

Conceitos Fundamentais da Física do Sistema Solar (MPA5004)  
Enos Picazzio (IAGUSP)

<http://www.nasa.gov/vision/universe/stargalaxies/betapic.html>



## FORMAÇÃO E ESTRUTURA DO SISTEMA SOLAR

01

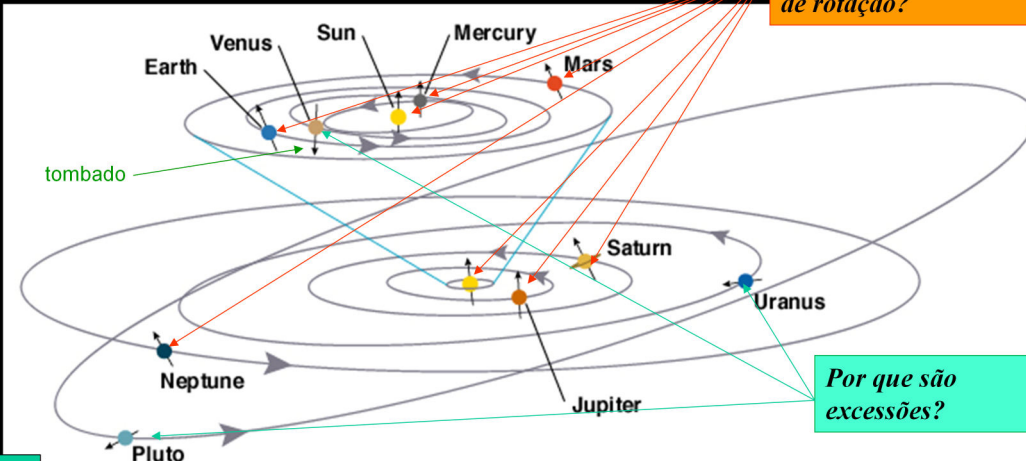
NÃO HÁ PERMISSÃO DE USO PARCIAL OU TOTAL DESTE MATERIAL PARA OUTRAS FINALIDADES.

## 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 transeptuniana, as órbitas são altamente excêntricas e inclinadas.

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



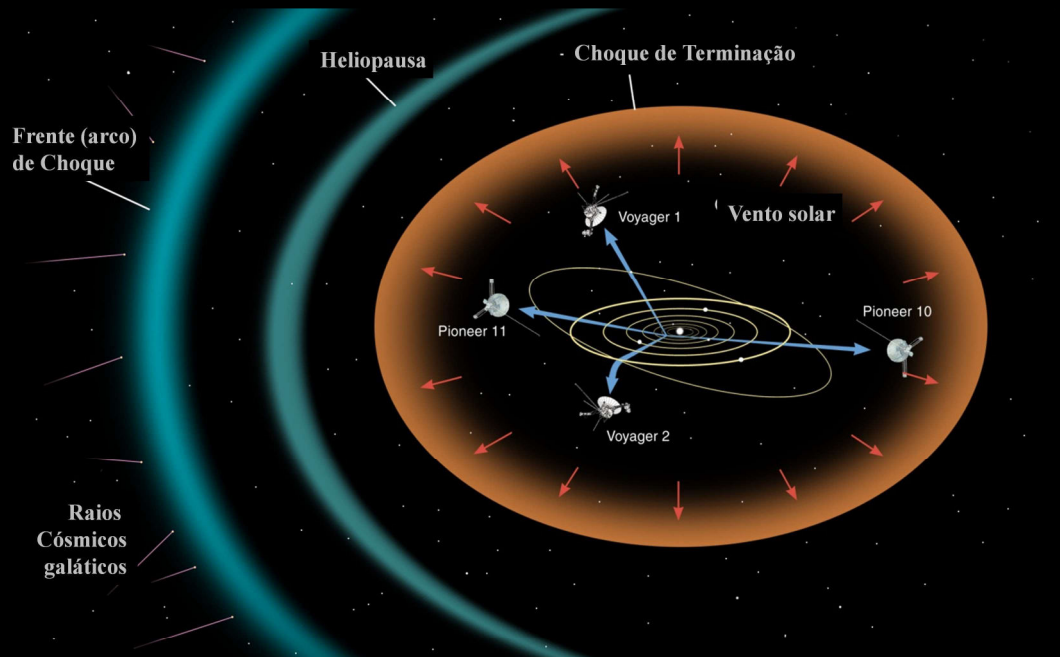
02

pyright © Addison Wesley

Our Solar System and Its Origin, Haosheng Lin

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°) e Netuno (tombado em 90°). Deve haver uma razão para isso.

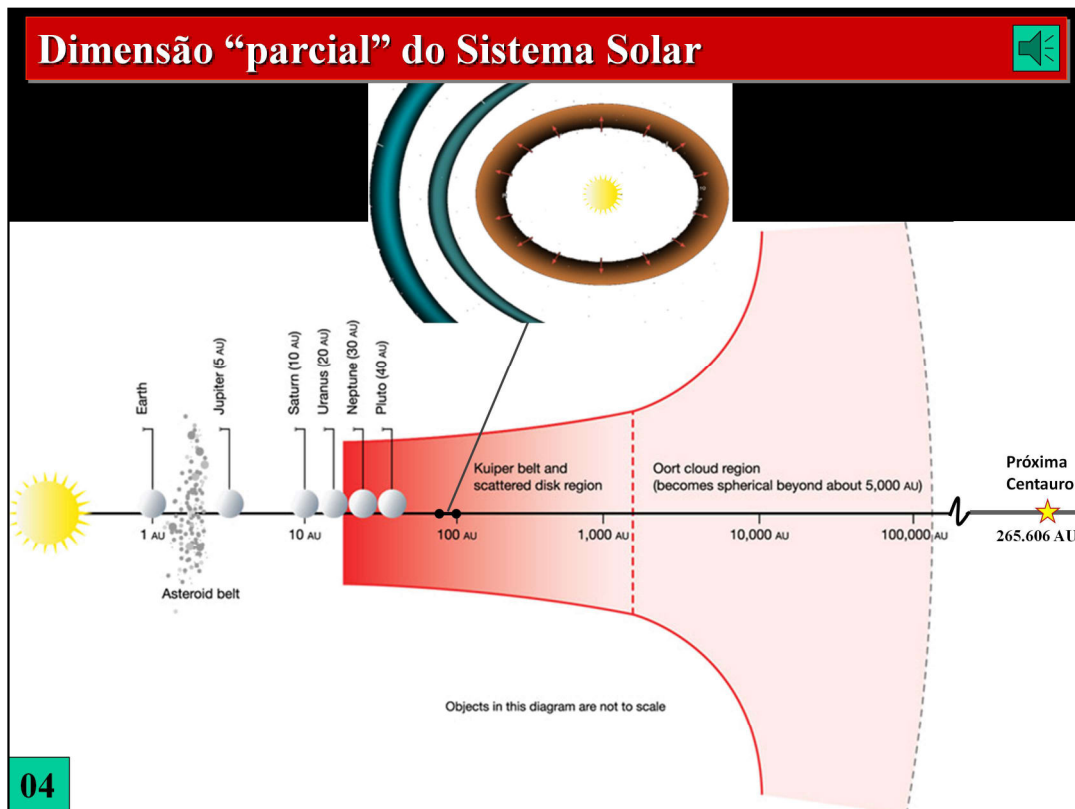
## Dimensão “parcial” do Sistema Solar



03

Vivemos na bolha solar

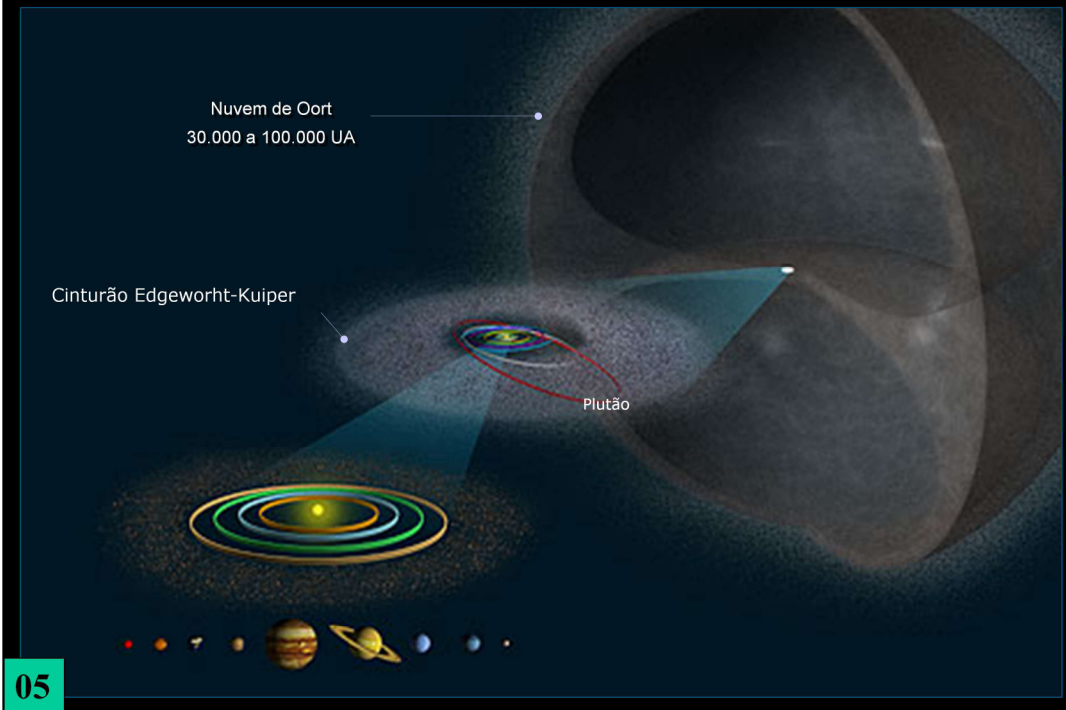
Todos os planetas estão envolvidos por uma bolha de plasma (gás quente e magnetizado) oriunda do Sol. Essa bolha protege a região interna do SS dos raios cósmicos galácticos (partículas de elevada energia que se movem em velocidades próxima a da luz). Com o movimento do Sol em torno do núcleo da Via 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.



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



## 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 de  $\frac{1}{4}$  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.

## 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 <sup>3</sup> )	Orbital Period	Rotation Period	Axis Tilt	Average Surface (or Cloud Top) Temperature <sup>†</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>‡</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>‡</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>‡</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>‡</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 e Moderna)*

*Forças de Maré*

*Acreção*

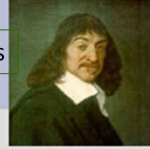
07

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.

## 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.



## 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.



## 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;





## 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);**

## 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.

## Teorias de Força de Maré - Revisitada

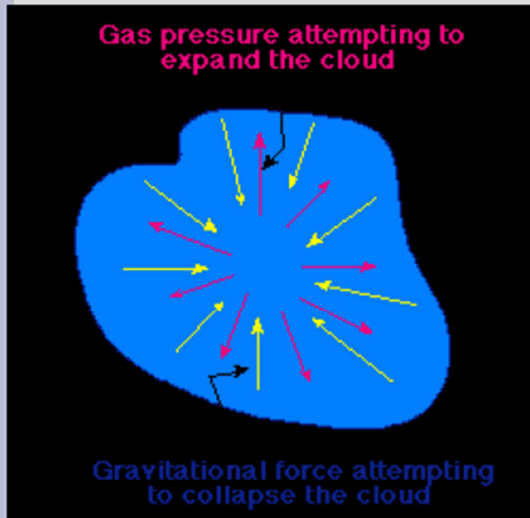


- Na década de 30 surgiram modelos que sugerem que o Sol inicialmente fazia parte de um sistema binário e que os planetas se originaram da companheira;
- Na década de 60 Wolfson sugeriu que o encontro entre o Sol e uma proto-estrela e um filamento da proto-estrela condensou em planetas;
- Este tem a 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)

# Teoria nebular moderna

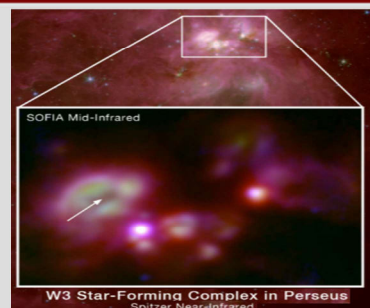
Baseada na Teoria Original de Laplace – Sol e Planetas foram formados quase simultaneamente.



Massa da nuvem primordial =  
Massa de Jeans  $> 10^5 M_{\text{sol}}$

A nuvem colapsa gravitacionalmente.

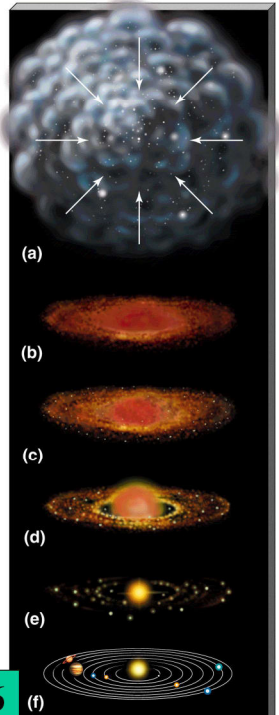
Força gravitacional x pressão



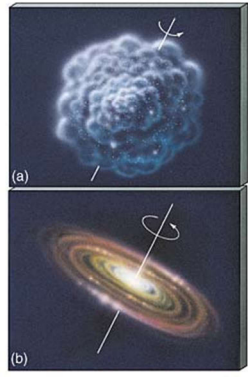
15 <http://www.if.ufrgs.br/~tiberio/disciplinas/fis02010/aula13.pdf>

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).

## Contração Nebular e a Formação dos Planetas



16



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).

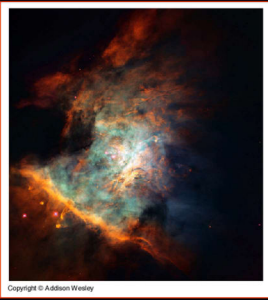
No seu plano equatorial forma-se um disco de matéria, dele surgirão planetas e demais corpos.

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

## 1. **Aquecimento** $\Rightarrow$ Proto-Sol $\Rightarrow$ 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.

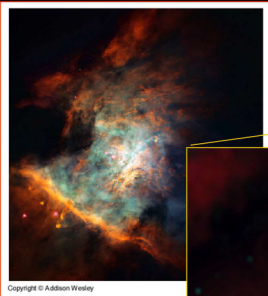
## 2. **Rotação** $\Rightarrow$ uniformiza movimentos aleatórios

Conservação do momento angular faz material em queda aumentar gradativamente a rotação quanto mais se aproxima do centro da nuvem.

## 3. **Achatamento** $\Rightarrow$ 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 com aumento de pressão (de
2. **Rotação**  
Conservação gradativa
3. **Achatamento**  
forma de caótico (a

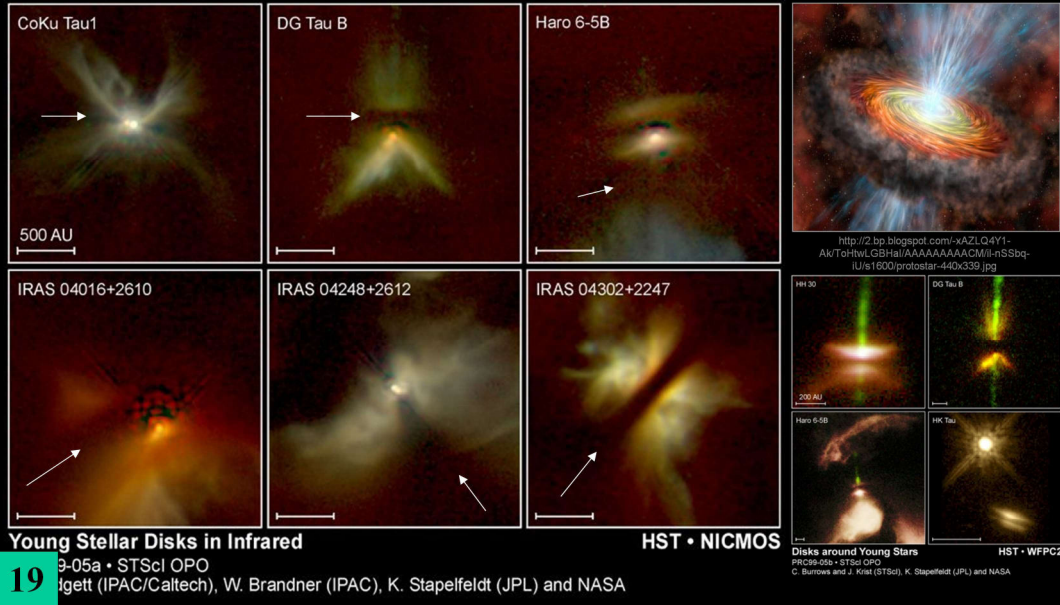
18



## Sistemas Planetários em Formação

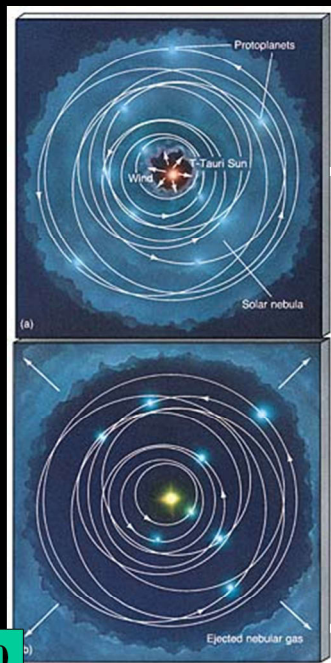


Formação de disco protoplanetário durante a contração nebular também é observada em estrelas em formação. A posição do disco é indicada nas imagens.



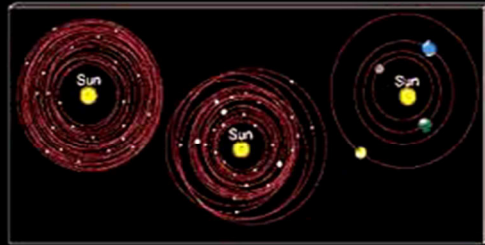
Vemos aqui vários casos conhecidos de nascimento de estrelas com o disco protoplanetário. A protoestrela está no centro. Ainda não é visível porque a matéria circundante bloqueia a luz estelar. O disco em torno da estrela (disco protoplanetário) aparece como zona escura (posição da setas). O modelo teórico 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 colisão é fundamental para o processo de acreção (aglutinação de matéria por atração gravitacional).

Collision of Planetesimals In A Protoplanetary Disk



20

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.

## 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

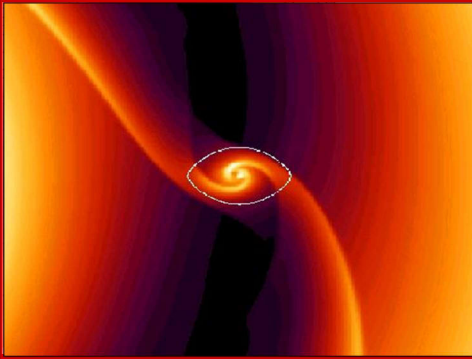
**Planetas terrestres**

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

Planetas podem crescer por acúmulo gravitacional de material de nuvem

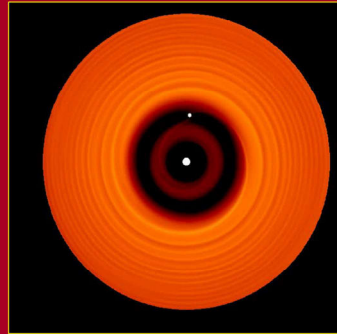
**Planetas gasosos**

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



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.

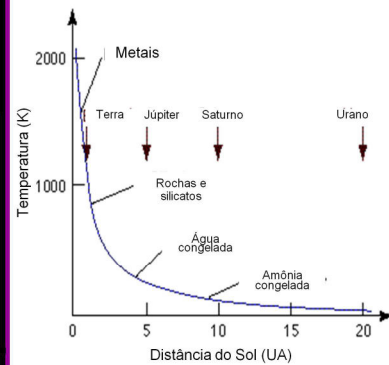
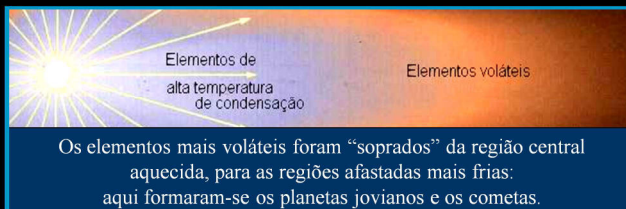
Este furo no disco retarda o processo da formação do planeta. Essas ondulações, tal como em torno de um barco, retardam o movimento do planeta, lenta e continuamente, deslocando-o para o centro do disco, num movimento espiral em direção à estrela.

## Sequência de condensação

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**.



**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)

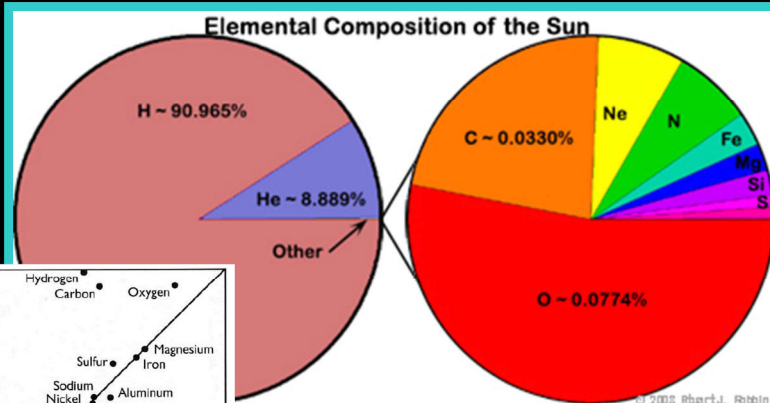
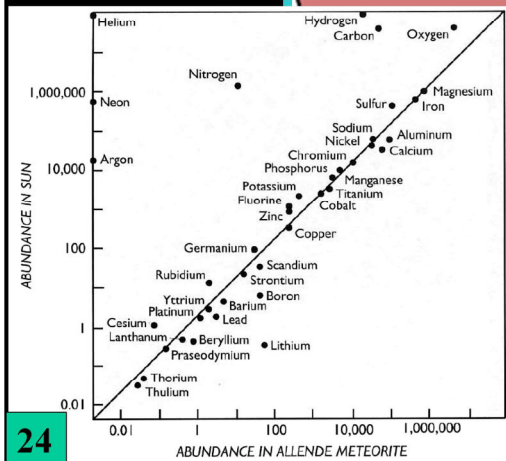
23

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.



## Composição química do Sistema Solar

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



Meteorito Carbonáceo Allende



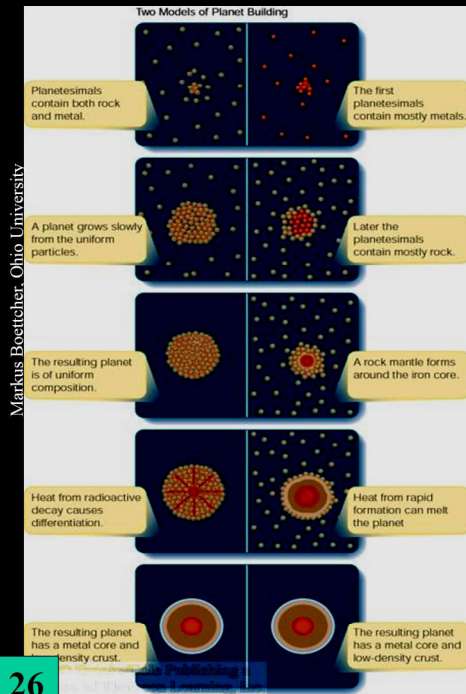
O Sol é feito de gás, assim como os planetas gasosos. Os planetas rochosos, assim como os satélites e asteroides são feitos de rocha. Os cometas contém rochas e gases congelados. Então, como podemos afirmar que todo o material do sistema planetário surgiu de uma única nuvem primordial? Os meteoritos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

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.

## Acreção de sólidos e a formação de planetésimos

25

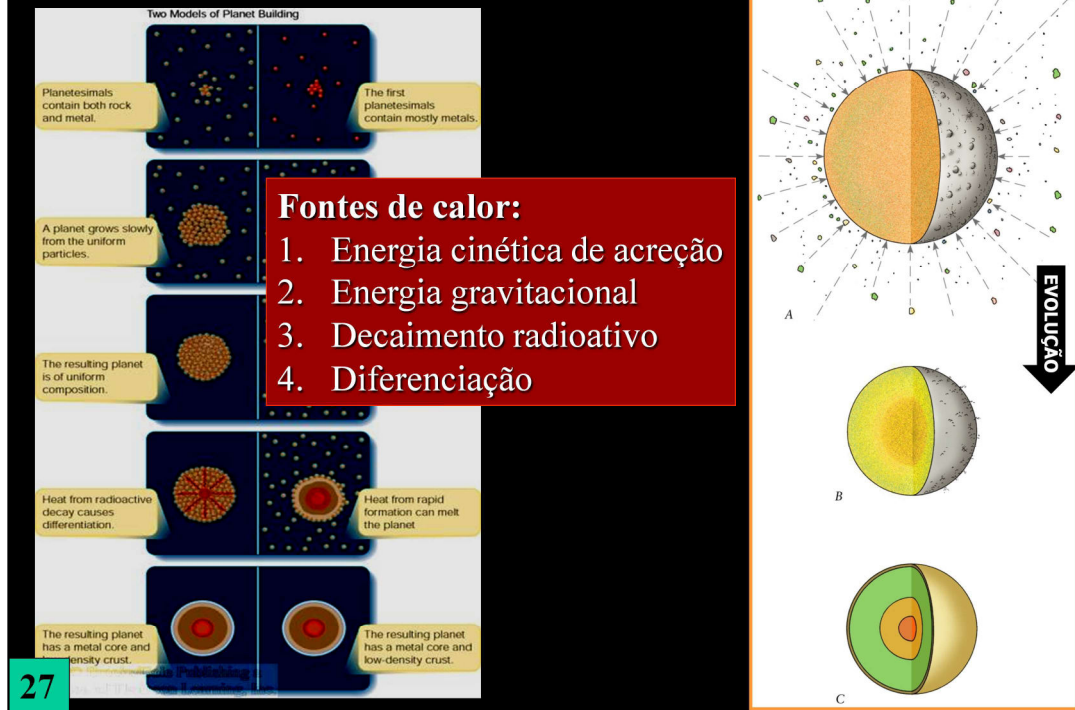
## Acreção de sólidos e a formação de planetesimos



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

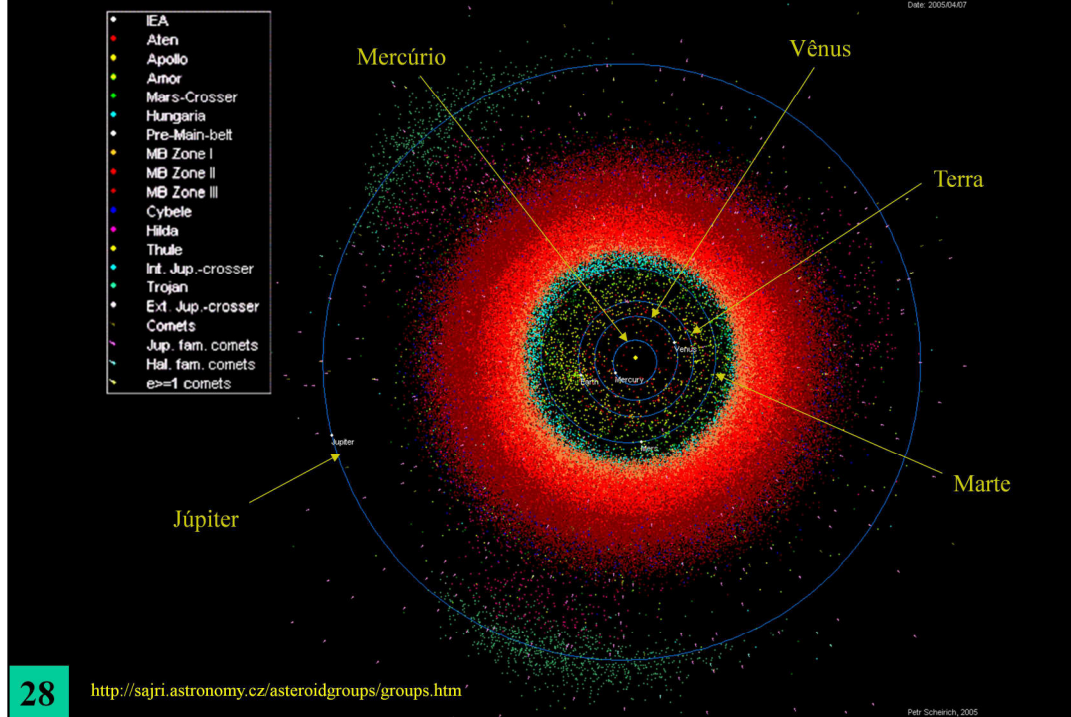
Os planetas terrestres têm metais pesados concentrados nos núcleos, e substâncias menos densas no manto.

## Diferenciação dos planetas terrestres



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.

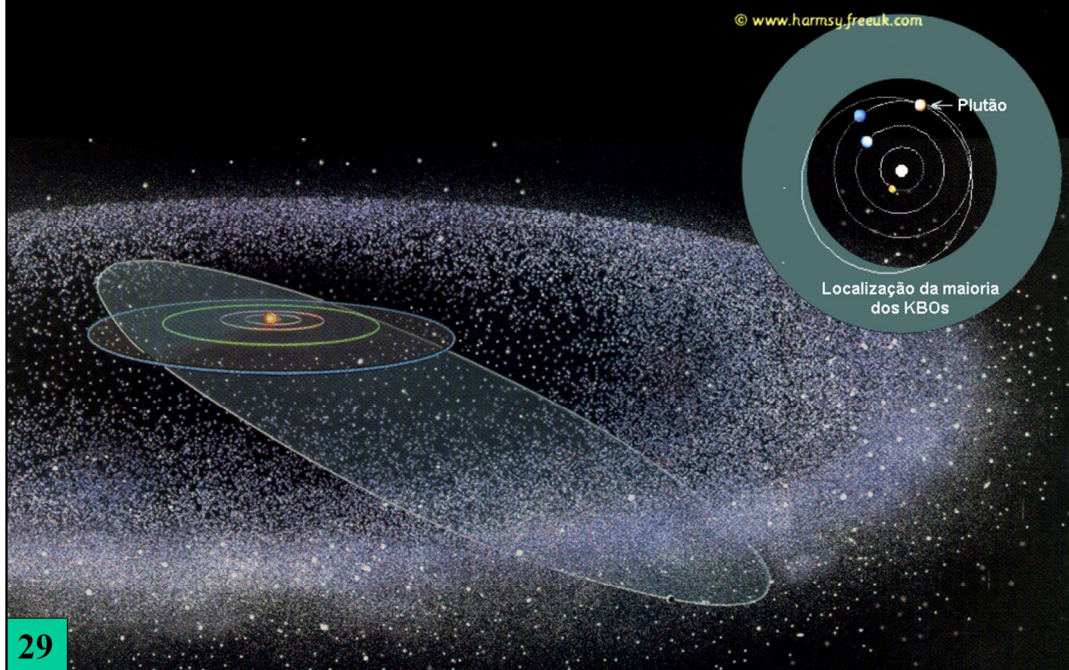
## Asteróides



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

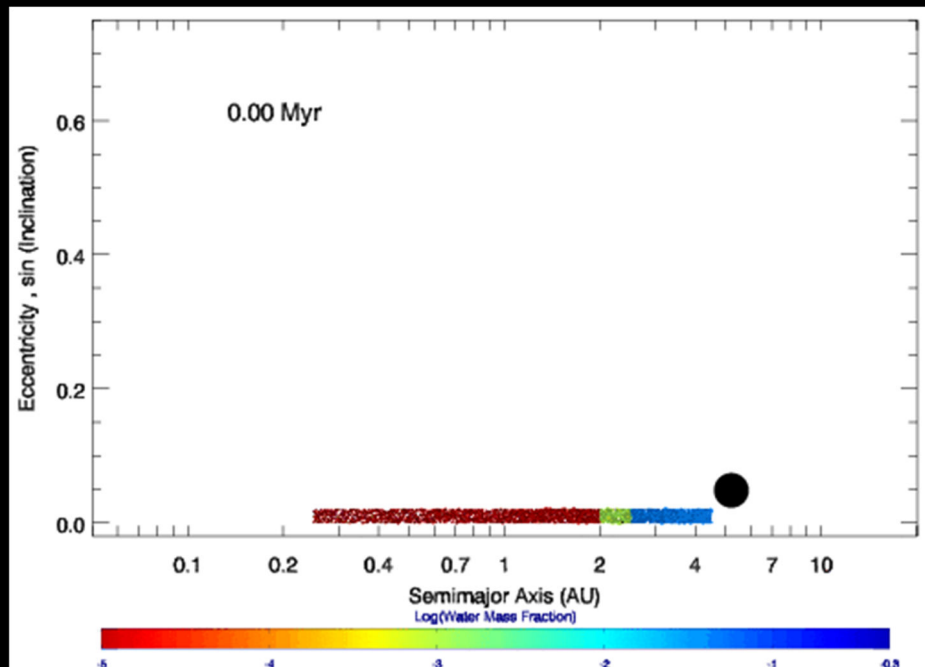


29

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.



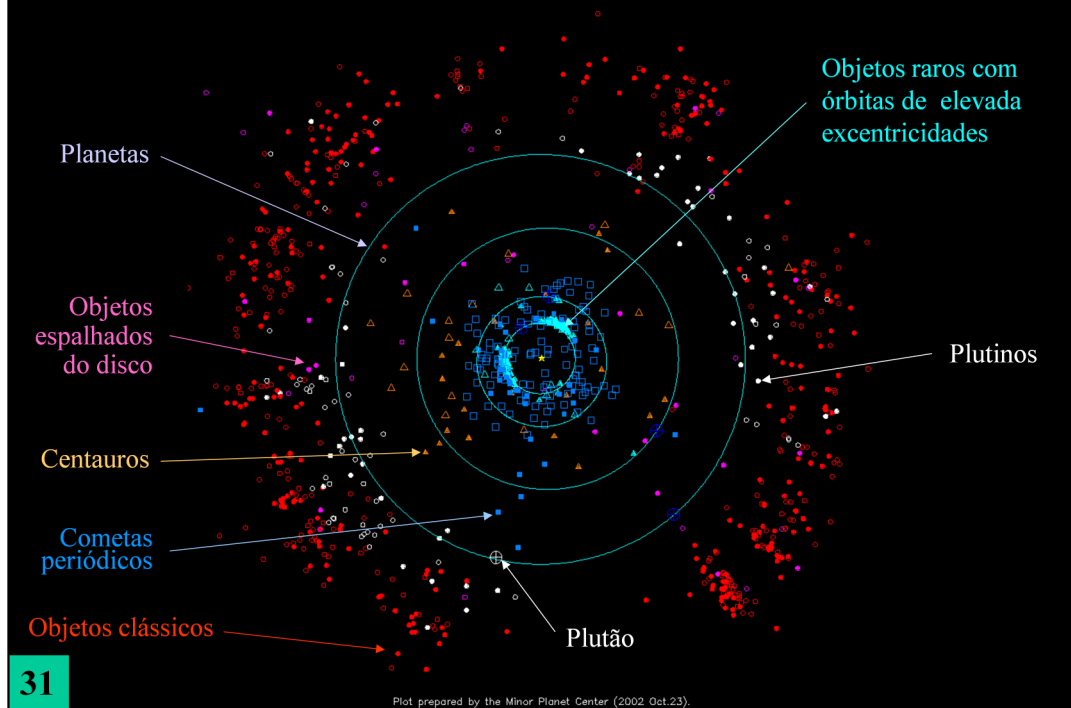
## Consequências da migração de um planeta massivo



30

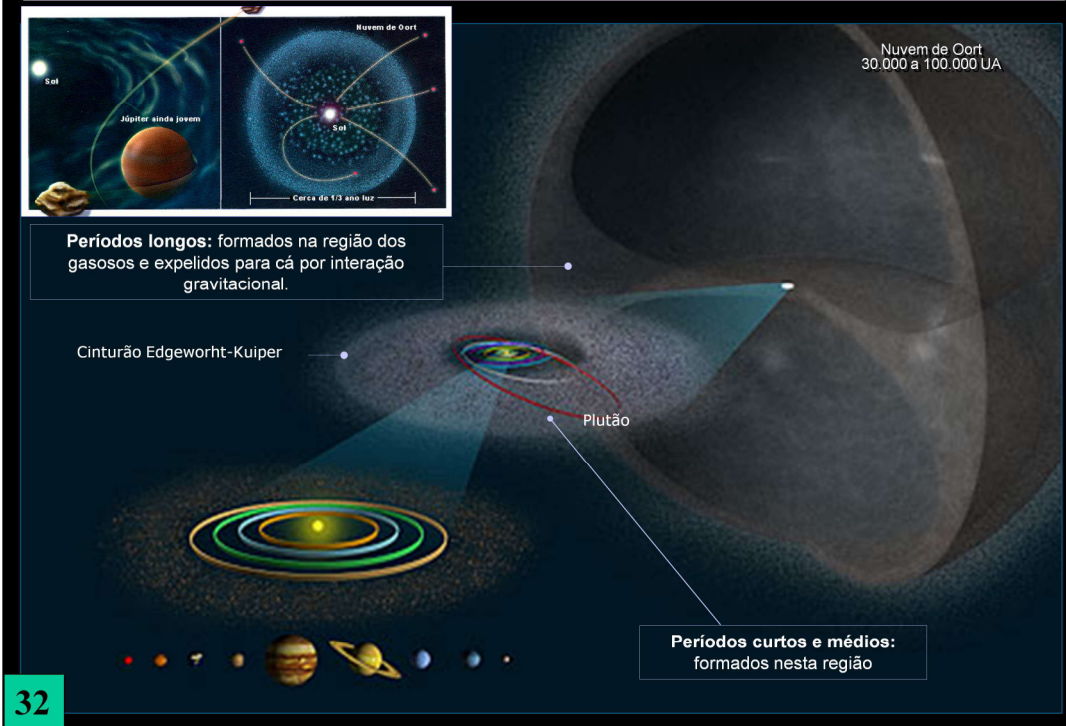
Image credit: Dr. Avi M. Mandell, NASA / Goddard Space Flight Center.

## Cometas e Objetos do Cinturão de Edgeworth-Kuiper



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.

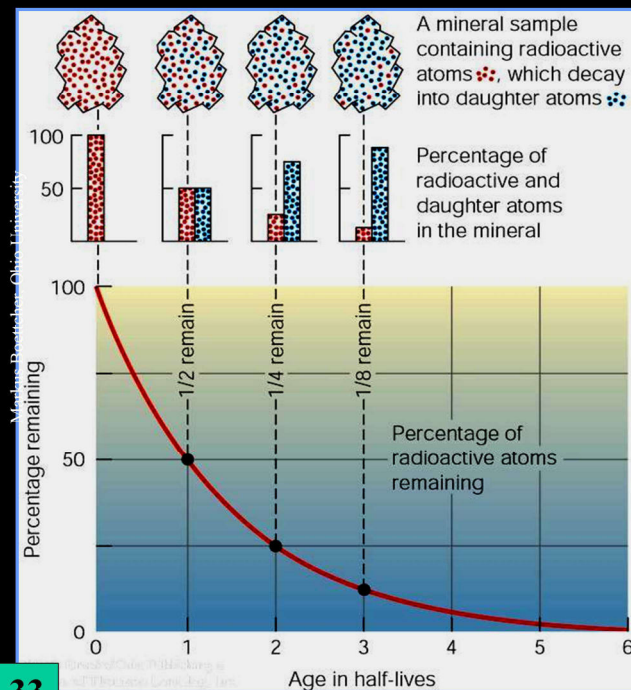
## Cometas: regiões de acúmulo



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

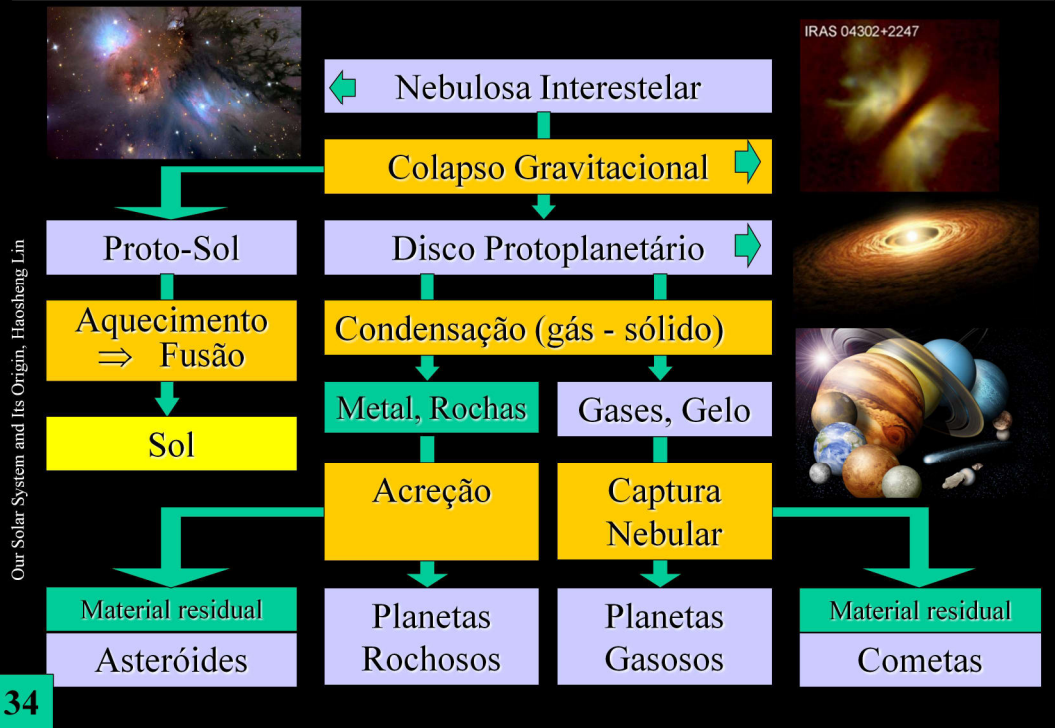
Medidas de abundância relativa entre elemento instável e estável revela data de formação da rocha.

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?

# Teoria Nebular ou Protoplanetária



## Zona Habitável

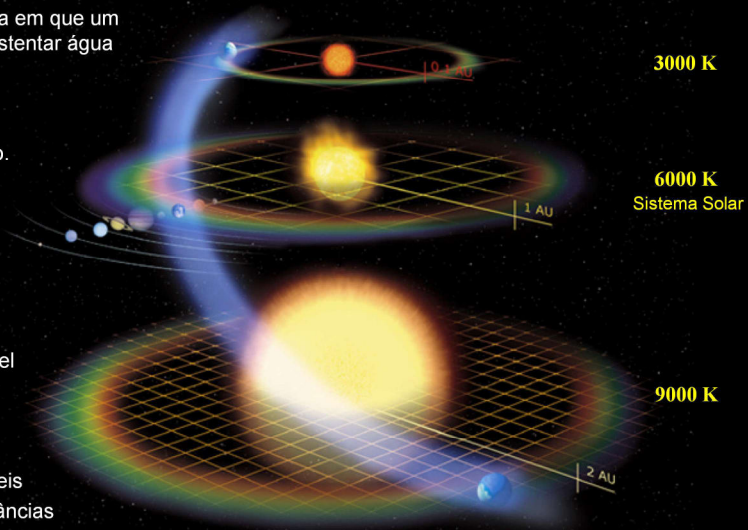


Região em torno de uma estrela em que um planeta com atmosfera pode sustentar água líquida em sua superfície.

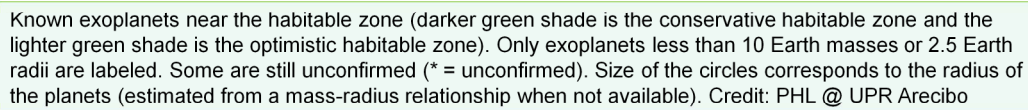
Vênus está próximo do limite interno e Marte, do limite externo.

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.



## 36

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