

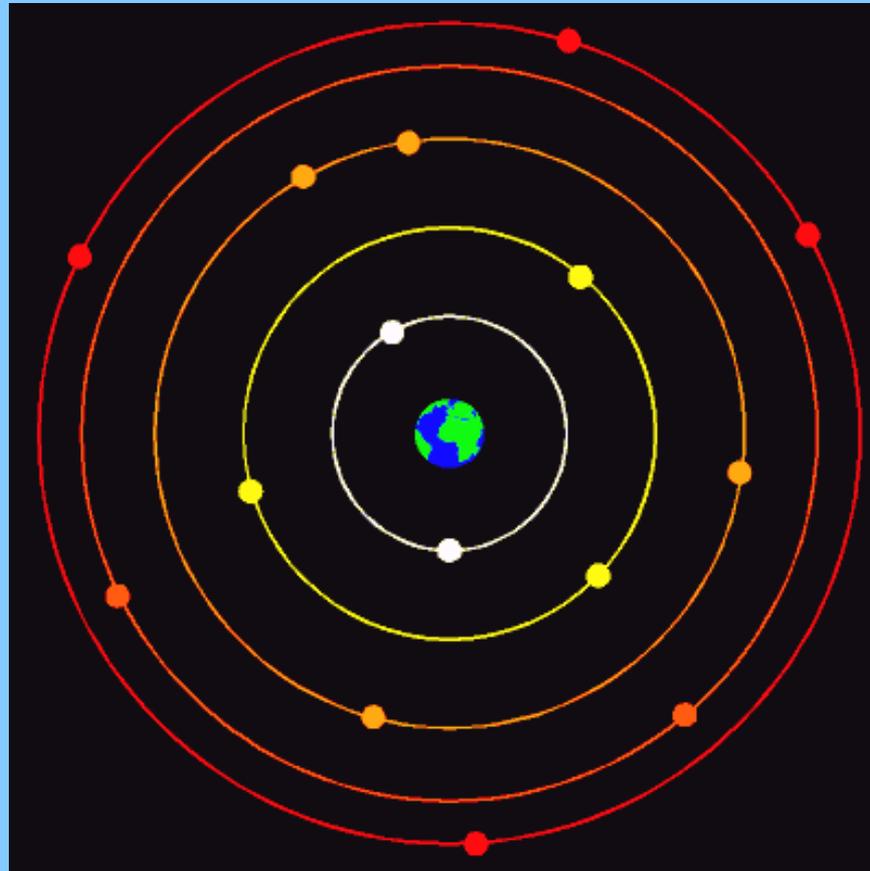
# Sistema Solar

A diagram of the Solar System. The Sun is a large, bright orange-yellow sphere on the right side. Eight planets are shown on elliptical orbits around the Sun, ordered from closest to farthest: Mercury (small, reddish-brown), Venus (orange), Earth (blue and white), Mars (reddish-brown), Jupiter (large, striped), Saturn (large, ringed), Uranus (medium, blue-green), and Neptune (medium, blue). The background is a dark blue space with faint white lines representing the orbits.

**Características  
e Formação**

Até o Renascimento:

## MODELO GEOCÊNTRICO



## Grécia Antiga

### Anaximandro:

Terra cilíndrica, no centro de tudo.

Sol, Lua, planetas eram buracos em rodas invisíveis que orbitavam a Terra, através dos quais se via fogo.

### Pitágoras:

Terra esférica  
em movimento ao redor de um “fogo invisível”



Terra esférica no centro do universo.

# Platão

Terra = esfera, no centro.

Estrelas e planetas eram carregados ao redor  
em esferas ou círculos na ordem:

Lua, Sol, Vênus, Mercúrio, Marte, Júpiter,  
Saturno

Modelo descrito no  
Mito de Er (na *República*)

## Platão → Eudoxo

Modelo mais matemático, menos mitológico.

Platão: *“ Todos os fenômenos nos céus podem ser explicados como um movimento circular uniforme”*

Lua e Sol: três esferas

- nascente e poente (24h);
- ciclo de “fases” (1 mês, 1 ano);
- outra com mesmo período, mas eixo inclinado.

Platão → Eudoxo

Planetas: quatro esferas

- mais externa: movimento diário;
- movimento ao longo da eclíptica;
- duas para explicar o movimento retrógrado

Platão → Eudoxo → Aristóteles

Aprimorou o modelo de Eudoxo;

Terra no centro e os outros corpos são ligados a **47-55 (!!!)** esferas concêntricas que orbitam a Terra;

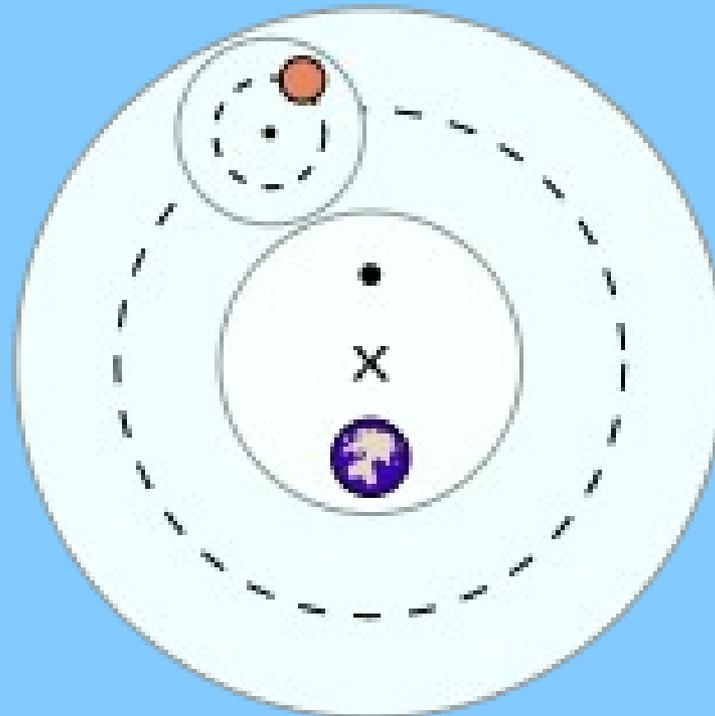
Todas têm velocidades orbitais diferentes;

Esferas eram compostas pelo *éter*.

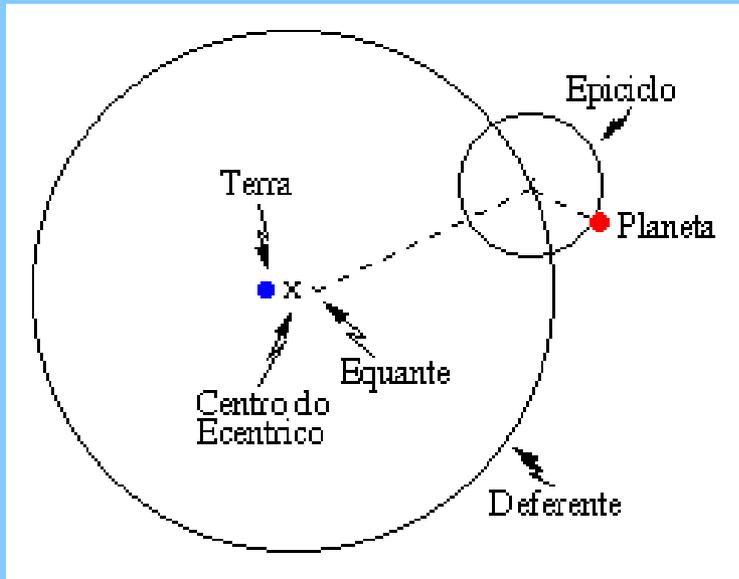
Platão → Eudoxo → Aristóteles → Ptolomeu

*Almagestum (~150)*

Modelo padrão até a Renascença!



# Modelo de Ptolomeu



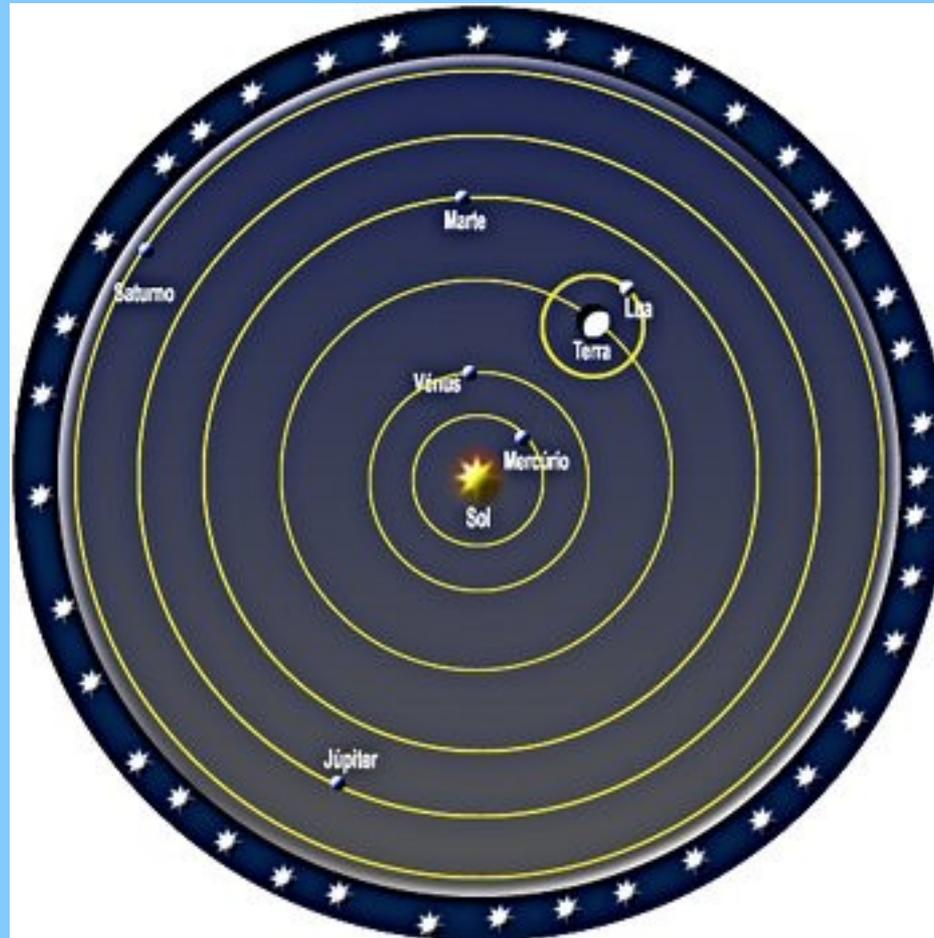
Planeta move-se no ***epiciclo***, com taxa uniforme em relação ao ***equante***.

Centro do epiciclo move-se no ***deferente***.

Previa posição dos planetas de forma satisfatória, inclusive movimento retrógrado!  
(<http://astro.if.ufrgs.br/p1/epicycle-move.gif>)

⇒ utilizado sem mudanças substanciais por 1300 anos!

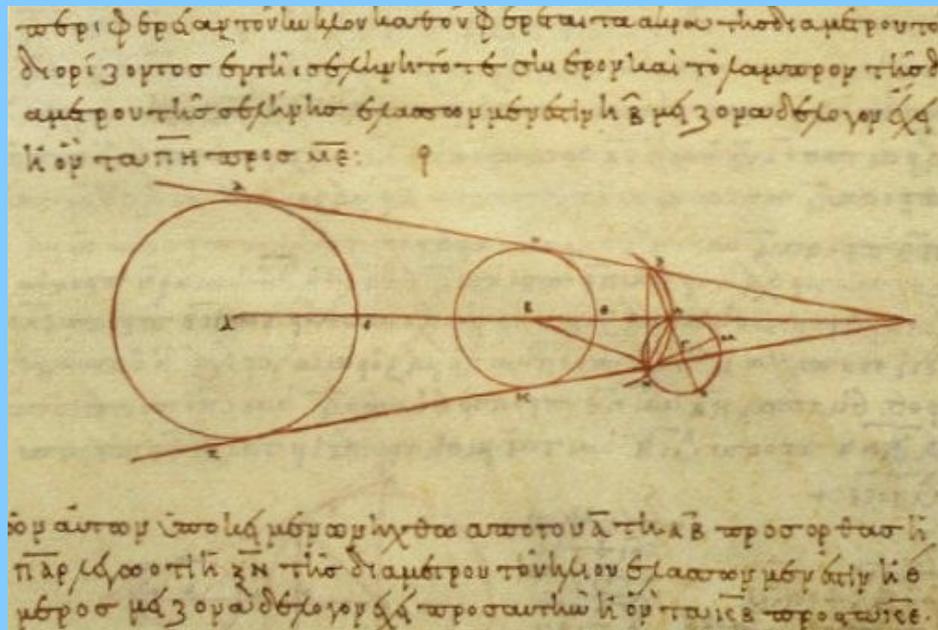
# MODELO HELIOCÊNTRICO



# Aristarco

Primeiro a propor modelo heliocêntrico  
(~280 a. C.)

Suspeitava que estrelas eram “outros sóis”,  
muito distantes (pois não se observava  
paralaxe).



# Aristarco → Copérnico

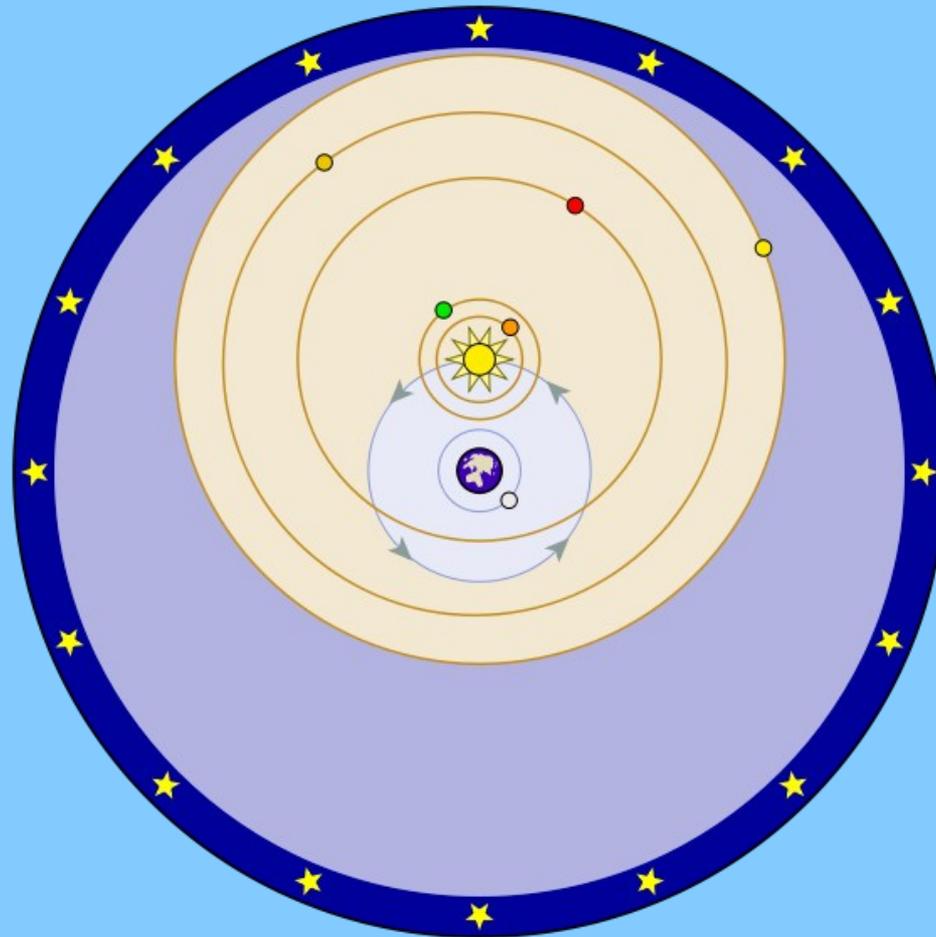
## *De Revolutionibus (1543):*

- Terra = apenas um dos seis planetas;
- ordenou planetas por sua distância ao Sol;
- determinou as distâncias em termos da distância Terra-Sol;
- Planeta mais perto do Sol ⇒ maior velocidade orbital ⇒ movimento retrógrado facilmente explicado (<http://astro.if.ufrgs.br/p1/copernican-move.gif>).

Mas: manteve órbitas circulares...

## ↗ Tycho Brahe (~ 1587)

Sol e Lua orbitam a Terra, mas os planetas orbitam o Sol.



## Tycho Brahe

A Física aristotélica não oferecia explicação para o movimento de um corpo como a Terra, mas o movimento dos demais corpos podia ser atribuído ao éter.

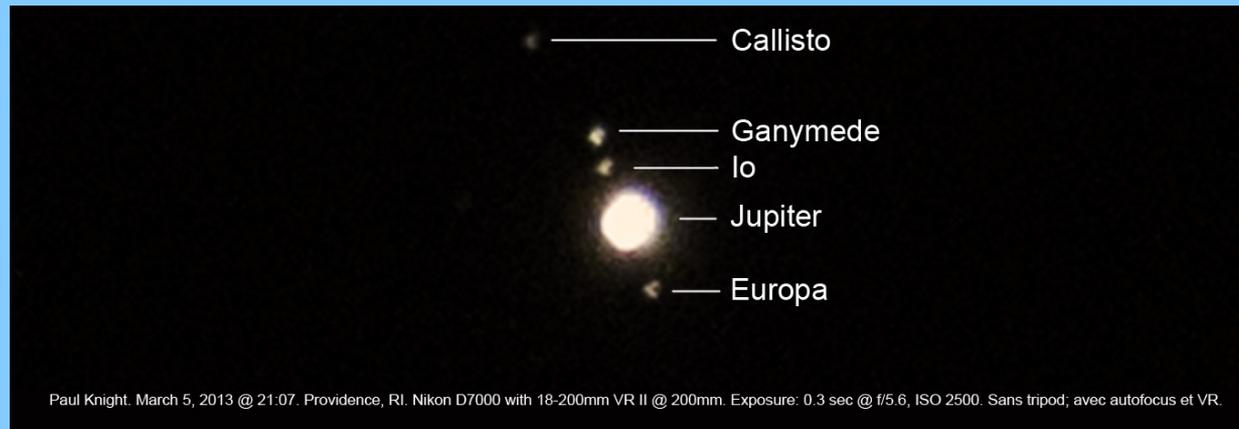
Além disso, não acreditava que as estrelas pudessem estar distantes a ponto de não se detectar paralaxe.

Por fim, um sistema heliocêntrico não estava de acordo com os preceitos da Bíblia...

Aristarco → Copérnico → Galileu

*Sidereus Nuncius (1610)*

→ descoberta dos quatro maiores satélites de Júpiter;



→ descoberta de que Vênus apresenta fases como a Lua.

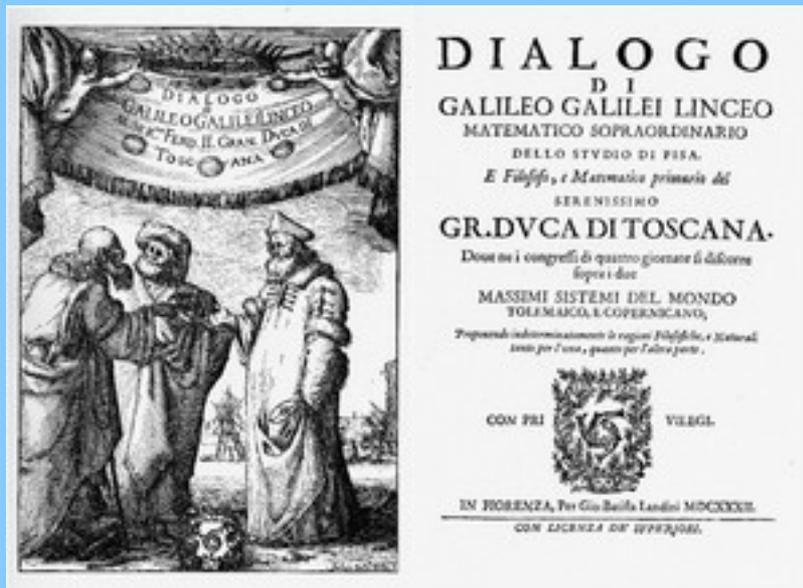
Aristarco → Copérnico → Galileu

Condenado pela Inquisição a:

*"abster-se completamente de ensinar ou defender esta doutrina e opinião ou discuti-la... abandonar completamente... a opinião de que o Sol permanece imóvel no centro de tudo e a Terra se move e, daqui em diante, não a sustentar, ensinar ou defender de qualquer forma, seja oral ou escrita.*

Aristarco → Copérnico → Galileu

*Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo  
(1632)*



→ publicação encorajada pelo Papa Urbano VIII.

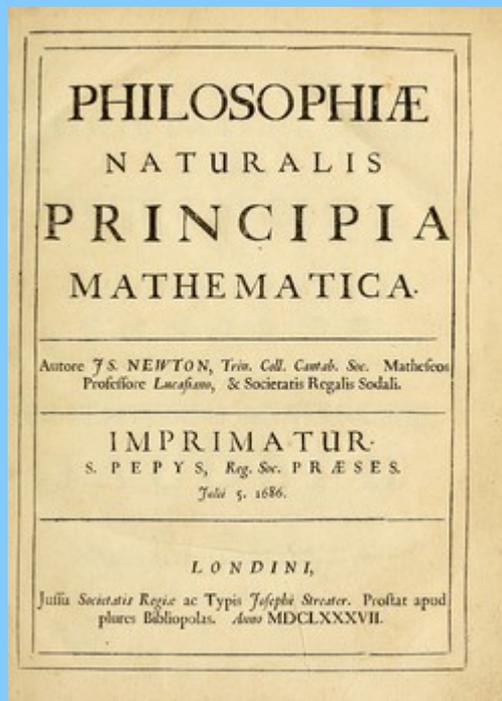
→ discutia os dois sistemas, mas claramente defendia o heliocentrismo.

→ Galileu foi condenado pela Inquisição a prisão domiciliar pelos últimos anos da sua vida.



# Newton

## *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (1687)



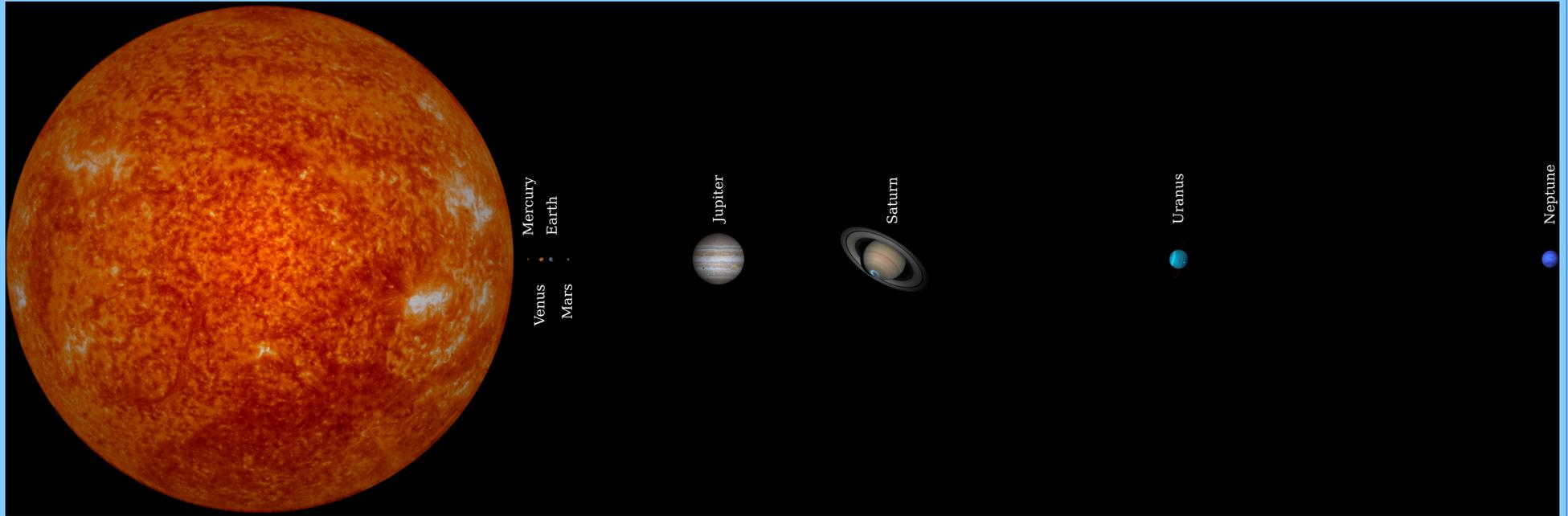
→ Explicação para as Leis de Kepler em termos da lei da gravitação universal;

→ Leis de Newton;

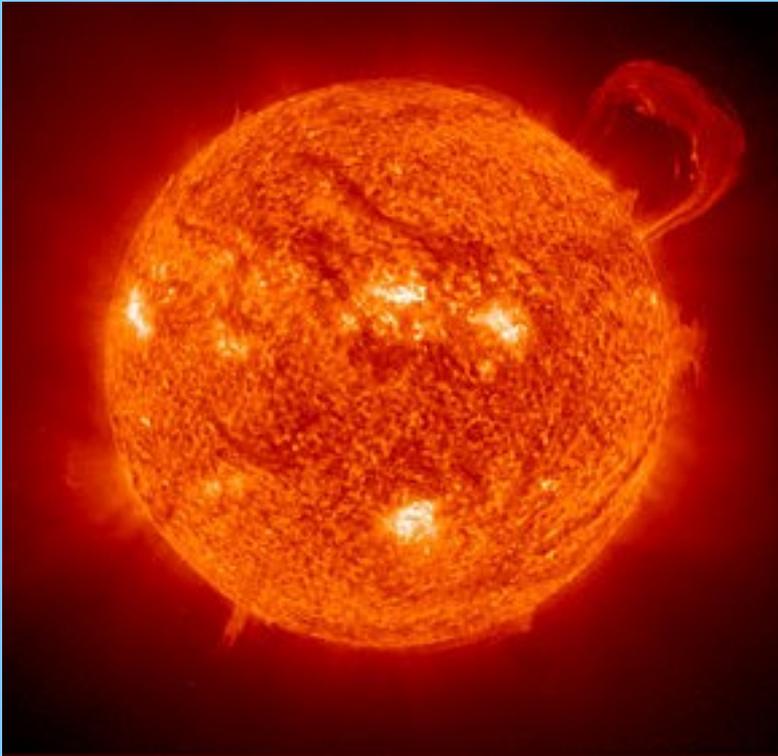
→ Fundação teórica para o heliocentrismo.

1758 → Igreja Católica retira todos os livros defendendo heliocentrismo da lista de proibições.

# COMPONENTES DO SISTEMA SOLAR



# SOL



$$M = 1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$$

$$R = 695\,500 \text{ km}$$

$$\bar{\rho} = 1\,409 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{central}} = 160\,000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Distância} = 149\,600\,000 \text{ km}$$

$$L = 3,9 \times 10^{26} \text{ W}$$

$$T_{\text{ef}} = 5\,785 \text{ K}$$

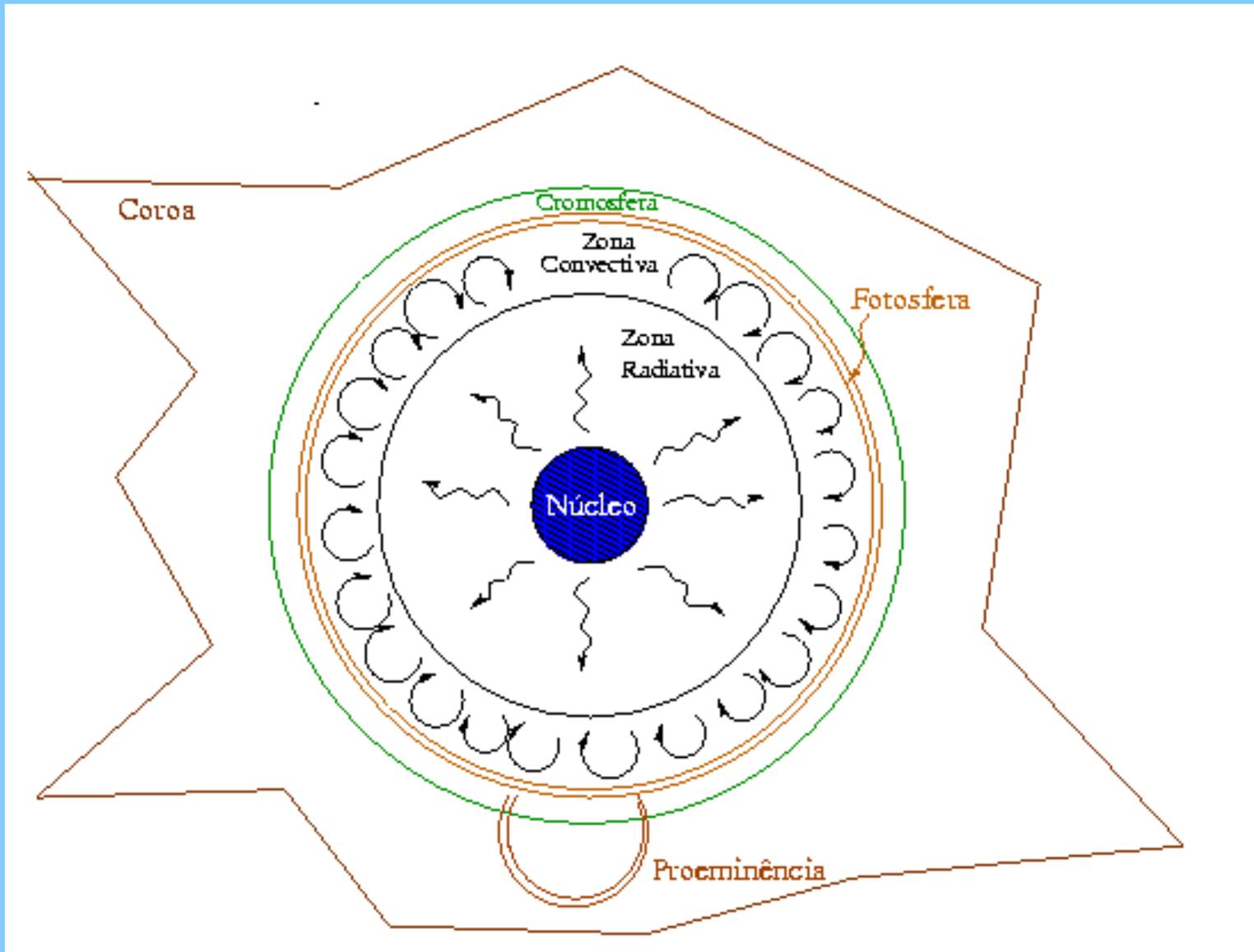
$$T_{\text{c}} = 15\,000\,000 \text{ K}$$

$$M_{\text{bol}} = 4,72$$

$$M_{\text{V}} = 4,79$$

Tipo :G2 V

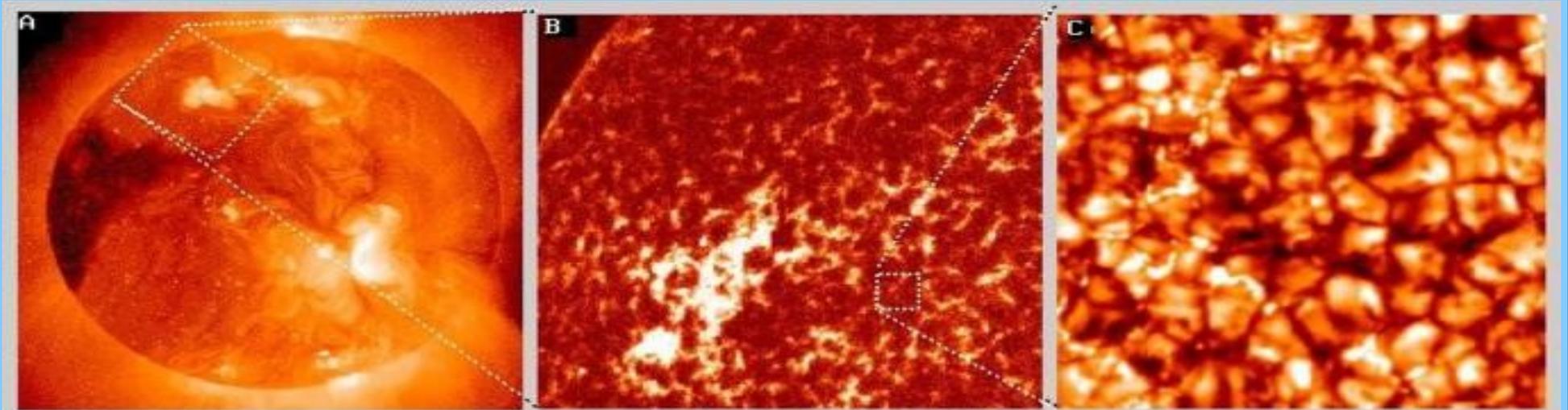
# SOL



# SOL

Fotosfera:

→ região visível do Sol;



→ onde ocorrem as manchas solares (efeito do campo magnético intenso).

# SOL

## Cromosfera & Coroa



→ visíveis apenas em eclipses;

→ aquecimento da base ao topo (até 1 milhão de K na coroa), provavelmente devido a campos magnéticos variáveis.

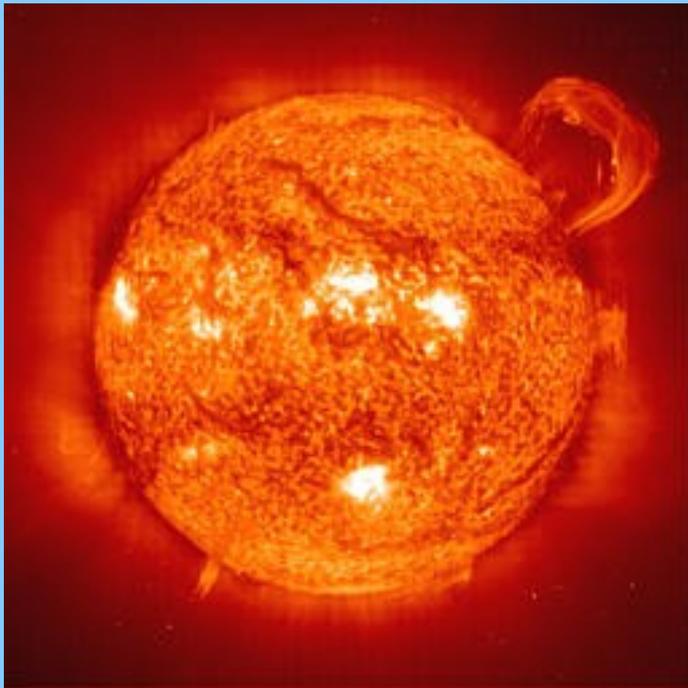
→ de onde provém o vento solar que, capturado pelo campo magnético da Terra, resulta no cinturão de Van Allen e nas auroras.



# SOL

## Ejeções coronais de massa

<http://astro.if.ufrgs.br/esol/erupcao.gif>

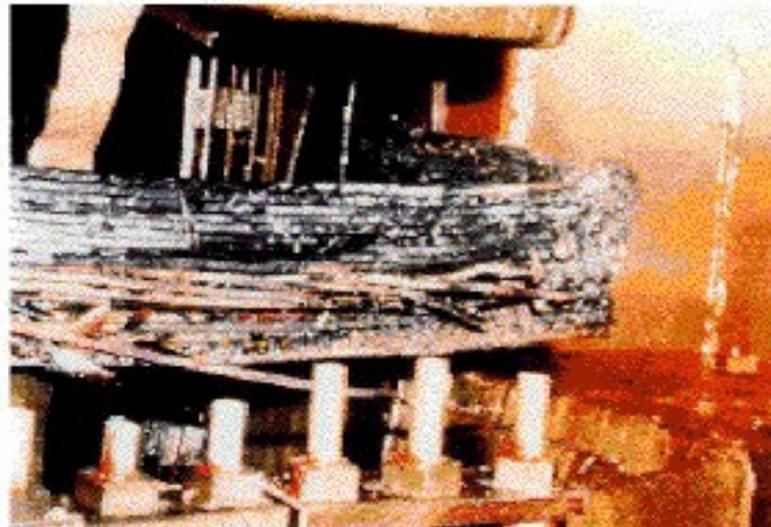


- danos a satélites;
- erro no posicionamento de GPS;
- danos às redes de energia elétrica;
- danos nas tubulações metálicas de gaseodutos;
- aumento na incidência de radiação ionizante nas pessoas.

# SOL

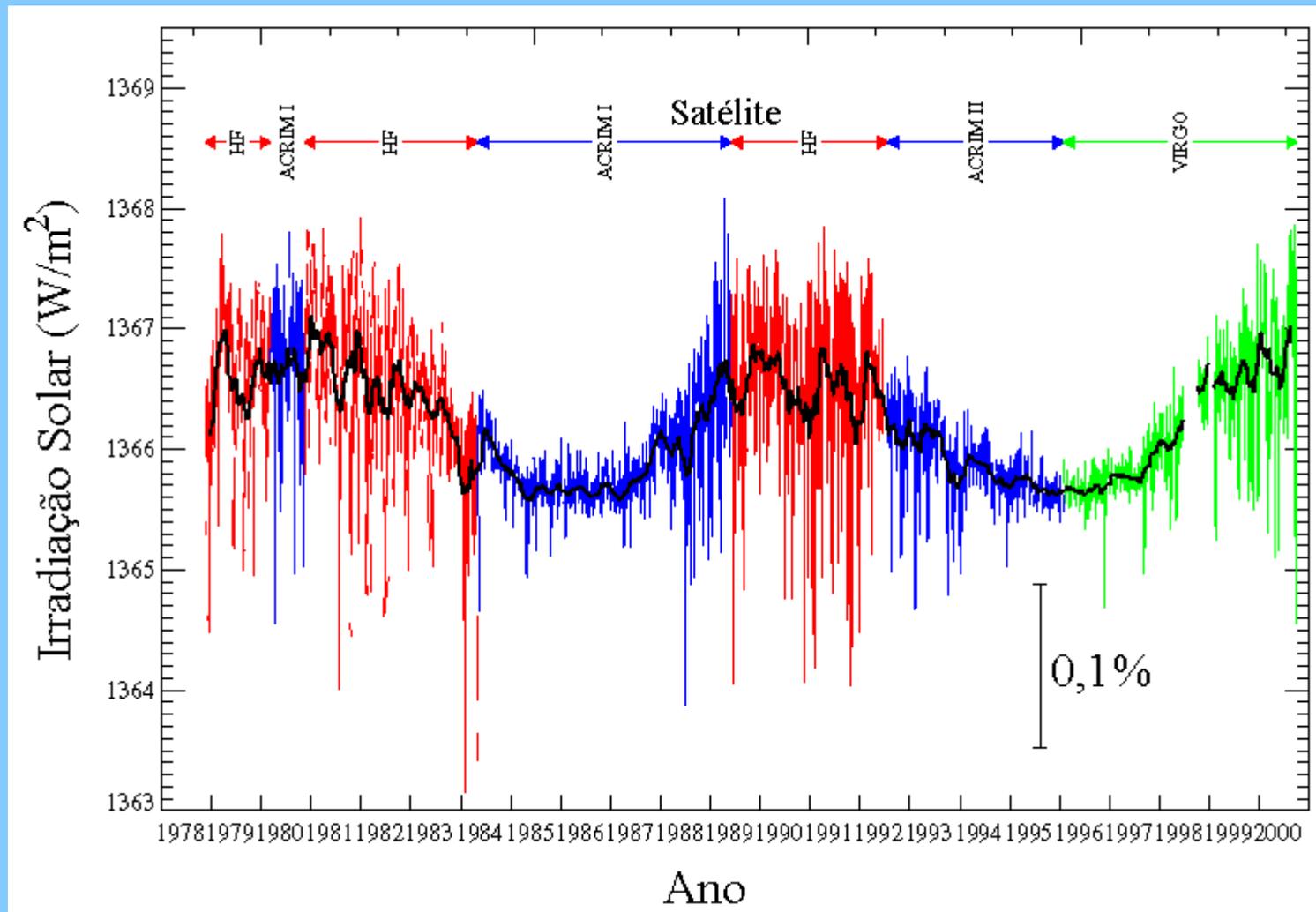


**Transformador**  
queimado em 13 de março de 1989  
por tempestade solar.



# SOL

## Ciclo de 11 anos



# VULCANO?

Planeta hipotético sugerido em 1859 por Urbain Le Verrier para explicar perturbações na órbita de Mercúrio, que hoje sabemos serem efeito da Relatividade Geral.

# MERCÚRIO



$$M = 0.055 M_{\oplus}$$

$$R = 0.3029 R_{\oplus}$$

$$\bar{\rho} = 5\,427 \text{ kg/m}^3$$

$$a = 0.387 \text{ AU}$$

$$\varepsilon = 0.205$$

$$g = 3.7 \text{ m/s}^2$$

$$P_{\text{orbital}} = 87.969 \text{ dias}$$

$$P_{\text{rotação}} = 58.646 \text{ dias}$$

Satélites: nenhum

Magnitude aparente: -2.6 a 5.7

# VÊNUS



$$M = 0.815 M_{\oplus}$$

$$R = 0.9499 R_{\oplus}$$

$$\bar{\rho} = 5\,243 \text{ kg/m}^3$$

$$a = 0.723 \text{ AU}$$

$$\varepsilon = 0.0067$$

$$g = 8.87 \text{ m/s}^2$$

$$P_{\text{orbital}} = 224.701 \text{ dias}$$

$$P_{\text{rotação}} = 243.0185 \text{ dias (retrógrado)}$$

Satélites: nenhum

Magnitude aparente: -4.9 a -3.8

# TERRA



$$M = 5.972 \times 10^{24} \text{ kg}$$

$$R = 6\,371 \text{ km}$$

$$\bar{\rho} = 5\,514 \text{ kg/m}^3$$

$$a = 149\,598\,261 \text{ km}$$

$$\varepsilon = 0.016$$

$$g = 9.807 \text{ m/s}^2$$

$$P_{\text{orbital}} = 365.256363004 \text{ dias}$$

$$P_{\text{rotação}} = 23\text{h } 56\text{m } 4.100\text{s}$$

Satélites: Lua

# MARTE



$$M = 0.107 M_{\oplus}$$

$$R = 0.532 R_{\oplus}$$

$$\bar{\rho} = 3935 \text{ kg/m}^3$$

$$a = 1.523679 \text{ AU}$$

$$\varepsilon = 0.0935$$

$$g = 3.711 \text{ m/s}^2$$

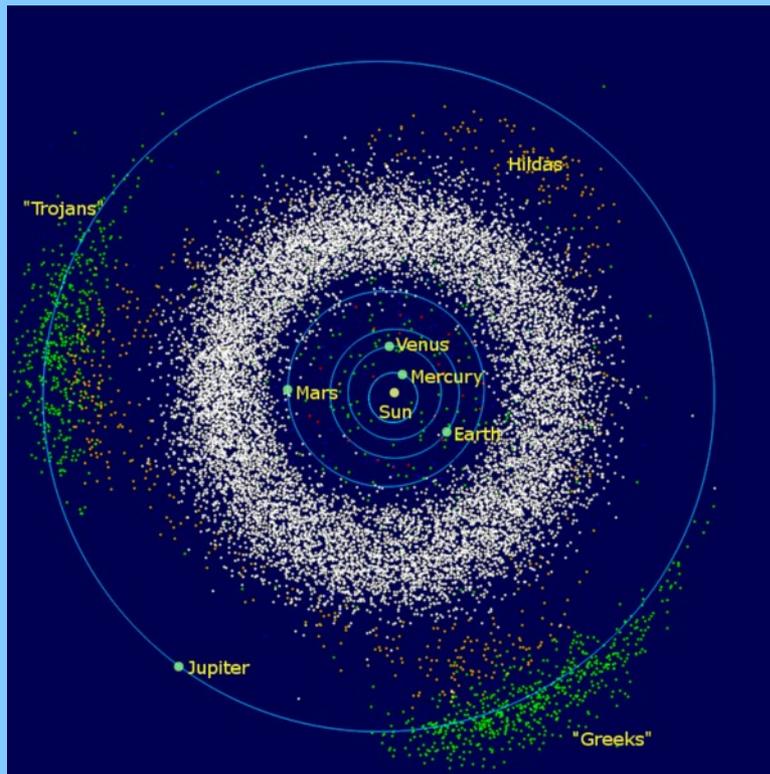
$$P_{\text{orbital}} = 686.971 \text{ dias}$$

$$P_{\text{rotação}} = 1.025957 \text{ dias}$$

Satélites: Phobos e Deimos

Magnitude aparente: -3.0 a +1.6

# CINTURÃO DE ASTERÓIDES



Principais corpos:

Ceres (planeta-anão)

4 Vesta, 2 Palas, 10 Hígia (proto-  
planetas)

Três tipos:

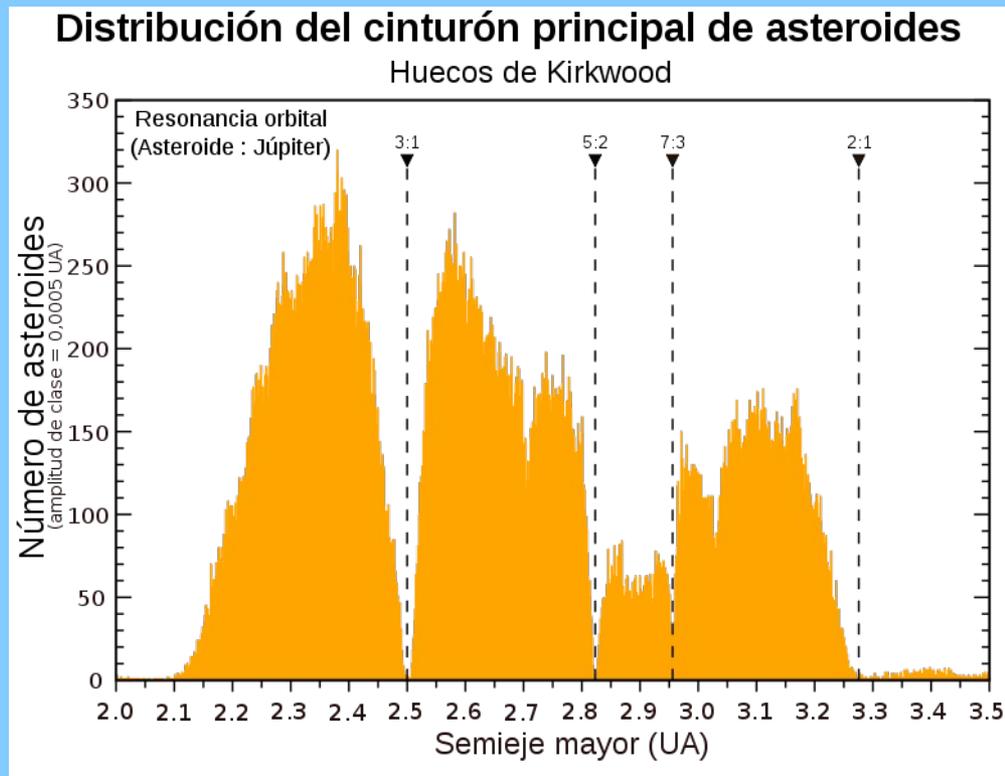
carbonáceos, de silicato e  
metálicos

Nunca formaram planeta devido à  
perturbação de Júpiter.

# CINTURÃO DE ASTERÓIDES

Massa total:  $\sim 0.0006 M_{\oplus}$

Excentricidade média 0.15, mas alguns objetos chegam a 0.6



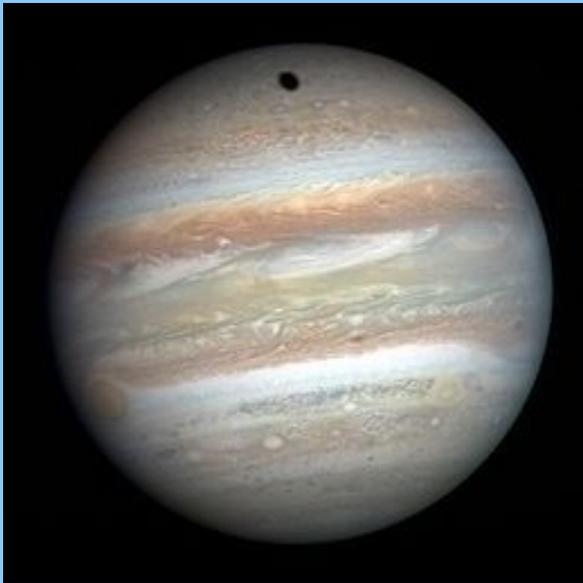
Lacunas de Kirkwood: regiões sem asteróide, devido a ressonâncias com a órbita de Júpiter (são ejetados).

# CINTURÃO DE ASTERÓIDES

Descoberta: Lei de Titius-Bode  $\rightarrow a = 0.4 + 0.3 \times 0.2^m$

| Objeto   | m         | a via T-B (A.U.) | a real (A.U.) | Erro (%) |
|----------|-----------|------------------|---------------|----------|
| Mercúrio | $-\infty$ | 0.4              | 0.39          | 2.56     |
| Vênus    | 0         | 0.7              | 0.72          | 2.78     |
| Terra    | 1         | 1.0              | 1.00          | 0.00     |
| Marte    | 2         | 1.6              | 1.52          | 5.26     |
| Ceres    | 3         | 2.8              | 2.77          | 1.08     |
| Júpiter  | 4         | 5.2              | 5.20          | 0.00     |
| Saturno  | 5         | 10.0             | 9.54          | 4.82     |
| Urano    | 6         | 19.6             | 19.2          | 2.08     |
| Netuno   | 7         | 38.8             | 30.06         | 29.08    |
| Plutão   | 8         | 77.2             | 39.44         | 95.75    |

# JÚPITER



$$M = 317.8 M_{\oplus}$$

$$R = 11 R_{\oplus}$$

$$\bar{\rho} = 1\,326 \text{ kg/m}^3$$

$$a = 5.204 \text{ AU}$$

$$\varepsilon = 0.048$$

$$g = 24.79 \text{ m/s}^2$$

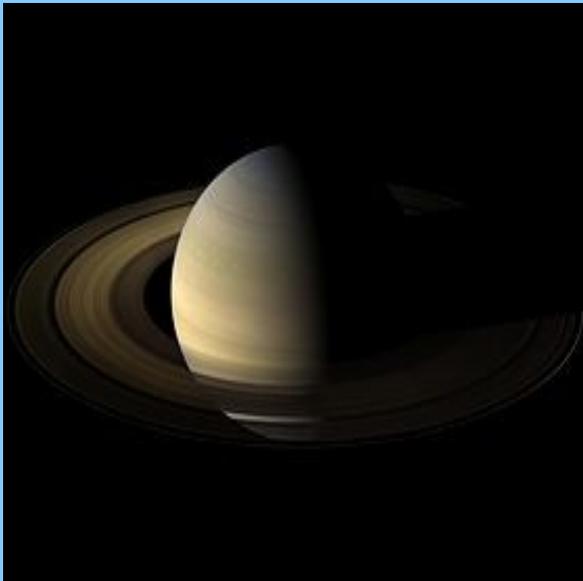
$$P_{\text{orbital}} = 11.8618 \text{ anos}$$

$$P_{\text{rotação}} = 9 \text{ h } 55 \text{ m } 30 \text{ s}$$

Satélites: 67 (Io, Europa, Ganimedes,  
Calisto...)

Magnitude aparente: -2.9 a -1.6

# SATURNO



$$M = 95.152 M_{\oplus}$$

$$R = 9.14 R_{\oplus}$$

$$\bar{\rho} = 687 \text{ kg/m}^3$$

$$A = 9.582 \text{ AU}$$

$$\varepsilon = 0.055$$

$$g = 10.44 \text{ m/s}^2$$

$$P_{\text{orbital}} = 29.4571 \text{ anos}$$

$$P_{\text{rotação}} = 10 \text{ hr } 34 \text{ min}$$

Satélites: 62 ( Titã, Reia, Tétis,  
Dione.....)

Magnitude aparente: -3.0 a +1.6

# URANO



Descoberto em 1781  
por William Herschel

$$M = 14.536 M_{\oplus}$$

$$R = 3.98 R_{\oplus}$$

$$\bar{\rho} = 1\,270 \text{ kg/m}^3$$

$$a = 19.189 \text{ AU}$$

$$\varepsilon = 0.047$$

$$g = 8.69 \text{ m/s}^2$$

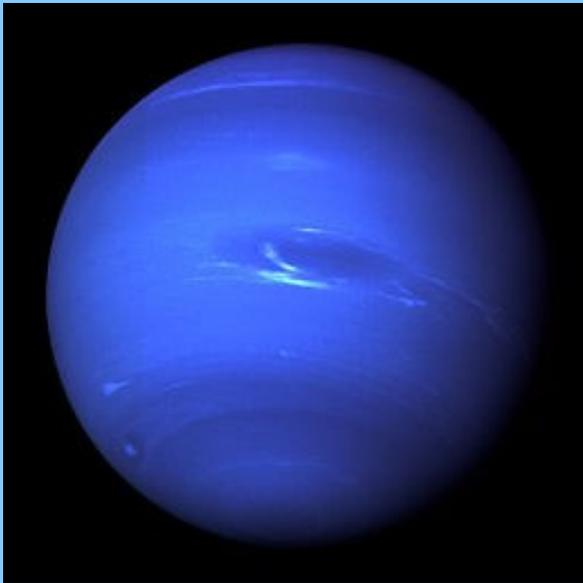
$$P_{\text{orbital}} = 84.016 \text{ anos}$$

$$P_{\text{rotação}} = 17 \text{ h } 14 \text{ min } 24 \text{ s (retrógrado)}$$

Satélites: 27 ( Miranda, Ariel, Umbriel,  
Titania, Oberon...)

Magnitude aparente: 5.9 a 5.32

# NETUNO



Posição prevista por Urbain  
Le Verrier em 1845-1846  
Observado por Johann  
Galle em 1846

$$M = 17.147 M_{\oplus}$$

$$R = 3.86 R_{\oplus}$$

$$\bar{\rho} = 1.638 \text{ kg/m}^3$$

$$a = 30.070 \text{ AU}$$

$$\varepsilon = 0.008$$

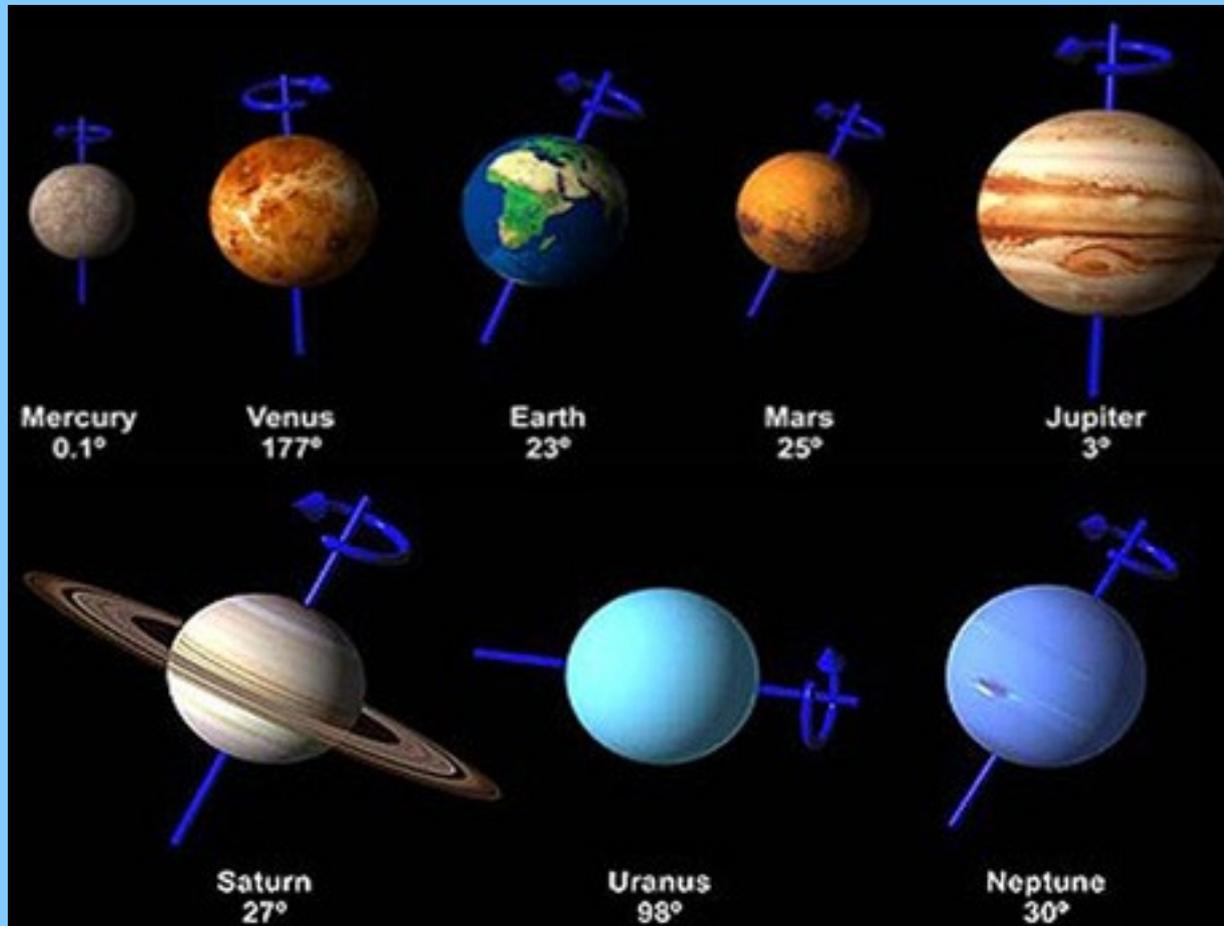
$$g = 11.15 \text{ m/s}^2$$

$$P_{\text{orbital}} = 164.8 \text{ anos}$$

$$P_{\text{rotação}} = 16 \text{ h } 6 \text{ min } 36 \text{ s}$$

Satélites: 14

Magnitude aparente: 8.02 a 7.78



# POR QUE PLUTÃO NÃO É MAIS UM PLANETA?

Definição de planeta segundo a IAU (2006):

1. Está em órbita ao redor do Sol
2. Tem massa suficiente para que se assuma equilíbrio hidrostático (forma esférica)
3. Limpou a vizinhança de sua órbita (tornou-se gravitacionalmente dominante)

# POR QUE PLUTÃO NÃO É MAIS UM PLANETA?

Definição de planeta segundo a IAU (2006):

1. Está em órbita ao redor do Sol ✓
2. Tem massa suficiente para que se assuma equilíbrio hidrostático (forma esférica) ✓
3. Limpou a vizinhança de sua órbita (tornou-se gravitacionalmente dominante) X

# PLANETAS-ANÕES

In 2006, the organization responsible for classifying celestial bodies, the International Astronomical Union (IAU) decided that a new class of objects was needed. Pluto, considered a planet since its discovery in 1930, was reclassified into the new “dwarf planet” category. To date, five dwarf planets have been found, although some astronomers expect there may be as many as 50 in the solar system.

Earth's  
moon  
to scale

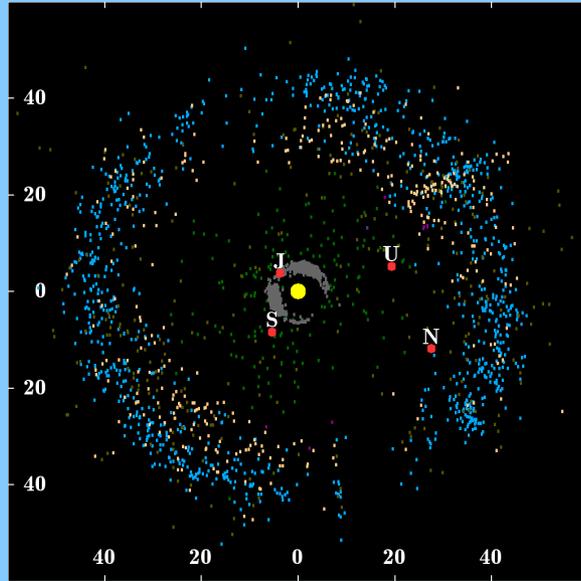


|  | <b>ERIS</b>             | <b>PLUTO</b>            | <b>HAUMEA</b>           | <b>MAKEMAKE</b>       | <b>CERES</b>            |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Year of discovery                          | 2003                    | 1930                    | 2003                    | 2005                  | 1801                    |
| Diameter (mean)                            | 1,445 miles<br>2,326 km | 1,430 miles<br>2,302 km | 892.3 miles<br>1,436 km | 882 miles<br>1,420 km | 591.8 miles<br>952.4 km |
| Orbital period (Earth years)               | 561.4                   | 247.9                   | 281.9                   | 305.34                | 4.6                     |
| Distance from sun (times Earth's distance) | 68                      | 39.5                    | 43.1                    | 45.3                  | 2.8                     |
| Orbital inclination (degrees)              | 46.9                    | 17.14                   | 28.2                    | 29                    | 10.59                   |
| Rotation period                            | 25.9 hours              | 6.39 Earth days         | 3.9 hours               | 22.5 hours            | 9.1 hours               |
| Moons                                      | 1                       | 5                       | 2                       | 0                     | 0                       |

SOURCE: NASA

KARL TATE / © SPACE.com

# CINTURÃO DE KUIPER (30-55 AU)



Principais corpos:

Plutão, Makemake, Haumea,  
Caronte

Composição:

Hidrocarbonetos leves ( $\text{CH}_4$ ), amônia,  
gelo.

# DISCO DISPERSO (+100 AU)

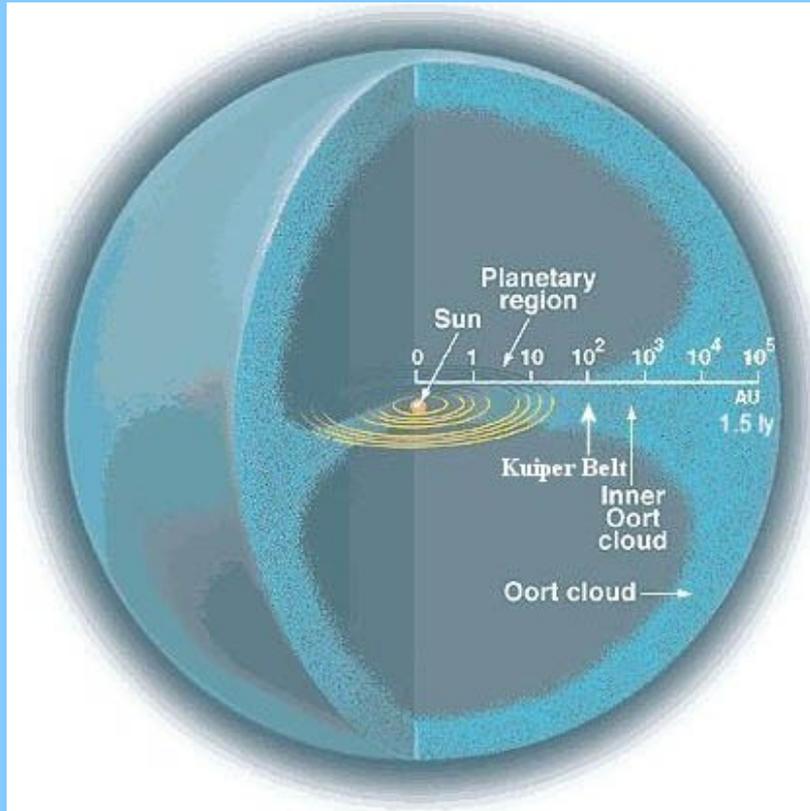
Principais corpos:

Éris (planeta-anão), cometas

Composição:

Compostos voláteis congelados (água, metano)

# NUVEM DE OORT



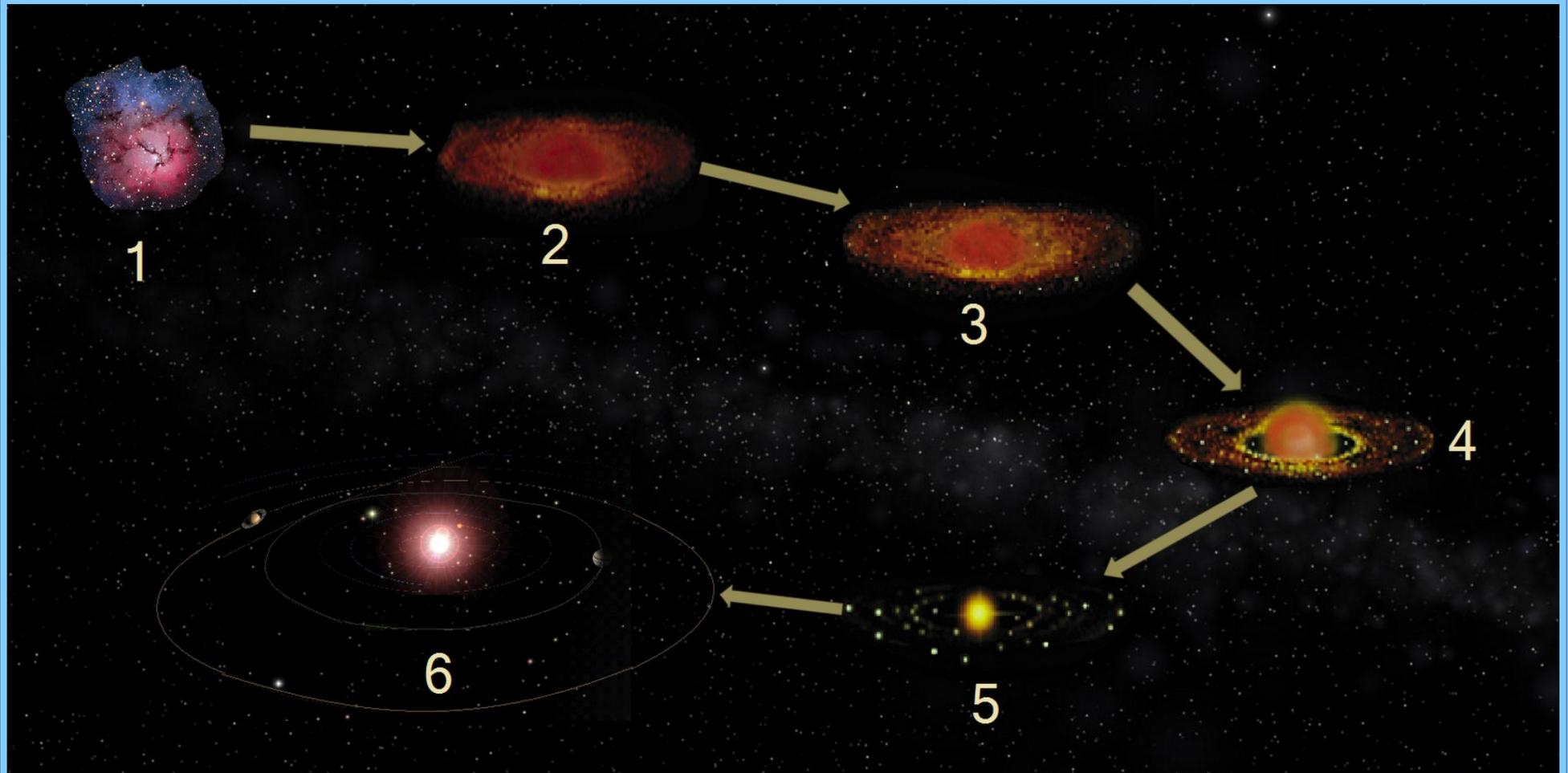
Nuvem esférica compostosta predominante por planetesimais de gelo.

Nuvem interna discoidal.

Distância ~ 50 000 AU - 100 000 AU  
(1-2 ly)

Origem de cometas de longo período (e. g. Halley)

# FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR



# FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

1. A nebulosa solar é formada.
2. Protoestrela se forma no centro da nuvem.
3. Formação de partículas rochosas.
4. Formação dos planetas rochosos.
5. Formação dos planetas gigantes gasosos.
6. Sistema Solar atual.

# FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR



# FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

1. Idade (~ 4.5 bilhões de anos).
2. Padrão dos movimentos de translação.
- \*\*\* 3. O Sol ter 99.9% da massa, mas os planetas terem 99.7% do momento angular do sistema.
4. Planetas rochosos (composição, tamanho, órbitas).
5. Planetas gasosos (composição, tamanho, órbitas).
6. Asteróides.
7. Cometas.
8. Satélites regulares dos planetas gigantes.
9. Satélites irregulares.
10. Movimento retrógrado.

# FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

## HIPÓTESE NEBULAR:

Emanuel Swedenborg, Immanuel Kant e Pierre-Simon Laplace, séc XVII

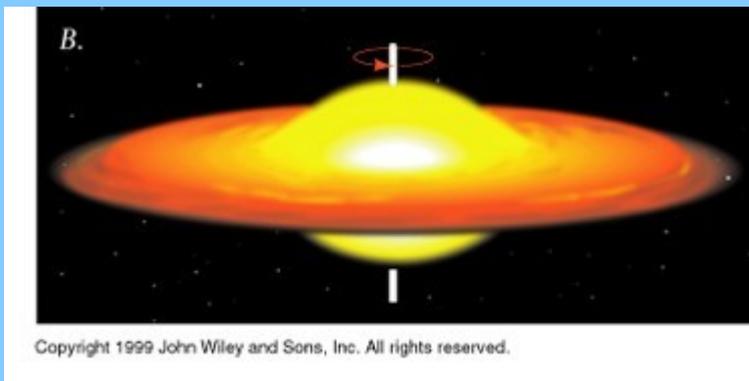
Todos os planetas estão no mesmo plano, giram em torno do Sol e de si mesmos (exceto Vênus) na mesma direção  $\Rightarrow$  formaram-se de uma mesma grande nuvem discoidal de partículas em rotação, a **nebulosa solar**.



# FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

Nuvem colapsa (onda de choque, onda de densidade)  
⇒ rotação aumenta por conservação do momentum angular  
⇒ forma discoidal, com concentração central  
(comprovações observacionais!)

Colapso aumenta pressão  
⇒ aumenta na temperatura na região central  
⇒ reações nucleares = Sol



Perda de momentum angular do Sol:

- ventos solares fortes? (pressão de radiação)
- interação do campo magnético com material ionizado no disco?

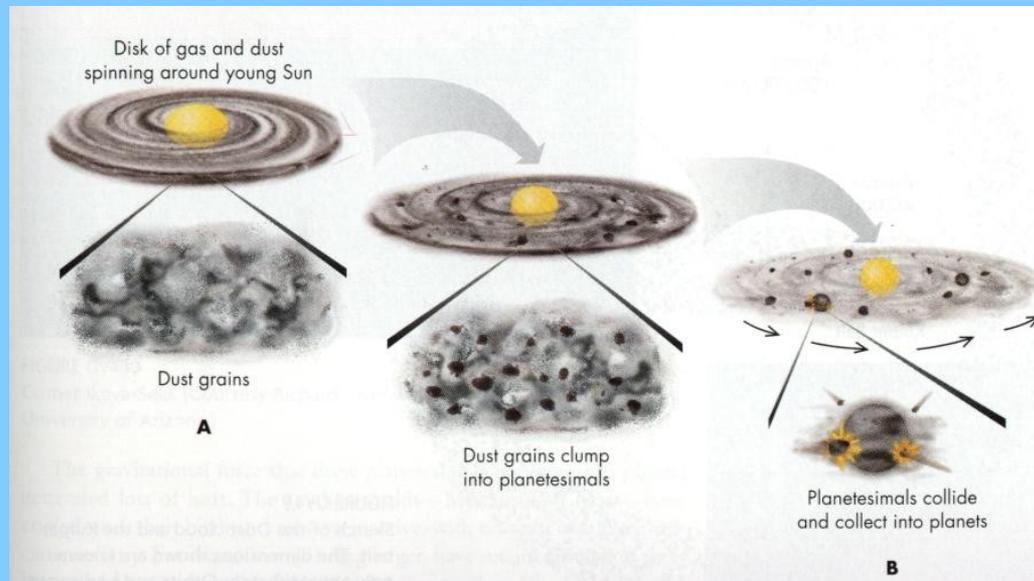
# FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

Região externa esfria  $\Rightarrow$  material condensa =  
planetesimais



~km de diâmetro  
Regiões internas: material volátil perdido  
Regiões externas: material volátil  
colapsa

Planetesimais acretam materiais  $\Rightarrow$  núcleos planetários.



# FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

## Parte externa

- material condensado contém silicatos e gelos (mais abundante)
- núcleos cresceram até atingiram massas da ordem de 10 vezes a massa da Terra
- acretaram grande quantidade de hidrogênio e hélio da nebulosa solar.

= planetas gigantes (jovianos)

Júpiter e Saturno → H e He

Urano e Netuno → água, amônia, metano  
[formaram-se depois, mais perto do Sol(?)]

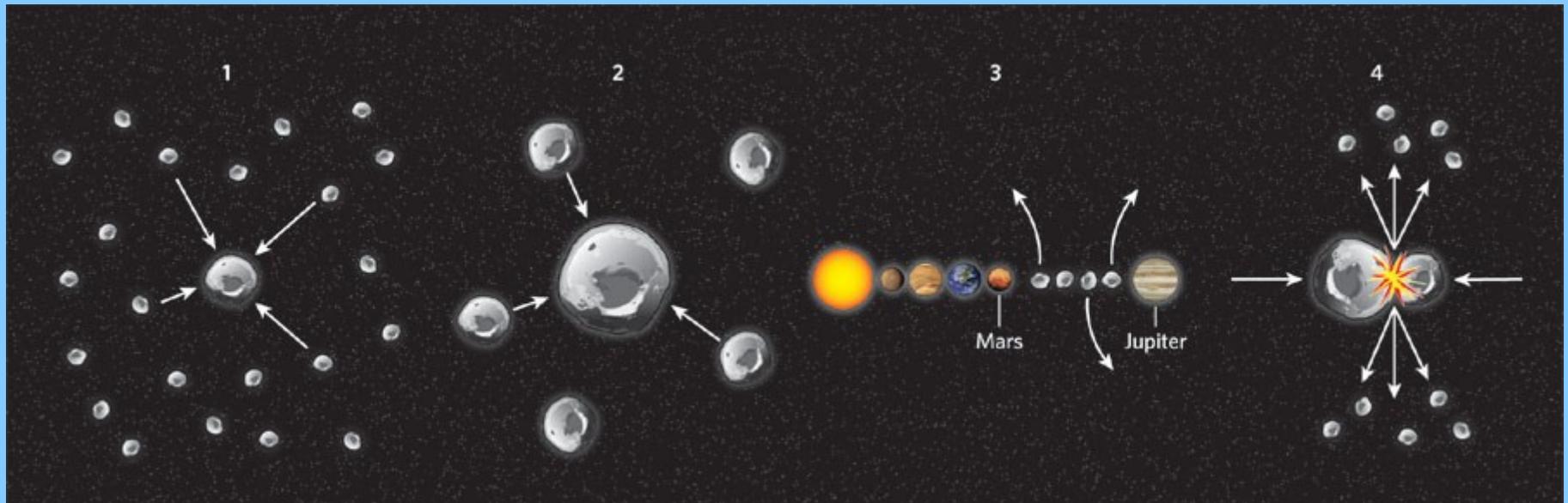
## Parte interna

- apenas silicatos
  - núcleos com tamanho limitado
- = planetas rochosos (terrestres)

# FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

Período de vento solar forte afasta o gás restante.  
Objetos que não foram acretados em corpos grandes formam meteoritos e cometas  
(composição parecida com a primordial)

Júpiter perturbou a órbita dos planetesimais internos  $\Rightarrow$  velocidades muito altas para coalescer  $\Rightarrow$  se quebraram = cinturão de asteróides



# FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

Planetesimais, proto-planetas e cometas distantes trouxeram material volátil dando origem à atmosfera dos planetas terrestres.

Sistemas planeta+satélites são similares ao Sistema Solar como um todo:

satélites mais próximos = rochosos

Satélites mais distantes = gelo

⇒ formação análoga

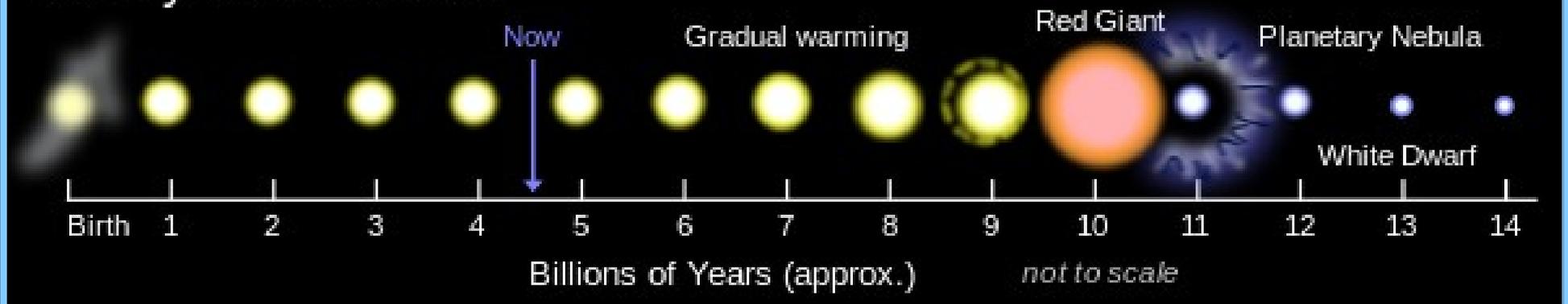
Alguns dos planetesimais restantes foram capturados pelos planetas gigantes e formaram satélites irregulares.

Lua e Cartonte ⇒ colisão oblíqua

# FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

1. Idade (~ 4.5 bilhões de anos).
2. Padrão dos movimentos de translação.
- \*\*\* 3. O Sol ter 99.9% da massa, mas os planetas terem 99.7% do momento angular do sistema.
4. Planetas rochosos (composição, tamanho, órbitas).
5. Planetas gasosos (composição, tamanho, órbitas).
6. Asteróides.
7. Cometas.
8. Satélites regulares dos planetas gigantes.
9. Satélites irregulares.
10. Movimento retrógrado.

# Life Cycle of the Sun



# Links:

<http://astro.if.ufrgs.br/ssolar.htm>

<https://janus.astro.umd.edu/SolarSystems/>

<http://www.solarsystemscope.com/>

<http://space-facts.com/>