

CIAA 2021 ON-LINE

XXI Curso de Introdução à Astronomia e Astrofísica

09 a 20 de agosto de 2021

- Deixe seu microfone e câmera desligados
- Para perguntas ao final da apresentação, use o chat ou “levante a mão” em “reações”

Créditos da imagem: NASA/JPL-Caltech/UCLA (USA)

O Sistema Solar

Cláudia Vilega Rodrigues

XXI Curso de Introdução à Astronomia e Astrofísica Online

Divisão de Astrofísica

INPE

Agosto/2021

Roteiro

- Pequena introdução histórica mesclada com um pouco de dinâmica do Sistema Solar
- Descrição do Sistema Solar
- Outros sistemas planetários

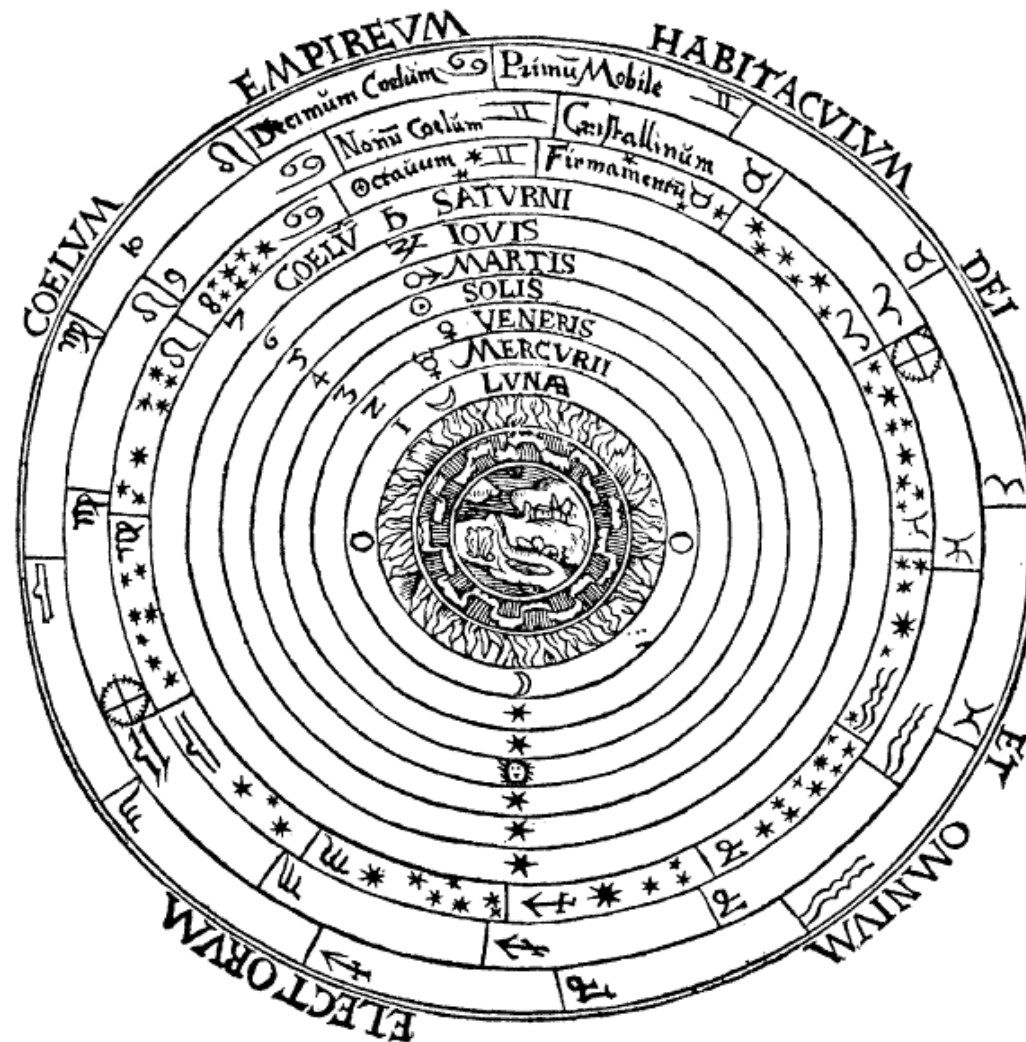
Estudar o Sistema Solar... para quê?

- Entender o sistema solar significa responder questões relativas a:
 - ✓ ciclos de tempo
 - ✓ fonte de energia na Terra
 - ✓ compreensão do Universo em que vivemos

Um pouco de história

Modelo Geocêntrico

Schema huius præmissæ diuisionis Sphærarum .

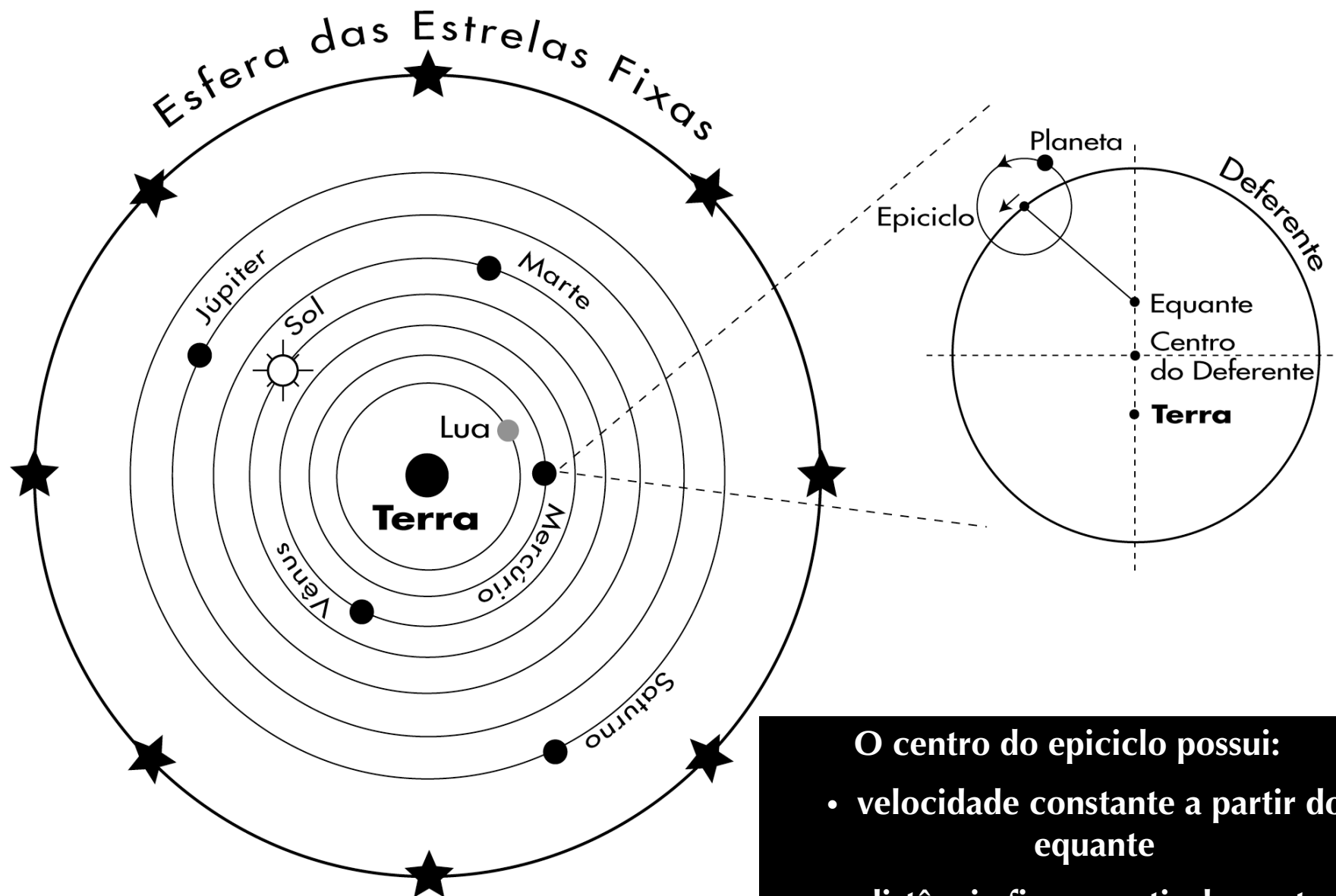


Cosmographia
de Peter Apian

Wikipedia

Modelo Geocêntrico

- ◆ Sistematizado e aprimorado por Ptolomeu - II dC no Almagesto
- ◆ Perdurou como paradigma da estrutura do Universo na cultura ocidental durante toda a Idade Média até o século XVI
- ◆ Previa com razoável precisão os movimentos dos planetas
 - ✓ usando artifícios geométricos: epiciclo, por exemplo



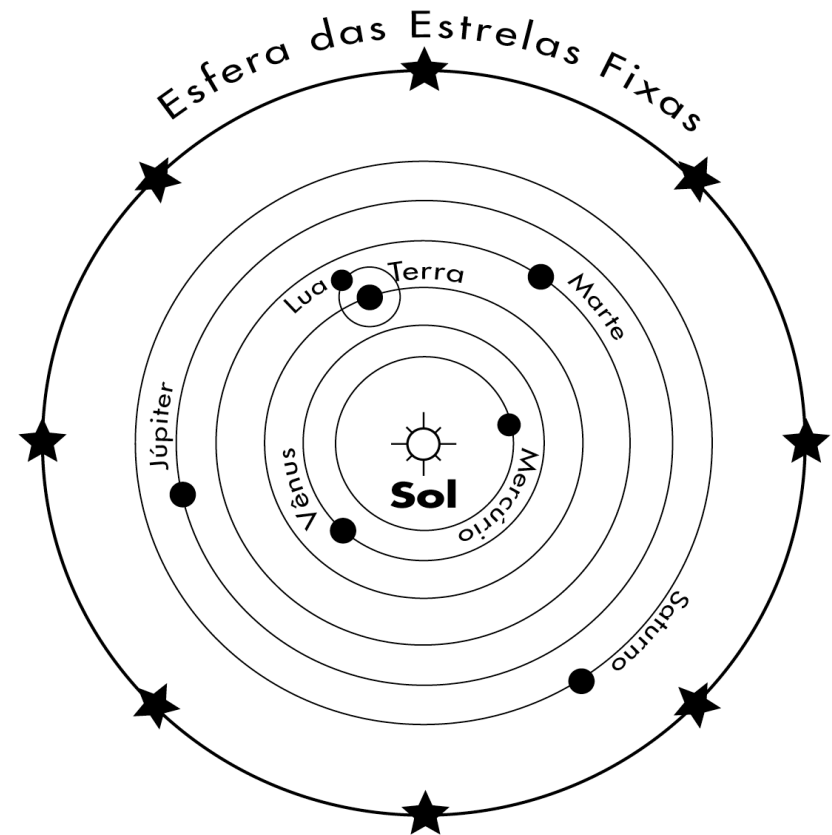
O centro do epiciclo possui:

- velocidade constante a partir do equante
- distância fixa a partir do centro do deferente

Modelo Heliocêntrico

◆ Na figura ao lado, temos uma representação simplificada e fora de escala do sistema solar como o entendemos hoje

◆ A seguir alguns destaques da história que levaram à mudança desse paradigma



As revoluções...

A nossa visão atual
do Sistema Solar
começa a ser
construída com
Copérnico:

*De Revolutionibus Orbium
Celestium (1543)*



As revoluções...

- Copérnico propõe uma mudança radical da descrição do Universo (= Sistema Solar)
 - ✓ desloca a Terra do centro do Mundo colocando o Sol em seu lugar
 - ▶ Modelo heliocêntrico
- Esse modelo permite o cálculo da escala de distâncias ao Sol e períodos de translação dos planetas com alta precisão

Cálculos de Copérnico

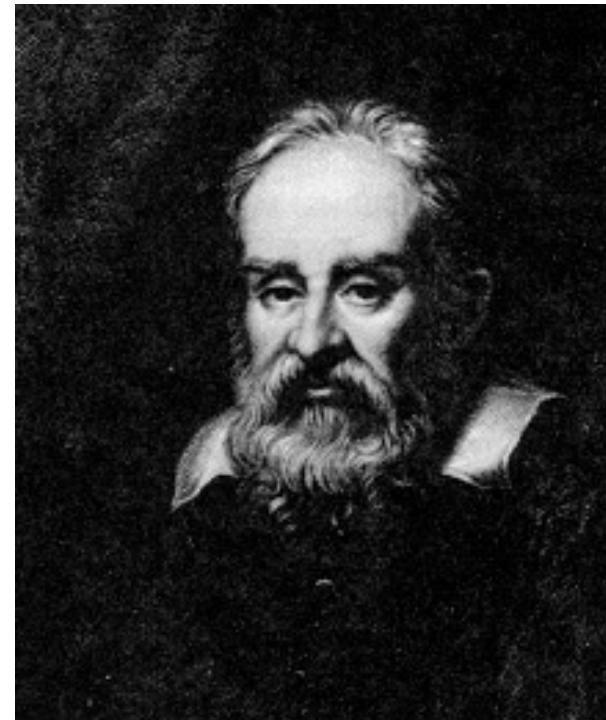
Planeta	Raio médio da órbita		Período Sideral	
	Copérnico	Atual	Copérnico	Atual
Mercúrio	0,3763	0,3871	87,97 d	87,97 d
Vênus	0,7193	0,7233	224,70 d	224,70 d
Terra	1,0	1,0	365,26 d	365,26 d
Marte	1,5198	1,5237	1,882 anos	1,881 anos
Júpiter	5,2192	5,2028	11,87 anos	11,862 anos
Saturno	9,1743	9,5388	29,44 anos	29,457 anos

Detalhes do modelo de Copérnico

- Ele prevê os movimentos dos planetas tão bem quanto o Ptolomaico
- Todos os movimentos são circulares
- Possui epiciclos
- Centro do sistema é próximo, mas não exatamente, no Sol

Nasce a astronomia observacional moderna

- Galileu Galilei em 1609 foi o primeiro a observar o céu com um telescópio:
 - ✓ *Sidereus Nuncius* (1610)



Nasce a ciência moderna

Abordagem científica de Galileu

Teoria

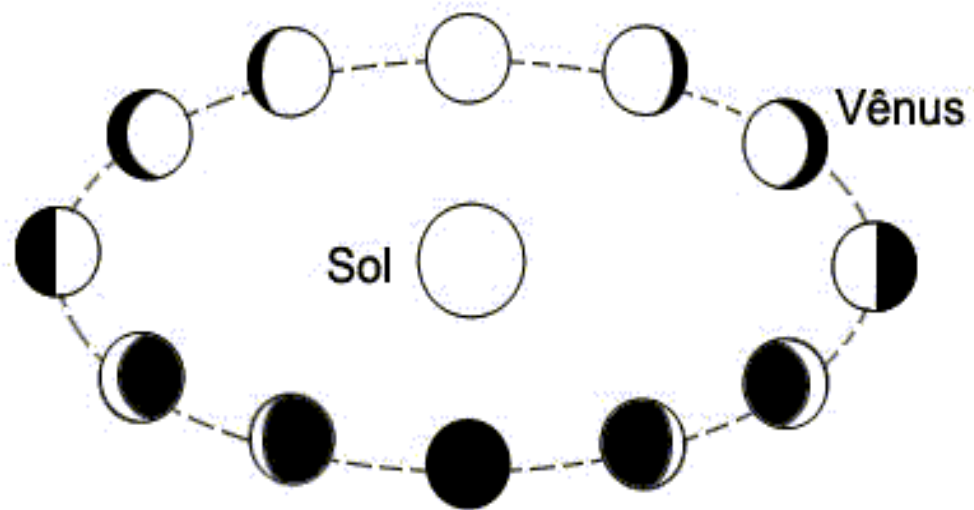
X

Experimento/Fato/Observação

O que Galileu viu com um telescópio?

- O Universo não é o que parece...
 - ✓ Satélites de Júpiter
 - ▶ existem corpos que não giram em torno da Terra
 - ✓ Relevo da Lua
 - ▶ a Lua não é uma esfera perfeita
 - ✓ Estrelas compondo Via Láctea
 - ▶ a nossa percepção da realidade não é perfeita
 - ✓ Manchas solares
 - ✓ Fases de Vênus
 - ▶ Vênus não pode girar em torno da Terra! Difícil sustentar modelo geocêntrico...

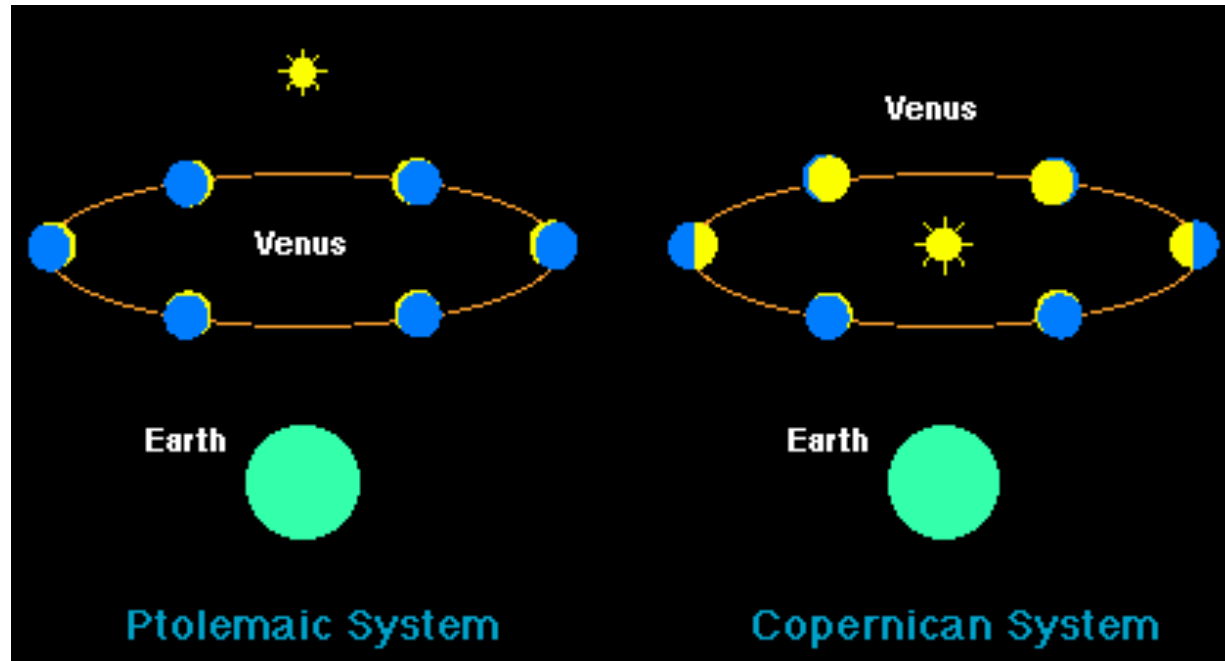
Fases de Vênus



Todas as fases de Vênus mostradas ao lado foram observadas por Galileu.

No modelo geocêntrico, nem todas essas configurações ocorreriam...

Fases de Vênus



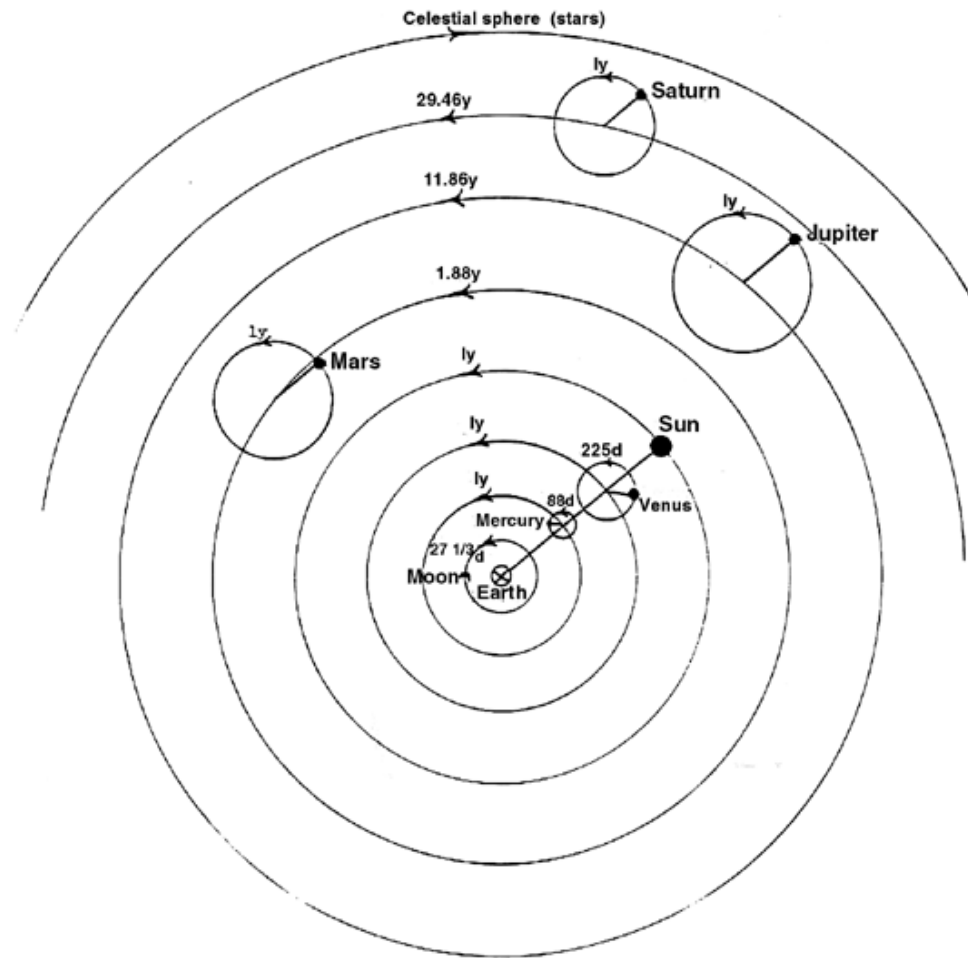
Todas as fases de Vênus mostradas ao lado foram observadas por Galileu.

No modelo geocêntrico, nem todas essas configurações ocorreriam...

Fonte:

<https://thonyc.wordpress.com/2014/06/09/the-phases-of-venus-and-heliocentricity-a-rough-guide/>

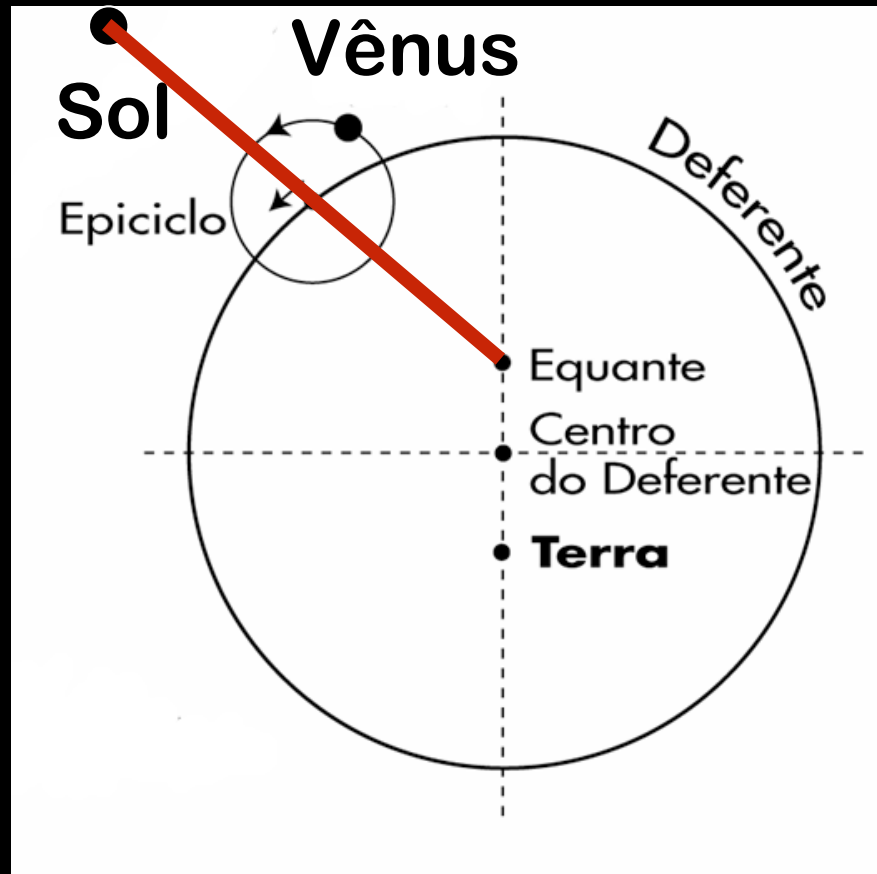
Sobre as fases de Vênus



- No modelo geocêntrico, de Ptolomeu, o centro do epiciclo da órbita de Vênus tem que estar próximo da linha que liga a Terra ao Sol e o epiciclo tem que ser pequeno o suficiente de modo a não extrapolar as órbitas “dos planetas” imediatamente antes e depois. Isso é um requisito para se explicar o movimento aparente nesse modelo.
- Notar que é possível ter modelos geocêntricos que adequadamente explicam as observações em duas situações:
 - ✓ (1) com a intersecção entre o deferente e a linha Terra-Sol entre Sol e Terra;
 - ✓ (2) ter essa intersecção depois da Terra.

Robert A. Hatch

https://users.clas.ufl.edu/ufhatch/pages/02-TeachingResources/HIS-SCI-STUDY-GUIDE/0033_simplifiedPtolemaicScheme.html



Notar que o centro do epiciclo está na mesma linha que liga Equante e Sol.

A fase cheia (de Vênus) ocorre quando o Sol está entre a Terra e Vênus.

Essa configuração não é possível no modelo geocêntrico ao lado.

Sobre as fases de Vênus

- Vídeos da Universidade de Nebraska que mostram as fases de Vênus nos modelos geocêntrico e heliocêntrico. O vídeo do modelo geocêntrico ilustra apenas o caso (1) acima.
 - ✓ <https://www.youtube.com/watch?v=TaxuuiuGo4Y>
 - ✓ <https://www.youtube.com/watch?v=fnmjpekJXNQ>
- No modelo geocêntrico não temos todas as fases.
 - ✓ No caso (1), não temos lua cheia.
 - ✓ No caso (2), não temos lua nova.
 - ✓ Assim, o modelo geocêntrico, em qualquer dos casos, não tem todas as fases de Vênus. Ao contrário, o modelo heliocêntrico prevê todas as fases, e está de acordo com as observações.

Será mesmo que a Terra gira em torno do Sol?....



- Existem ao menos dois efeitos decorrentes do movimento da Terra em torno do Sol que podem ser observados
 - ✓ paralaxe
 - ✓ aberração estelar
- A existência de **paralaxe** foi logo cogitada e buscada, ainda no século XVI. Isso antes mesmo das descobertas de Galileu. Mas, a confirmação do efeito só ocorreu em 1838, por F. Bessel, observando a estrela 61 Cygni.
- A aberração estelar foi observada e explicada por J. Bradley em 1725, da estrela Polaris.

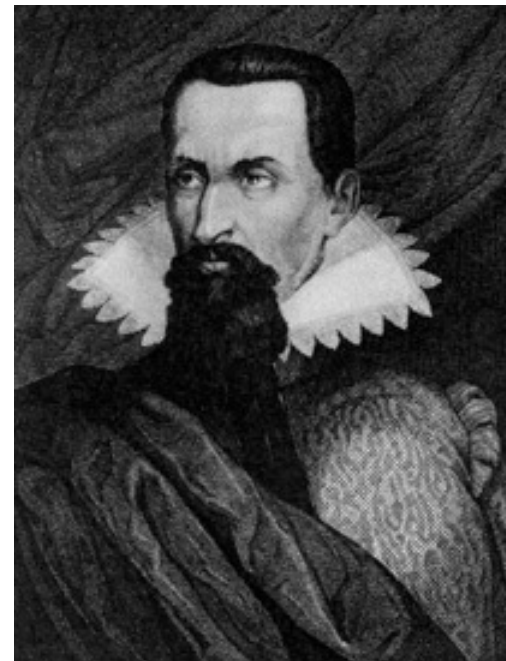
Mais mudanças...

- O modelo de Copérnico ainda podia ser melhorado em sua representação dos movimentos dos planetas...

Como os planetas se movem?

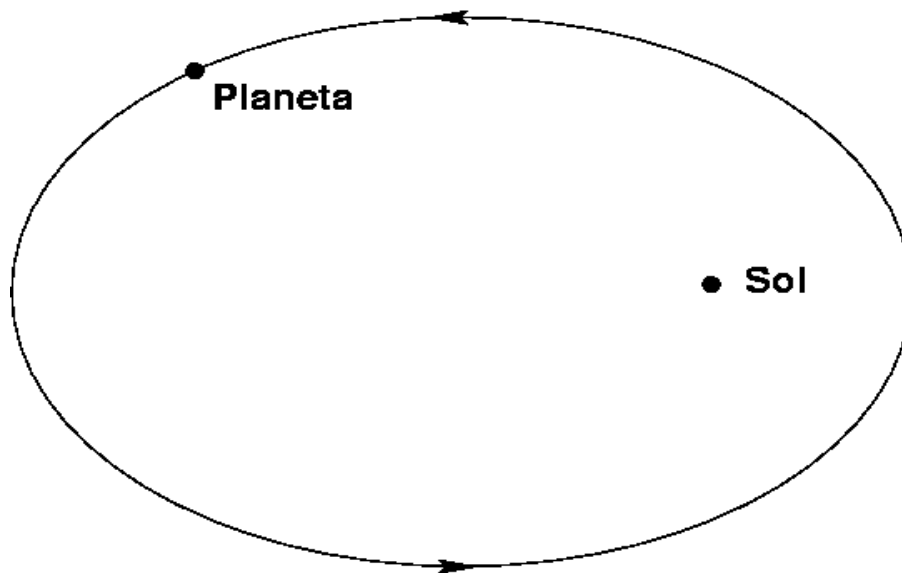
Apenas no início do século XVII (1609-1619), pudemos descrever os movimentos dos planetas com um modelo simples e preciso

As Três Leis de Kepler



Primeira Lei de Kepler

- A órbita de um planeta é uma elipse com o Sol em um dos focos



As órbitas da maior parte dos planetas não são tão elípticas como a desta figura.

- ✓ necessária para explicar com exatidão movimento aparente de Marte sem epiciclo no modelo de Copérnico
 - ▶ medidas de Marte feitas por Tycho Brahe

Tycho Brahe - o observador

- Tabelas Rudolfinas (1627)
 - ✓ observações de Tycho Brahe, publicadas postumamente por Kepler
- Melhor catálogo de posições estelares e tabelas planetárias sem auxílio de um telescópio
 - ✓ Combinação de observações, instrumentos e cálculos muito bons
- posições de Marte com extrema precisão



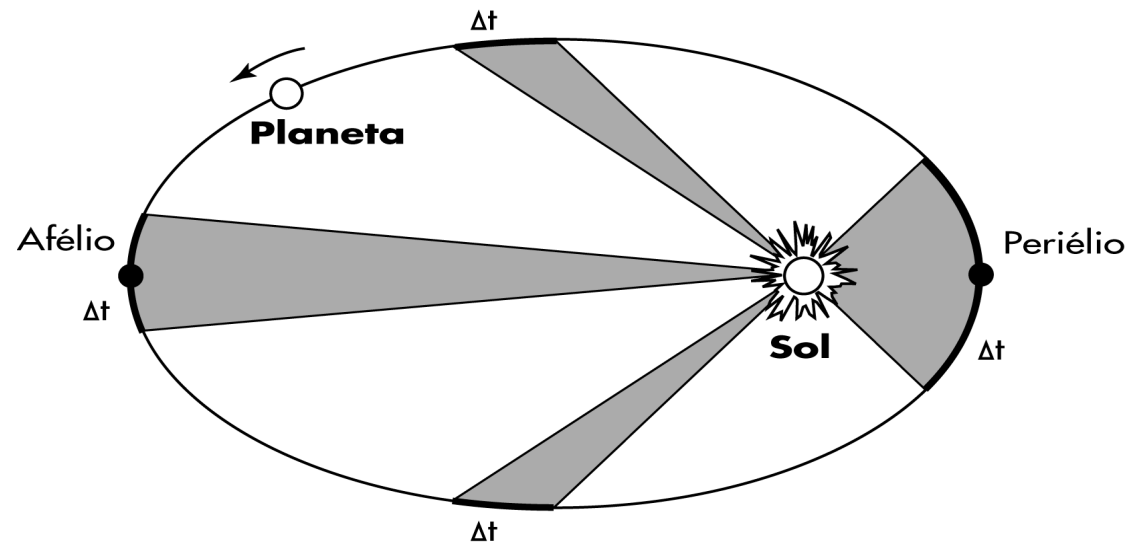
Wikipedia

Consequências

- a distância entre o Sol e um planeta não é uma constante
- ✓ o modelo de Copérnico também já continha esse resultado. Mas para se obter essa variação, o movimento final do planeta era composto por vários movimentos circulares, como os epiciclos

Segunda Lei de Kepler

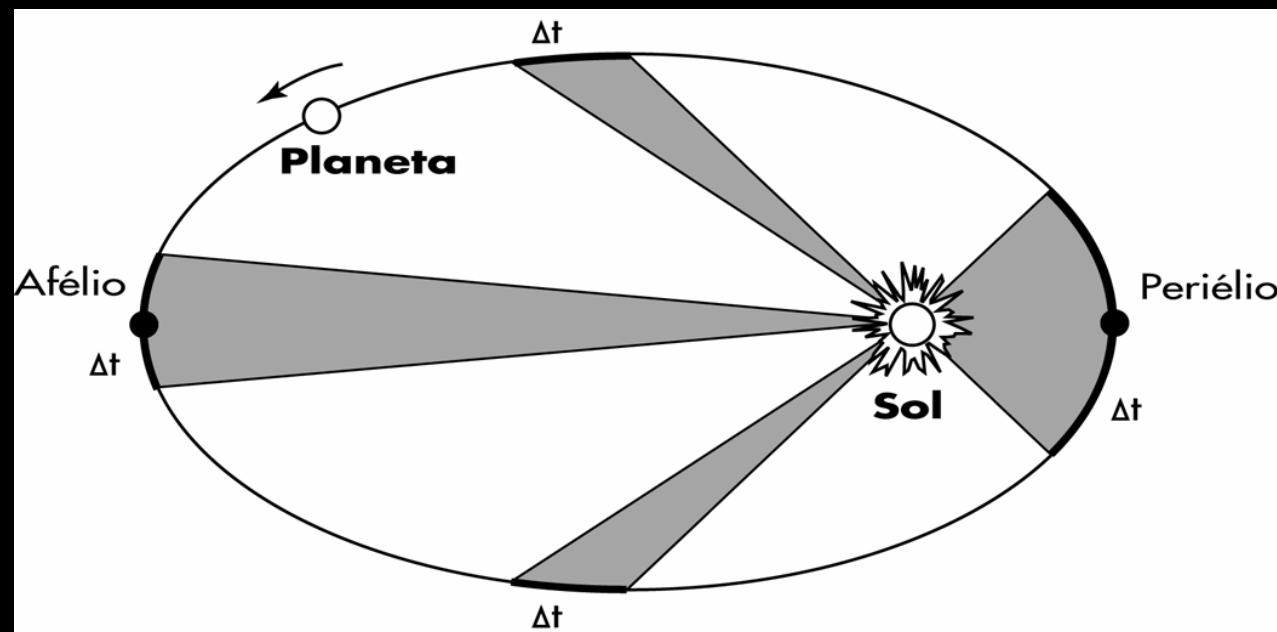
- A área coberta pela linha que liga o Sol ao planeta é sempre a mesma em intervalos de tempos iguais



Consequências da Segunda Lei

- A velocidade de um planeta é variável ao longo de sua órbita

Quando o planeta possui maior velocidade: no afélio ou periélio?



Terceira Lei de Kepler

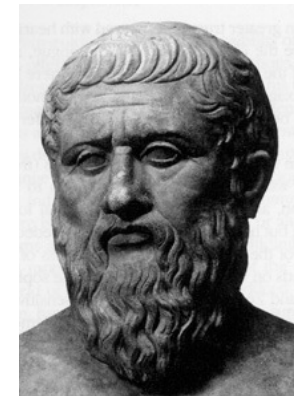
- A razão entre o quadrado do período de translação, P , de um planeta e o cubo do semi-eixo maior de sua órbita, a , é a mesma para todos os planetas

$$\frac{P_1^2}{a_1^3} = \frac{P_2^2}{a_2^3} = K$$

Sobre as Leis de Kepler

- Desde muitos séculos a humanidade buscava a melhor descrição dos movimentos no sistema solar!

Quais são os movimentos uniformes e ordenados necessários para explicar o movimento aparente dos planetas?



Platão, séc. IV A.C.

- Descrição correta apenas foi conseguida quando a forma circular e o movimento uniforme foram abandonados.

Ainda sobre as Leis de Kepler

- Astronomia Nova (1609)
 - ✓ As duas primeiras Leis
- Harmonices Mundi (1619)
 - ✓ Terceira Lei: 10 anos depois das primeiras!
 - ✓ Harmonia, enfim! – Procurada desde *Mysterium Cosmographicum* (1596)

Mas, por quê?

- Nos *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687), Newton explica os movimentos dos planetas com:
 - ✓ As três Leis de movimento
 - ✓ Lei da Gravitação Universal



Primeira Lei de Movimento

- Qualquer corpo permanece em seu estado de repouso, ou de movimento retilíneo uniforme, a menos que seja compelido a mudar de estado por uma força externa

Segunda Lei de Movimento

- A taxa de variação do momento é proporcional à força impressa e na mesma direção em que a força age

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$$

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a}$$

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Terceira Lei de Movimento

- A cada ação corresponde uma reação de mesma intensidade e sentido oposto.

Lei da Gravitação Universal

- Quaisquer dois corpos atraem um ao outro com uma força proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles

$$\vec{F}_G = -G \frac{M_1 M_2}{r^2} \hat{r}$$

Daí para frente...

- Com a base da dinâmica firmada, pode-se explicar (o que foi feito pelo próprio Newton)
 - ✓ Marés
 - ✓ Achatamento da Terra e precessão dos equinócios
 - ✓ Além de outros fatos...
- As Leis da Terra e as Leis dos Céus são as mesmas!
- Nestes tempos, estavam nascendo a Física e a Ciência tal qual as concebemos hoje

**Usando a matemática para
representar a realidade**

Problema de 2-corpos

- A aproximação mais simples para se explicar o movimento dos corpos no Sistema Solar é o chamado problema de 2-corpos
- Hipóteses:
 - ✓ Apenas dois corpos existem no Universo
 - ✓ A massa de cada corpo é concentrada em apenas um ponto
 - ✓ A massa de um dos objetos é infinita e esse corpo é estático
 - ✓ A massa do segundo corpo é desprezível

Problema de 2-corpos: solução

Equação de movimento:

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -\frac{G(M+m)}{r^3} \vec{r} = -\frac{\mu}{r^3} \vec{r}$$

Solução:

$$r = \frac{h^2/\mu}{1 + e \cos \theta}$$

onde:

$$h = |\vec{h}| = |\vec{r} \times \vec{v}|$$

e: excentricidade da órbita

θ : anomalia verdadeira

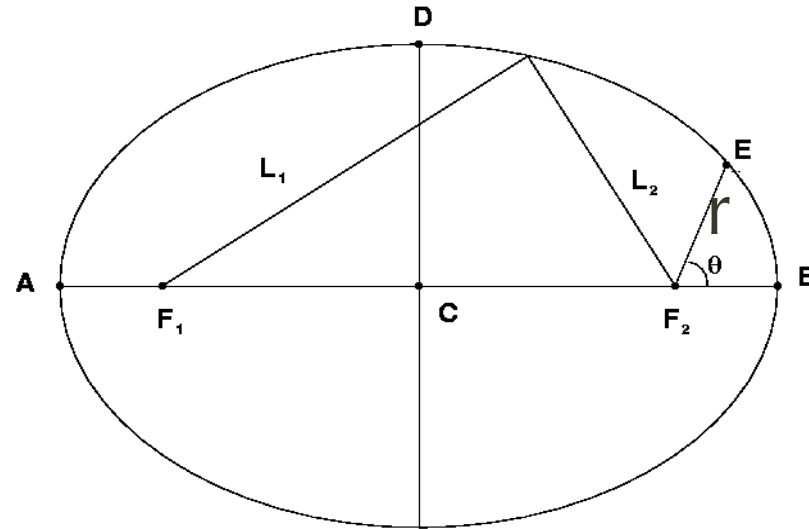
Elipse

- excentricidade, e :

✓ $e = CF_2/CB$

- θ : anomalia verdadeira

- O foco da órbita cônica coincide com o corpo de maior massa



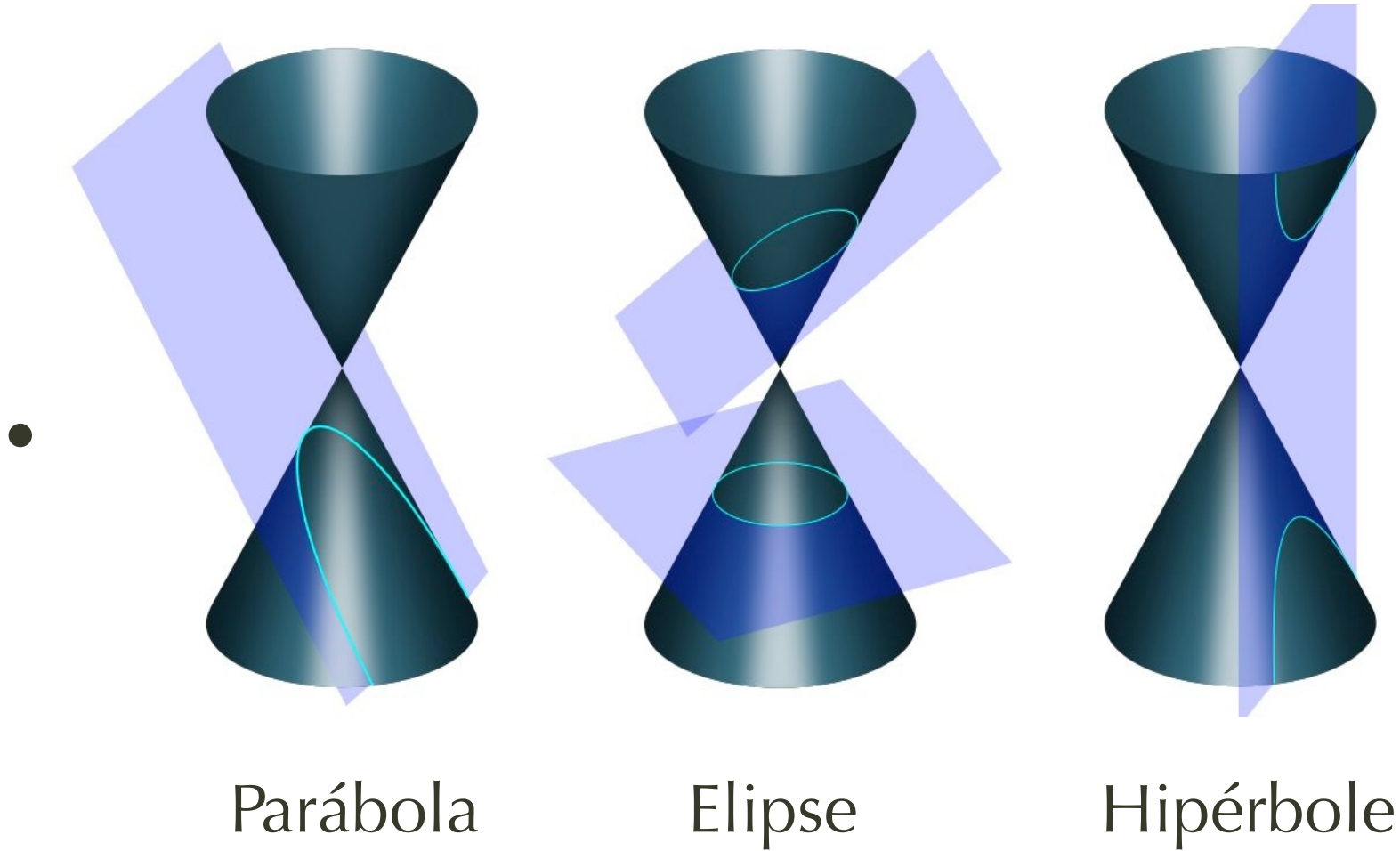
Solução:

$$r = \frac{h^2/\mu}{1 + e \cos \theta}$$

Problema de 2-corpos: trajetórias

- A solução do problema de 2-corpos é a representação matemática das curvas denominadas cônicas:
 - ✓ círculo, $e = 0$
 - ✓ elipse, $0 < e < 1$
 - ✓ parábola, $e = 1$
 - ✓ hipérbole, $e > 1$

Cônicas



Problema de 2-corpos: constantes

- Constantes do movimento

- ✓ Energia mecânica

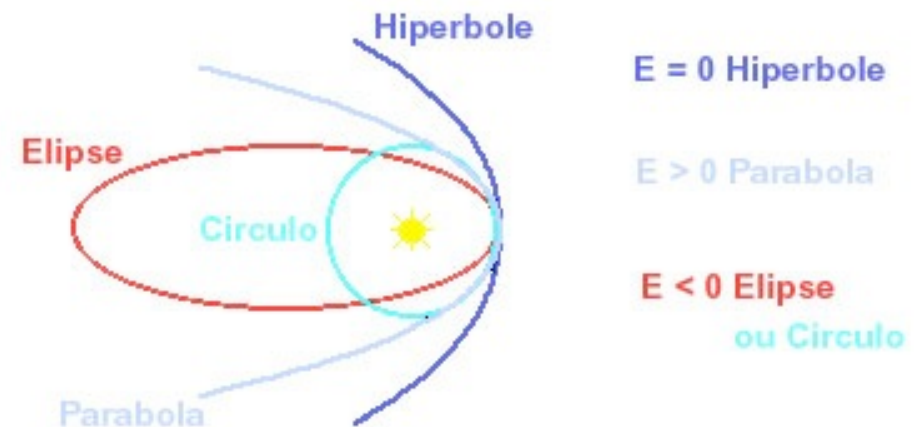
- ▶ energia mecânica = energia potencial + energia cinética
- ▶ campo gravitacional é conservativo

- ✓ Momento angular

- ▶
$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times m\vec{v}$$

Problema de 2-corpos: energia

- Energia de ligação é igual à energia mecânica total
 - ✓ Trabalho necessário para separar dois corpos de uma distância infinita
- Energia de ligação negativa
 - ✓ Corpos ligados gravitacionalmente
 - ✓ Órbitas fechadas: elipse e círculo
- Energia de ligação positiva
 - ✓ Órbitas abertas: parábola e hipérbole

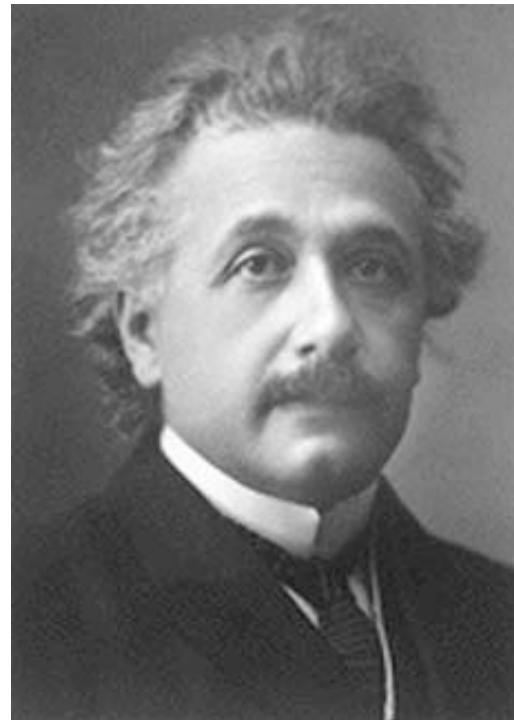


2-corpos são suficientes?

- Não! O problema de 2-corpos é uma aproximação da realidade.
- Problema de n-corpos: uma melhor aproximação. Mas, não tem solução analítica...
 - ✓ Método de perturbações
 - ✓ Soluções numéricas

Einstein

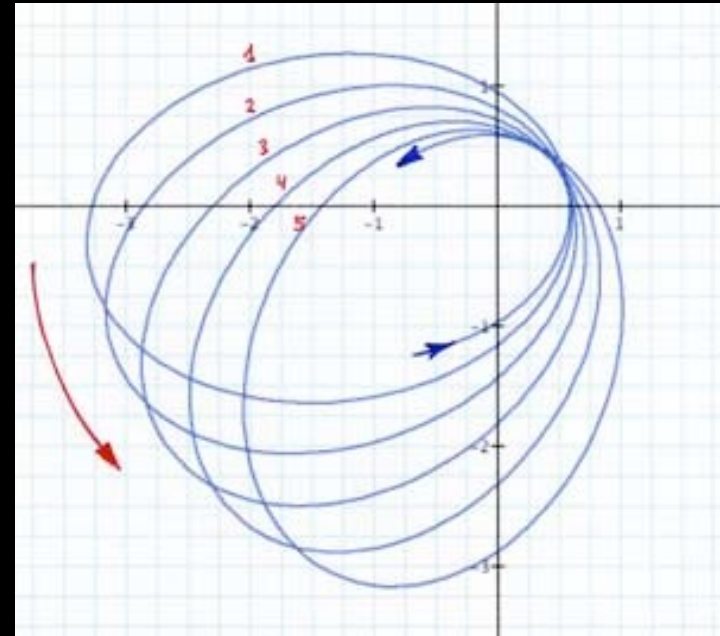
A Relatividade Geral, proposta por Einstein, é hoje a melhor teoria que temos para explicar e descrever a dinâmica de qualquer objeto.



Testes da relatividade geral

- Os testes observacionais abaixo comprovam que a Relatividade Geral é uma melhor representação da realidade que a Dinâmica Newtoniana:
 - ✓ Precessão do periélio de Mercúrio
 - ✓ Deflexão da luz pelo Sol
 - ✓ Vermelhamento gravitacional da luz

Precessão do periélio de Mercúrio



Precessão do periélio de Mercúrio

- Em 1859, Le Verrier observa precessão (~ 5600 arcsec/ano)
- Precessão pode ocorrer devido:
 - ✓ presença de outros corpos
 - ✓ corpo principal não-esférico
- Dinâmica newtoniana prevê valor diferente do observado por 43 arcsec/ano
- Relatividade geral prevê valor correto

Deflexão da luz pelo Sol

- Cavendish em 1784 calculou que a luz é defletida pela presença de massa



Deflexão da luz pelo Sol

- Em 1915, Einstein calcula com a relatividade geral valor que difere por um fator 2 do valor newtoniano
- Em 1919, durante um eclipse solar, Eddington monta uma observação que confirma o valor deduzido por Einstein

Sugestões de leitura

- A imagem do Mundo dos Babilônios a Newton, A. Simaan e J. Fontaine, 2003, Cia. das Letras
- A History of Astronomy from Thales to Kepler, J.L.E. Dreyer, 1953, Dover [livro bastante detalhado, um pouco pesado]
- en.wikipedia.org

CIAA 2021 ON-LINE

XXI Curso de Introdução à Astronomia e Astrofísica

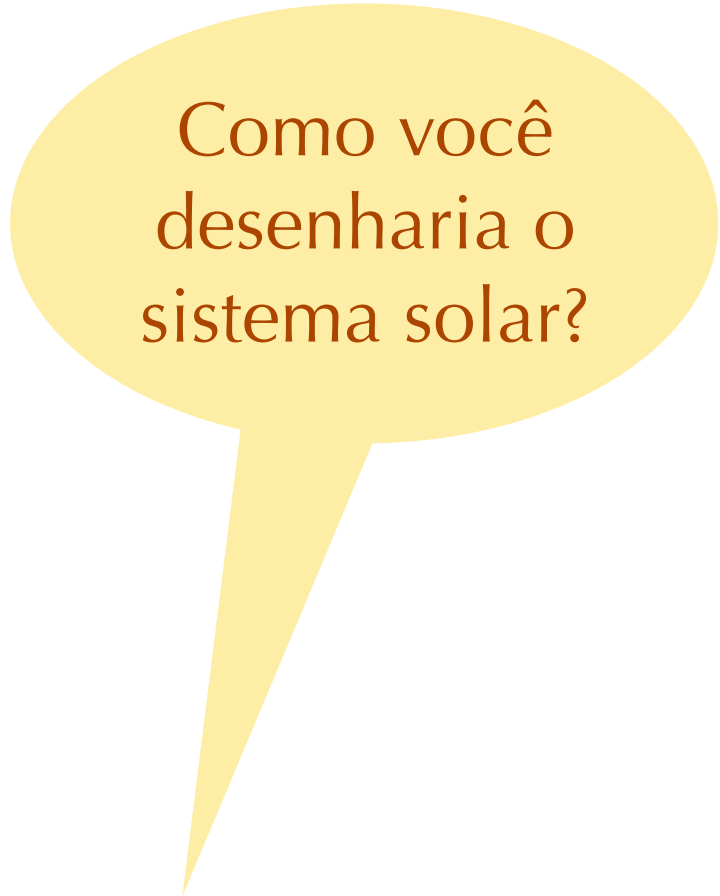
09 a 20 de agosto de 2021

- Deixe seu microfone e câmera desligados
- Para perguntas ao final da apresentação, use o chat ou “levante a mão” em “reações”

Créditos da imagem: NASA/JPL-Caltech/UCLA (USA)

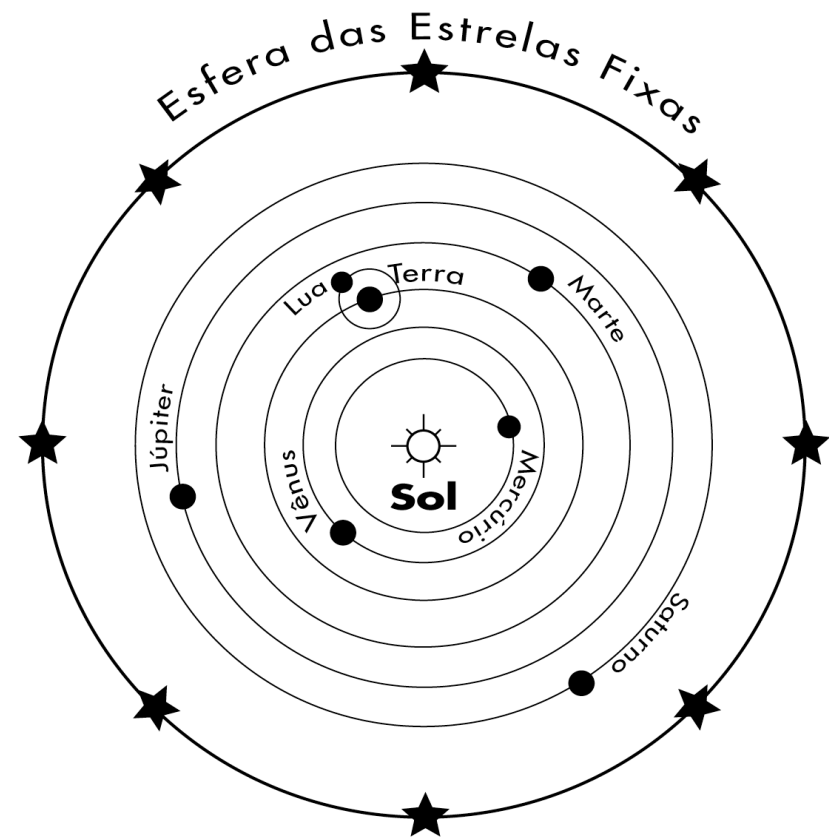
O que tem no sistema solar?

- O sistema solar é composto por
 - ✓ Sol
 - ✓ Planetas (e seus satélites)
 - ✓ Planetas-anões
 - ✓ Corpos menores do sistema solar
 - Objetos trans-netunianos
 - Asteróides
 - Cometas
 - ✓ Vento solar
 - ✓ Grãos de poeira

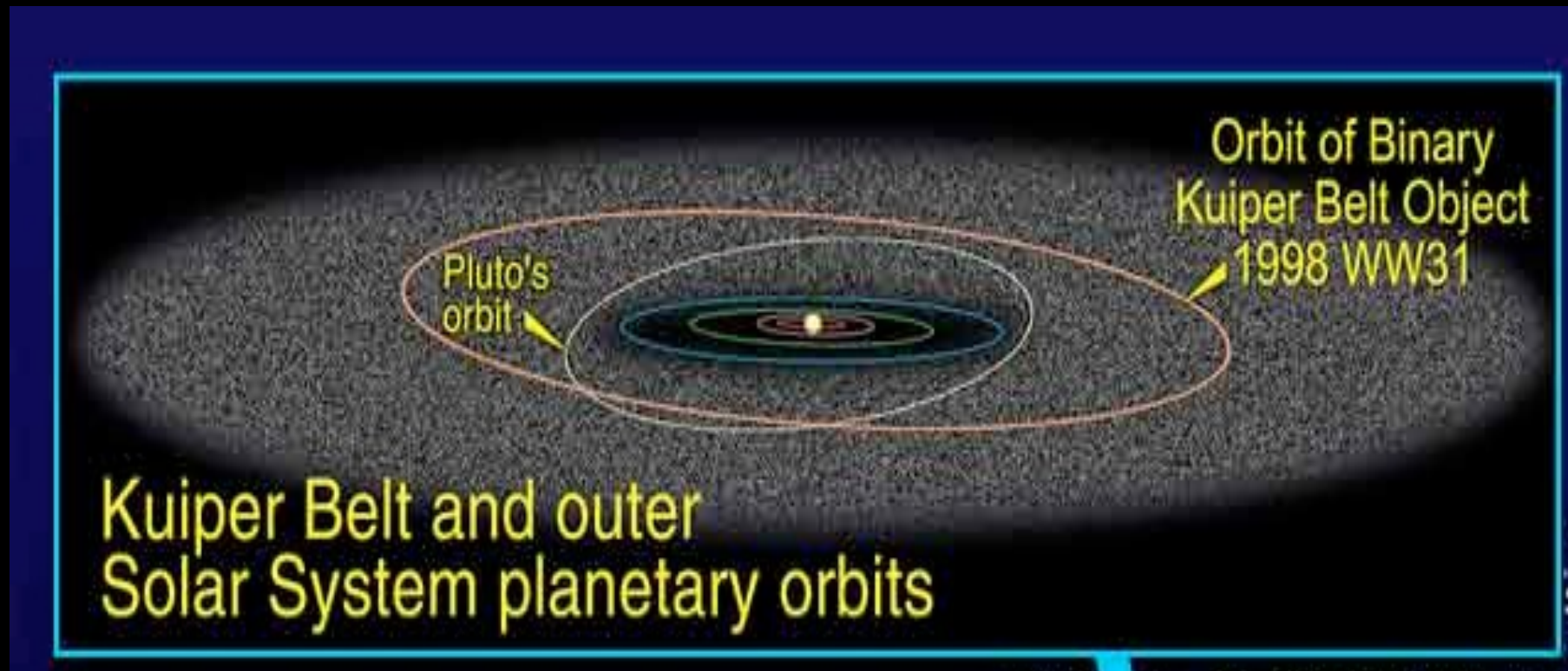


Como você
desenharia o
sistema solar?

Órbitas dos planetas?



Planetas + objetos transnetunianos?



Fonte: Views of the Solar System

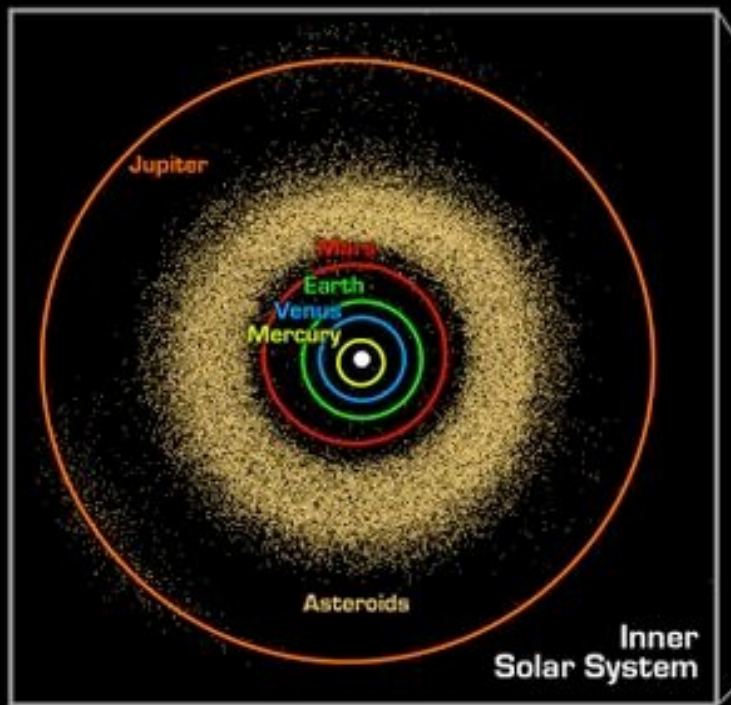
Nuvem de Oort, talvez...



The Oort Cloud
(comprising many
billions of comets)

Oort Cloud cutaway
drawing adapted from
Donald K. Yeoman's
illustration (NASA, JPL)

Fonte: Views of the Solar System

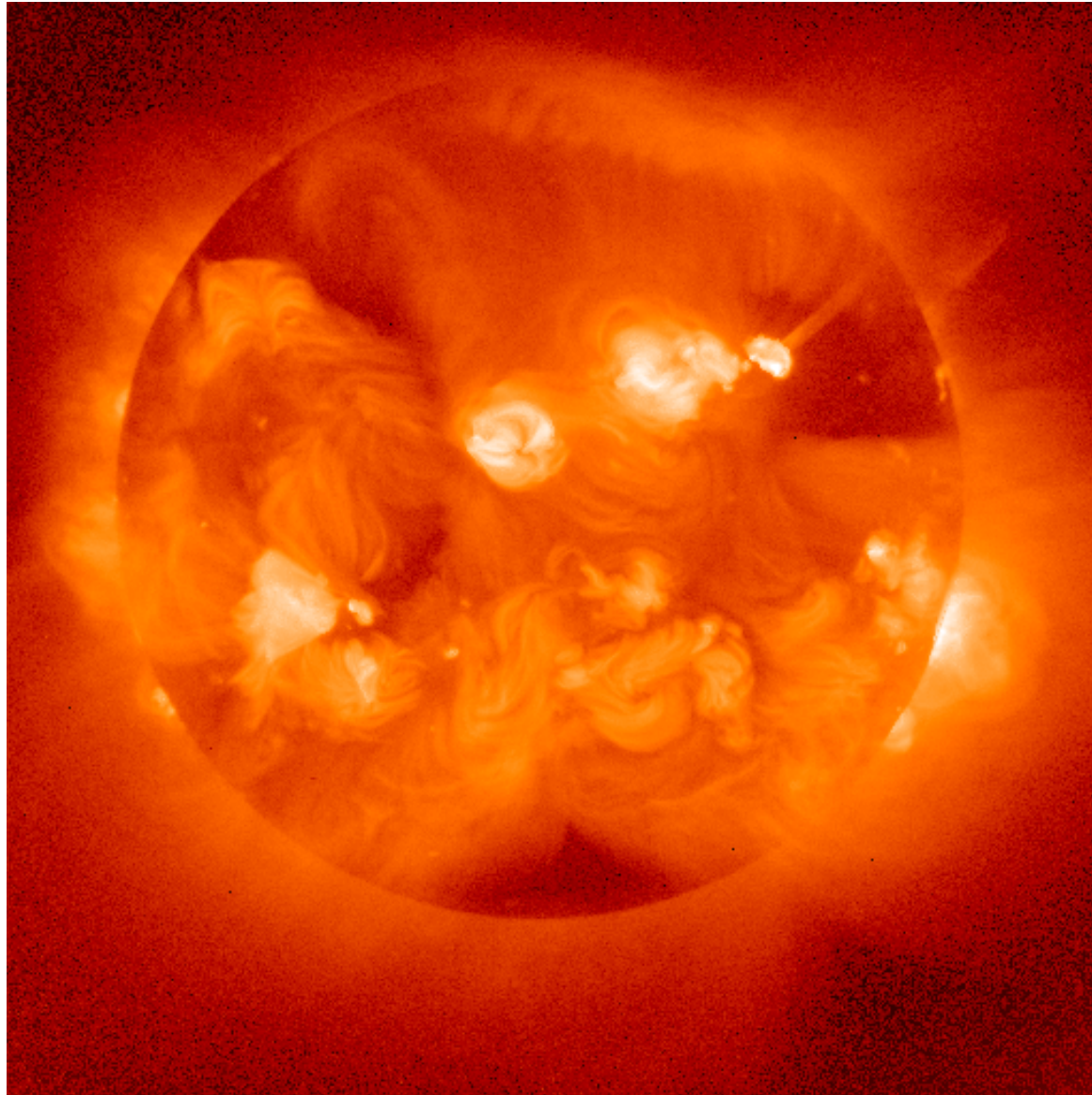


Distâncias ao Sol

- Terra: 1 Unidade Astronômica (UA)
- Netuno: 30 UA
- Cinturão de Kuiper: 30 - 50 UA
- Nuvem de Oort: 100.000 UA
- Estrela mais próxima: 420.000 UA

As componentes do sistema solar

Sol



Yohkoh
(Raios -X)

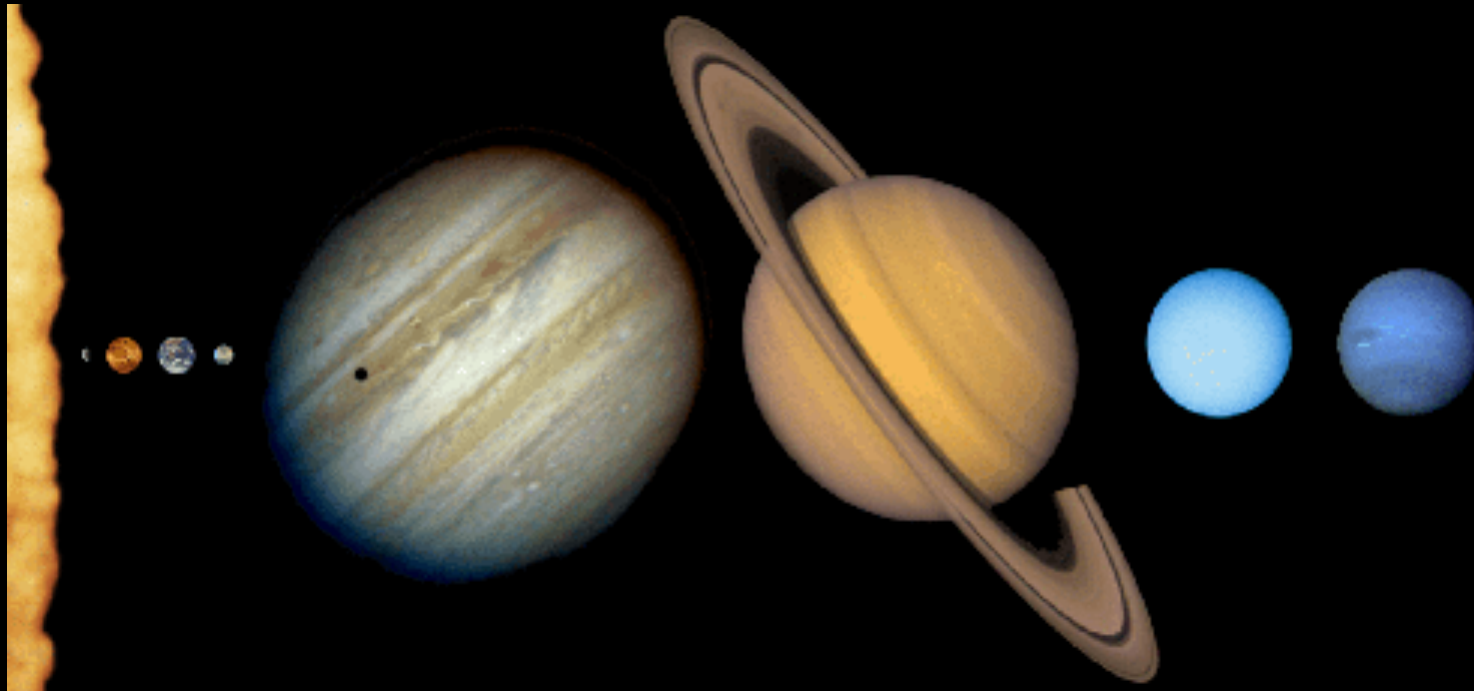
Qual é o papel do Sol?

- 99,86% da massa do Sistema Solar está no Sol!
- É o principal centro de atração do Sistema Solar
- Produz praticamente toda a energia presente no Sistema Solar
 - ✓ aquece e ilumina os planetas, por exemplo

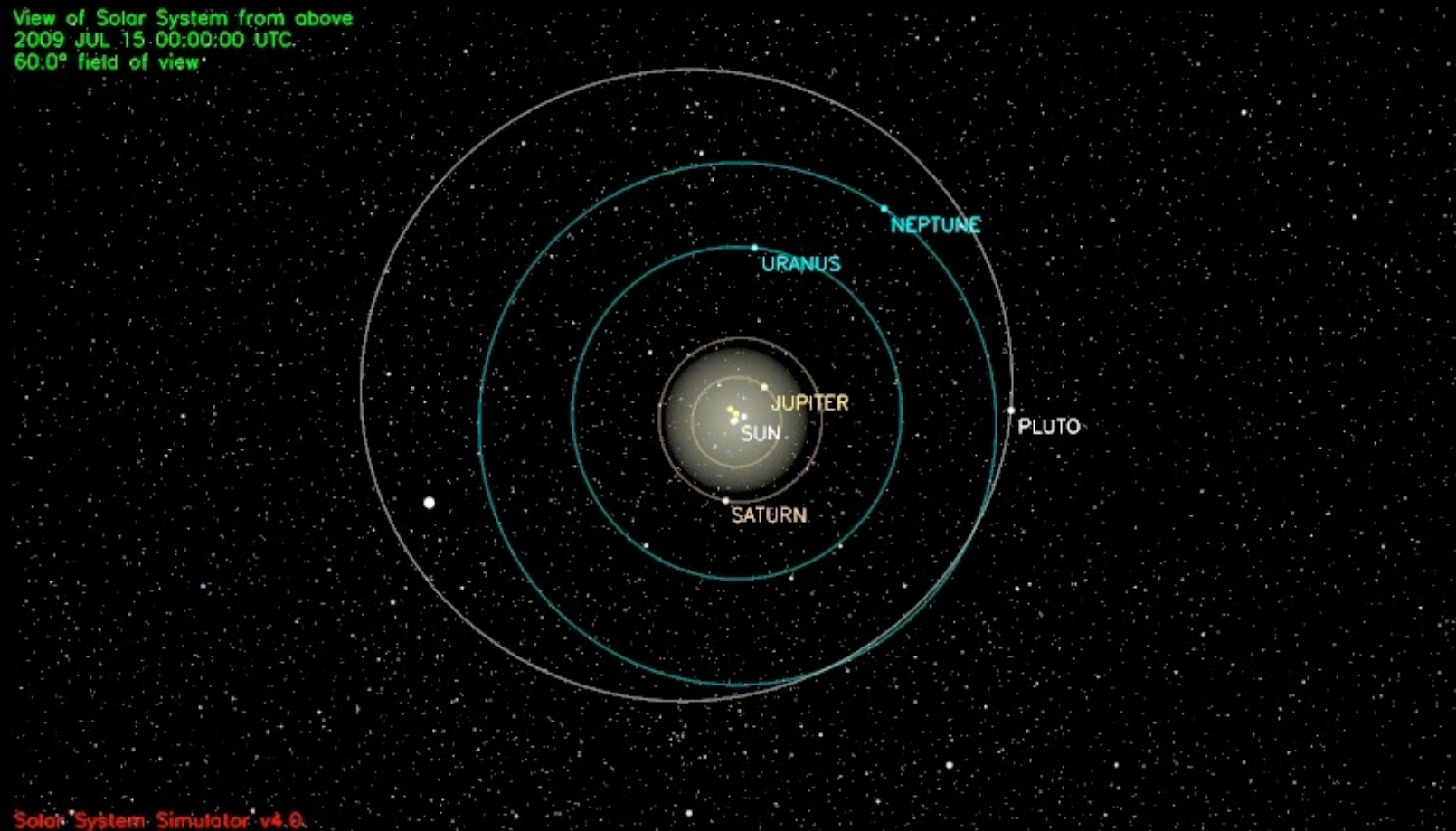
Os planetas

- Ao redor do Sol orbitam oito planetas
 - ✓ Mercúrio
 - ✓ Vênus
 - ✓ Terra
 - ✓ Marte
 - ✓ Júpiter
 - ✓ Saturno
 - ✓ Urano
 - ✓ Netuno

Os planetas do Sistema Solar



Órbitas



Simulador: <http://space.jpl.nasa.gov>

O que é um planeta?

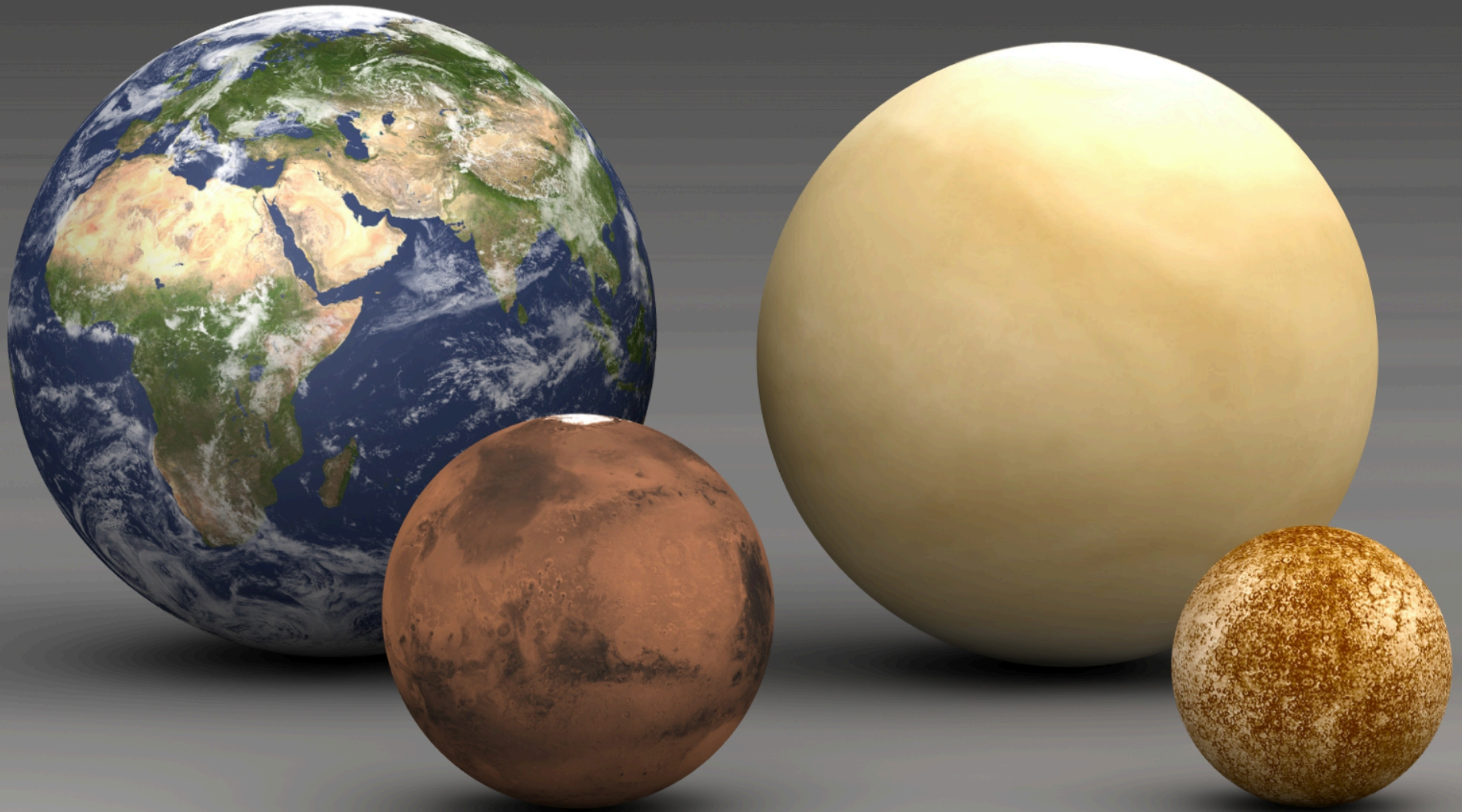
- Quais são as características que um corpo deve possuir para ser classificado como um planeta?
 - ✓ orbitar em torno do Sol (ou de outra estrela)
 - ✓ massa suficiente para possuir forma esférica (massa não tão pequena)
 - ✓ não produzir energia por fusão nuclear (massa não tão grande...)
 - ✓ **a região onde se encontra ser livre de planetesimais**

Os planetas

- Praticamente todo o momento angular está concentrado nos planetas
- Planetas não tem luz própria: o brilho de um planeta origina-se da reflexão da luz solar (em primeira aproximação)
- Atmosfera e atividade vulcânica determinam aparência do planeta
- Os planetas são divididos em
 - ✓ planetas internos ou telúricos (= Terra)
 - ✓ planetas externos ou jovianos (= Júpiter)

Planetas telúricos

Mercúrio - Vênus - Terra - Marte



Planetas telúricos

Mercúrio - Vênus - Terra - Marte

- São pequenos e compostos basicamente por elementos pesados \Rightarrow densos
- Superfície sólida
- Atividade vulcânica presente ou passada
- Atmosfera tênue
- Possuem poucos ou nenhum satélite
- Não possuem anéis

Planetas jovianos

Júpiter - Saturno - Urano - Netuno

- São grandes planetas gasosos, compostos basicamente por hidrogênio e hélio
- Por serem gasosos, não possuem superfície sólida
- Atmosfera espessa
- Possuem anéis
- Possuem muitos satélites

Valendo certificado!

- Como você explica que os planetas jovianos tem mais satélites, tem anéis e atmosfera mais densa que os telúricos?

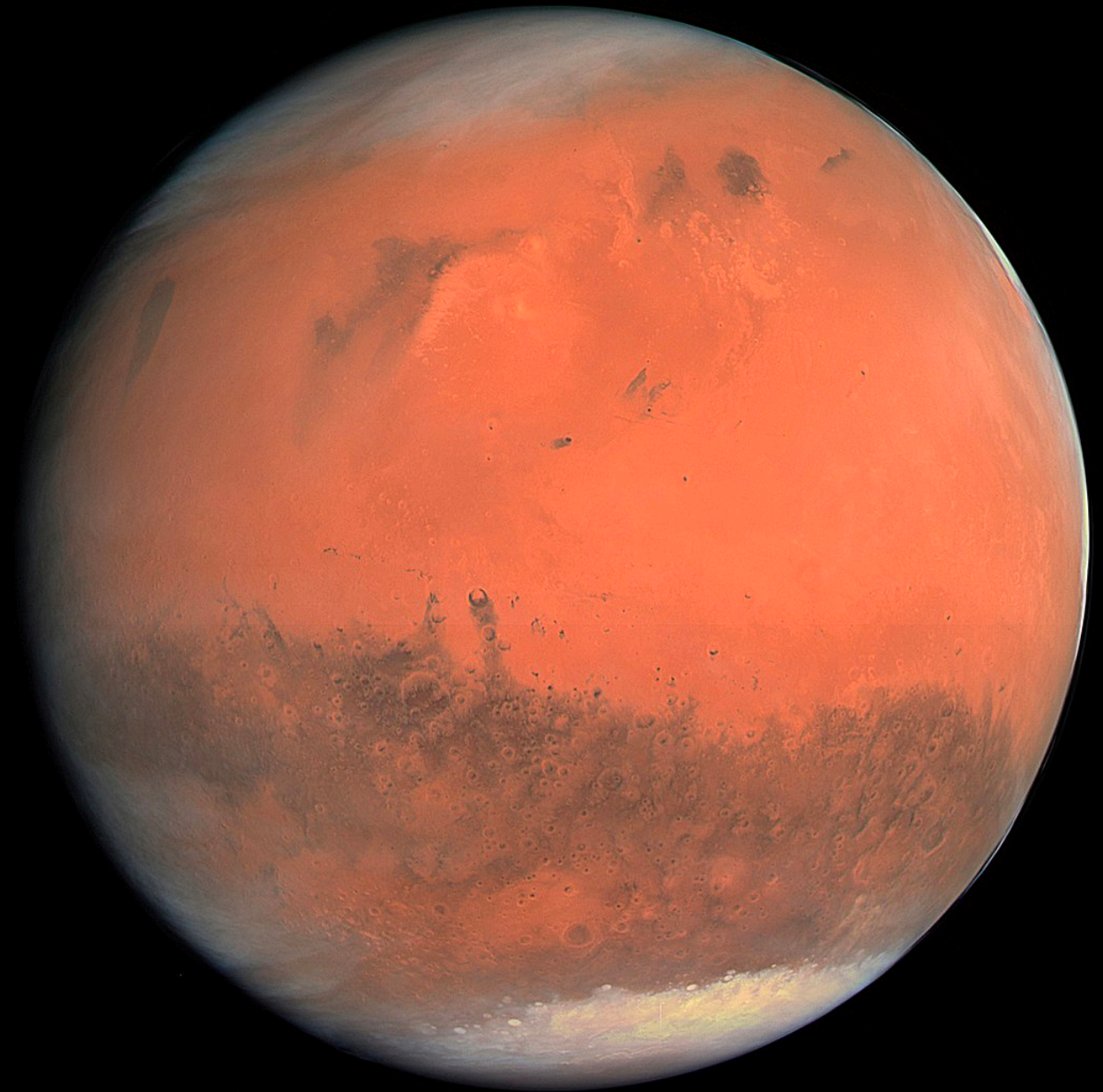
maior força gravitacional

Alguns destaques planetários

Marte

Imagem em cor natural

Instrumento Osiris
Sonda Rosetta (ESA)
Fevereiro de 2007



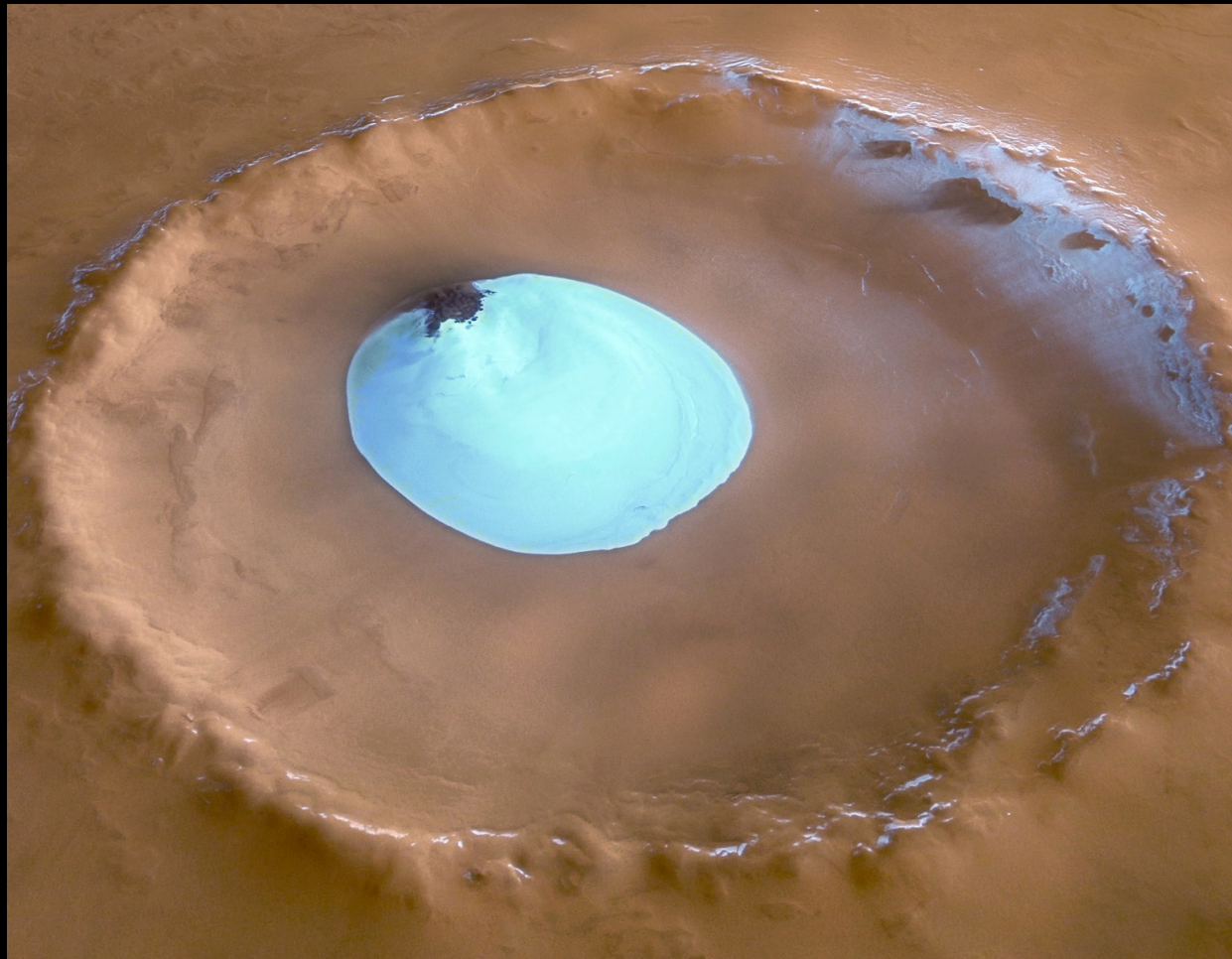
https://en.wikipedia.org/wiki/File:OSIRIS_Mars_true_color.jpg

Marte

- Atmosfera tênue de gás carbônico
- Relevo
 - ✓ planícies de lava solidificada, crateras de impacto e montanhas
 - ✓ Monte Olimpo: maior montanha do Sistema Solar - 25 km de altura
- Possui dois pequenos satélites irregulares
 - ✓ Fobos e Deimos
- Marte é alvo de intensa exploração local
- Água em Marte (na forma de gelo)
- Amônia e metano em Marte
 - ✓ Mars Express (ESA) - Março e Julho/2003
 - ✓ Origem
 - ▶ Vulcânica ou devida a microorganismos

Phobos 27 km de diâmetro





© ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum)

Cratera com gelo de água próximo ao pólo norte marciano
Mars Express - ESA

Perseverance - NASA

Imagem obtida em 8 de julho de 2021



<https://www.nasa.gov/press-release/nasa-perseverance-mars-rover-to-acquire-first-sample>

Saturno

- Segundo planeta em tamanho no Sistema Solar
- Muito parecido com Júpiter
- Belo sistema de anéis
 - ✓ extremamente finos: (200 m/ 480.000 km!)
 - ▶ 1 folha sulfite do tamanho do INPE
 - ✓ partículas de poeira e gelo: de 10^{-6} a 10^3 m
- São conhecidos mais de 30 satélites

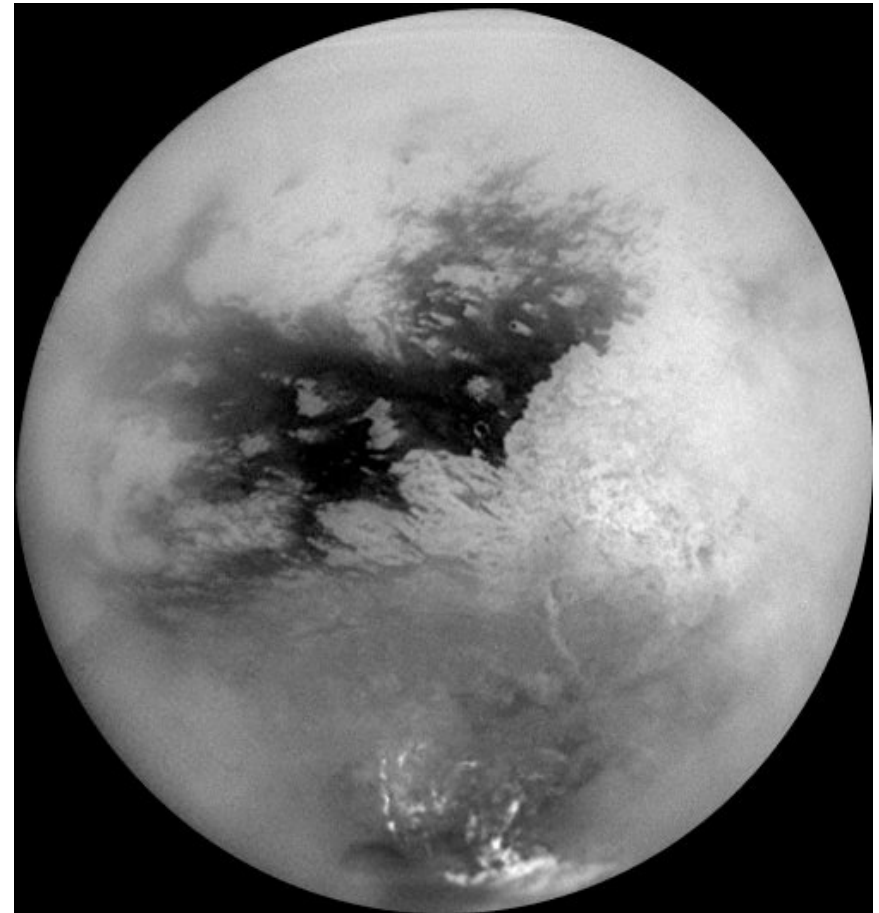


Anéis de Saturno
vistos pela Cassini -
Julho/2004

Cortesia:
NASA/JPL/Space
Science Institute

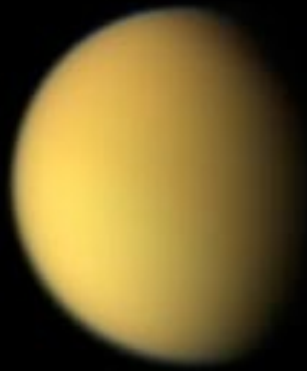
Titã

- maior satélite de Saturno
- único satélite do sistema solar com atmosfera densa
 - ✓ atmosfera similar à da Terra primitiva
 - ▶ nitrogênio (90%) + argônio
 - ▶ mas muito mais fria
- tem atividade vulcânica



NASA

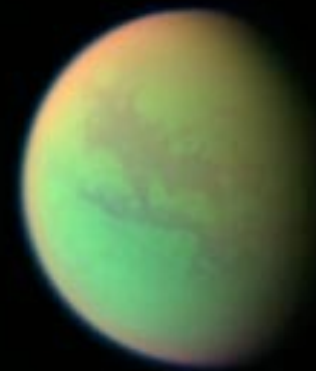
Titã visto pela Cassini



Óptico
3 cores



938nm – IV
transparente



2 imagens IV + 1 UV
verde: superfície
vermelho: metano

Fonte: NASA

Encélado

[https://pt.wikipedia.org/wiki/Encélado_\(satélite\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/Encélado_(satélite))

- Sexto maior satélite de Saturno
 - ✓ diâmetro da ordem de 500 km
- Provável água no estado líquido
- Crio vulcão
 - ✓ vulcão de água e outros voláteis

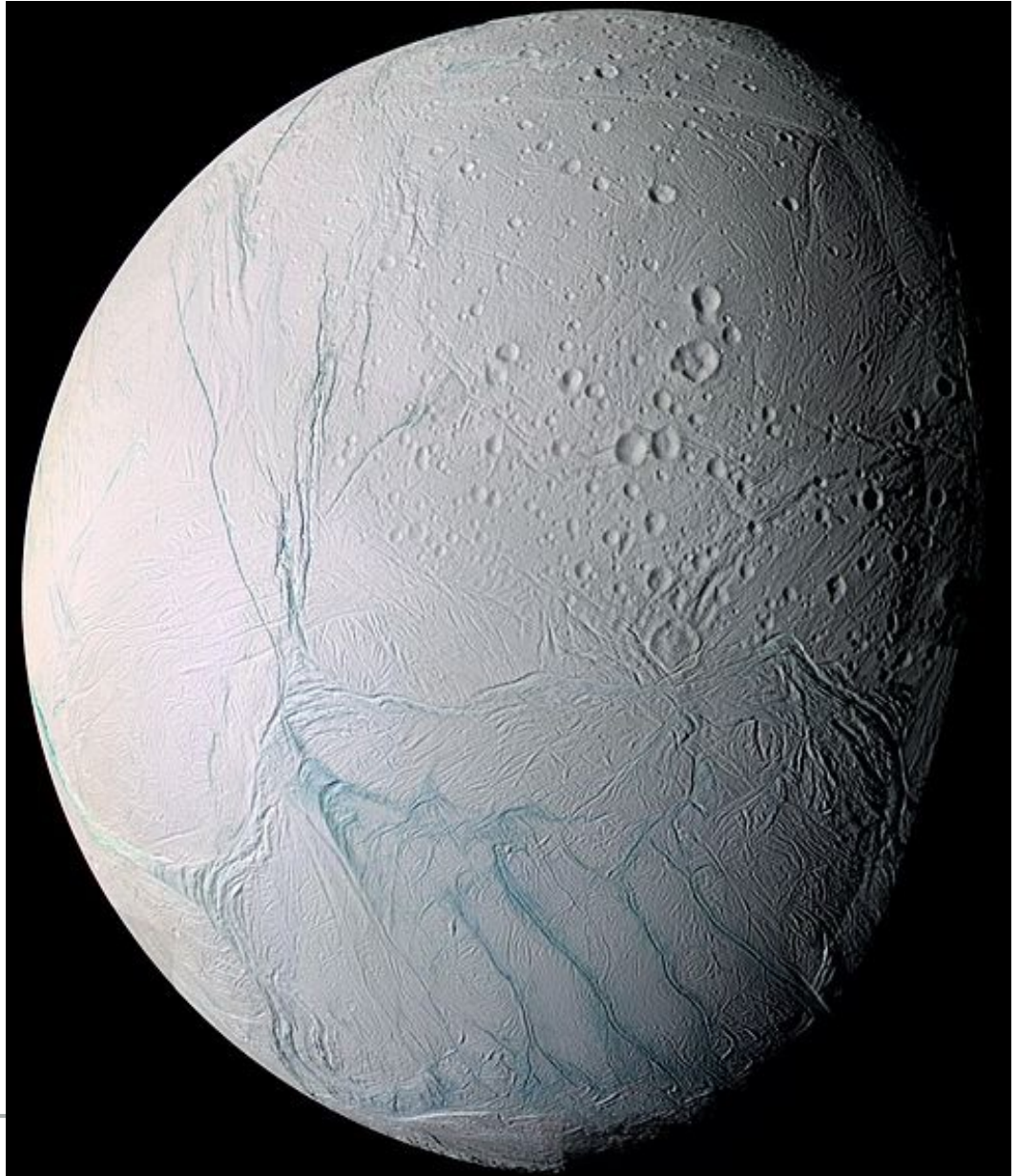
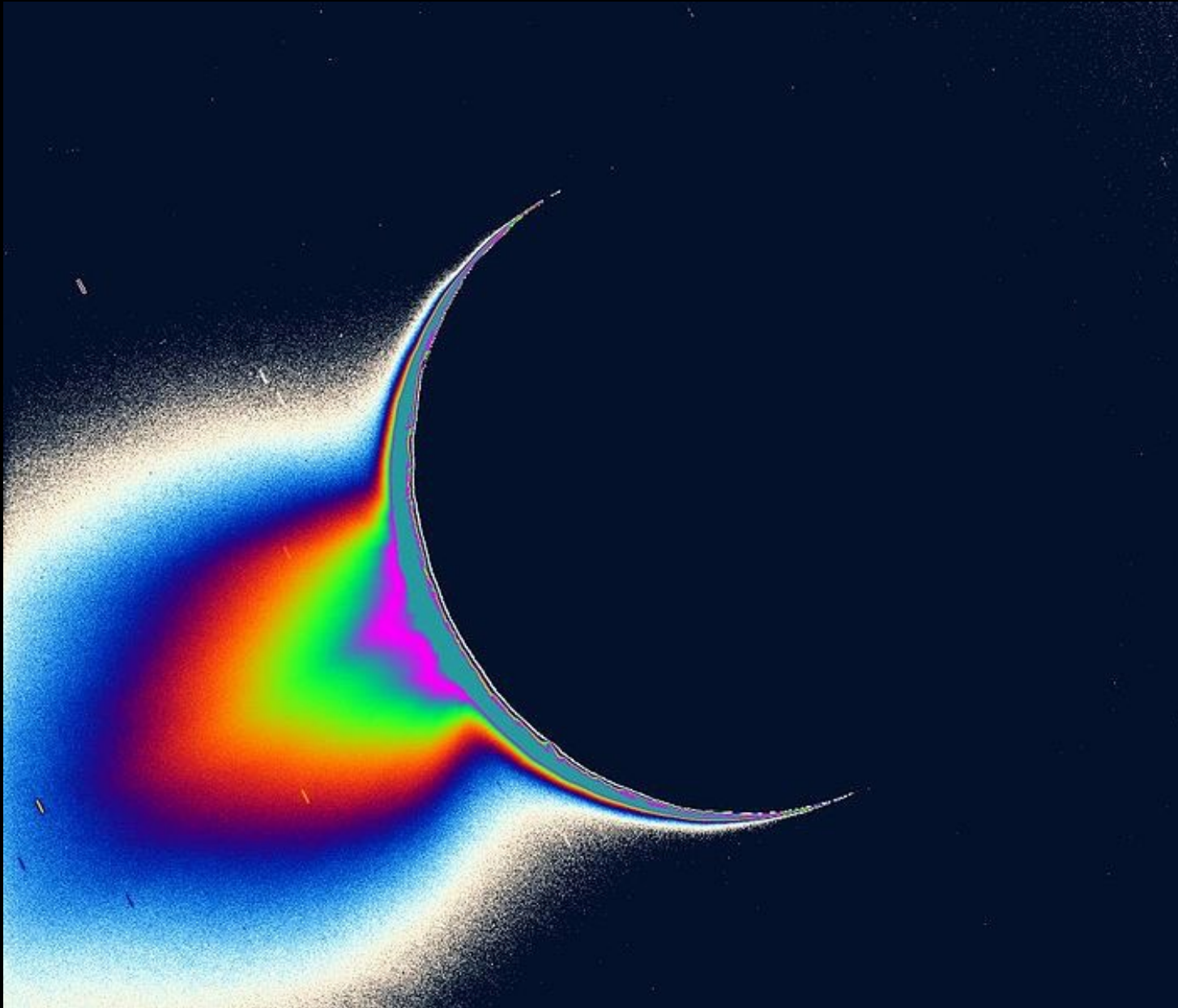
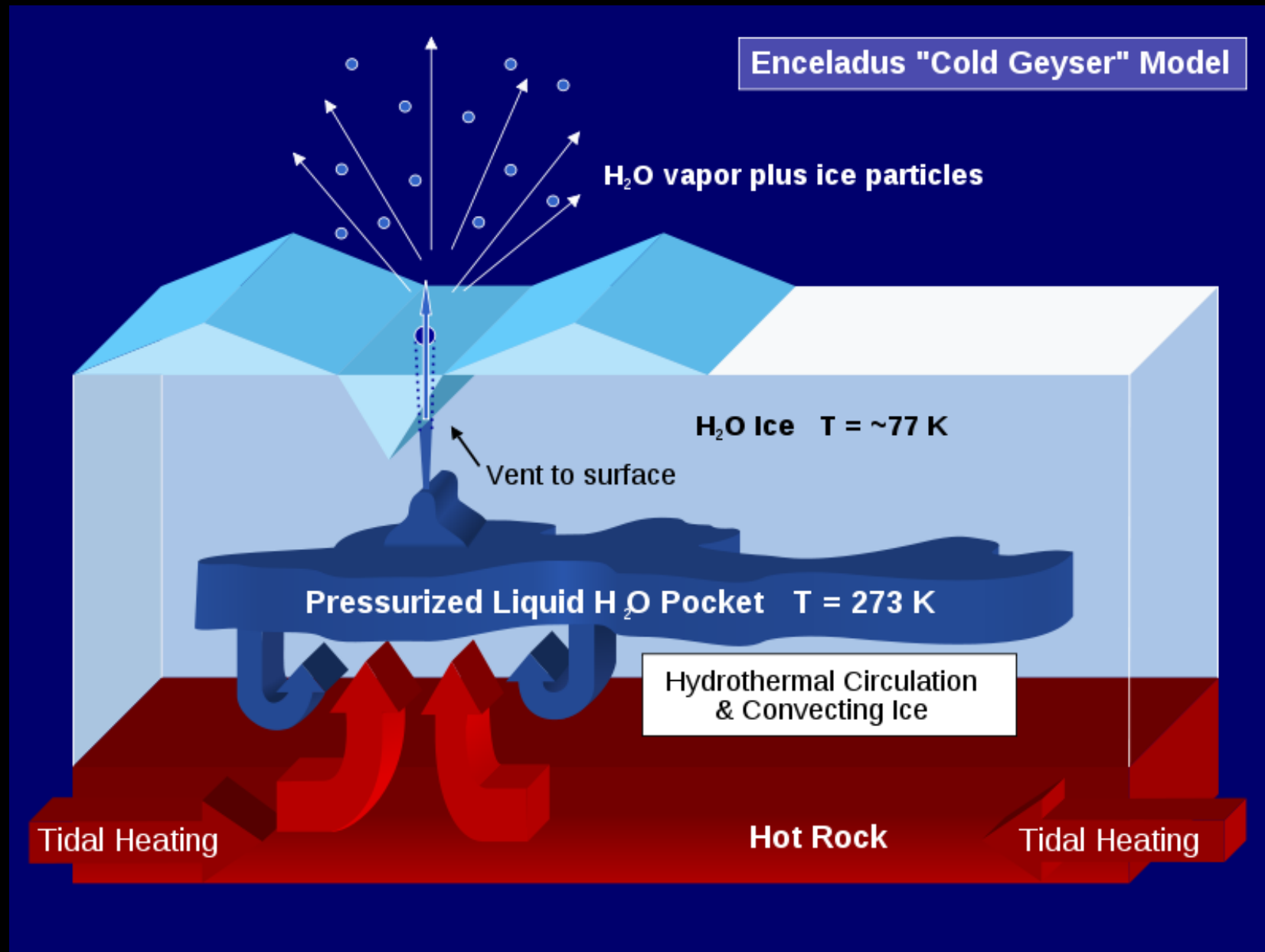


Imagem Sonda Cassini



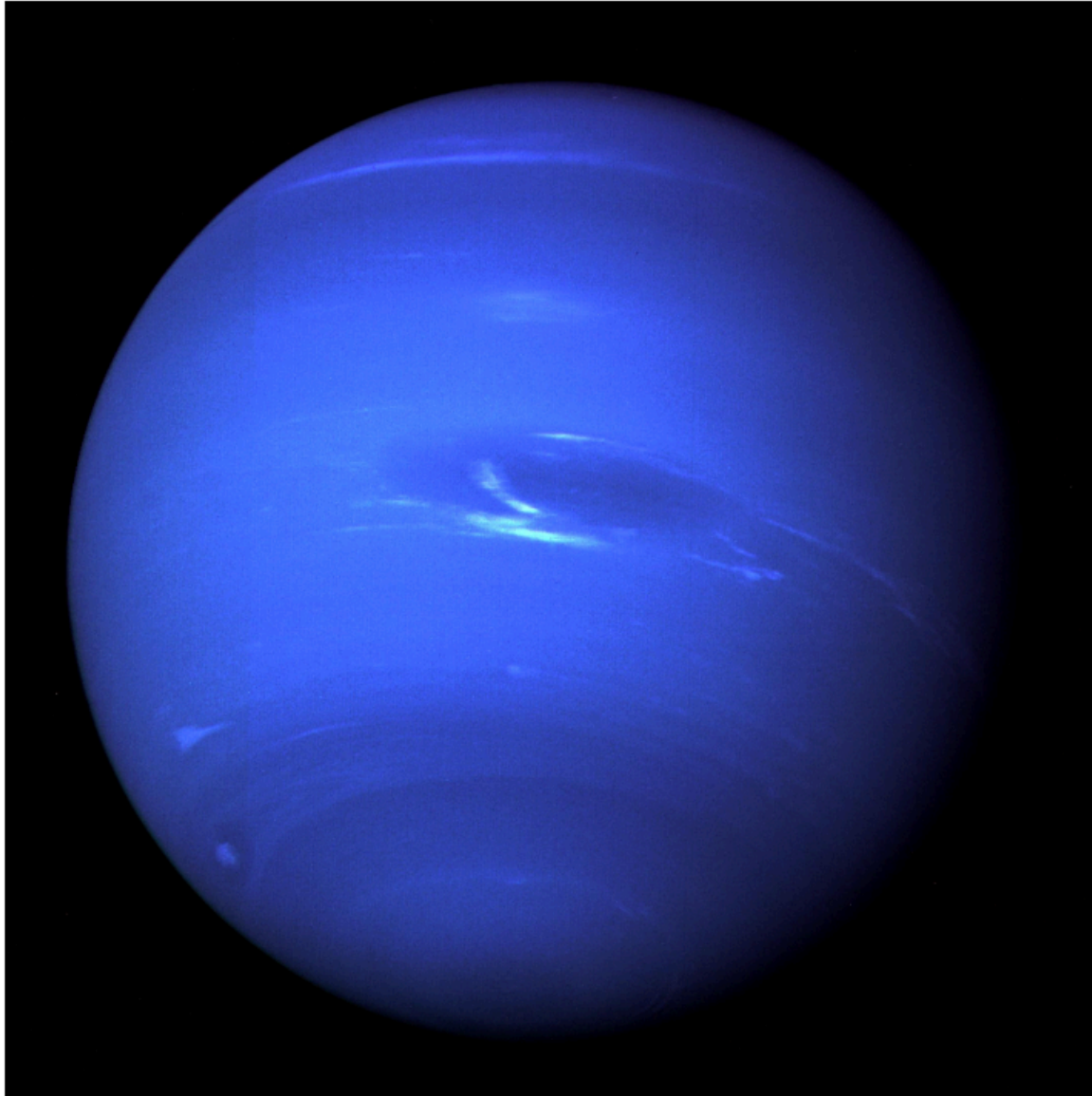
Cortesia:
NASA/JPL/Space
Science Institute

[https://pt.wikipedia.org/wiki/Encélado_\(satélite\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/Encélado_(satélite))



<https://en.wikipedia.org/wiki/Enceladus>

Netuno



NASA - Voyager 2

Netuno

- Previsto matematicamente
 - ✓ 1821: Bouvard publica tabelas astronômicas da órbita de Urano que se mostram incorretas
 - ▶ isto é, ele calculou a órbita de Urano e as previsões não bateram com observações subsequentes
 - ✓ 1843: Adams calcula órbita do 8o. planeta
 - ✓ 1846: Le Verrier também calcula órbita do 8o. planeta...
 - ✓ 1846: Challis e Galle iniciam de maneira independente procura observacional por planeta
 - ✓ 1846: d'Arrest e Galle acham planeta comparando a disposição dos astros em uma dada região do céu em dois momentos distintos

Planetas, planetas-anões e outros bichos

- Longa controvérsia a respeito da classificação de Plutão
- Em 2006, os astrônomos definiram uma nova classificação para alguns corpos do sistema solar:
 - ✓ planetas
 - ✓ planetas-anões
 - ✓ corpos menores

Planetas-anões

- Os planetas-anões são cinco:
 - ✓ Plutão
 - ✓ Ceres
 - ✓ Éris
 - ✓ Haumea
 - ✓ Makemake
- Já existem vários candidatos, mais ou menos prováveis.
- + no futuro... estima-se 200 no Cinturão de Kuiper e milhares em todo o sistema solar...

Planetas-anões

- Quais são as características que um corpo deve possuir para ser um planeta-anão?
 - ✓ corpo que orbita em torno do Sol
 - ✓ massa suficiente para possuir forma aproximadamente esférica
 - ✓ não produz energia por fusão nuclear
 - ✓ a região onde se encontra NÃO é livre de planetesimais

Alguns planetas-anões

	Distância ao Sol (UA)	Diâmetro (km)	Composição
Plutão	29,7 a 49,3	2300	gelo
Ceres	2,5 a 2,9	~1000	terrestre
Éris	37,8 a 97,6	3.100	gelo

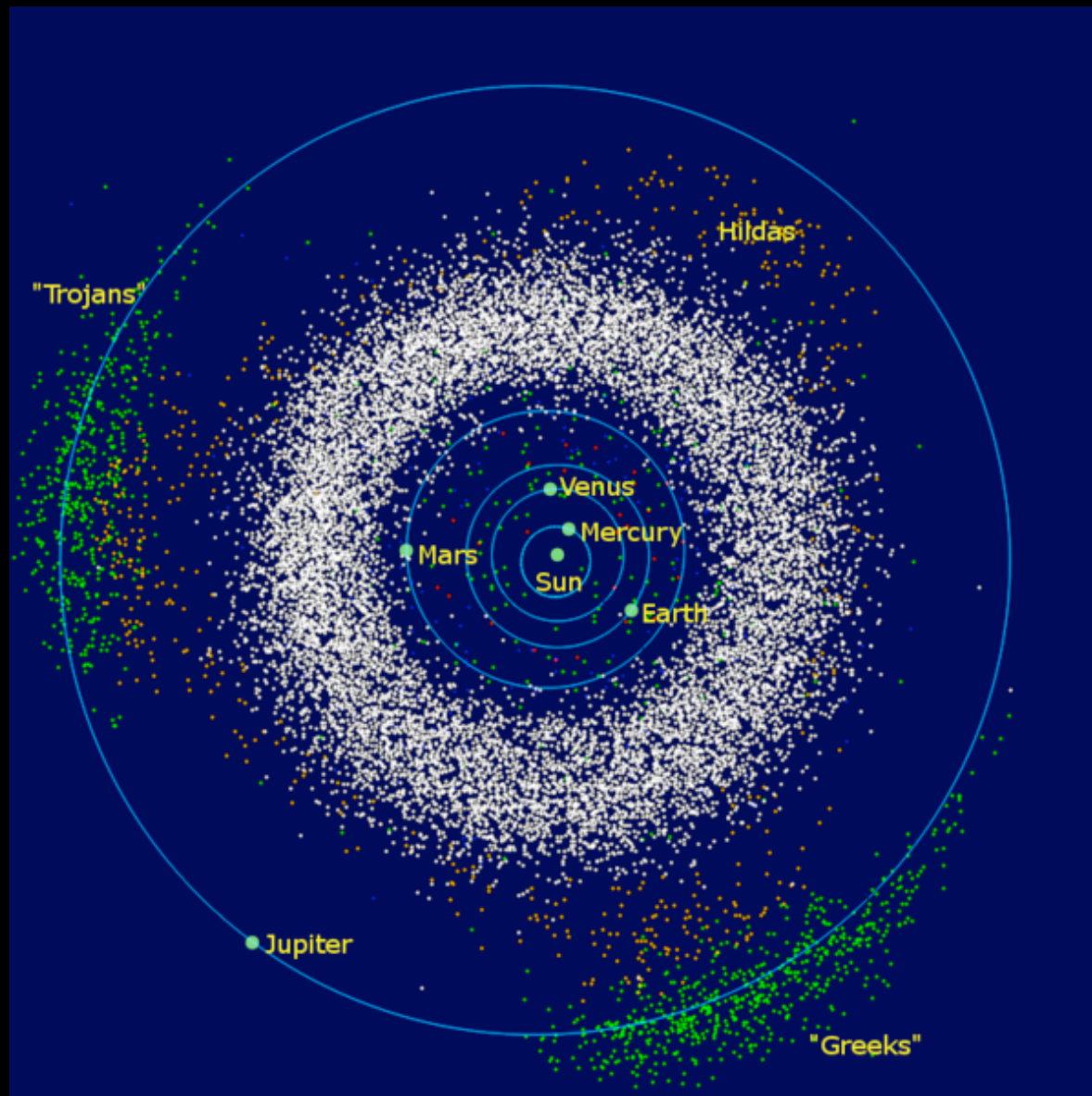
Planeta 9 ou planeta X

- Sugerido como explicação para distribuição de órbitas de um grupo de objetos transnetunianos, que possuem órbitas muito similares.
 - ✓ Existem outras explicações possíveis.
- Características (muito incertas)
 - ✓ Massa: 10 x massa da Terra (ou menor, tudo muito incerto...)
 - ✓ Órbita elíptica com período de 15.000 anos
- Não foi detectado até o momento.
- Não existe consenso: é um debate sério que ocorre em revistas e por pesquisadores conceituados.

Corpos menores do sistema solar

- O sistema solar abriga outros corpos além dos planetas e planetas-anões (e seus satélites). São eles:
 - ✓ asteróides (Ceres não é mais asteróide)
 - ✓ planetóides (em qualquer ponto do sistema solar)
 - ✓ objetos transnetunianos
 - ✓ cometas
- Os corpos menores não são esféricos.

Cinturão de asteróides



www.wikipedia.com asteroid

Formação - teoria atual:

planetesimais formados no início da formação do Sistema Solar e nunca agregados em corpo maior devido à perturbação gravitacional de Júpiter.

Ida (58 km) ...



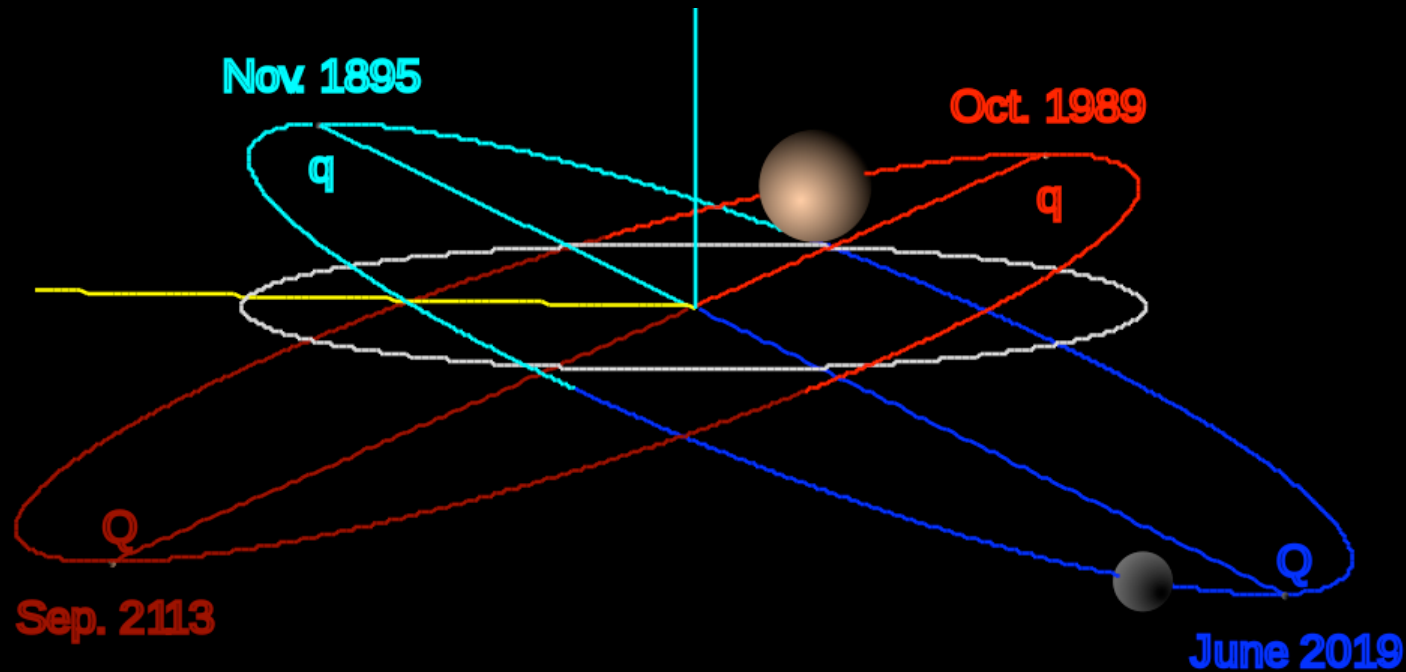
... e Dactil

Largest known trans-Neptunian objects (TNOs)



https://en.wikipedia.org/wiki/Trans-Neptunian_object

Órbitas fora do plano

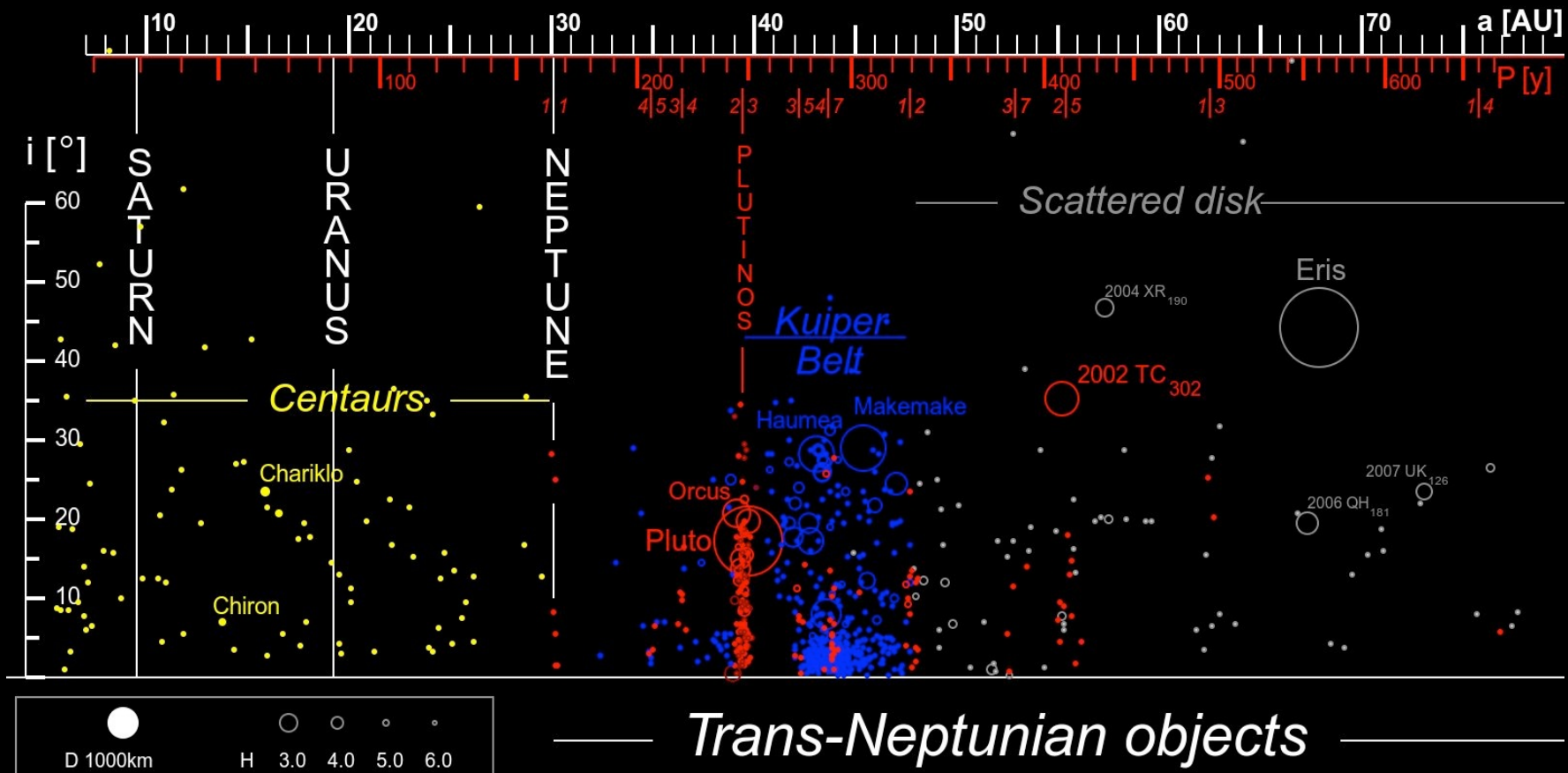


Cinza
Vermelho
Azul

Netuno
Plutão
Orcus

www.wikipedia.com - *Orcus*

Distribuição de corpos no sistema solar



www.wikipedia.com small solar system body

Cometas



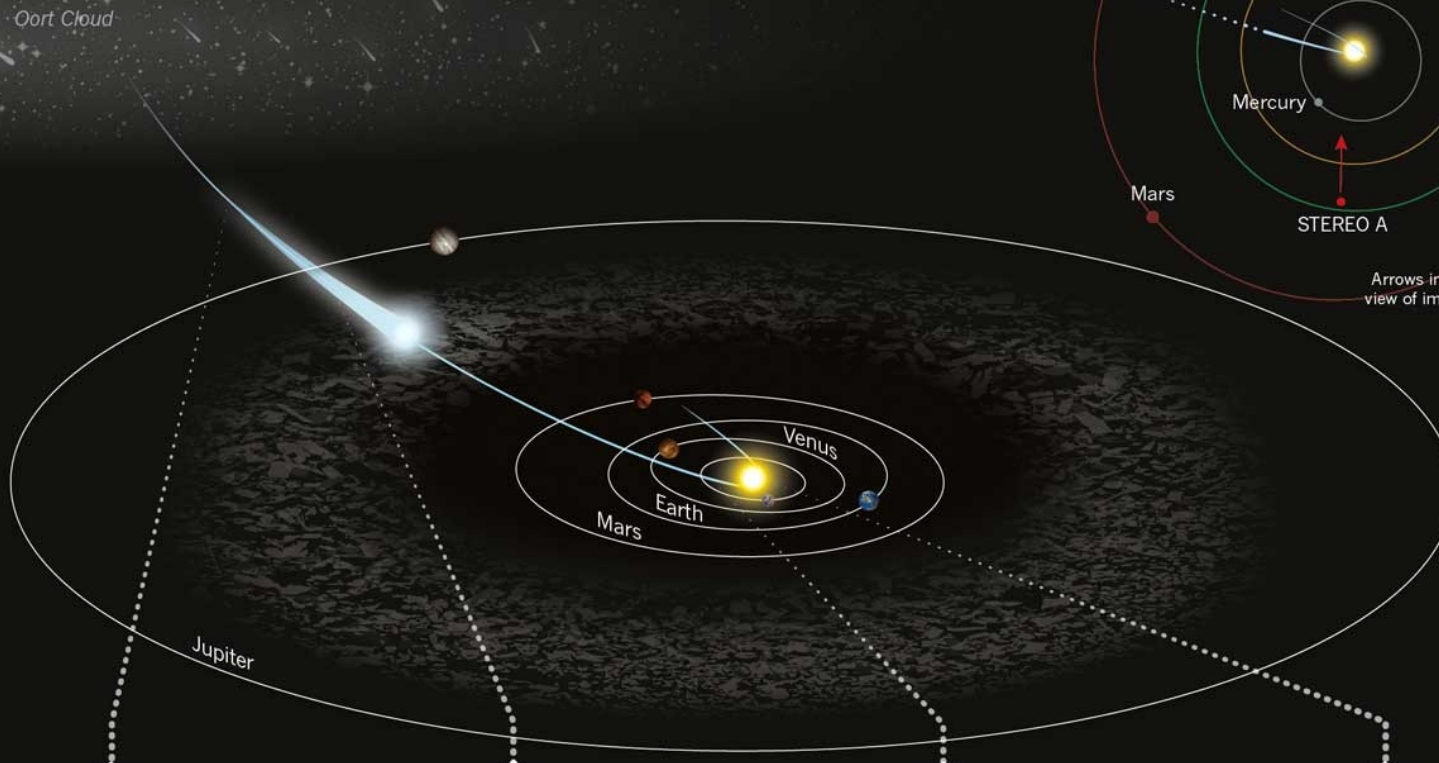
Cometas

- Estrutura:
 - ✓ núcleo: aglomerado de gás e poeira da ordem de quilômetros
 - ✓ coma: material sublimada pela ação do Sol
 - ✓ cauda: material arrastado pelo vento solar - dezenas de milhões de km!
- Cometas de curto período (< 200 anos)
 - ✓ Cinturão de Kuiper (~ 100 UA)
- Cometas de longo período
 - ✓ Nuvem de Oort (~ 100.000 UA; ~ 1.5 ano-luz)
- **Relíquias do tempo de formação do Sistema Solar**

FINAL JOURNEY

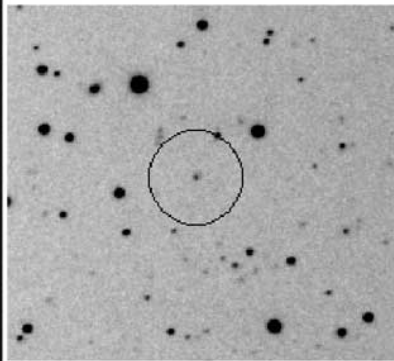
After billions of years hanging out in the distant Oort Cloud, Comet ISON plunged into the inner Solar System last year. Astronomers first caught sight of the comet in 2012, and then used an unprecedented number of telescopes in space to follow its path. Despite hopes that the comet would survive its close encounter with the Sun, ISON disintegrated in late November 2013.

SOLAR TELESCOPES CAPTURE ISON'S DEMISE



21 SEPTEMBER 2012

Amateur astronomers discover ISON beyond the orbit of Jupiter.



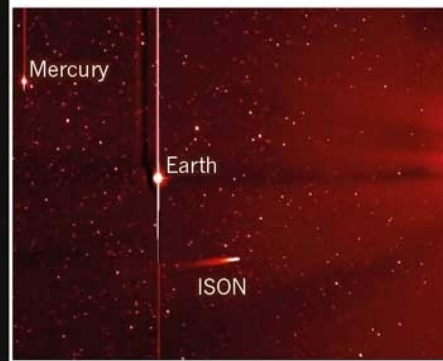
10 APRIL 2013

Hubble images suggest that ISON is not as big as previously thought.



25 NOVEMBER 2013

The STEREO A satellite captures an image of ISON as it passes Earth and Mercury.



28-29 NOVEMBER 2013

A composite of images from the SOHO mission show the remnants of ISON.



Meteoros, ...itos e ...óides

- Meteoróide
 - ✓ corpo sólido que entra na atmosfera
 - ✓ fragmentos de cometas ou asteróides
- Meteoro
 - ✓ fenômeno: quando um meteoróide entra na atmosfera terrestre
- Meteorito
 - ✓ meteoróide que atinge a superfície da Terra
 - ✓ fragmento de asteróide
- Chuva de meteoros
 - ✓ quando a Terra atravessa os rastros de um cometa
 - ✓ determinadas épocas do ano

Chuva de meteoros

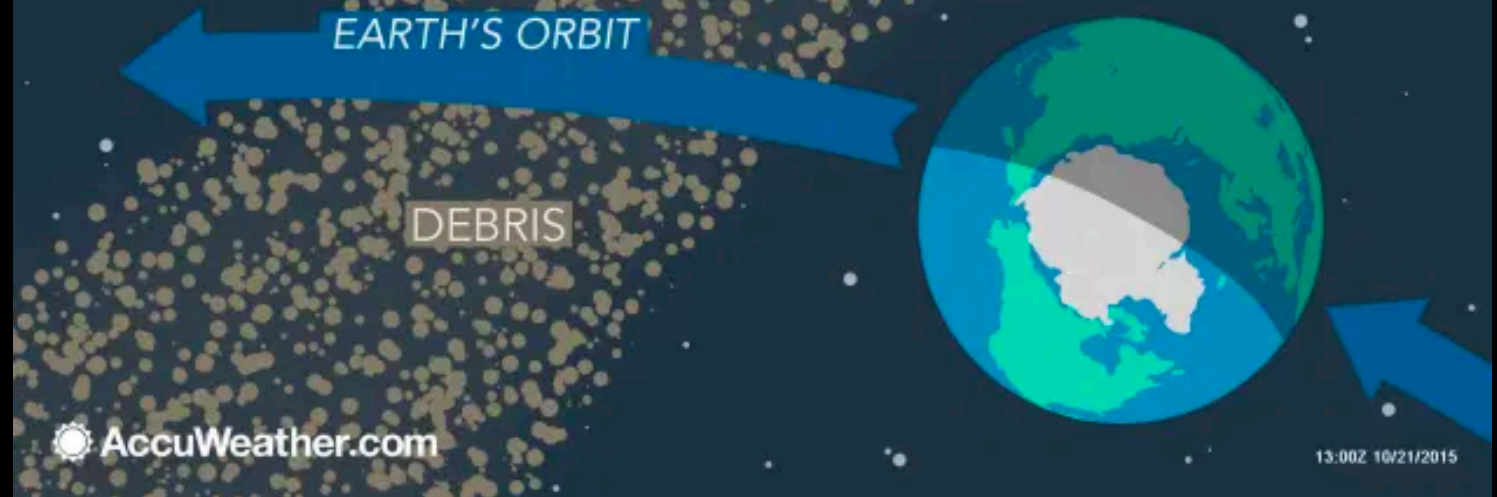


http://www.caosciencia.com/visual/imagen.php?id_img=138

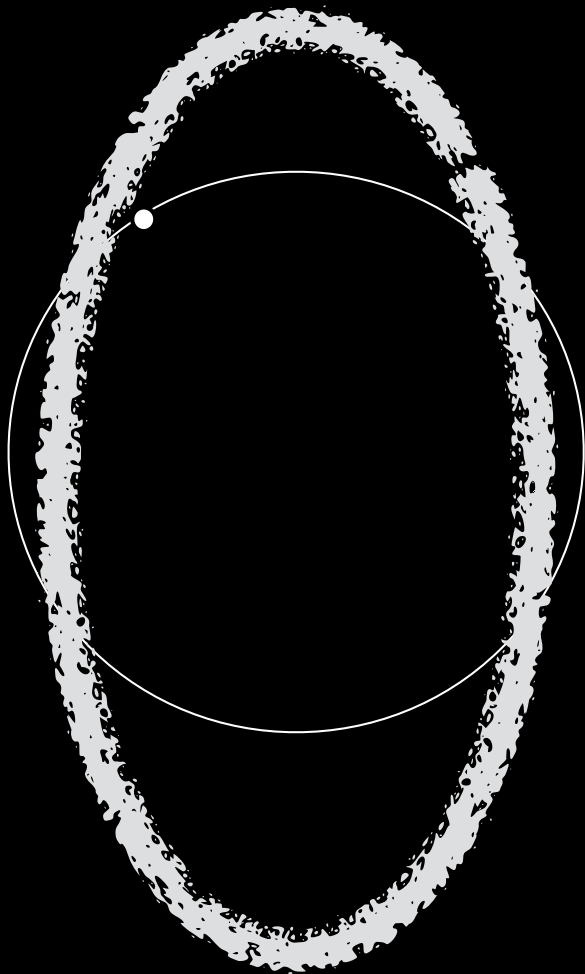


METEOR SHOWER

- The "Shooting Stars" We See When Earth Passes Through A Cometary Or Asteroidal Debris Trail.



<https://www.accuweather.com/en/space-news/why-do-meteors-glow-in-vibrant-colors/433610>

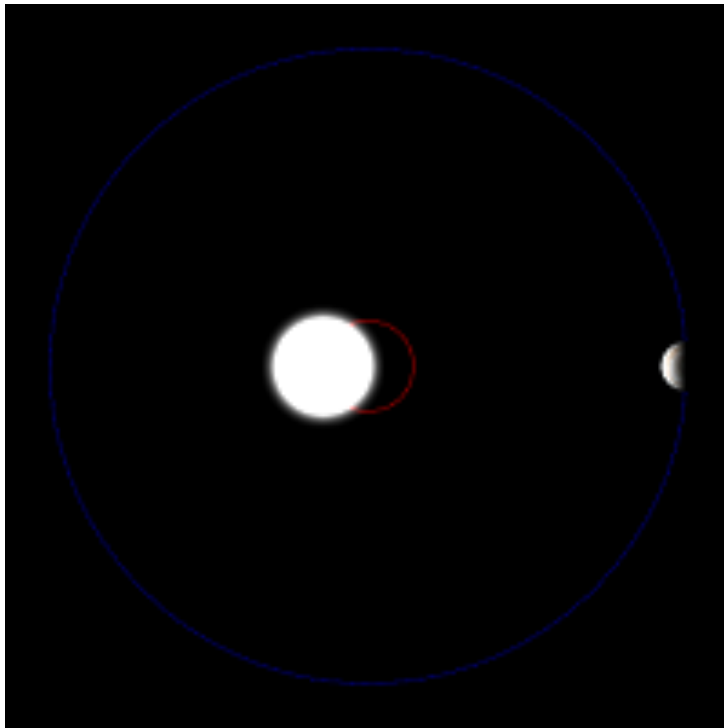


Planetas fora do Sistema Solar: Exoplanetas

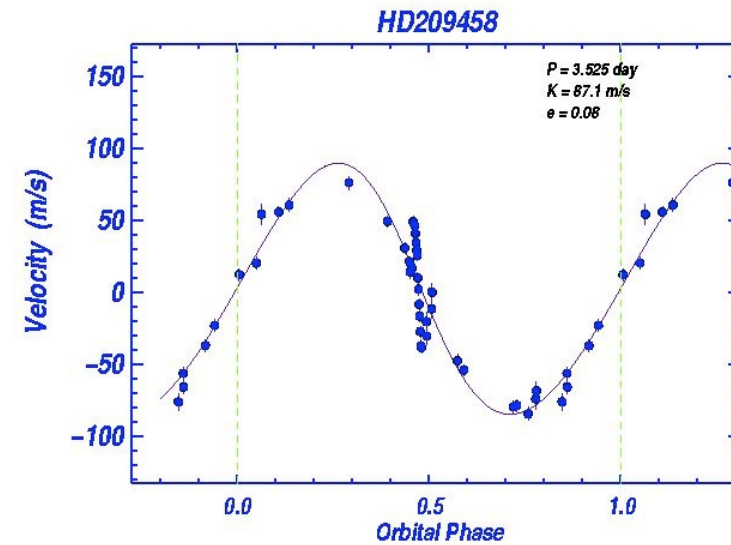
Planetas fora do Sistema Solar

- detecção direta difícil
- detecção indireta
 - ✓ variação da velocidade radial de uma estrela
 - ✓ trânsito de planeta na frente da estrela
 - ✓ variação no brilho de objetos “atrás” de sistemas planetários (lente gravitacional)
- Página sobre exoplanetas
 - ✓ exoplanets.org

Detecção de planetas por variação de velocidade radial



https://en.wikipedia.org/wiki/Radial_velocity

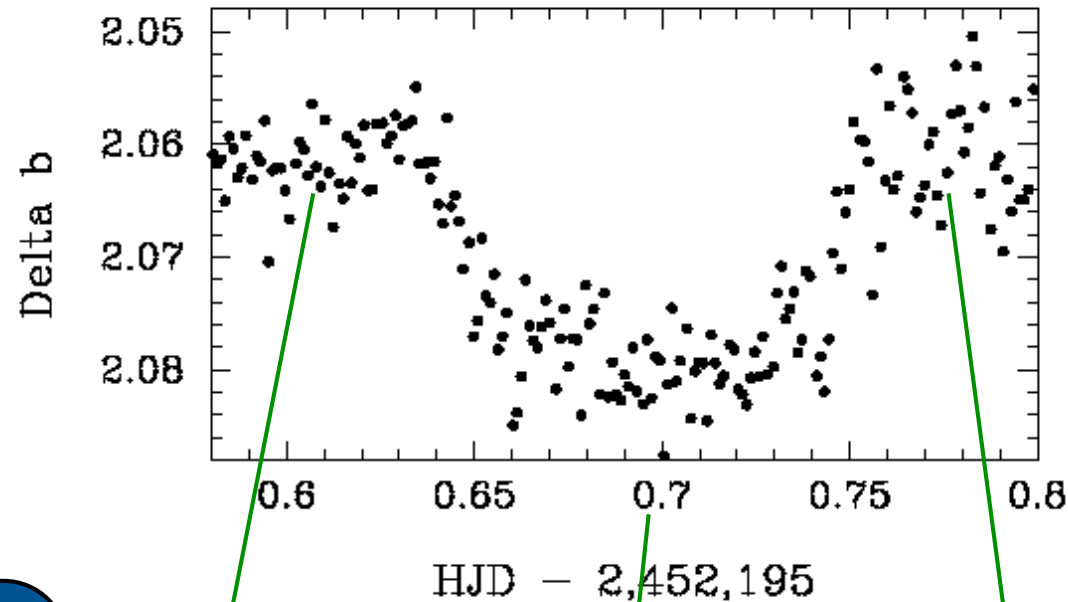


<http://exoplanets.org/>

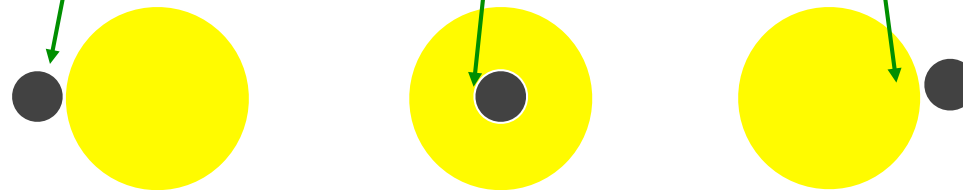
Detecção de planetas por trânsito

<http://exoplanets.org>

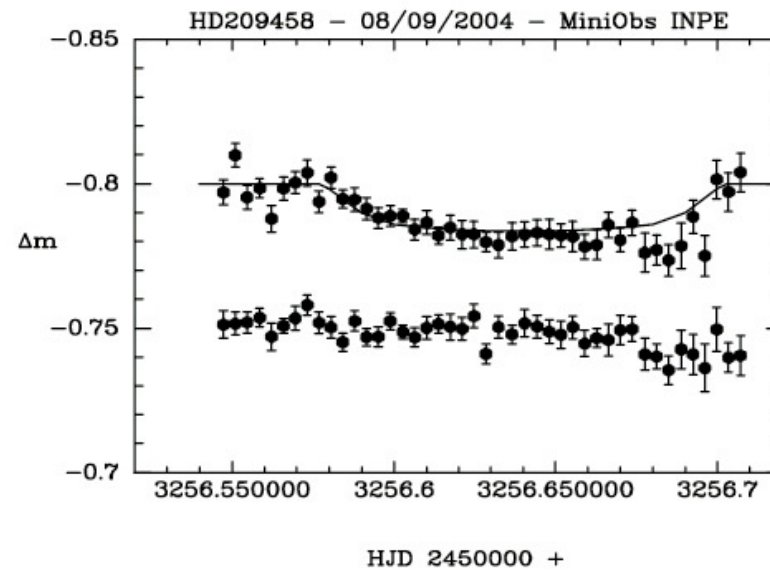
HD209458



Este método é
o utilizado pelo
projeto Kepler



Trânsito de planeta observado no Miniobservatório Astronômico do INPE



Bond et al. 2004
astro-ph/0404309

INPE participa
de consórcio
internacional para
detecção de planetas
via este método

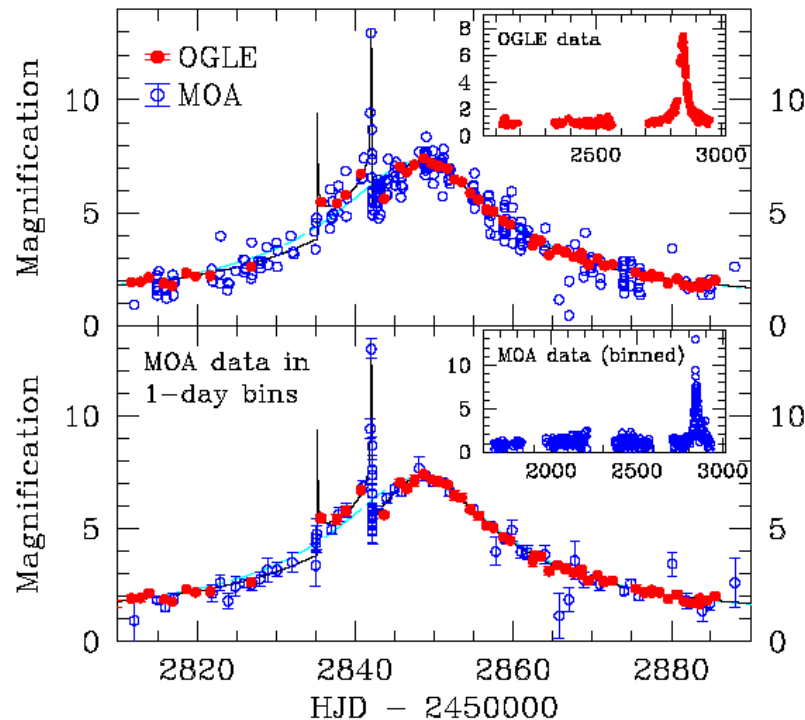
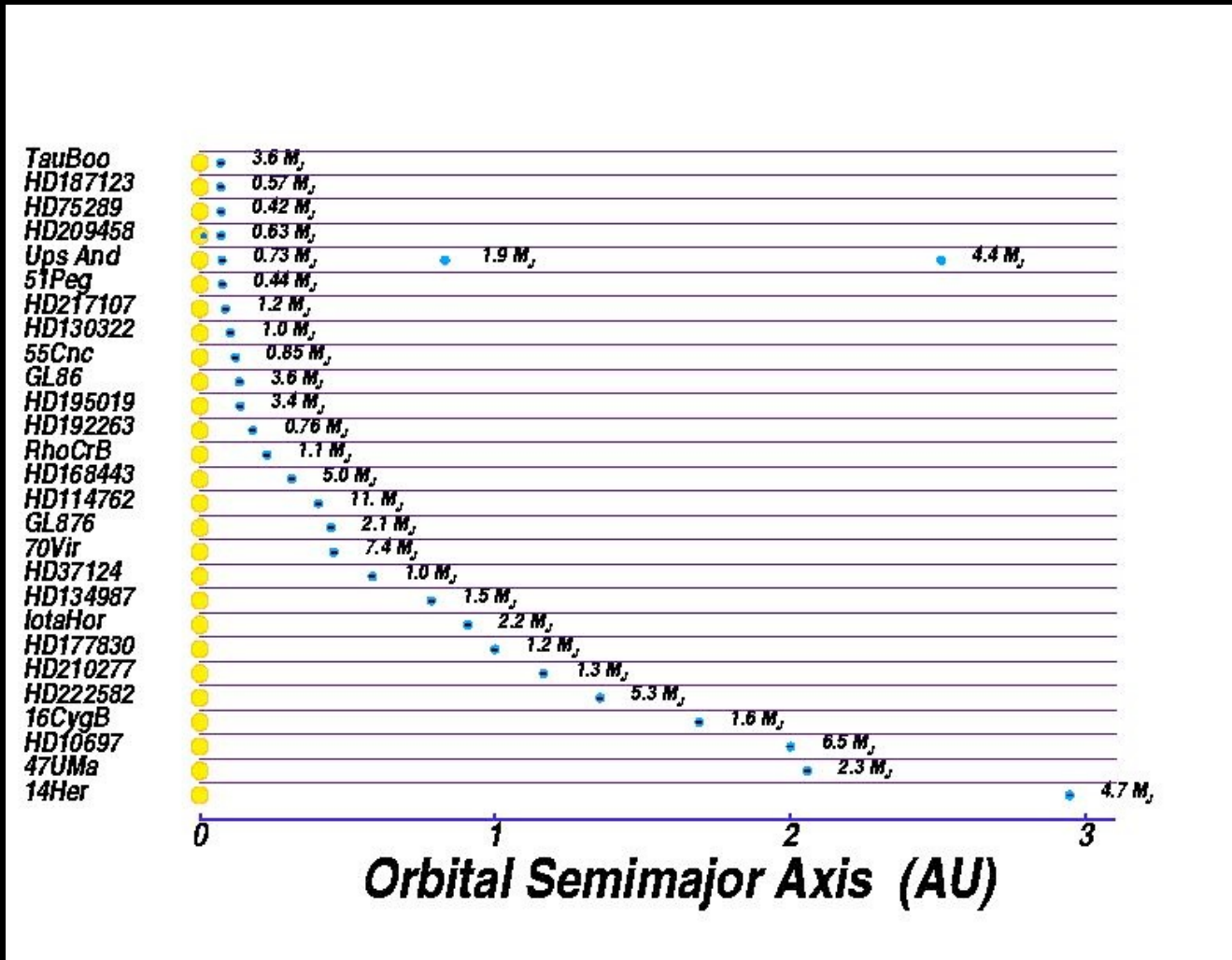
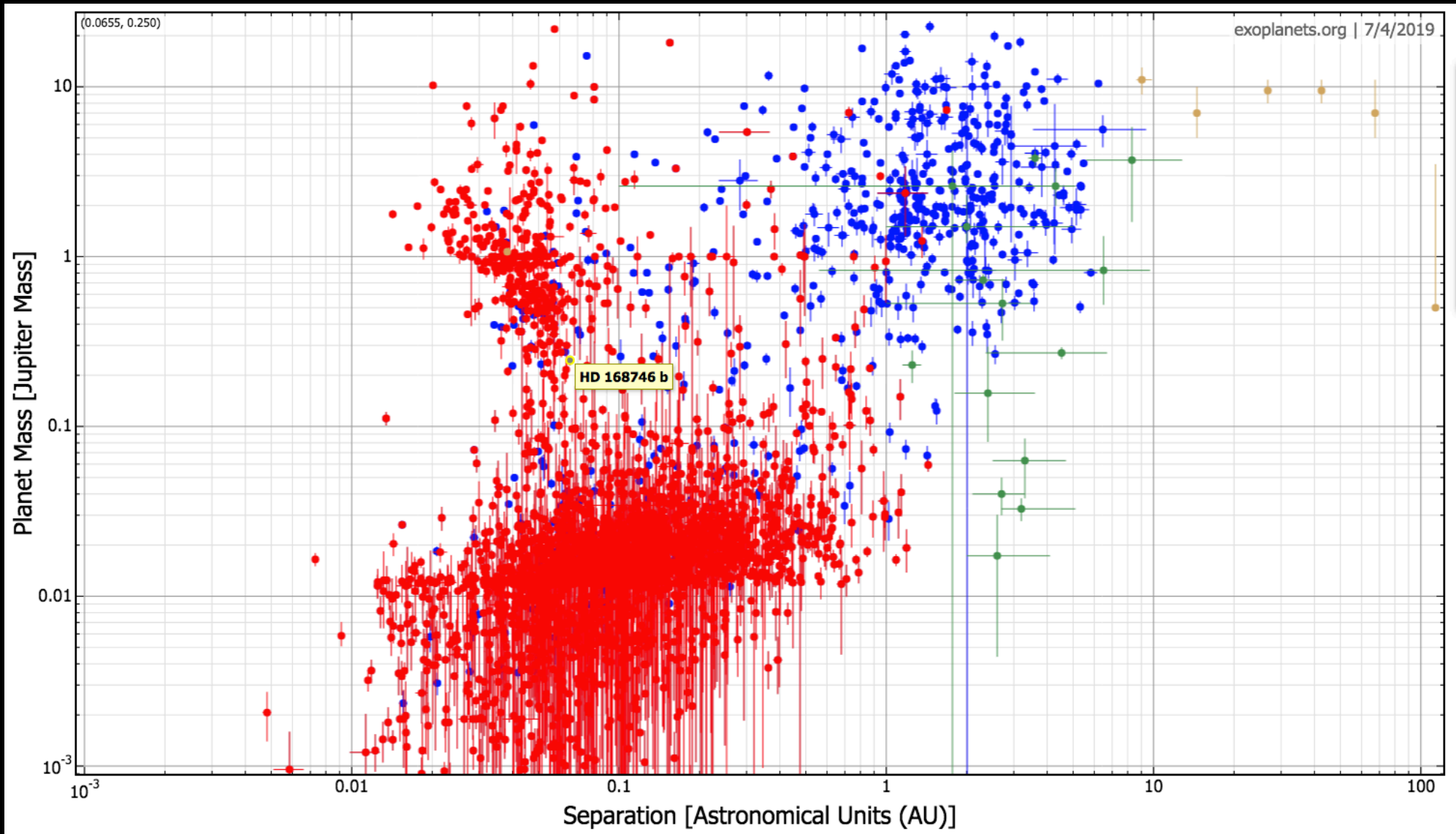


Fig. 1.— Light curve with best fitting and single lens models of O235/M53. The OGLE and MOA measurements are shown as red filled circles and open blue circles, respectively. The top panel presents the complete dataset during 2003 (main panel) and 2001–2003 OGLE data (inset). For clarity, the error bars were not plotted, but the median errors in the OGLE and MOA points legend are indicated. The lower panel is as the top panel but with the MOA data grouped in 1 day bins except for the caustic crossing nights, and with the inset showing MOA photometry during 2000–2003. The binary and single lens fits are plotted in flux units normalized to the unlensed source star brightness of the best planetary fit, and they are indicated by the solid black and cyan dashed curves, respectively.



http://cannon.sfsu.edu/~gmarcy/planetsearch/multi_panel.jpg



Fim