

Introdução à Astrofísica

---

# Origem do Sistema Solar

---

Rogemar A. Riffel

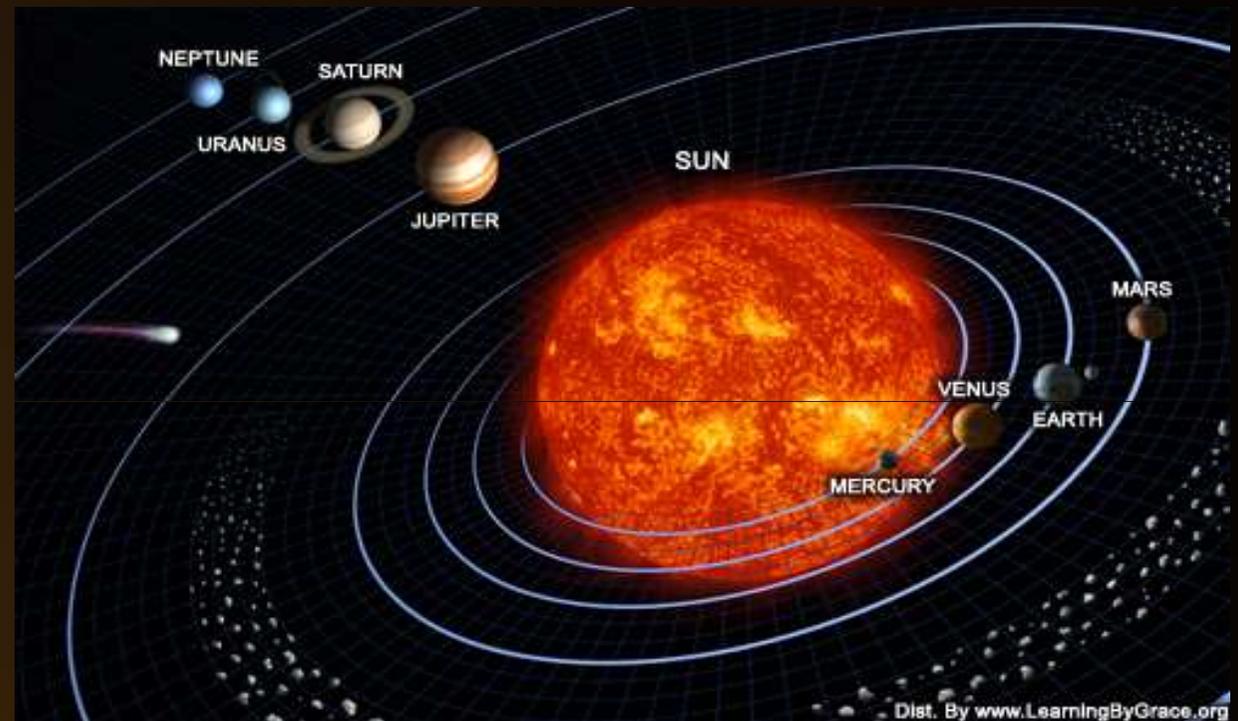
# Requerimentos do Modelo

- As órbitas dos planetas são em sua maioria coplanares e paralelas ao equador Solar;
- As órbitas são quase circulares;
- Os planetas orbitam o Sol com órbitas no sentido anti-horário, que é a direção da rotação solar;
- A maioria dos planetas rota no sentido anti-horário (exceto: Vênus e Urano);
- A distância deles ao Sol obedece a lei de Titus-Bode;
- Os planetas tem ~98% do momento angular do sistema solar, mas apenas 0.15% da massa;
- Planetas Terrestre e Jovianos exibem diferenças físicas e químicas;
- A estrutura dos satélites dos sistemas planetários lembram sistemas solares em miniaturas.

# Várias teorias

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

- Modelos baseados em turbulência;
- Teoria Nebular (antiga);
- Teoria de Forças de Maré;
- Teorias de Acreção;
- Teoria Nebular (moderna).



# Modelos baseados em turbulência

- **Descartes (1596-1650):** Primeiro a propor um modelo científico para a existência do sistema solar, em 1644;
- O universo, 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

- Proposta por Kant em 1755 e formulado por Laplace em 1796;
- Nebulosa em rotação deu origem ao Sistema Solar.
- A nebulosa contrai-se sob a influência da gravidade e sua velocidade rotacional aumenta até que ela colapse em um disco.
- O Sol se forma da concentração central e os planetas são formados a partir dos anéis de planetesimais.

# Teoria Nebular - Antiga

- Vários problemas no Século XIX;
- É difícil explicar a formação 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 e deveria ter  $P \sim 1/2$  dia.

# Teorias de Força de Maré

- Os planetas se formaram de material ejetado do Sol
- Buffon (1707-1788): O Sistema Solar surgiu de uma ejeção de matéria do Sol devido a colisão com um cometa.
- Esta teoria não tem base científica.
- Na época não se conhecia o material dos cometas.
  
- Devido a problemas com a teoria nebular, esta teoria ganhou força e foi revista.

# Teorias de Força de Maré

- **Colisão entre o Sol e outra estrela:** Os planeta se formaram de material condensado perdido pelo Sol (evento raro).
- 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.
- **Década de 30:** Modelos que sugerem que o Sol inicialmente fazia parte de um sistema binário e que os planetas se originaram da companheira.
- **Década de 60:** Wolfson sugeriu que o encontro entre o Sol e uma proto-estrela arrancou um filamento da proto-estrela que se condensou e formou os planetas.
- Leva em conta a composição química e isotopia dos planetas (se originaram de um meio frio)

# Teorias de Acreção

- Possibilidade de o Sol acretar material interestelar
  - Uma estrela próxima do Sol (Schmidt 1944): permite que o meio interestelar se condense em planetas (ponto de Lagrange)
  - O Sol passou por duas nebulosas (Alfén & Arrhenius):
    - Uma formada por grãos não voláteis (sólidos) - Planetas terrestres.
    - Outra formada por H - Planetas Gigantes

# 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 campo magnético (vento solar)
- As partículas são transportadas a uma distância  $a$  muito maior que o raio  $R$  da estrela;

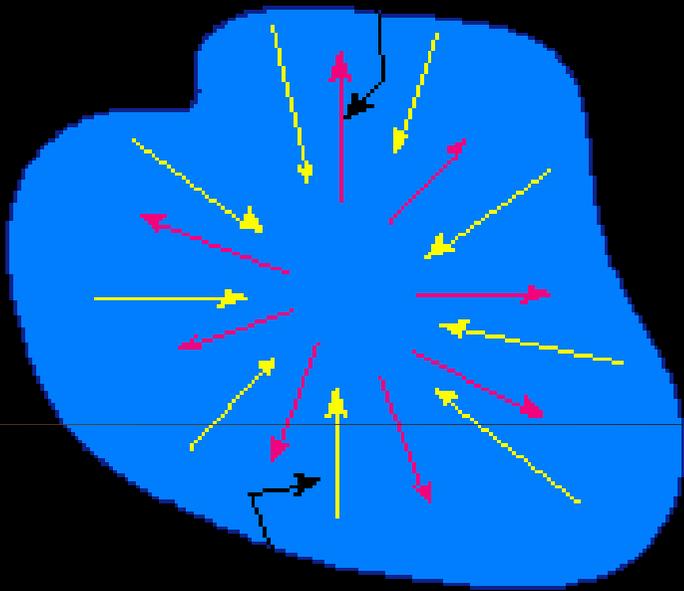
Uma pequena perda de massa é suficiente para levar o momento angular do Sol ao valor observado hoje ( $a/R=10$  e  $dM/dt = 0.003 M_{\text{Sol}}$ )

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

# Teoria nebular moderna

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

Gas pressure attempting to expand the cloud



Gravitational force attempting to collapse the cloud

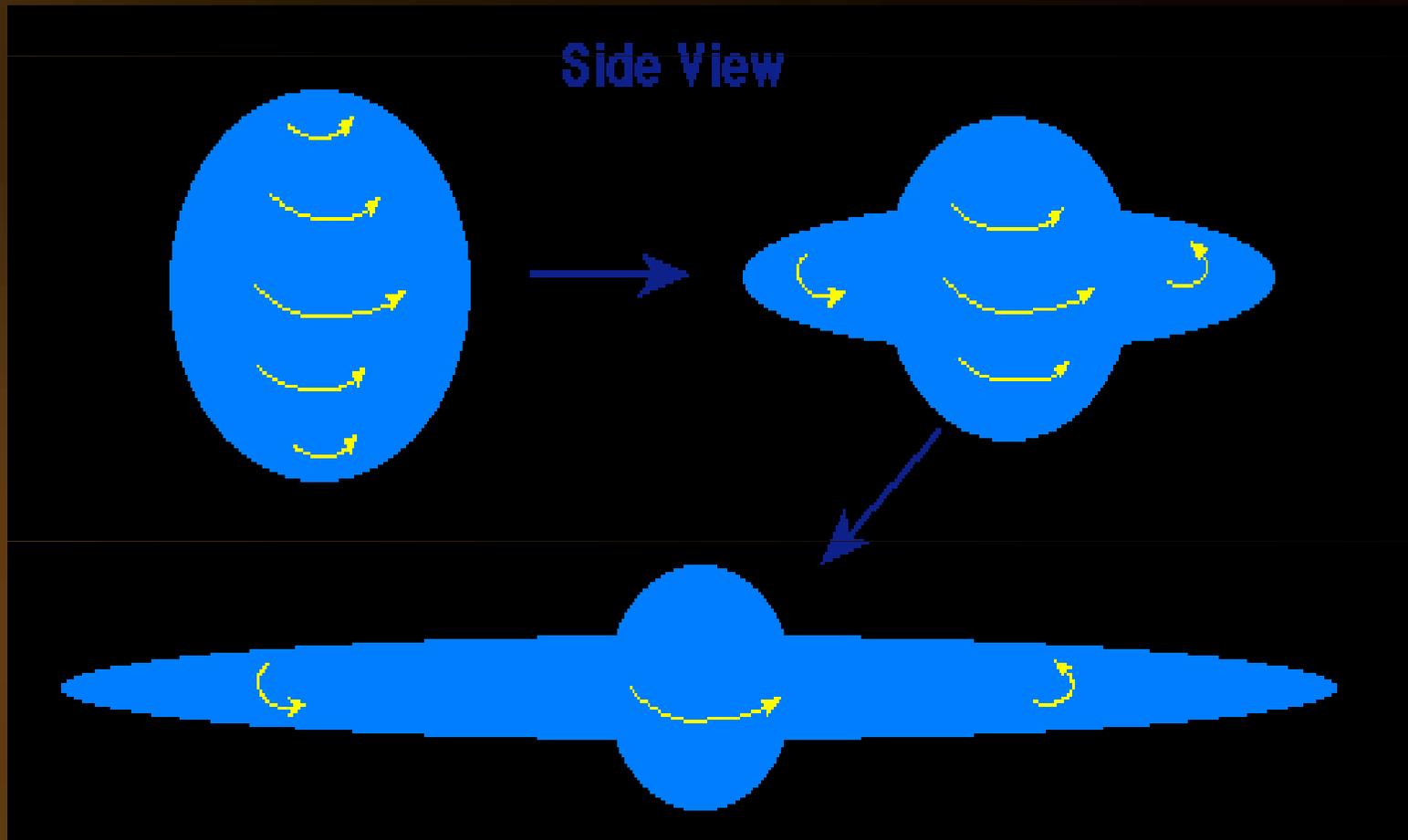
Massa da nuvem primordial = Massa de Jeans  $> 10^5 M_{\text{sol}}$

A nuvem colapsa gravitacionalmente.

Força gravitacional  $\times$  pressão

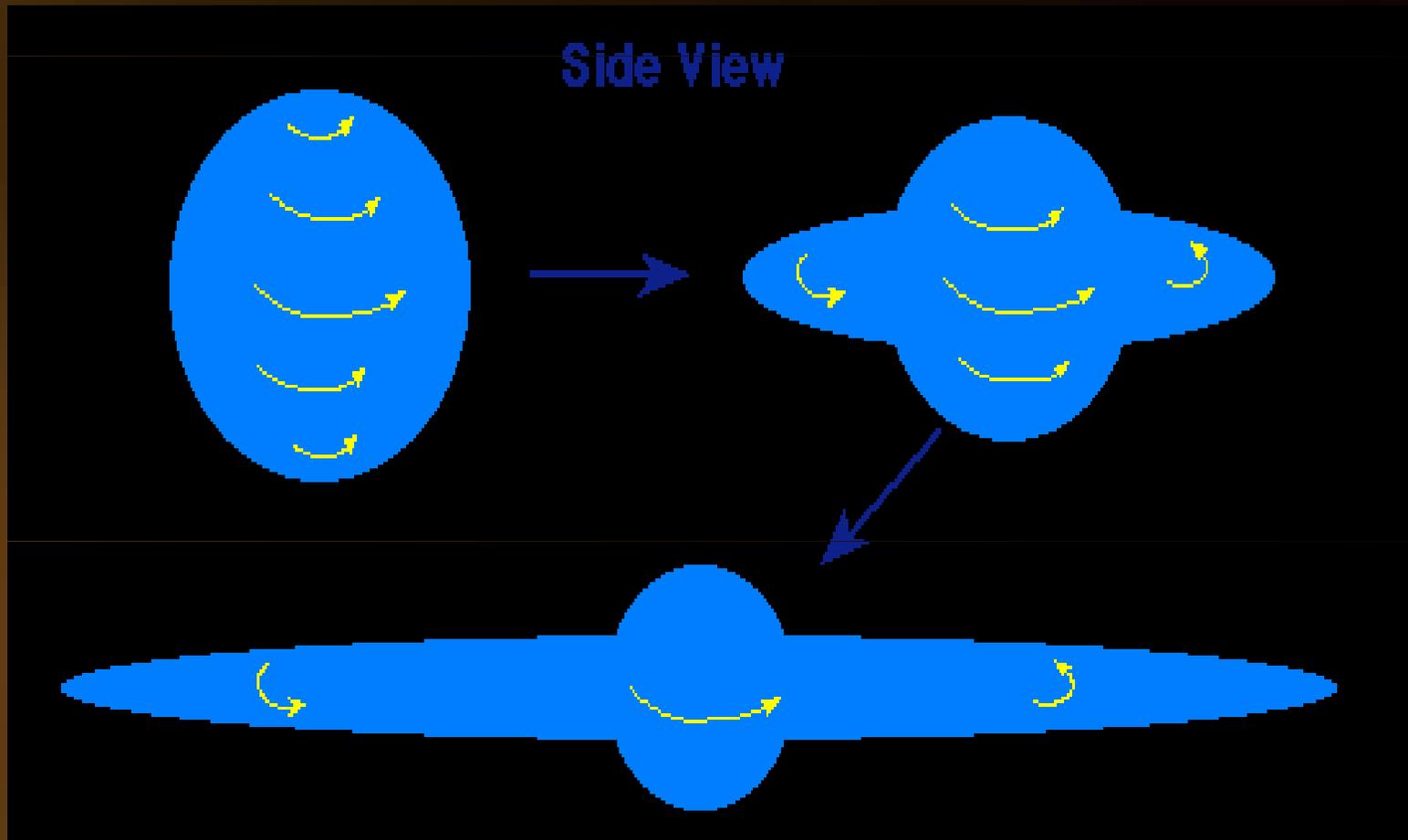
# Teoria nebular moderna

- A nuvem gira mais rapidamente enquanto a nuvem colapsa - aumento de Spin



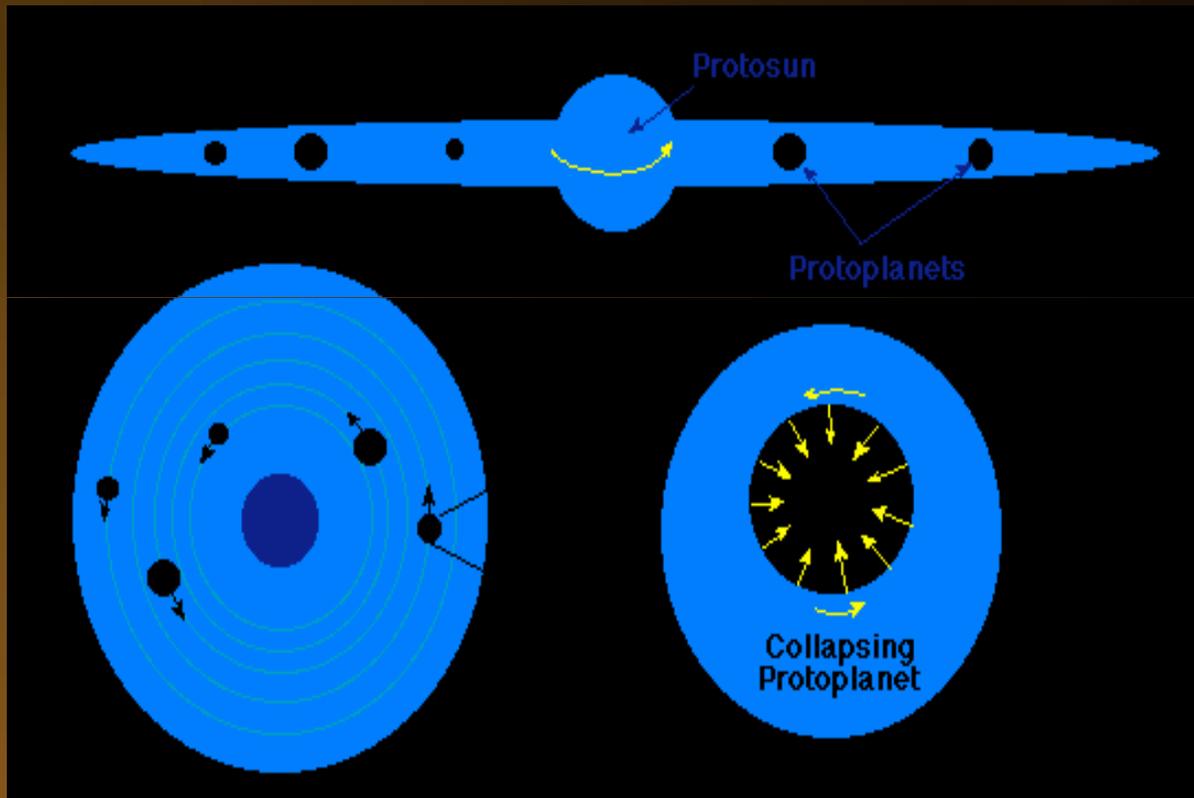
# Teoria nebular moderna

- Devido a competição entre a força gravitacional, pressão do gás e rotação, a nebulosa em contração começa a achatarse em uma panqueca em rotação com um bojo no centro.



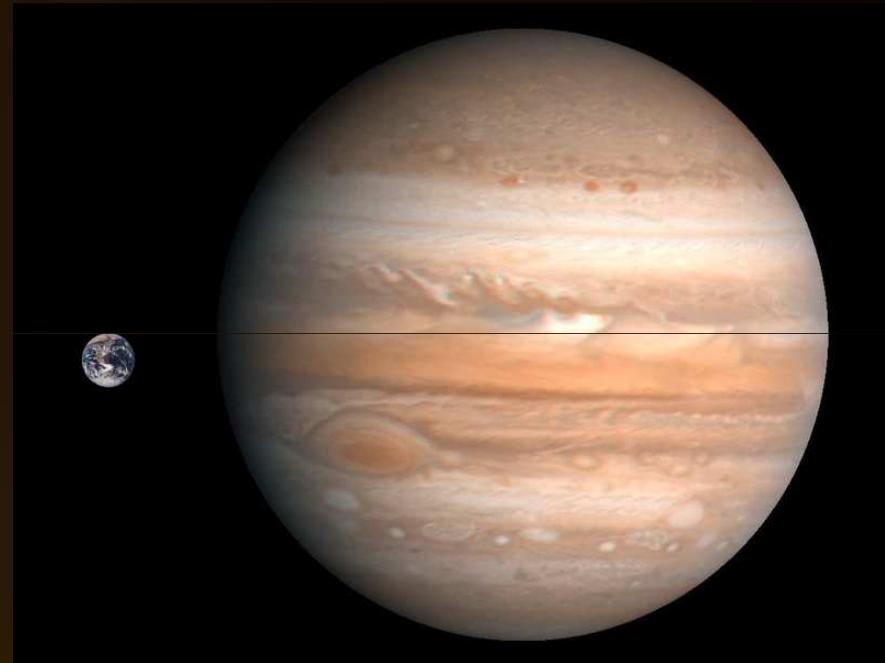
# Teoria nebular moderna

- O Sol se forma no centro. O disco se esfria e dá origem aos planetesimais com alguns km.
- Nas regiões mais externas: A temperatura é menor e até mesmo materiais voláteis se condensam.
- Nas regiões internas: A temperatura é maior e os materiais voláteis são perdidos.



# Teoria nebular moderna

- Núcleos Planetários
- Externos:
  - Silicatos e gelo
  - Cresceram até  $10 M_{\text{Terra}}$
  - Campo gravitacional grande = acretaram H e He
- Internos
  - Apenas silicatos
  - Não cresceram muito

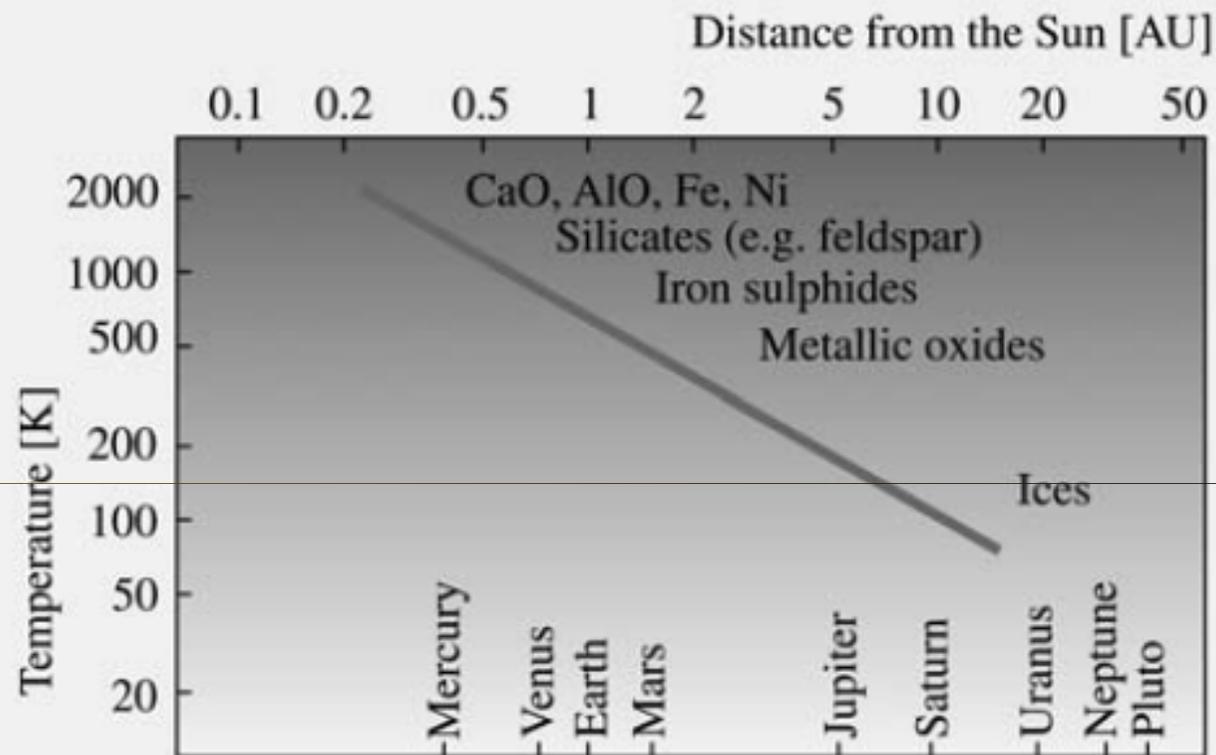


# Teoria nebular moderna

- Fornece algumas explicações naturais para alguns fatos observados no sistema solar, como:
  - a) As órbitas dos planetas estão todas no mesmo plano com o Sol no centro (~circulares);
  - b) Os planetas todos revolvem na mesma direção
  - c) A maioria dos planetas rota na mesma direção com eixos de rotação aproximadamente perpendiculares ao plano orbital.

# Teoria nebular moderna

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

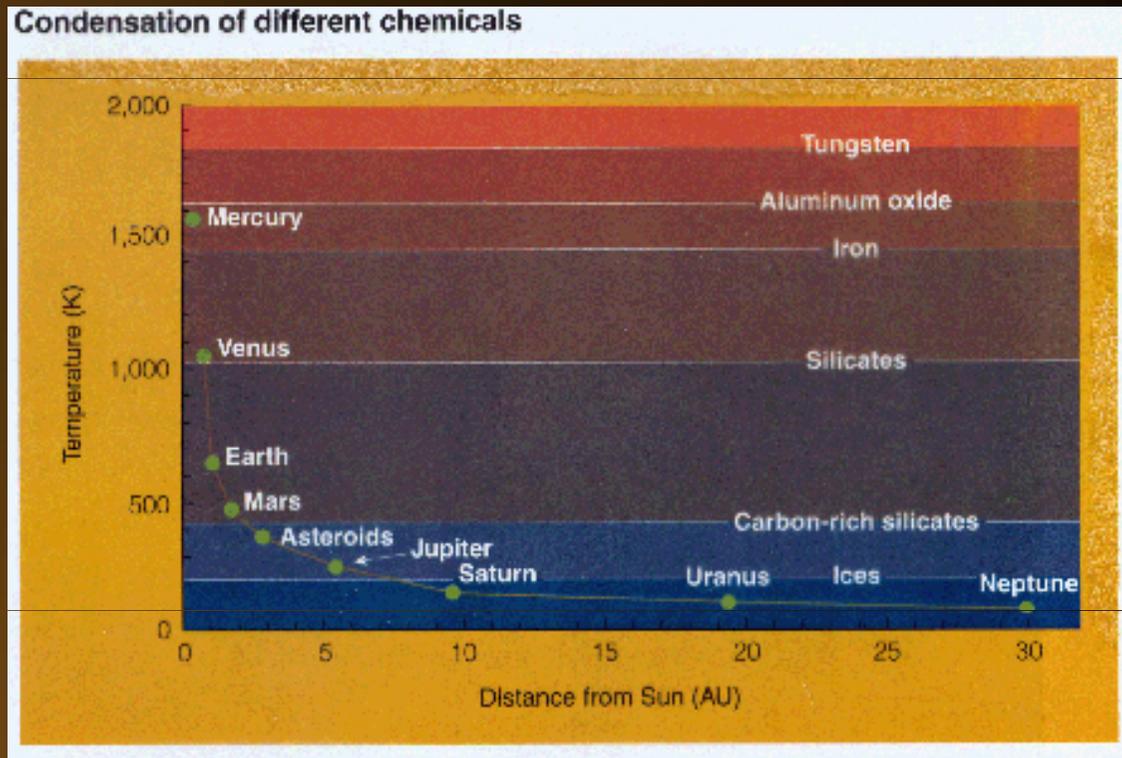


Elementos voláteis (H; He e gelo) estão ~ ausentes nos planetas interiores

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

# Teoria nebular moderna

- A diferença de abundâncias químicas entre Mercúrio e Marte - mais Fe e O (500K) em Marte que em Mercúrio.

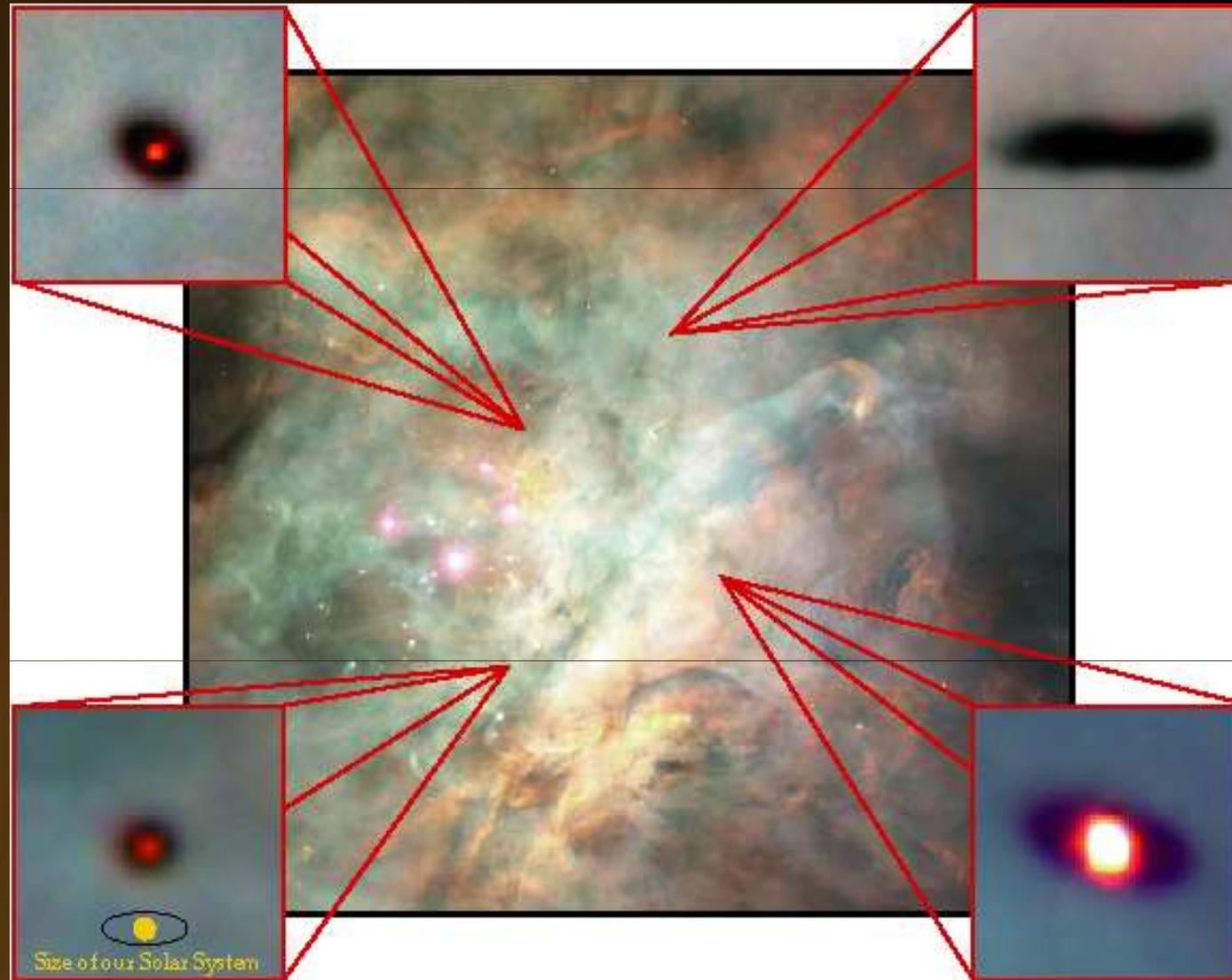


Na parte mais externa da nuvem os materiais voláteis condensaram e puderam ser acretados pelos planetesimais.

Os objetos na periferia do Sistema Solar (Cinturão de Kuiper) podem sobreviver.

O início das reações nucleares no Sol (1 Milhão de Anos) e o vento solar expulsaram o material interestelar residual e marca o fim da formação do Sistema Solar.

# Teoria nebular moderna - Outros Sistemas Planetários



## Teoria nebular moderna - Outros Sistemas Planetários

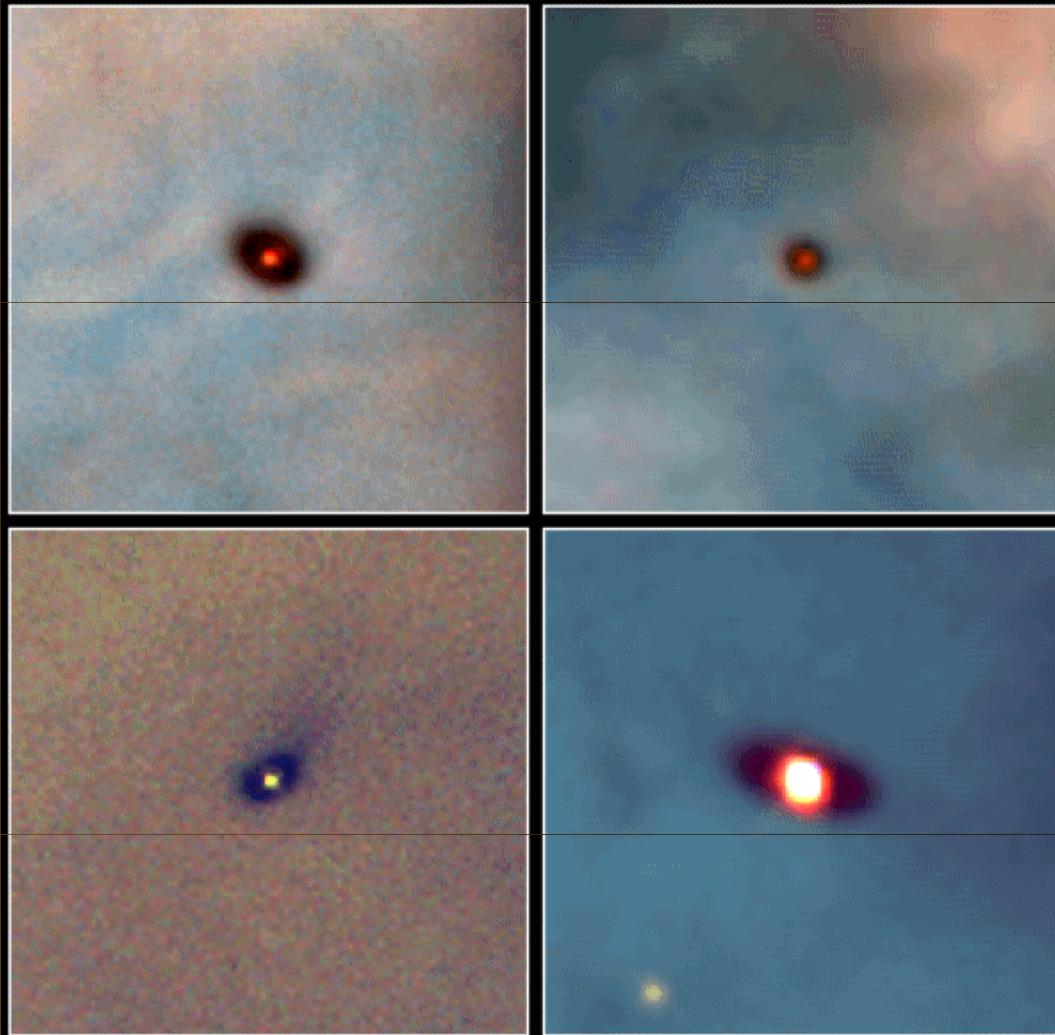


Imagem do HST de 4 discos proto-planetários

Diâmetros entre 2 e 8 vezes o diâmetro do Sistema Solar.

**Protoplanetary Disks  
Orion Nebula**

HST · WFPC2

PRC95-45b · ST ScI OPO · November 20, 1995

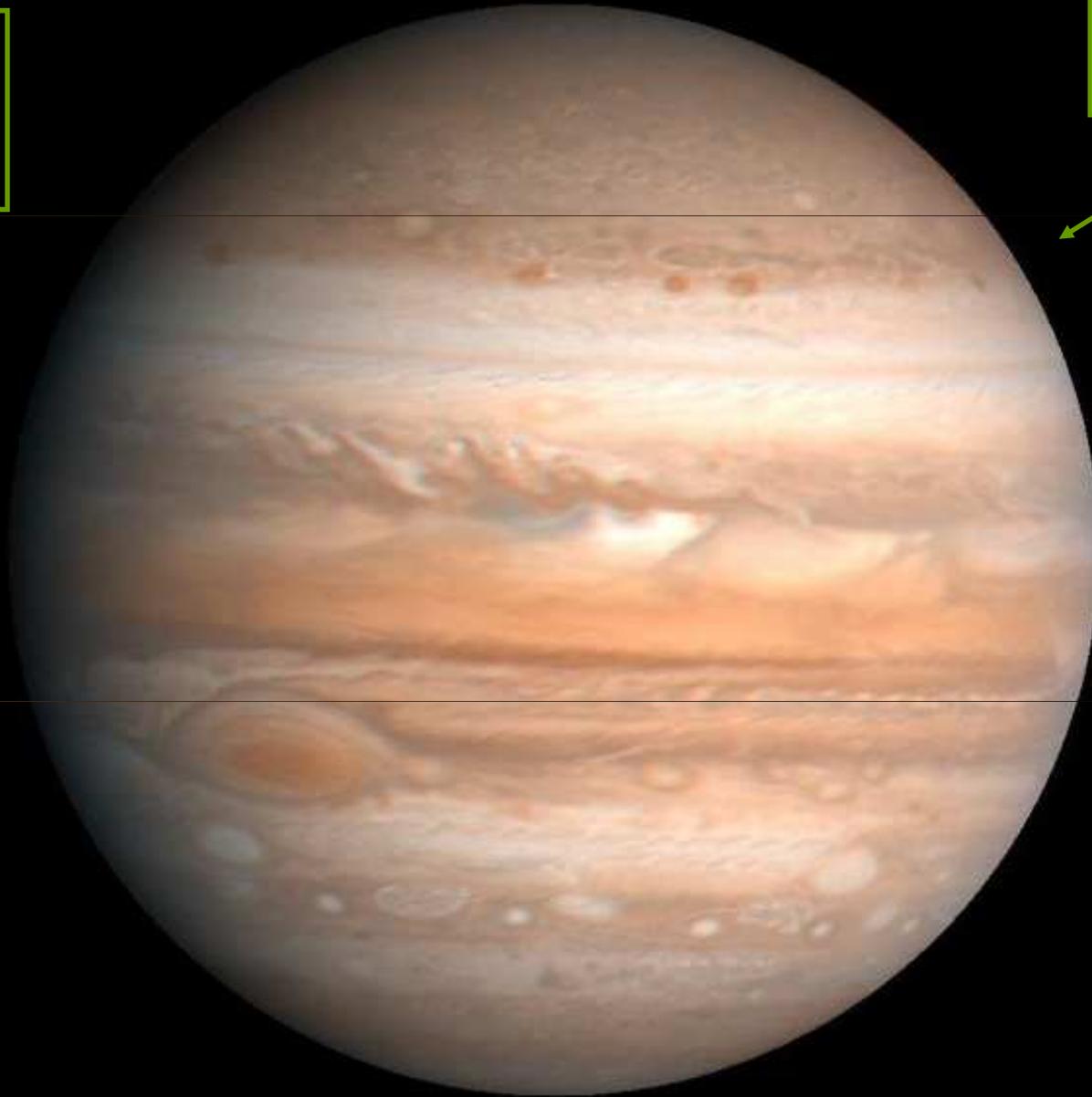
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA

## Teoria nebular moderna - Outros Sistemas Planetários



# Teoria nebular moderna - Outros Sistemas Planetários

O que ainda não observamos?



O que observamos?



# Teoria nebular moderna - Outros Sistemas Planetários

Novidades com o satélite Kepler

Busca de planetas extrasolares por variação de fluxo da estrela

<http://kepler.nasa.gov/>

