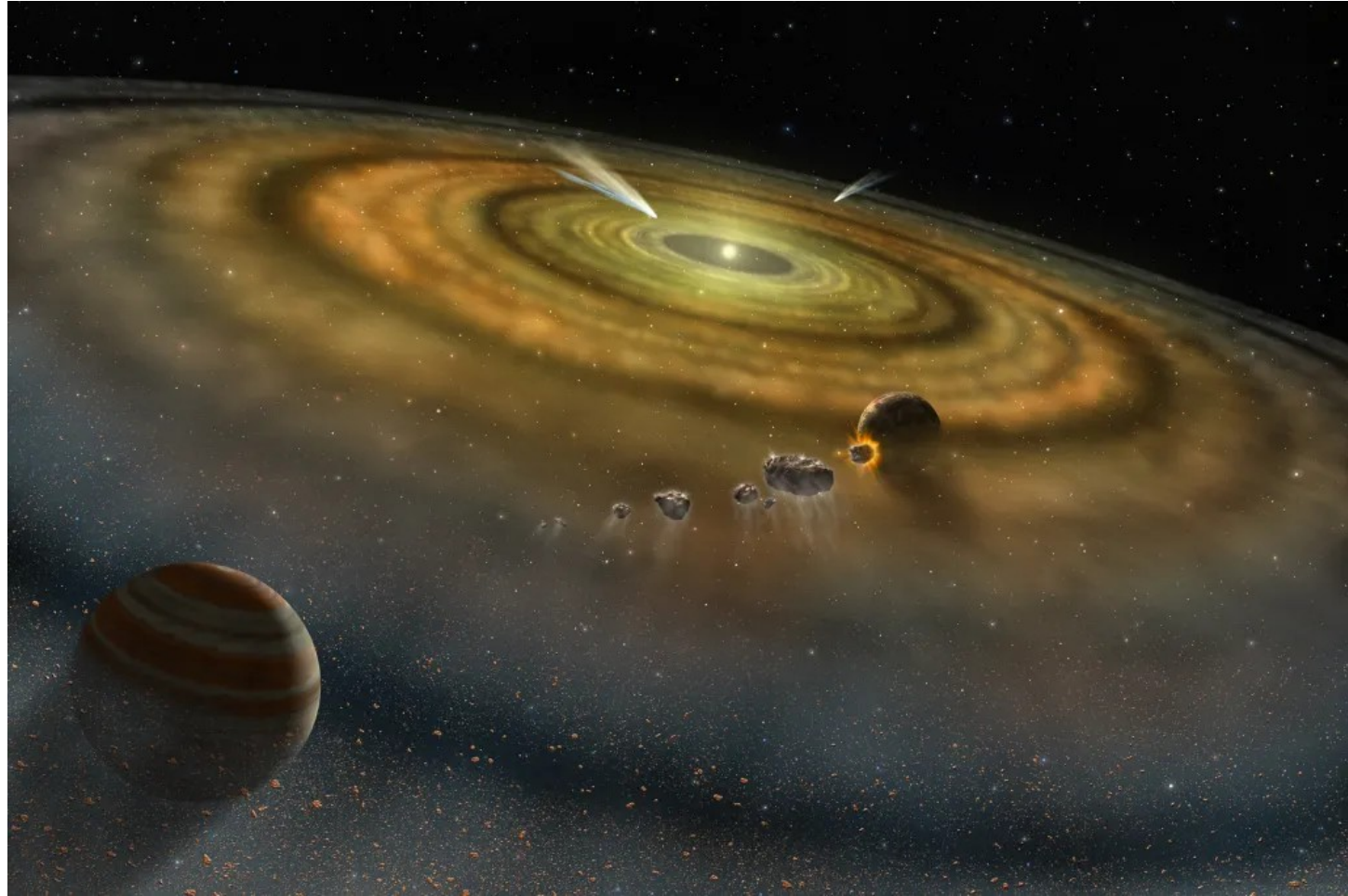
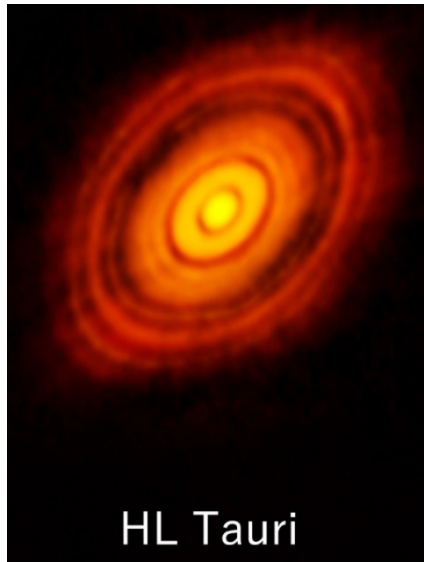
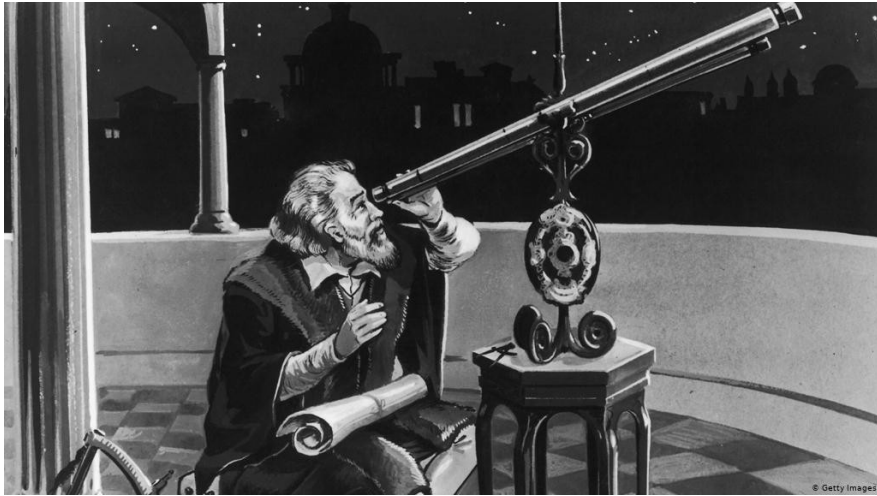


## 2. Formação e Estrutura do Sistema Solar

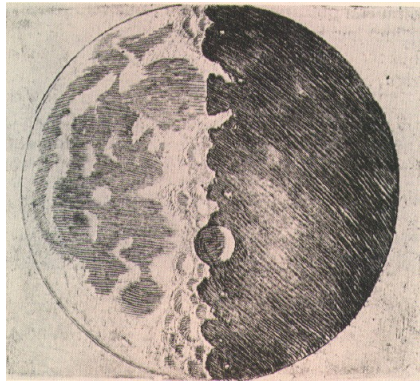


# Dois marcos importantes no estudo do Sistema Solar

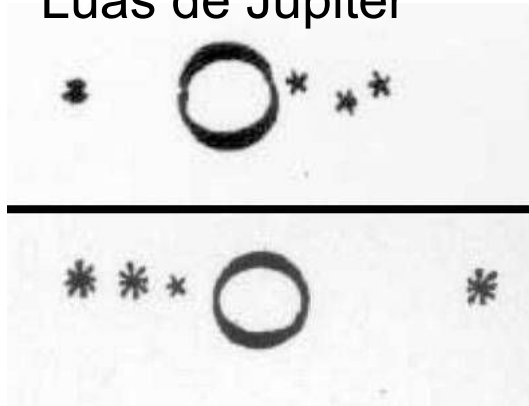
## Invenção do telescópio Galileu, 1609



Lua



Luas de Júpiter



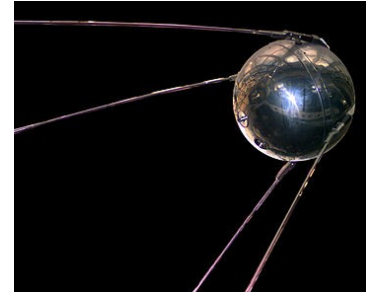


# Dois marcos importantes no estudo do Sistema Solar

Invenção do telescópio  
Galileu, 1609

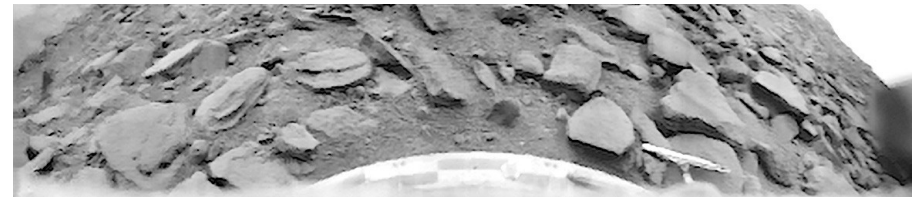


Exploração espacial  
Sputnik, 1957



Venera, anos  
1960s-70s

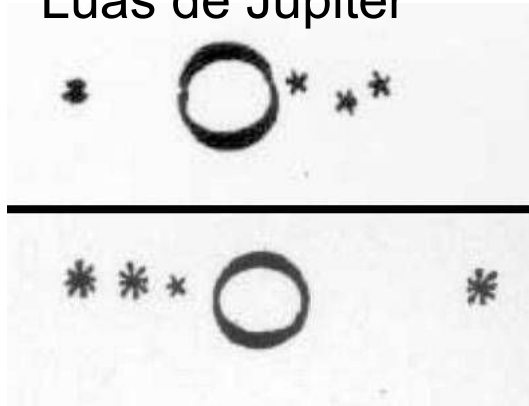
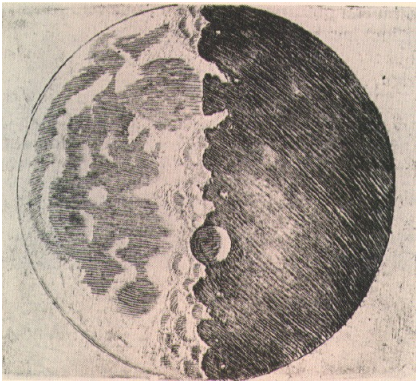
Vênus, 1975



Lua

Luas de Júpiter

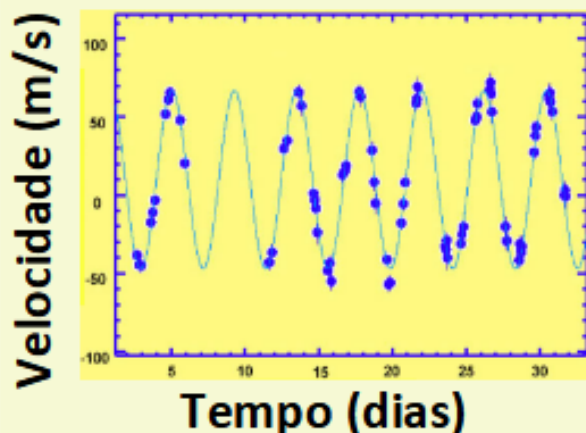
Apollo 11  
7/1969



# O Método Científico

(c) Jorge Meléndez, IAG/USP

## 1. Observações



## 2. Perguntas

- É um exoplaneta?
- São oscilações estelares?
- É atividade magnética estelar?
- Problema no telescópio?

## 3. Hipótese

- Pela modulação do sinal, provavelmente é um exoplaneta

## 4. Modelo físico

- Equações da física. Leis de Kepler
- Testar diversas hipóteses (a atividade estelar explica o sinal?)

## 5. Conclusões

- É um novo planeta!

## 6. Novas observações, hipóteses, modelos

- Sim, exoplaneta confirmado com novos dados!



# Existem muitas observações importantes para criar uma teoria sobre a origem do Sistema Solar

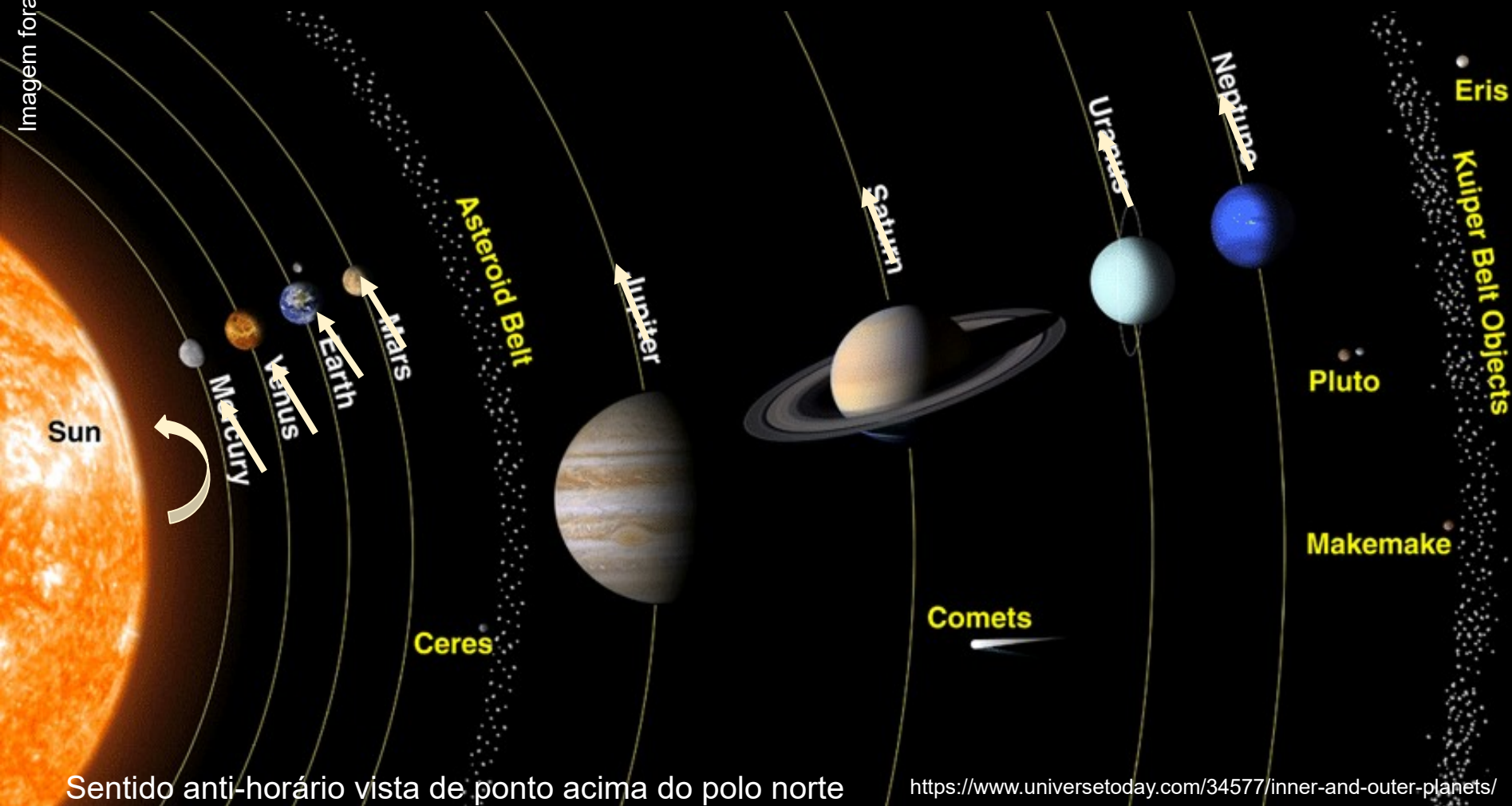
As órbitas dos planetas são quase **coplanares** (inclinação  $\sim$  zero) e quase **circulares**



\* Many comets exist outside the orbital plane

# Os sentidos de revolução dos planetas ao redor do Sol coincidem com o sentido de rotação do Sol

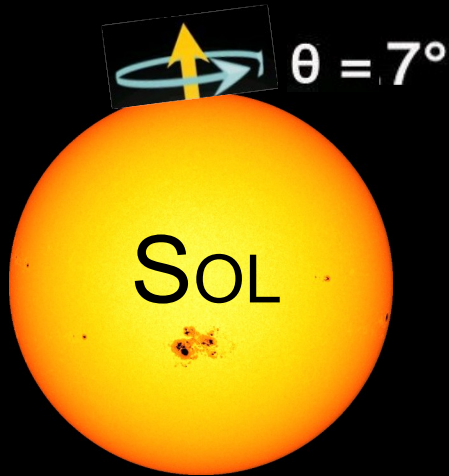
Imagem fora de escala



Sentido anti-horário vista de ponto acima do polo norte

<https://www.universetoday.com/34577/inner-and-outer-planets/>





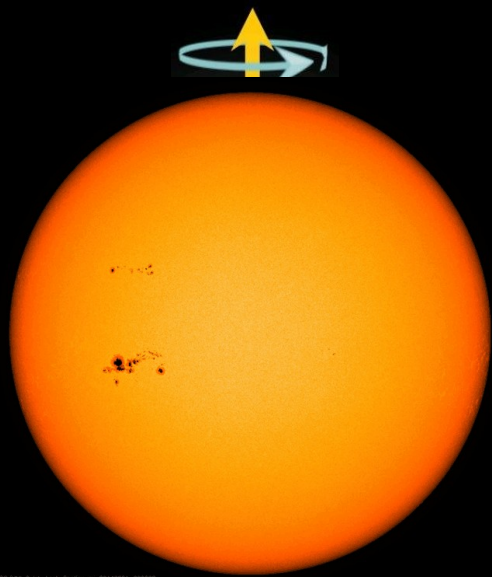
Os sentidos de rotação dos planetas coincidem com o sentido de rotação do Sol (exceto Vênus e Urano)



Sentido anti-horário  
vista de ponto acima  
do polo norte





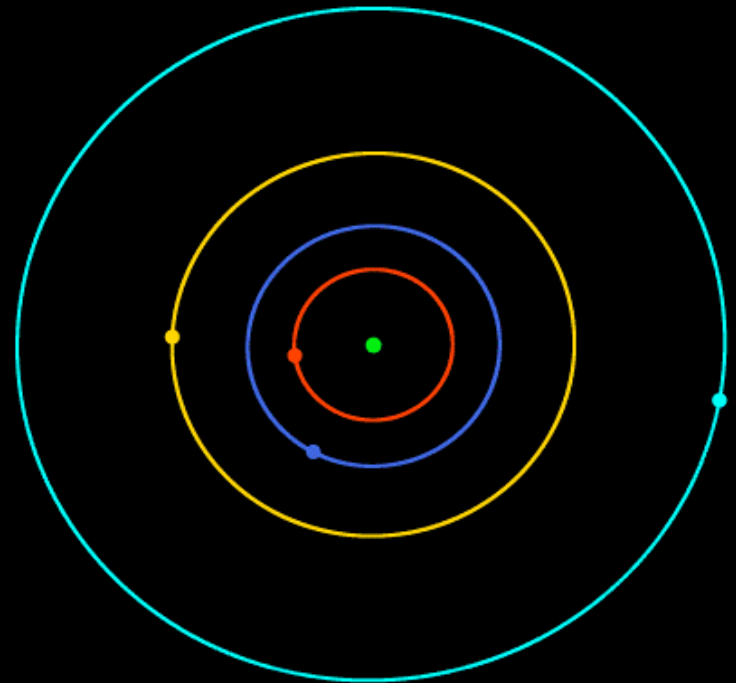


Os sentidos de revolução e rotação da maioria das luas coincidem com o sentido de rotação do Sol

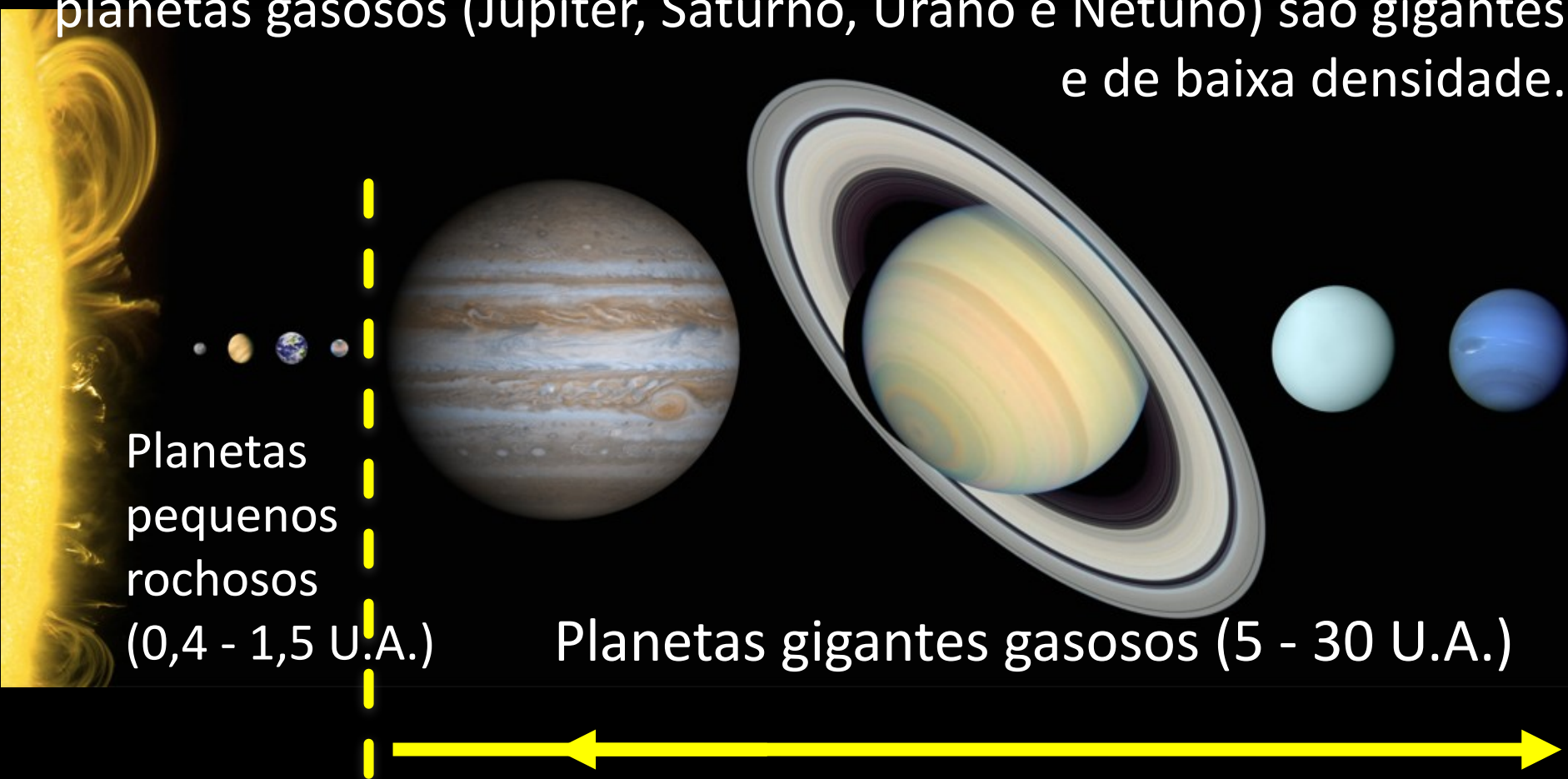
■ Jupiter · ■ Io · ■ Europa · ■ Ganymede · ■ Callisto

2019-01-01 00:00 Galilean moons

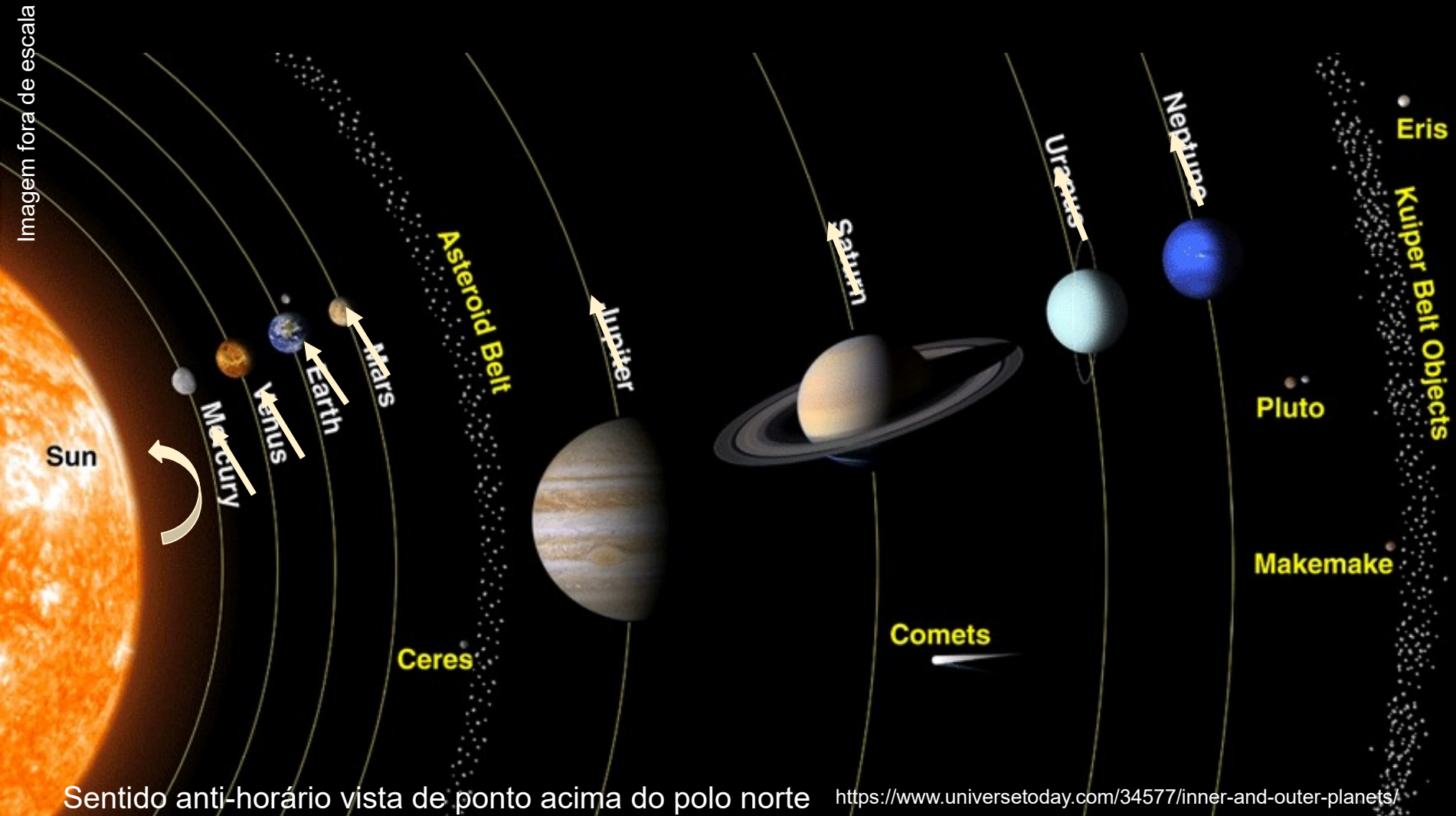
Sentido anti-horário visto de ponto acima do polo norte da Terra



Os planetas são divididos em 2 grupos distintos. Na região interna os planetas rochosos (Mercúrio, Vênus, Terra e Marte) são pequenos, densos e sólidos, já na região externa os planetas gasosos (Júpiter, Saturno, Urano e Netuno) são gigantes e de baixa densidade.



Ademais dos planetas, observamos objetos do cinturão de asteroides (p.ex. asteroide Ceres) a  $\sim 2,7$  UA, objetos do cinturão de Kuiper (p.ex. Plutão) a 30 - 50 UA, e cometas





**Asteroides.** Os asteroides são pequenos corpos rochosos (~1m a 939 km), remanescentes (planetesimais e protoplanetas) da formação do Sistema Solar.

## The four largest asteroids

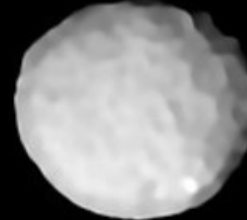


(Também considerado planeta anão)

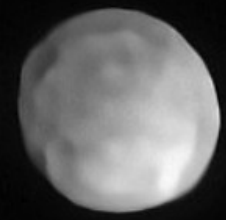
**Ceres**  
939 km



**Vesta**  
525 km



**Pallas**  
512 km

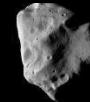


**Hygiea**  
434 km

**Vesta**  
 $572,6 \times 557,2 \times 446,4$  km  
Mean diameter: 525 km



4 Vesta



21 Lutetia



253 Mathilde



243 Ida

(243) Ida 1 Dactyl



433 Eros



951 Gaspra



2867 Šteins



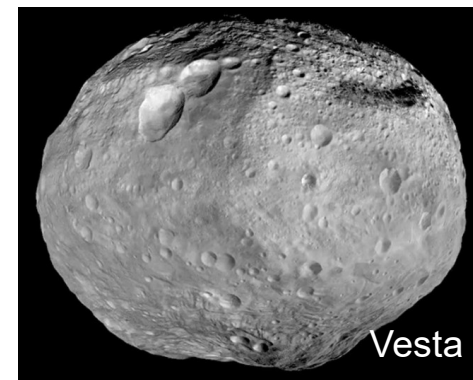
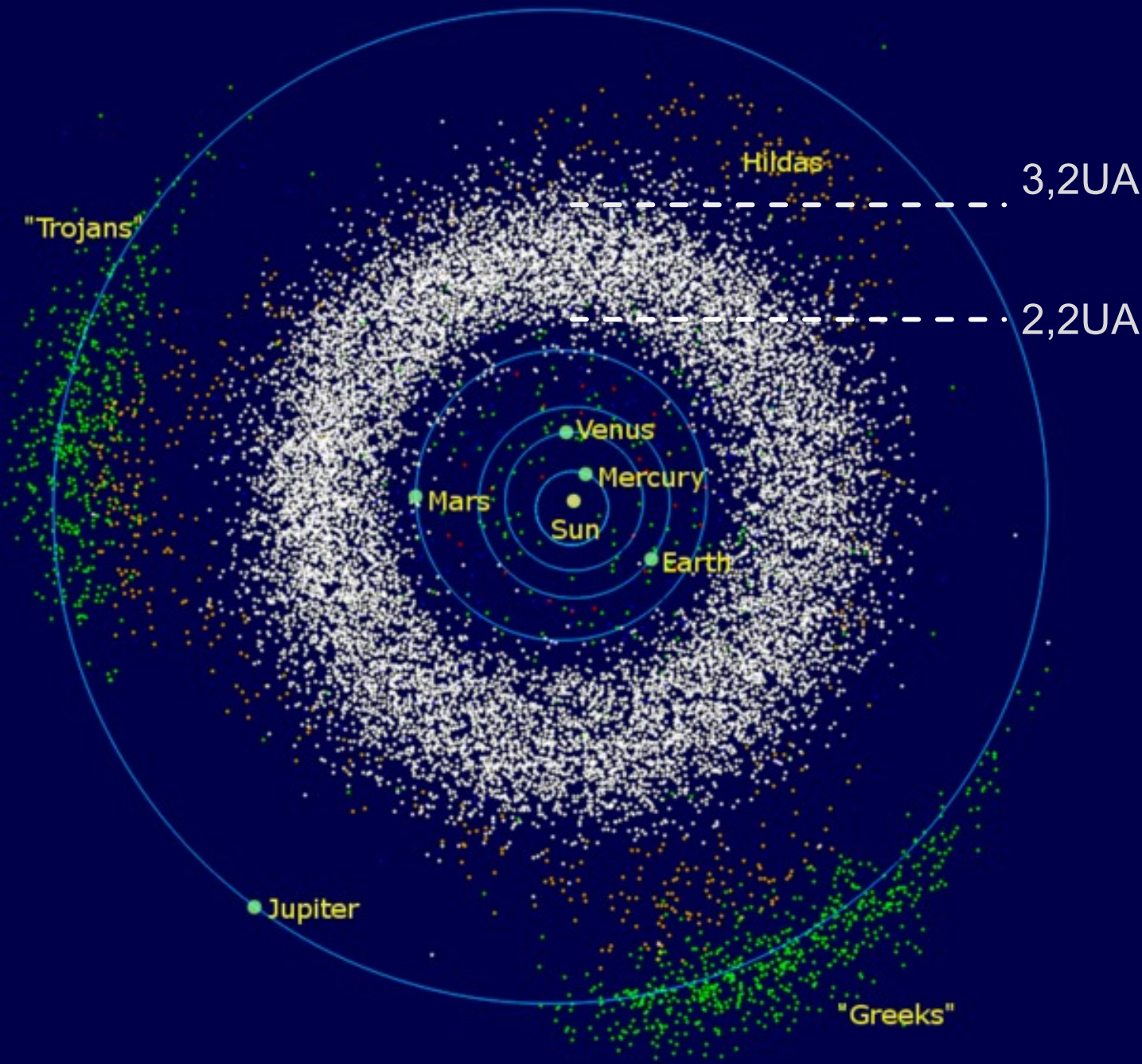
25143 Itokawa

Approximate number of asteroids (N) larger than a certain diameter (D)

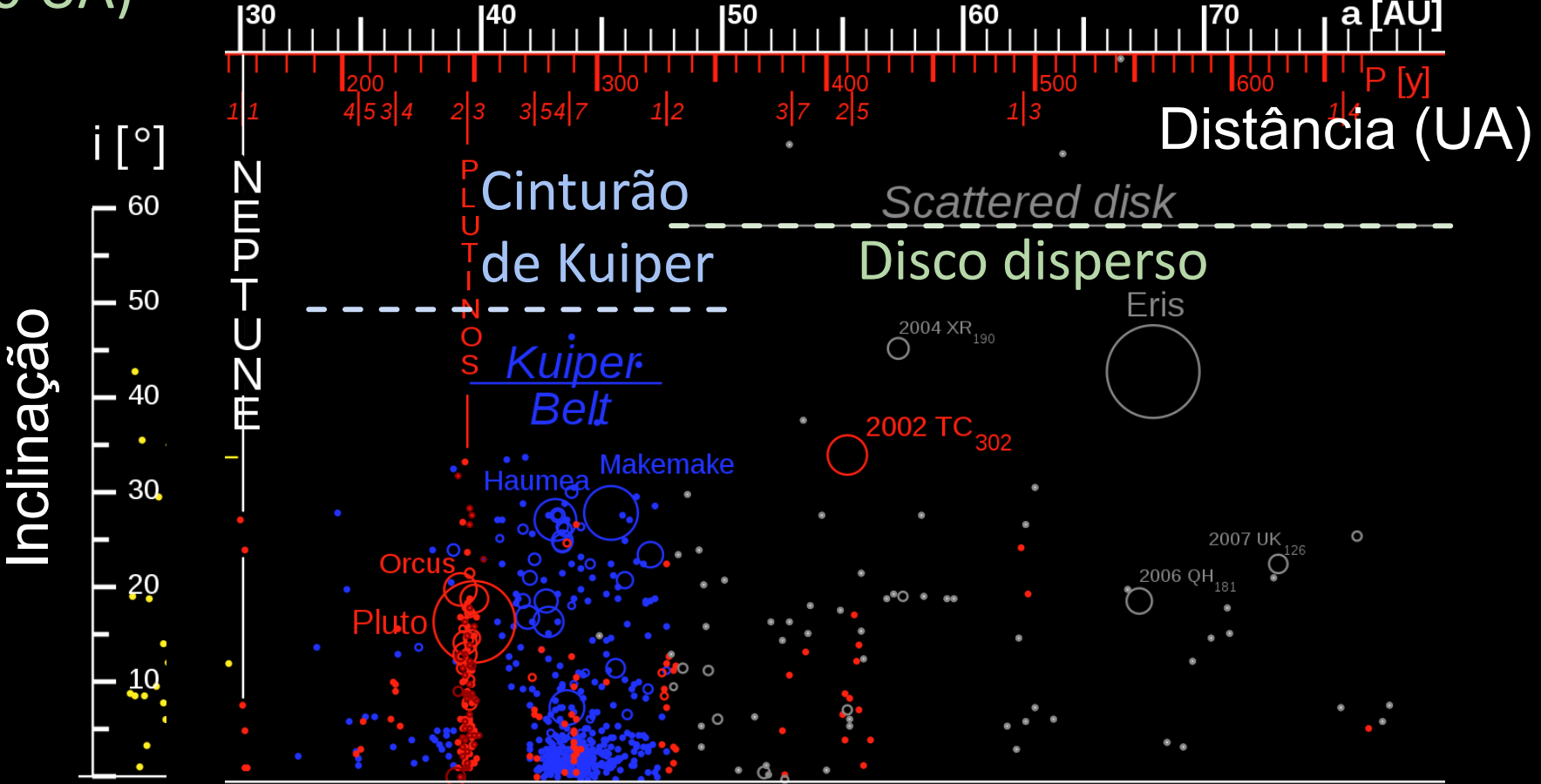
D	0.1 km	0.3 km	0.5 km	1 km	3 km	5 km	10 km	30 km	50 km	100 km	200 km	300 km	500 km	900 km
N	25 000 000	4 000 000	2 000 000	750 000	200 000	90 000	10 000	1100	600	200	30	5	3	1

# Asteroides.

Entre Marte e Júpiter,  $\sim 2,7\text{UA}$  observamos o Cinturão de Asteroides. São planetesimais que não formaram um planeta devido às perturbações gravitacionais de Júpiter.



Além de Netuno (> 30 UA): **Objetos Transnetunianos**, e são do Cinturão de Kuiper (30 - 50 UA) ou do Disco disperso (até ~ 100 UA)

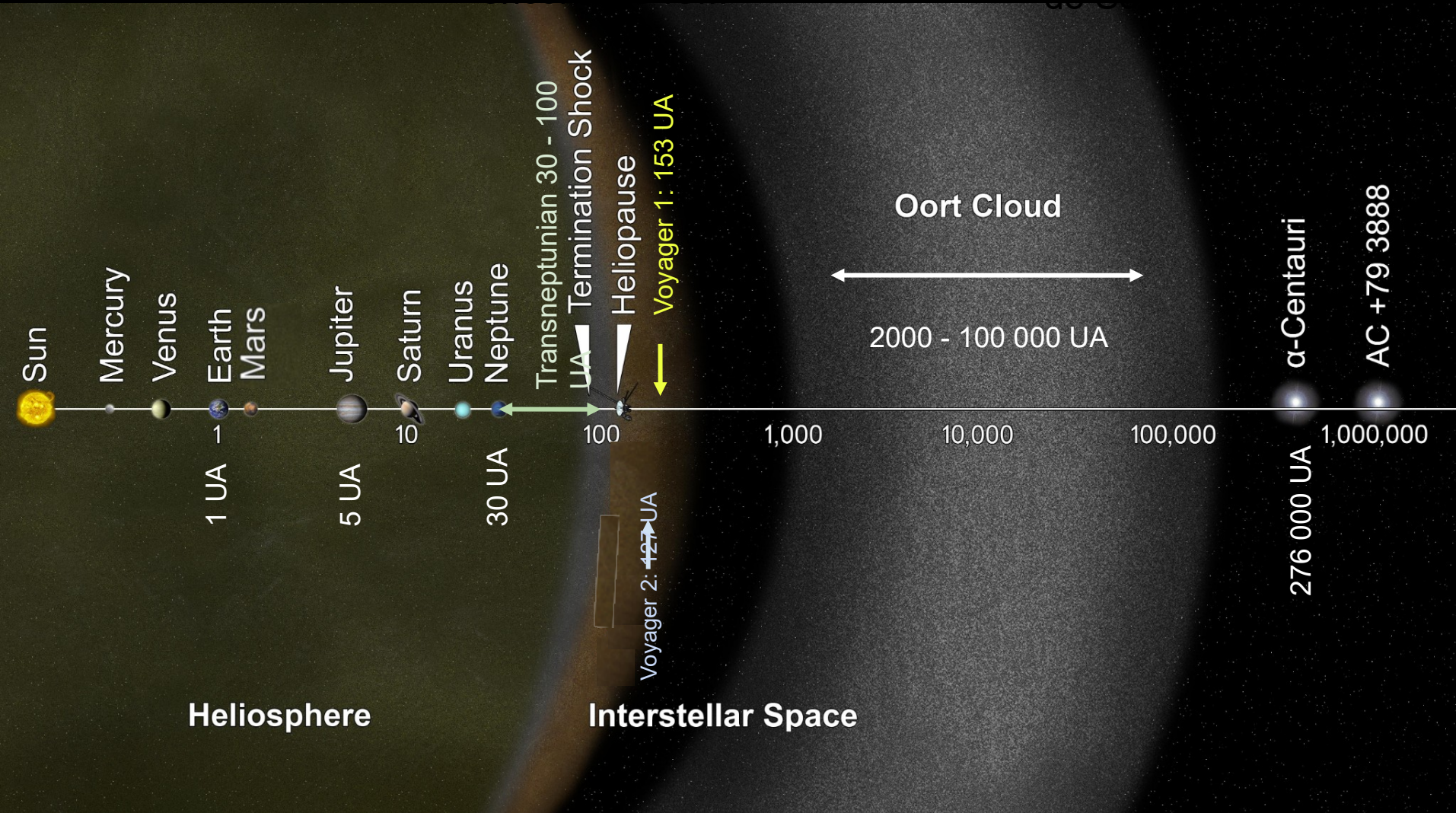


*Trans-Neptunian objects*  
**Transnetunianos**



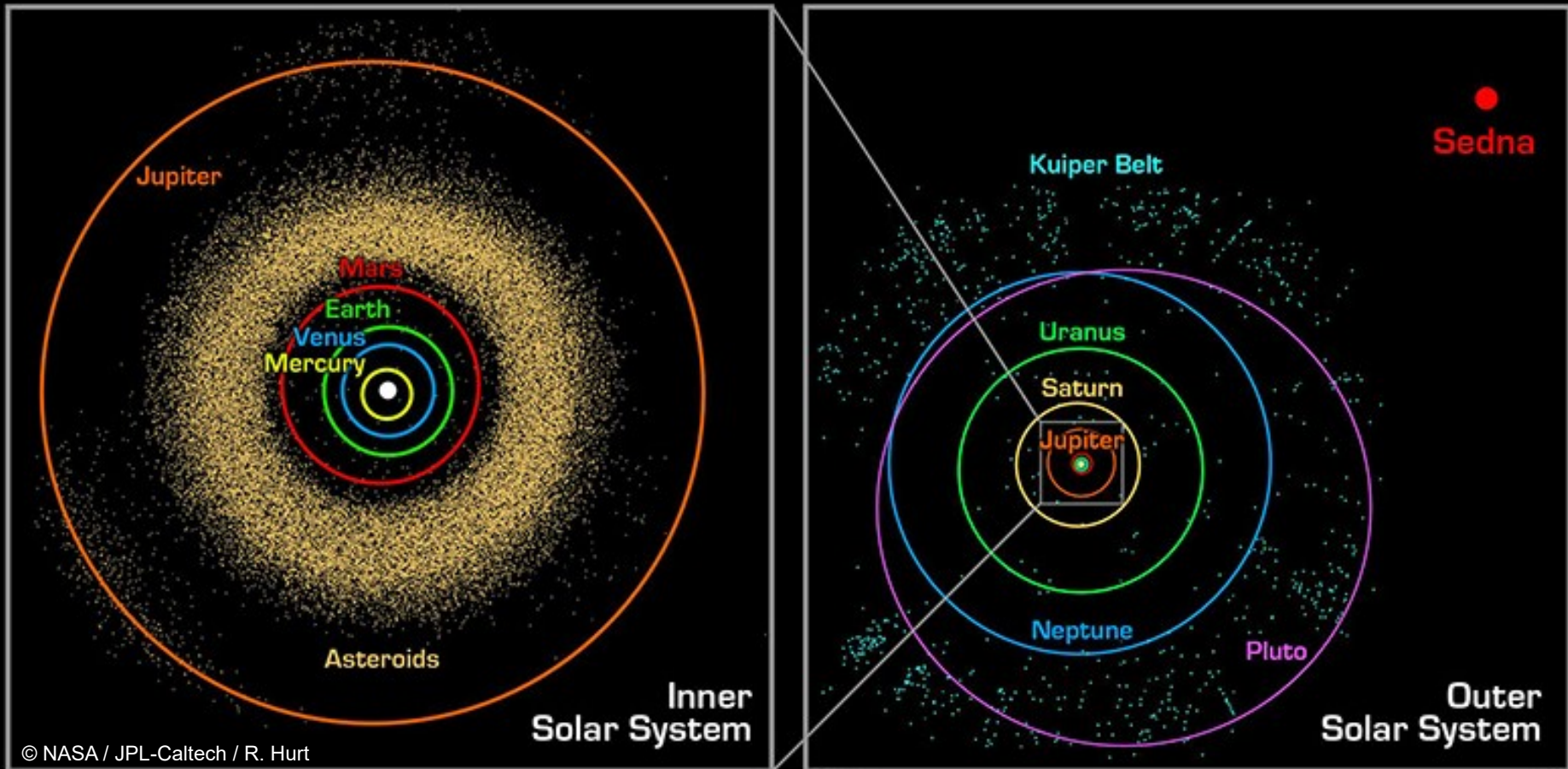
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TheTransneptunians\\_73AU.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TheTransneptunians_73AU.svg)





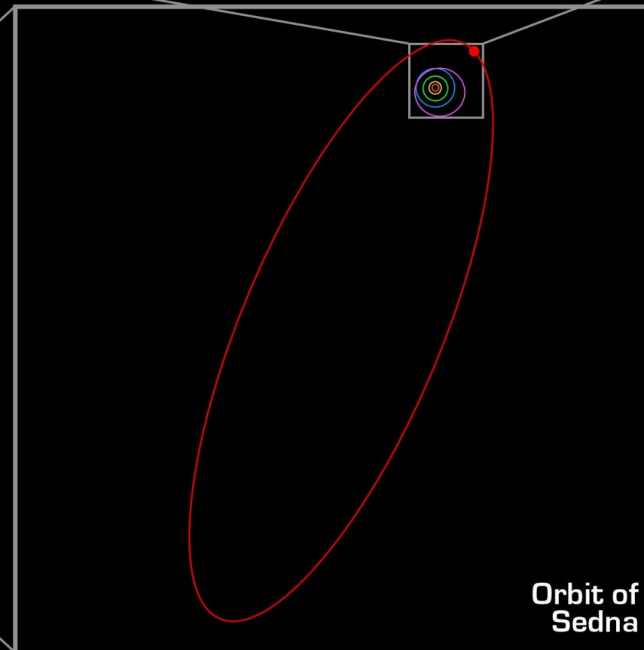
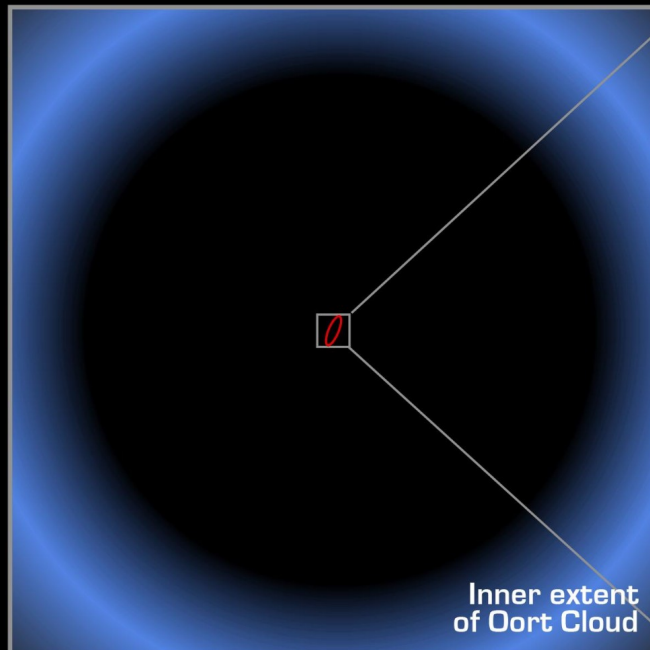
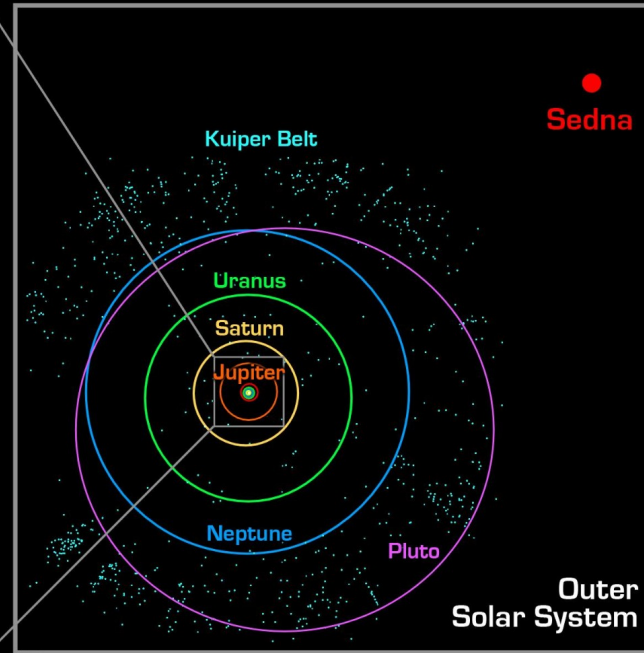
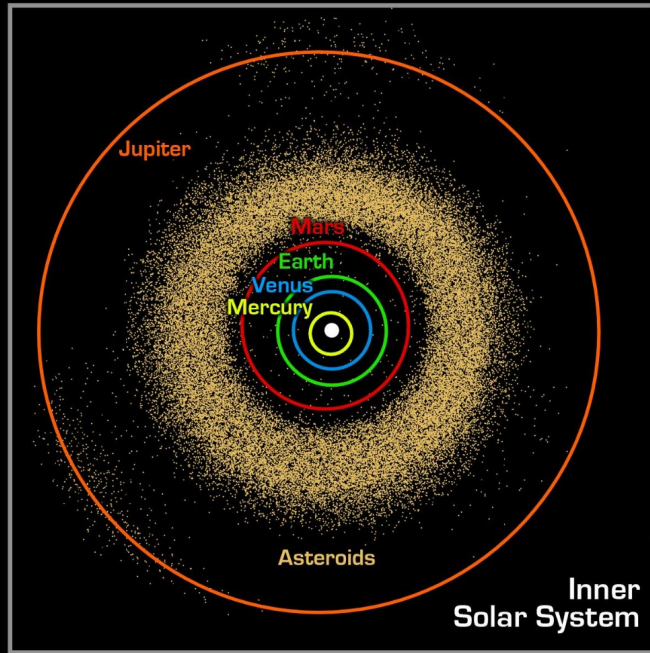
# Arquitetura do Sistema Solar

- Planetas rochosos (0,4 - 1,5 UA) e Cinturão de asteroides (~2,7 UA)
- Planetas gigantes (Júpiter, Saturno, Urano e Netuno), 5 - 30 UA
- Transnetunianos [Kuiper + Disco Disperso] (30 a ~100 UA). Plutão, Sedna, etc
- Nuvem de Oort (2000 a ~ 100.000 UA)



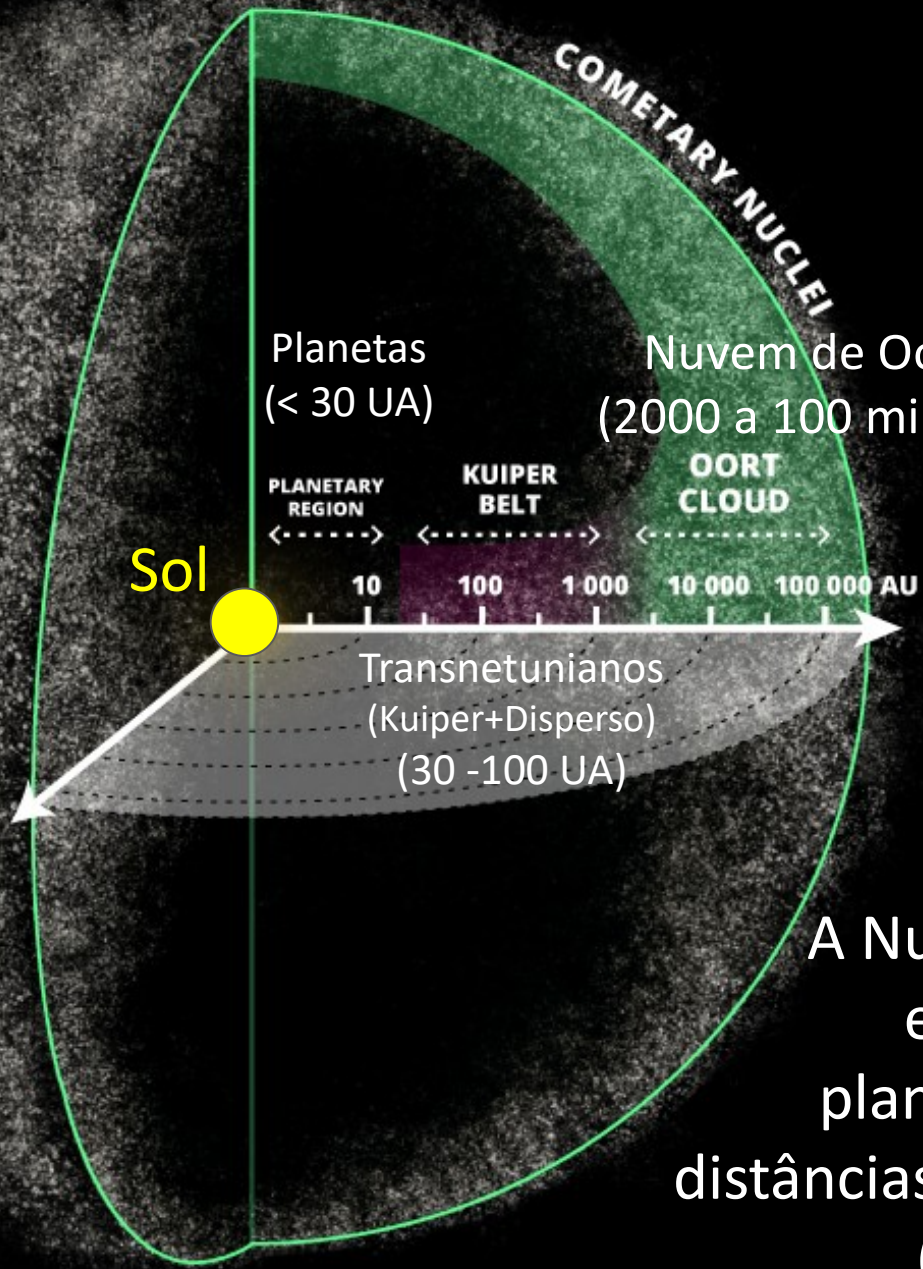


# Sistema Solar



- Planetas rochosos Mercúrio, Vênus, Terra e Marte (0,4 - 1,5 UA)
- Cinturão de asteroides (~ 3 UA)
- Planetas gigantes Júpiter, Saturno, Urano e Netuno (5 - 30 UA)
- Objetos transnetunianos (30 - 100 UA). Por ex., Plutão e Sedna
- Nuvem de Oort (2000 - 100 mil UA)





Planetas  
( $< 30$  UA)

Nuvem de Oort  
(2000 a 100 mil UA)

Proxima  
Centauri

4,24 anos-luz

Sol

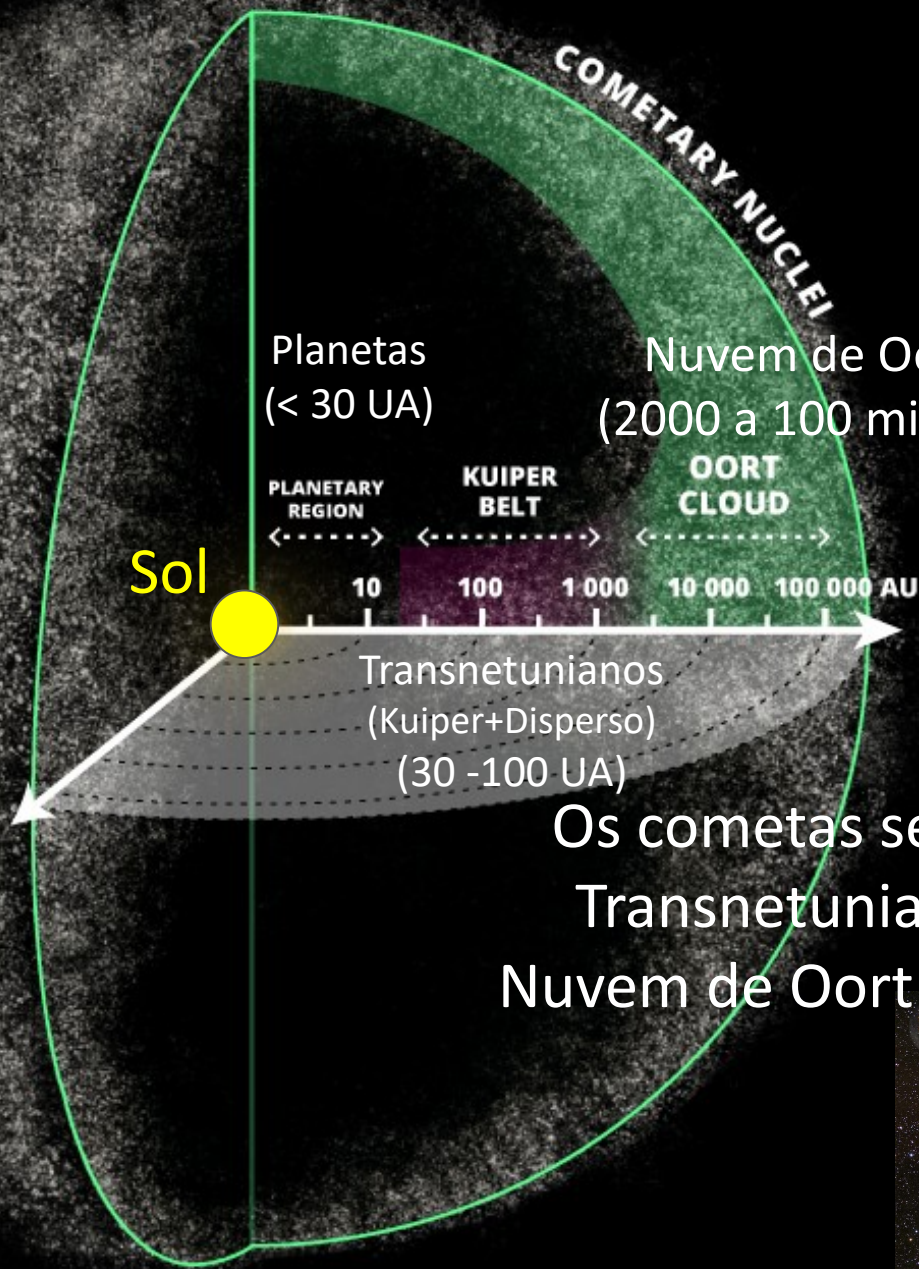


Transnetunianos  
(Kuiper+Disperso)  
(30 -100 UA)

A Nuvem de Oort é uma estrutura esférica de planetesimais voláteis a distâncias de 2 a ~100 mil UA (0,03 a 1,6 anos-luz)



1 U.A.: distância média entre a Terra e o Sol (~150 milhões de km)



Proxima Centauri

4,24 anos-luz



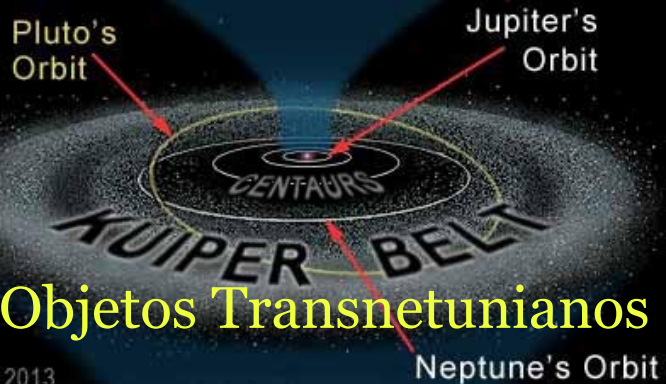
Os cometas se originam na região Transnetuniana (30-100 UA) e na Nuvem de Oort (2000 a 100 mil UA)





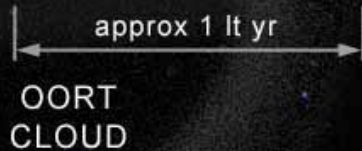


## Cinturão de asteroides

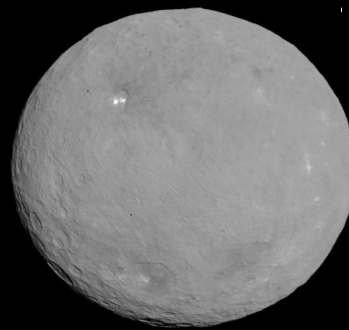


## Objetos Transnetunianos

© 2013  
Gary M. Winter  
SkyMarvels.com



## Nuvem de Oort



**Ceres**

939 km



**Vesta**

525 km



**433 Eros**  
13 x 13 x 33 km

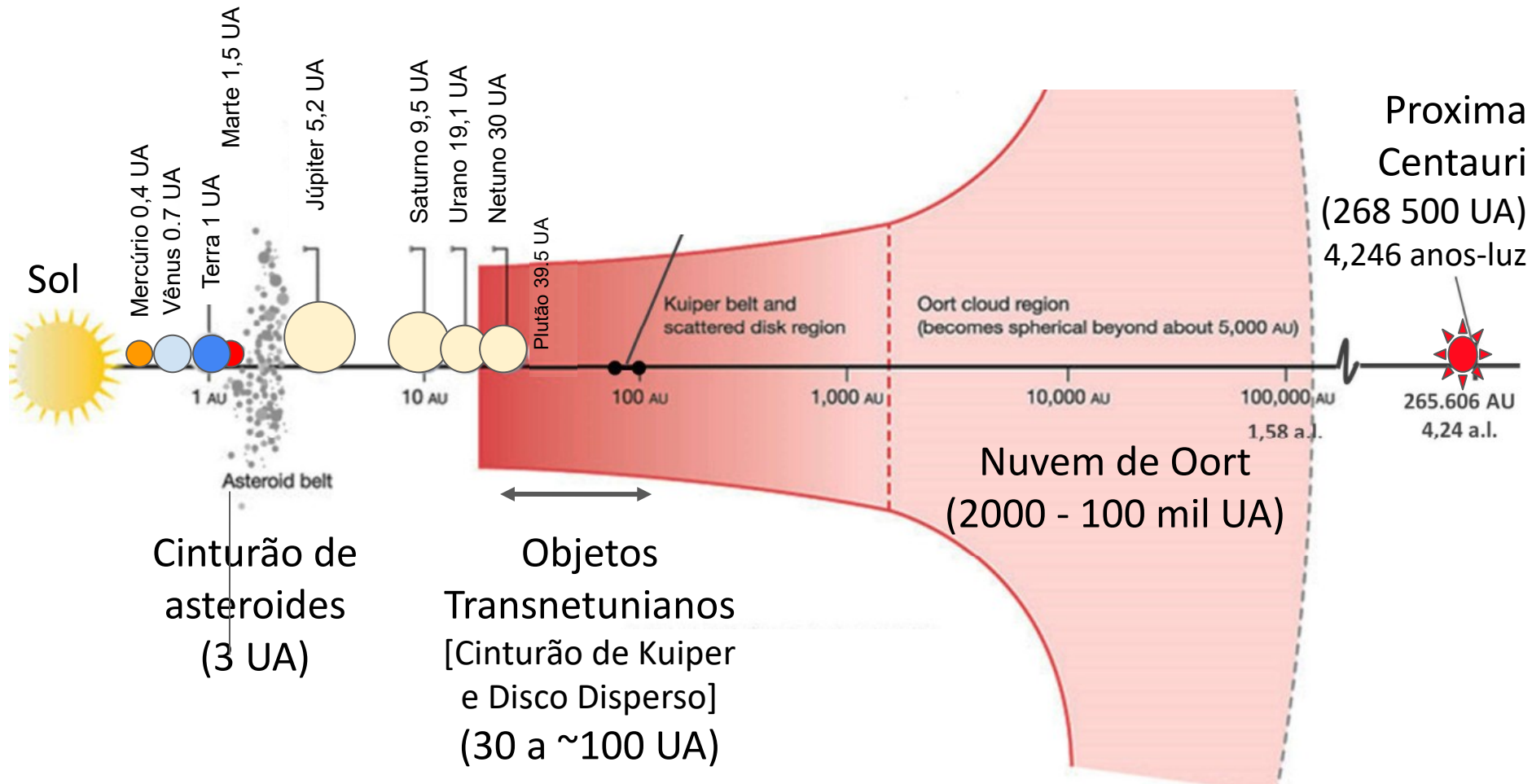
Os asteroides são rochosos e a maioria é < 1 km (de 1 m a 939 km). Origem: cinturão de asteroides

Os núcleos dos cometas são compostos de gelo e a maioria é < 10 km (tamanhos de 100 m a 100 km). Origem: Transnetuniana e Nuvem de Oort



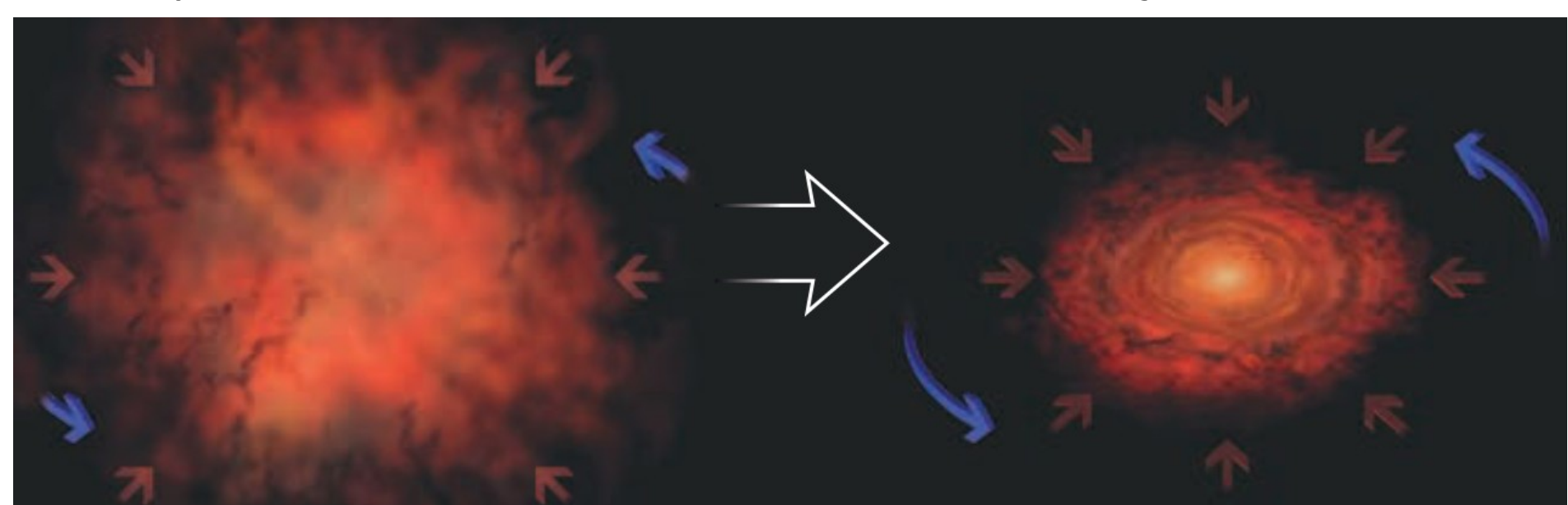


# Uma teoria da formação do Sol e o Sistema Solar deve explicar as suas características gerais (e as exceções ao comportamento geral, p.ex., rotação de Urano)

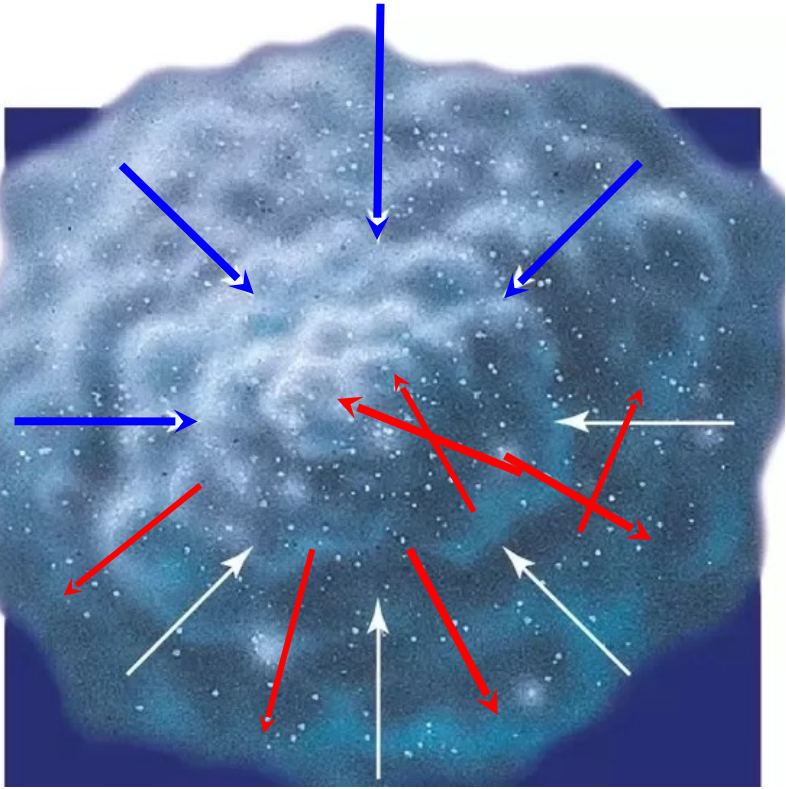


# Hipótese nebular da formação do Sistema Solar

- Filósofo Immanuel Kant, 1755
- Desenvolvida pelo matemático Pierre-Simon Laplace, 1796
- Sistema Solar se originou a partir do contração de nuvem de gás e poeira → colapso em um disco → Sol e planetas → Sol e planetas têm o mesmo sentido de rotação



# Teoria nebular moderna



- Para que a Nuvem molecular **não colapse**, a **força gravitacional (contração da nuvem)**  $<$  **força de pressão do gás (expansão)**

- **Equilíbrio hidrostático:**  
**Força gravitacional (dentro)** =  
**Força de pressão do gás (fora)**

- **Colapso da Nuvem (critério de Jeans):**

**Força gravitacional**  $>$  **Força de pressão interna do gás**



Se a nuvem molecular se encontra em equilíbrio hidrostático precário (perto do limite de Jeans),

o colapso pode acontecer devido a perturbações:

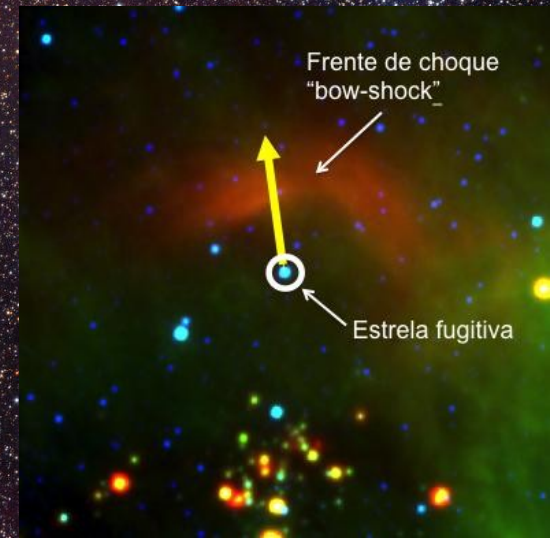
- Outra galáxia
- Entre nuvens
- Explosão supernova

Nota: a órbita do Sol na Galáxia não é tão simples como a mostrada





A “asa” da nebulosa da Gaivota é uma gigantesca concha estelar denominada estrutura "CMa shell" (concha CMa). Foi formada por sucessivas explosões de supernova, segundo pesquisa de Dra. Beatriz Fernandes e da Profa. Jane Gregorio-Hetem (IAG-USP),





# Conservação de momento angular $L$

$$\mathbf{L} = I\boldsymbol{\omega} = (r^2 m) \left( \frac{\mathbf{r} \times \mathbf{v}}{r^2} \right) = m(\mathbf{r} \times \mathbf{v}) = \mathbf{r} \times m\mathbf{v} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$$

For a point particle in motion:

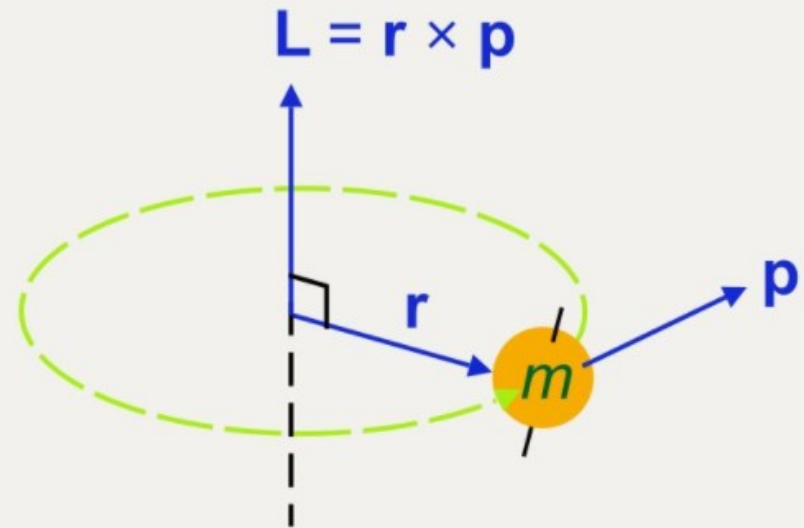
$I = r^2 m$  is the moment of inertia

$\boldsymbol{\omega} = \frac{\mathbf{r} \times \mathbf{v}}{r^2}$  is the orbital angular velocity

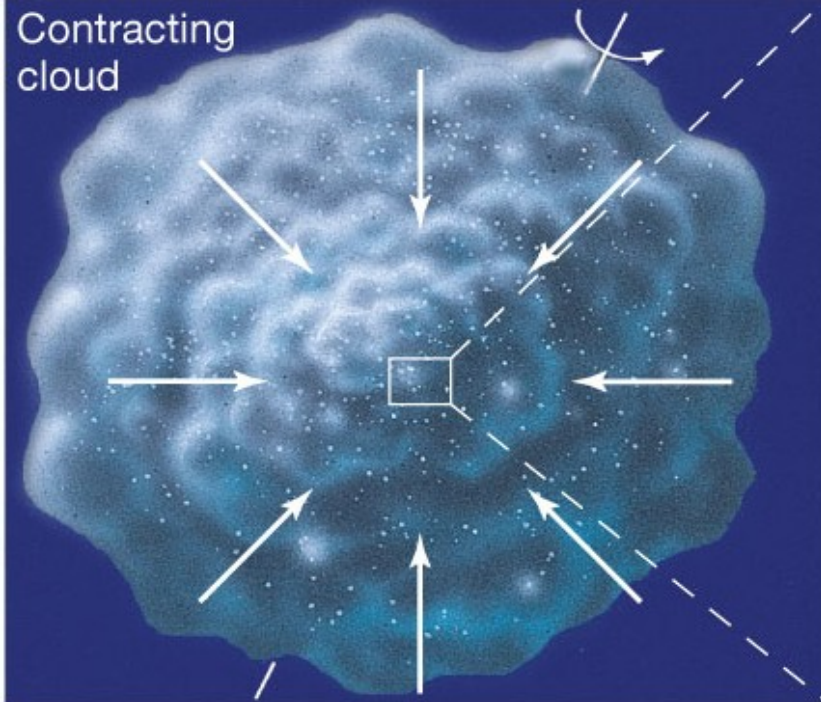
$\mathbf{r}$  is the position vector relative to the origin

$\mathbf{v}$  is the linear velocity relative to the origin

$m$  is the mass







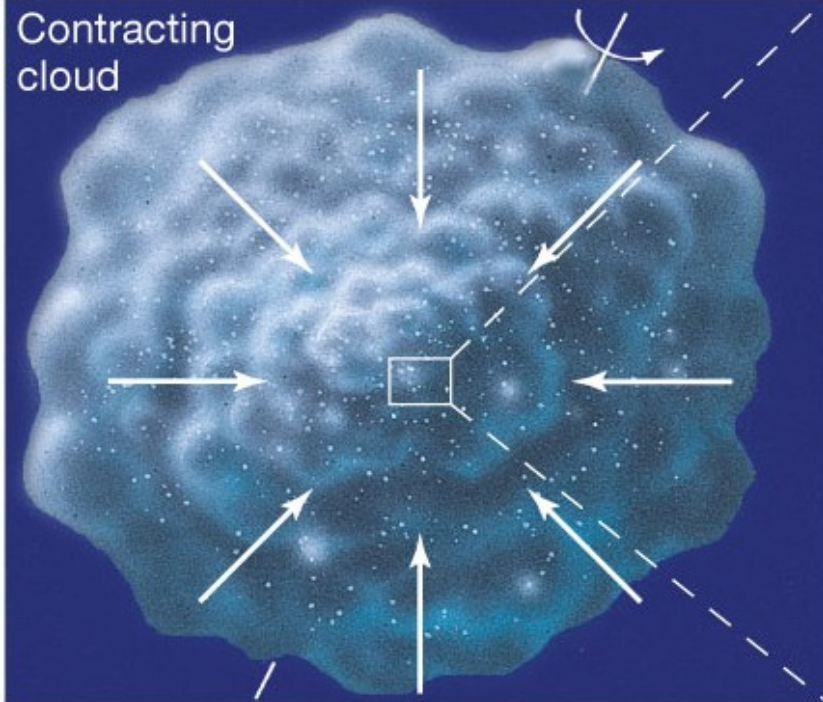
Pela conservação de momento angular ( $L = I\omega$ ), ao se contrair, a nuvem gira mais rápido

$$\text{Para uma esfera: } I = \frac{2}{5} M R^2$$

$$L = I\omega = I_{\text{inicial}}\omega_{\text{inicial}} = I_{\text{final}}\omega_{\text{final}}$$

Mesma massa  $\rightarrow$

$$R^2_{\text{inicial}}\omega_{\text{inicial}} = R^2_{\text{final}}\omega_{\text{final}}$$



Pela conservação de momento angular ( $L = I\omega$ ), ao se contrair, a nuvem gira mais rápido

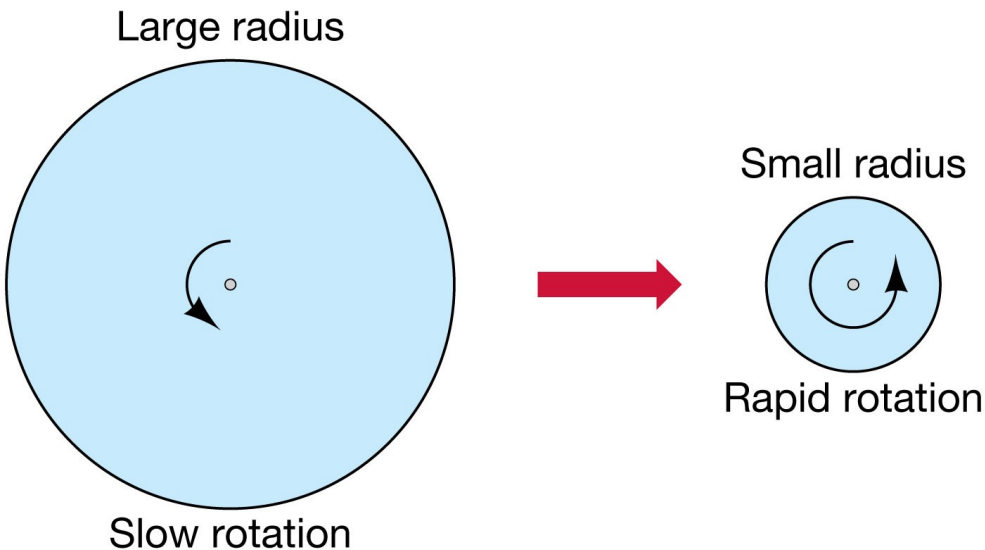
Para uma esfera:  $I = \frac{2}{5} M R^2$

$$L = I\omega = I_{\text{inicial}}\omega_{\text{inicial}} = I_{\text{final}}\omega_{\text{final}}$$

Mesma massa  $\rightarrow$

$$R^2_{\text{inicial}}\omega_{\text{inicial}} = R^2_{\text{final}}\omega_{\text{final}}$$

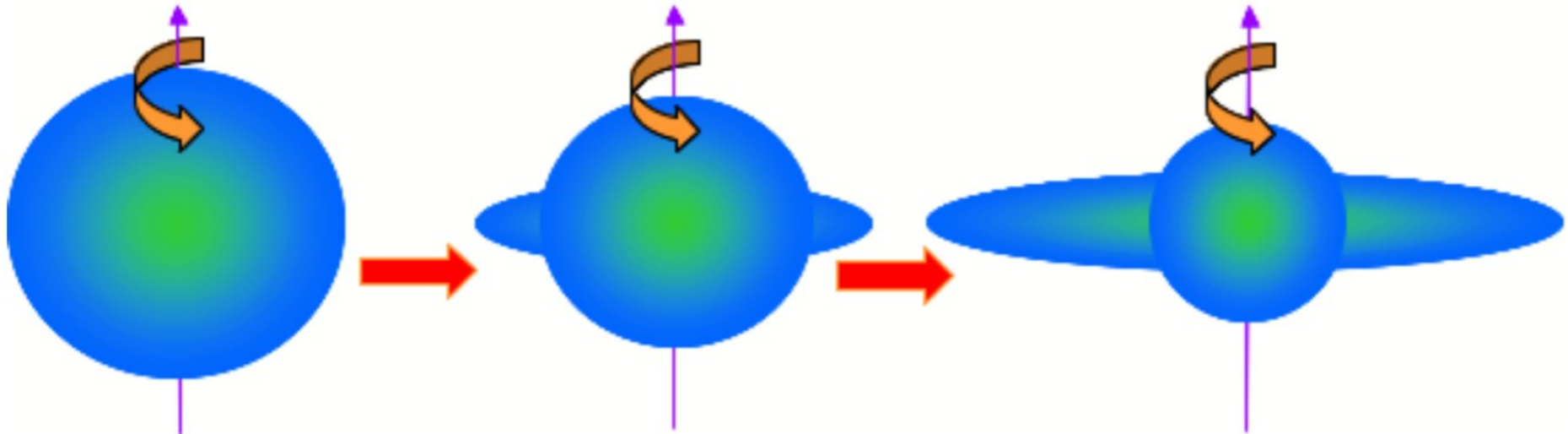
$$\omega_{\text{final}} = \omega_{\text{inicial}} \left( R_{\text{inicial}}/R_{\text{final}} \right)^2$$



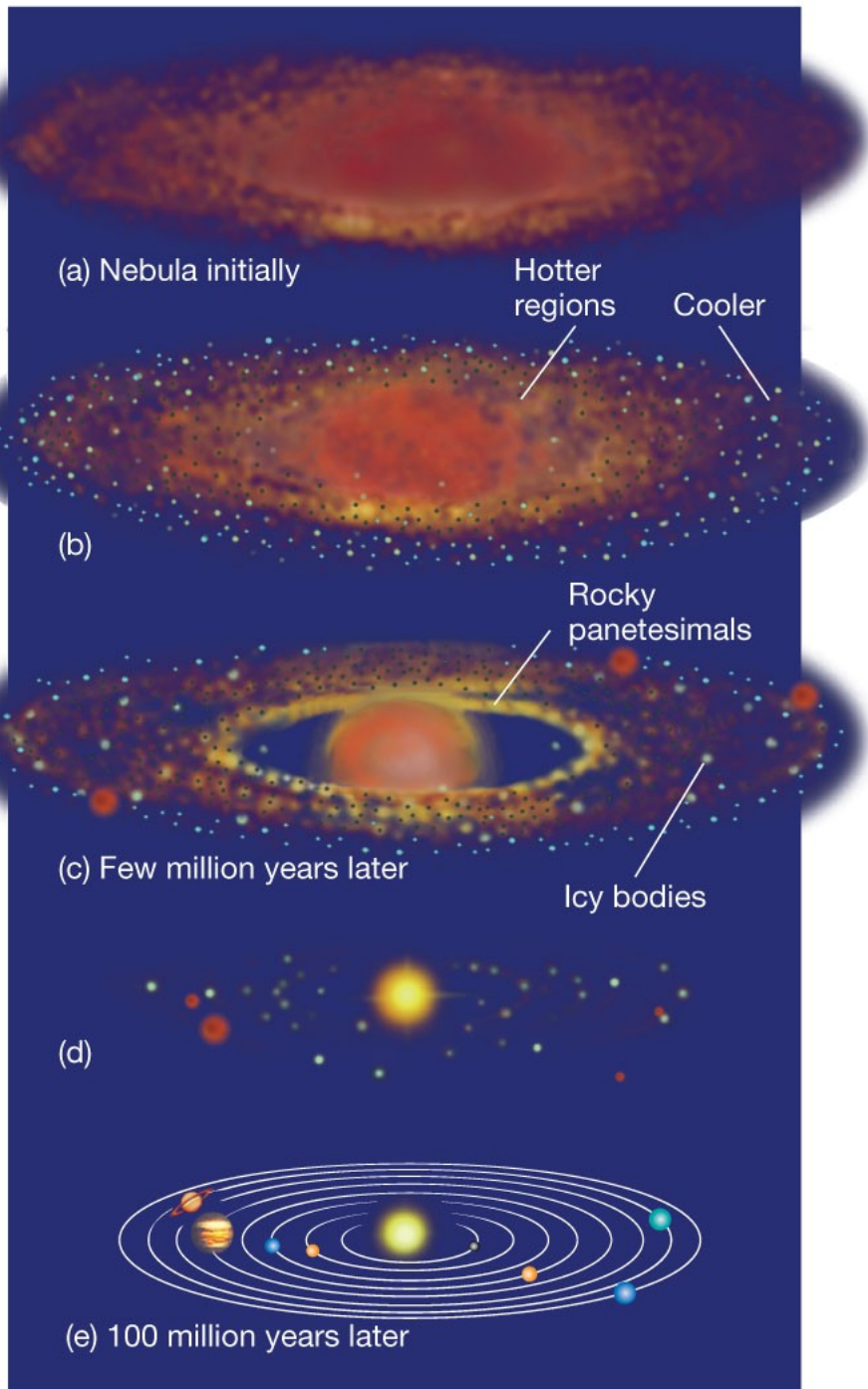
# Formação de disco

$$\omega_{\text{final}} = \omega_{\text{inicial}} \left( R_{\text{inicial}} / R_{\text{final}} \right)^2$$

Nuvem contrai  $\rightarrow$  raio  $R$  fica menor  $\rightarrow$  a velocidade aumenta e a nuvem gira mais rápido, criando grandes forças centrífugas, que são maiores equador (que é perpendicular ao eixo de rotação). A força centrífuga se opõe ao colapso no equador  $\rightarrow$  disco protoplanetário

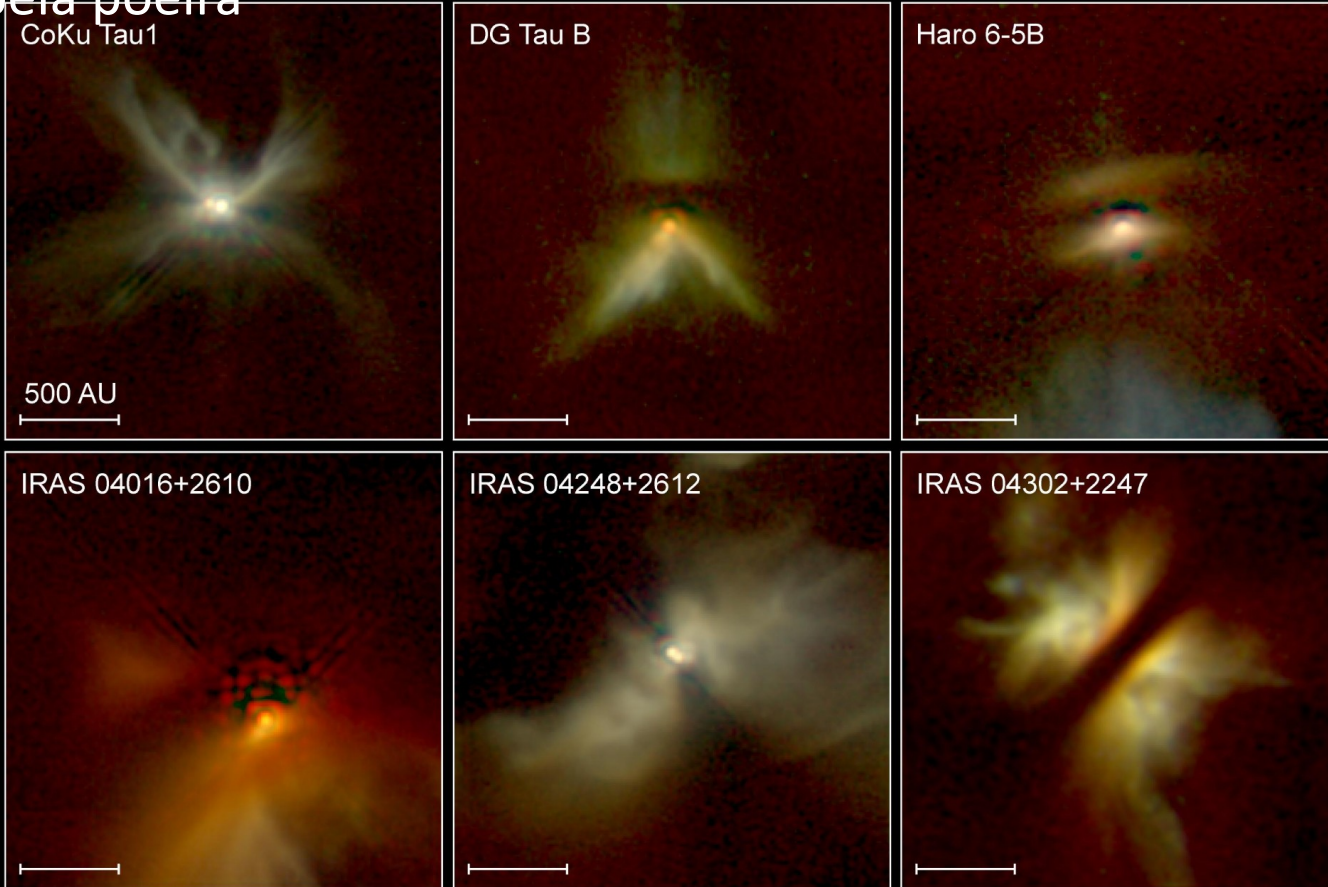






- Colapso da nebulosa e formação de disco
- Condensação em grãos de poeira. Região mais próxima à estrela é mais quente (material rochoso). Região mais afastada é mais fria (rochoso + gelos).
- Colisões  $\Rightarrow$  corpos maiores. Região interna: planetesimais rochosos. Região externa: rochosos + gelos
- Após 10 Myr: protoplanetas rochosos na região interna e planetas gigantes na externa
- $\sim$ 100Myr: Sistema solar final

Discos em formação, observados no infravermelho pelo telescópio espacial Hubble em Taurus. A luz das estrelas em formação é bloqueada pelo espesso disco de poeira. O brilho ao redor do disco escuro é a luz da estrela refletida pela poeira



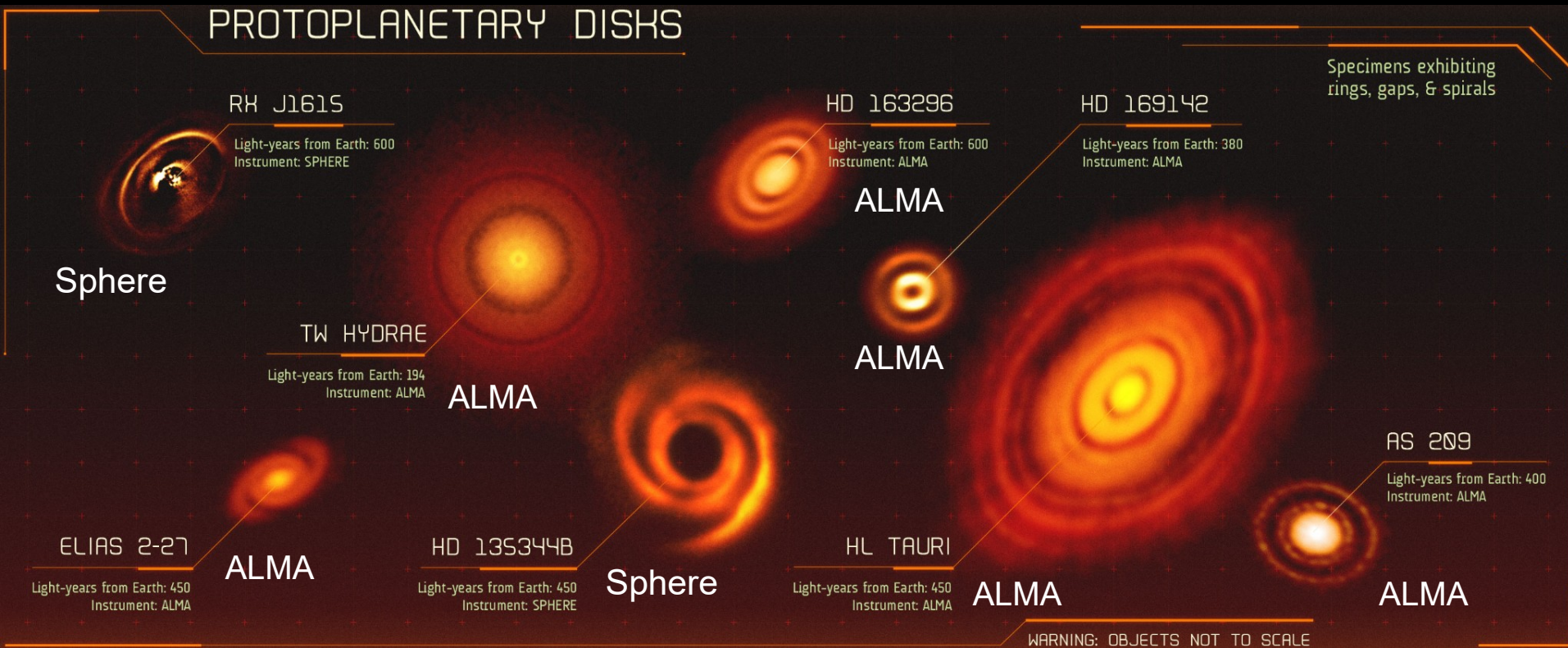
<https://hubblesite.org/contents/media/images/1999/05/7771-Image.html>

**Young Stellar Disks in Infrared**  
Hubble Space Telescope • NICMOS



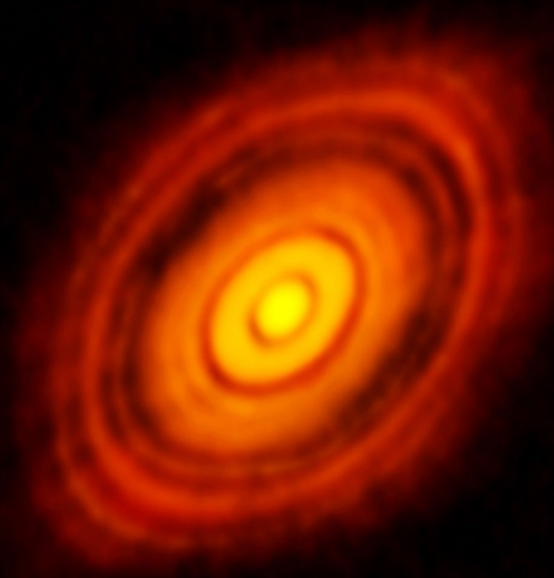
# Discos protoplanetários

Observados pelo ESO (VLT 8m + Sphere) no infravermelho (ocultando a estrela central) e pelo Radiotelescópio ALMA

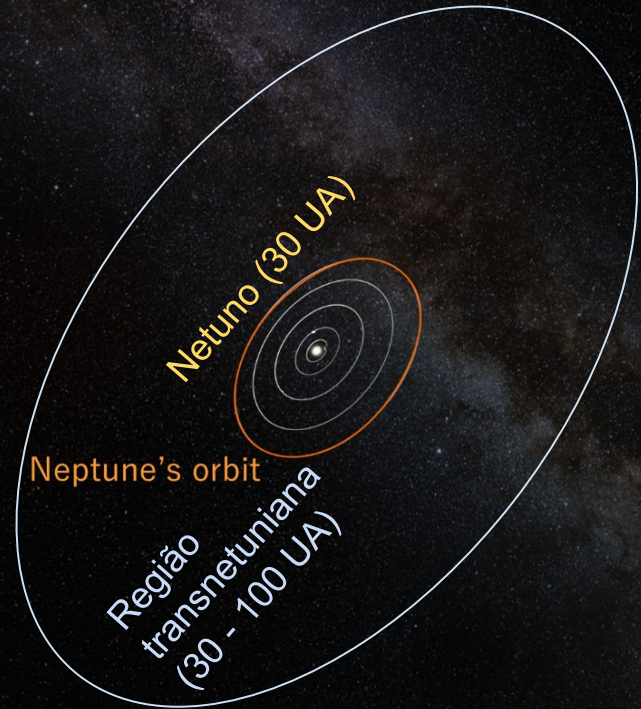




# Comparação de disco protoplanetário HL Tauri observado pelo ALMA e o tamanho do Sistema Solar



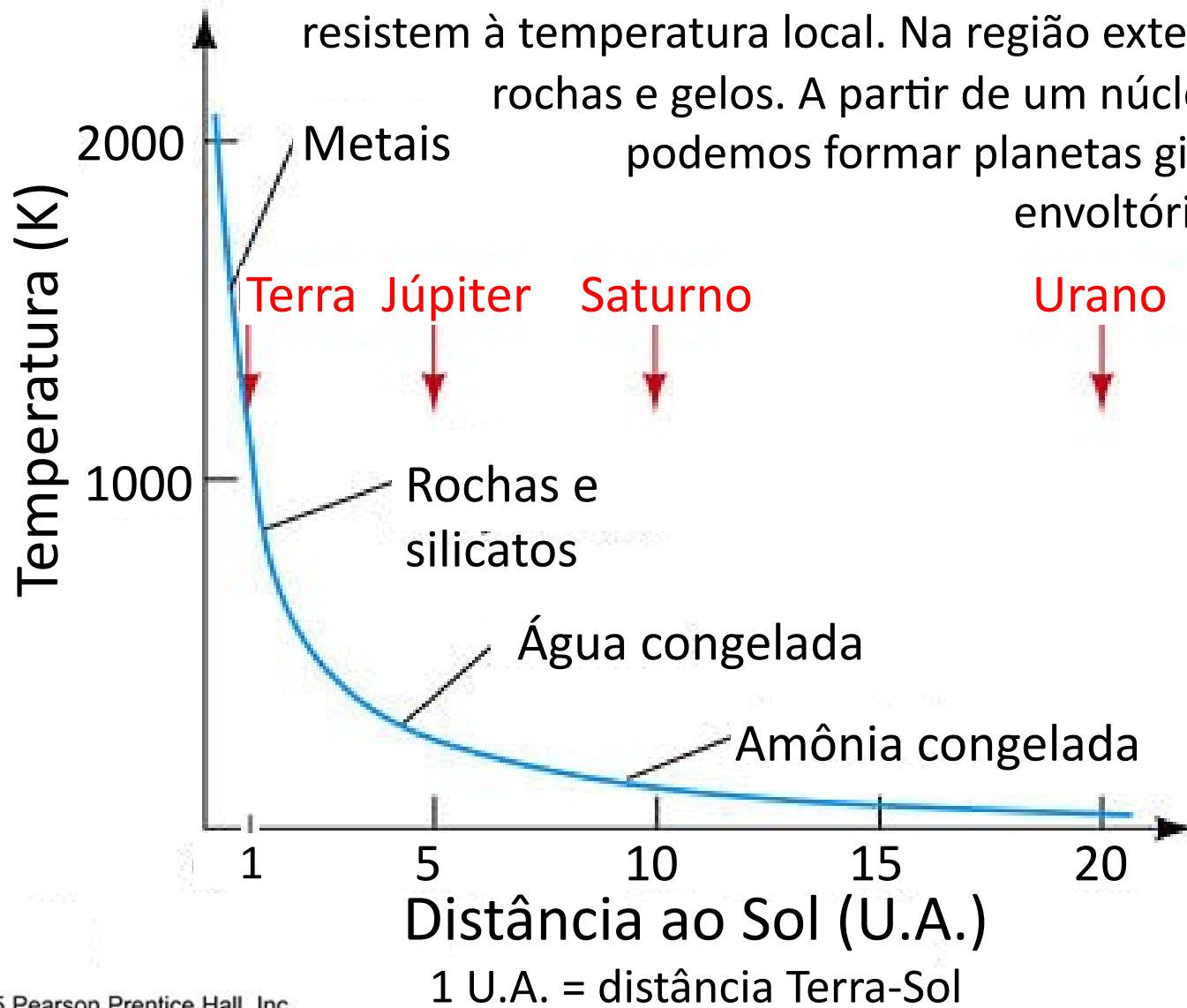
HL Tauri



Solar System

# Temperatura na nebulosa solar e formação de planetas.

Na região interna são formados planetas rochosos, pois os metais e rochas resistem à temperatura local. Na região externa, temos rochas e gelos. A partir de um núcleo rochoso, podemos formar planetas gigantes com envoltórios gasosos.



**Material Exemplo Temp. Abundância (% massa)**

**Hydrogen and Helium Gas**



hydrogen, helium

do not condense in nebula



98%

**Materiais na nebulosa solar**

**Hydrogen Compounds**



water (H<sub>2</sub>O)  
methane (CH<sub>4</sub>)  
ammonia (NH<sub>3</sub>)

<150 K



1.4%

**Rock**



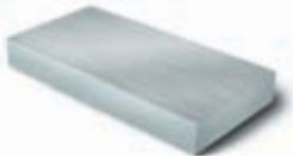
various minerals

500–1300 K



0.4%

**Metals**



iron, nickel, aluminum

1000–1600 K



0.2%



# Sequência de condensação na nebulosa solar

---

Temperature/K	Substance	Chemical formula
1758	Corundum	$\text{Al}_2\text{O}_3$
1471	Iron–nickel	Fe plus $\sim 6\%$ Ni by mass
1450	Diopside <sup>a</sup>	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$
1444	Forsterite <sup>b</sup>	$\text{Mg}_2\text{SiO}_4$
< 1000	Alkali feldspars	$(\text{Na}, \text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$
700	Troilite	$\text{FeS}$
550–330	Hydrated minerals <sup>c</sup>	$\text{X}(\text{H}_2\text{O})_n$ or $\text{X}(\text{OH})_n$
190	Water	$\text{H}_2\text{O}$
135	Hydrated ammonia	$\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
77	Hydrated methane	$\text{CH}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$
70	Hydrated nitrogen	$\text{N}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$
37	Methane	$\text{CH}_4$
$\sim 8$	Hydrogen	$\text{H}_2$
$\sim 1$	Helium	He

Barrie Jones, Discovering the Solar System

---

<sup>a</sup> A particular form of pyroxene,  $(\text{Ca}, \text{Fe}, \text{Mg})_2\text{Si}_2\text{O}_6$ .

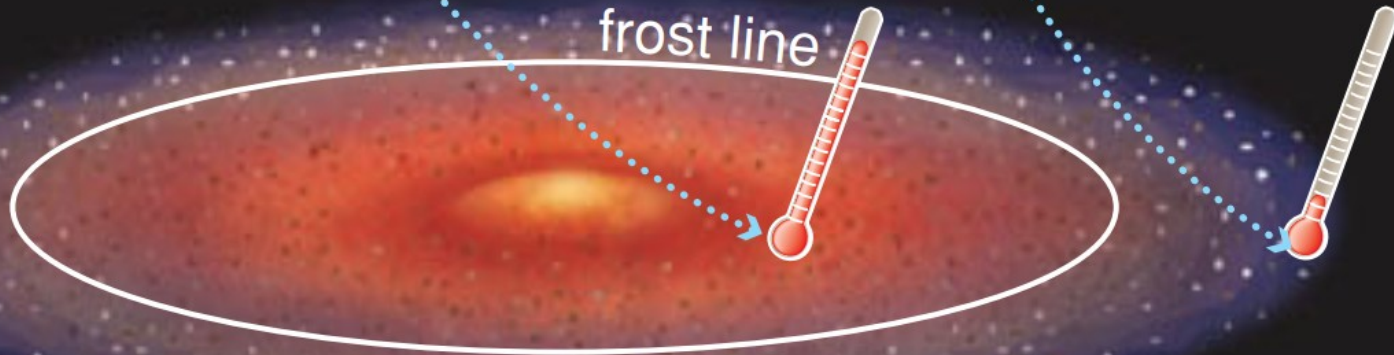
<sup>b</sup> A particular form of olivine,  $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ .

<sup>c</sup> X can be a molecule of a variety of minerals, and n is greater than or equal to 1.

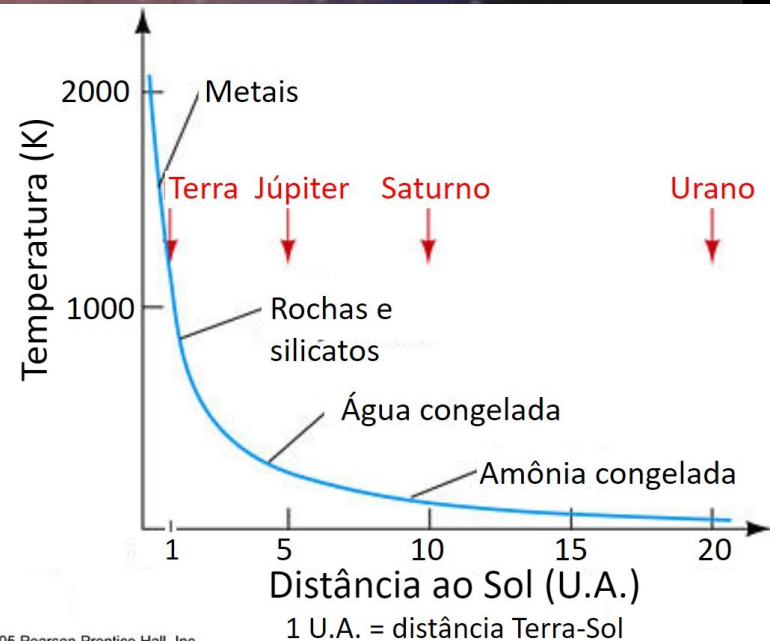
# Linha de gelo (frost line) Temperatura permite a condensação de gelos

*Within the frost line, rocks and metals condense, hydrogen compounds stay gaseous.*

*Beyond the frost line, hydrogen compounds, rocks, and metals condense.*



*Within the solar nebula, 98% of the material is hydrogen and helium gas that doesn't condense anywhere.*



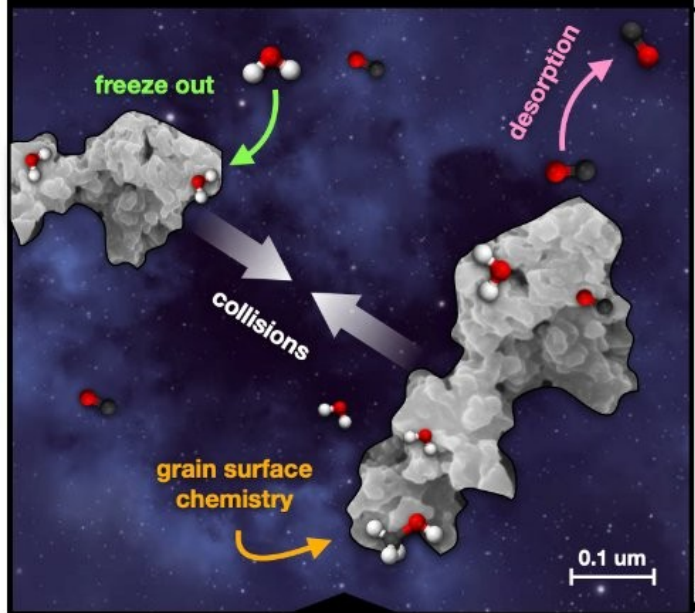


# Acreção gradual: de grãos de poeira a planetesimais

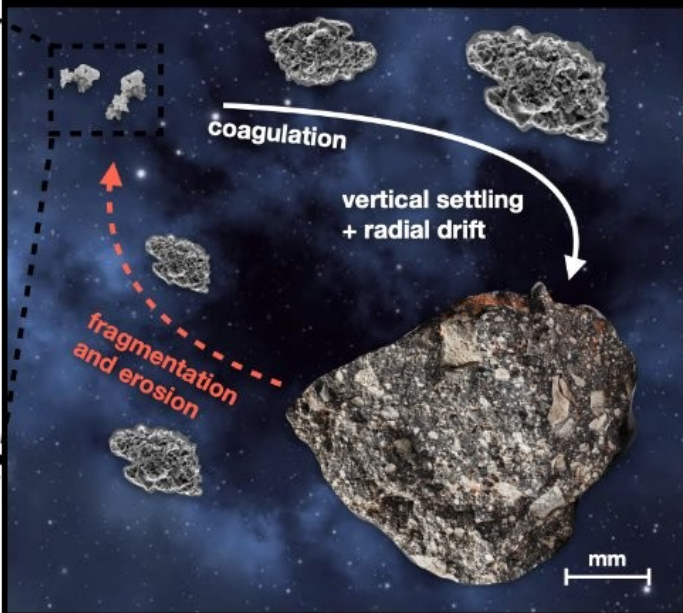
1. Coagulação de pequenos grãos de poeira ~100 nm

2. Crescimento de pequenos fragmentos (*pebbles*), tamanho ~ mm

## 1. Molecules & microscopic dust



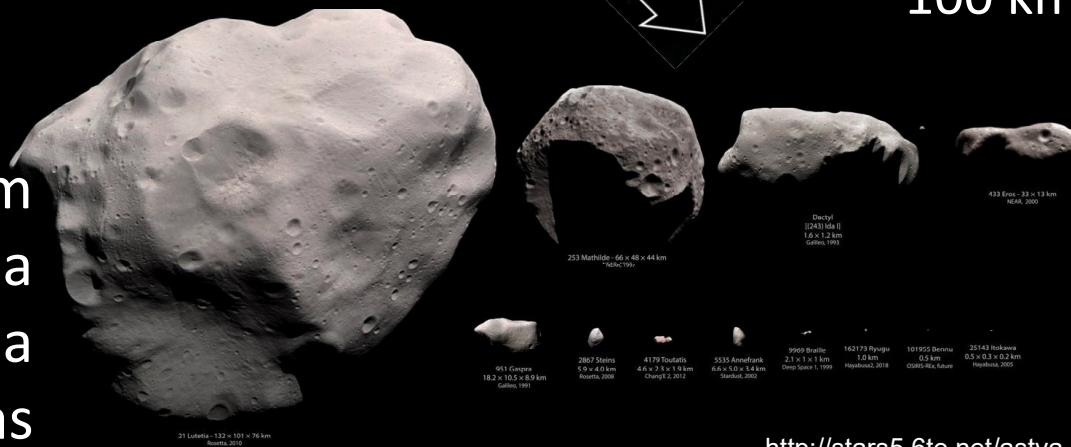
## 2. Pebble growth & dynamics



3. Aglutinação em planetesimais, tamanhos ~ 1m a ~ 100 km

© @tim\_lichtenberg

Planetesimais maiores a ~1 km podem atrair-se por meio da gravidade mútua, ajudando a formar protoplanetas





Inicialmente as órbitas caóticas favoreceram o crescimento de planetesimais por colisões. Ao atingir  $\sim 1$  km, a força da gravidade é importante, podendo crescer por atração gravitacional

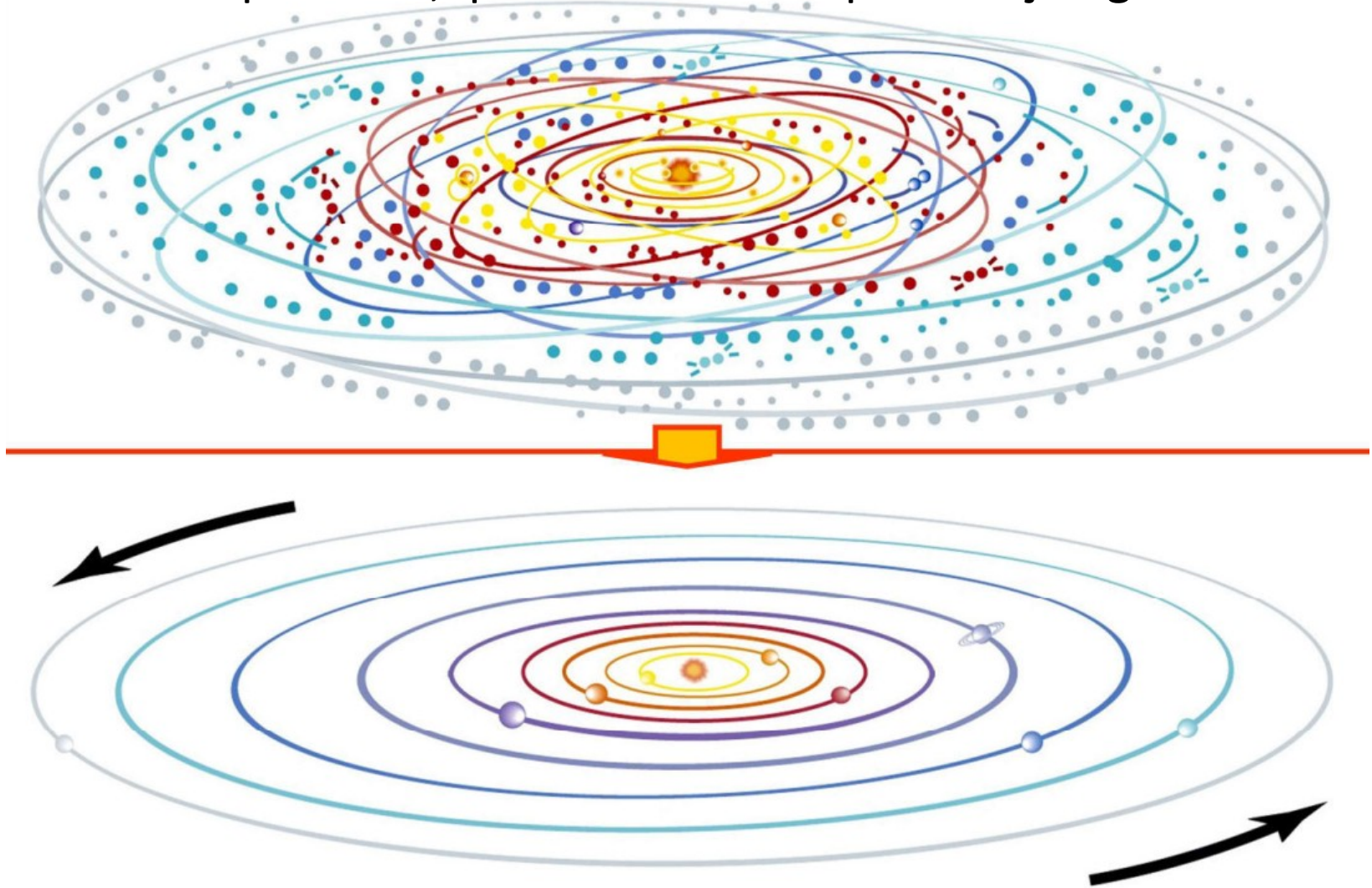
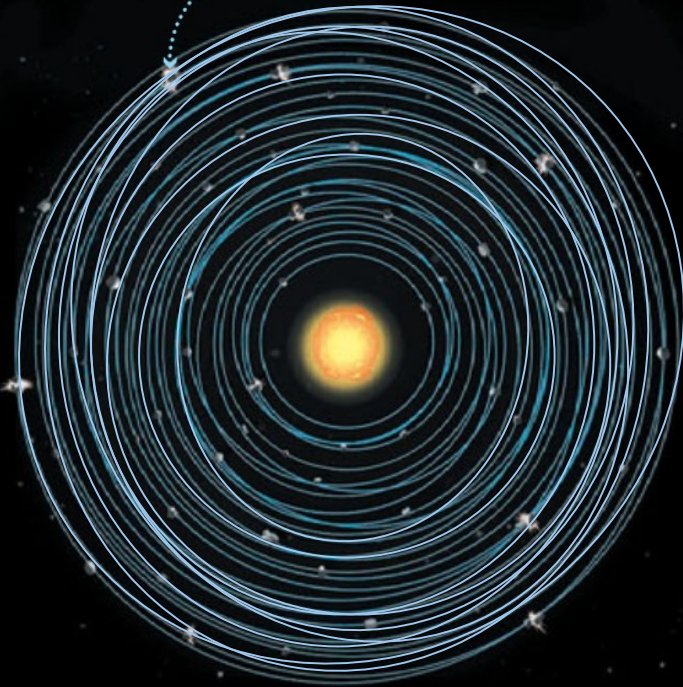


Figure 11-8d  
*Earth System History, Second Edition*  
© 2005 W. H. Freeman and Company

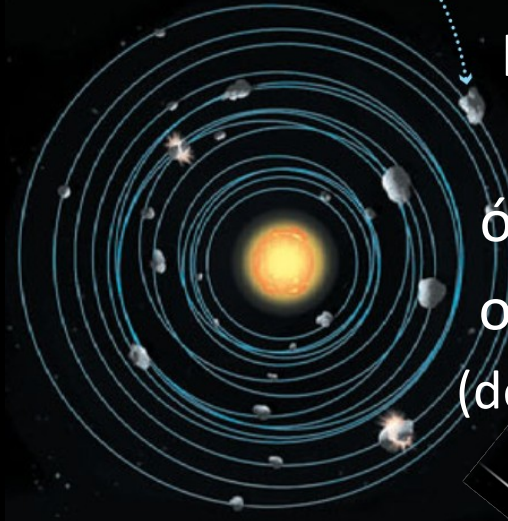
# Acreção gradual de planetesimais em planetas terrestres

*Early in the accretion process, there are many relatively large planetesimals on crisscrossing orbits.*



1. Inicialmente, há muitos planetesimais relativamente grandes em órbitas cruzadas

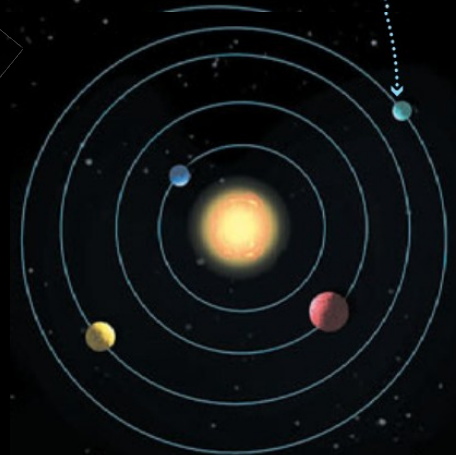
*As time passes, a few planetesimals grow larger by accreting smaller ones, while others shatter in collisions.*



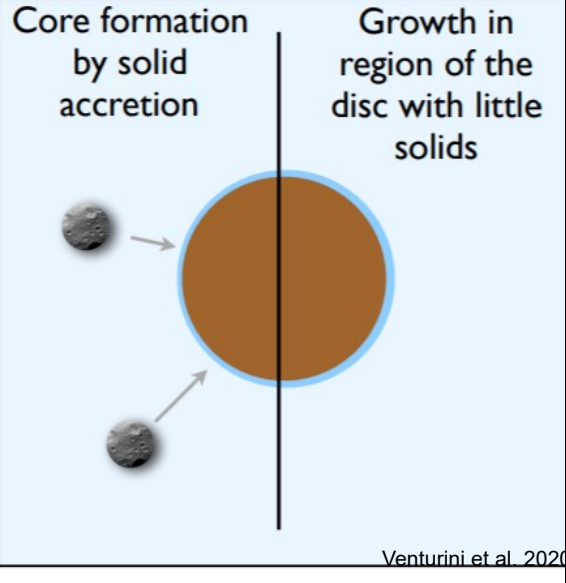
2. Alguns planetesimais crescem, enquanto outros se estilhaçam em colisões

3. Apenas os maiores planetesimais crescem para formar planetas, “limpando” as suas órbitas e se mantendo o corpo predominante (definição de planeta, IAU)

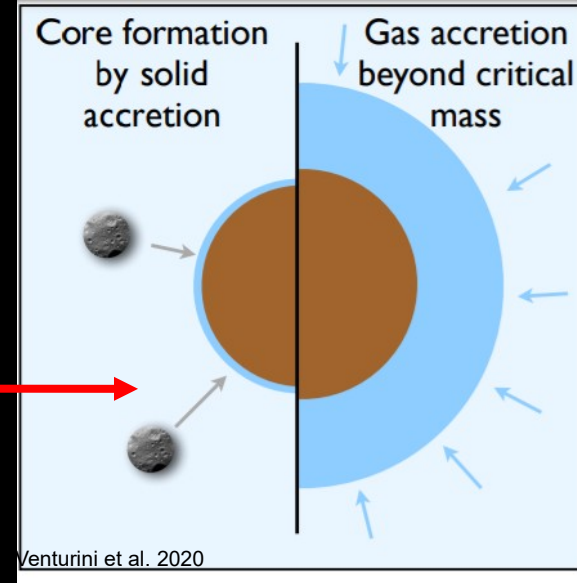
*Ultimately, only the largest planetesimals avoid shattering and grow into full-fledged planets.*







Teoria de “core accretion” (acréção de núcleo) explica formação de pequenos planetas rochosos internos e planetas gigantes gasosos externos



Formação de planeta rochoso por acreção de planetesimais



Planeta gigante: primeiro acreção de núcleo rochoso e gelos, e depois acreção de envelope gasoso (H e He)



# Teoria de “core accretion” (acresção de núcleo) explica formação de planetas rochosos internos e planetas gigantes gasosos externos

**Condensation of Solid Particles:** Hydrogen and helium remain gaseous, but other materials can condense into solid “seeds” for building planets.

Warm temperatures allow only metal/rock “seeds” to condense in inner solar system.

Cold temperatures allow “seeds” to contain abundant ice in the outer solar system.

Região interna:  
rochas/metais

Região externa:  
rochas/metais e gelos

**Accretion of Planetesimals:** Solid “seeds” collide and stick together. Larger ones attract others with their gravity, growing bigger still.

Terrestrial planets are built from metal and rock.

The seeds of jovian planets grow large enough to attract hydrogen and helium gas, making them into giant, mostly gaseous planets; moons form in disks of dust and gas that surround the planets.

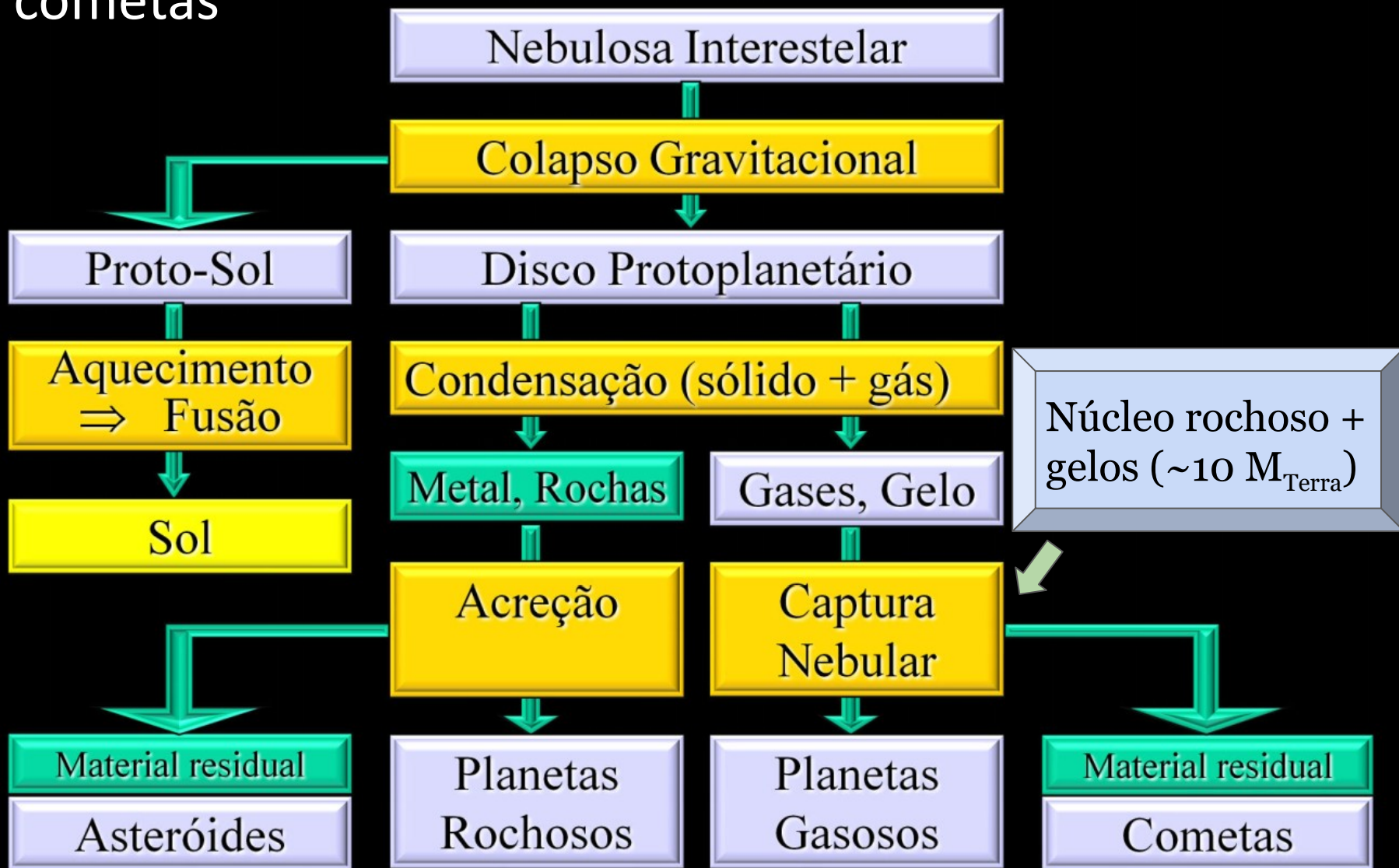
50 - 100 Myr: formação de planetas rochosos

< 10 Myr: formação de planetas gigantes (núcleo → acreção gás)



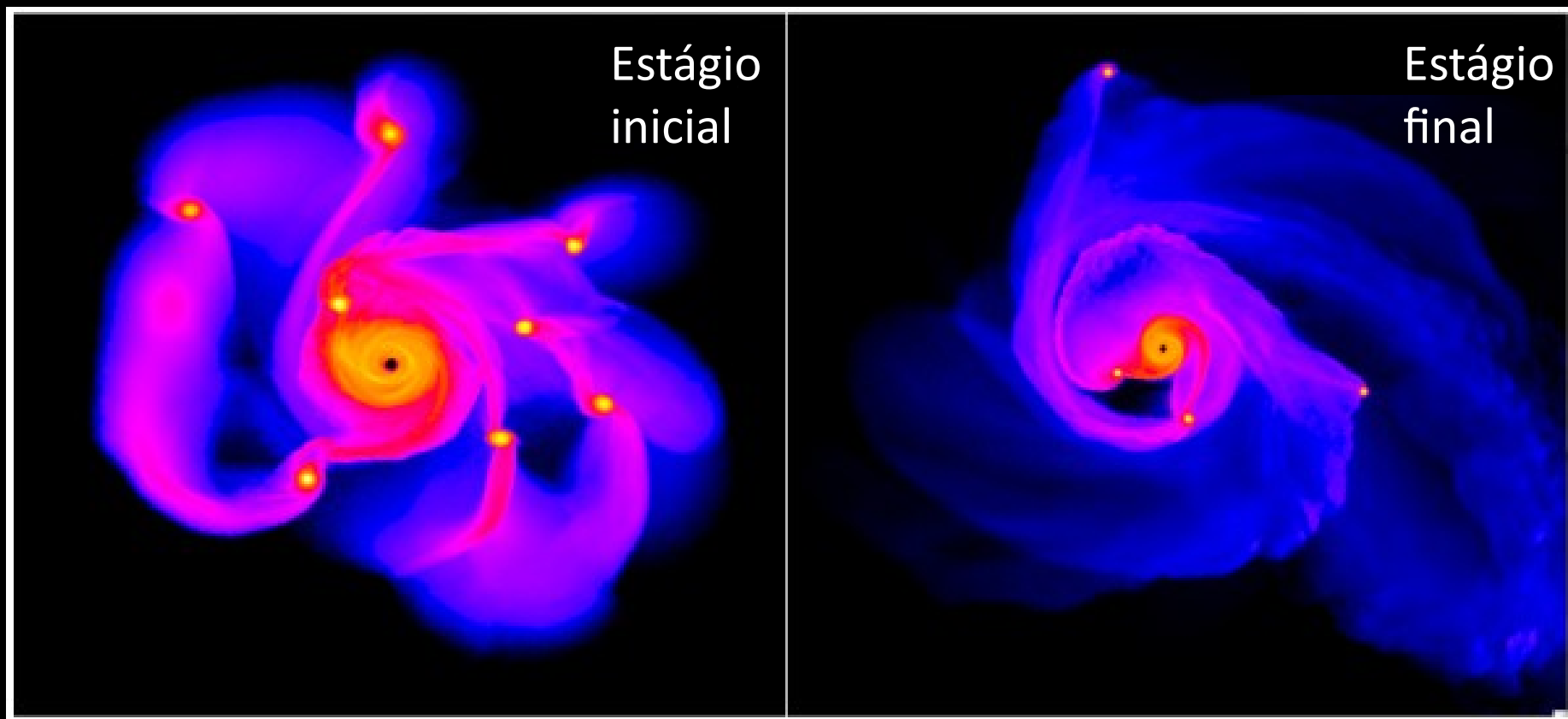
# Formação do Sol, planetas rochosos, gasosos, asteroides e cometas

Our Solar System and Its Origin, Haosheng Lin



Teoria alternativa para formar planetas gigantes:  
instabilidade do disco. É menos provável, mas é uma alternativa  
para formar planetas gigantes muito distantes da sua estrela central.

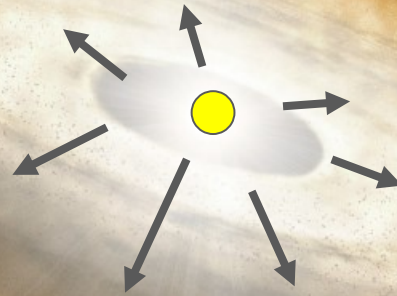
Dois instantes de simulação de colapso por instabilidade do disco. O estágio final  
mostra apenas 4 protoplanetas gigantes restantes entre os formados inicialmente.



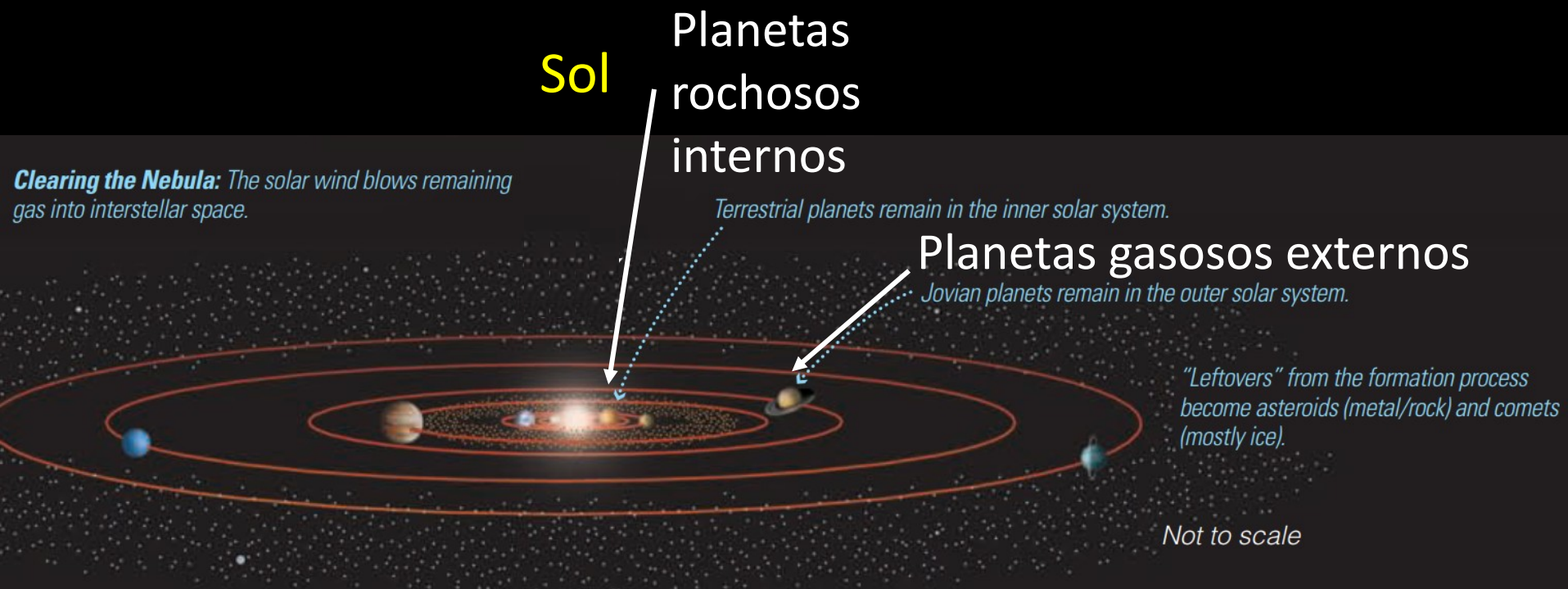


O vento solar do proto-Sol era muito forte, e limpou o gás residual do disco protoplanetário.

Apenas os planetas gigantes preservaram quantidades significativas de gases voláteis em seus envelopes.



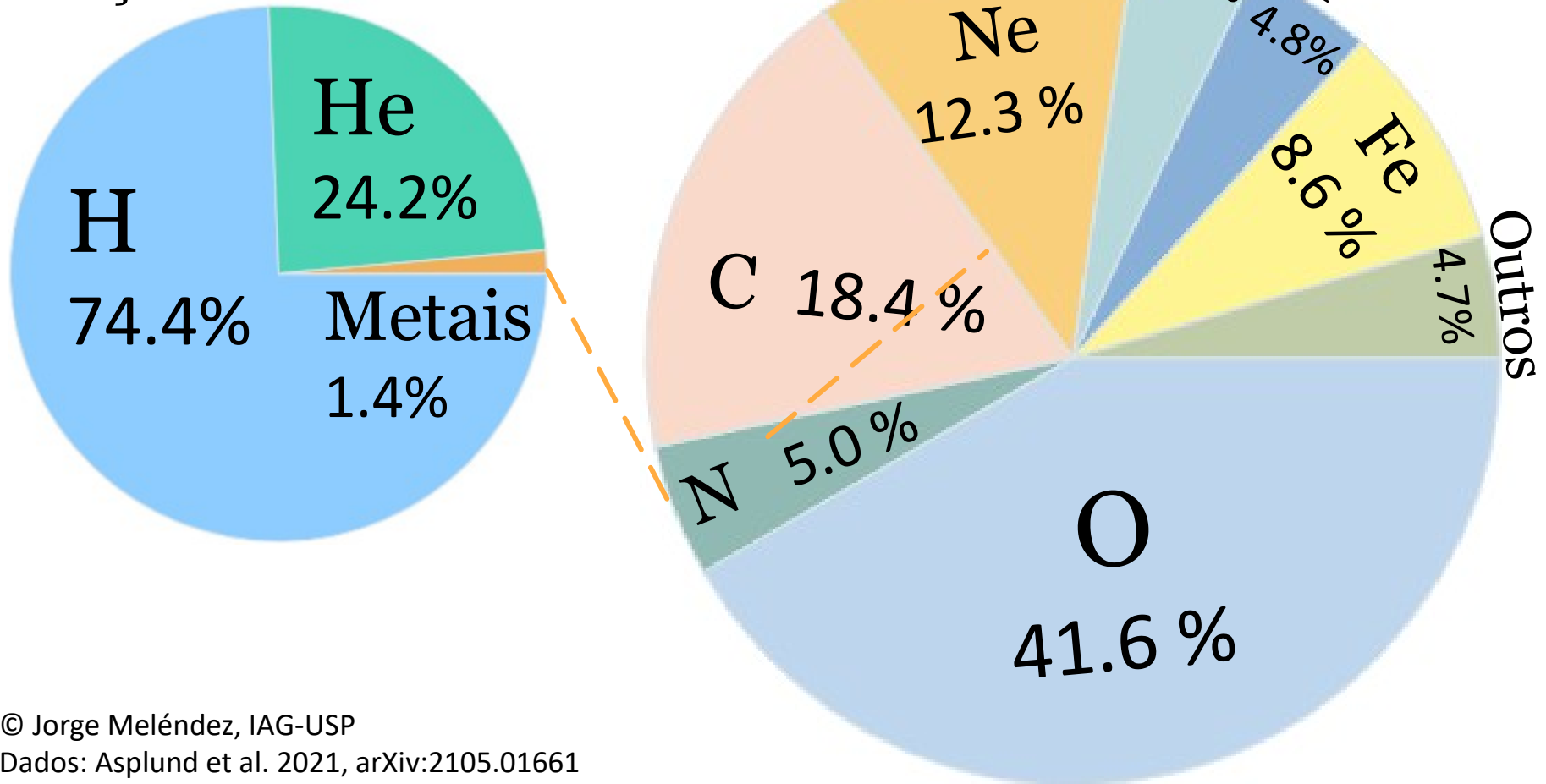
# Configuração final do Sistema Solar: o vento solar sopra o restante do gás no espaço interestelar.



As “sobras” do processo de formação tornam-se asteróides (metal / rocha) e cometas (principalmente gelo)

Se o Sol e as rochas do Sistema Solar surgiram da mesma nuvem primordial, a composição deveria ser similar (exceto os elementos voláteis)

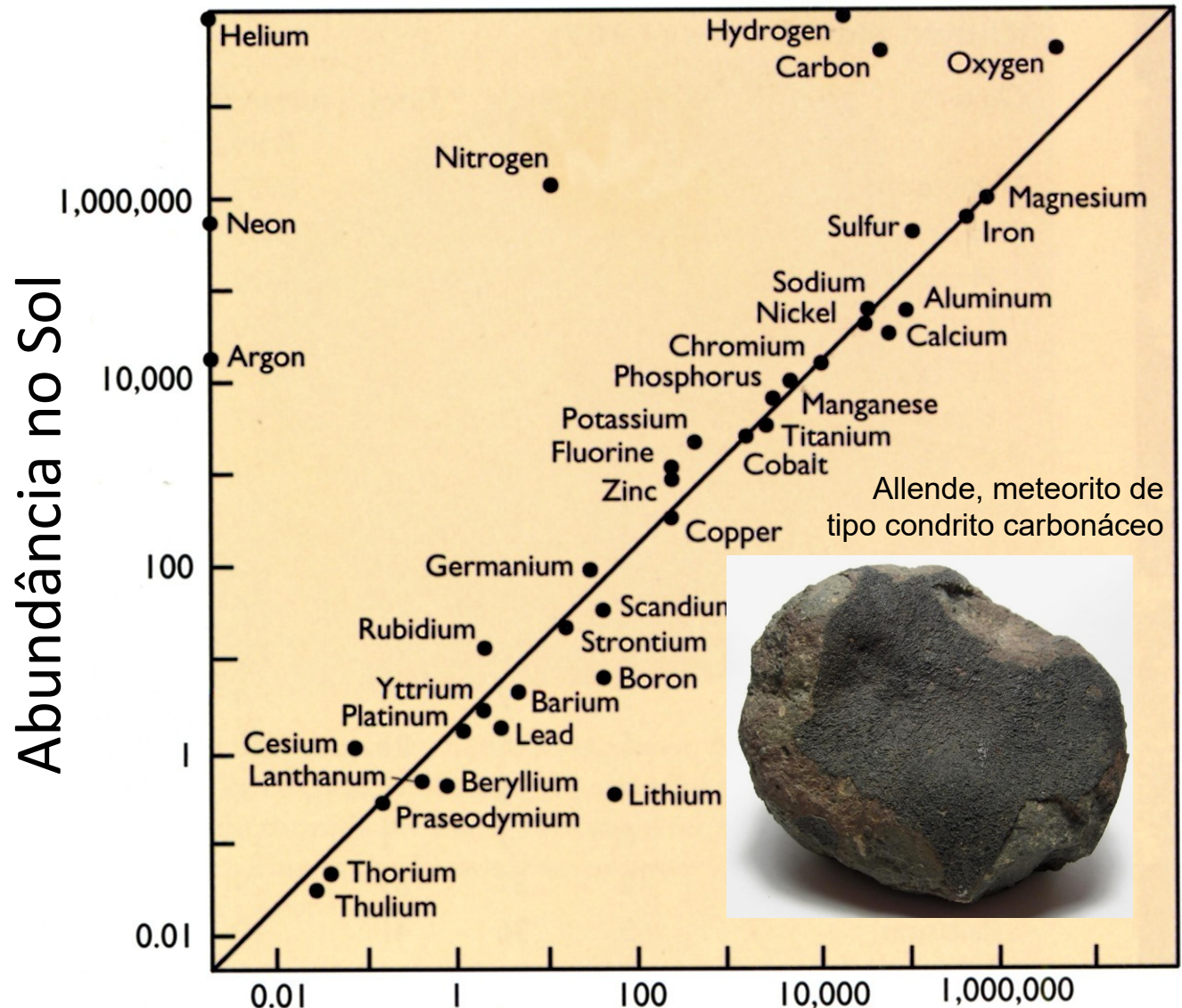
## Abundância dos elementos no Sol Fração de massa do Sol





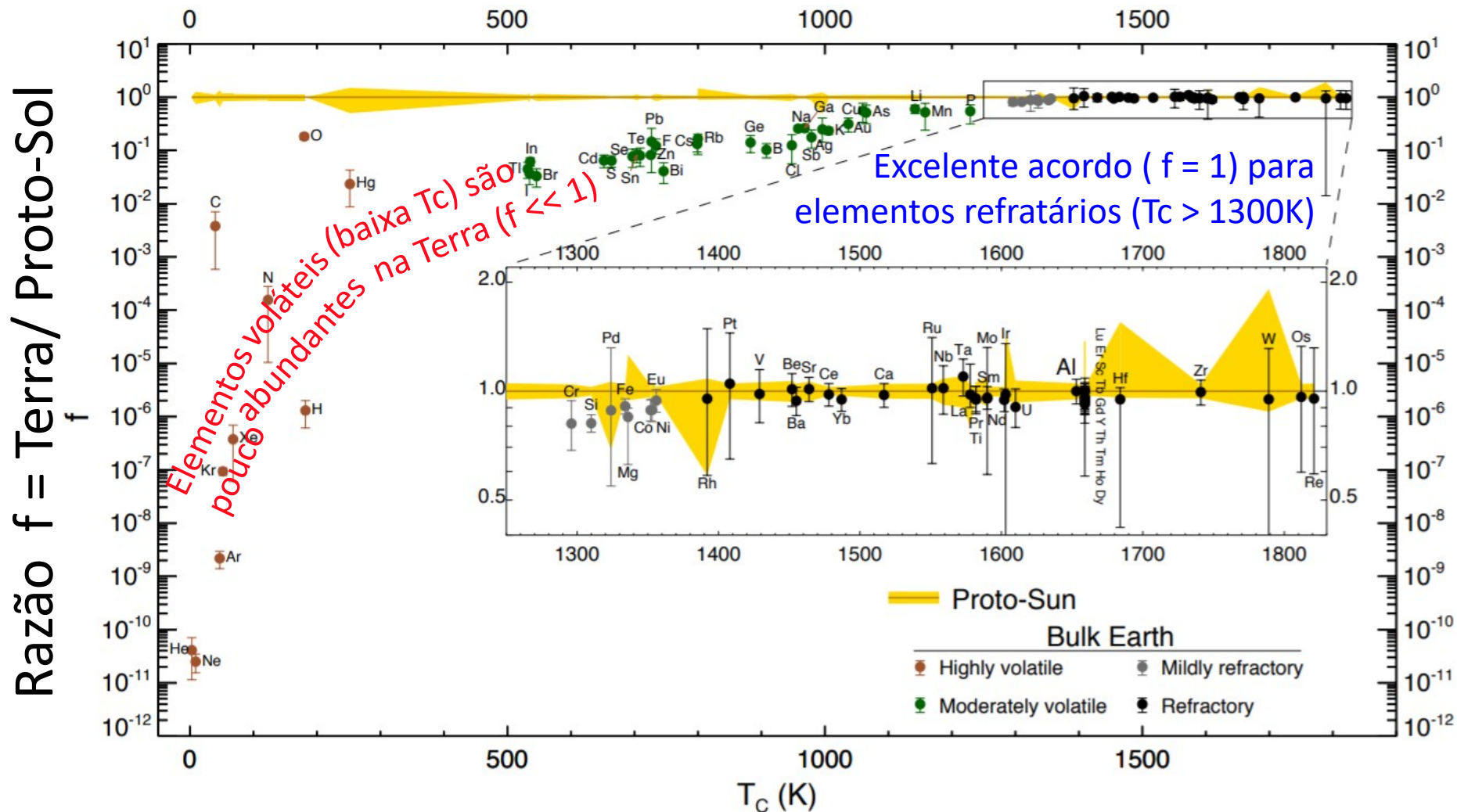
# Abundância no Sol vs. Meteorito de Allende

A composição química do Sol está em excelente acordo com a do meteorito encontrado em Allende (México), exceto para elementos voláteis como H, He, C, N e O.



Abundância no meteorito de Allende

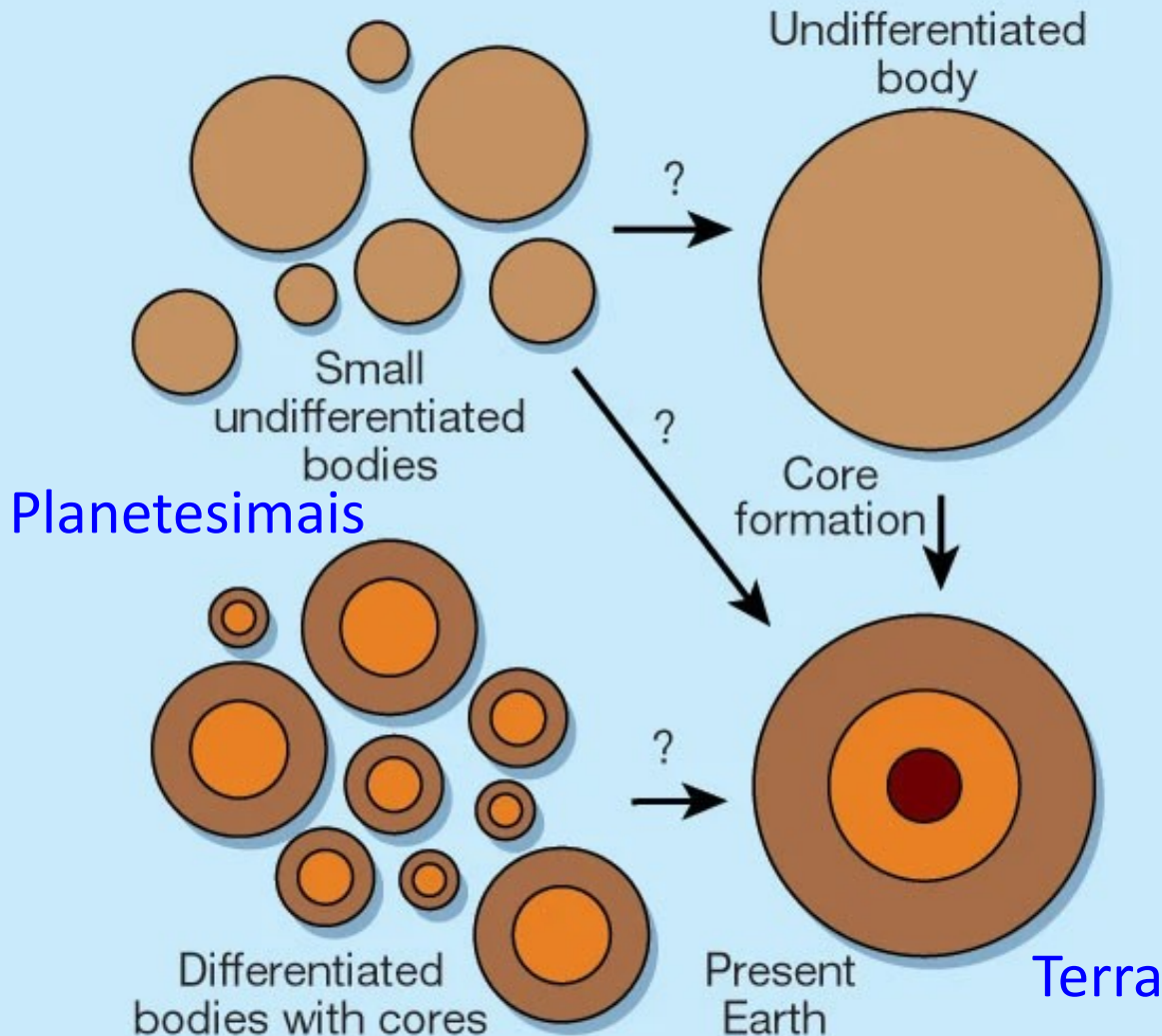
# Razão entre abundância na Terra e o proto-Sol



Temperatura de condensação no disco protoplanetário

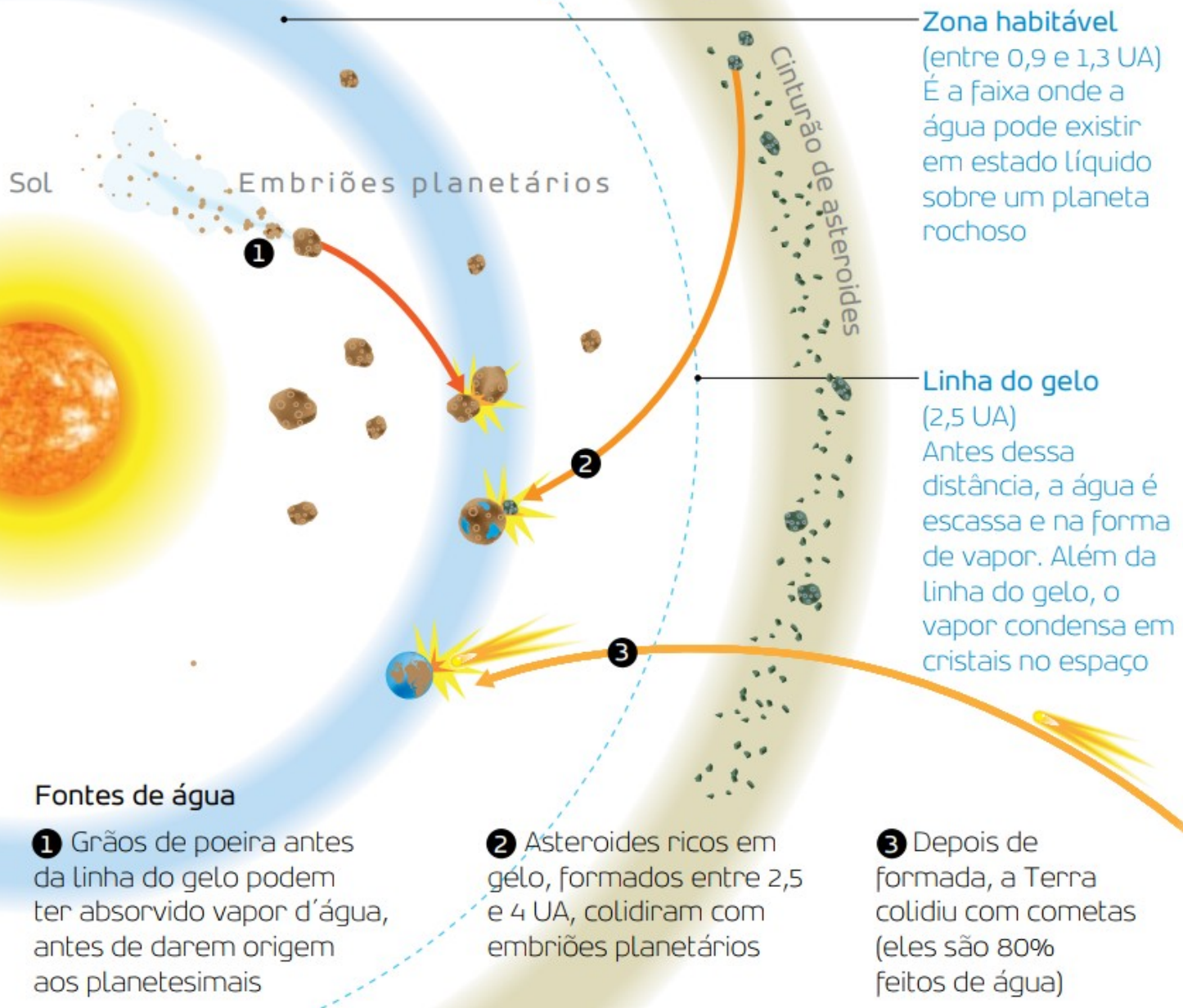
Diferenciação: o material mais denso precipita em direção ao núcleo.

A Terra se formou por acreção, por colisões de planetesimais não diferenciados (acima) ou diferenciados (abaixo). Em ambos os casos, o resultado final é uma Terra diferenciada, com metais pesados no núcleo, compostos menos densos no manto, e crosta de baixa densidade





A Terra se formou onde está hoje, a uma distância de 1 UA (unidade astronômica) do Sol, bem no meio da zona habitável, antes da linha do gelo



De onde vem a água da Terra.

Planetesimais contribuíram com apenas uma fração da água da Terra, pois a “linha de gelo” se encontra a ~2,5 - 3 U.A.

## A ORIGEM DA ÁGUA DA TERRA

**60%**

Água trazida por asteroides que colidiram com os embriões planetários que originaram a Terra

**2% a 5%**

Água que chegou pela chuva de cometas que atingiram a Terra recém-formada

**35% a 38%**

Água absorvida pelos grãos do disco que formaram os embriões planetários

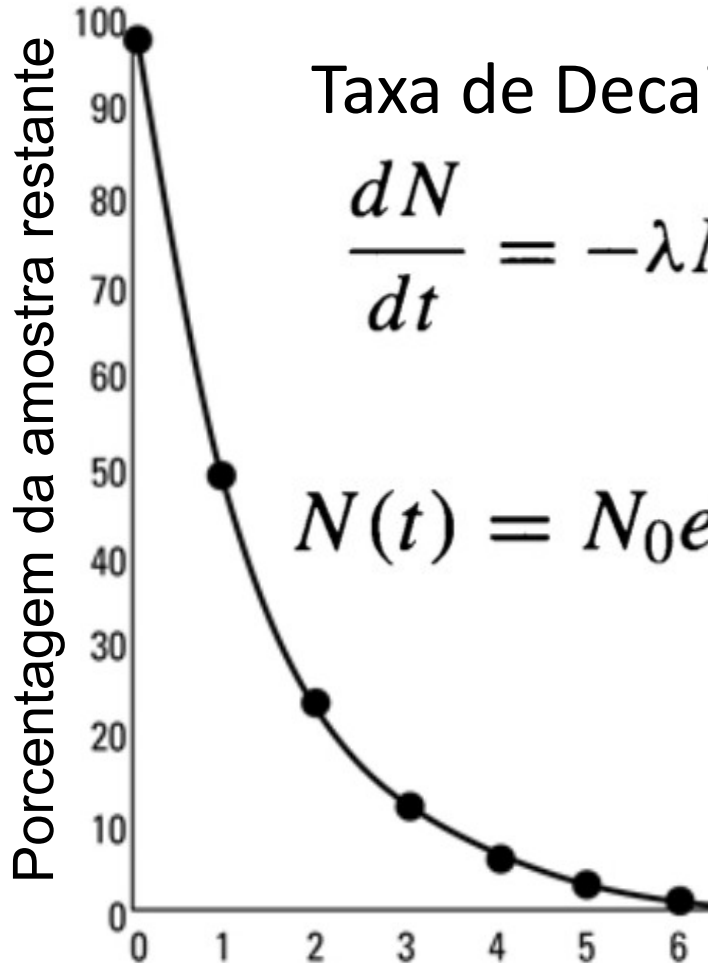
# De onde vem a água da Terra.

Estudo UNESP/INPE:

- 35% planetesimais
- 60% de asteroides
- 5% cometas

Nota: diversos estudos sugerem frações diferentes, mas todos concordam em uma baixa contribuição por cometas (< 10%)

# Idade do Sistema Solar:

 medida pelo decaimento radioativo de meteoritos, os objetos mais antigos do sistema solar

Taxa de Decaimento radioativo:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

$N$ : número de isótopos

$\lambda$ : constante de desintegração

$$\lambda = \frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} \quad \tau_{1/2}: \text{tempo de meia-vida}$$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

$N_0$ : número inicial de isótopos

Alguns exemplos de meia-vida  $\tau_{1/2}$ :

Plutônio-239: 24 mil anos

Urânio-235: 704 milhões de anos

Urânio-238: 4,5 bilhões de anos

Th-232: 14 bilhões de anos

Tempo (em unidades do tempo de meia-vida  $\tau_{1/2}$ )



# Idade do Sistema Solar

Meteoritos:  $4567 \pm 1$  milhões de anos ( $4,567 \pm 0,001$  Gyr)

Júpiter: alguns milhões de anos depois

Terra:  $\sim 50$  milhões de anos depois

Artigo na Nature Geoscience: 4,5682 Gyr

Decaimento de urânio  
(U) em chumbo (Pb)

*Nature Geoscience* **3**, 637 - 641 (2010)

Published online: 22 August 2010 | doi:10.1038/ngeo941

Audrey Bouvier<sup>1</sup> & Meenakshi Wadhwa<sup>1</sup>

The age of the Solar System redefined  
by the oldest Pb–Pb age of a meteoritic  
inclusion

Connelly et al. (2017):

$4,5673 \pm 0,0002$  Gyr

Pb–Pb chronometry and the early  
Solar System



Chondrite meteorite with calcium–aluminium-rich inclusions seen as white specks. From the collection of the American Museum of Natural History.

## Pb–Pb chronometry and the early Solar System

J.N. Connelly\*, J. Bollard, M. Bizzarro

Lead has four naturally occurring isotopes of  $^{204}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  and  $^{208}\text{Pb}$  that were inherited from the molecular cloud in relative abundances of 1: 9.307: 10.294: 29.476 as measured in troilite from the Type IAB Canyon Diablo iron meteorite (Tatsumoto et al., 1973). The latter three Pb isotopes have increased in abundances through the radioactive decay of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$ , respectively, with half-lives (Table 1) that make the U–Pb decay systems ideally suited for dating materials formed in the first 5 Myr of the Solar System. Only  $^{204}\text{Pb}$  preserves its primordial abundances such that the radiogenic ingrowth of Pb isotopes is most conveniently expressed as  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ratios that evolved according to the equation:

$$\left(\frac{{}^{20x}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_{\text{today}} = \left(\frac{{}^{20x}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_{t_0} + \left(\frac{{}^{23z}\text{U}, {}^{232}\text{Th}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_{\text{today}} (e^{\lambda t} - 1) \quad (1)$$

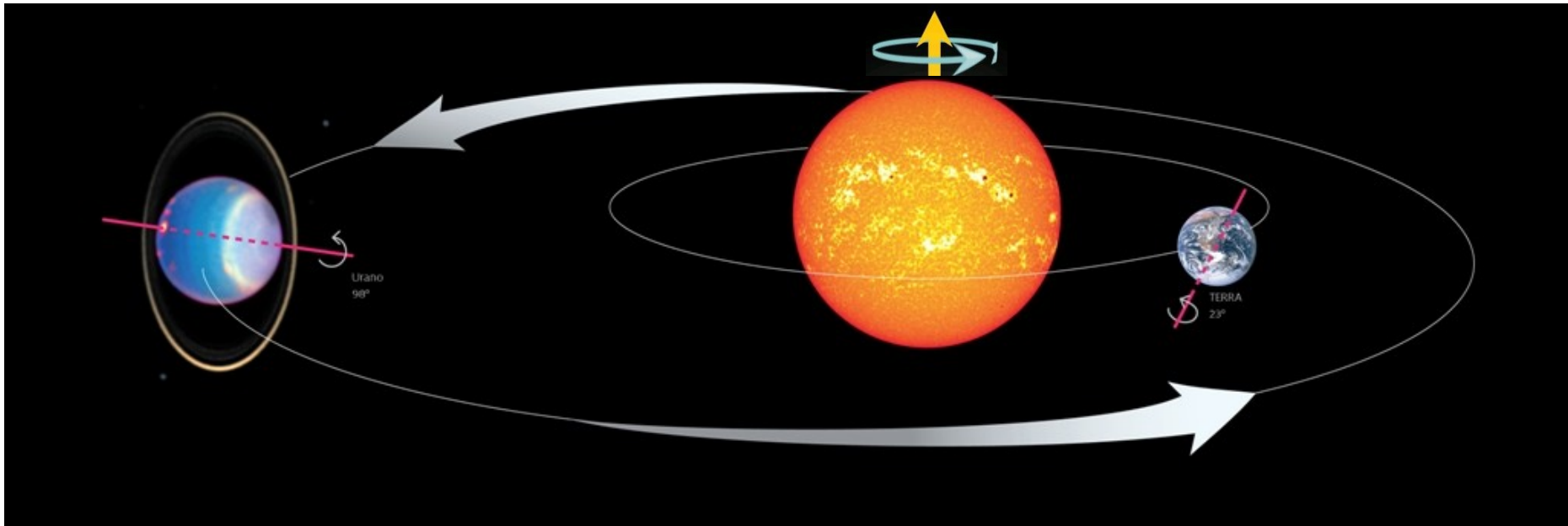
where  $t$  represents the time before present and  $\lambda$  represents the decay constant of the parent isotope. In cases where there are only initial ( $\text{Pb}_i$ ) and radiogenic ( $\text{Pb}_r$ ) Pb, this permits the theoretical possibility of calculating three independent ages based on the  $^{235}\text{U}$ – $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{238}\text{U}$ – $^{206}\text{Pb}$  and  $^{232}\text{Th}$ – $^{208}\text{Pb}$  decay systems. However, several issues limit the general use of Th–U–Pb isochrons: (1) the  $^{232}\text{Th}$  has a decay rate that is too slow to provide ages with errors less than 1 Myr, and (2) the ubiquitous presence of modern terrestrial Pb contamination ( $\text{Pb}_c$ ) requires pre-cleaning using dilute acid that typically alters the U/Pb ratio. To circumvent the latter issue, we rely on the dual decay of the U–Pb system that results in unique radiogenic  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  ratios for different times in the past, by combining the two equations:

$$\left(\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_{\text{today}} = \left(\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_{t_0} + \left(\frac{{}^{235}\text{U}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_{\text{today}} (e^{\lambda_1 t} - 1) \quad (2)$$

$$\left(\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_{\text{today}} = \left(\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_{t_0} + \left(\frac{{}^{238}\text{U}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_{\text{today}} (e^{\lambda_2 t} - 1) \quad (3)$$

# Por que Urano gira de lado

Os sentidos de rotação dos planetas (e de revolução ao redor do Sol) coincidem com o sentido de rotação do Sol, mas Urano gira “deitado”, talvez devido a 1 ou 2 grandes colisões.



Artigo: <https://arxiv.org/abs/1208.4685>

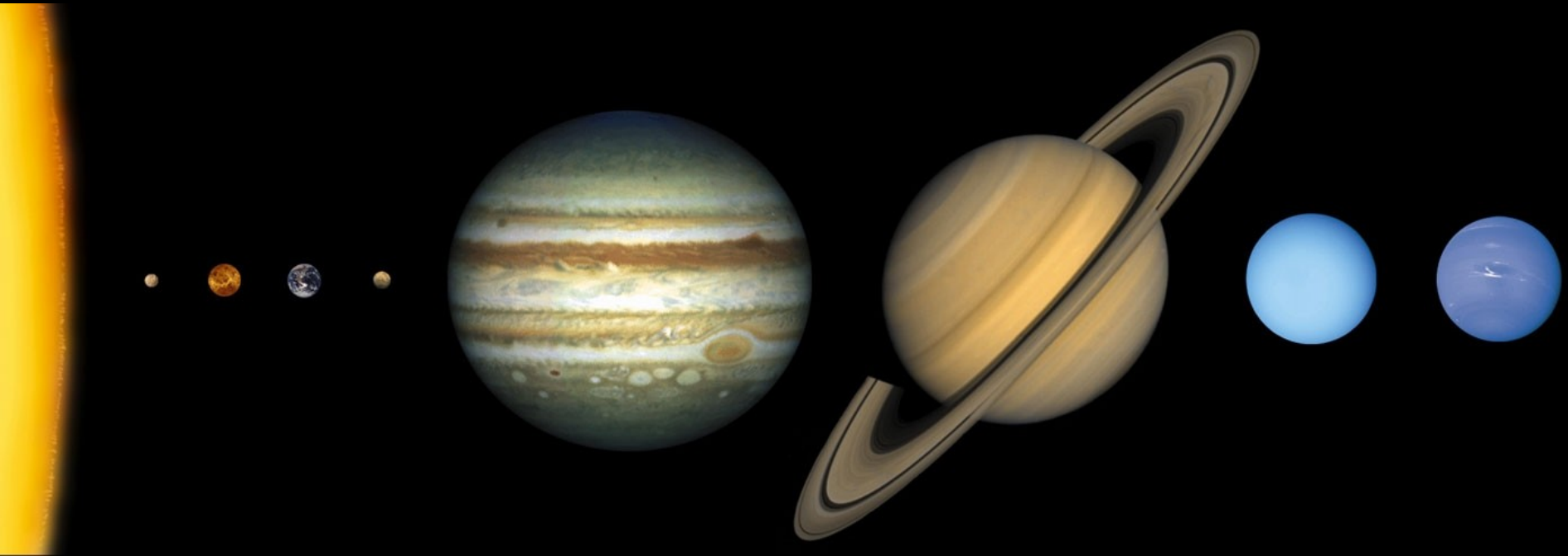
Matéria na Revista Pesquisa Fapesp:

<https://revistapesquisa.fapesp.br/por-que-urano-gira-de-lado/>



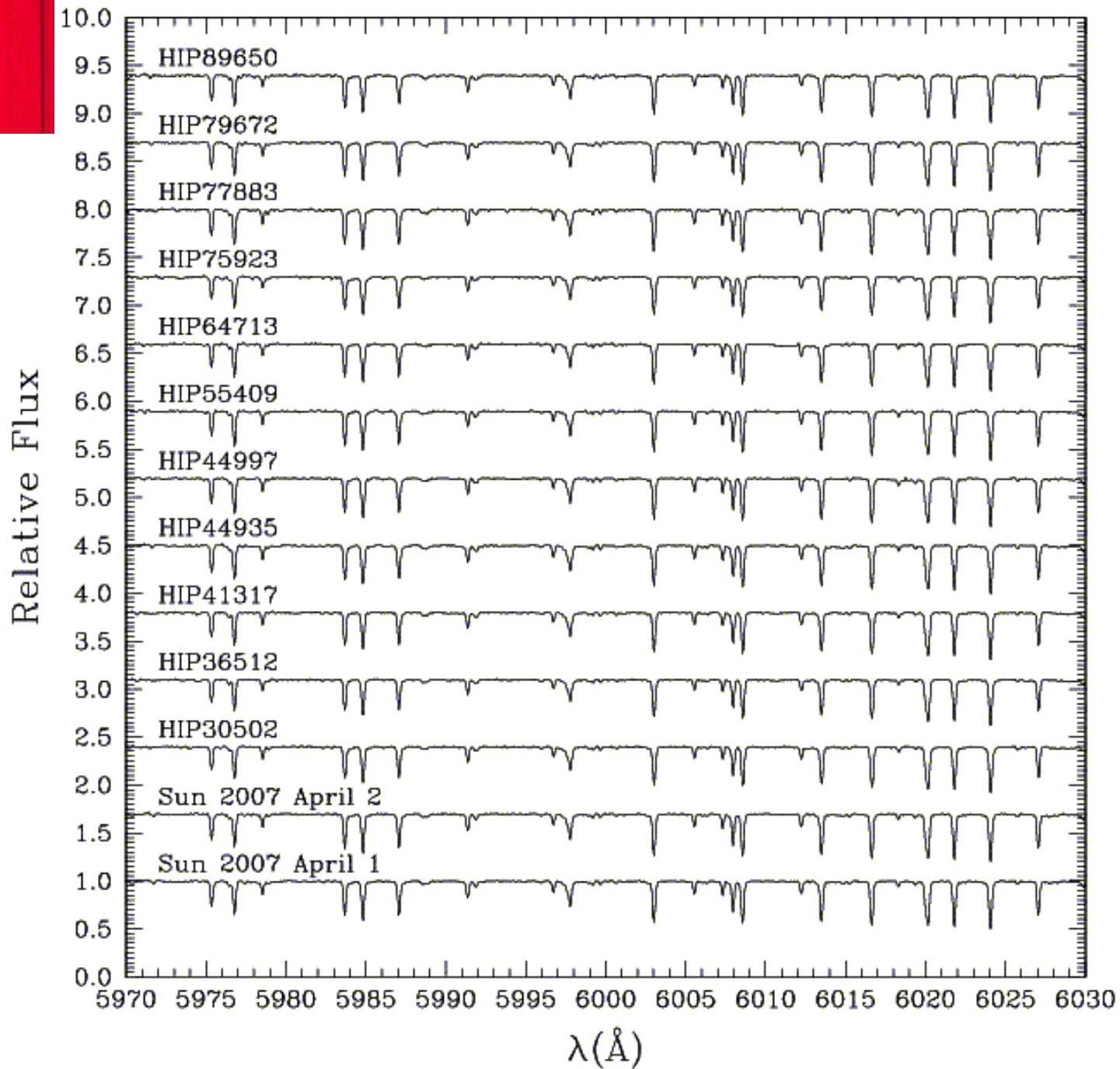
- Bonus slides:
- **Possível assinatura química da formação de planetas**  
(Meléndez et al. 2009, Astrophysical Journal [Letters]  
704, L66)

Quão comuns são o Sol e  
nosso sistema solar?





Exemplo de  
espectros  
de 11  
gêmeas  
solares e o  
Sol



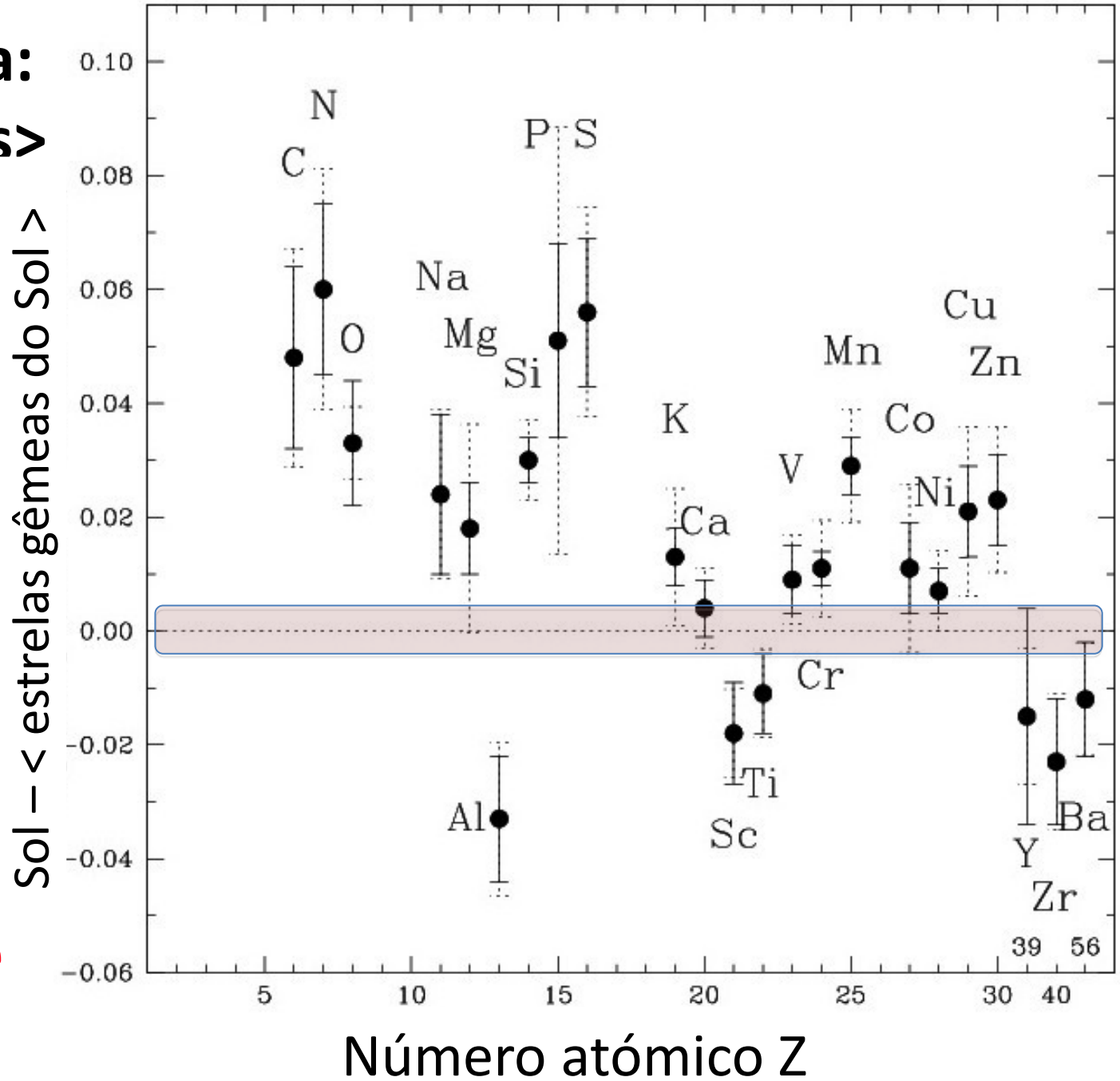


**$\Delta$  abundância:**  
**Sol - <gêmeas>**  
vs. Número  
atômico Z

Sol normal :  
 **$\Delta = 0$**

Sol anormal  
 **$\Delta \neq 0$**

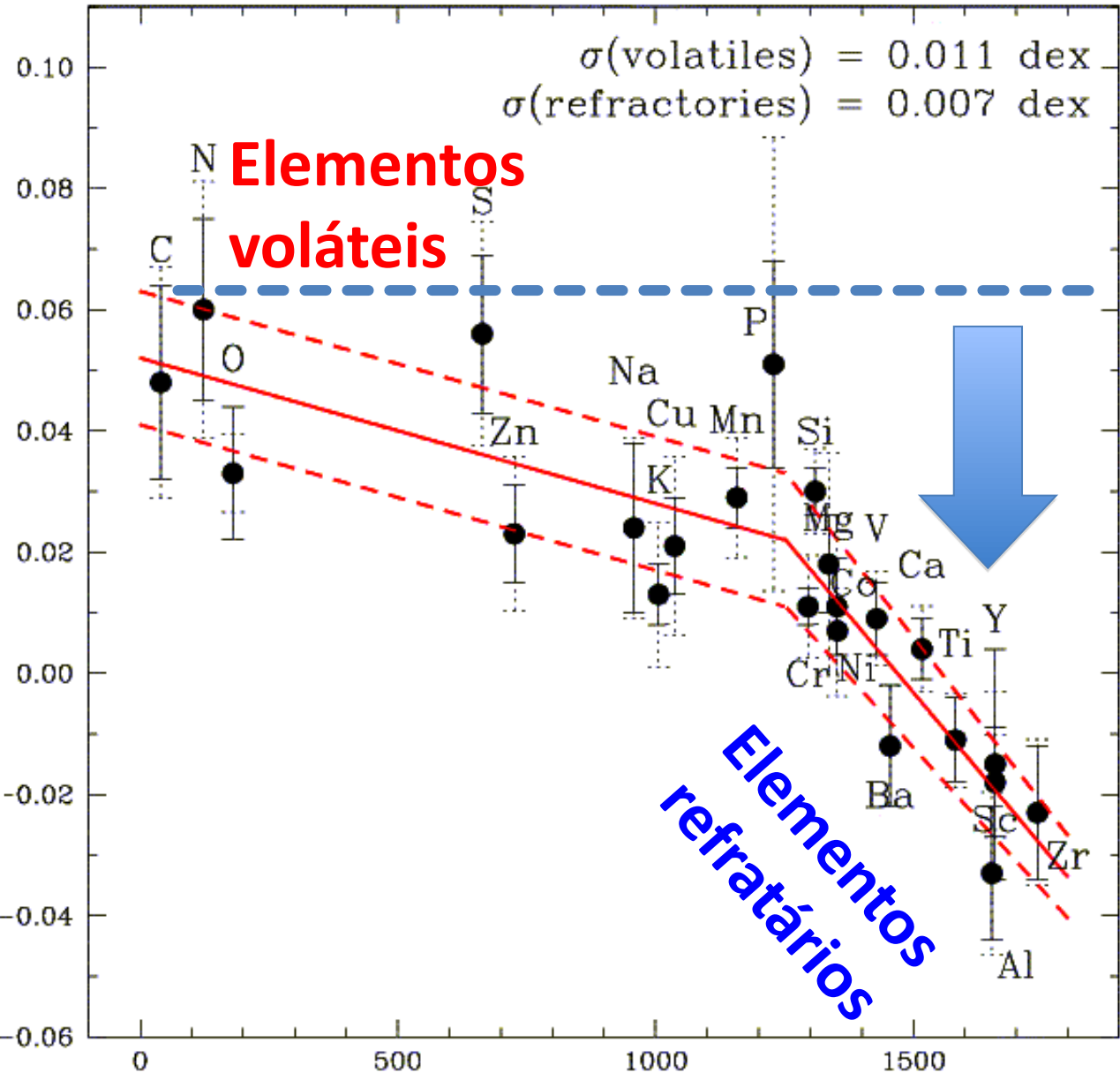
**Nossa  
estrela mãe  
é anômala!**

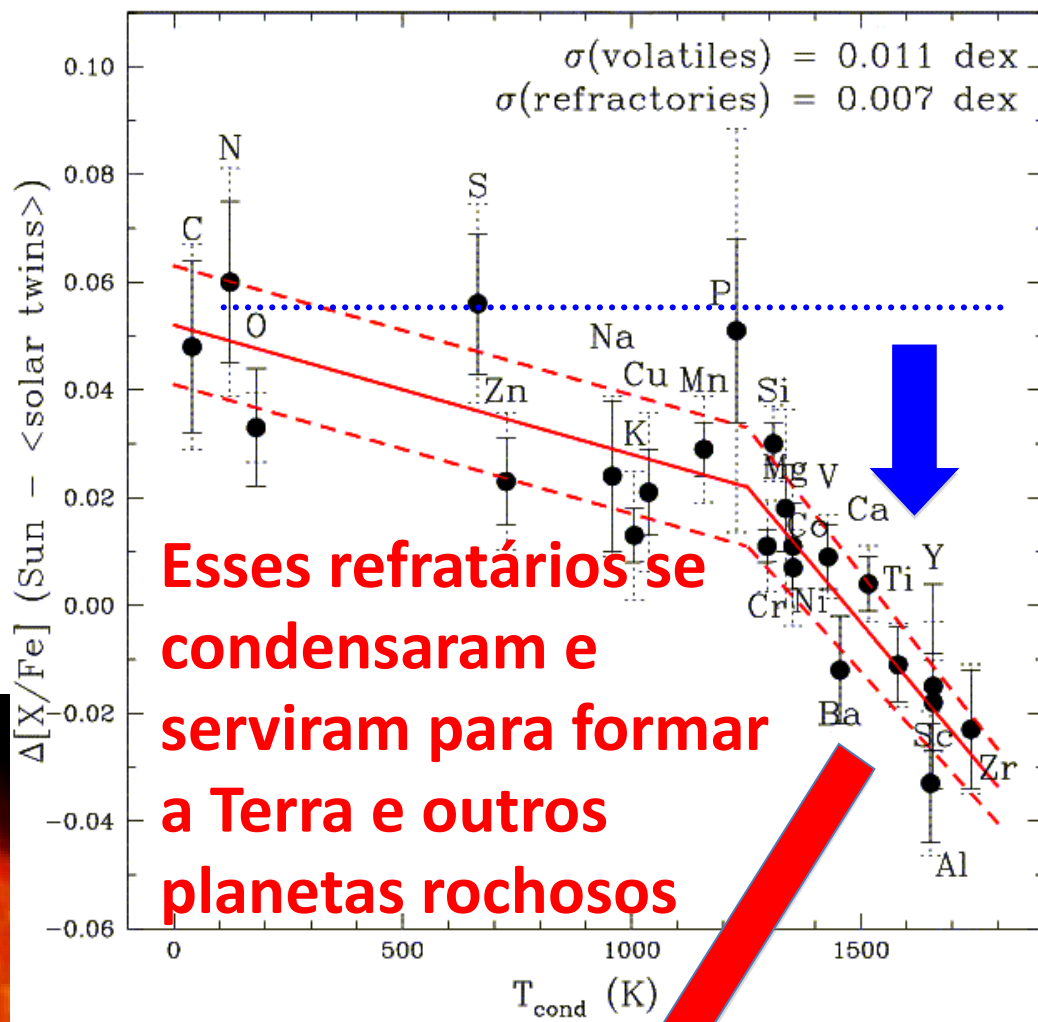


Elementos químicos que formam a Terra são mais deficientes no Sol !!!



$\Delta$  Sol - < estrelas gêmeas do Sol >





Na região interna do Sistema Solar a temperatura é muito alta, permitindo a condensação só de elementos refratários





# Assinaturas químicas de planetas

1. Remoção de poeira → gás pobre em refratários



2. Acreção de planetas → aumento de refratários

Engolfamento de planetas

