<sub>3</sub>]

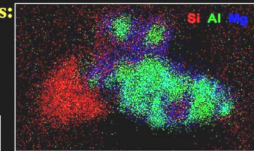
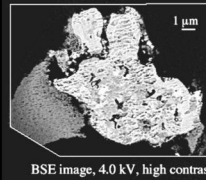
### GEMS ?

(Glass with Embedded Metal and Sulfides)

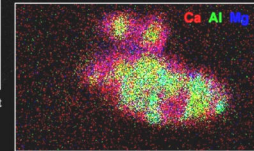


### SEM-EDS X-ray Maps: overlay maps

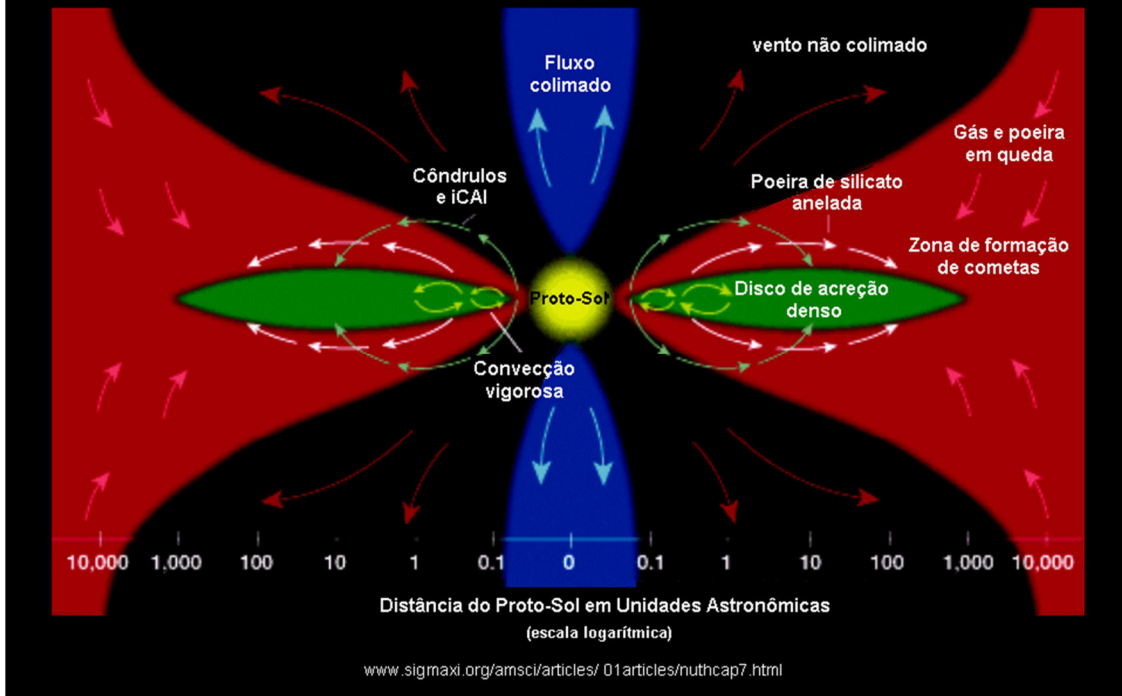
"Easter" C054.4.25.0  
potted butt in acrylic



EDS X-ray maps, 10 kV



Os cometas são feitos de rocha, água e gases, ambos congelados. Um corpo desses não sobreviveria em ambientes quentes. No entanto, material coletado na coma do cometa Wild 2 exibiu partículas de poeira de elevada temperatura de fusão, muito comum em alguns tipos de meteorito. Como explicar tal fato?



O mecanismo de formação estelar pode explicar tal fato. Os cometas formados em locais frios do disco protoplanetário, portanto longe do proto-Sol. As protoestrelas apresentam jatos bipolares de plasma aquecidos. Material rochoso do disco próximos desses jatos foram fundidos e arrastados pelos jatos para grandes distâncias e se agregaram aos cometas em formação.

## Acreção de sólidos e a formação de planetesimais

**Início:  
disco protoplanetário  
formando blocos  
sólidos**

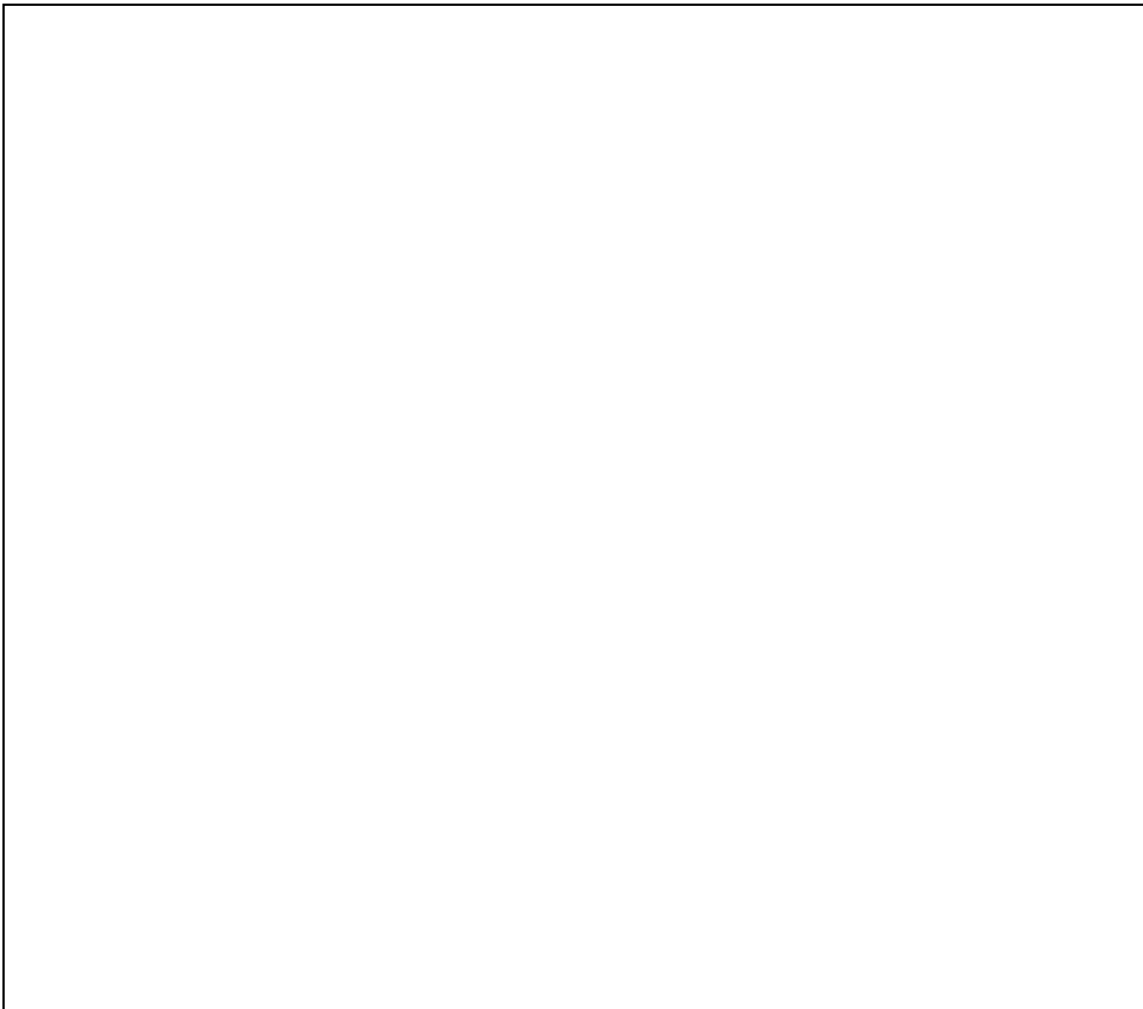
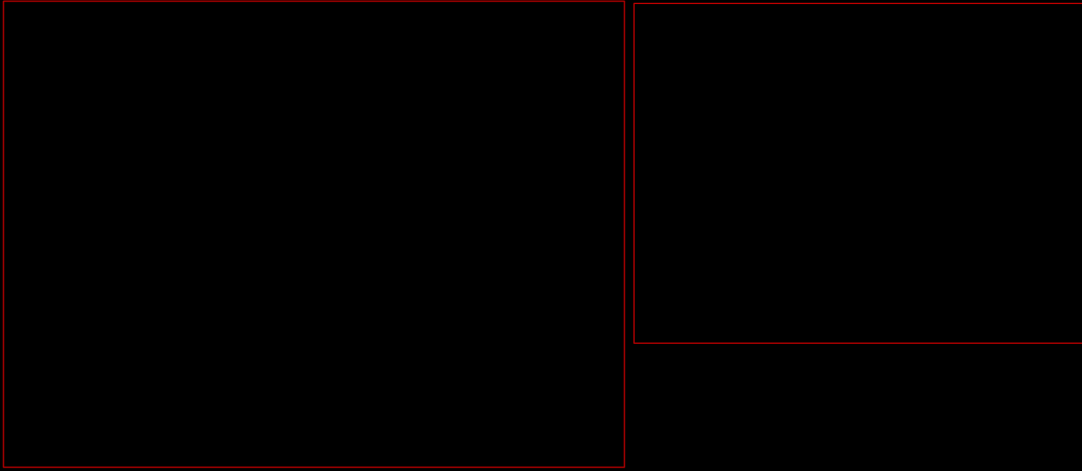


**Fase posterior:  
planetas se formando  
por acreção**

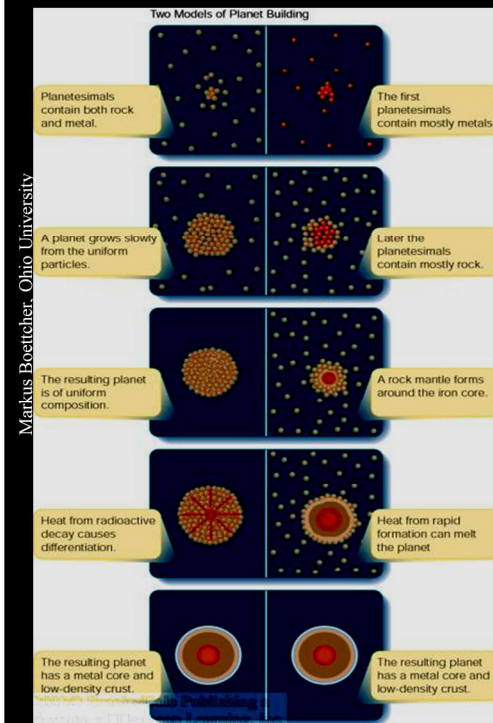


<http://www.maths.otago.ac.nz/~gregt/planetesimals.html>

## Acreção de sólidos e a formação de planetésimos



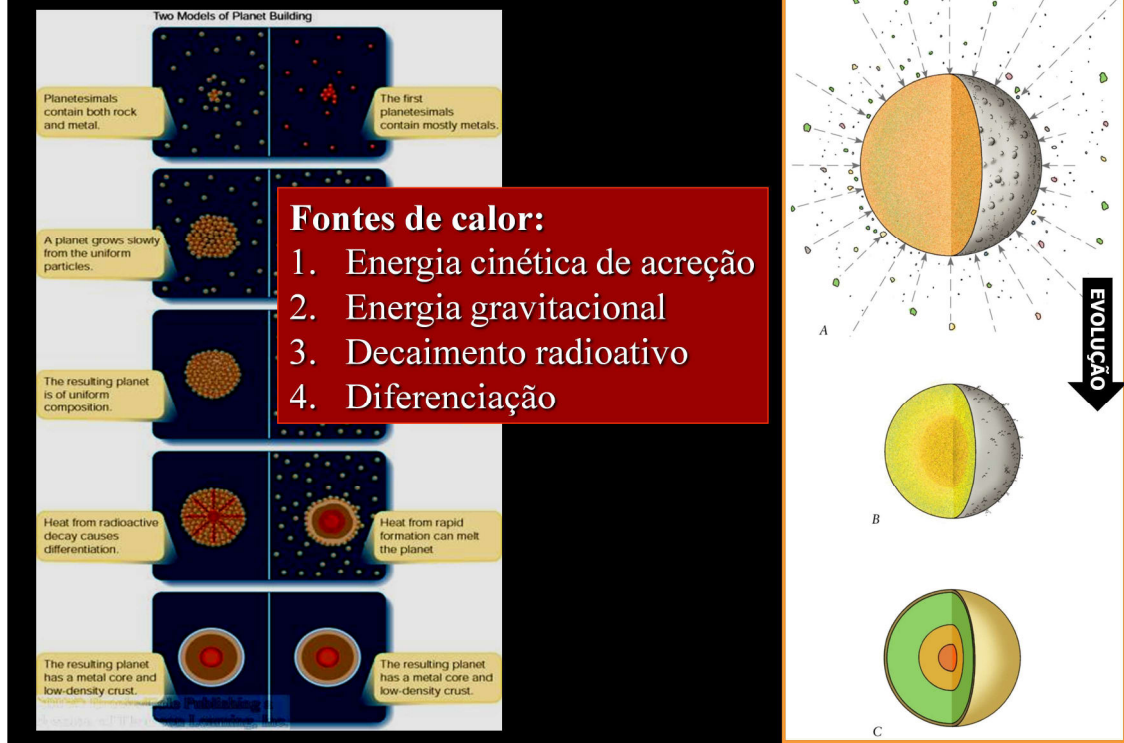
## Acreção de sólidos e a formação de planetesimos



Quando as 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



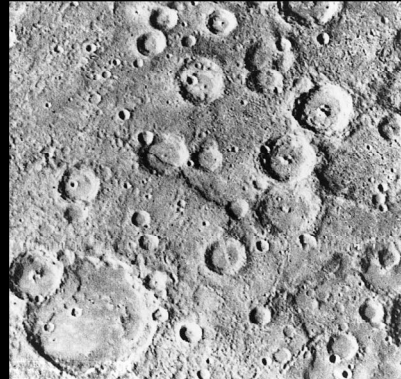
Durante a formação de um corpo de dimensões planetárias materiais de diferentes densidades são agregados. O calor gerado por diferentes processos físicos fundem esses materiais. Com o passar do tempo, os elementos menos densos deslocam-se em direção à superfície e os mais densos se deslocam em direção ao centro. Esse processo é chamado “diferenciação”. Grandes corpos são diferenciados porque geram muito calor e demoram muito tempo para resfriarem.



## 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

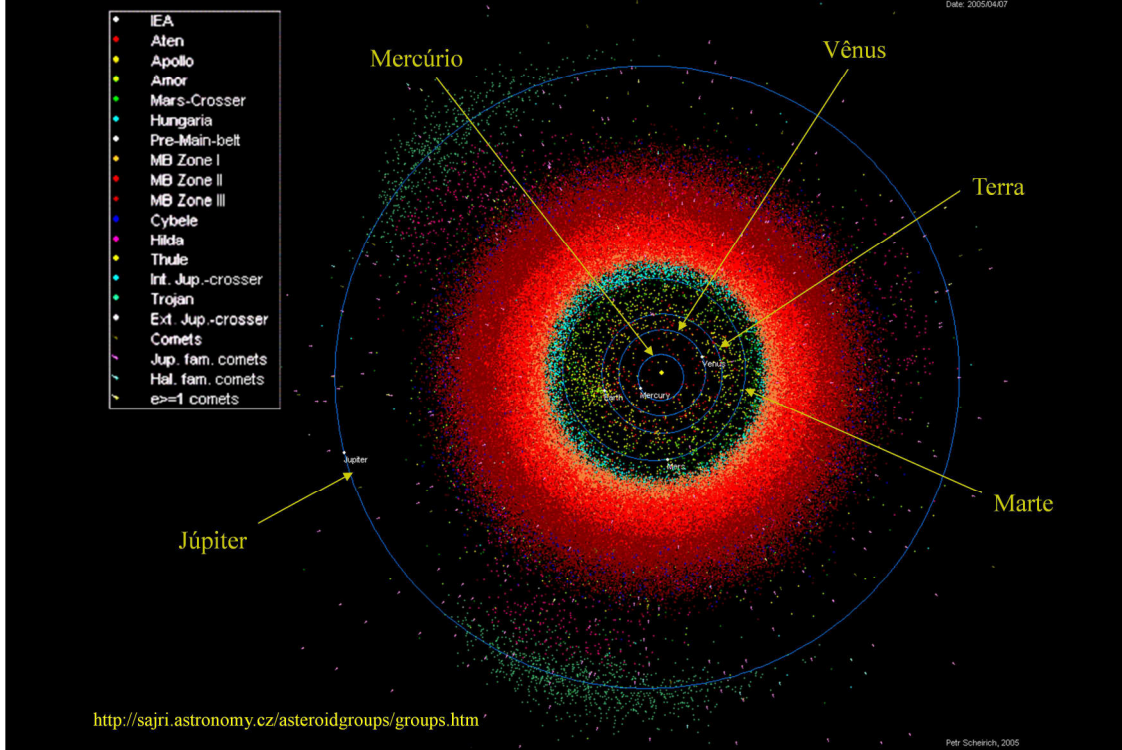
Markus Boetteler, Ohio University



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

# Asteróides

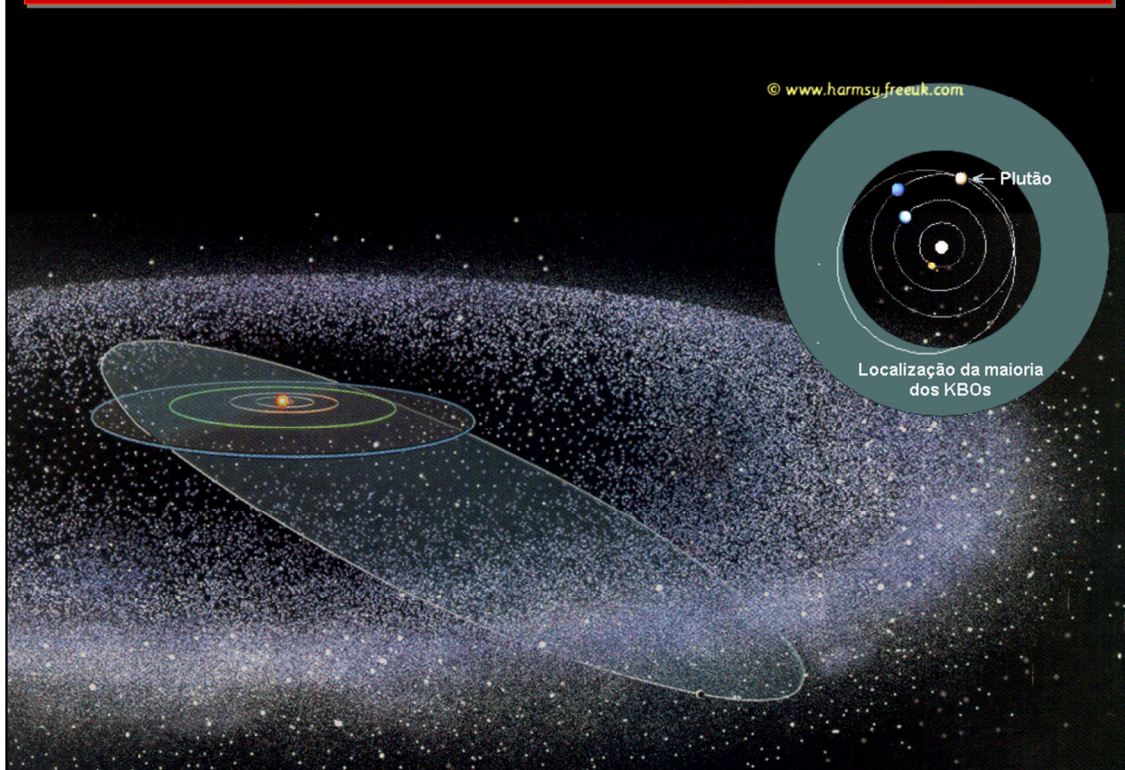
Enos Picazzio  
IAGUSP  
Agosto 2006



A região entre Marte e Júpiter é fortemente influenciada pela ação gravitacional do planeta gigante. Isso impede a formação e sobrevivência de um corpo planetário. Essa região é habitada por asteroides e conhecida por Cinturão Principal dos asteroides. Dinamicamente, eles se distribuem em famílias com órbitas típicas. Algumas famílias adentram as regiões internas dos planetas rochosos.

## Cometas e Objetos do Cinturão de Edgeworth-Kuiper

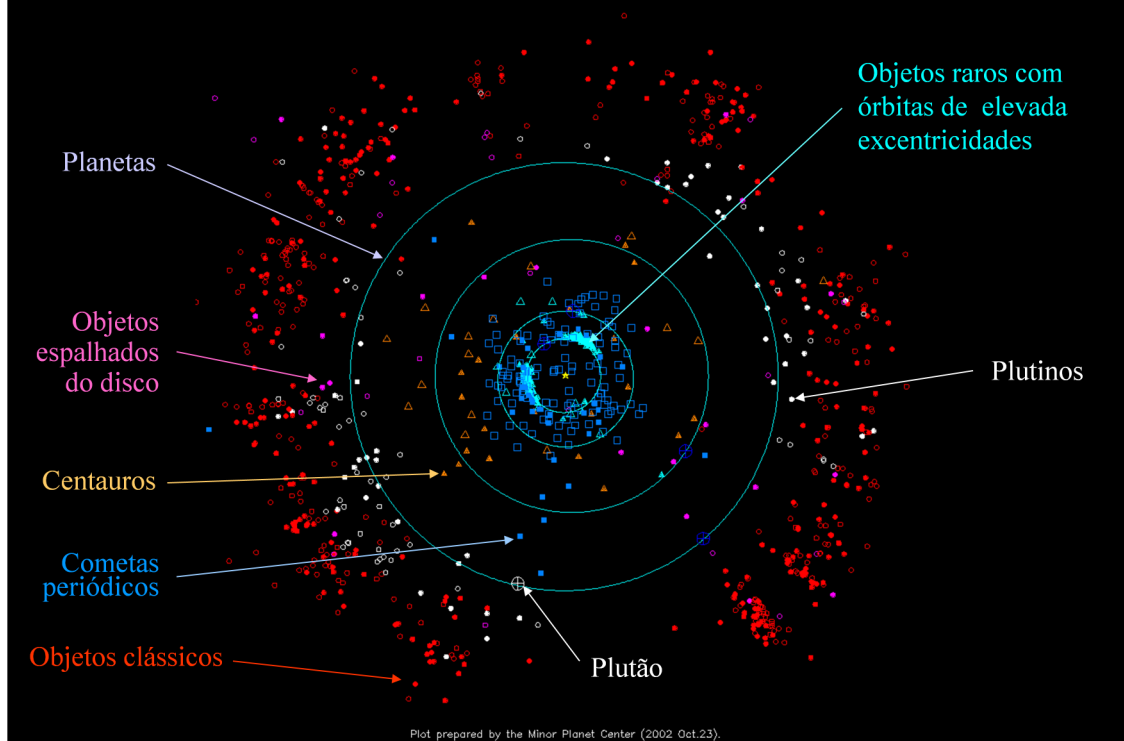
Enos Picazzio  
IAGUSP  
Agosto 2006



Adiante de Netuno existe um anel de corpos congelados, formados por rochas e água e gases congelados. O periélio (ponto orbital mais próximo do Sol) de Plutão está na parte interna do cinturão e o afélio (ponto orbital mais distante do Sol) localiza-se na parte externa do cinturão.

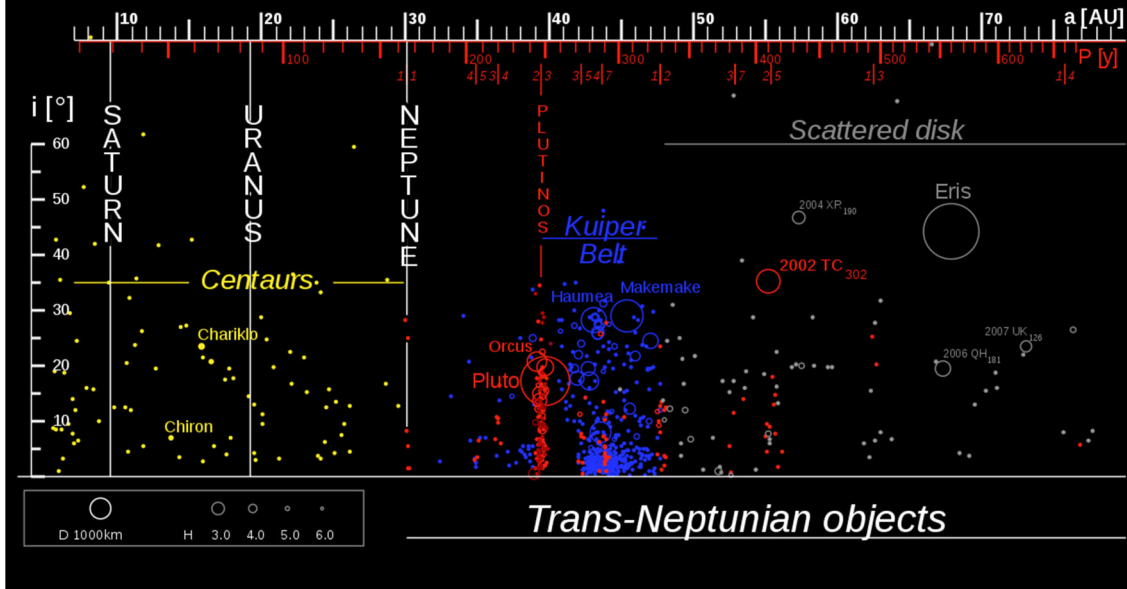
## Cometas e Objetos do Cinturão de Edgeworth-Kuiper

Enos Picazzio  
IAGUSP  
Agosto 2006



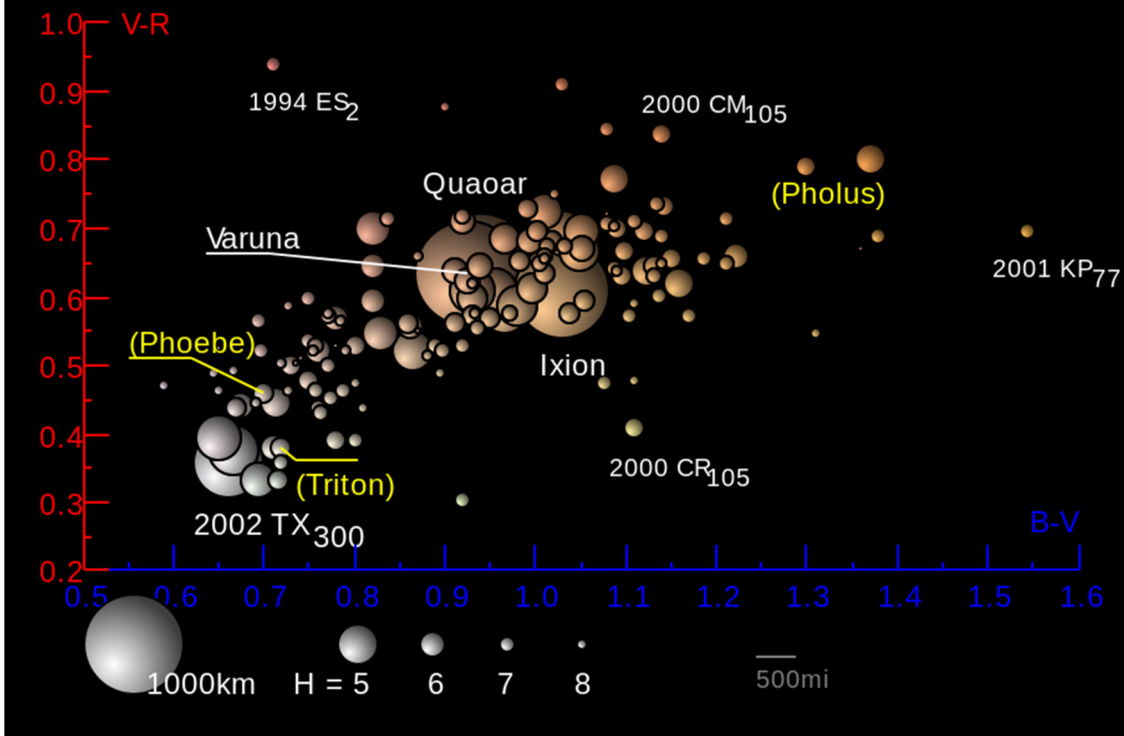
Inúmeros corpos de dimensões diversas habitam o cinturão Kuiper e eles também podem ser divididos em famílias ou tipos, de acordo com as características dinâmicas e/ou composição química. Na órbita de Plutão há muitos objetos, com características dinâmicas e químicas semelhantes. Eles fazem parte da família Plutinos.

## Corpos transnetunianos



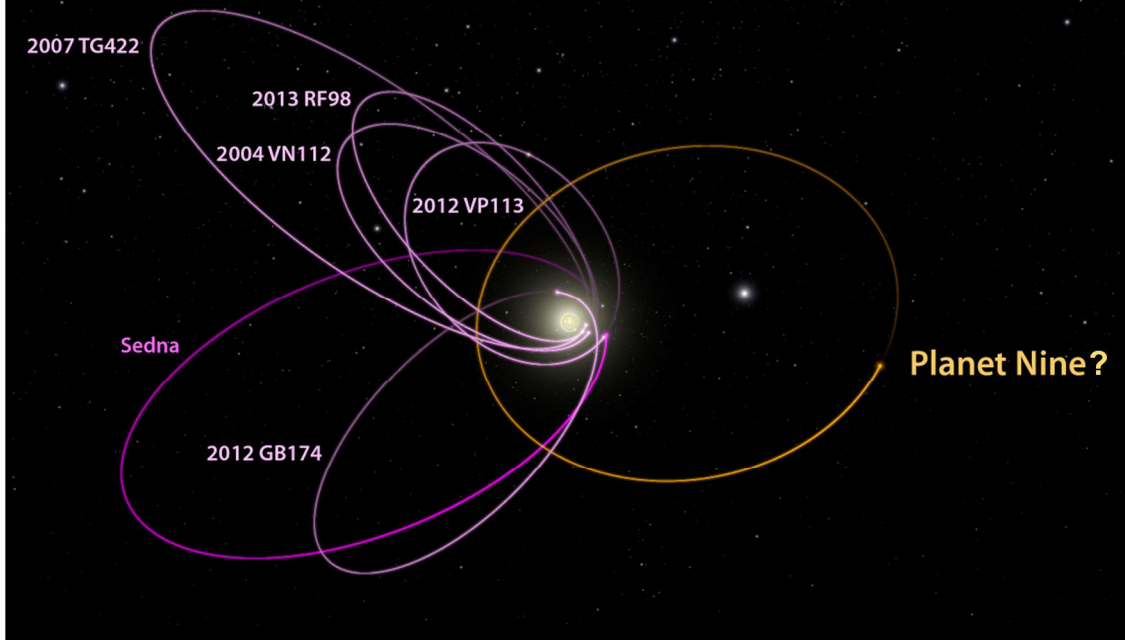
A região adiante do Netuno é denominada região transnetuniana. O cinturão Kuiper pertence a ela. Essa região distante é povoada por corpos congelados e planetas-anões. Deve haver uma infinidade de corpos nessa região, mas são difíceis de serem vistos porque estão muito distantes e possuem brilho muito fraco mesmo para os mais potentes telescópios. A região espectral do infravermelho (emissão térmica) é mais apropriada para a detecção desses objetos. Boa parte dos estudos é baseada na dinâmica orbital, ou seja, analisando as órbitas dos objetos conhecidos pode-se inferir propriedades importantes, levando até mesmo a uma estimativa da massa total dessa população.

## Corpos transnetunianos



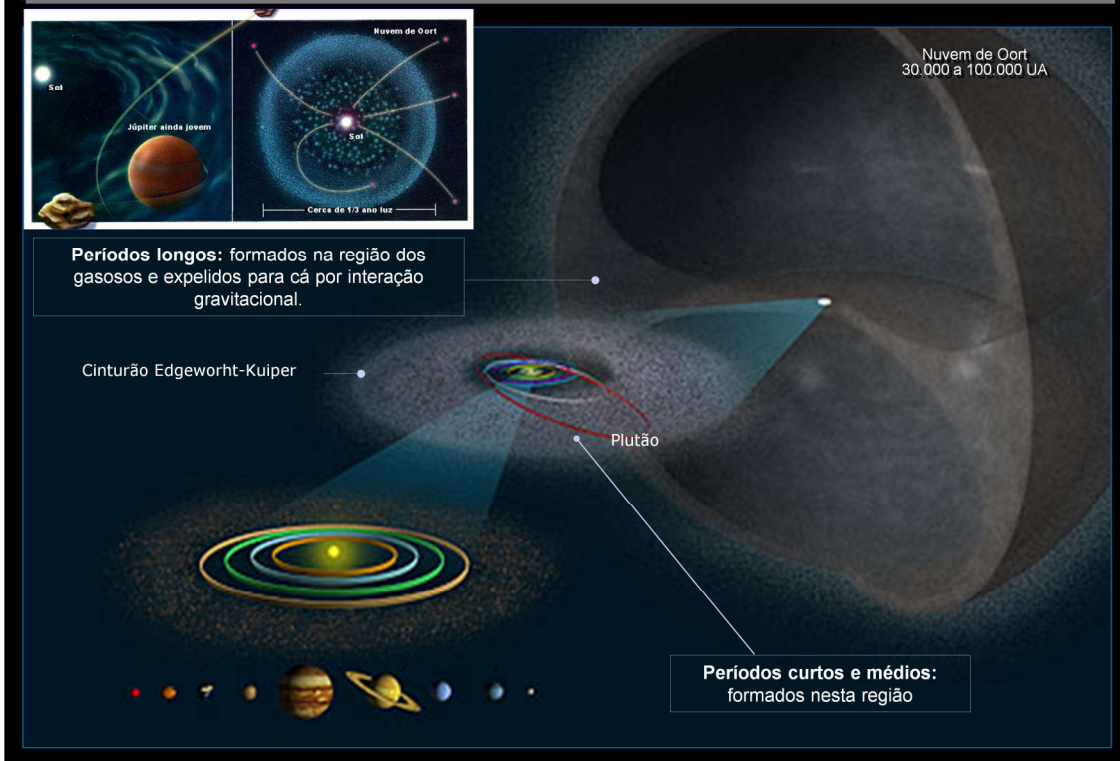
Alguns dos objetos conhecidos são mostrados no gráfico acima, onde ordenada e abscissa representam índices de cor das bandas espectrais B (blue), V (visual) e R (red). Cores claras representam material de alta refletividade (geralmente provocada pelo gelo de água); cores escuras representam material de baixa refletividade (materiais absorvedores). Os tamanhos são indicados em km.

## Corpos transnetunianos



A distribuição das órbitas dos objetos designados (por ex. 2012 GB174) são ilustradas. São órbitas elípticas bem alongadas (elevada excentricidade) e distribuídas no espaço. Estão fora do plano da eclíptica. Um estudo dinâmico revela que elas podem ter adquirido esse formato e distribuição em consequência de um corpo massivo e desconhecido, representado pela órbita de cor laranja. Esse corpo teria dimensão e massa de planeta. Esse poder ser o nono planeta, ainda não detectado. Há estudos que indicam a possibilidade de ser um grupo de objetos ainda desconhecidos e não um objeto único o responsável pelas órbitas espalhadas.

## Cometas: regiões de acúmulo

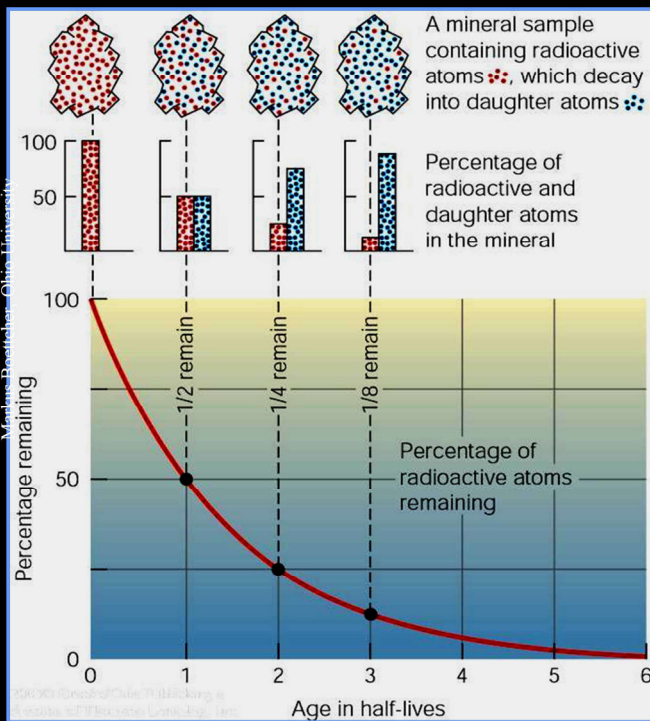


A matéria está distribuída conforme mostra a ilustração. Entre Marte e Júpiter estão os asteroides do Cinturão Principal, e adiante de Netuno os objetos transnetunianos, parte deles centrada em uma anel conhecido por Cinturão Kuiper (ou de Kuiper). Bem adiante, há uma imensa nuvem esférica composta de cometas, conhecida por Nuvem Oort (ou de Oort). Essa nuvem chega até um quarto da distância entre o Sol e a Próxima Centauro (estrela mais próxima).

Mas, afinal, qual é o mecanismo responsável pela existência da nuvem Oort. Há estudos que mostram que o tempo necessário para que a matéria primordial que preenchia a região ocupada pela nuvem se concentrasse em uma miríade de corpos pequenos (cometas) seria maior que a idade do SS. O volume da nuvem é enorme e a quantidade de matéria é limitada. Uma explicação mais plausível e melhor suportada por observações é que os cometas que se formaram perto dos planetas gigantes, região rica em gás, foram ejetados para grandes distâncias ou caíram nos planetas. Esse processo dinâmico provocado pela força gravitacional dos planetas é isotrópico, ou seja, não tem direção preferencial, por isso resultou em uma nuvem esférica. Há evidências químicas que corroboram com essa teoria.



# Idade do Sistema Solar



Sol e planetas têm aproximadamente a mesma idade

Idades das rochas são obtidas através do decaimento radioativo

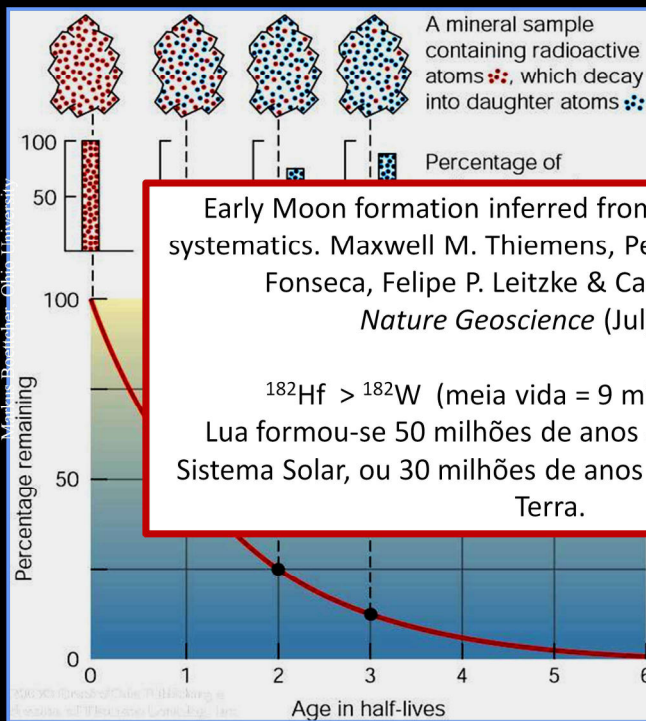
Medidas de abundância relativa entre elemento instável e estável revela data de formação da rocha.

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

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

Como comprovamos a idade do SS?

# Idade do Sistema Solar



Early Moon formation inferred from hafnium–tungsten systematics. Maxwell M. Thiemens, Peter Sprung, Raúl O. C. Fonseca, Felipe P. Leitzke & Carsten Münker, *Nature Geoscience* (Jul, 2019)

$^{182}\text{Hf} > ^{182}\text{W}$  (meia vida = 9 milhões de anos)

Lua formou-se 50 milhões de anos após a formação do Sistema Solar, ou 30 milhões de anos após o surgimento da Terra.

Sol e planetas têm aproximadamente a mesma idade

Idades das rochas são obtidas através do decaimento radioativo

Idades relativas e estáveis da rocha.

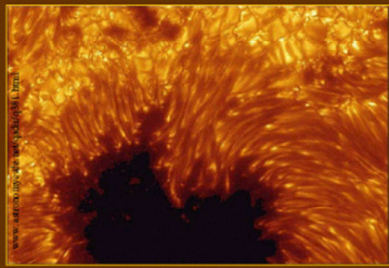
Idades revelam a história de anos.

Isótopo	Meia-vida
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

Como comprovamos a idade do SS?

# A presença da água

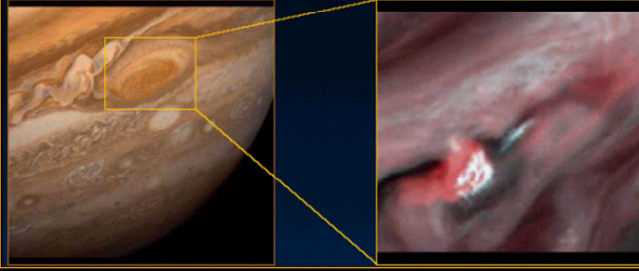
## SOL



Regiões mais frias da atmosfera solar, cerca de 4.500 K

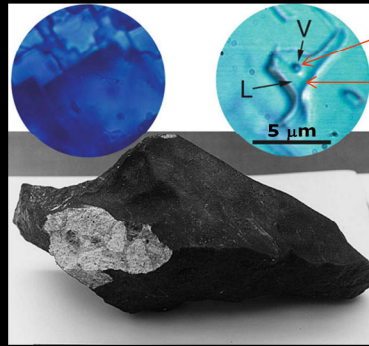
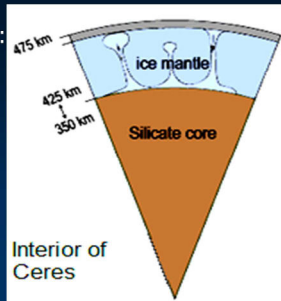
Espectro no IV marcado por linhas de absorção da água

## Tempestade de nuvem d'água em Júpiter



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

TERRA:  
total 1,4 bilhão de km<sup>3</sup>, água doce: 41 milhões de km<sup>3</sup>



Bolha

Água salgada

Meteorito Monahans (condrito ordinário)

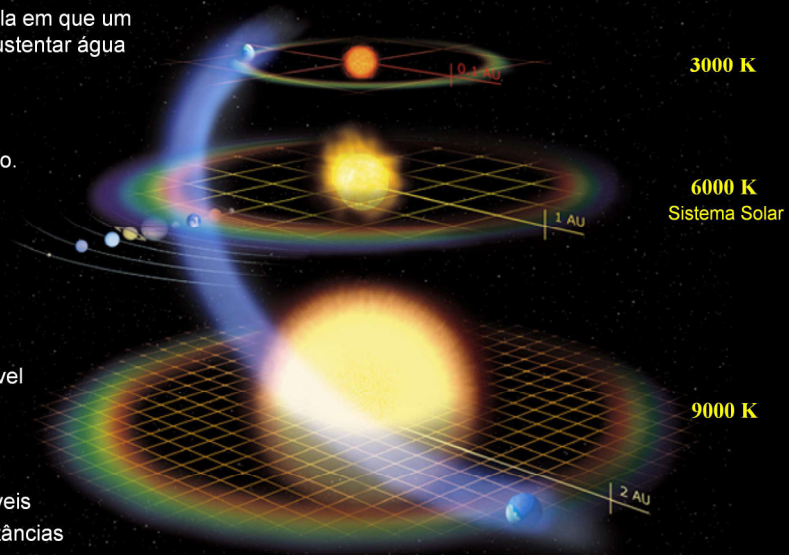
## Zona Habitável

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.

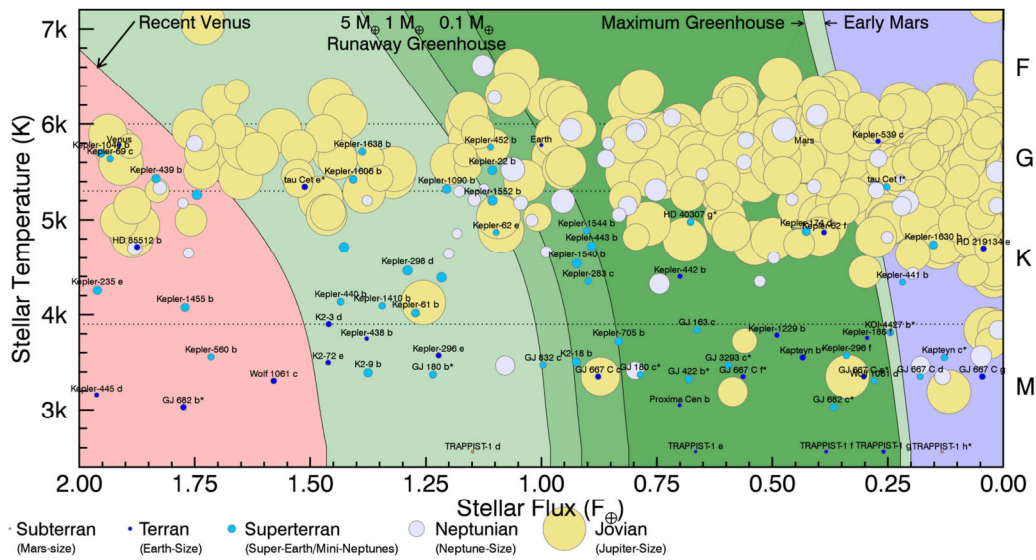
Atualmente o Sol brilha 30% que no passado. Portanto, sua zona habitável já esteve mais próxima dele e estará mais distante no futuro.

O limite externo da zona habitável pode se estender devido à presença de  $\text{CO}_2$  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.

# 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 Arcibo

## HABITABLE EXOPLANETS CATALOG

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

# De onde veio a água da Terra?

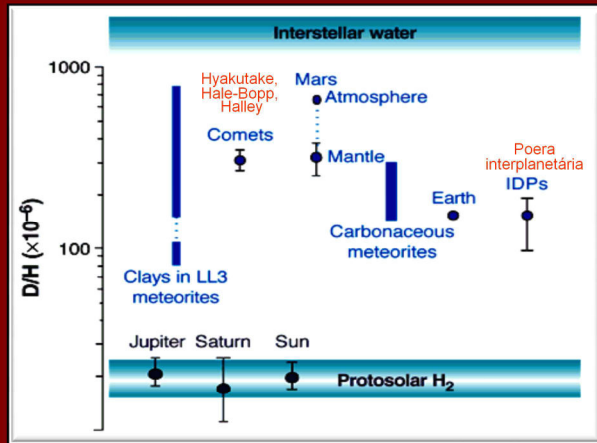
Atualmente



No final da era de bombardeamento



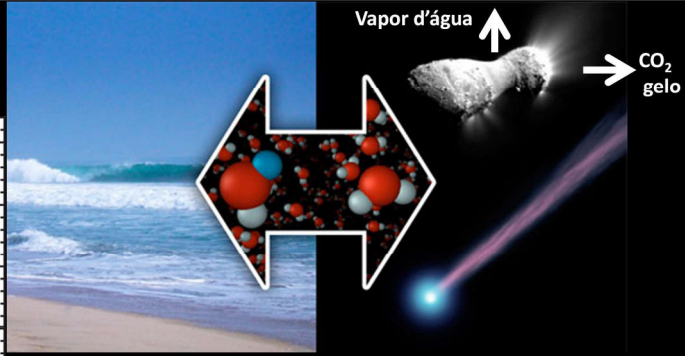
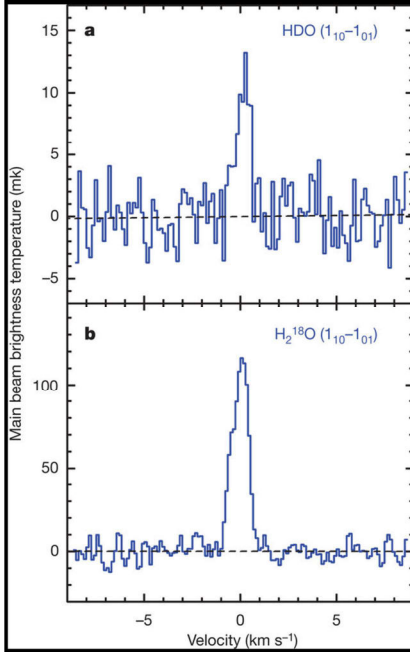
Hoje a Terra é recoberta por água, mas houve época em que a temperatura era elevada demais para que isso ocorresse. De onde veio a água? A taxa de D/H mostra que esta pergunta ainda carece de resposta conclusiva.



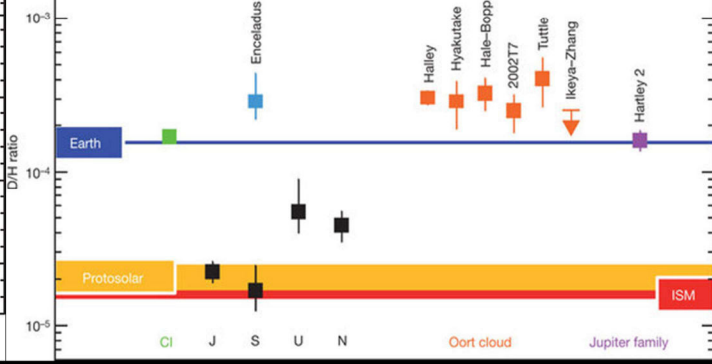
**Inigma isotópico:** distribuição da composição isotópica do hidrogênio.  
François Robert, *Science* 10 August 2001, Vol. 293, no. 5532, pp. 1056 – 1058.

# De onde veio a água da Terra?

## 103P/Hartley 2



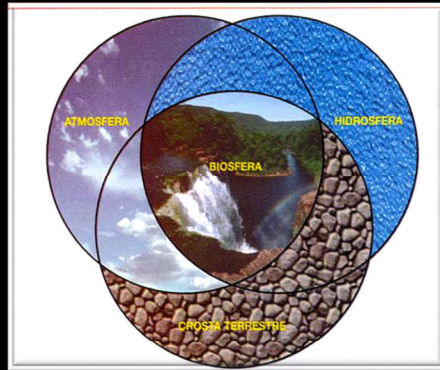
Nature 478, 218–220 (13 October 2011) doi:10.1038/nature10519



## 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 e o proteja de radiação maléfica à vida (UV, raios X).
- Deve possuir magnetosfera, para protegê-lo da radiação corpuscular da estrela (vento 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.**