

INTRODUÇÃO ÀS CIÊNCIAS PLANETÁRIAS

DOS PLANETAS AOS PEQUENOS CORPOS

GUSTAVO MADEIRA & FILIPE MONTEIRO

CRONOGRAMA



1. Segunda-feira, 11h-12h15 : Gustavo Madeira

- a. Inventário do Sistema Solar
- b. Princípios da Dinâmica Orbital
- c. Formação do Sistema Solar



2. Terça-feira, 11h-12h15: Filipe Monteiro

- a. Revisão histórica de pequenos corpos
- b. Grupos dinâmicos
- c. Sistemas Múltiplos

3. Quinta-feira, 14h-15h15: Filipe Monteiro

- a. Caracterização física de pequenos corpos
- b. Propriedades de populações de pequenos corpos

CIÊNCIAS PLANETÁRIAS

FOTOMETRIA



Daniela Lazzaro



Filipe Monteiro

ASTRONOMIA DINÂMICA



Gustavo Madeira



Fernando Roig

ASTROMETRIA



Júlio Camargo



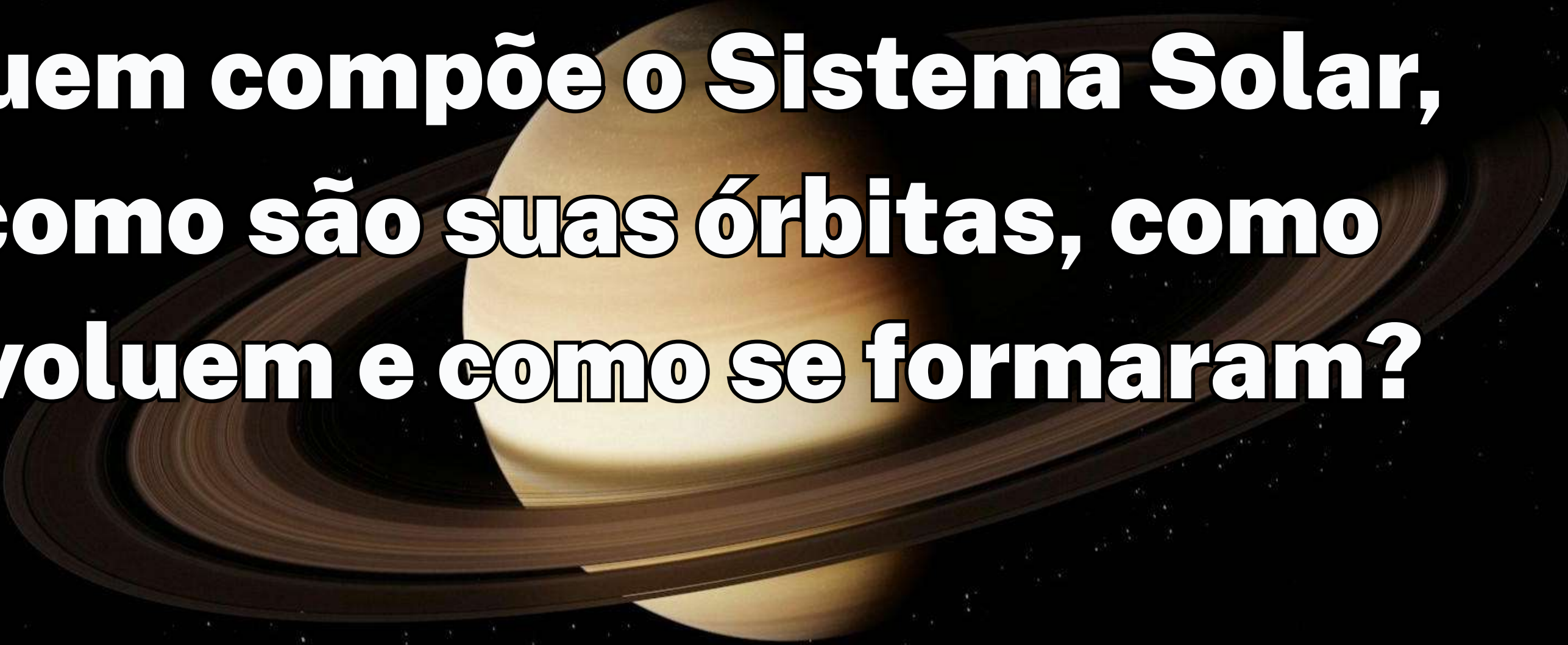
Jorge Carvano



Mário de Prá

ESPECTROSCOPIA

FORMAÇÃO PLANETÁRIA



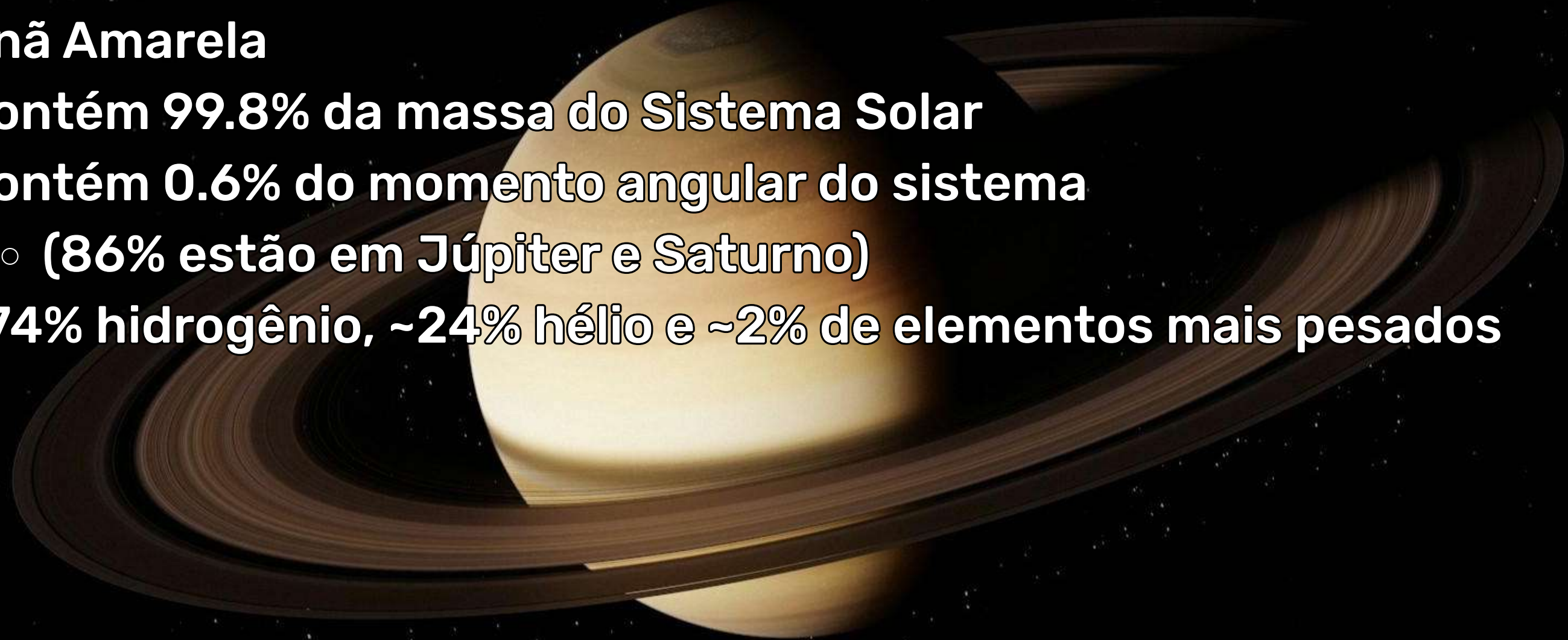
**Quem compõe o Sistema Solar,
como são suas órbitas, como
evoluem e como se formaram?**

O INVENTÁRIO DO SISTEMA SOLAR

- Anã Amarela
- Contém 99.8% da massa do Sistema Solar
- Contém 0.6% do momento angular do sistema
 - (86% estão em Júpiter e Saturno)
- ~74% hidrogênio, ~24% hélio e ~2% de elementos mais pesados



Sol



O INVENTÁRIO DO SISTEMA SOLAR

Orbitam ou passam pelo entorno do Sol

Objetos sem atividade

Em equilíbrio hidrostático

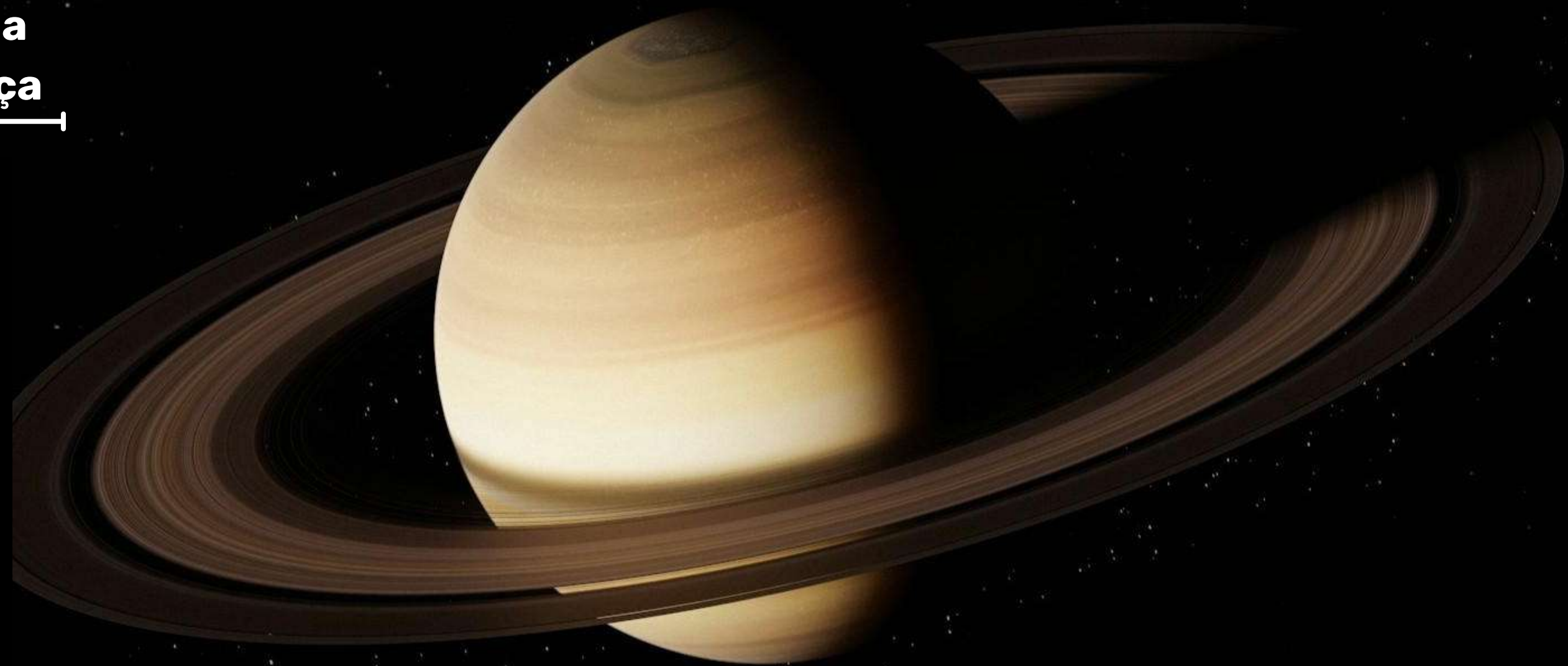
Limpam a
vizinhança



Sol



Planetas



O INVENTÁRIO DO SISTEMA SOLAR

Orbitam ou passam pelo entorno do Sol

Objetos sem atividade

Em equilíbrio hidrostático

Limpam a
vizinhança



Sol



Planetas



Planetas-anões



O INVENTÁRIO DO SISTEMA SOLAR

Orbitam ou passam pelo entorno do Sol

Objetos sem atividade

Em equilíbrio hidrostático

Limpam a
vizinhança



Sol



Planetas



Planetas-anões



Asteroides



O INVENTÁRIO DO SISTEMA SOLAR

Orbitam ou passam pelo entorno do Sol

Objetos sem atividade

Em equilíbrio hidrostático

Limpam a
vizinhança



Sol



Planetas



Planetas-anões



Asteroides



Cometas



Poeira

O INVENTÁRIO DO SISTEMA SOLAR

Orbitam ou passam pelo entorno do Sol

Objetos sem atividade

Em equilíbrio hidrostático

Limpam a
vizinhança



Sol



Planetas



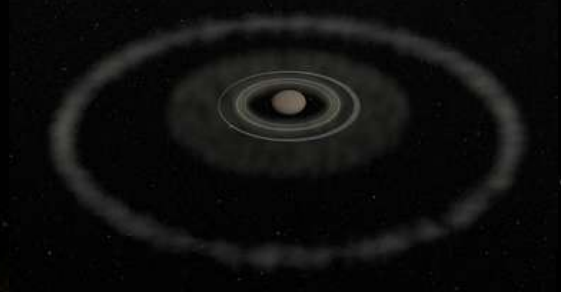
Planetas-anões



Asteroides



Cometas



Anéis



Arcos

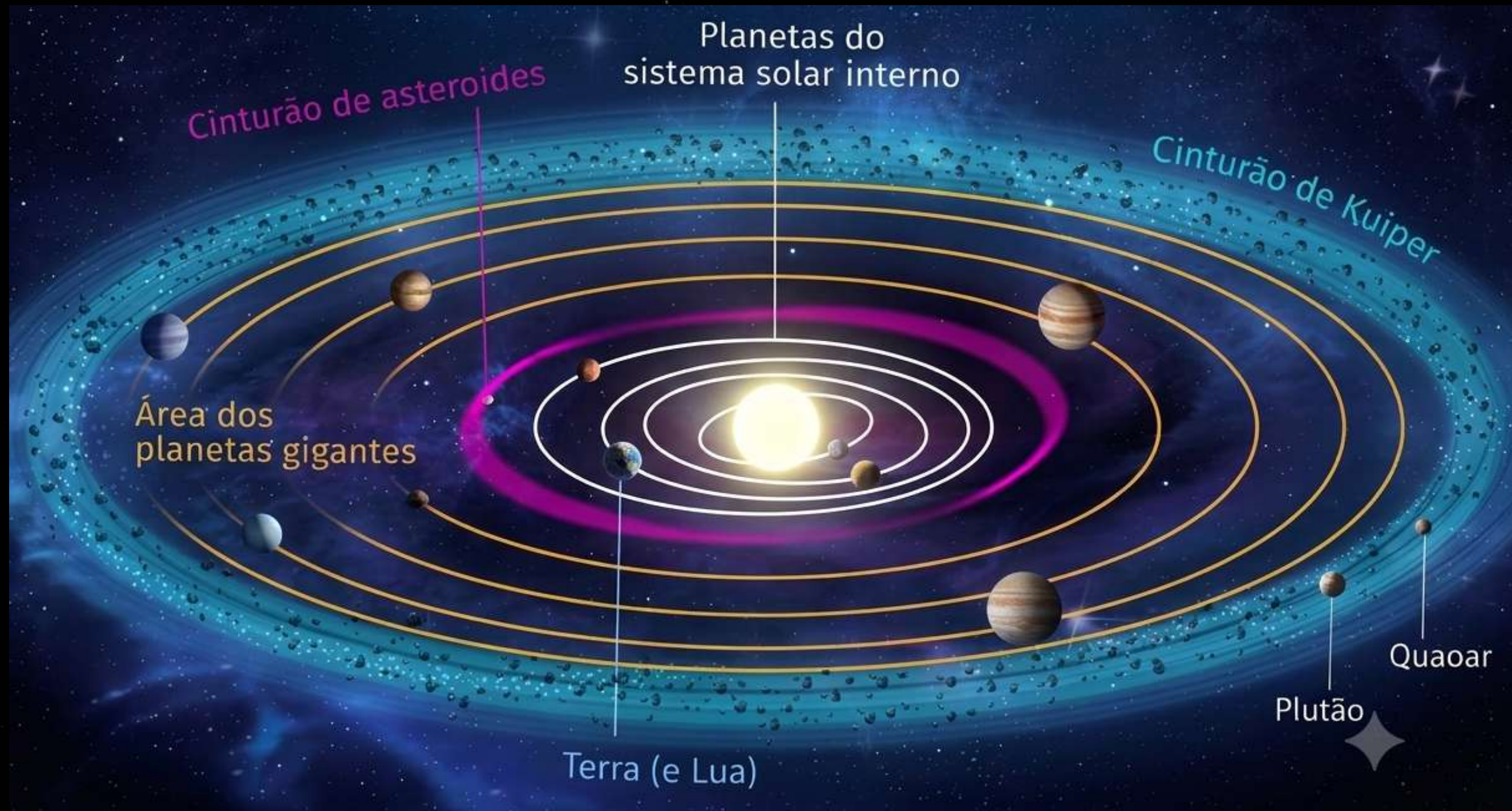


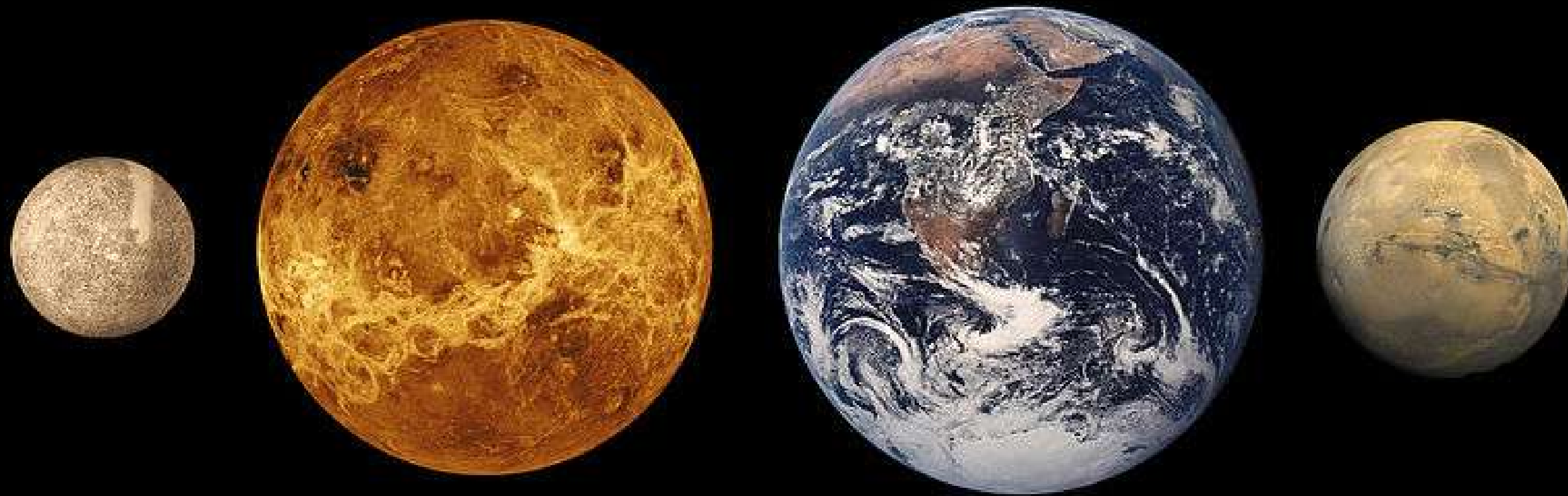
Poeira



Satélites

A ARQUITETURA DO SISTEMA SOLAR





- Menores planetas do Sistema Solar
- Planetas com núcleo metálico (Fe e Ni) e manto formado de silicatos
- Alta densidade (4000-5500 kg/m³)
- Lenta rotação (24 horas - 243 dias)

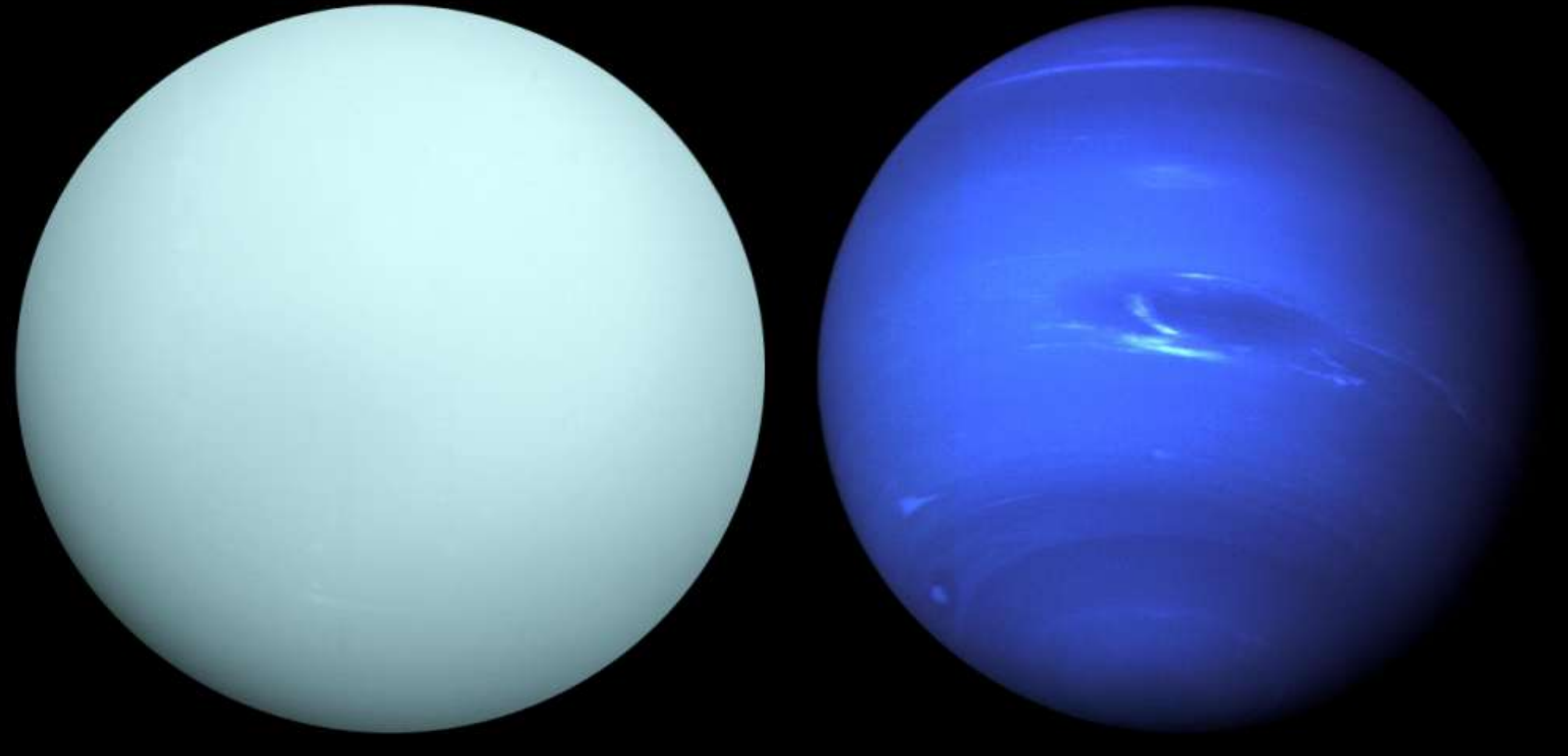
PLANETAS TERRESTRES

A ARQUITETURA DO SISTEMA SOLAR

- 
- The diagram illustrates the architecture of the Solar System. At the center is the Sun. Concentric elliptical orbits represent the paths of the planets. The 'Área dos planetas gigantes' (Area of the gas giants) is highlighted in a purple band, encompassing the orbits of Jupiter and Saturn. The Kuiper belt is shown as a blue ring of small objects beyond the gas giants, with labels for 'Plutão' (Pluto) and 'Quaoar'. The Oort cloud is depicted as a distant, spherical shell of icy bodies. Labels for 'Terra (e Lua)' (Earth and Moon) and 'Kuiper' are also present.
- Compostos de hidrogênio e hélio em estado gasoso/plasmático, sem superfície sólida definida
 - Densidade próxima ou menor que da água
 - Rotações próximas de 10-11 horas
 - Maiores planetas do Sistema Solar

GIGANTES GASOSOS

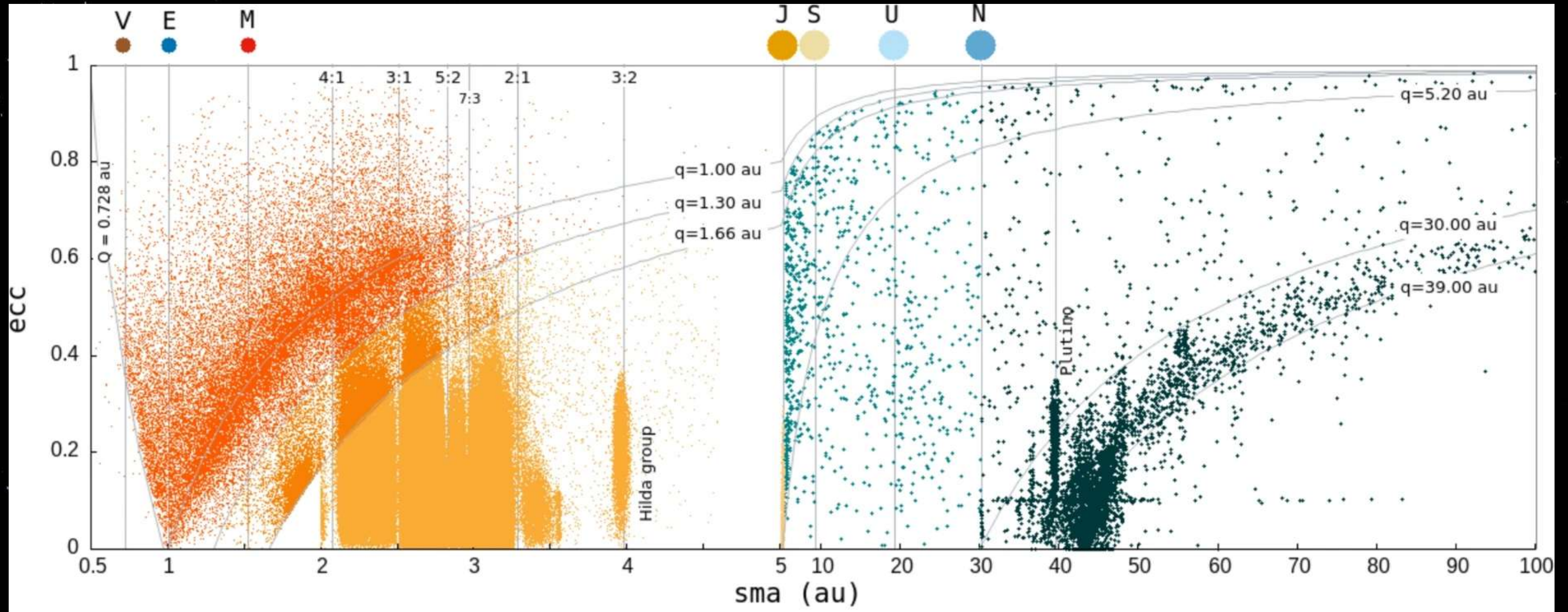
A ARQUITETURA DO SISTEMA SOLAR



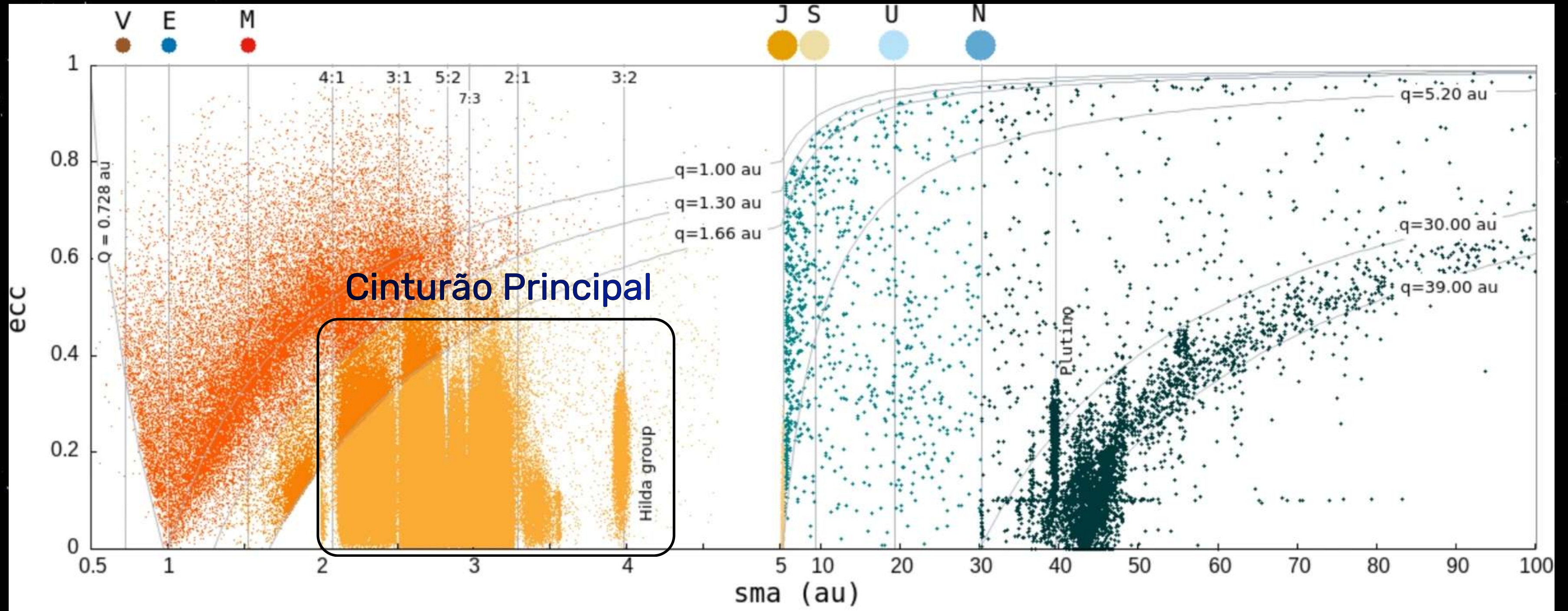
- Contém hidrogênio e hélio e gelos voláteis (água, amônia, metano), com pequeno núcleo rochoso
- Densidade de 1000-2000 kg/m³
- Rotações próximas de 16-17 horas

GIGANTES DE GELO

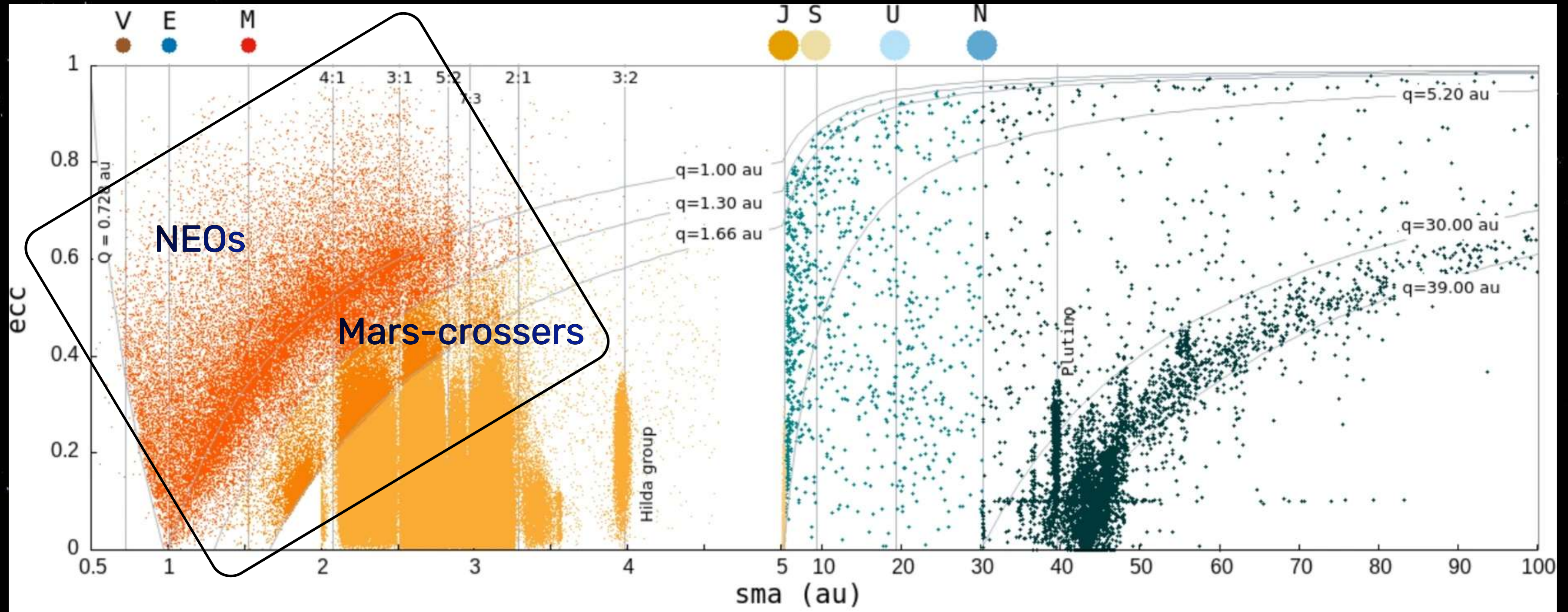
OS PLANETAS ESTÃO IMERSOS EM UM AMBIENTE REPLETO DE CORPOS MENORES



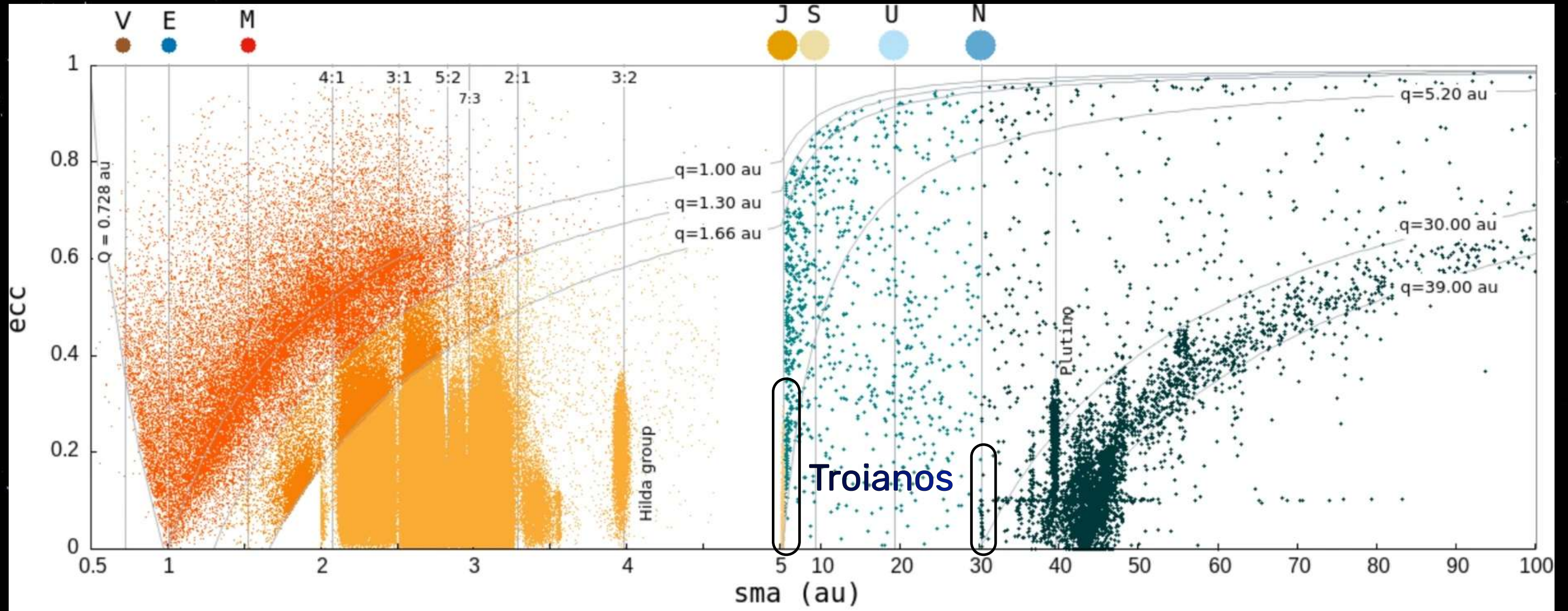
OS PLANETAS ESTÃO IMERSOS EM UM AMBIENTE REPLETO DE CORPOS MENORES



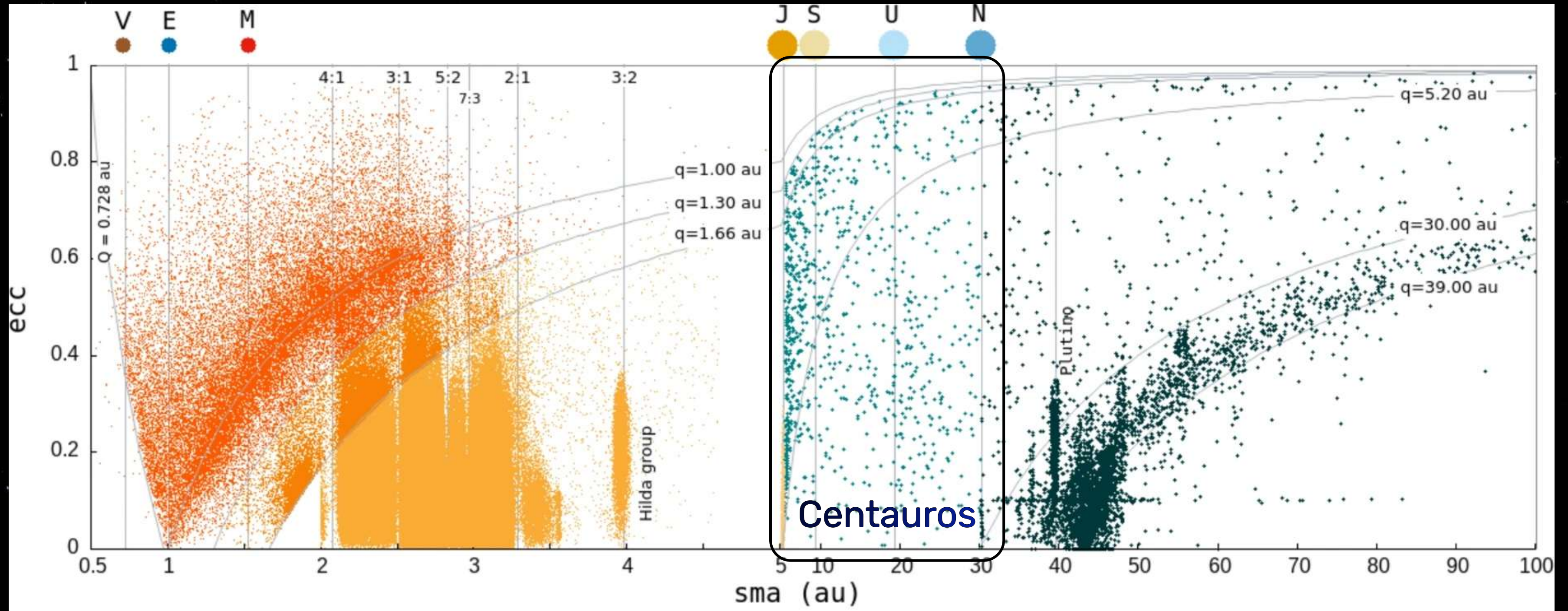
OS PLANETAS ESTÃO IMERSOS EM UM AMBIENTE REPLETO DE CORPOS MENORES



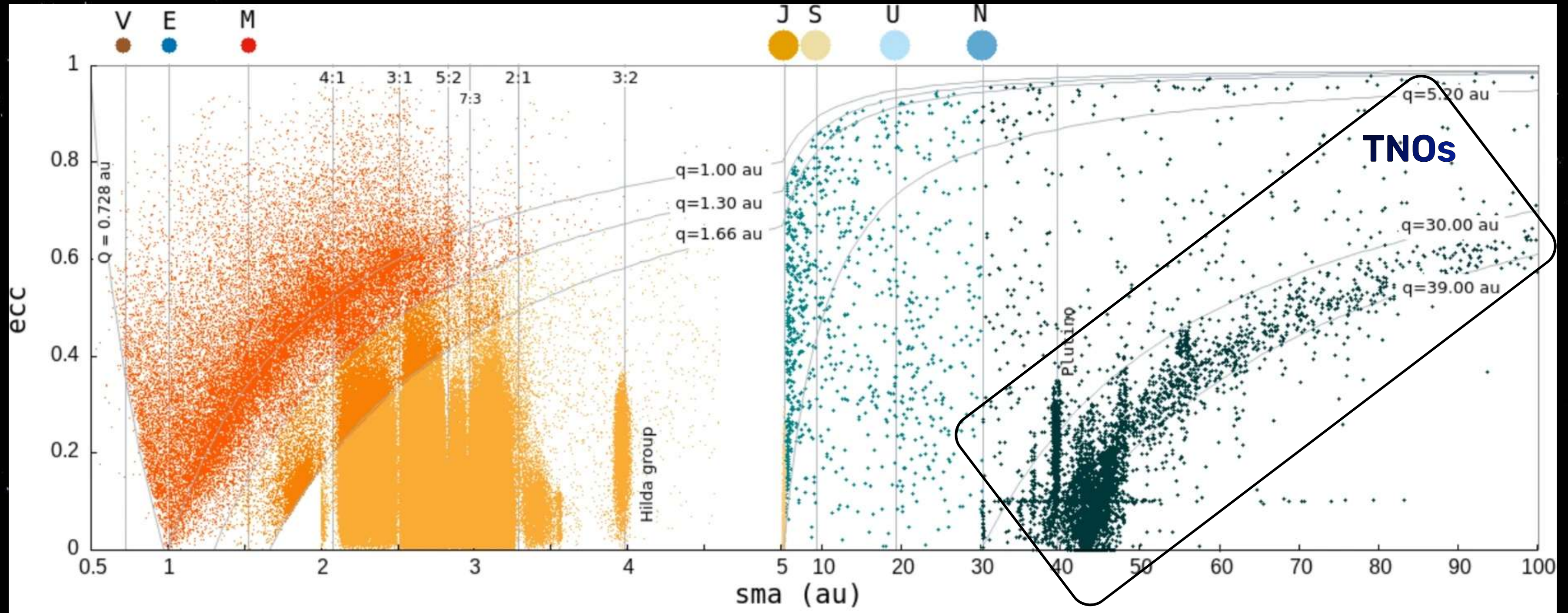
OS PLANETAS ESTÃO IMERSOS EM UM AMBIENTE REPLETO DE CORPOS MENORES



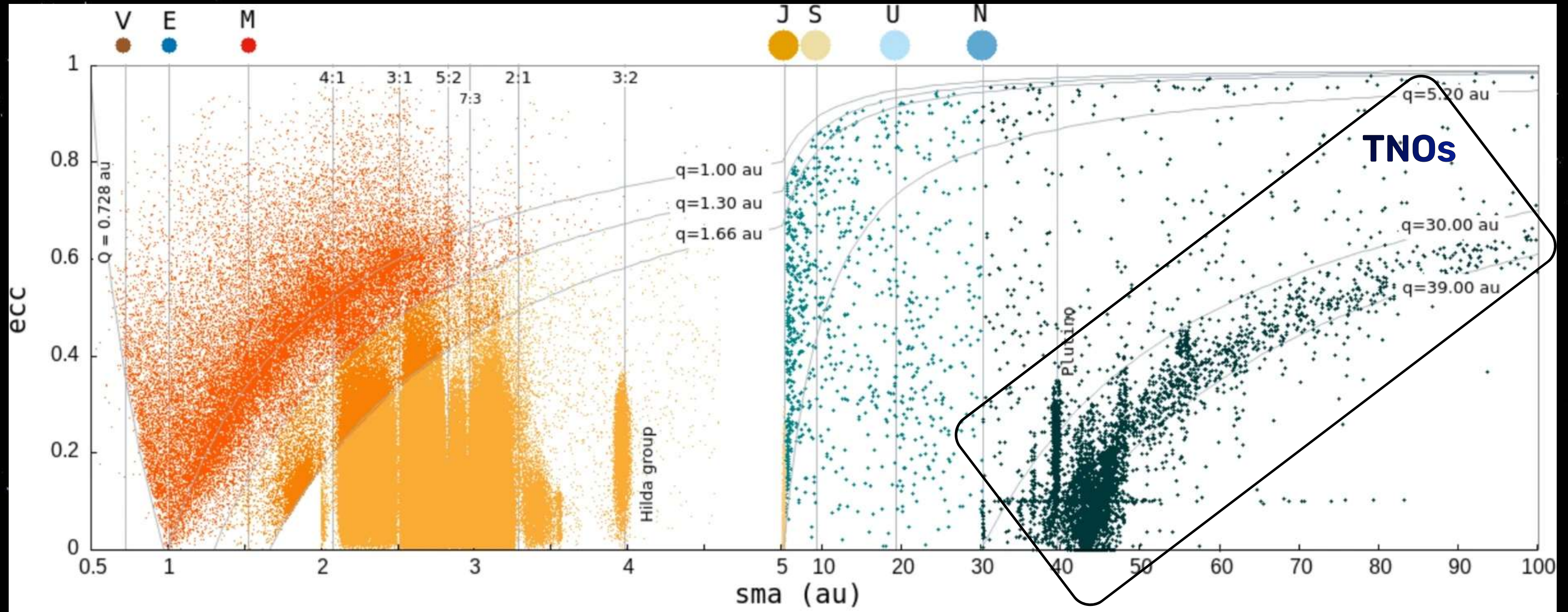
OS PLANETAS ESTÃO IMERSOS EM UM AMBIENTE REPLETO DE CORPOS MENORES



OS PLANETAS ESTÃO IMERSOS EM UM AMBIENTE REPLETO DE CORPOS MENORES

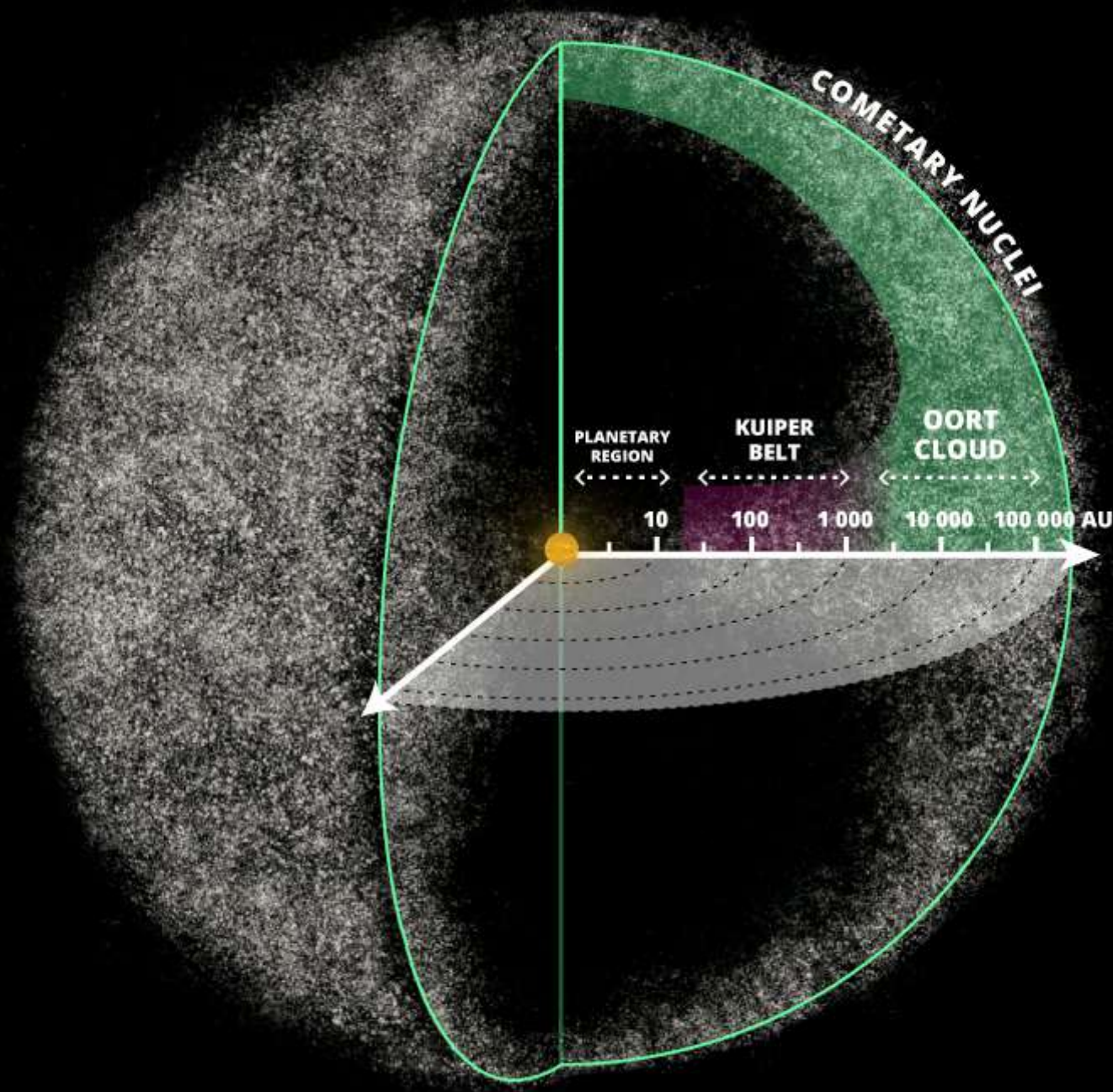
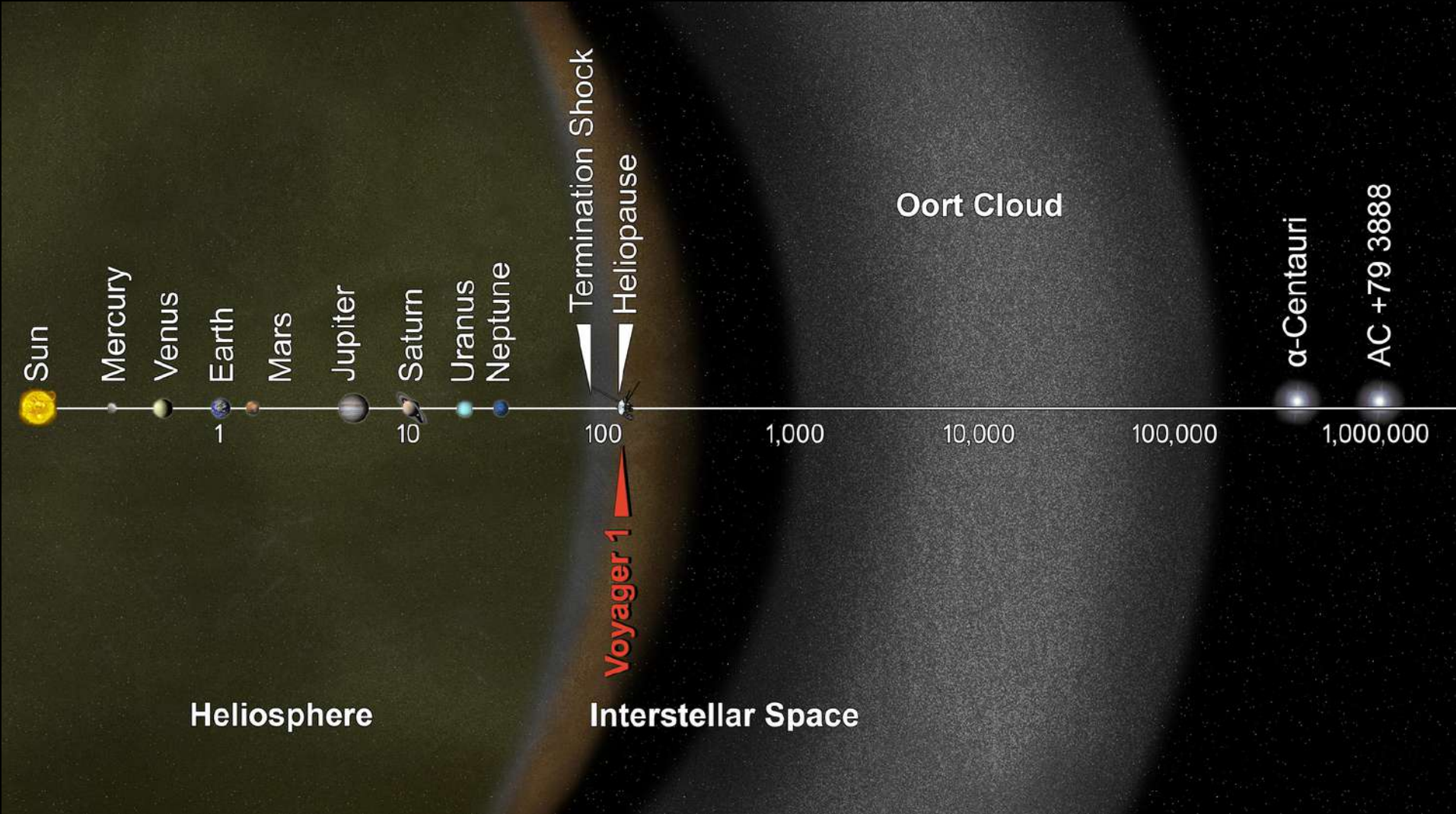


OS PLANETAS ESTÃO IMERSOS EM UM AMBIENTE REPLETO DE CORPOS MENORES



Nas próximas aulas vocês estudarão esses pequenos corpos em mais detalhes

OS PLANETAS ESTÃO IMERSOS EM UM AMBIENTE REPLETO DE CORPOS MENORES

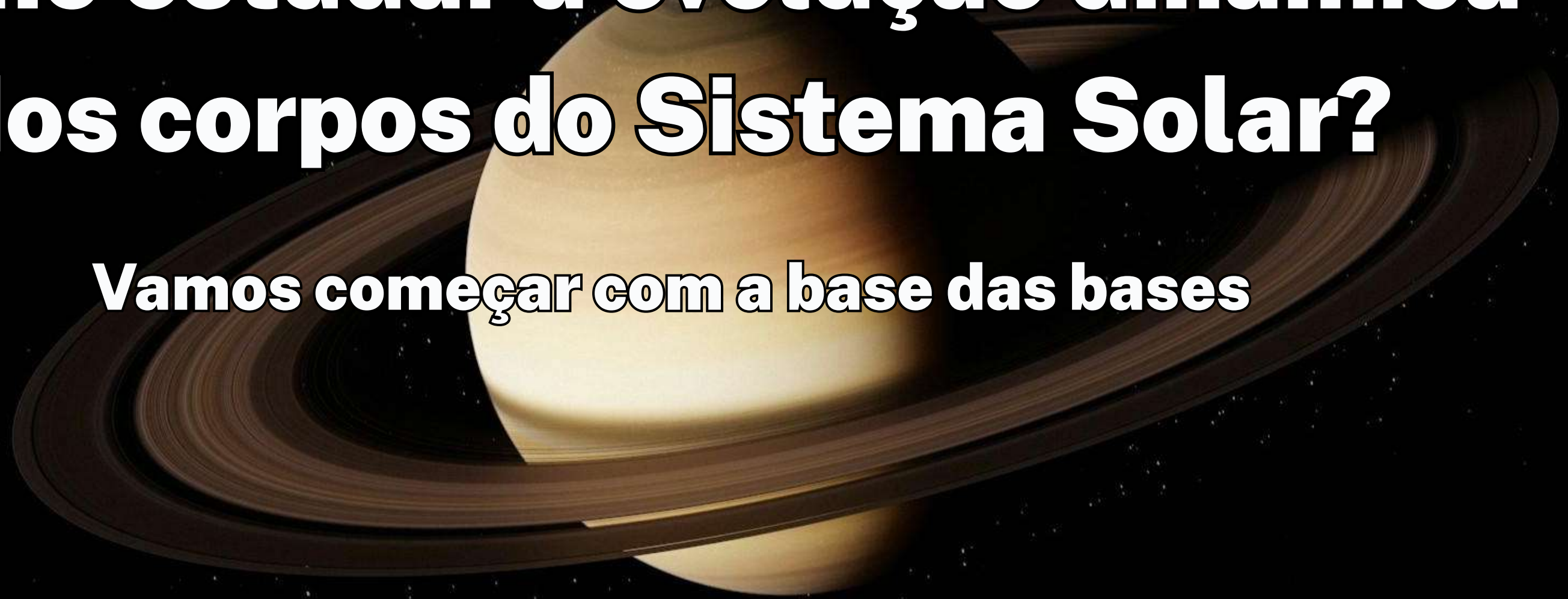


**Como estudar a evolução dinâmica
dos corpos do Sistema Solar?**



Como estudar a evolução dinâmica dos corpos do Sistema Solar?

Vamos começar com a base das bases



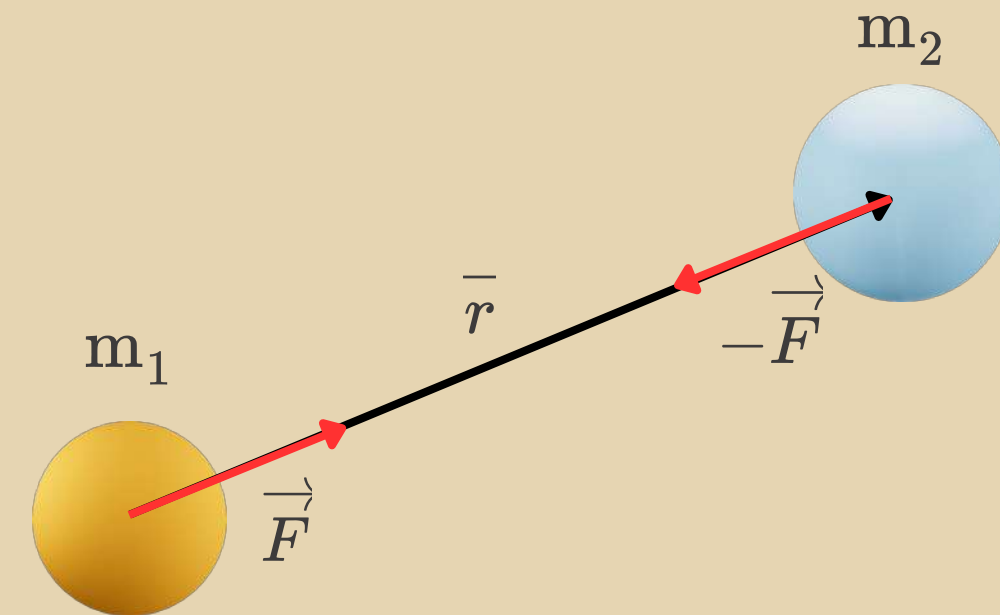


LEI DA GRAVITACIONAL UNIVERSAL NEWTON, 1687

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^3} \vec{r}$$

CONSTANTE GRAVITACIONAL UNIVERSAL

$$G = 6,674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$



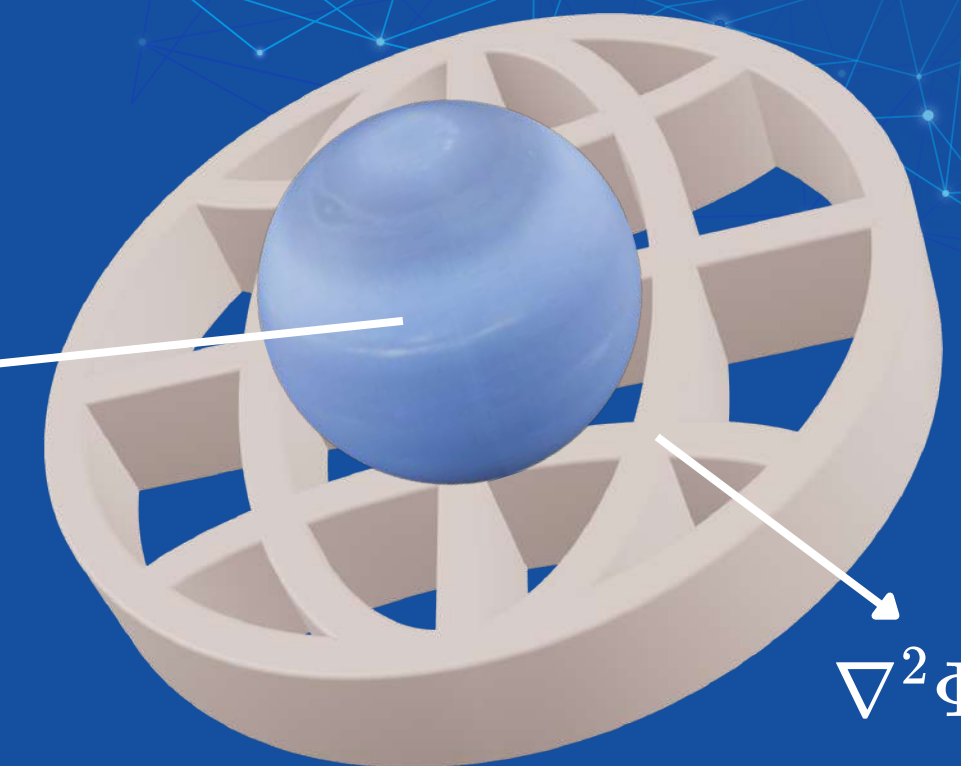
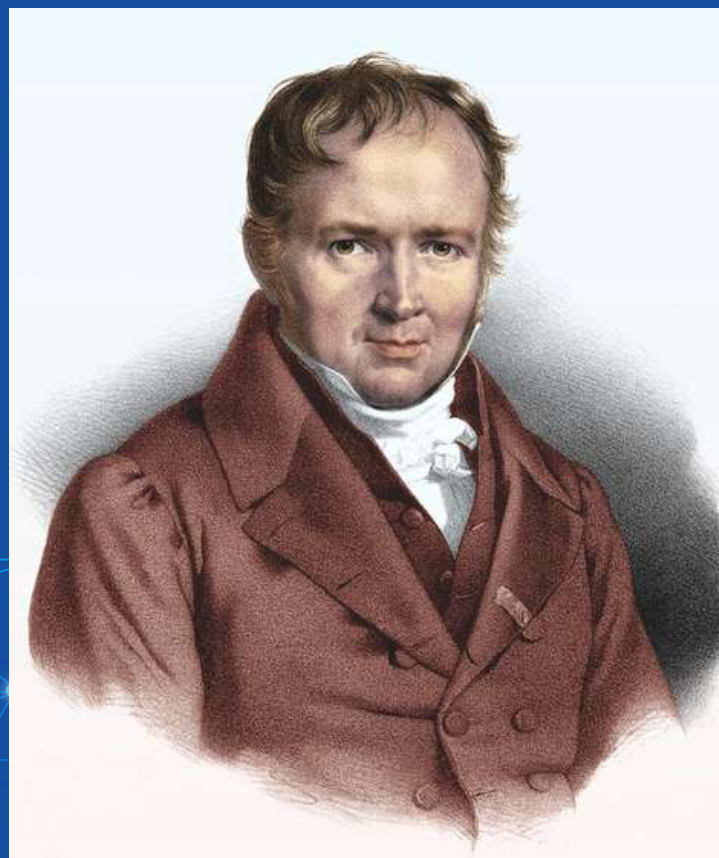
FORÇA DE ATRAÇÃO ENTRE DOIS
PONTOS DE MASSA

EQUAÇÃO DE POISSON POISSON, 1813

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho$$

Φ = potencial gravitacional

ρ = densidade de massa local



Campo gravitacional gerado por uma
distribuição de massa

O PROBLEMA DE 2 CORPOS

O problema da interação gravitacional entre dois pontos-de-massa isolados no espaço é a base da dinâmica orbital, o que nos permite encontrar os chamados “elementos orbitais”

no tempo $t = 0$

$$x_1, y_1, z_1$$

$$\dot{x}_1, \dot{y}_1, \dot{z}_1$$

$$x_2, y_2, z_2$$

$$\dot{x}_2, \dot{y}_2, \dot{z}_2$$

no tempo $t = t$

$$x_1, y_1, z_1$$

$$\dot{x}_1, \dot{y}_1, \dot{z}_1$$

$$x_2, y_2, z_2$$

$$\dot{x}_2, \dot{y}_2, \dot{z}_2$$

no baricentro

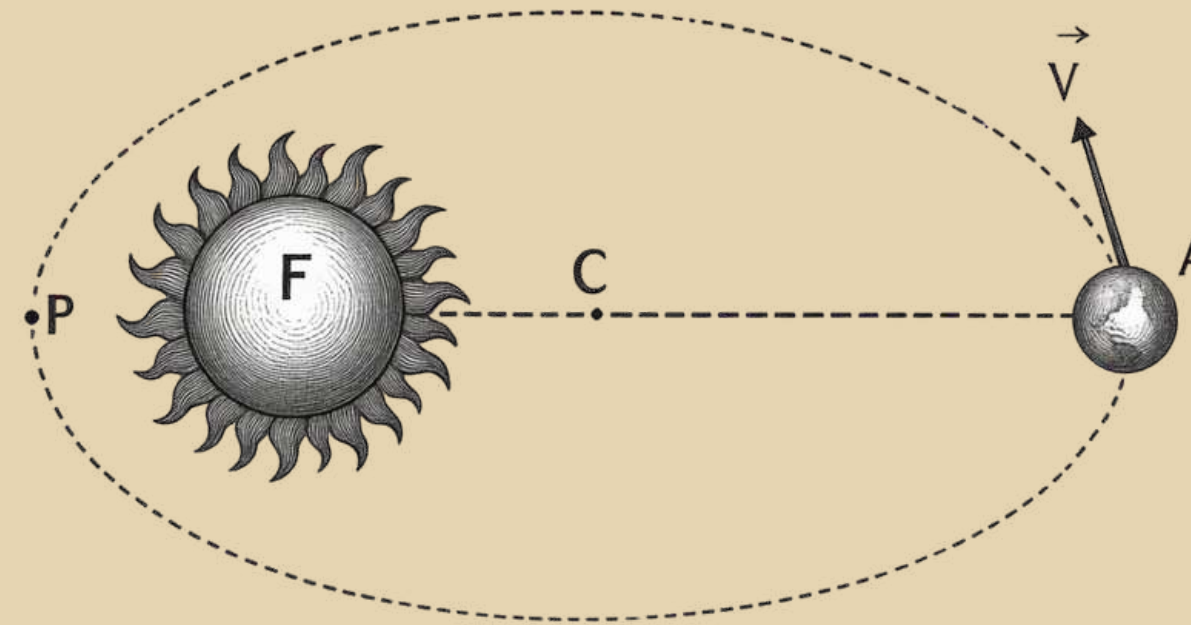
$$x_{CM} = y_{CM} = z_{CM} = 0$$

$$\dot{x}_{CM} = \dot{y}_{CM} = \dot{z}_{CM} = 0$$

+ 6 elementos orbitais

PRIMEIRA LEI DE KEPLER

KEPLER, 1609



OS PLANETAS SE MOVEM AO REDOR DO SOL EM ÓRBITAS ELÍPTICAS, COM O SOL EM UM DOS FOCOS

OBTIDA A PARTIR DOS DADOS DO TYCHO BRAHE

LEIS DAS ÓRBITAS

p = semilatus rectum
(extensão da órbita)

e = excentricidade
(formato da órbita)

f = anomalia verdadeira
(posição na órbita)

$$r = \frac{p}{1 + e \cos f}$$



$e = 0$ - Circunferência

$e < 1$ - Elipse

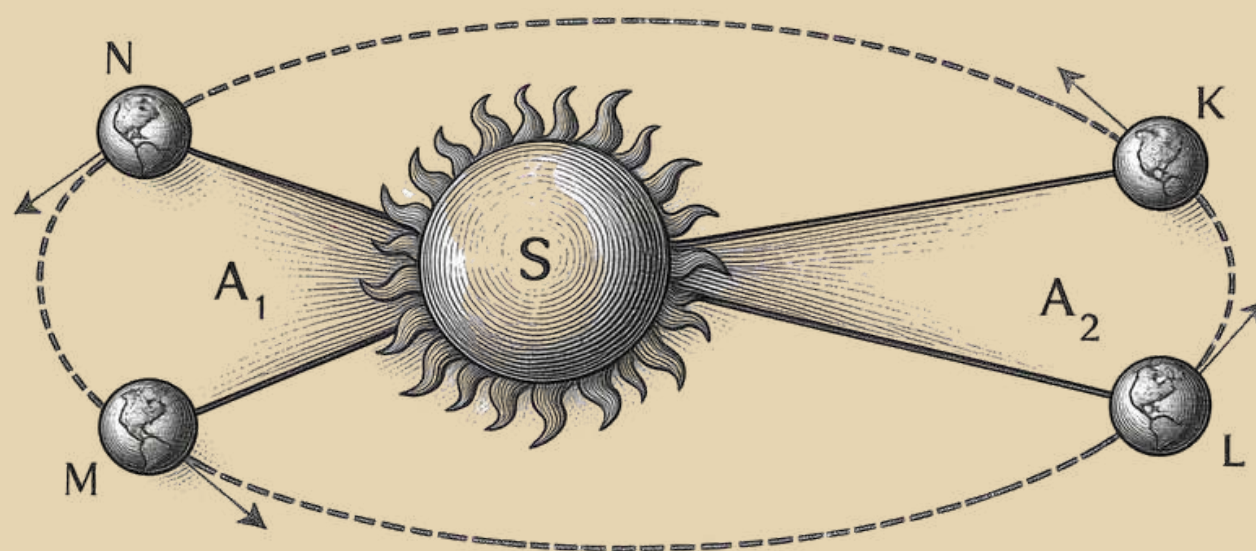
$e = 1$ - Parábola

$e > 1$ - Hipérbole

Obtida a partir da lei de gravitação universal

SEGUNDA LEI DE KEPLER

KEPLER, 1609



OS PLANETAS VARREM ÁREAS IGUAIS EM TEMPOS IGUAIS

OBTIDA A PARTIR DOS DADOS DO TYCHO BRAHE

LEIS DAS ÁREAS

A = área varrida

h = momento angular

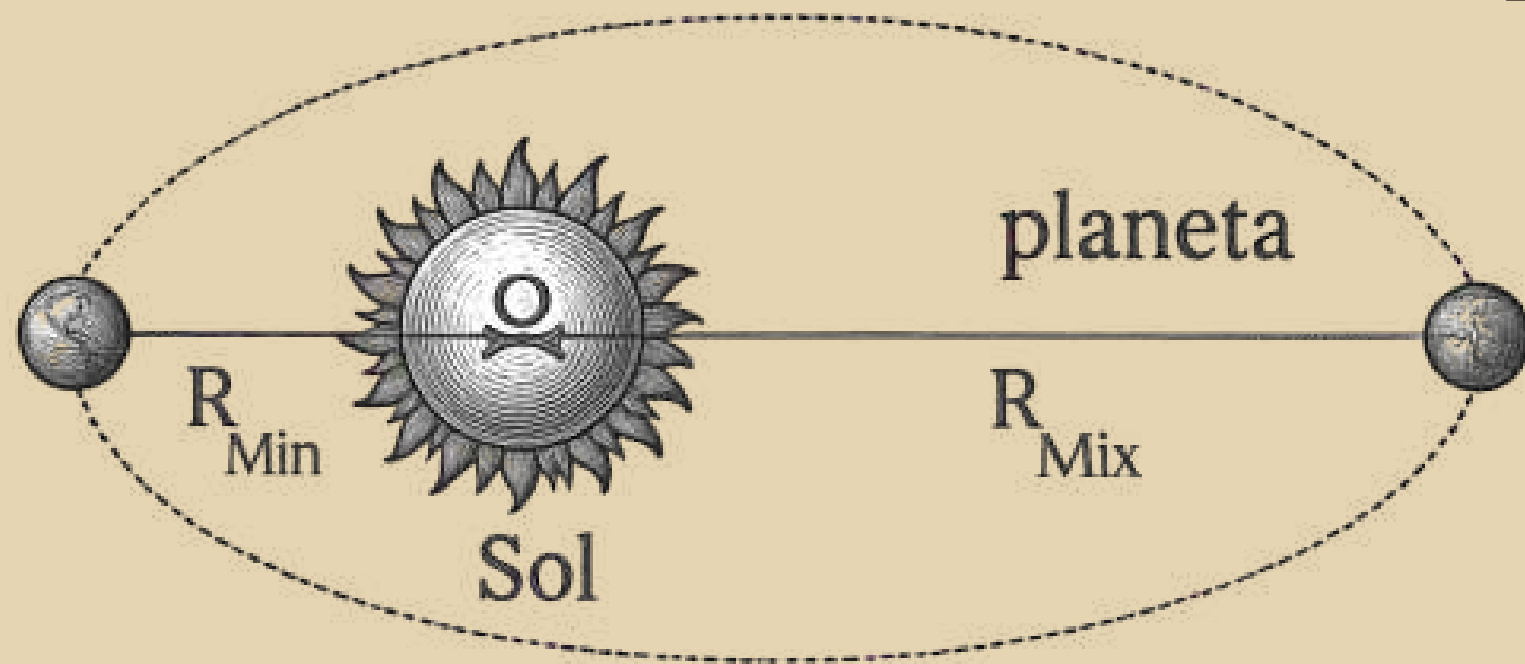
$$\frac{dA}{dt} = \frac{h}{2} = \text{constante}$$

É uma consequência da
simetria esférica do
potencial gravitacional

Obtida a partir da lei de gravitação universal

TERCEIRA LEI DE KEPLER

KEPLER, 1619



$$\frac{R_{Mercurio}^3}{T_{Mercurio}^2} = \frac{R_{Venus}^3}{T_{Venus}^2} = \frac{R_{Terra}^3}{T_{Terra}^2} = \frac{R_{Marte}^3}{T_{Marte}^2} = \frac{R_{Jupiter}^3}{T_{Jupiter}^2} = \frac{R_{Saturno}^3}{T_{Saturno}^2}$$

OBTIDA A PARTIR DOS DADOS DO TYCHO BRAHE

LEIS DOS PERÍODOS

a = semi-eixo maior

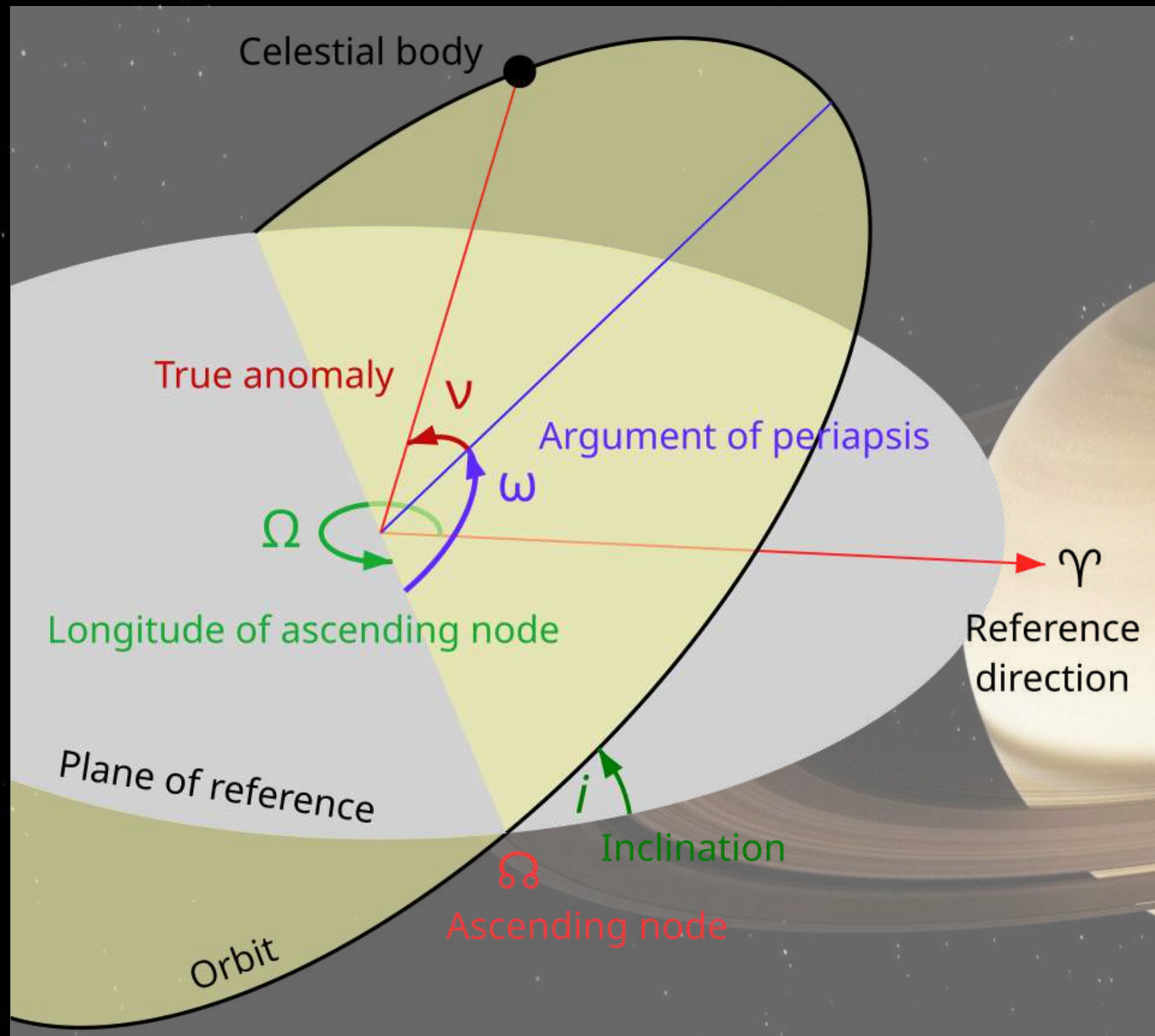
T = período orbital

$$G(M + m) = \frac{4\pi}{T^2} a^3$$

Lei válida para órbitas
fechadas ou conectadas
(circunferência e elipse)

Obtida a partir da lei de gravitação universal

OS ELEMENTOS ORBITAIS DE UMA ÓRBITA FECHADA



- a : semi-eixo maior
extensão da órbita
- e : excentricidade
formato da órbita
- ω : argumento do pericentro
orientação 1D da órbita
- i : inclinação
orientação 2D da órbita
- Ω : longitude do nodo ascendente
orientação 3D da órbita
- τ : tempo de passagem pelo pericentro
localização temporal da órbita

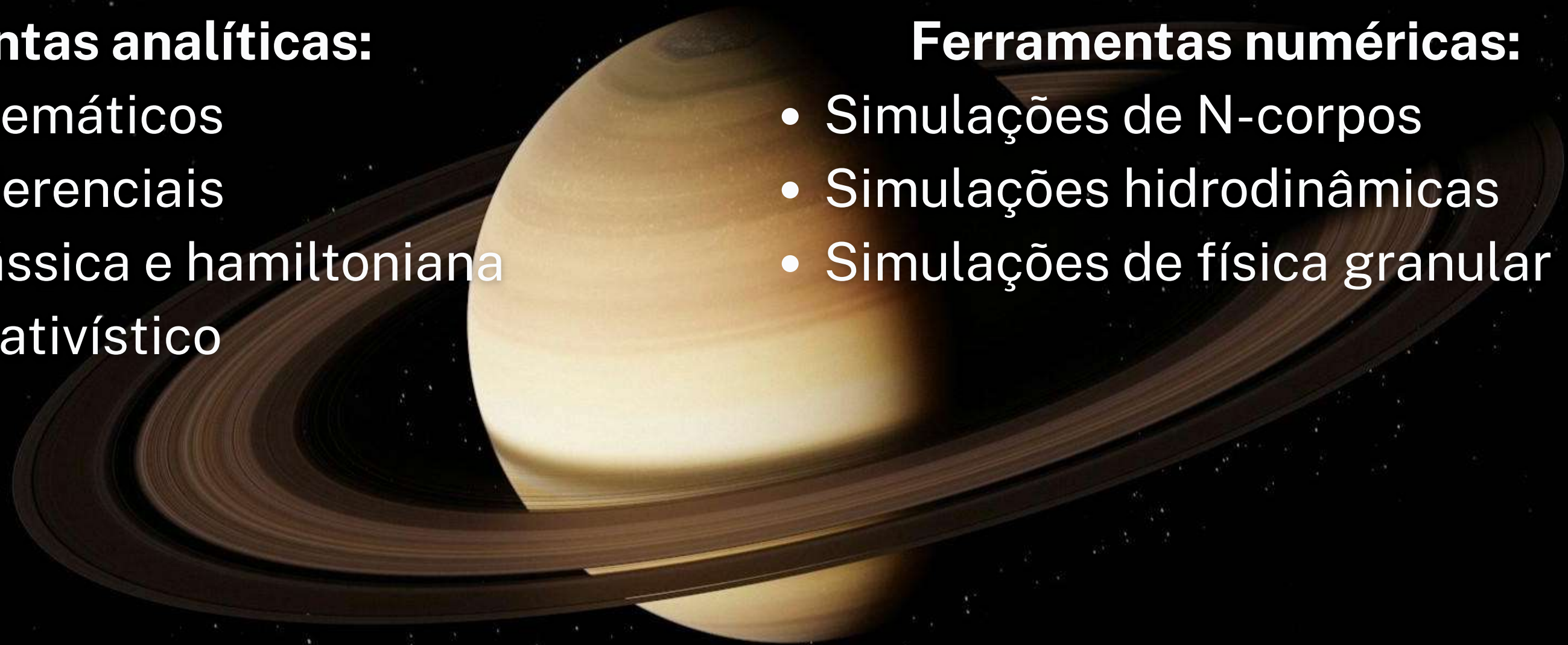
COMO ESTUDAR SISTEMAS MAIS COMPLEXOS?

Ferramentas analíticas:

- Modelos matemáticos
- Equações diferenciais
- Mecânica clássica e hamiltoniana
- Mecânica relativístico

Ferramentas numéricas:

- Simulações de N-corpos
- Simulações hidrodinâmicas
- Simulações de física granular



COMO ESTUDAR SISTEMAS MAIS COMPLEXOS?

Ferramentas analíticas:

- Modelos matemáticos
- Equações diferenciais
- Mecânica clássica e hamiltoniana
- Mecânica relativístico

**Resultados universais, mas
aplicação limitada**

Ferramentas numéricas:

- Simulações de N-corpos
- Simulações hidrodinâmicas
- Simulações de física granular

**Aplicação ilimitada, mas com
resultados particulares**



EXEMPLO ANALÍTICO: MÉTODO DE PERTURBAÇÃO

Consiste em considerar qualquer efeito sobre o secundário, além da atração gravitacional do primário tratado como ponto de massa, como uma perturbação que faz com que os elementos orbitais deixem de ser constantes.

$$\frac{da}{dt} = \frac{2na^2}{\mu} \left(\frac{ae}{\sqrt{1-e^2}} R \sin f + B \frac{a^2 \sqrt{1-e^2}}{r} \right)$$

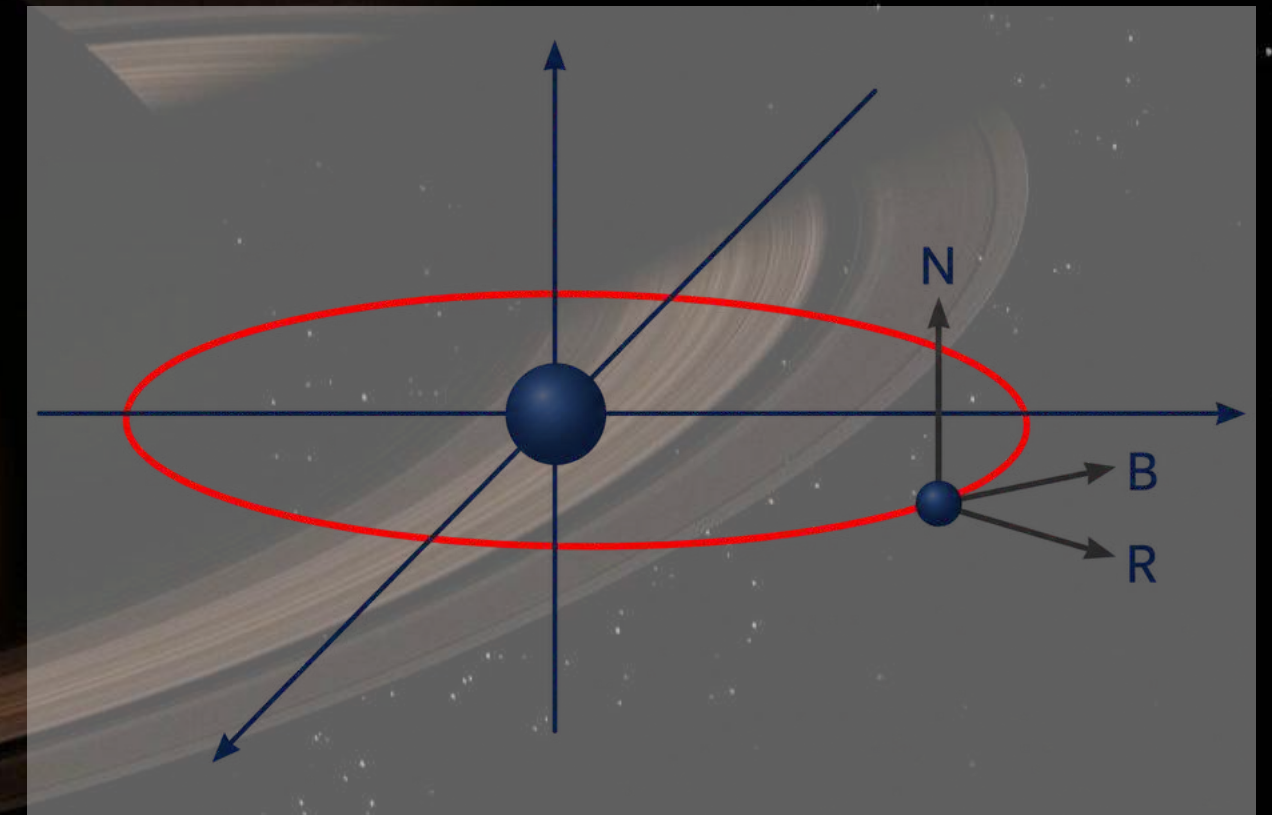
$$\frac{de}{dt} = \frac{na^2}{\mu} \sqrt{1-e^2} [R \sin f + B(\cos f + \cos E)]$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{nar}{\mu \sqrt{1-e^2}} N \cos u$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{nar}{\mu \sqrt{1-e^2}} N \sin u \csc i$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{na^2}{e\mu} \sqrt{1-e^2} \left[-R \cos f + B \sin f \left(1 + \frac{r}{p} \right) \right] - \cos i \frac{d\Omega}{dt}$$

Equações de Gauss

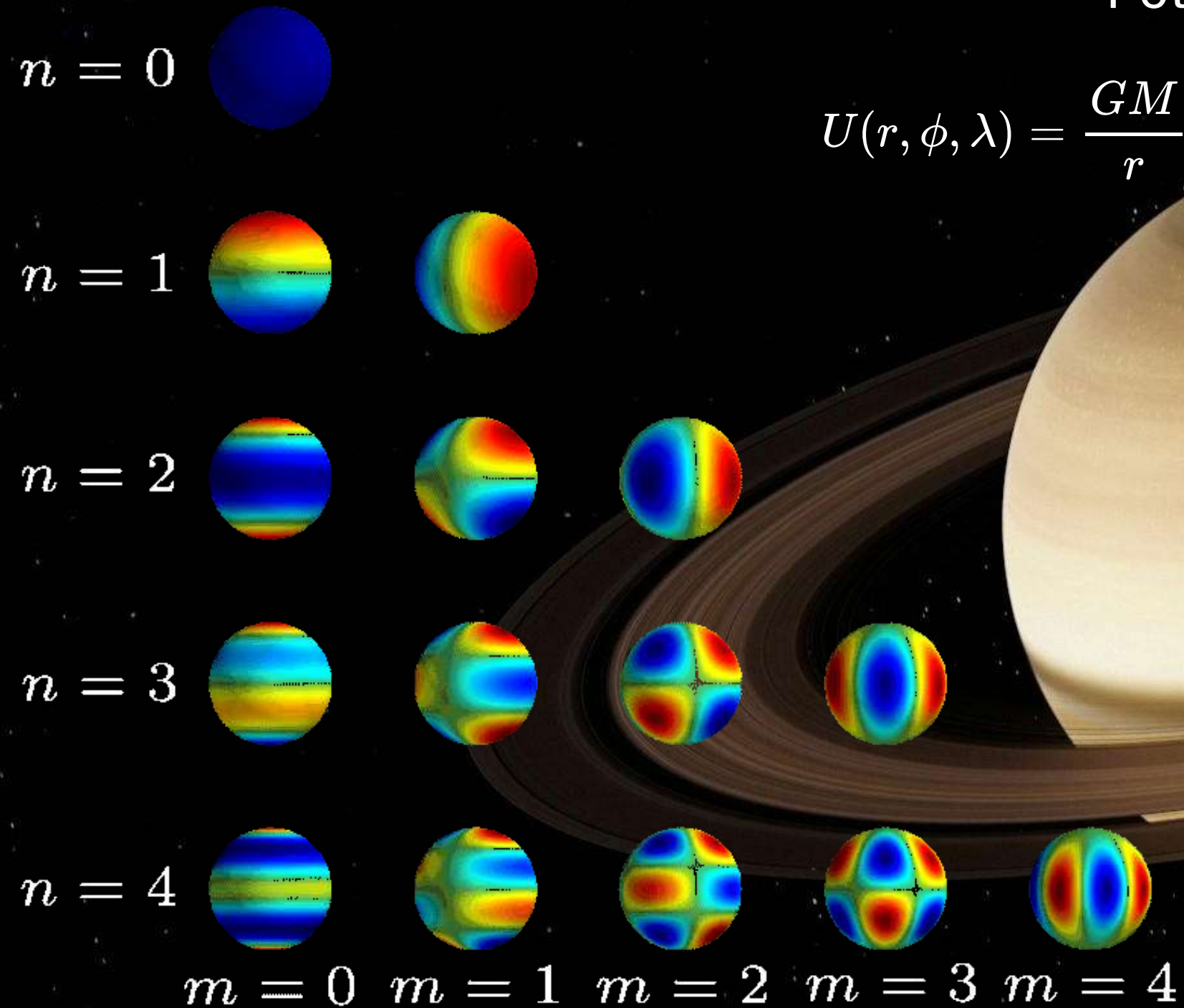


EXEMPLO ANALÍTICO: MÉTODO DE PERTURBAÇÃO

Uma dessas perturbações pode ser, por exemplo, o formato do corpo central

Potencial gravitacional geral de um corpo:

$$U(r, \phi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{R}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin \phi) (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) \right]$$

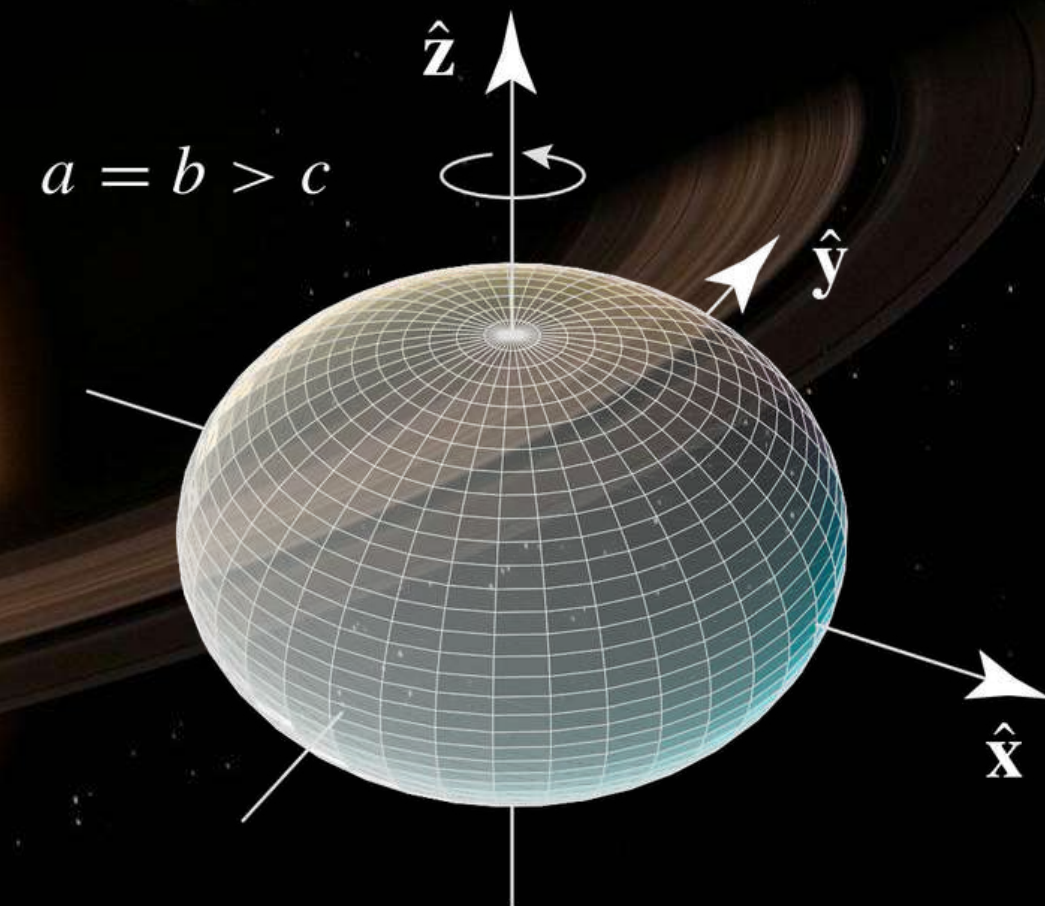
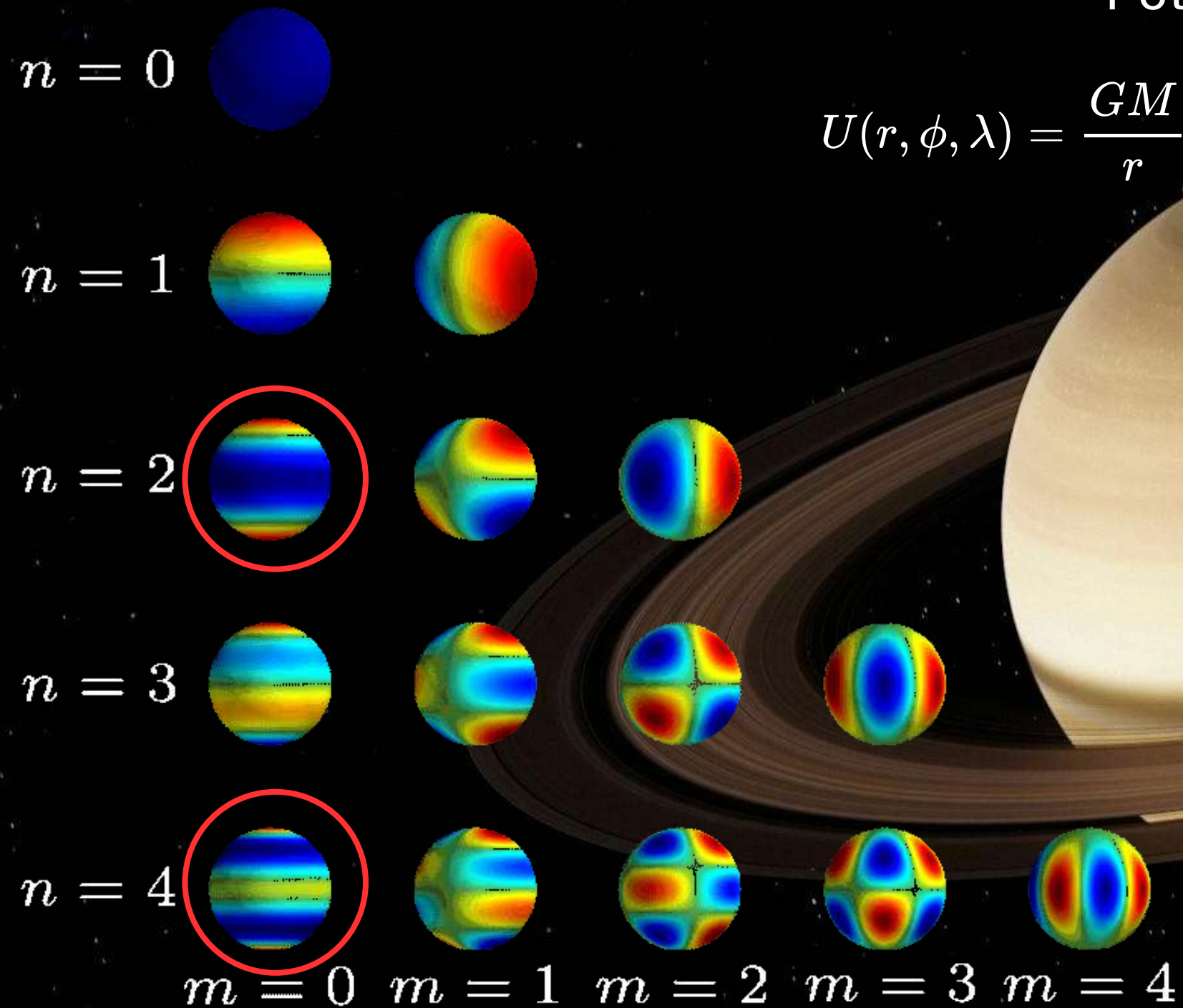


EXEMPLO ANALÍTICO: MÉTODO DE PERTURBAÇÃO

Uma dessas perturbações pode ser, por exemplo, o formato do corpo central

Potencial gravitacional geral de um corpo:

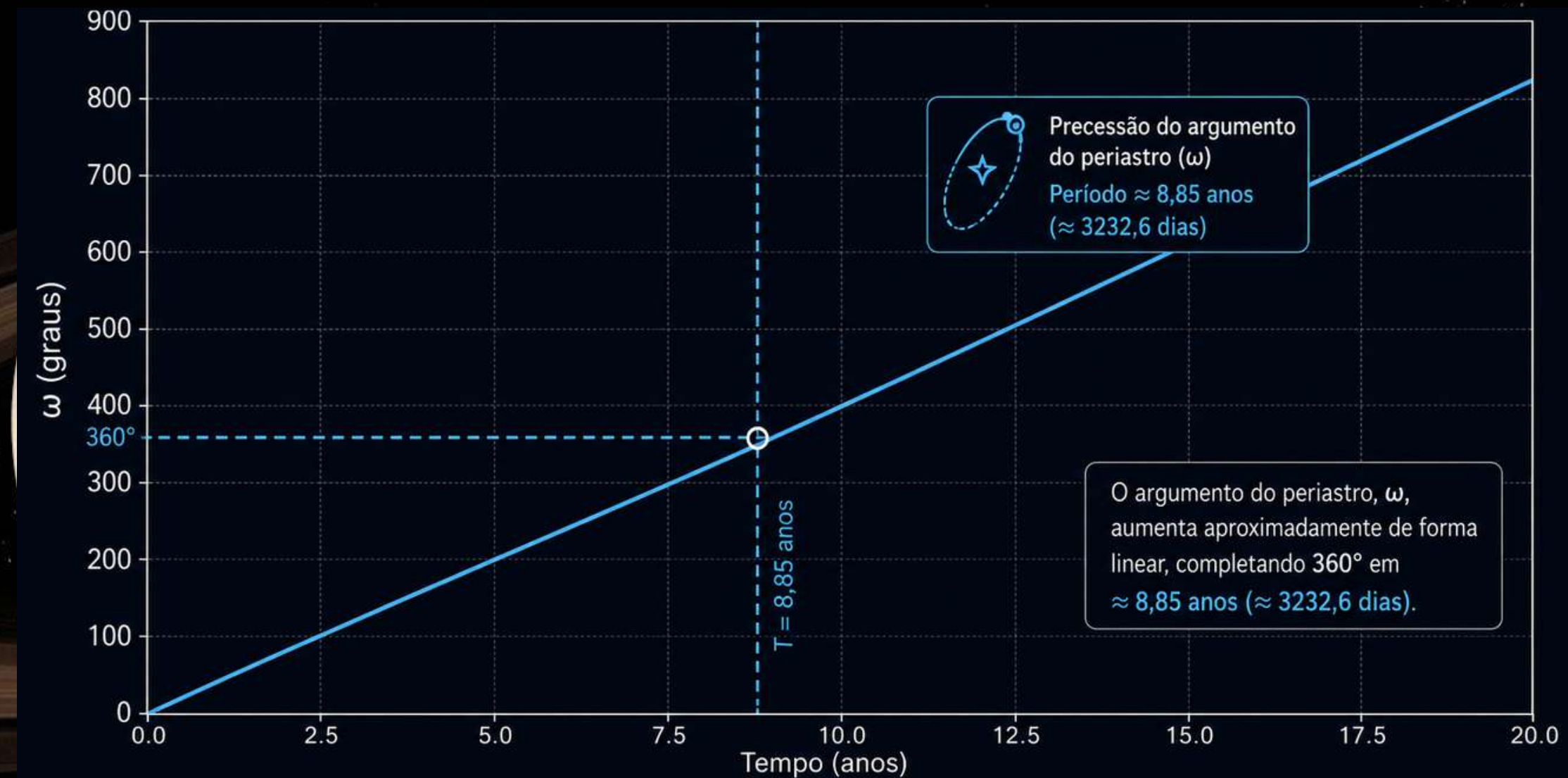
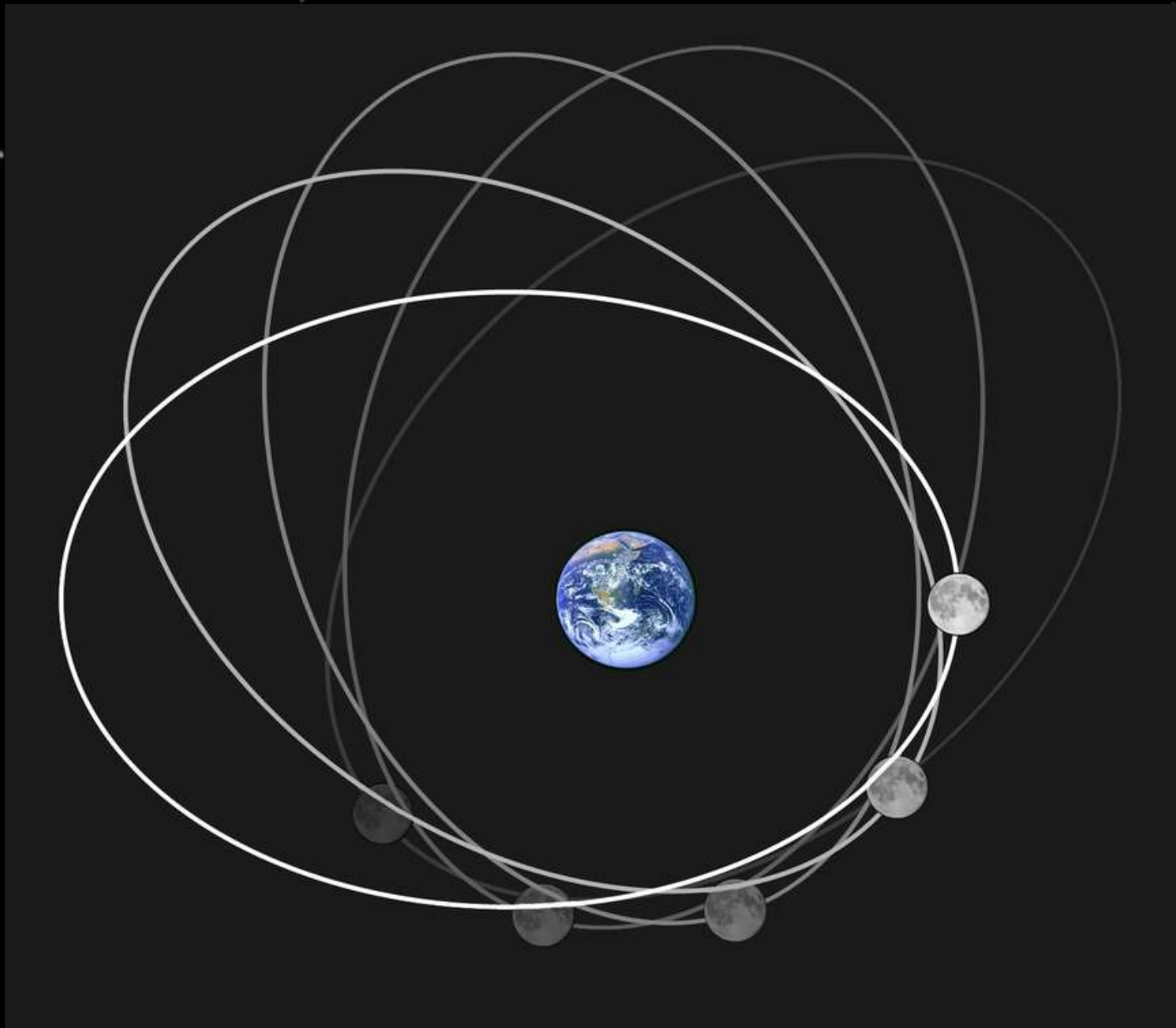
$$U(r, \phi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{R}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin \phi) (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) \right]$$



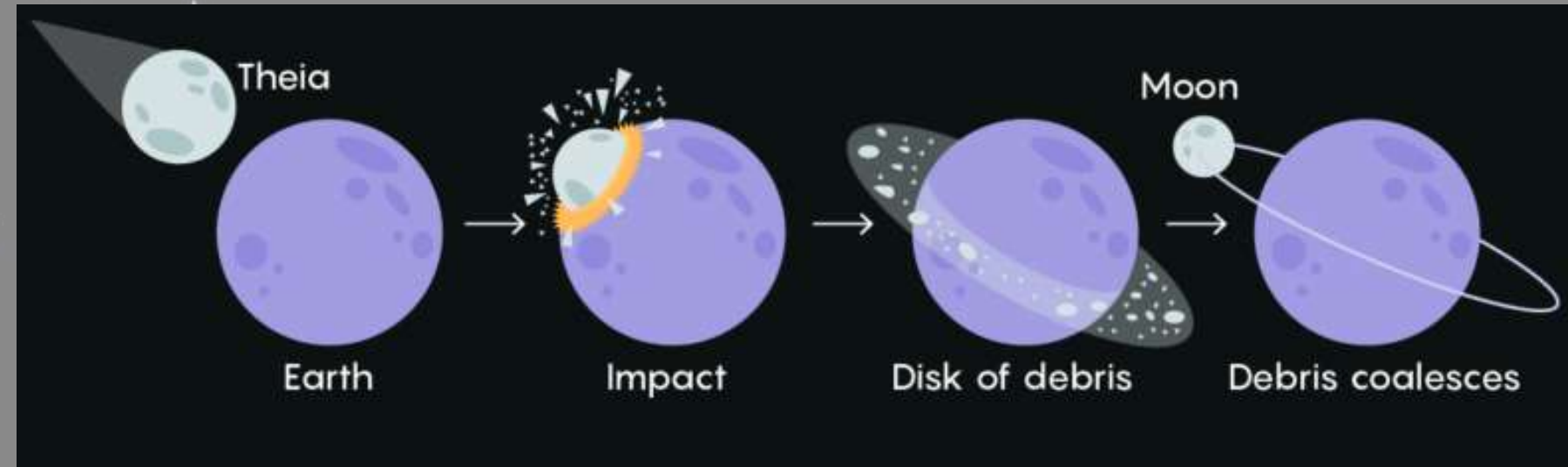
Formato de equilíbrio de um corpo rotacional

EXEMPLO ANALÍTICO: MÉTODO DE PERTURBAÇÃO

O achatamento do primário gera a precessão orbital



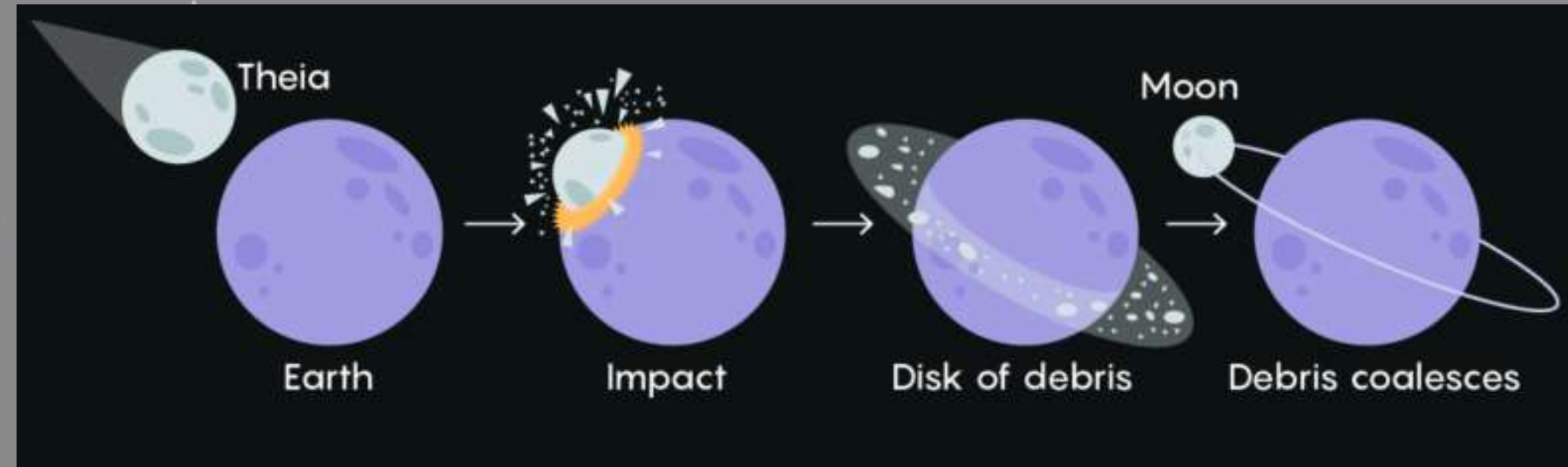
EXEMPLO ANALÍTICO: SIMULAÇÕES DE N-CORPOS



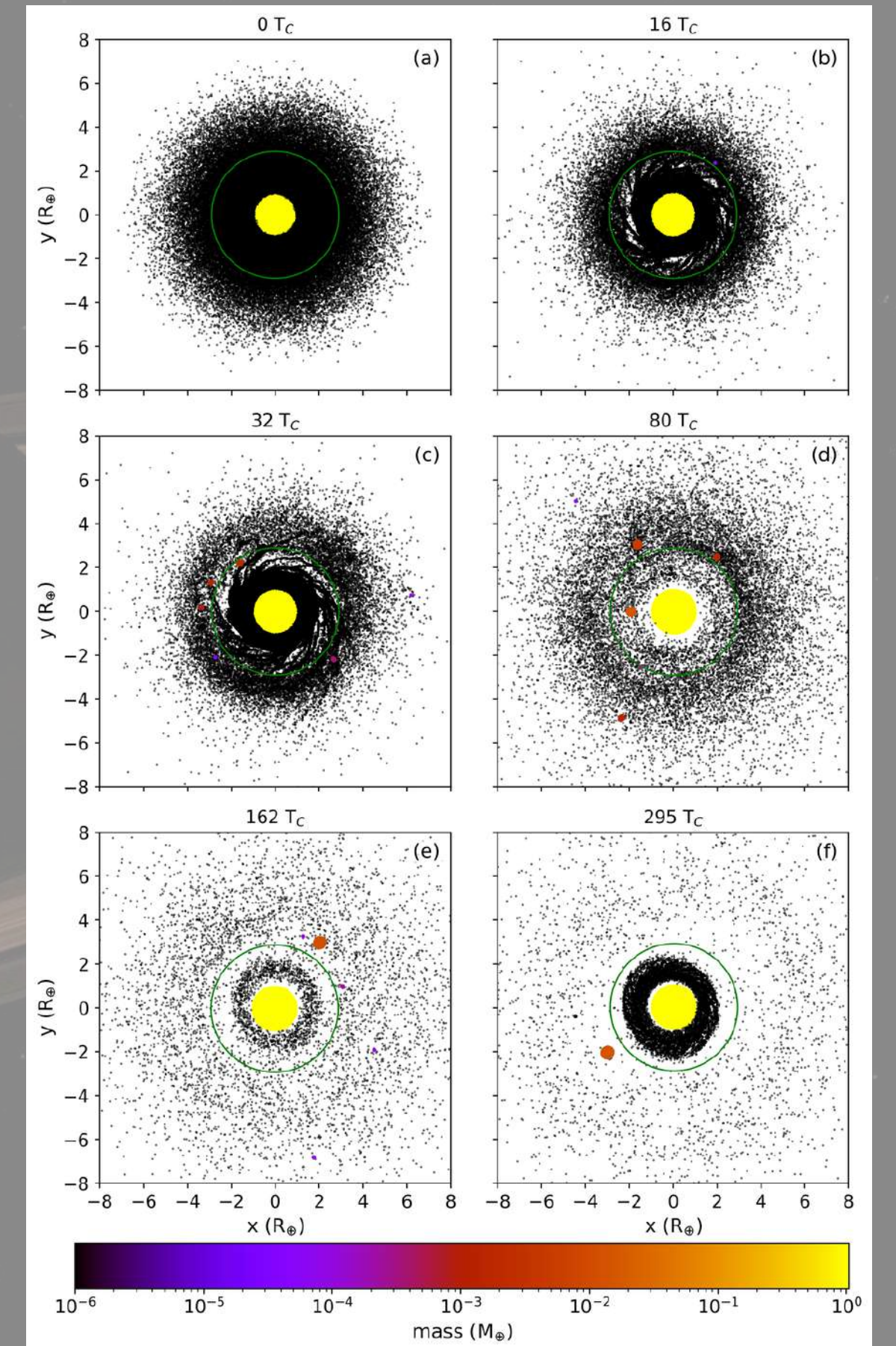
Hipótese da formação lunar por um impacto



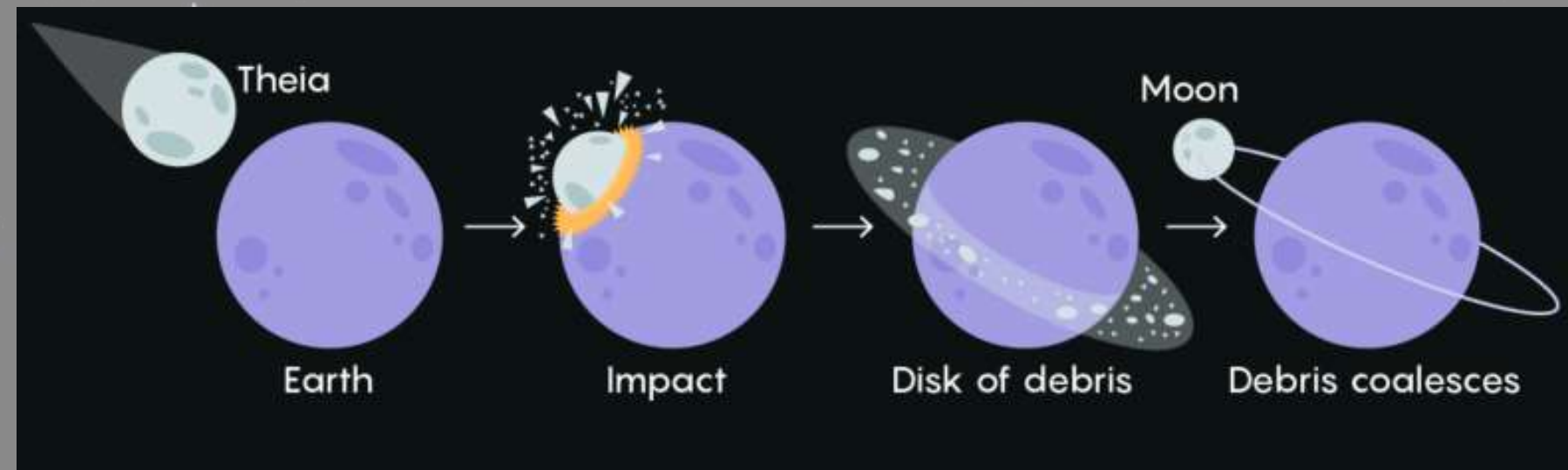
EXEMPLO ANALÍTICO: SIMULAÇÕES DE N-CORPOS



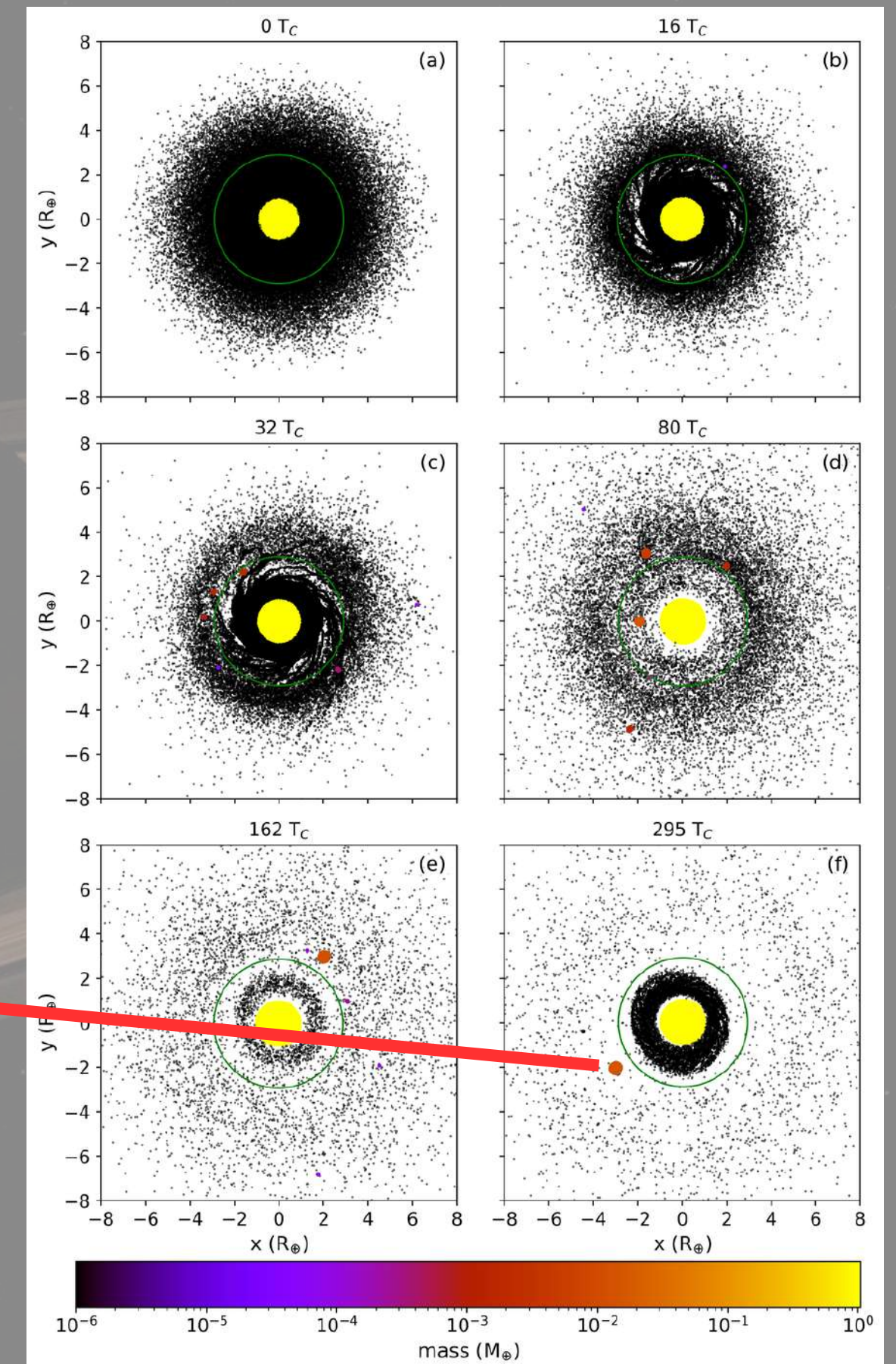
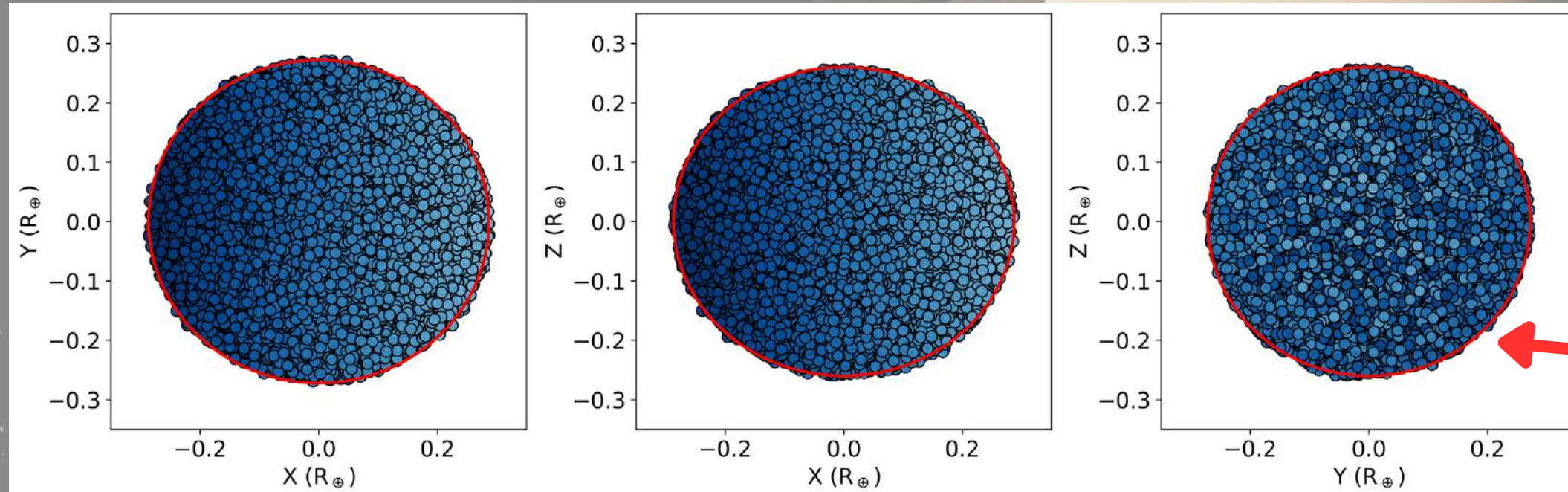
Hipótese da formação lunar por um impacto



EXEMPLO ANALÍTICO: SIMULAÇÕES DE N-CORPOS



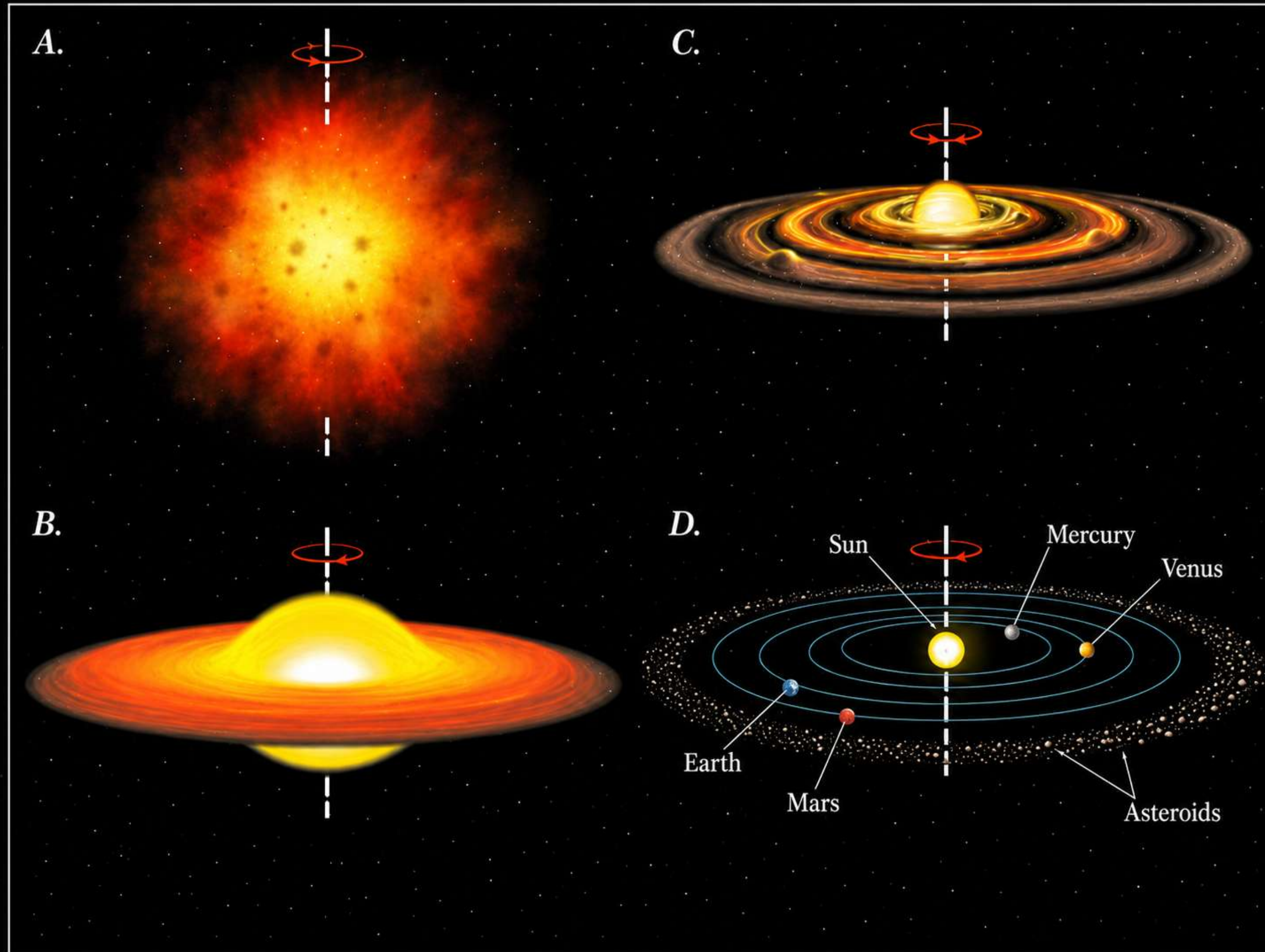
Hipótese da formação lunar por um impacto



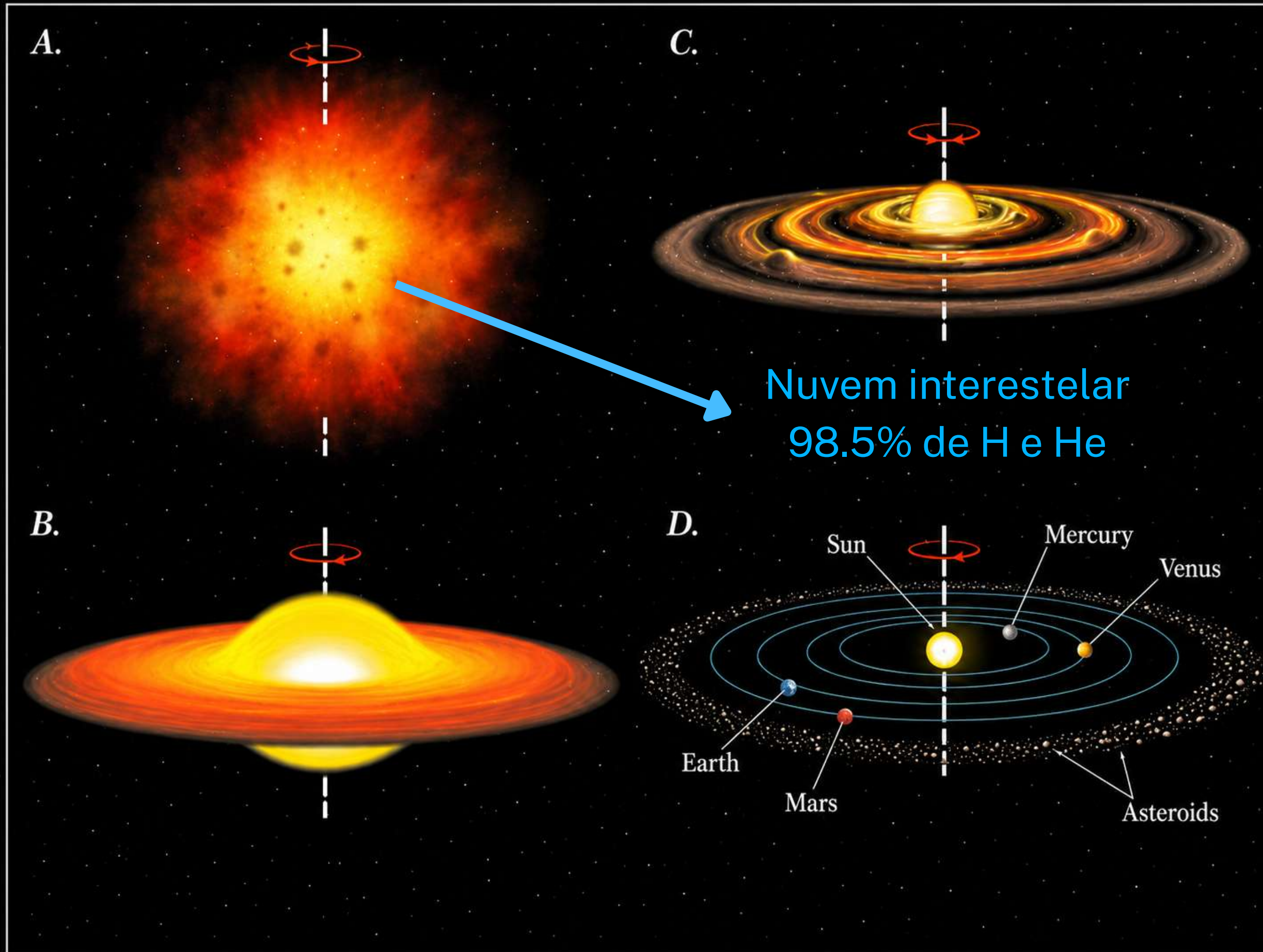
Como o Sistema Solar se formou?



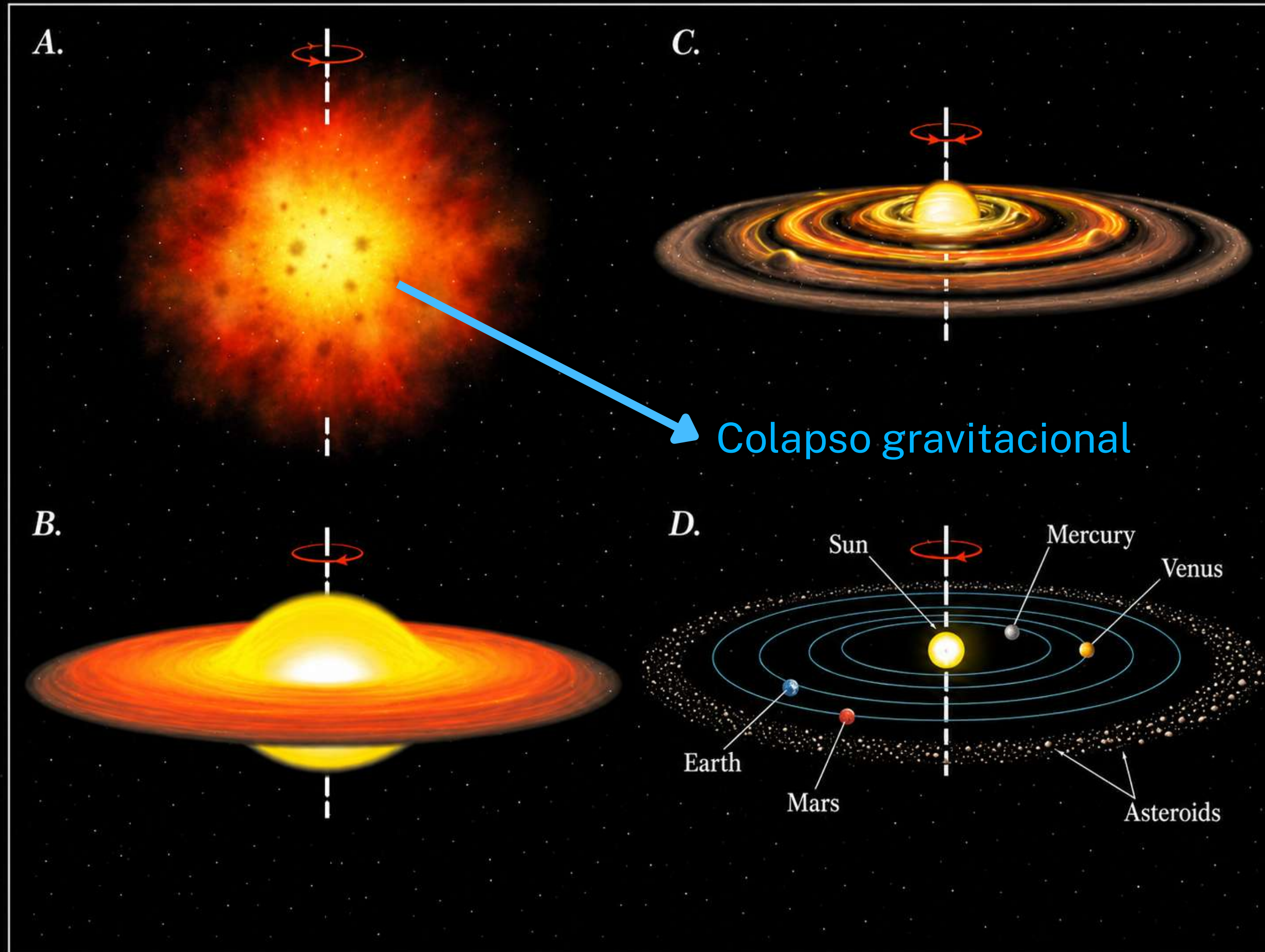
A HISTÓRIA GERAL DE UM SISTEMA SOLAR



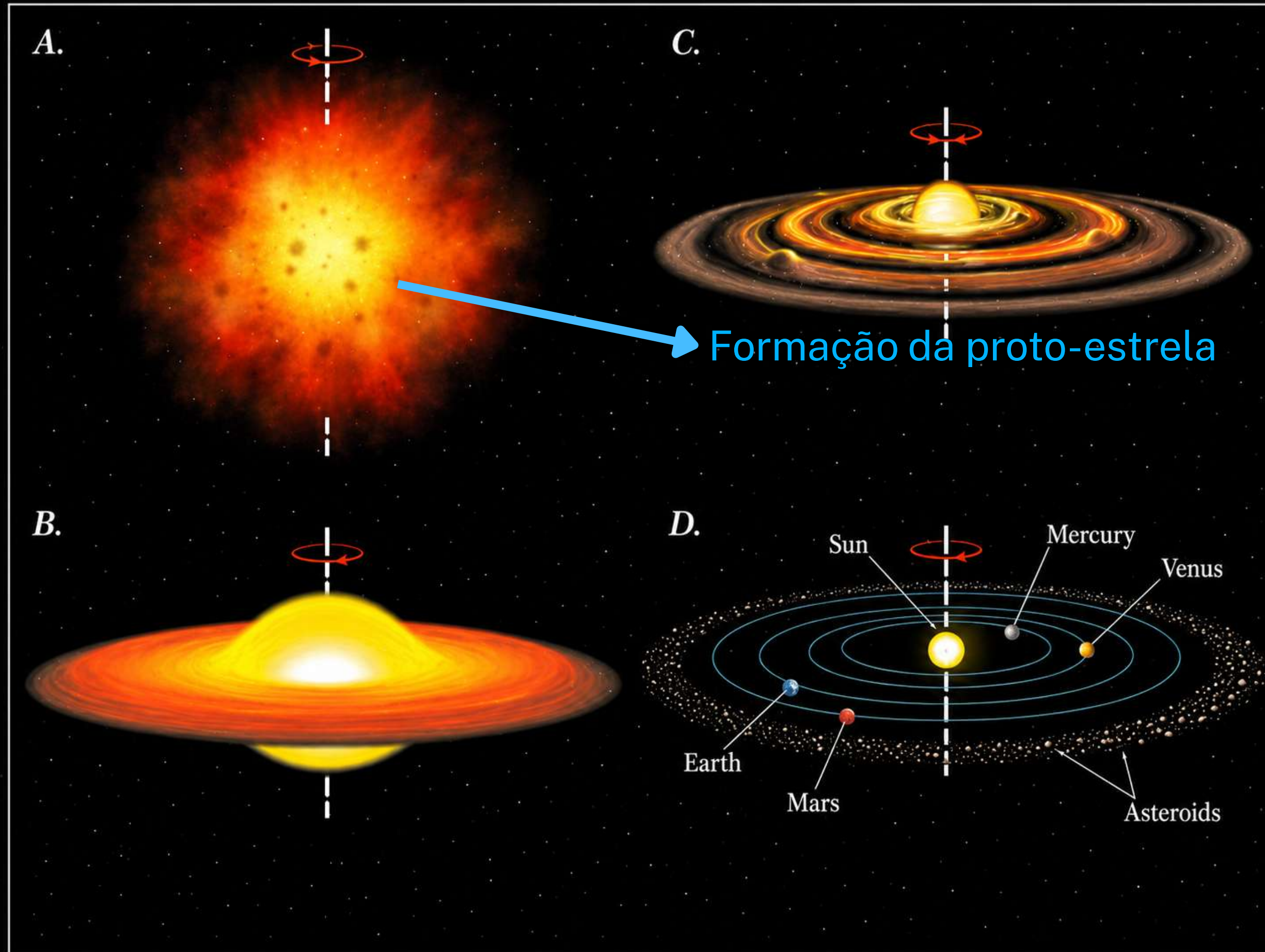
A HISTÓRIA GERAL DE UM SISTEMA SOLAR



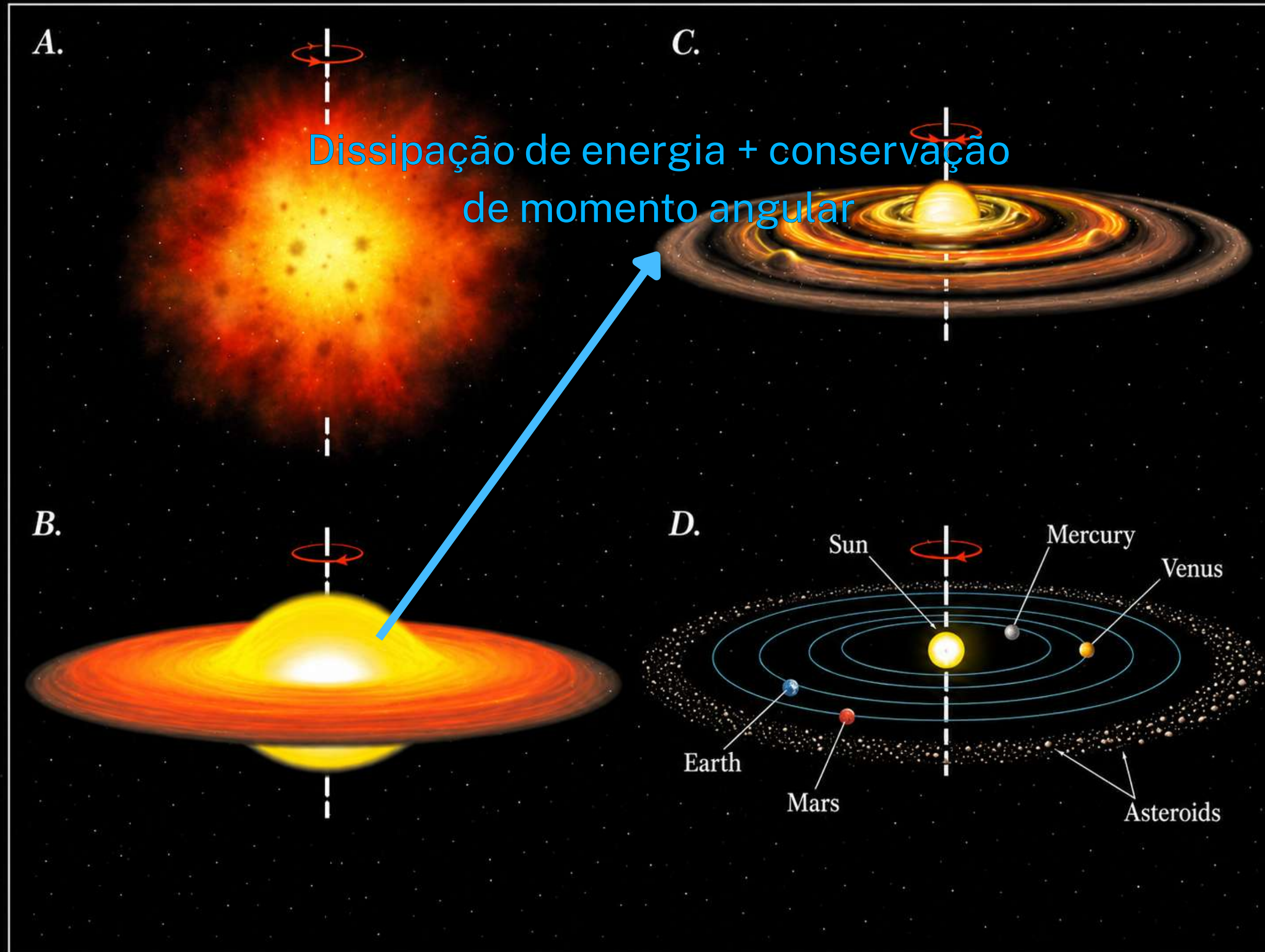
A HISTÓRIA GERAL DE UM SISTEMA SOLAR



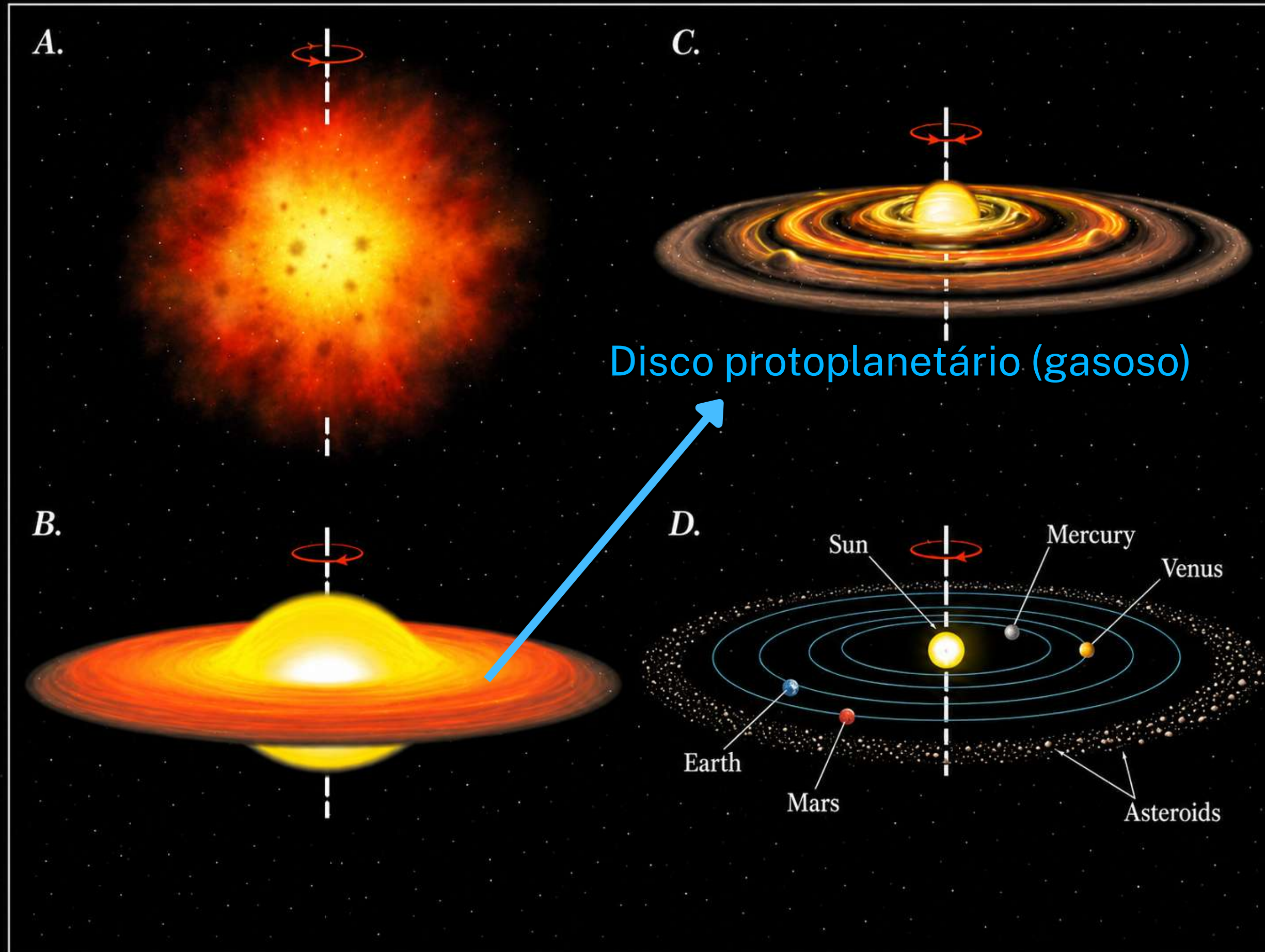
A HISTÓRIA GERAL DE UM SISTEMA SOLAR



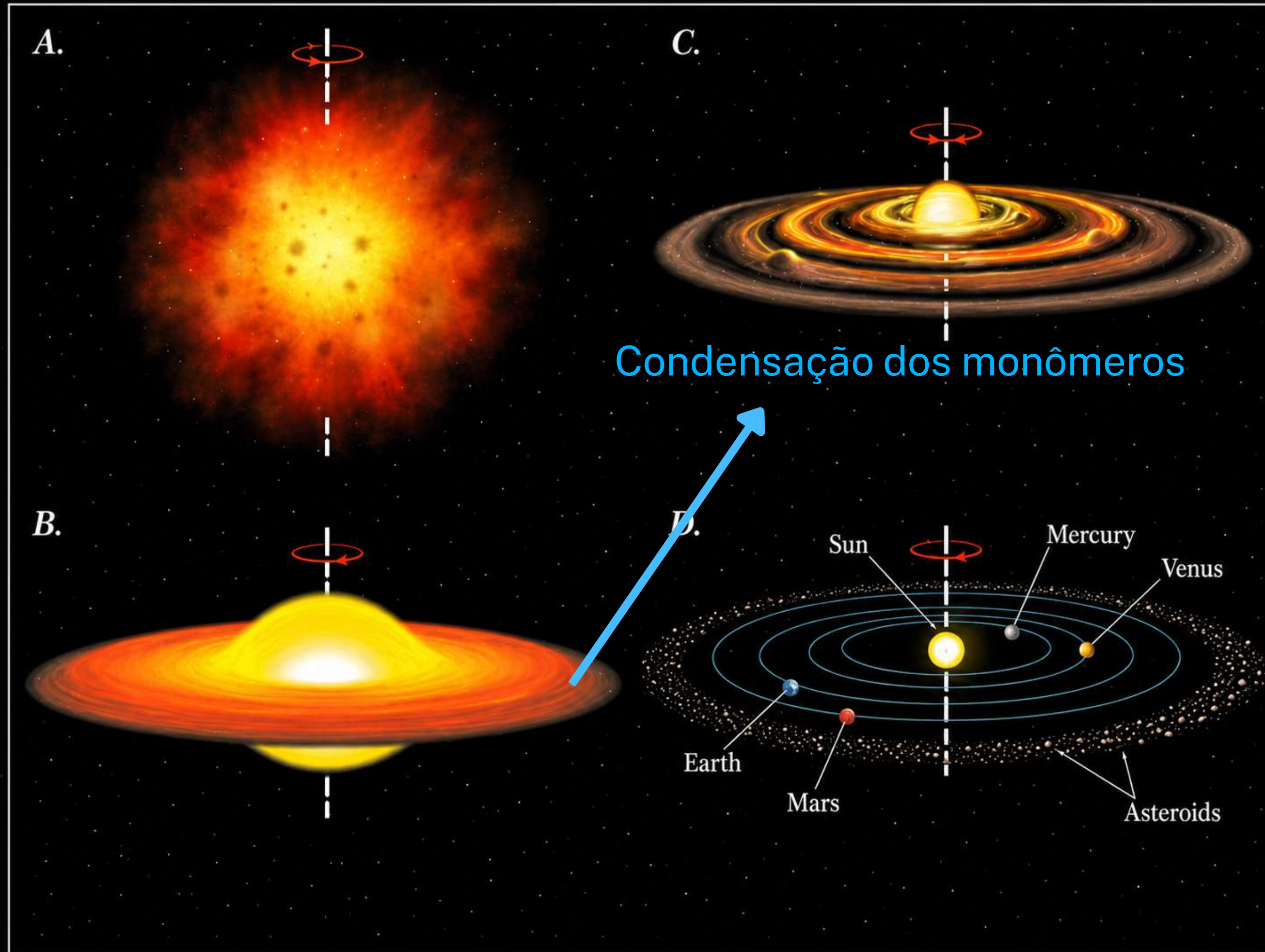
A HISTÓRIA GERAL DE UM SISTEMA SOLAR



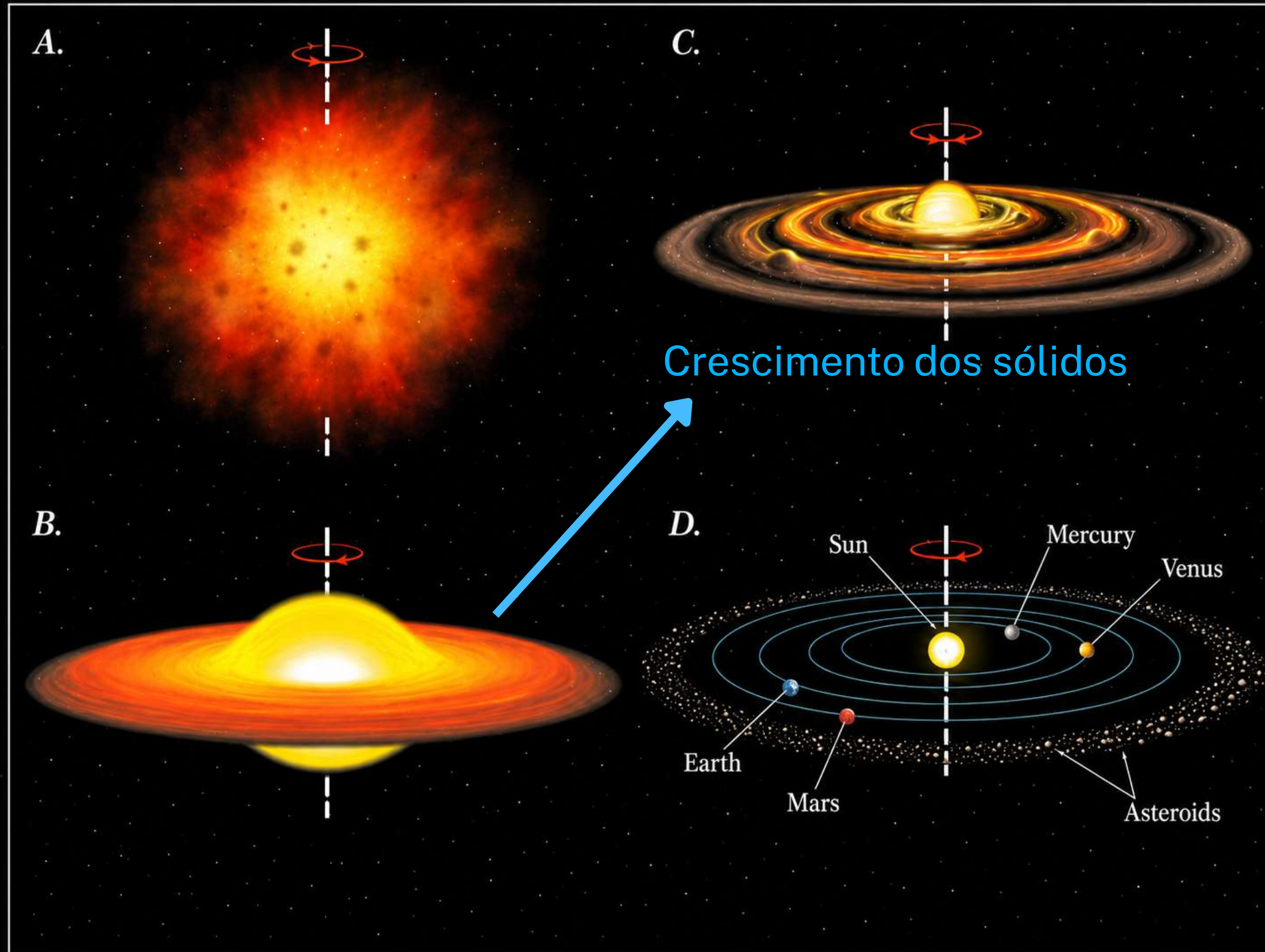
A HISTÓRIA GERAL DE UM SISTEMA SOLAR



A HISTÓRIA GERAL DE UM SISTEMA SOLAR

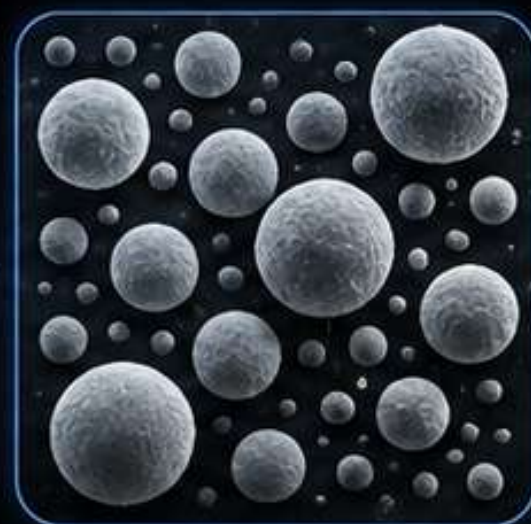


A HISTÓRIA GERAL DE UM SISTEMA SOLAR





Disco protoplanetário



Monômeros (μm)

aderência por
Van der Waals



Agregados (μm)

compactação



Seixos (mm–cm)

instabilidade
de streaming

colisões gerando
ricocheteio, fragmentação
e erosão



acrecção de seixos

Planetesimais (m–km)



Embriões (km)

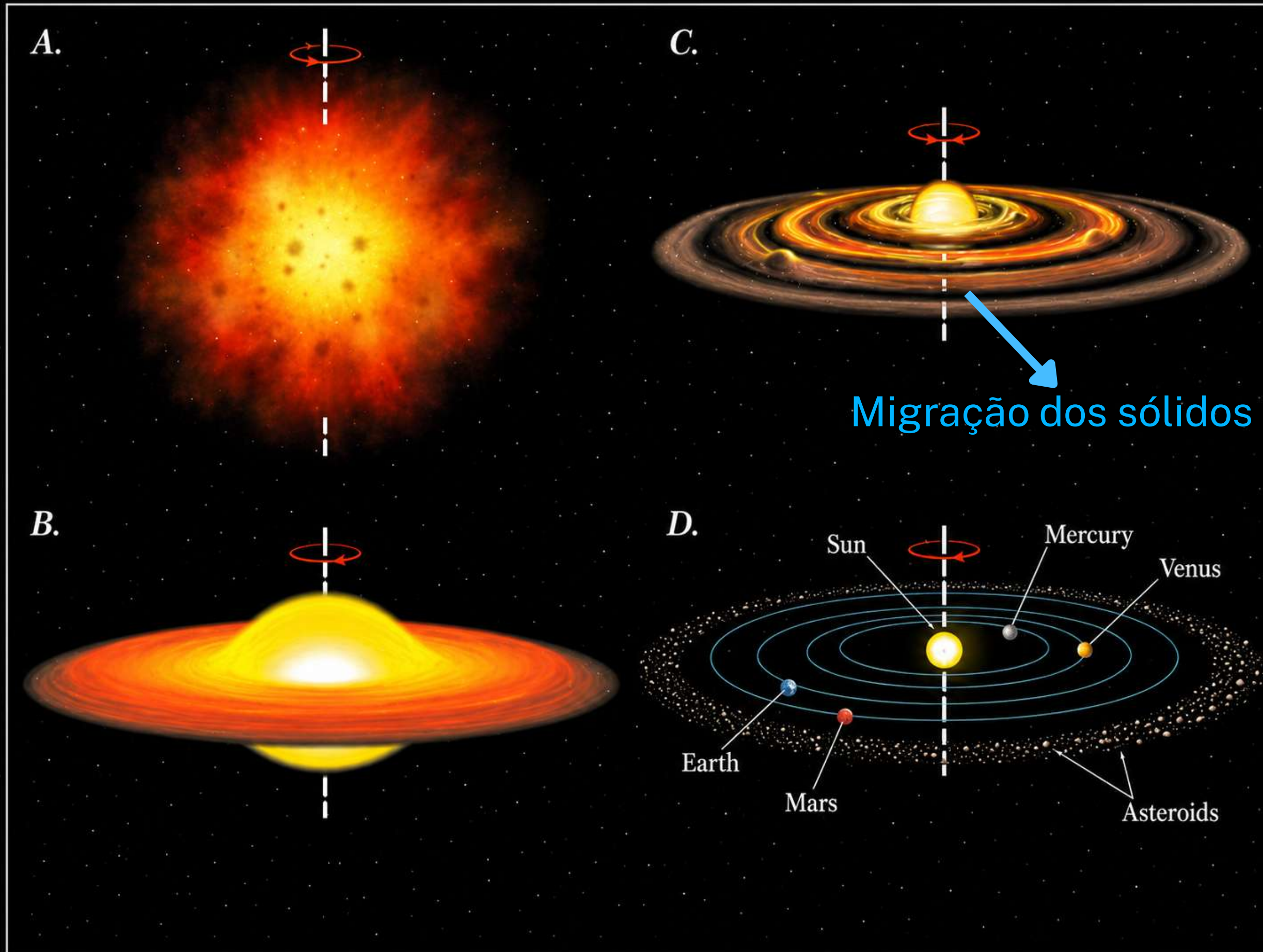


Planetas

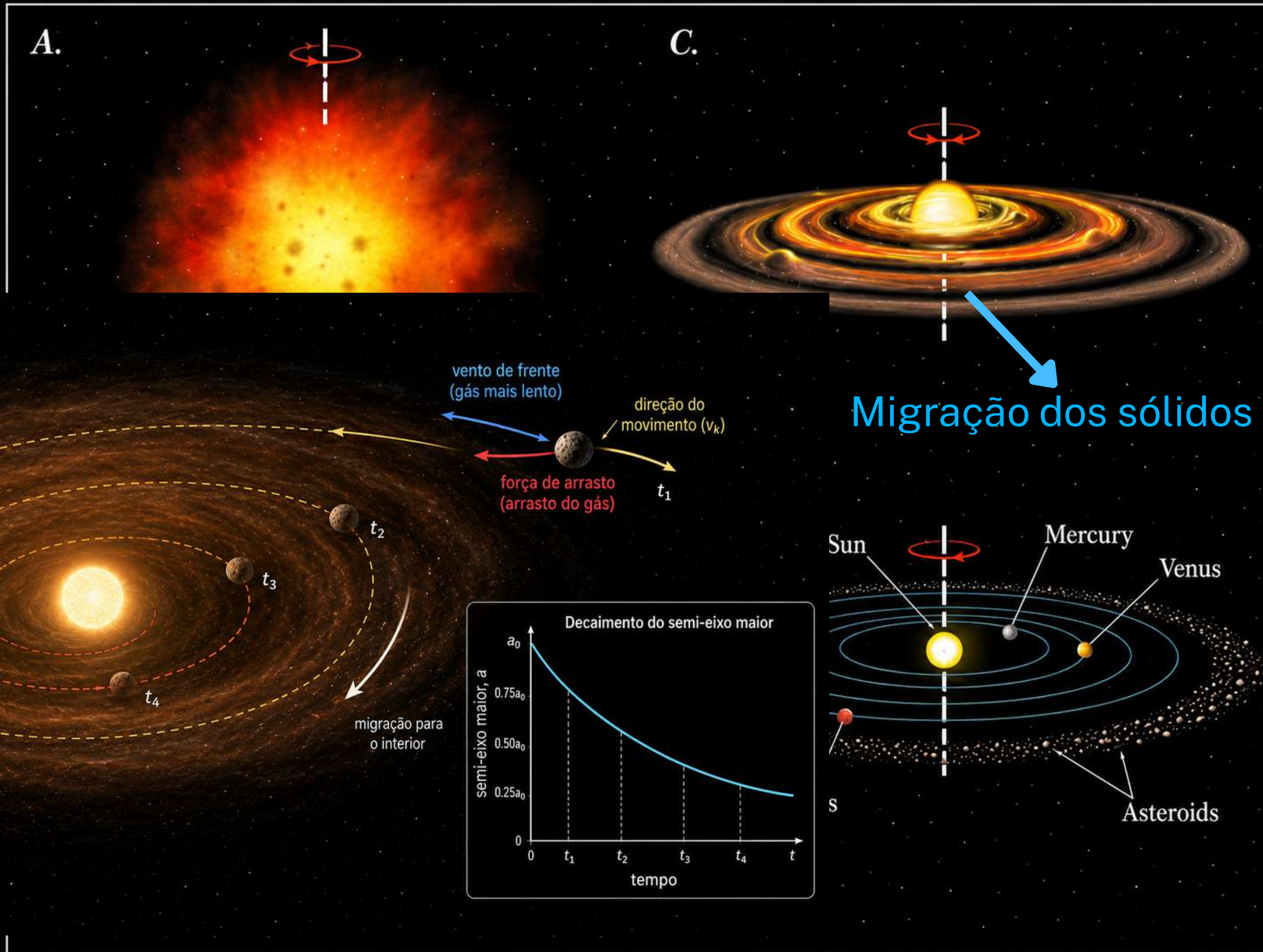
crescimentos
acelerado /
oligárquico /
ordenado



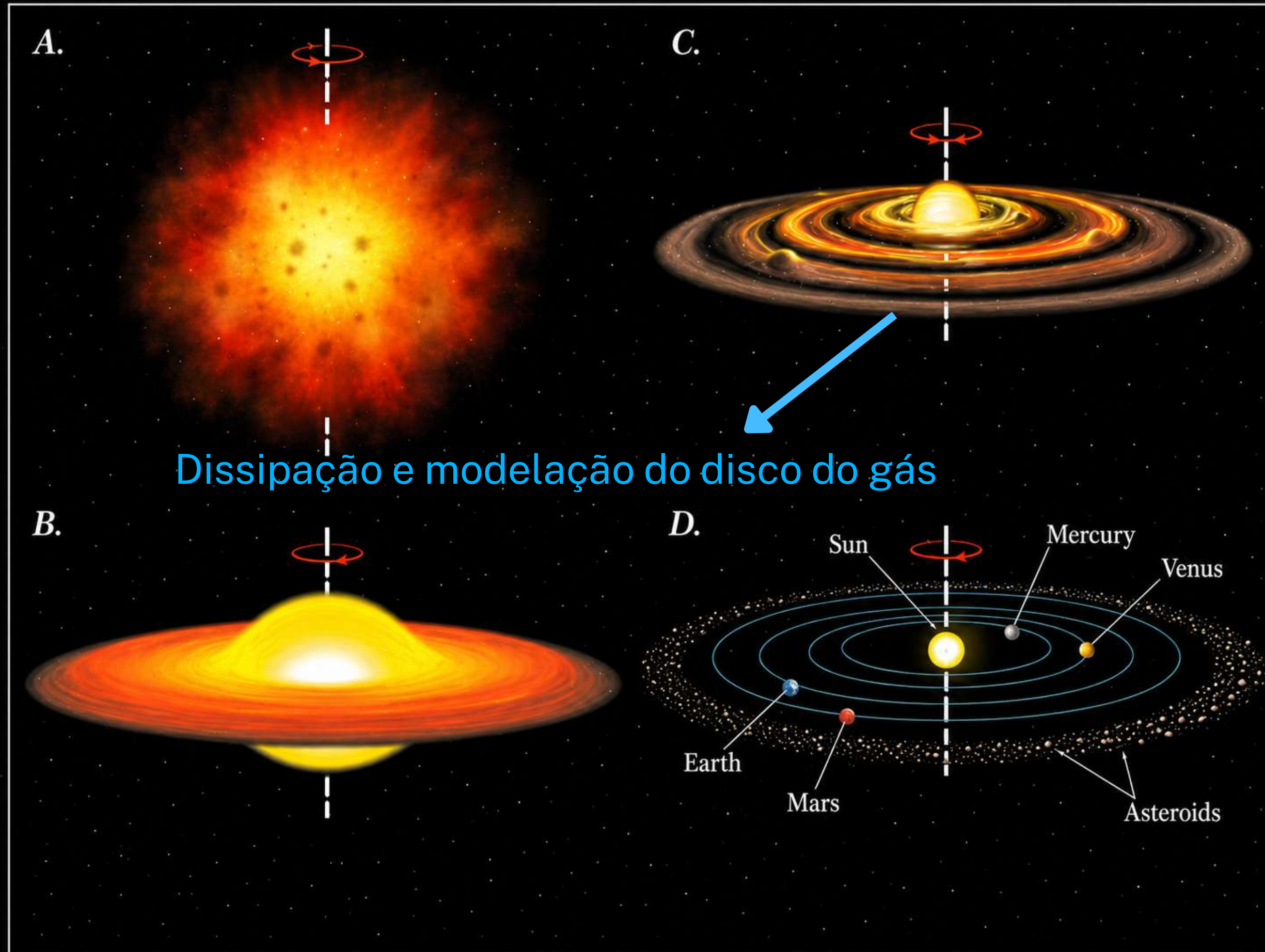
A HISTÓRIA GERAL DE UM SISTEMA SOLAR



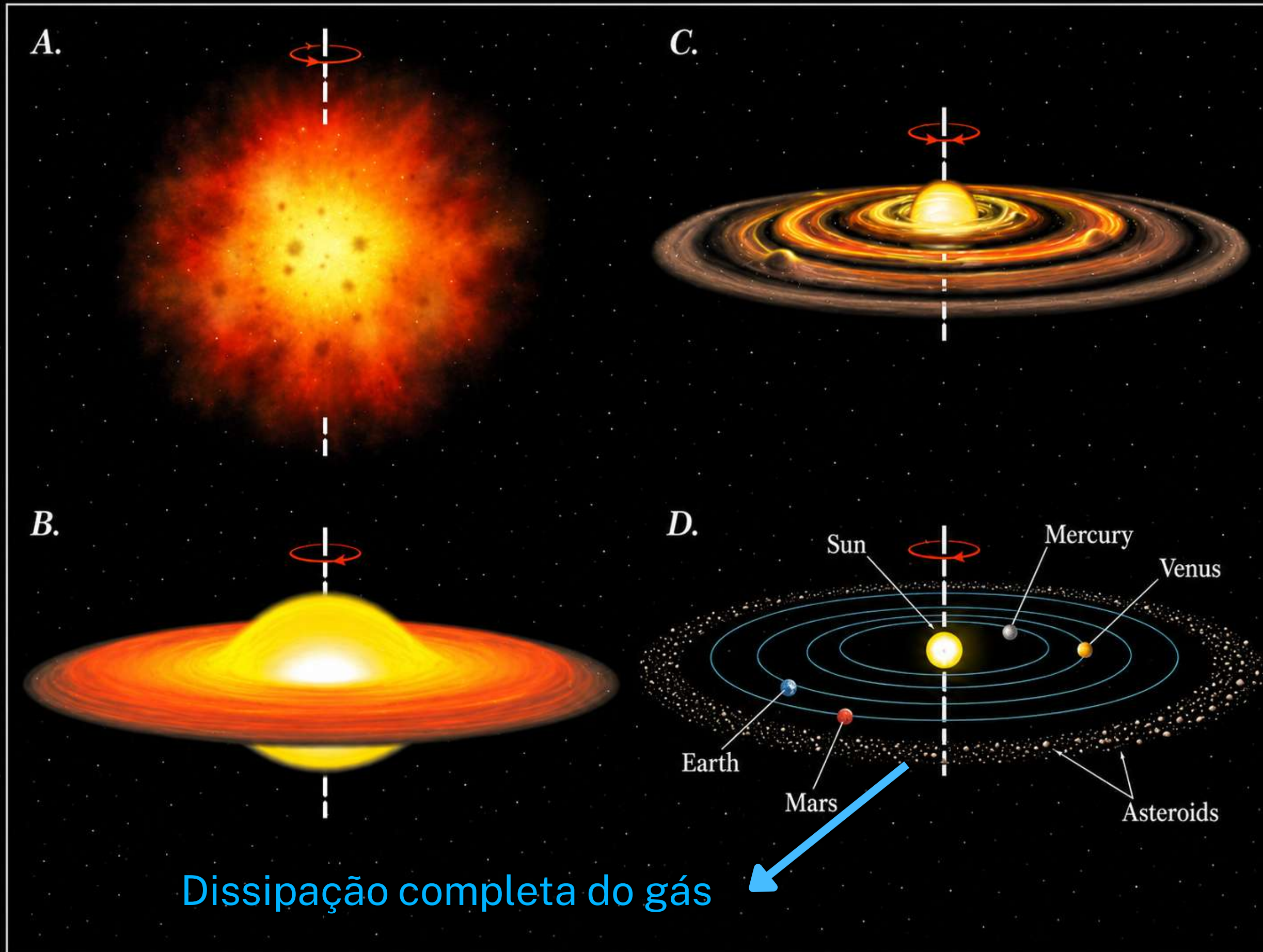
A HISTÓRIA GERAL DE UM SISTEMA SOLAR



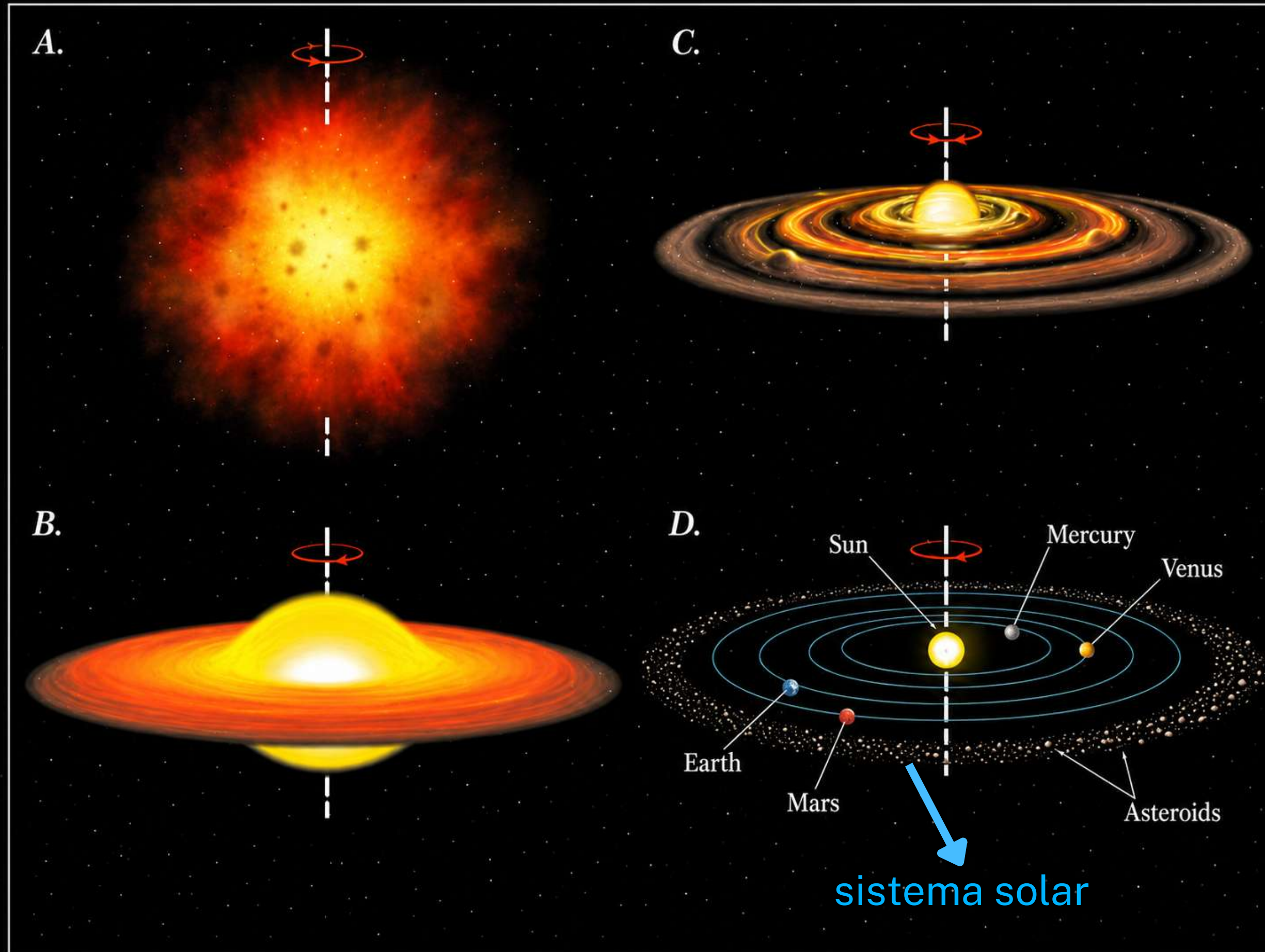
A HISTÓRIA GERAL DE UM SISTEMA SOLAR



A HISTÓRIA GERAL DE UM SISTEMA SOLAR



A HISTÓRIA GERAL DE UM SISTEMA SOLAR



**Essa é a história geral para um
sistema solar ...**

**... porém o nosso Sistema Solar
tem particularidades**

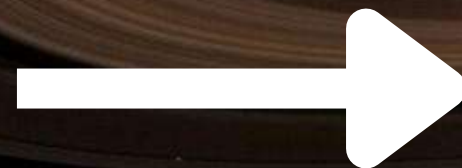
ALGUMAS PARTICULARIDADES

- Baixa massa de Marte
- Mistura radial dos asteroides tipos S e C no Cinturão Principal



GRAND TACK

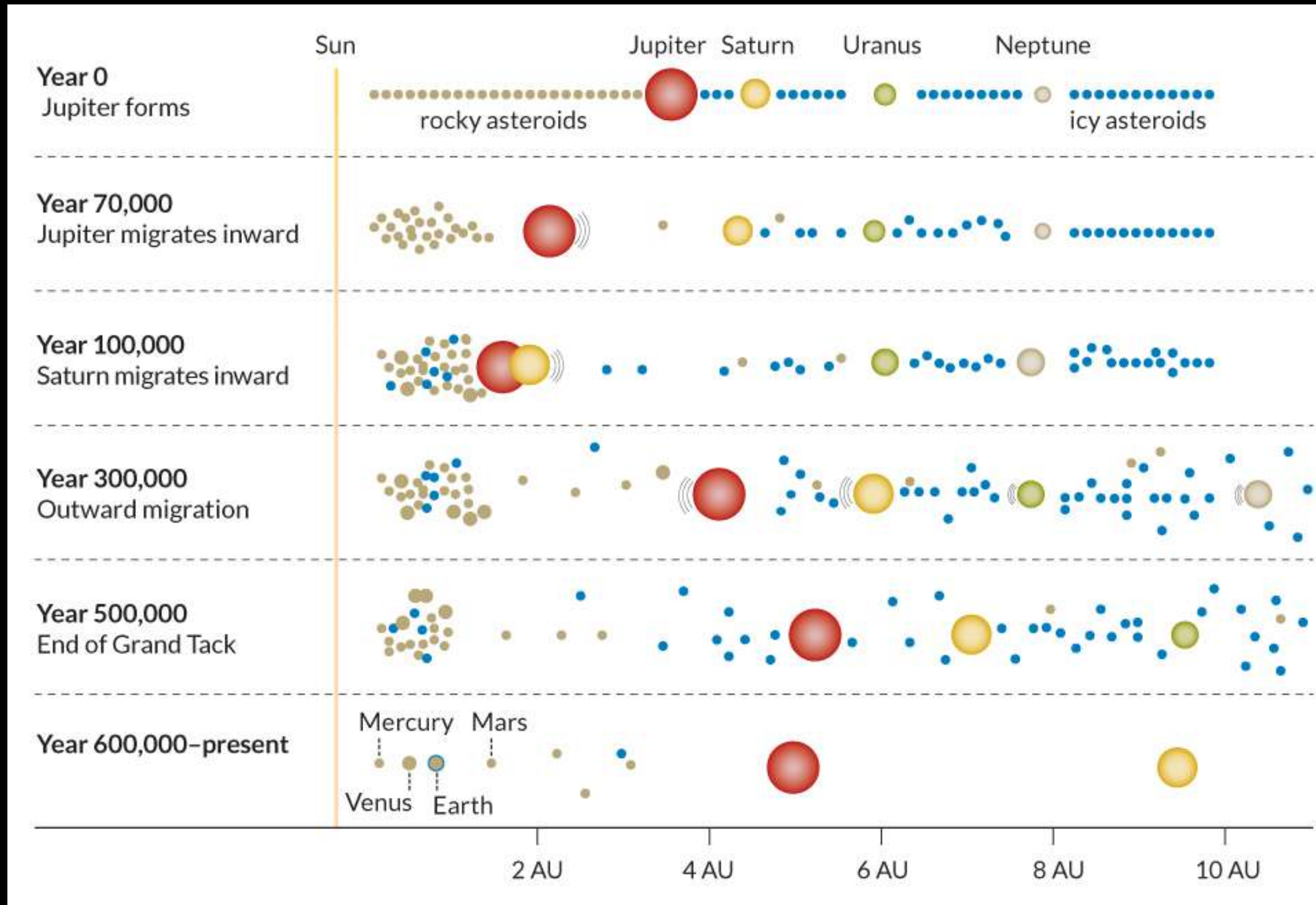
MODELO DE NICE



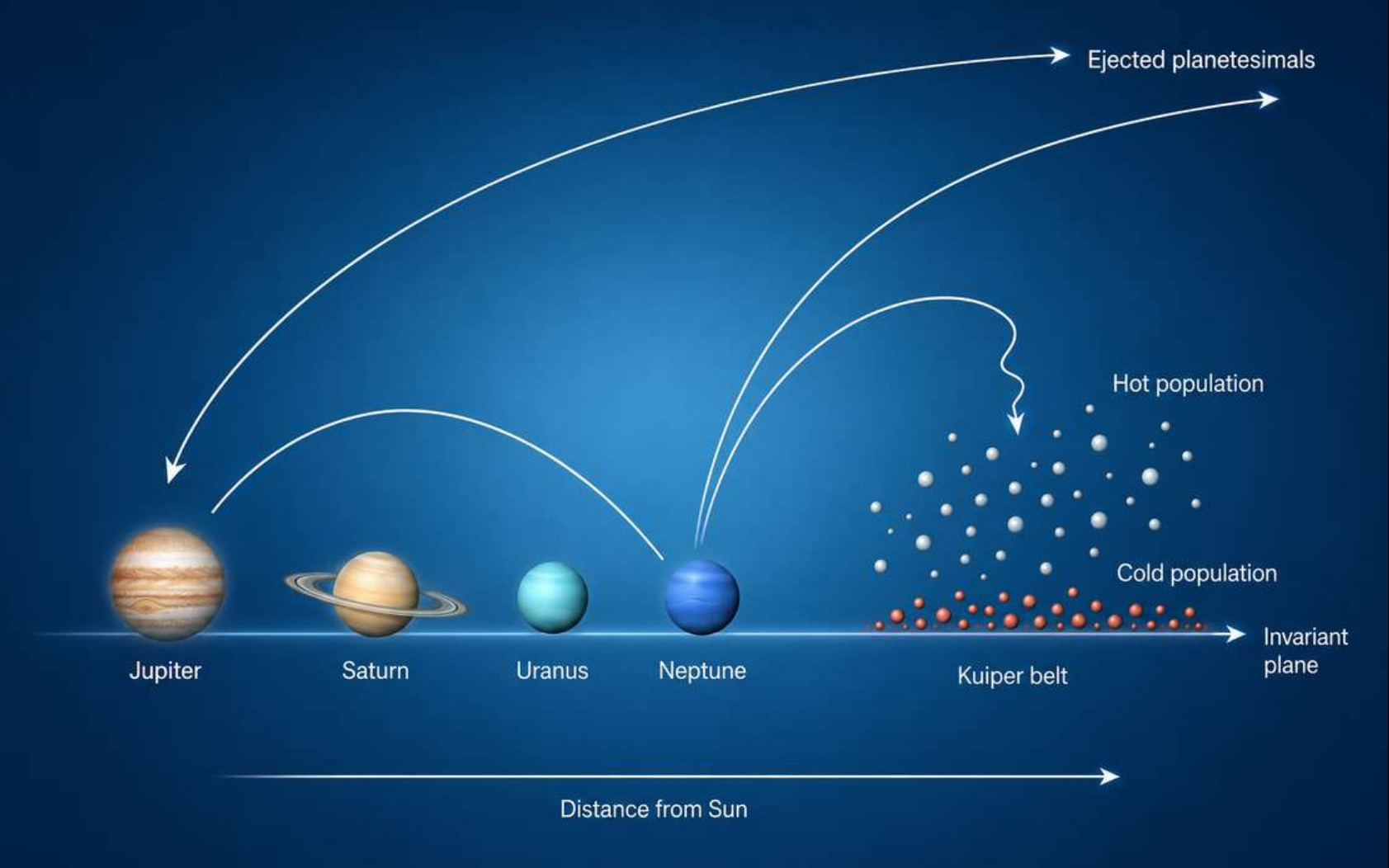
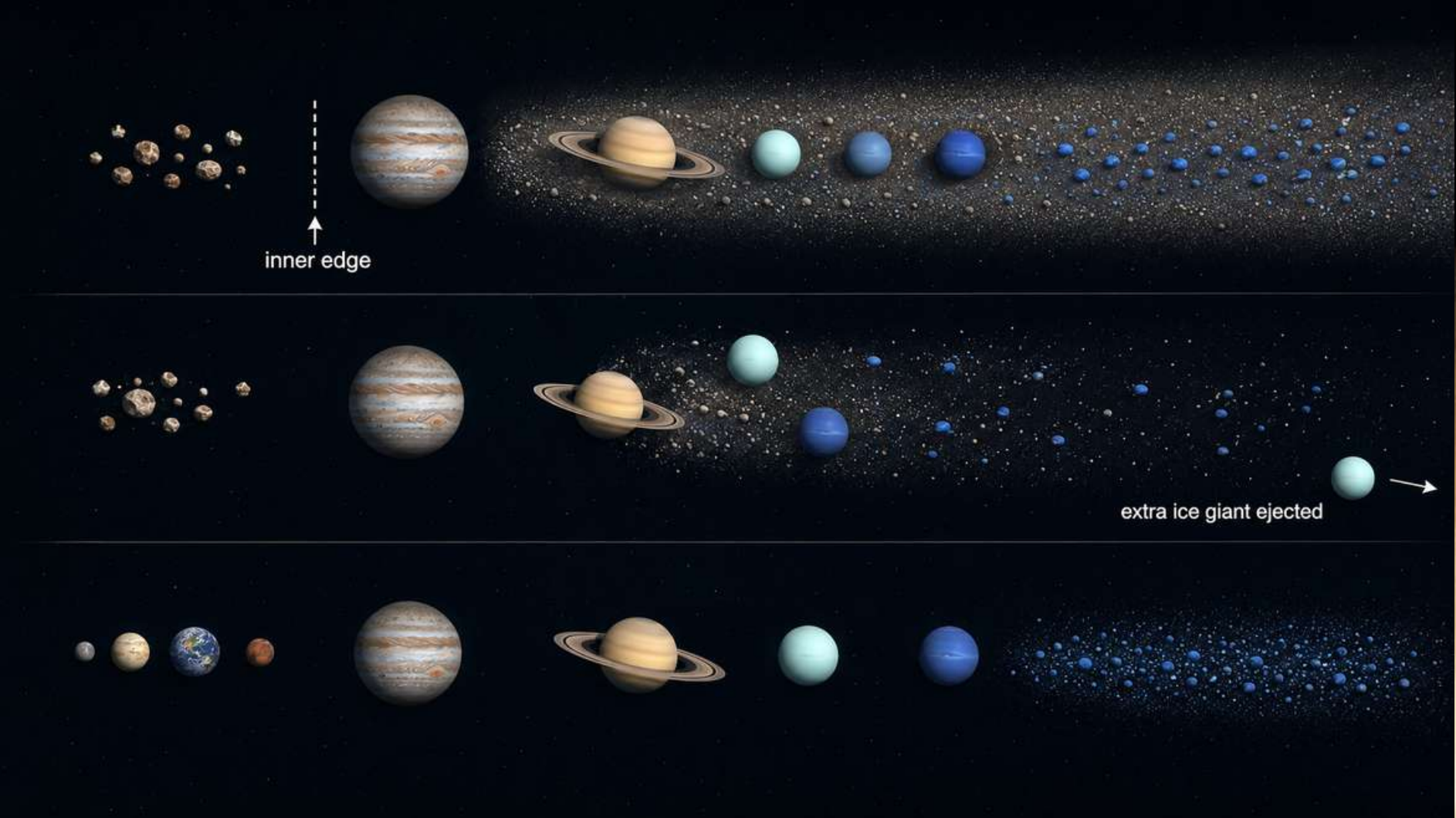
- Arquitetura orbital atual dos planetas gigantes
- Dispersão do disco primordial transnetuniano
- Captura dos troianos de Júpiter
- Bombardeio intenso tardio da Lua



O MODELO DO GRAND TACK



O MODELO DE NICE





PERGUNTAS? DÚVIDAS?