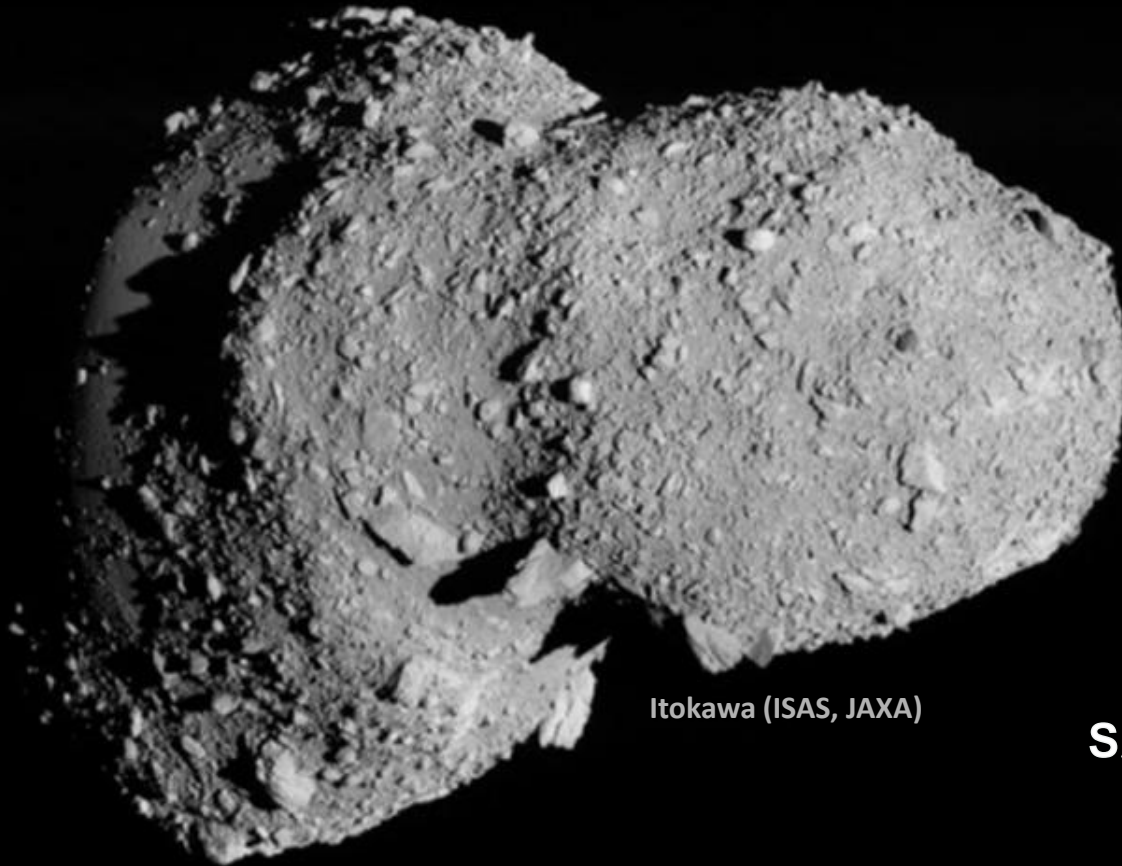


# Conceitos Fundamentais da Física do Sistema Solar (MPA5004)

Enos Picazzio (IAGUSP)



Itokawa (ISAS, JAXA)

## SATÉLITES E ASTERÓIDES

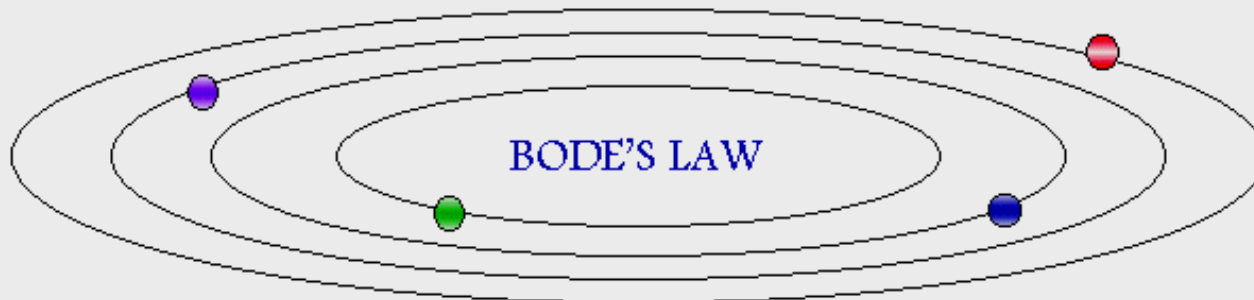
### Parte B: Asteróides

*NÃO HÁ PERMISSÃO DE USO PARCIAL OU TOTAL DESTE MATERIAL PARA OUTRAS FINALIDADES.*

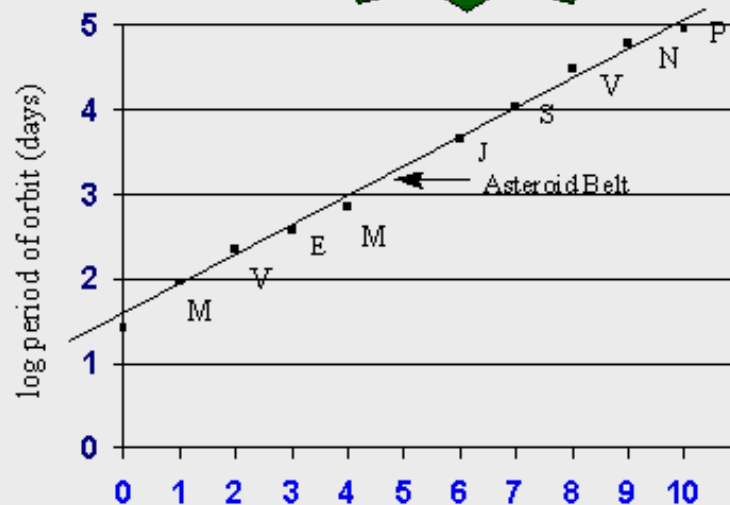
# Relação de Titius-Bode

1766: Johann Titius descobriu a relação entre as distâncias dos planetas.

1788: Johann E. Bode Formulou a expressão matemática dessa relação.



$$P_n = P_o A^n$$



$P_n$  = period of orbit of  $n^{\text{th}}$  planet  
 $P_o$  = period of sun's rotation  
 $A$  = semimajor axis of the orbit

# Relação entre brilho e tamanho

**Magnitude absoluta:** é a magnitude visual que um observador registraria se o asteroide estivesse a 1 U.A dele e do Sol, e ângulo de fase zero, ou seja, **magnitude de um asteroide sob ângulo de fase zero e distâncias heliocêntrica e geocêntrica unitárias. Na prática é um cenário impossível.**

<http://www.physics.sfasu.edu/astro/asteroids/sizemagnitude.html>

Conversion of Absolute Magnitude to Diameter for Minor Planets

Diâmetro

$$D = \frac{1329}{\sqrt{p}} 10^{-0.2H}$$

Magnitude absoluta

Fowler & Chillemi (1992)

Albedo

Nikoletta Sipos and Magdalena Polińska

Asteroid size estimator NASA

[https://cneos.jpl.nasa.gov/tools/ast\\_size\\_est.html](https://cneos.jpl.nasa.gov/tools/ast_size_est.html)

## Relação entre brilho e tamanho

$$H = 15,618 - 5 \times \log(D) - 2,5 \times \log(p_V),$$

$$D = 1329 \times 10^{-H/5} \times (p_V)^{-1/2}$$

H = magnitude absoluta

D = diâmetro do asteroide em km

$p_V$  = albedo do asteroide

(H e  $p_V$  são na luz visível)

Para Vesta (diâmetro = 468,3 km, albedo = 0,423):

$$H = 15,618 - 5 \times \log(468,3) - 2,5 \times \log(0,423) = 3,2$$

$$D = 1329 \times 10^{-3,2/5} \times 0,423^{-0,5} = 468,12 \text{ km}$$

# Magnitude e tamanho

Tabela com diâmetros, admitindo albedo entre 0,25 e 0,05

Absolute Magnitude (H)	Diameter (km = kilometers) (m = meters)	Absolute Magnitude (H)	Diameter (km = kilometers) (m = meters)	Absolute Magnitude (H)	Diameter (km = kilometers) (m = meters)
3.0	670 km - 1490 km	12.0	11 km - 24 km	20.5	210 m - 470 m
3.5	530 km - 1190 km	12.5	8 km - 19 km	21.0	170 m - 380 m
4.0	420 km - 940 km	13.0	7 km - 15 km	21.5	130 m - 300 m
4.5	330 km - 750 km	13.5	5 km - 12 km	22.0	110 m - 240 m
5.0	270 km - 590 km	14.0	4 km - 9 km	22.5	85 m - 190 m
5.5	210 km - 470 km	14.5	3 km - 7 km	23.0	65 m - 150 m
6.0	170 km - 380 km	15.0	3 km - 6 km	23.5	50 m - 120 m
6.5	130 km - 300 km	15.5	2 km - 5 km	24.0	40 m - 95 m
7.0	110 km - 240 km	16.0	2 km - 4 km	24.5	35 m - 75 m
7.5	85 km - 190 km	16.5	1 km - 3 km	25.0	25 m - 60 m
8.0	65 km - 150 km	17.0	1 km - 2 km	25.5	20 m - 50 m
8.5	50 km - 120 km	17.5	1 km - 2 km	26.0	17 m - 37 m
9.0	40 km - 90 km	18.0	670 m - 1500 m	26.5	13 m - 30 m
9.5	35 km - 75 km	18.5	530 m - 1200 m	27.0	11 m - 24 m
10.0	25 km - 60 km	19.0	420 m - 940 m	27.5	8 m - 19 m
10.5	20 km - 50 km	19.5	330 m - 750 m	28.0	7 m - 15 m
11.0	15 km - 40 km	20.0	270 m - 590 m	28.5	5 m - 12 m
11.5	13 km - 30 km			29.0	4 m - 9 m
12.0	11 km - 24 km			29.5	3 m - 7 m
				30.0	3 m - 6 m

# Condição para forma esferoidal

## Forma

Seja:  $l$  = altura de uma coluna de área unitária;

$\rho$  = densidade de massa

$P_c$  = pressão crítica

$$P_c = \rho l g$$

Então:  $P_c = \frac{F}{A} = \frac{m g}{A} = \frac{\rho V g}{A} = \frac{\rho l A g}{A} \Rightarrow g = \frac{P_c}{l \rho}$  [1]

Lei de gravitação universal:  $g = \frac{GM}{R^2} = \frac{4/3 \pi G R^3 \rho}{R^2} = \frac{4}{3} \pi G R \rho$  [2]

Tomando a razão entre os "g" do corpo e da Terra:  $\frac{g}{g_t} = \frac{R}{R_t} \times \frac{\rho}{\rho_t}$  [3]

[1] em [3]:  $\frac{P_c}{l \rho g_t} = \frac{R}{R_t} \frac{\rho}{\rho_t}$  ou  $R l = \frac{1}{\rho^2} \frac{P_c R_t \rho_t}{g_t}$

O raio crítico obtém-se fazendo  $l = R$ ; logo:  $R_c = \frac{1}{\rho} \left( \frac{P_c R_t \rho_t}{g_t} \right)^{1/2}$

Como  $P_c = 10^9$  dina  $\text{cm}^{-2}$  para materiais ordinários e  
 $\langle \rho \rangle = 4$  g  $\text{cm}^{-3}$  para asteróides,

$$R_c = 150 \text{ km} \rightarrow \text{Corpos menores são irregulares}$$



# Asteróides do Cinturão

Asteróide (descoberta)	Diâmetro (km)	Rotação (horas)	Excentricidade	Albedo	Tipo (2)
Pallas (1802)	583	7,9	0,23	0,09	M
Juno (1804)	249	7,2	0,26	0,16	S
Vesta (1807)	555	5,3	0,09	0,26	S
Astraea (1845)	116	16,8	0,19	0,13	S
Hebe (1847)	206	7,3	0,20	0,16	S
Iris (1847)	222	7,1	0,23	0,2	S
Elora (1847)	160	13,6	0,16	0,13	S
Metis (1848)	168	5,1	0,12	0,12	S
Higiea (1849)	443	18	0,12	0,05	C
Eros (1898)	20	5,3	0,22	0,18	S
Aquiles (1906)	70		0,15		
Hektor (1907)	230	6,9	0,03	0,03	C
Hidalgo (1920)	30	10,1	0,66		M
Amor (1932)	5?		0,43		
Icarus (1949)	2	2,3	0,83		
Appolo (1932)	2,5		0,56		
Chiron (1977)	320		0,38		

M – metálico

S - rochoso rico em silício

C - rochoso rico em carbono

## Características

Tipo	C	M	S
Abundância	60%	≤ 10%	≈ 30%
Composição predominante	C + Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	metais	silicatos
Albedo	< 5%	≈ 10%	≈ 15%
Cor	escuros	intermediário	claros
Posição	cinturão externo (próximo de Júpiter)	cinturão intermediário	cinturão interno (próximo de Marte)

Material primitivo que não formou planeta?  
Material originado de desintegração?



# Categorias Principais

Classificados em vários tipos de acordo com a composição química (revelada pelo seu espectro) e o albedo:

## – tipo C:

- cerca de 60% dos asteróides conhecidos
- extremamente escuros (albedo 0,03)
- semelhantes aos meteoritos condritos carbonáceos
- tem aproximadamente a mesma composição química do Sol, menos hidrogênio, hélio e outros voláteis

## – tipo S:

- cerca de 30% dos conhecidos
- relativamente brilhantes (albedo 0,10 - 0,22)
- contém material metálico (liga ferro-níquel) e silicatos de magnésio

## – tipo M:

- o restante  $\leq 10\%$
- brilhantes (albedo 0,10 - 0,18);
- formados essencialmente da liga ferro-níquel

– há outros tipos mais raros

# Asteróides

**Conhecidos:** ~ 40.000 (maiores que 1 km)

**Total:** incalculável (depende do tamanho)

**Maioria** está no Cinturão Principal

**CINTURÃO** - Distância média do Sol: 2.8 UA

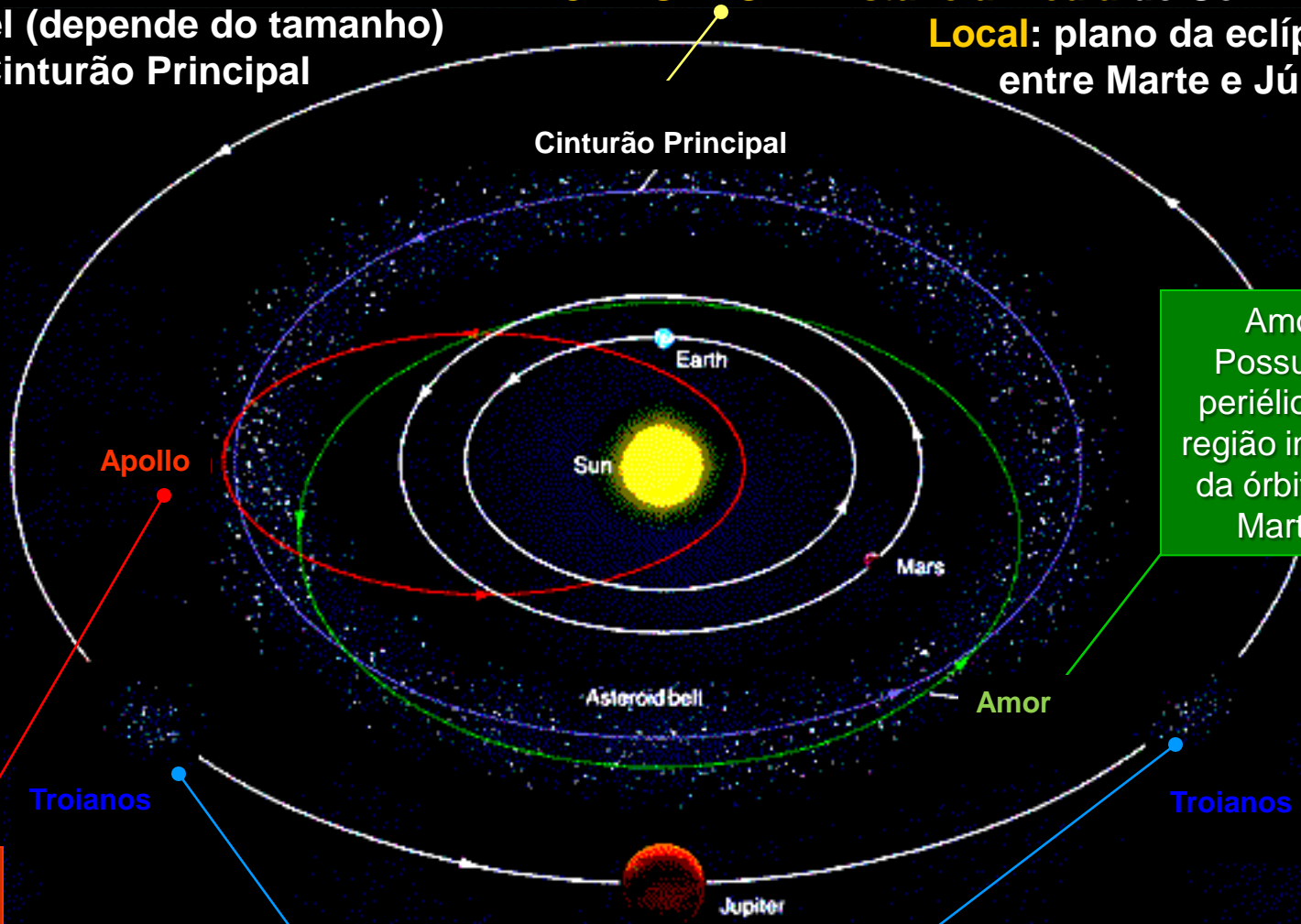
**Local:** plano da eclíptica, entre Marte e Júpiter.

subgrupos:  
Hungarias,  
Floras,  
Phocaea,  
Koronis,  
Eos,  
Themis,  
Cybeles e  
Hildas

*Nomes derivados dos principais asteróides do grupo.*

**Apollo**

Possuem periélio dentro da região interna à órbita da Terra. São de origem recente.



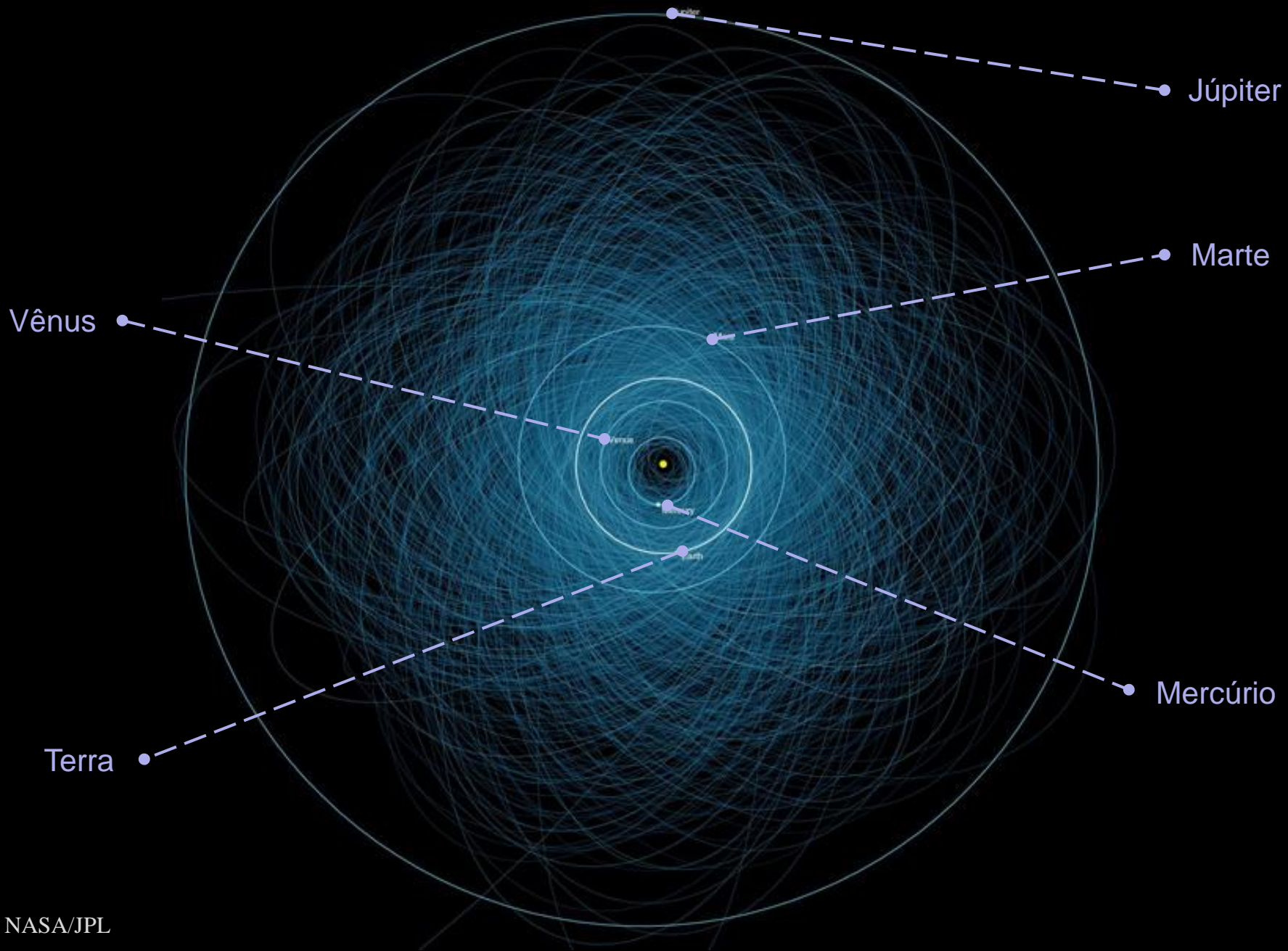
**Amor**

Possuem periélios na região interna da órbita de Marte.

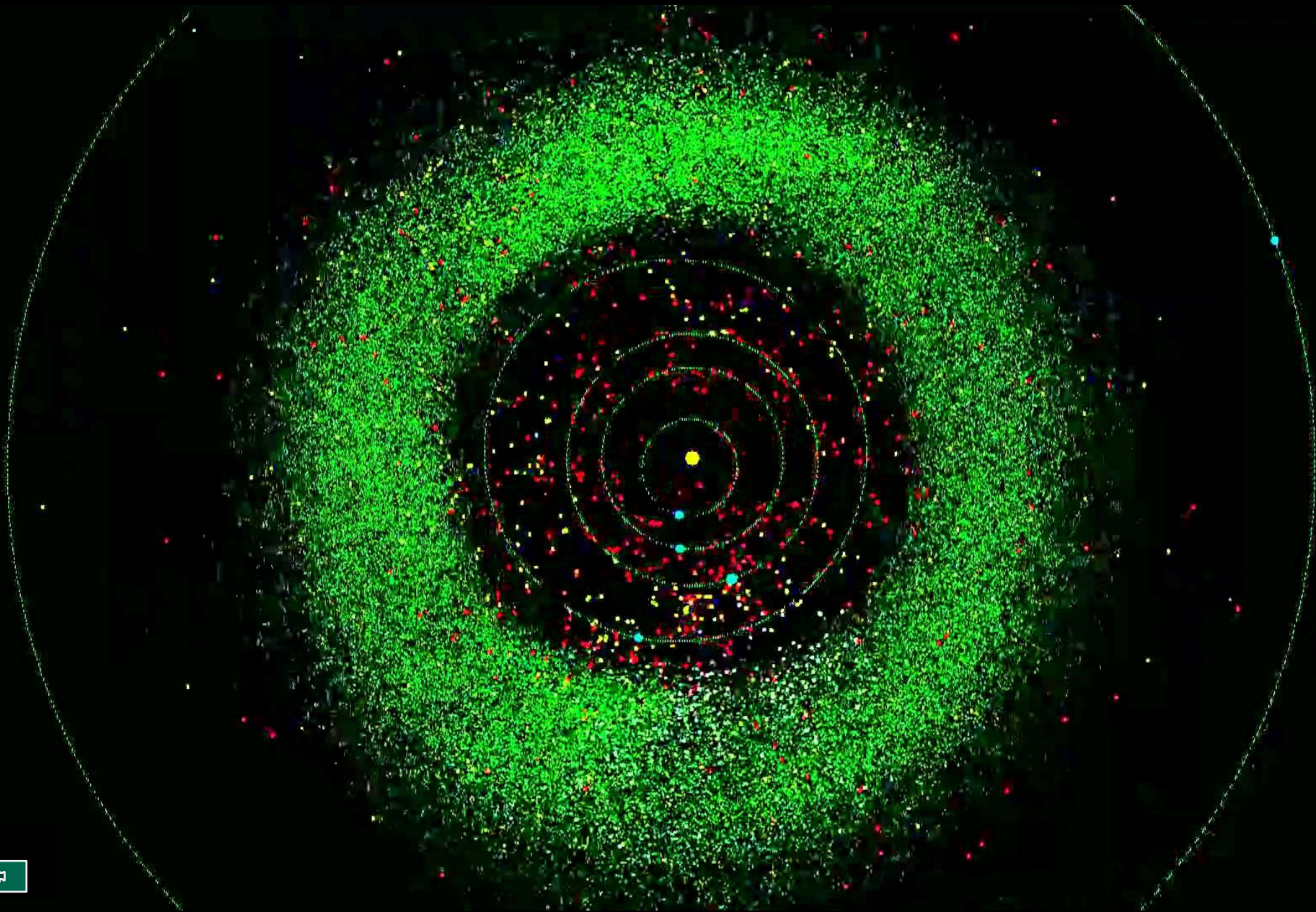
**Troianos**

Localizam-se na mesma órbita de Júpiter, nos pontos Lagrangianos, a 60° adiante e atrás do planeta.

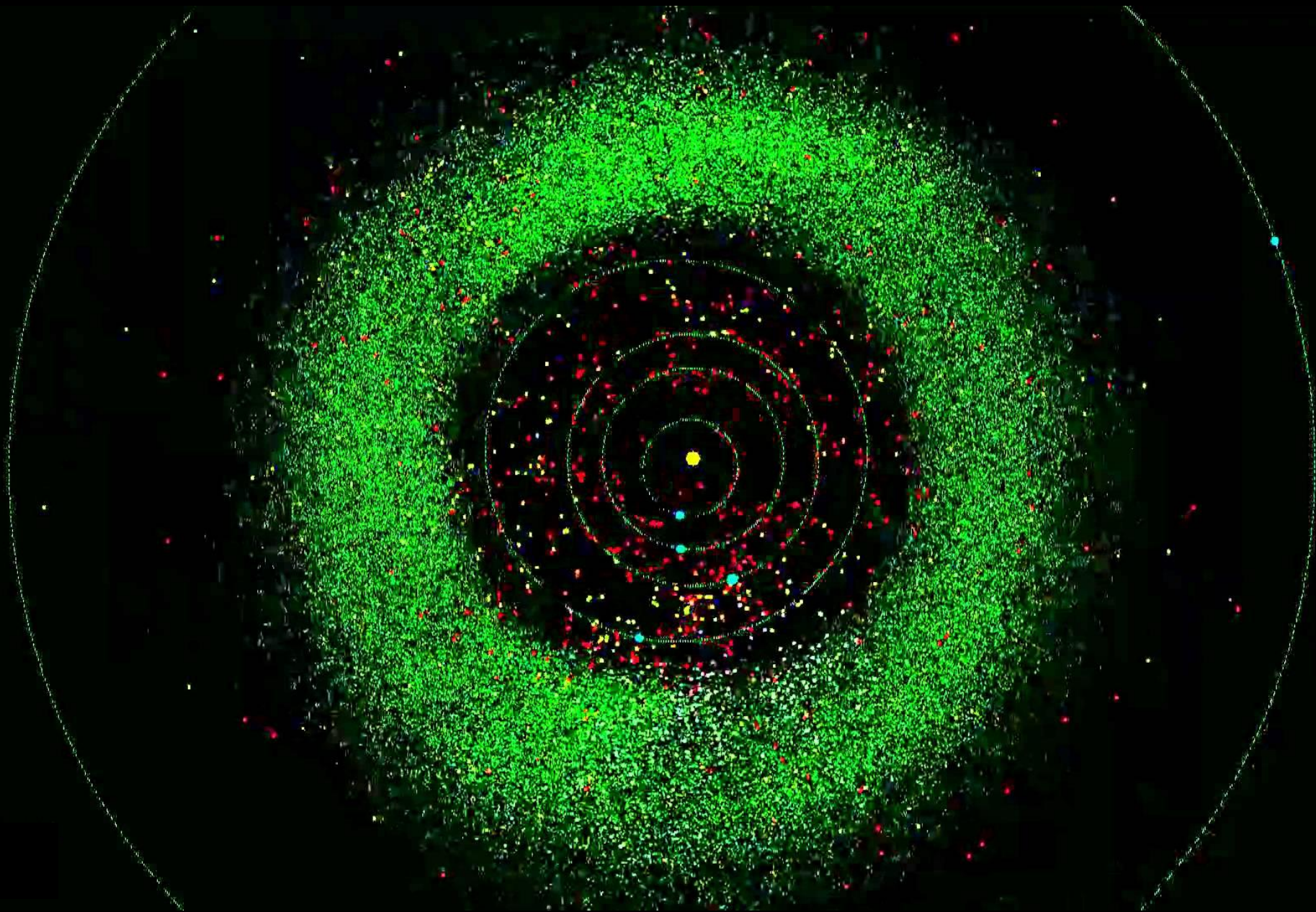
# Asteróides



# Asteróides



# Asteróides



# Asteróides do Cinturão Principal

- Massa total no Cinturão: ~ 1 milésimo da massa terrestre
- Mais de 40.000 já são conhecidos . Centenas deles são descobertos anualmente.
- 26 deles têm mais que 200 km de diâmetro
  - Estima-se que conheçamos ~99% dos asteróides maiores que 100 km de diâmetro.
- **1 Ceres** foi o maior asteróide dessa região, hoje é planeta-anão
  - ~ 933 km de diâmetro; acumula ~ 25% da massa total estimada dos asteróides combinados
- **2 Pallas, 4 Vesta e 10 Hygiea**
  - Diâmetros entre 400 e 525 km
- Os demais asteróides são menores que 340 km

# Asteróides do Cinturão – os mais conhecidos

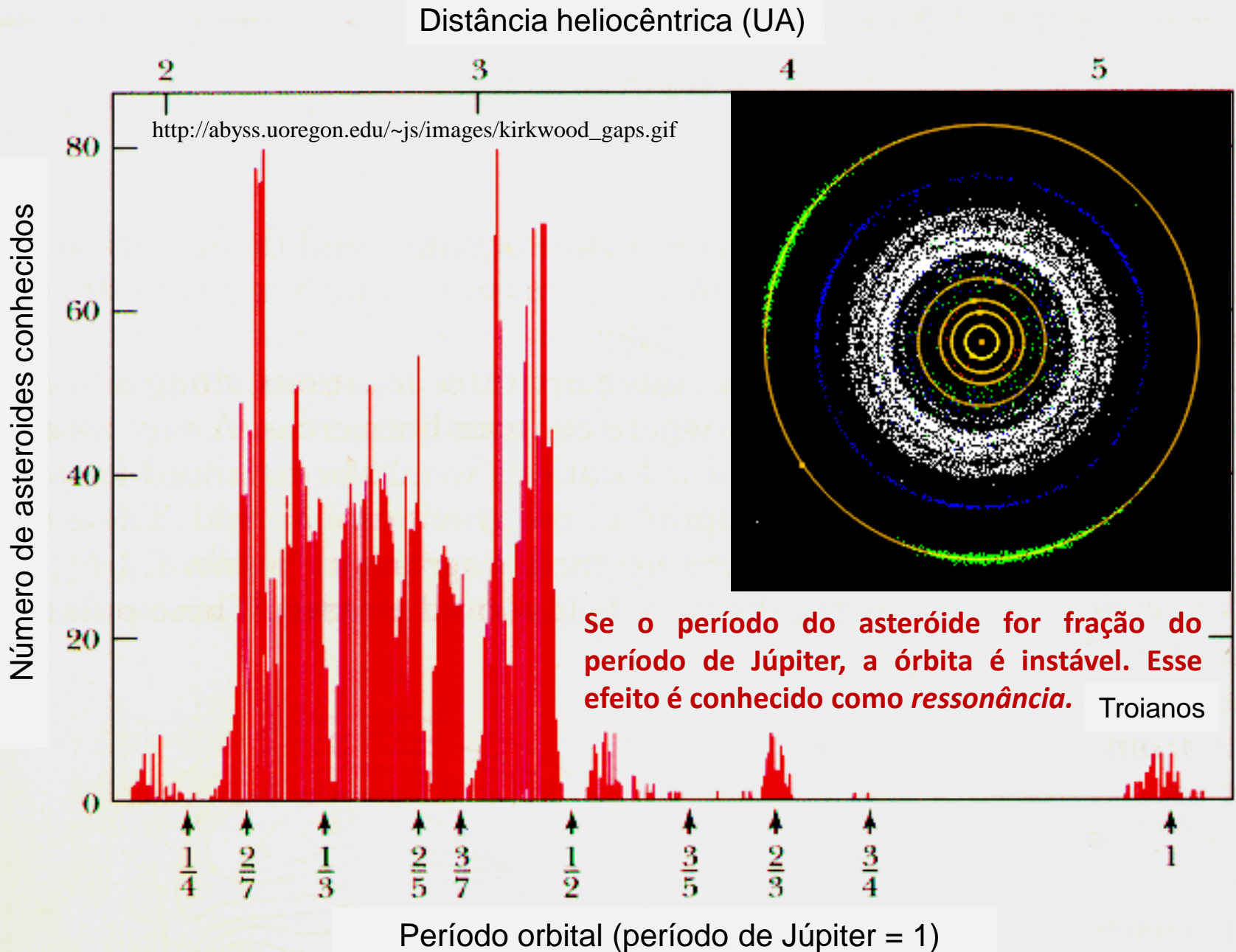
Asteróides	Diâmetro (km)	Massa ( $10^{15}$ kg)	Rotação (horas)	Distância do Sun (U.A.)	Período Orbital (anos)
1 Ceres <b>Planeta-anão</b>	960 x 932	870,000	9.075	2.767	4.60
2 Pallas	570 x 525 x 482	318,000	7.811	2.774	4.61
3 Juno	240	20,000	7.210	2.669	4.36
4 Vesta	530	300,000	5.342	2.362	3.63
45 Eugenia	226	6,100	5.699	2.721	4.49
140 Siwa	103	1,500	18.5	2.734	4.51
243 Ida	58 x 23	100	4.633	2.861	4.84
433 Eros	33 x 13 x 13	6.69	5.270	1.458	1.76
951 Gaspra	19 x 12 x 11	10	7.042	2.209	3.29
1862 Apollo	1.6	0.002	3.063	1.471	1.81
2060 Chiron	180	4,000	5.9	13.633	50.7

- **Propriedades genéricas:**

- Baixas excentricidades (0.1)
- Baixas inclinações (0.1)
- Baixos albedos (escuros), tipicamente
  - 0,04 (C ou tipo carbonáceo) ou
  - 0,2 (S ou silicatosos = rocha e M ou metálicos).
- Fortemente marcado por crateras, superfícies antigas
- Formas assimétricas
- Muitos consistem de material diferenciado (p.e. Vesta)
- Metálicos e rochosos são descobertos próximos ao Sol, enquanto os menos diferenciados são descobertos a distâncias maiores.

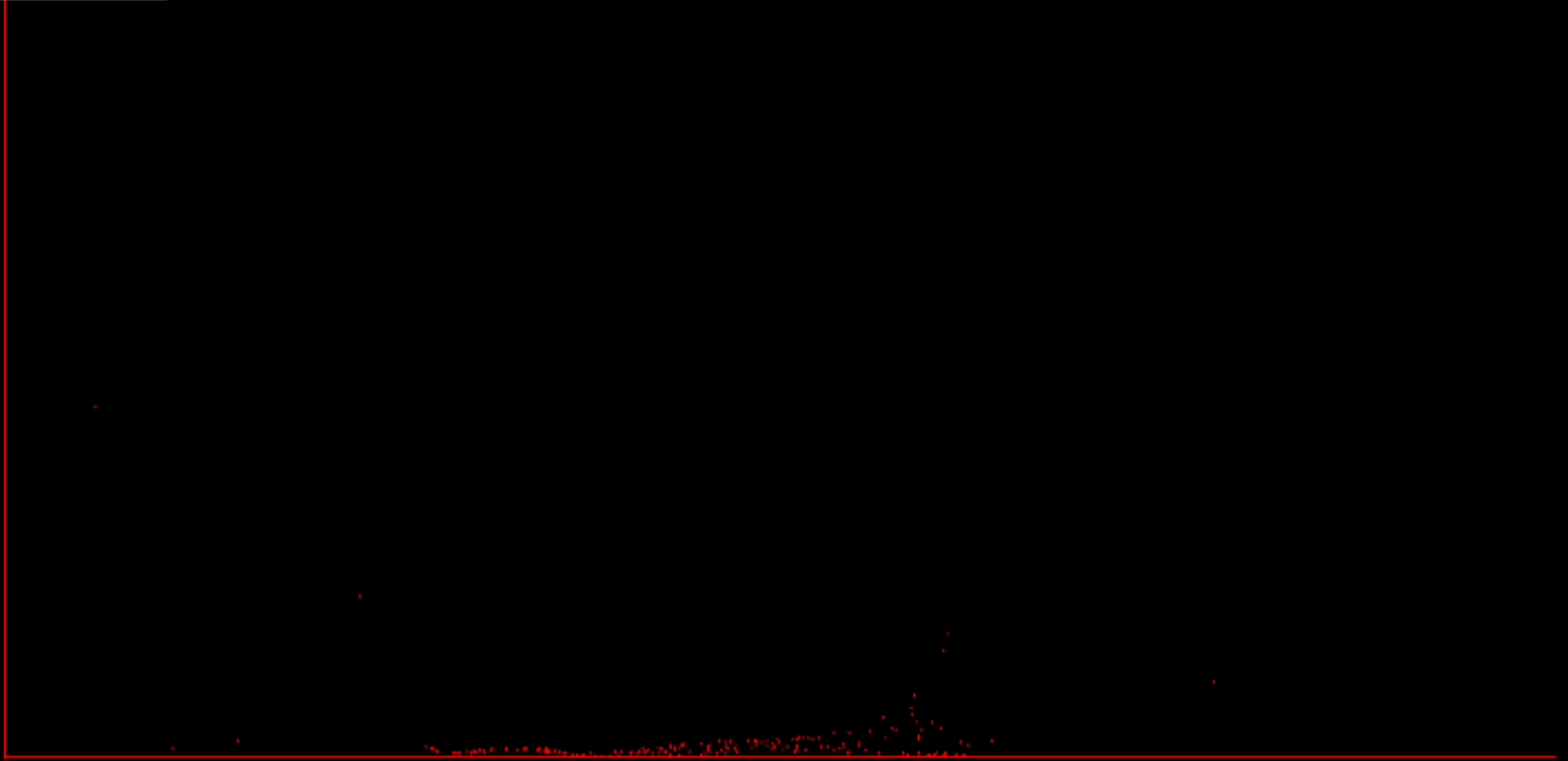


# Asteróides do Cinturão – Lacunas de Kirkwood



# Asteróides do Cinturão – Ressonância gravitacional

Object 2000 QJ150  
Object 2000 QJ150 2024 09 29 22:18:11



<http://www.orbitsimulator.com/cgi-bin/yabb/YaBB.pl?num=1222072355>

# Asteróides do Cinturão – Ressonância gravitacional

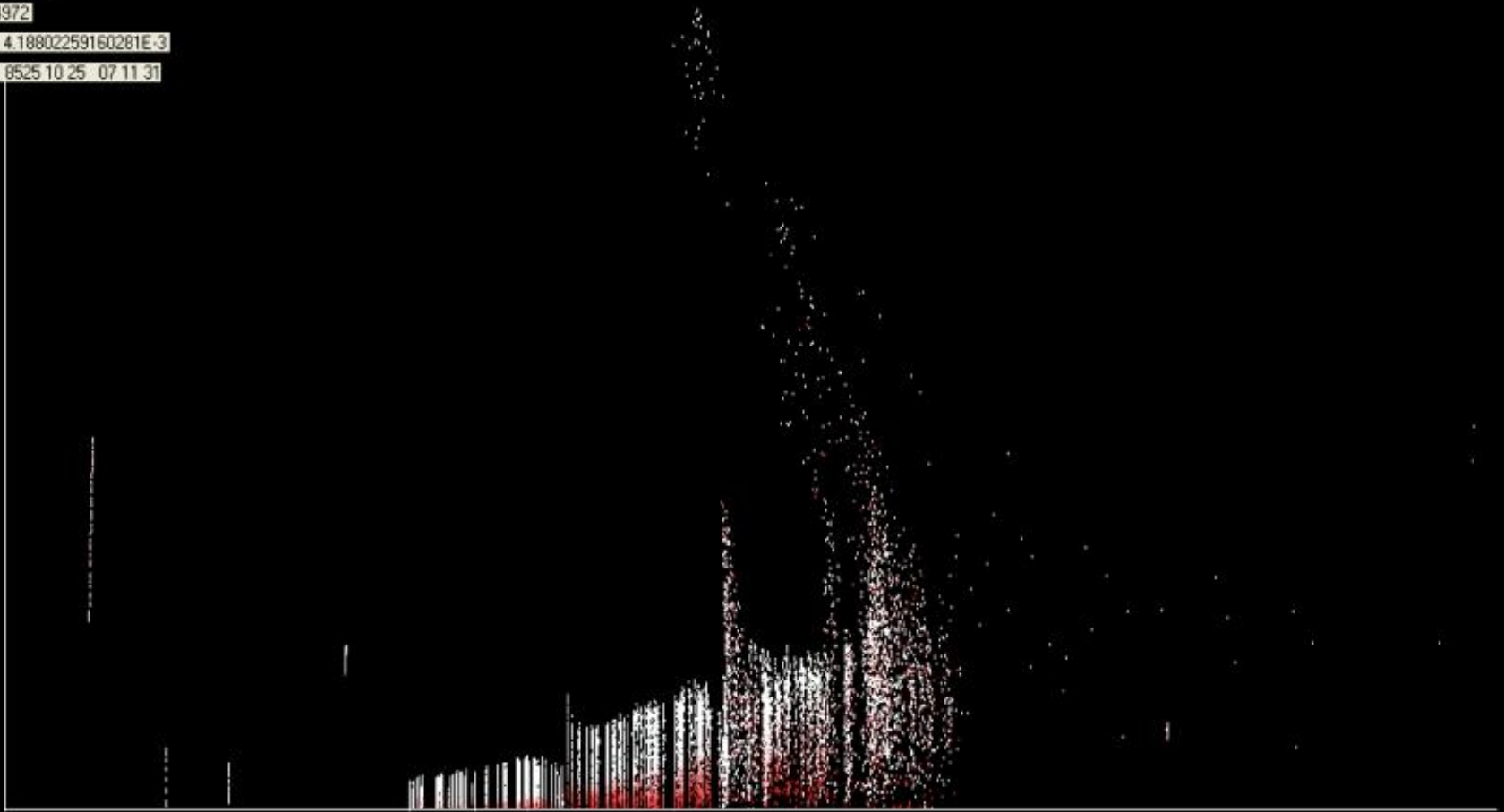
654 8555 10 27 09 00 19 606

.056060585842481E-2

.252370848214972

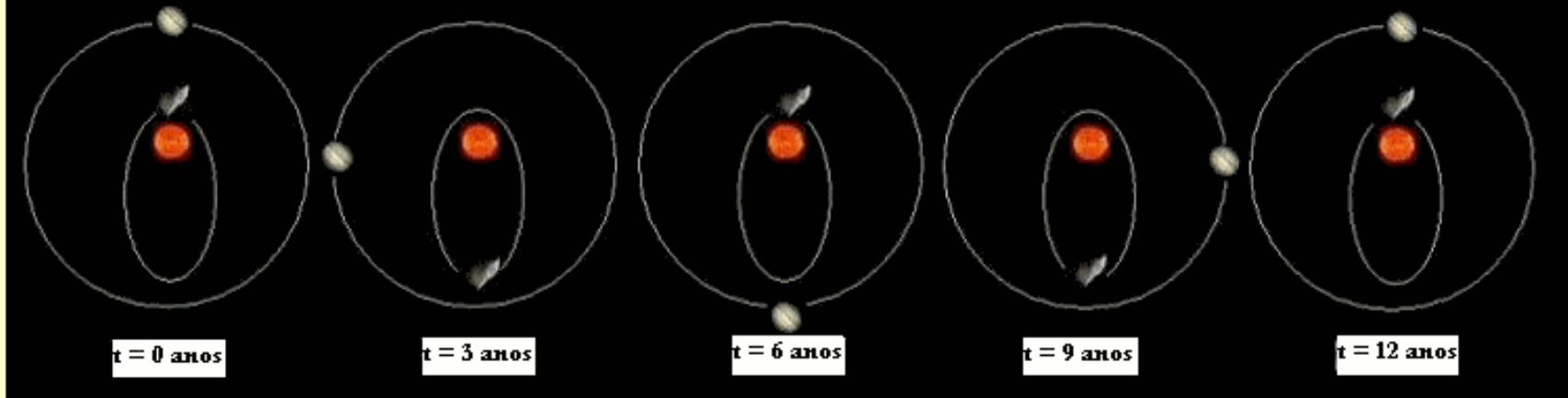
610 0 ject 200 4.18802259160281E-3

610 0 ject 200 8525 10 25 07 11 31



# Asteróides do Cinturão – Ressonância orbital

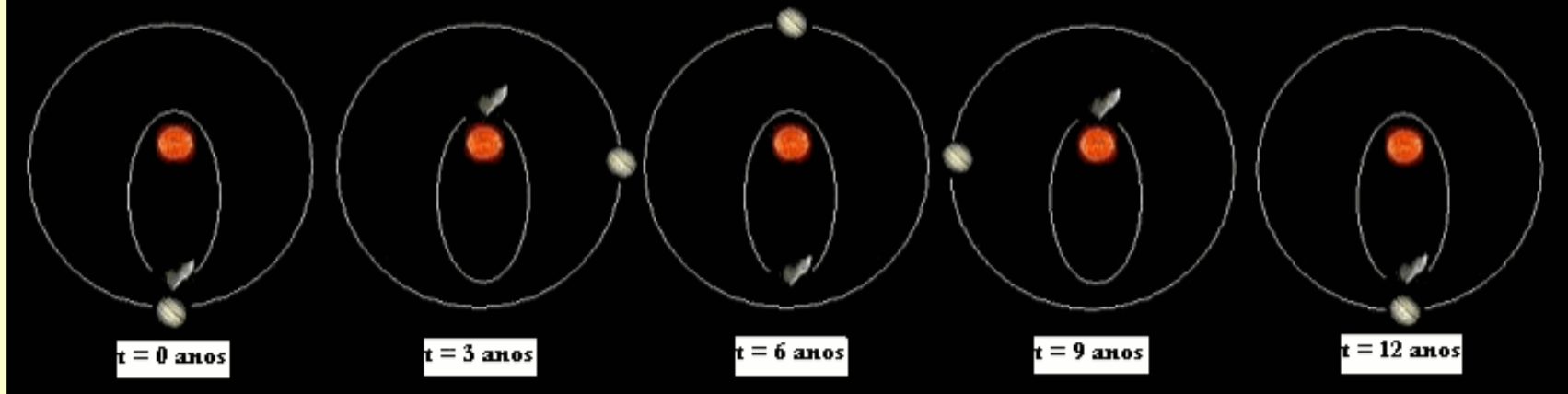
Ressonância 2:1 - configuração estável



Nas duas figuras temos duas configurações possíveis para a ressonância orbital 2:1 entre um asteróide da cintura (órbita elíptica) e Júpiter (órbita circular). No primeiro caso, 1ª figura, no instante inicial o asteróide e Júpiter estão em conjunção no periélio das suas órbitas; Ao fim de um quarto do período de Júpiter, o asteróide está no afélio da sua órbita, o ponto em que esta mais se aproxima da órbita de Júpiter, mas Júpiter está longe; Ao fim de metade do período orbital de Júpiter, o asteróide volta ao seu periélio, agora com Júpiter do lado oposto do Sol e ao fim de 3/4 desse período o asteróide regressa à posição de máxima proximidade com a órbita de Júpiter, mas mais uma vez também neste caso Júpiter está longe. Isto corresponde a uma configuração estável desta ressonância, porque, embora exista a possibilidade de encontros próximos entre Júpiter e o asteróide, esses encontros são evitados pelo mecanismo da ressonância e as perturbações dominantes compensam-se ao longo do tempo.

# Asteróides do Cinturão – Ressonância orbital

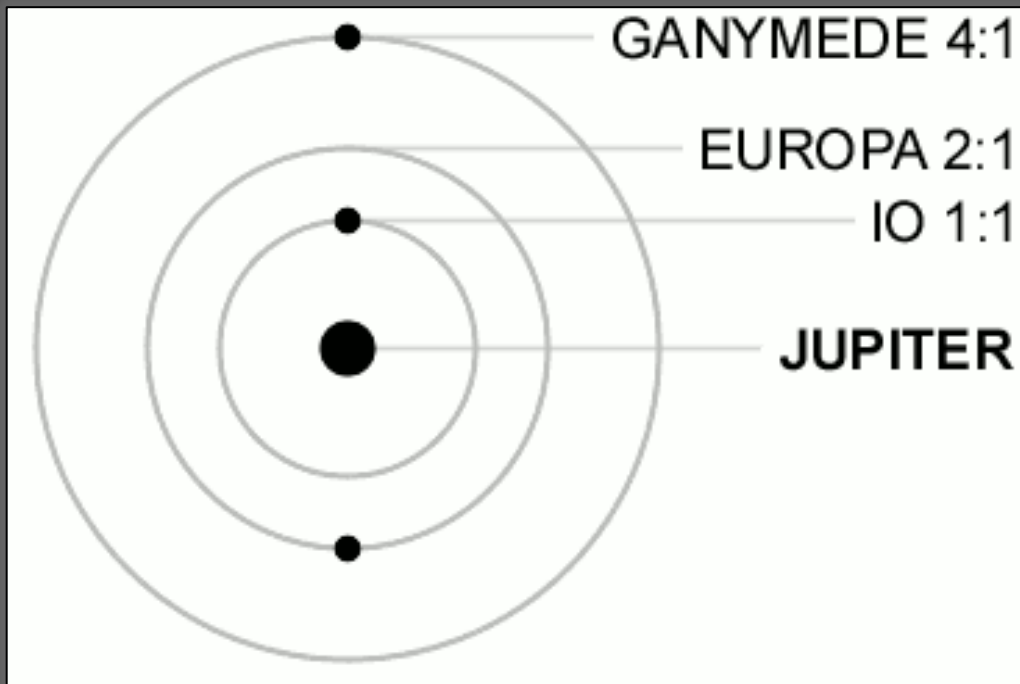
Ressonância 2:1 - configuração instável



Pelo contrário, no segundo caso, 2ª figura, no instante inicial o asteróide e Júpiter estão em conjunção no afélio da sua órbita, e os encontros próximos, envolvendo grandes perturbações da órbita do asteróide, sucedem-se em cada período orbital de Júpiter. Este segundo caso corresponde a uma configuração instável da ressonância 2:1.

# Ressonância nos satélites galileanos

**Ressonância gravitacional:** processo em que corpos sofrem solavancos regulares de seus vizinhos. Esses solavancos se somam e produzem alterações nas órbitas dos objetos.



## Ressonância

**Io** completa 2 voltas enquanto **Europa** completa 1.

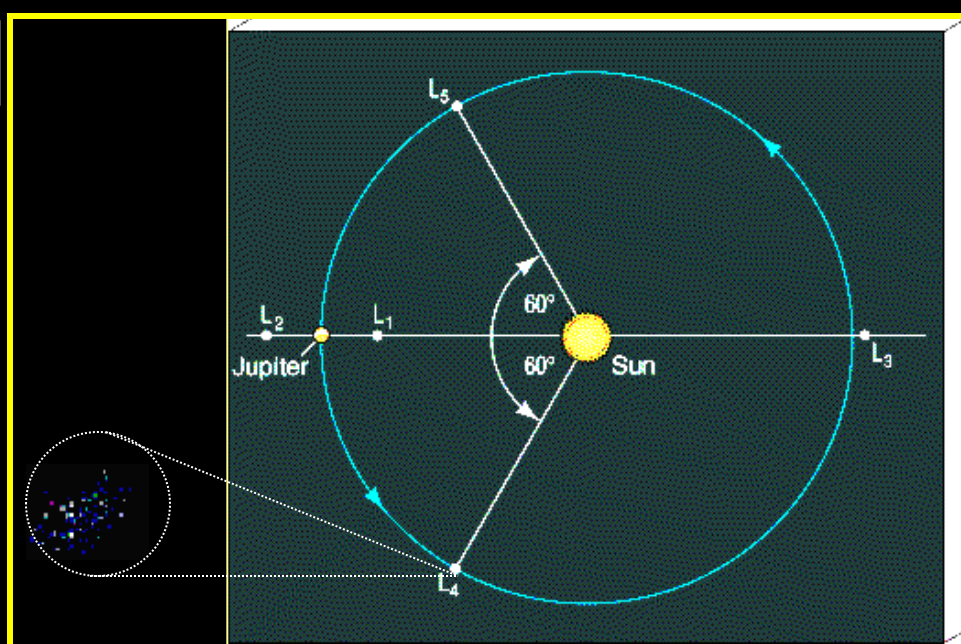
**Io** completa 4 voltas enquanto **Ganimedes** completa 1.

# Asteróides Troianos

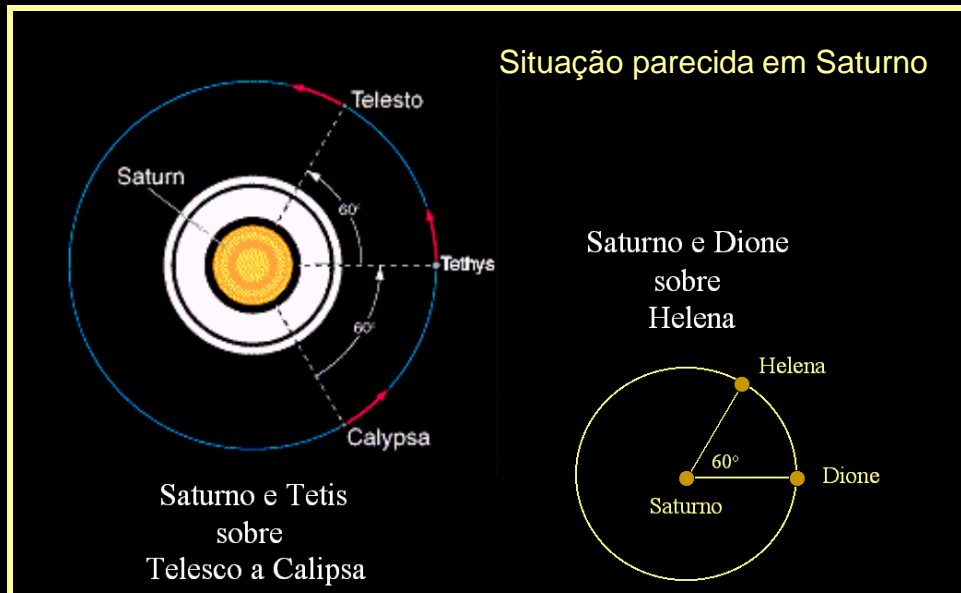
## Pontos Lagrangianos

<http://www.princeton.edu/~rvdb/JAVA/astro/galaxy/Galaxy.html>

- localizados próximos nos pontos lagrangianos, sobre a órbita de Júpiter, 60 graus à frente e atrás deste.
- Centenas deles já são conhecidos, estima-se que haja mais de 1000.
- Curiosamente, há mais asteróides em L4 que em L5.
- Deve haver alguns asteróides nos pontos lagrangianos de Vênus e Terra.;
- **5261 Eureka** é um troiano de Marte.



Os Pontos Lagrangianos representam regiões de equilíbrio de forças. L1, L2 e L3: o equilíbrio é instável; L4 e L5: regiões de estabilidade

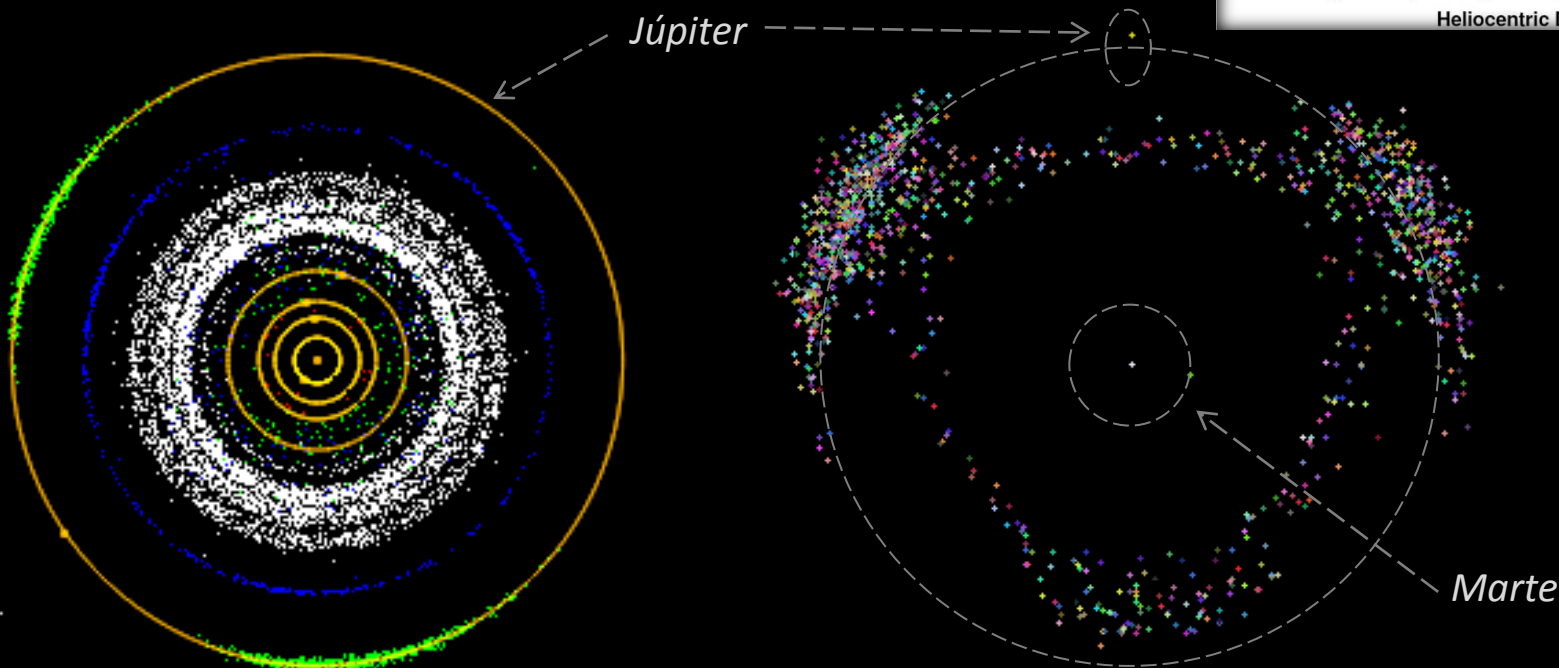
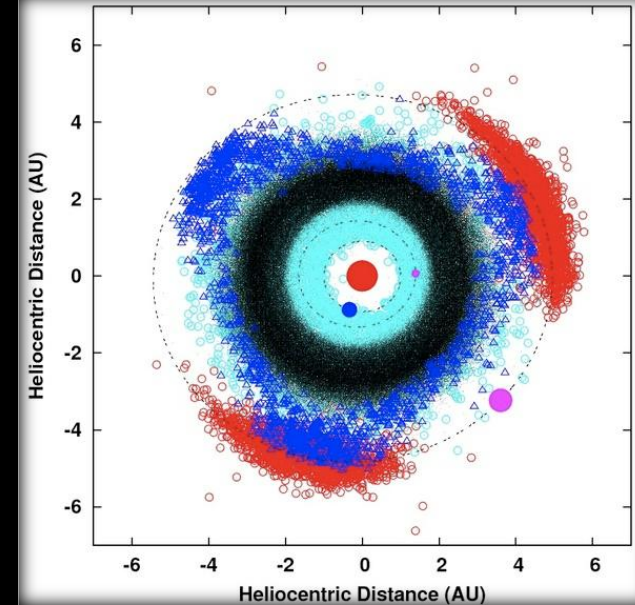


# Asteróides Troianos

## Pontos Lagrangianos

<http://www.princeton.edu/~rvdb/JAVA/astro/galaxy/Galaxy.html>

- Animação: asteróides se glomeram nos Pontos Lagrangianos L4 e L5.
- Vê-se o movimento dos asteróides da família Hilda e o do grupo troianos em co-rotação com Júpiter.





# Asteróides próximos da Terra (NEA - Near Earth Asteroids)

asteróides que se aproximam da Terra

## – Grupo Atenas:

- semi-eixo maior  $< 1,0$  UA
- distância afélica  $> 0,983$  UA
- cruzam a órbita da Terra

## – Grupo Apollo:

- semi-eixo maior  $> 1,0$  UA
  - distância periélica  $< 1,017$  UA
  - cruzam as órbitas da Terra e de Marte
- 31 deles têm diâmetros maiores que 2 km

## – Grupo Amor:

- distância periélica entre 1,017 e 1,3 UA
- cruzam a órbita de Marte.

# Ceres e Vesta: os corpos mais massivos do Cinturão Principal

## Vesta

corpo diferenciado e seco, com superfície remodelada por fluxos de lava basáltica, possivelmente, proveniente de um oceano de magma primitivo, como deve ter ocorrido na Lua.

Vesta tem sofrido processos erosivos por escavação; a mais notável é a enorme cratera perto de seu pólo sul.

Estudos de exposição de meteoritos HED (Howardite, Eucrite, and Diogenite ) provenientes de Vesta expostos aos raios cósmicos, indicam a ocorrência de pelo menos 5 impactos nos últimos 50 milhões de anos. Esses meteoritos auxiliam estudos da evolução térmica de Vesta.



# Asteróide Vesta

Missão DAWN (Vesta e Ceres) - NASA/JPL



Mars



Mercury



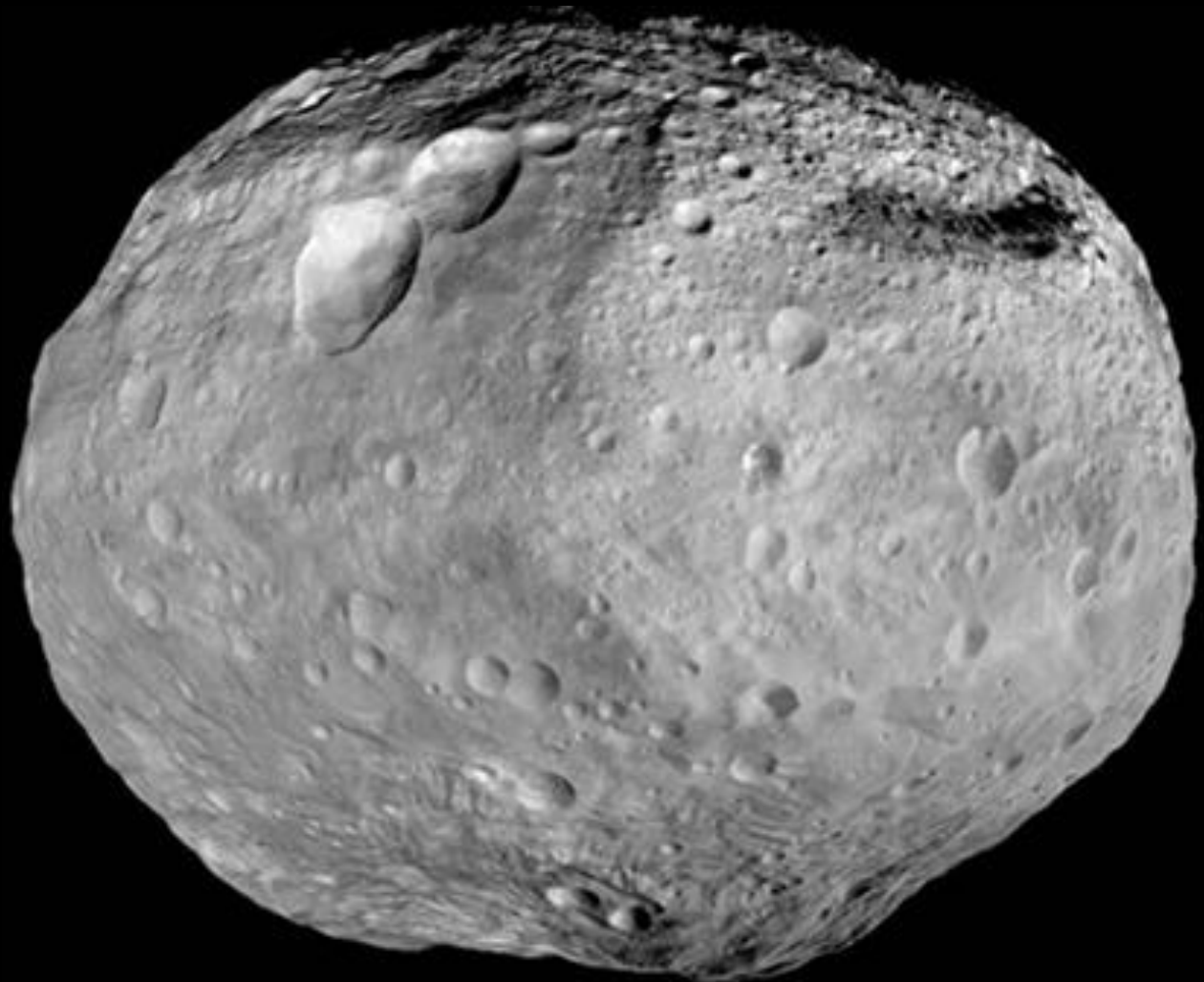
Moon



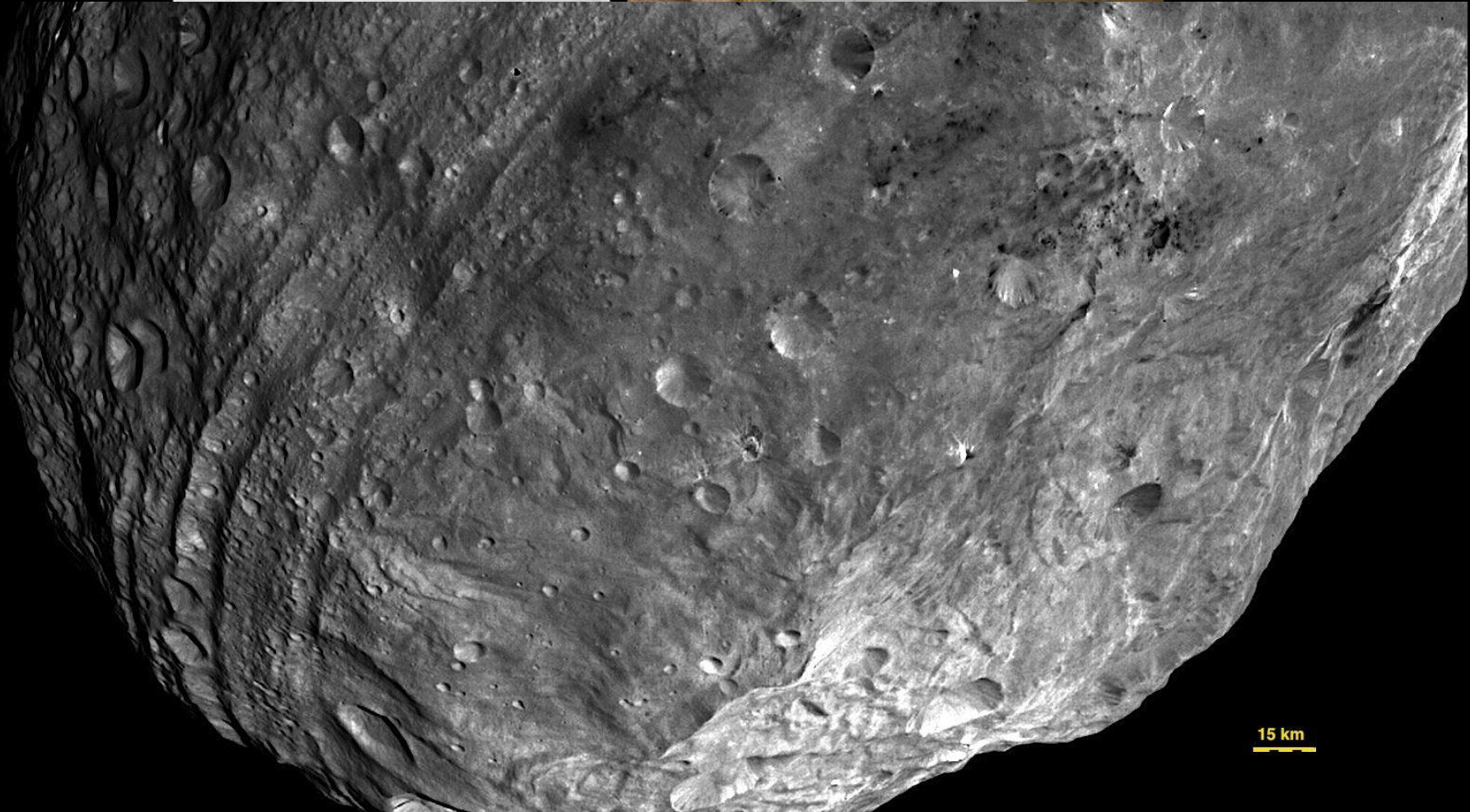
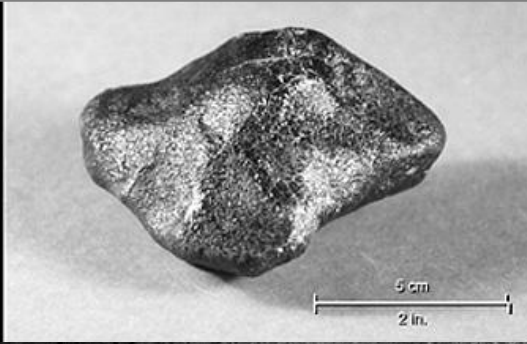
Ceres



Vesta



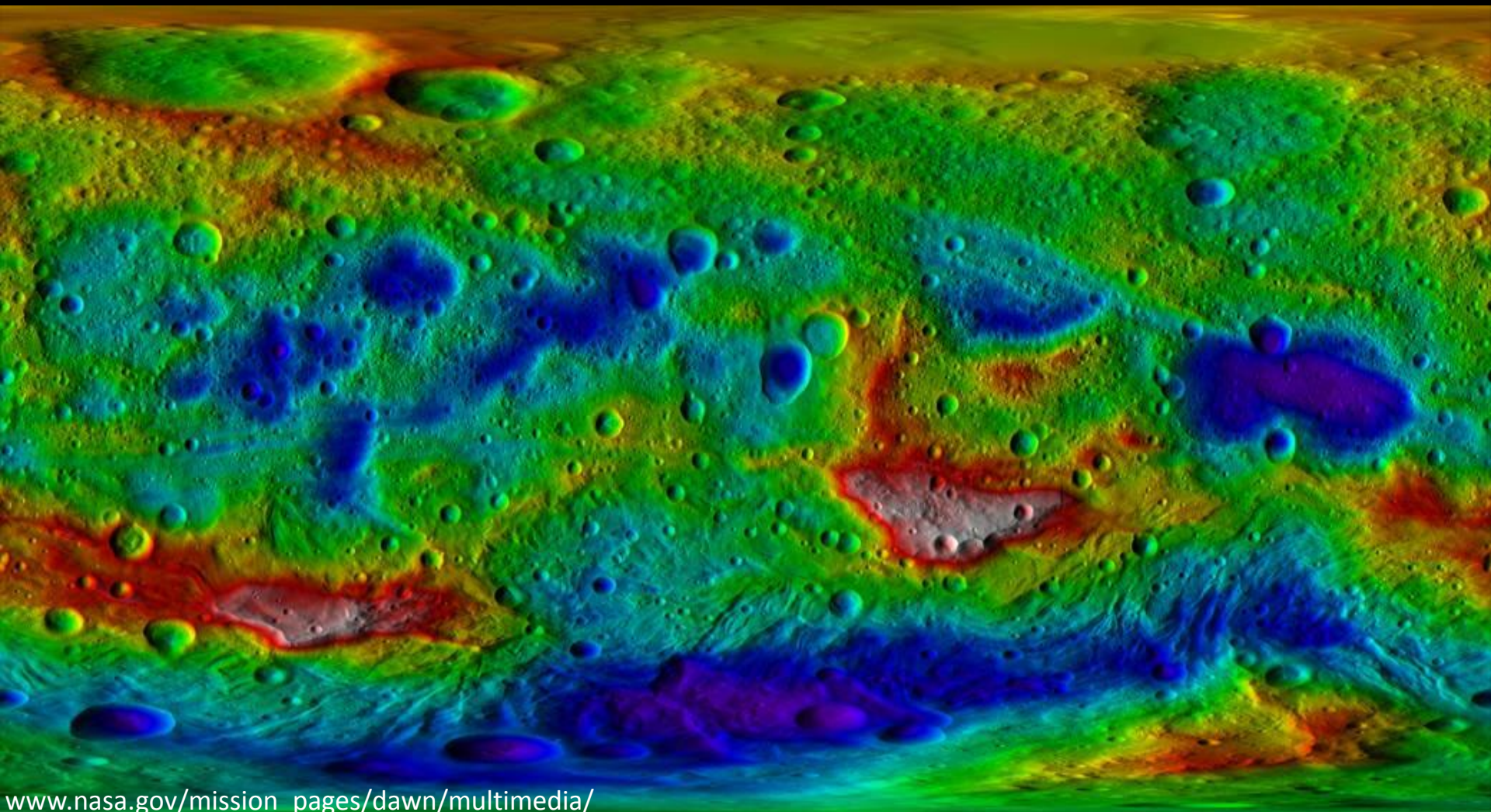
# Asteróide Vesta



# Asteróide Vesta

Topografia codificada por cores em projeção equirectangular,  
em relação a um elipsóide de 285 km por 229 km.

Escala de cores: Roxo - 22,47 km abaixo da superfície  
Branco - 19,48 quilômetros acima da superfície.



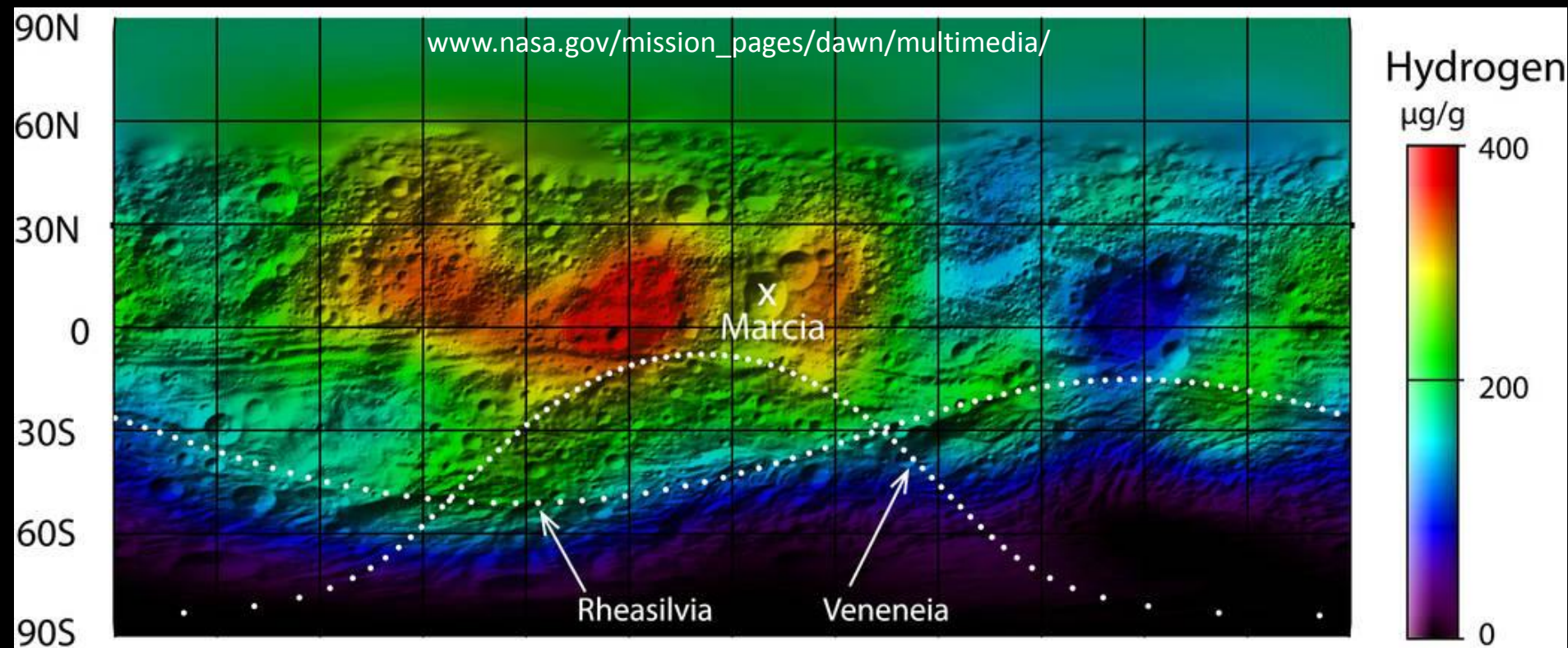
# Asteróide Vesta

Distribuição global de hidrogênio na superfície. O hidrogênio provavelmente existe na forma de hidroxila ou água ligada aos minerais, e não como gelo de água.

A presença mais forte para o hidrogênio vem de regiões próximas ao equador, onde o gelo de água não é estável.

Abundância de hidrogênio:

- em microgramas de hidrogênio por grama de material da superfície
- vermelho indica máxima e violeta indica mínima.



Linhas pontilhadas: bacias de impacto Rheasilvia e Veneneia

# Ceres e Vesta: os corpos mais massivos do Cinturão Principal

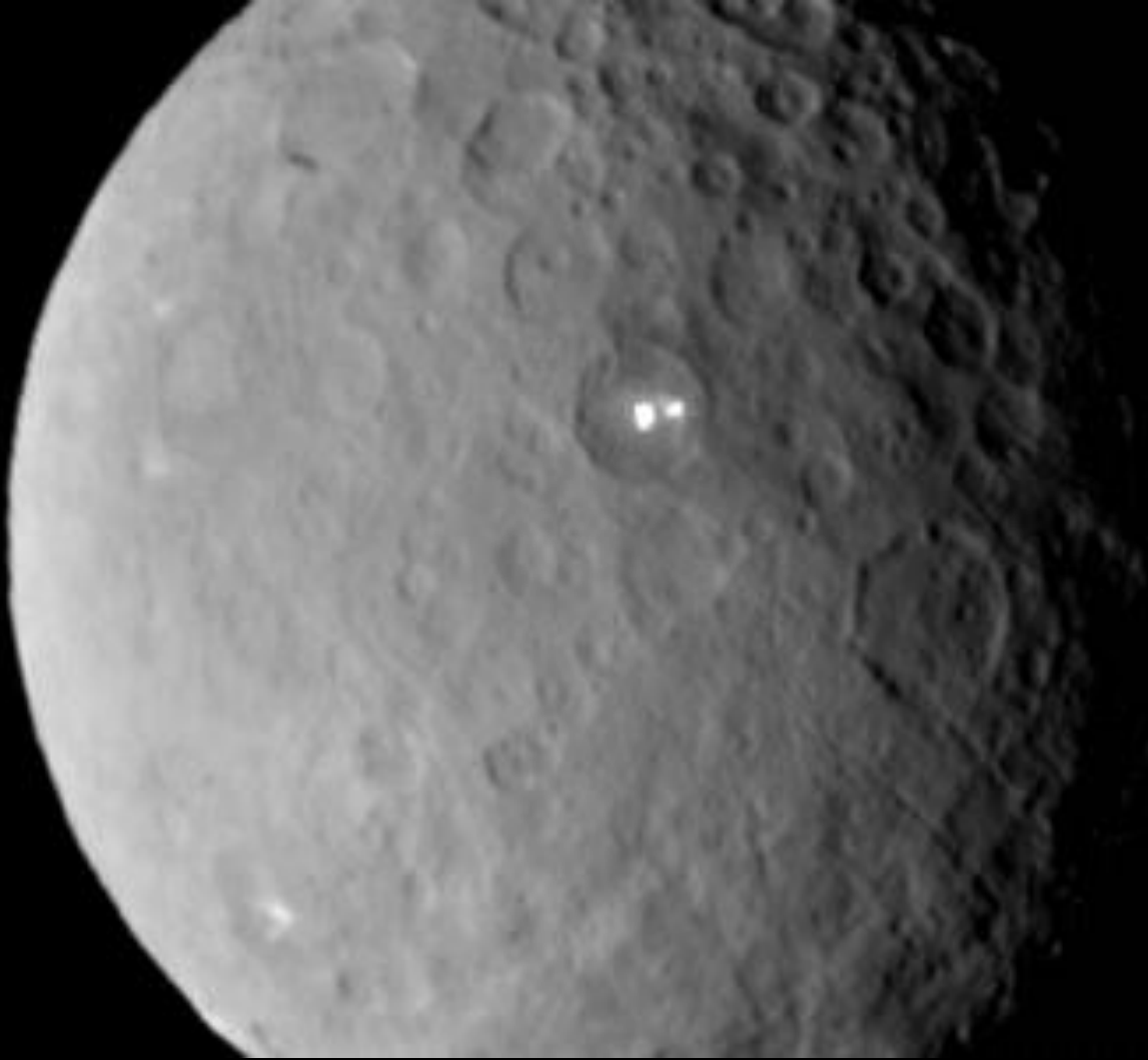
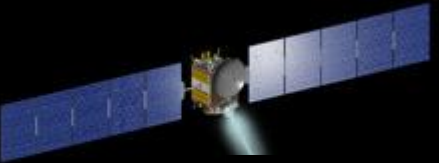
## Ceres

superfície muito primitiva, com minerais ricos em água e, possivelmente, com atmosfera muito rarefeita e geadas.

Estudos em microondas sugerem que Ceres tem superfície coberta por argila seca, em contraste com a camada de pó de basalto que cobre a superfície de Vesta, que reflete composição similar a da crosta terrestre.

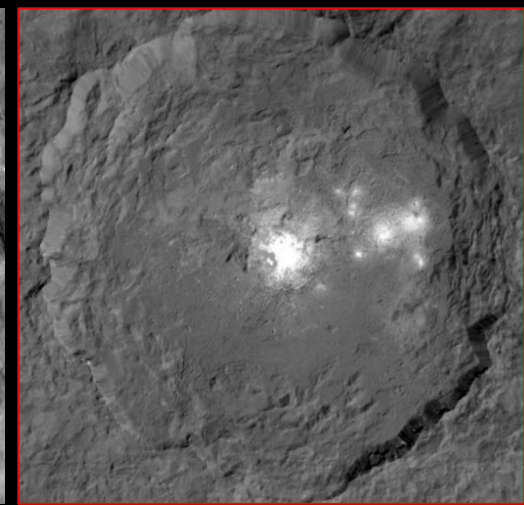
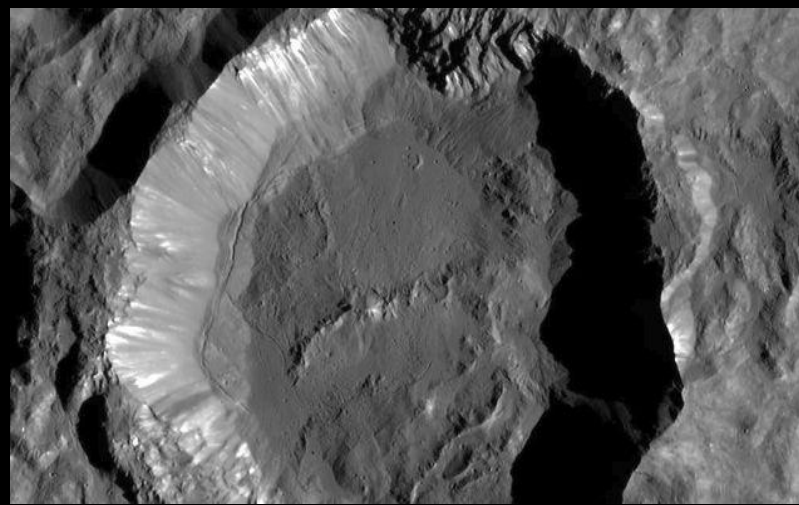
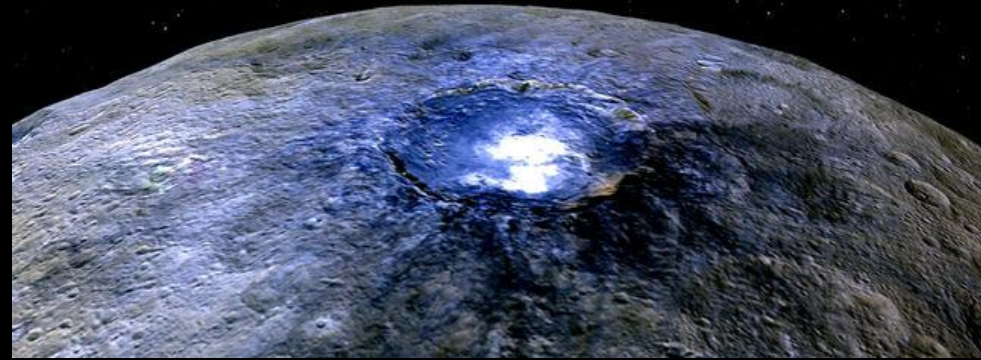
# Ceres (antes asteroide, agora planeta-anão)

Missão DAWN (Ceres e Vesta) - NASA/JPL





# Ceres (antes asteroide, agora planeta-anão)



## Características orbitais

Semieixo maior	2,7663 UA
Periélio	2,5468 UA
Afélio	2,9858 UA
Excentricidade	0,07934
Período orbital	4,599 anos

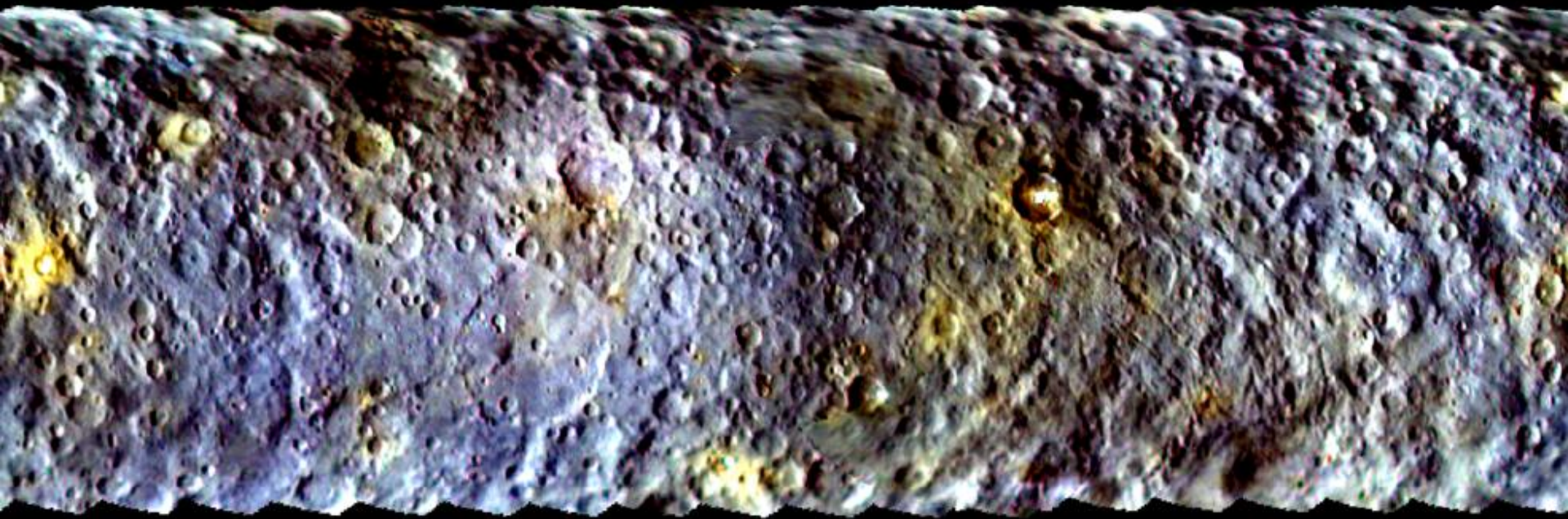


## Características físicas

Diâmetro equatorial	$974,6 \pm 3,6$ km
Área da superfície	1 800 000 km <sup>2</sup>
Massa	$9,5 \times 10^{20}$ kg
Densidade média	2,08 g/cm <sup>3</sup>

## Ceres (antes asteróide, agora planeta-anão)

Mapa codificado em cores revela superfície diversificada, com materiais de densidades variadas.

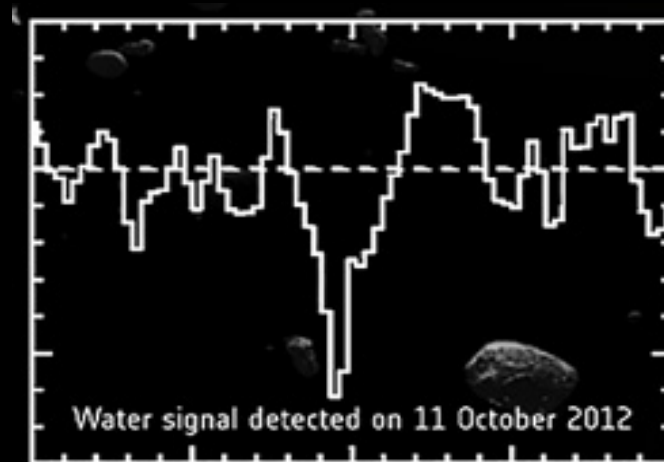
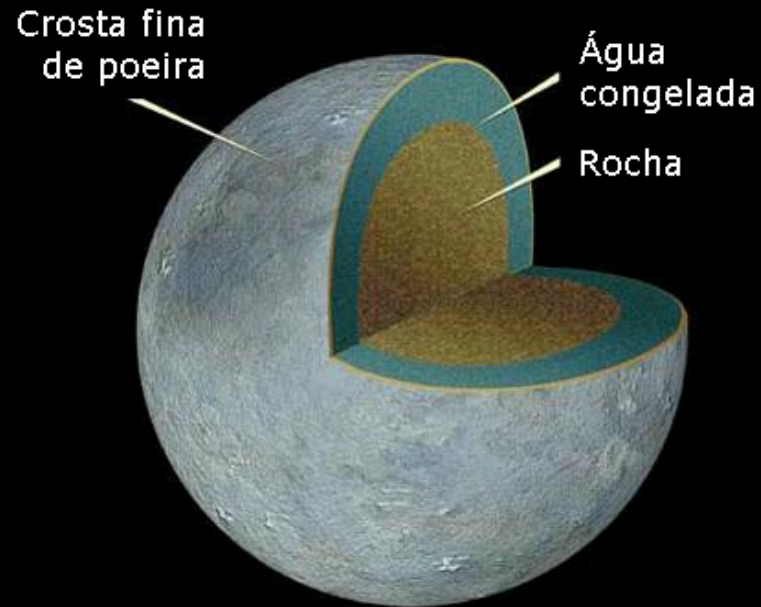


Credits: NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA

# Ceres (antes asteróide, agora planeta-anão)

## ELE DEVE CONTER ÁGUA POTÁVEL (SEM SAIS)

- É o maior corpo do cinturão principal. Ele pode conter cerca de 25% da massa total do cinturão.
- Estudos recentes indicam a possibilidade de ele possuir um manto espesso rico em água. Se essa água representar um quarto da massa do manto, Ceres pode conter mais água doce que a Terra.
- O volume total de água na Terra é cerca de 1,4 bilhões de  $\text{km}^3$ , sendo 41 milhões de  $\text{km}^3$  de água doce. Ceres pode conter 200 milhões de  $\text{km}^3$  de água doce.



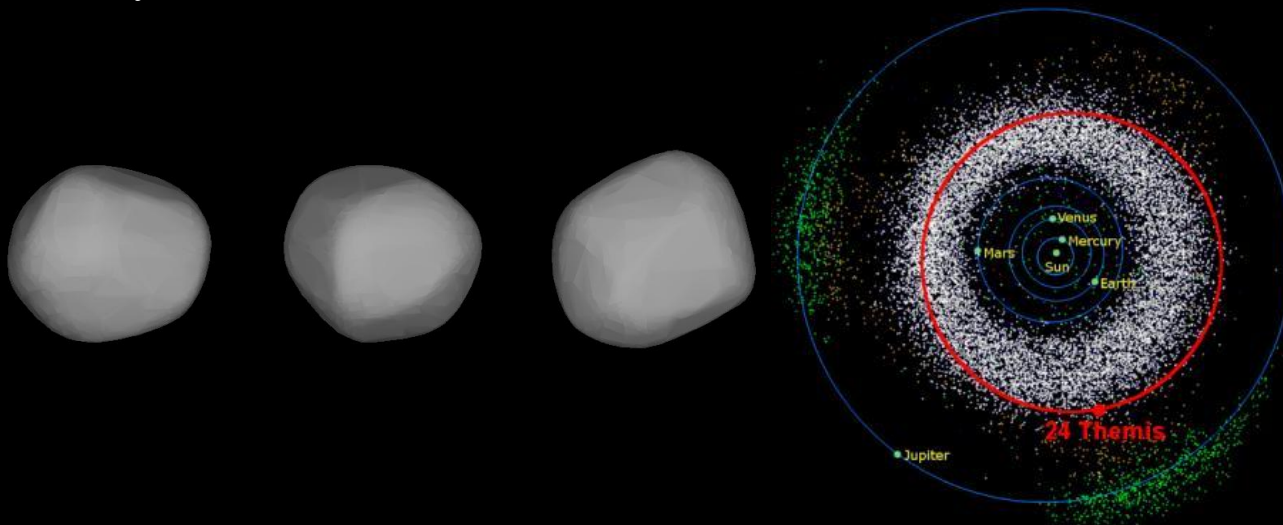
# Asteróides úmidos

**24 THEMIS:** Largura ~ 160 km, distância do Sol ~ 3,2 UA

Água e moléculas orgânicas são encontradas no asteróide (~200 km de diâmetro), do Cinturão de Asteróides, entre os planetas de Marte e Júpiter.

Seu espectro em luz infravermelha sugerem superfície coberta (alguns cm até m) com água congelada.

"Os compostos orgânicos ...aparentam ser cadeias extensas e complexas de moléculas. Ao caírem sobre a Terra estéril em meteoritos, essas moléculas podem ter servido como um grande pontapé inicial no desenvolvimento da vida no planeta", (Josh Emery, Universidade do Tennessee).



## Orbital characteristics<sup>[1]</sup>

Epoch 23 July 2010 (JD 2455400.5)

<b>Aphelion</b>	529.4 Gm (3.539 AU)
<b>Perihelion</b>	406.8 Gm (2.719 AU)
<b>Semi-major axis</b>	468.1 Gm (3.129 AU)
<b>Eccentricity</b>	0.1310
<b>Orbital period</b>	2021 d (5.54 yr)
<b>Mean anomaly</b>	146.6°
<b>Inclination</b>	0.7595°
<b>Longitude of ascending node</b>	35.99°
<b>Argument of perihelion</b>	107.7°

## Physical characteristics

<b>Dimensions</b>	198 ± 20 km <sup>[1][2]</sup>
<b>Mass</b>	(1.13 ± 0.43) × 10 <sup>19</sup> kg <sup>[2]</sup> 2.3 × 10 <sup>19</sup> kg <sup>[3][4]</sup>
<b>Mean density</b>	2.78 ± 1.35 g/cm <sup>3[2]</sup>
<b>Equatorial surface gravity</b>	0.15 <sup>+0.08</sup> <sub>-0.07</sub> m/s <sup>2[2]</sup>
<b>Equatorial escape velocity</b>	87 <sup>+15</sup> <sub>-20</sub> m/s <sup>[2]</sup>
<b>Rotation period</b>	0.348 92 d (8 h 23 min) <sup>[1]</sup>
<b>Geometric albedo</b>	0.067 <sup>[1]</sup>
<b>Spectral type</b>	C/B <sup>[1]</sup> (B-V=0.68)
<b>Absolute magnitude (H)</b>	7.08 <sup>[1]</sup>

# Asteróides úmidos

Figure 1: The reflectance spectra of 24 Themis are well fitted by a mixture of ice-coated pyroxene grains and amorphous carbon.

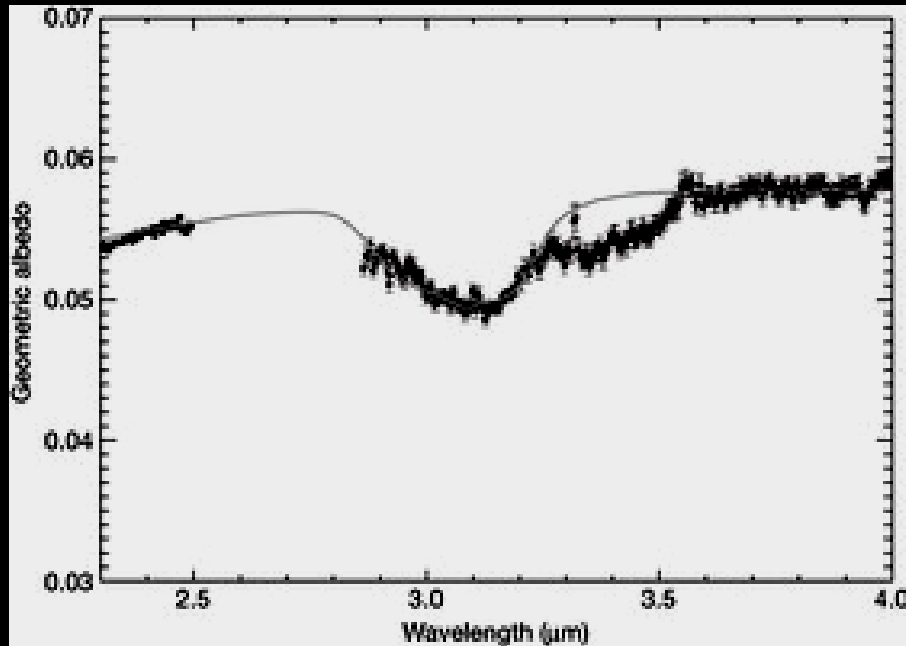
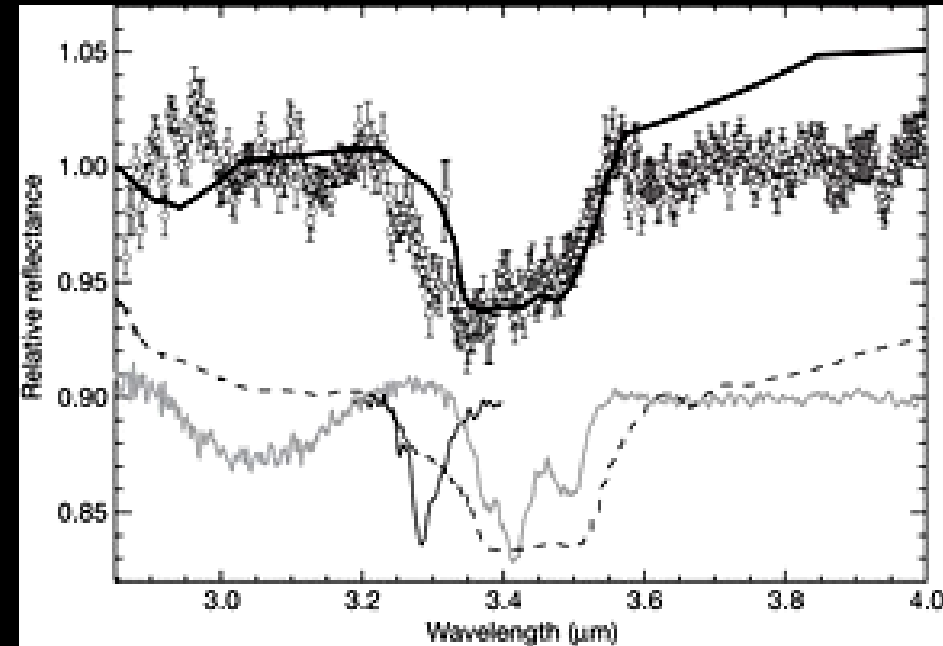


Figure 2: Organic material is present on the surface of 24 Themis.



The spectrum of 24 Themis from 2008 has been divided by the model shown in [Fig. 1](#) to identify residual absorptions (open symbols). A residual absorption band centred near 3.4  $\mu\text{m}$  and with a width of  $\sim 0.2 \mu\text{m}$  is well matched by complex org

**24 THEMIS:** Largura ~ 160 km, distância do Sol ~ 3,2 UA

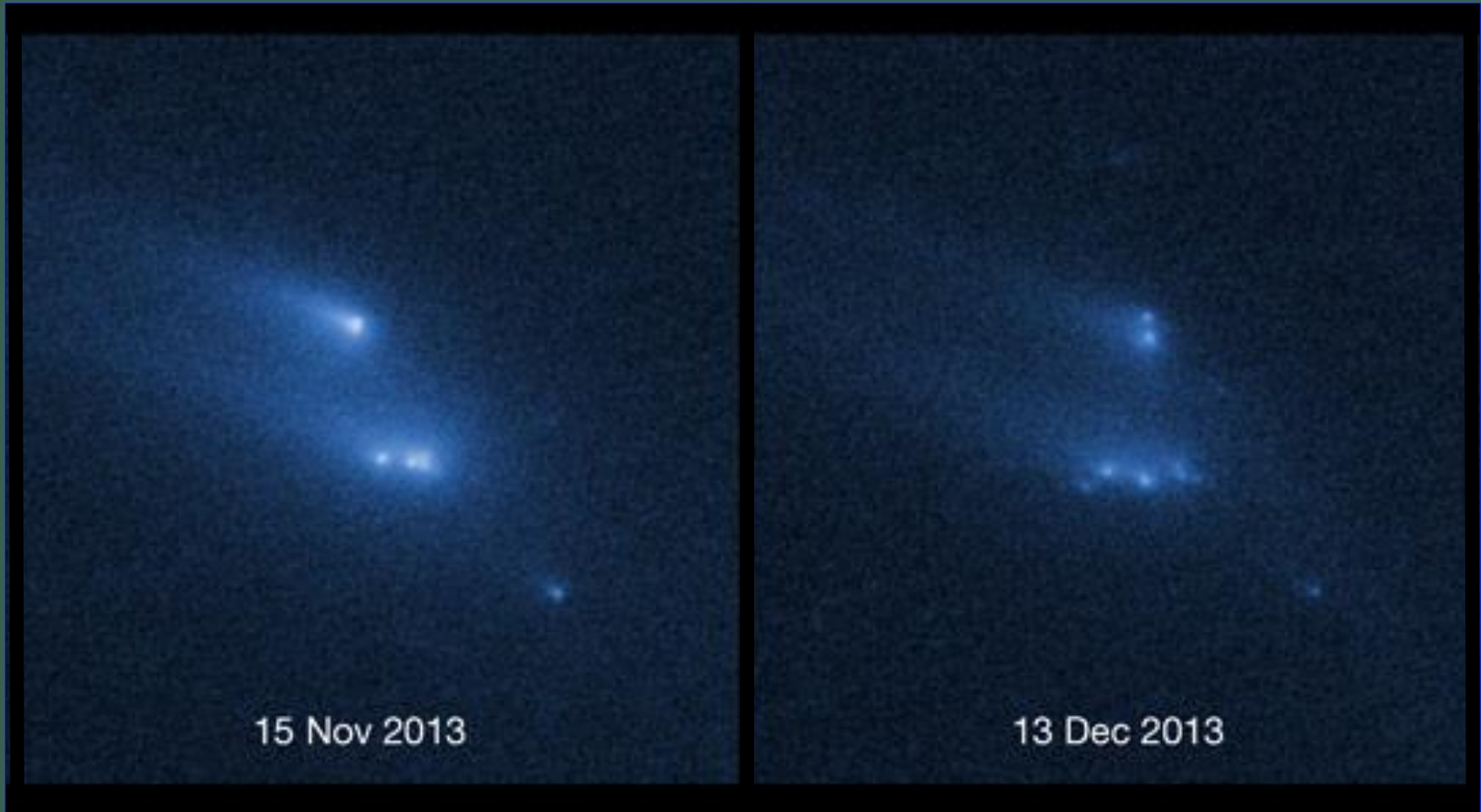
Nessa distância, a água congelada da superfície seria vaporizada. Isso significa que o gelo deve ser continuamente reabastecido, eventualmente, por um reservatório de água congelada dentro da rocha.

1ª. possibilidade : o gelo se encontra a vários metros abaixo da superfície. Quando atingida por detritos no espaço, o gelo aflora para a superfície. Se este for o caso, poderia confirmar que alguns asteróides lembram cometas, de repente se tornar ativo e material de ventilação para o espaço quando bolsões de gelo evaporar.

2ª. Possibilidade : ação semelhante às recentes descobertas de água na Lua. O vento solar (que inclui íons de H) interage com as rochas para criar moléculas de H<sub>2</sub>O e OH.

# Asteróides se desintegrando

- Asteroide P/2013 R3, do Cinturão Principal, quebrou-se em 10 pequenos pedaços.
- Os quatro maiores têm cerca de 400 metros de diâmetro e pesam cerca de 200 mil toneladas.
- Os fragmentos estão se separando a uma velocidade de 1,5 km/h.



## Alguns exemplos



Só os maiores têm forma esférica





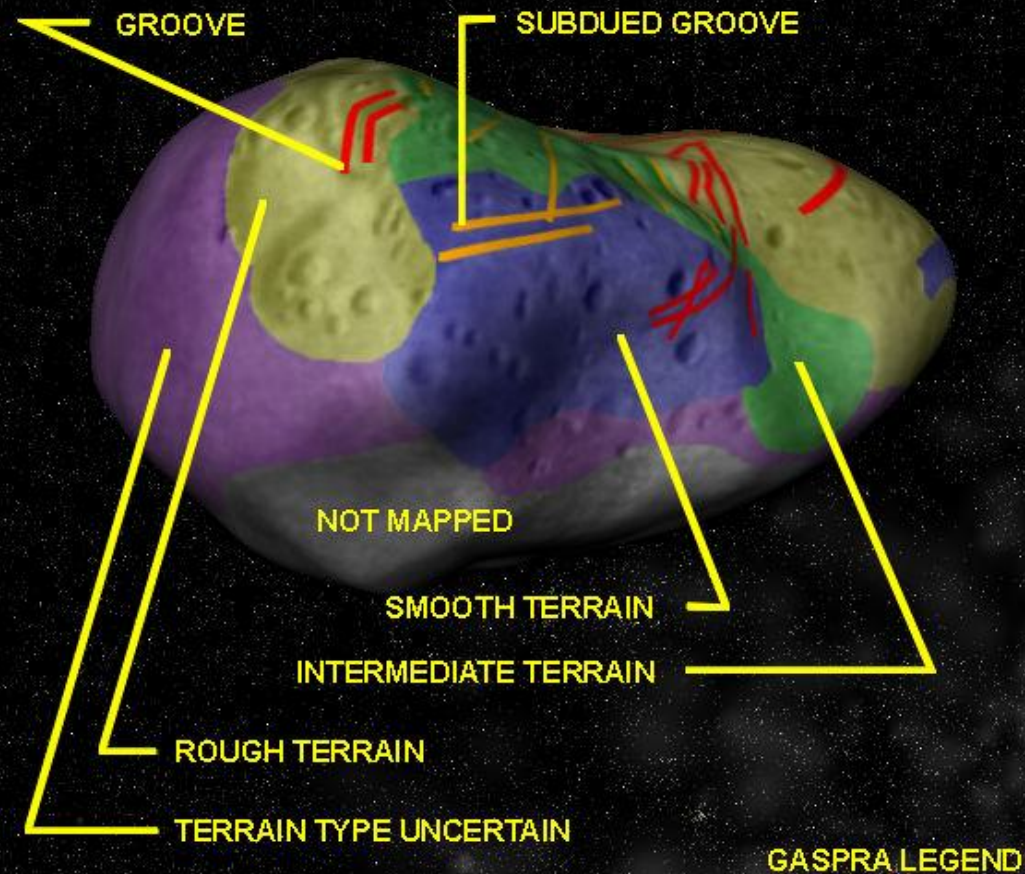
# Asteróide 951 Gaspra

- Sua órbita está próxima do bordo interno do cinturão asteroidal
  - distância média do Sol: 205.000.000 km
  - tamanho: 19x12x11 km
- Tipo S: talvez composto de uma mistura de rocha e minerais metálicos.
- Foi o primeiro a ser observado em detalhes pela sonda Galileo, em 29/10/1991.
- Gaspra é um membro da família de asteróides Flora..
- Sua superfície é coberta por crateras de impacto. Pelo número de crateras pequenas pode-se estimar sua idade: ~ 200 milhões de anos.



# Asteróide 951 Gaspra

- Sua órbita está próxima do bordo interno do cinturão asteroidal
  - distância média do Sol: 205.000.000 km
  - tamanho: 19x12x11 km
- Tipo S: talvez composto de uma mistura de rocha e minerais metálicos.
- Foi o primeiro a ser observado em detalhes pela sonda Galileo, em 29/10/1991.
- Gaspra é um membro da família de asteróides Flora..
- Sua superfície é coberta por crateras de impacto. Pelo número de crateras pequenas pode-se estimar sua idade: ~ 200 milhões de anos.

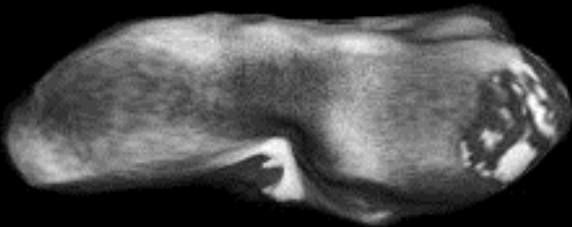


# Asteróides 243 Ida e seu satélite Dáctilo

Há muito que as observações sugeriam a existência de asteróides com satélites. A sonda Galileu (28/8/93) flagrou um desses casos.



Tipo S,  
Tamanho: ~ 58 x 23 km<sup>2</sup>  
Idade: 1 bilhão de anos



Tamanho: ~ 1,6 x 1,2 km<sup>2</sup>

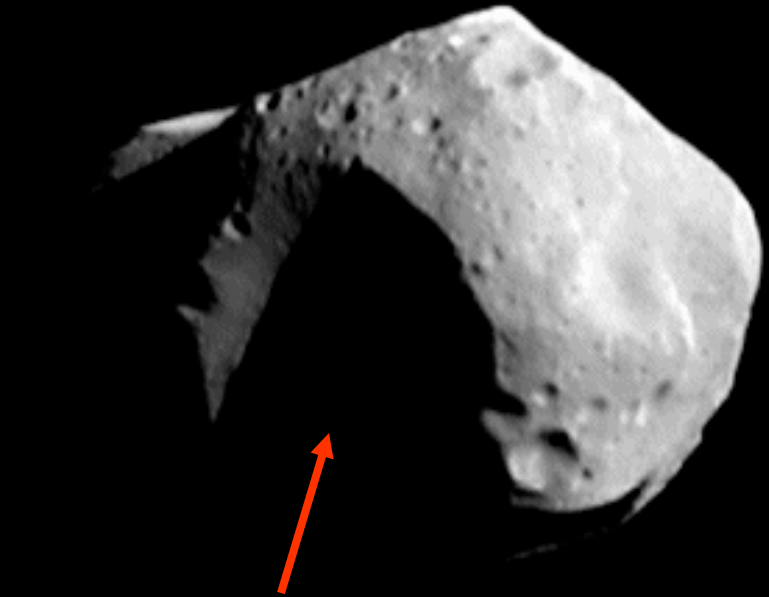
Distância: 90-km

- surpreendentemente esférico apesar de seu pequeno tamanho.

- densidade (2,9 g/cm<sup>3</sup>) sugere tipo meteorito condrito ordinário.

# Asteróides 253 Matilde

- Asteróide do cinturão, com periélio relativamente pequeno (1,94 UA)
  - distância heliocêntrica média: 394.000.000 km
  - tamanho: 59 x 47 km
- A sonda espacial NEAR o observou em close-up em 27/6/1997
- Asteróide do tipo C.
- Tem pelo menos 5 crateras maiores que 20 km de diâmetro.
- Densidade de apenas 1,4 g/cm<sup>3</sup>, provavelmente ele seja muito poroso.
- Albedo de apenas 4% (muito escuro).
- Cor de sua superfície é bastante uniforme, a despeito da existência de crateras profundas.
- Rotação é muito lenta, cerca de 17,4 dias.



## Uma cratera desproporcional!

Simulações teóricas mostram que a violência necessária para escavar tal cratera é suficiente para pulverizar um corpo rochoso rígido de mesma dimensão.

Explicação possível: Matilde resistiu ao choque porque não é rígido; o choque foi amortecido pela estrutura de aglomerado.

# Asteróides 179 Toutatis

Descoberta: 4/01/1989 por C.Pollas.

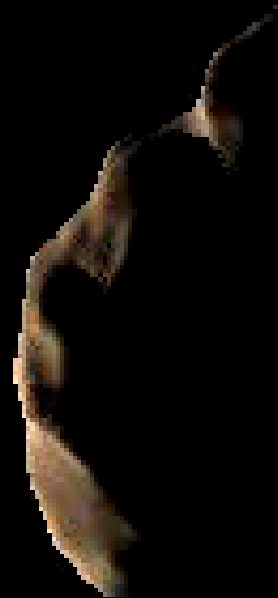
Tamanho: 4.6km x 2.4km x 1.9km

Período Rotacional: 5.4 e 7.3 dias  
terrestres

Período Orbital: 3,98 anos

Movimento complexo  
(vários eixos) pode ser  
indicativo de juventude.

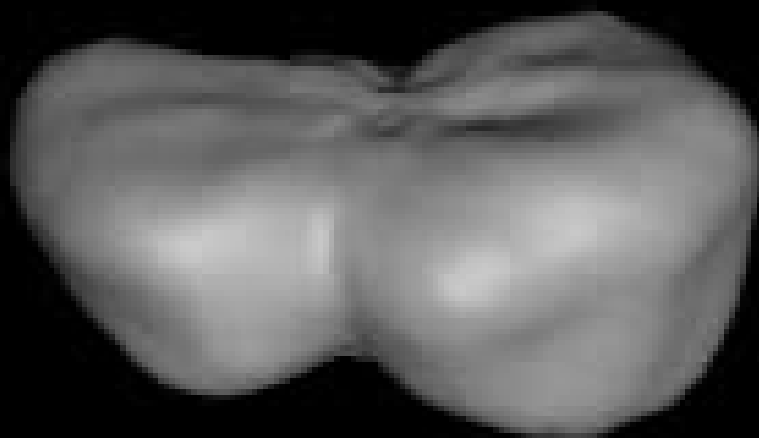
Asteróides antigos  
estabilizam seus  
movimentos em poucas  
componentes.



# Asteróides 4769 Castália (NEA)



castalia



Descoberta: 9/8/1989, por Eleanor F. Helin

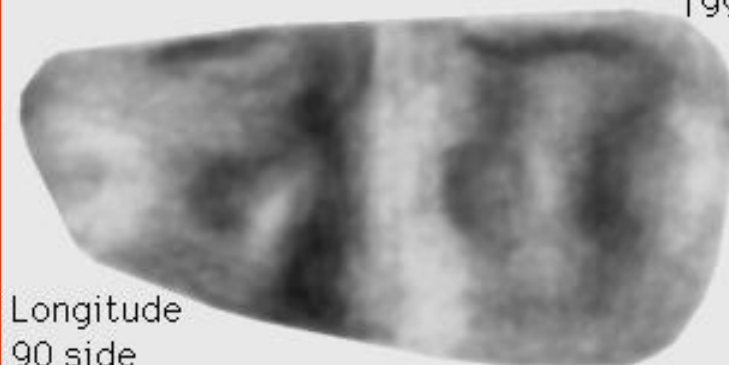
Tamanho: 1.8km x 0.8km

Período Rotacional: 4h42m

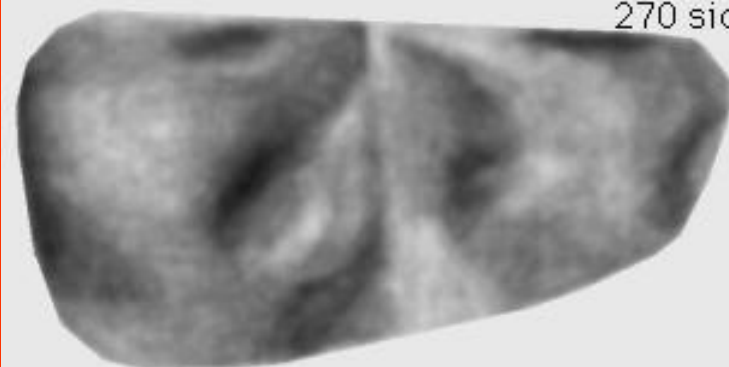
Período Orbital: 1,1 ano

4769 Castalia

P.J. Stooke  
1994



Longitude  
90 side



Longitude  
270 side

Morphographic Conformal Projection

# Asteróides 433 Eros

Descoberta: 13/8/1898, por Gustav Witt

Tamanho: 33km x 13km x 13km

Período Rotacional: 5,27 hours

Período Orbital: 1,76 years

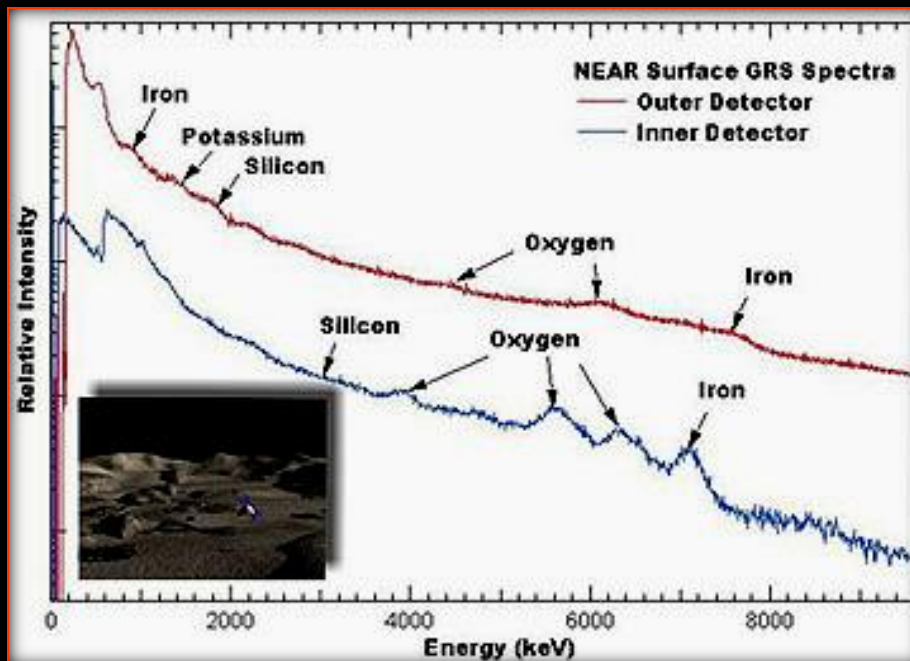
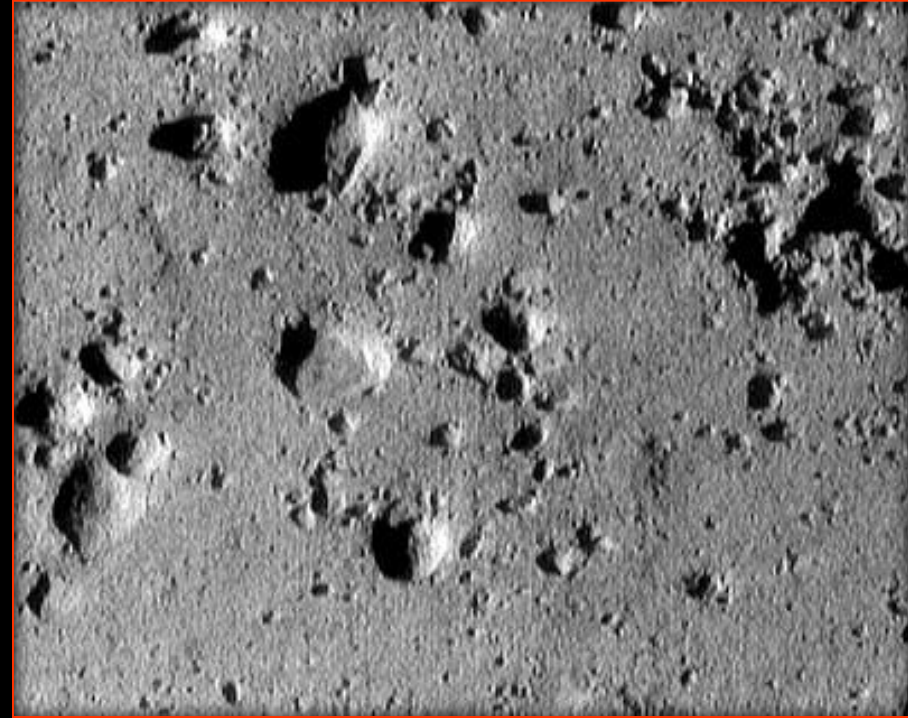
- A sonda NEAR–Shoemaker pousou em Eros 2001
- Asteróide do tipo S
- Tem interior sólido, ao contrário de Matilde.
- Superfície fortemente marcada por crateras.



# Asteróides 433 Eros

Imagem tirada a apenas 250 m da superfície, antes do pouso.

Rochas, com menos de 1 m de tamanho, estão espalhadas pela superfície.

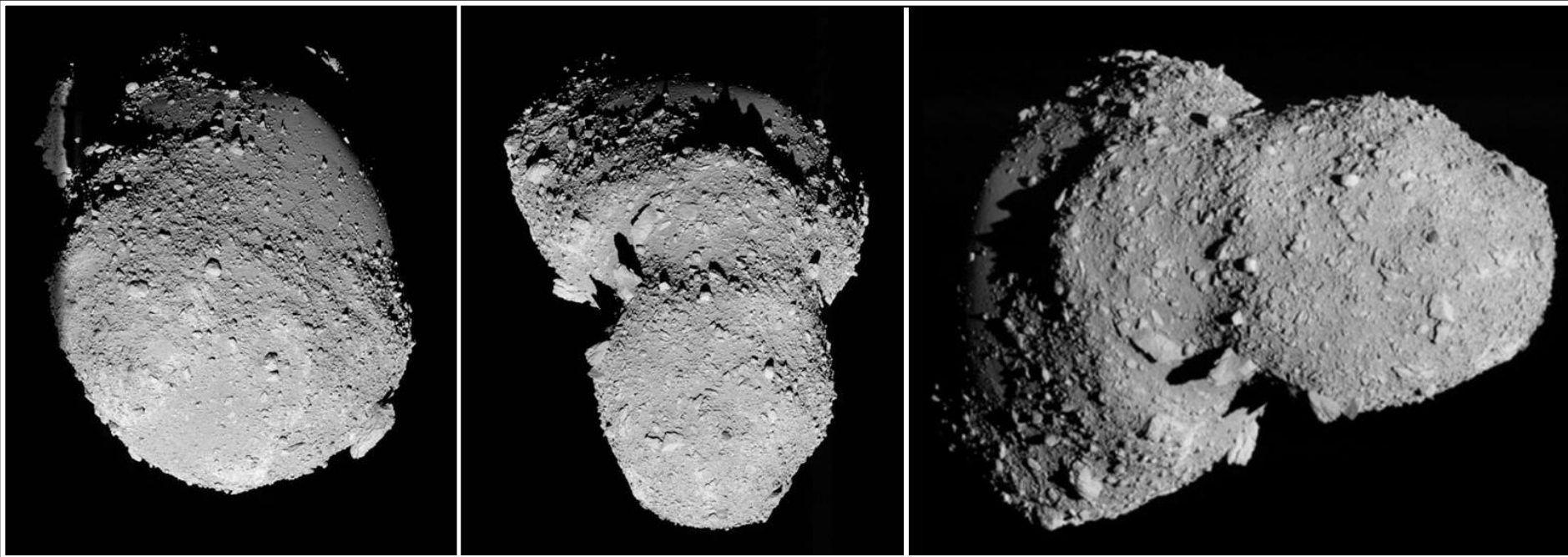


- Após o pouso, foram feitas medidas espectrométricas, que derminaram a composição do material de superfície.



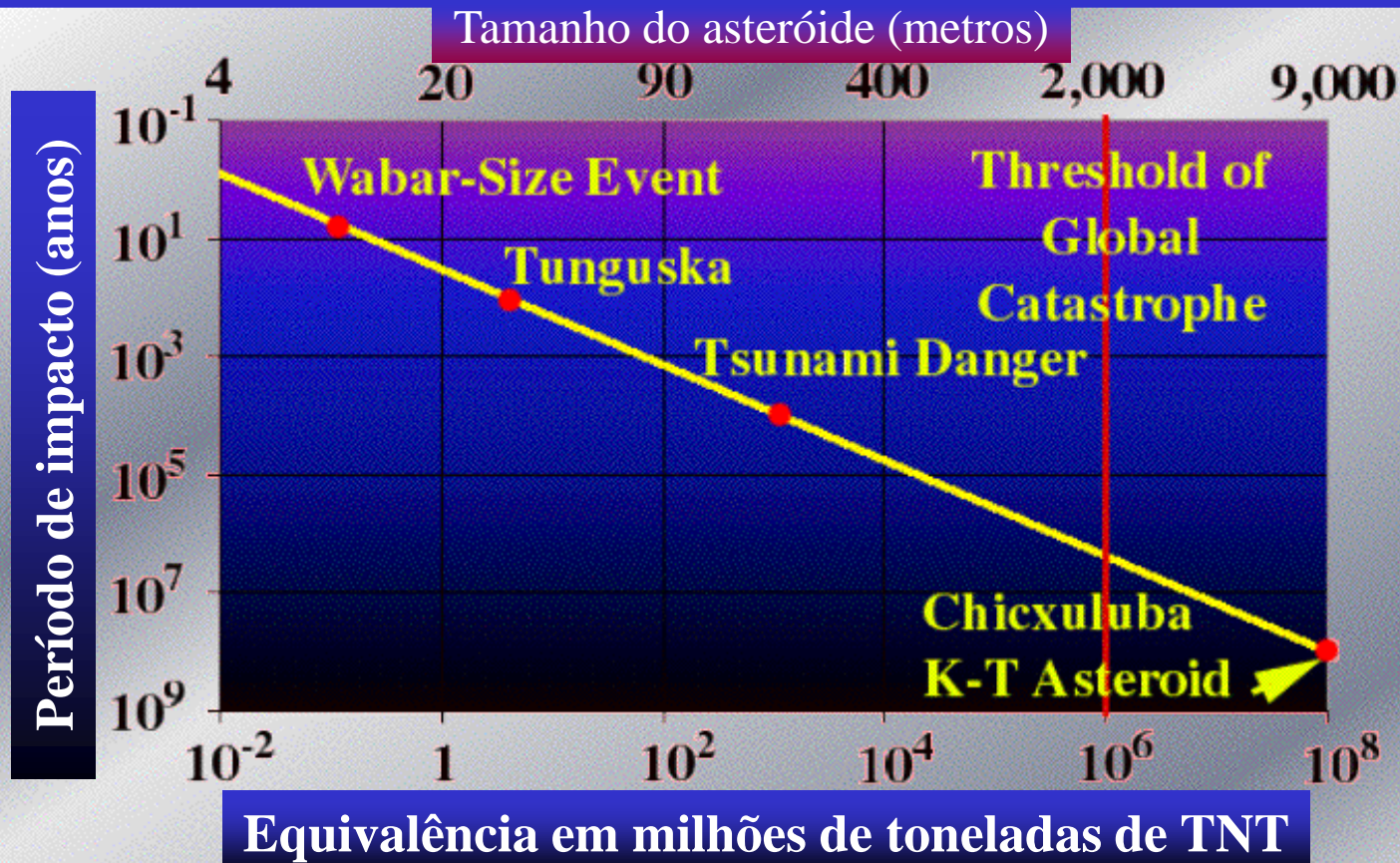
## Por que não há crateras como nos demais?

- ele pode ser um aglomerado de rochas e gelo, fragilmente unido pela gravitação. Neste caso as crateras teriam sido recobertas pelo bamboleio sofrido com a aproximação de um corpo planetário (Terra?)
- ou recoberta com poeira.
- A possibilidade de que asteróides possam ser aglomerados rochosos data do final dos anos 1970.



Clark R. Chapman e Donald R. Davis: “a energia necessária para quebrar um asteróide é muito menor que que necessária para dispersar completamente seus fragmentos”. Isto implica que se o asteróide for desintegrado por uma colisão, com o tempo ele poderá se recompor por gravitação, não necessariamente na forma que tinha antes do impacto, nem com a mesma massa. Rotação lenta (menos de 2 horas) fortalece essa estrutura. Rotação rápida desintegraria o asteróide, a menos que tivesse menos que 100m (forças coesivas o manteriam).

# Frequência das colisões com a Terra



<http://www.as.wvu.edu/~kgarbutt/EvolutionPage/Extinction.htm>

Os eventos de menores proporções, isto é, queda de corpos pequenos, são mais frequentes. Os catastróficos são bem mais raros. Eventos como o de Chicxulub ocorrem, em média, a cada 100 milhões de anos.

# Apofis: perigo à vista?

Nome: 99942 Apophis (2004 NM4)

Descoberta: 19/junho/2004

Tamanho ~270 m

$e = 0,1911775898611923$

$a = 0,9224082850654544$  UA

$q = 0,7460644922586452$  UA

$i = 3,331401591113404$  graus

período = 323,5811540415989 dias

0,89 anos

## 99942 Apophis (2004 MN4) Earth Impact Risk Summary

<b>Torino Scale (maximum)</b>	0
<b>Palermo Scale (maximum)</b>	-2.42
<b>Palermo Scale (cumulative)</b>	-2.41
<b>Impact Probability (cumulative)</b>	2.3e-05
<b>Number of Potential Impacts</b>	3

Analysis based on 2 radar delay, 5 Doppler, and 731 optical observations spanning 884.52 days (2004-Mar-15.10789 to 2006-Aug-16.626954)

<b><math>V_{\text{impact}}</math></b>	12.59 km/s
<b><math>V_{\text{infinity}}</math></b>	5.87 km/s
<b>H</b>	19.7
<b>Diameter</b>	0.270 km
<b>Mass</b>	2.7e+10 kg
<b>Energy</b>	5.1e+02 MT

all above are mean values weighted by impact probability

Orbit diagram and elements available [here](#).

# Apofis: perigo à vista?

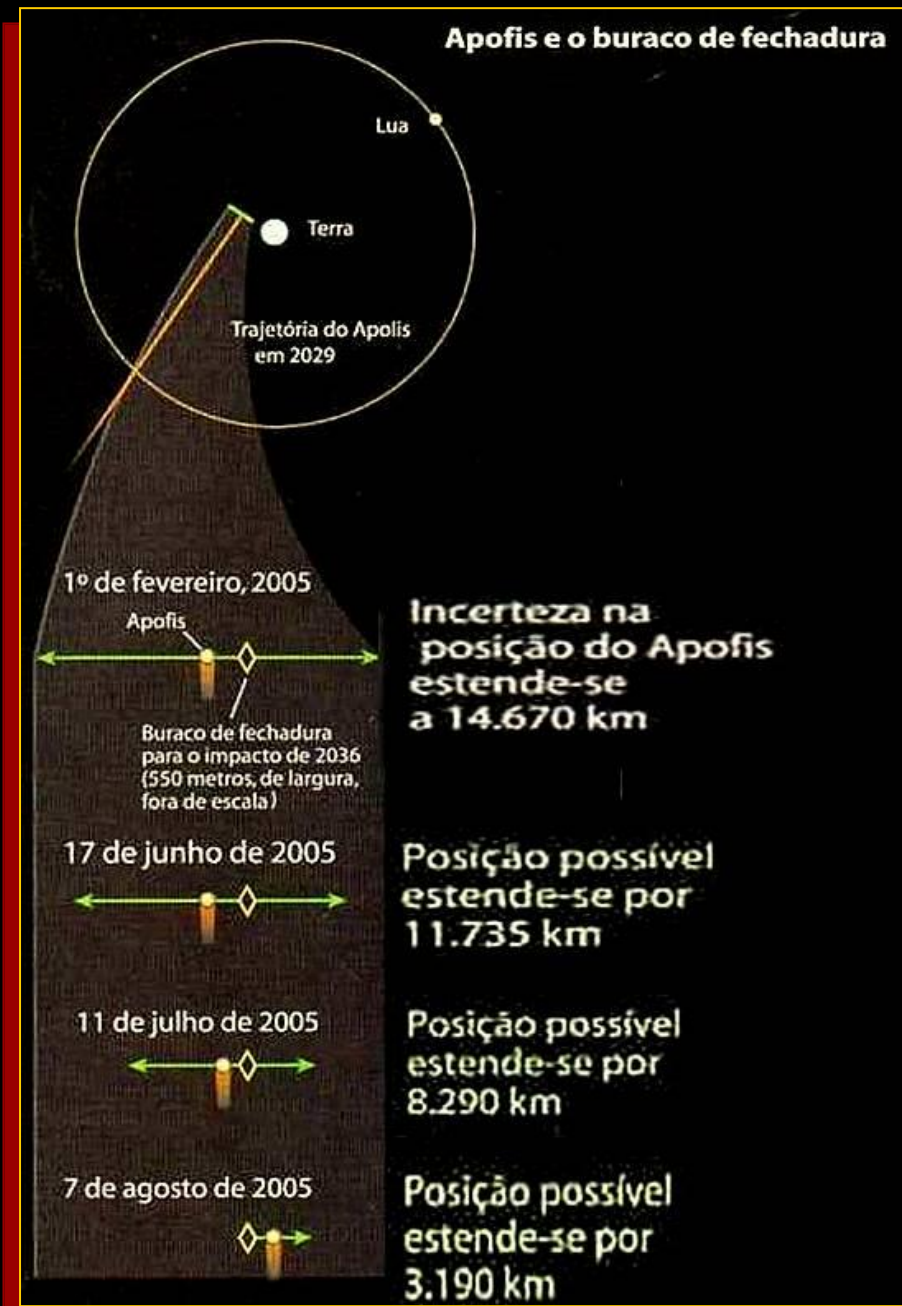
These results were computed on May 06, 2008

## 99942 Apophis (2004 MN4) Earth Impact Table

Date	Distance	Width	Sigma Impact	Sigma LOV	Stretch LOV	Impact Probability	Impact Energy	Palermo Scale	Torino Scale
YYYY-MM-DD.DD	( $r_{\text{Earth}}$ )	( $r_{\text{Earth}}$ )			( $r_{\text{Earth}}$ )		(MT)		
2036-04-13.37	0.53	1.19e-03	0.000	-2.43132	1.60e+03	2.2e-05	5.06e+02	-2.42	0
2037-04-13.64	0.63	1.11e-03	0.000	4.12074	1.58e+03	8.1e-08	5.06e+02	-4.87	0
2069-04-13.08	0.46	0.00e+00	0.000	2.02831	1.85e+05	4.9e-07	5.06e+02	-4.41	0

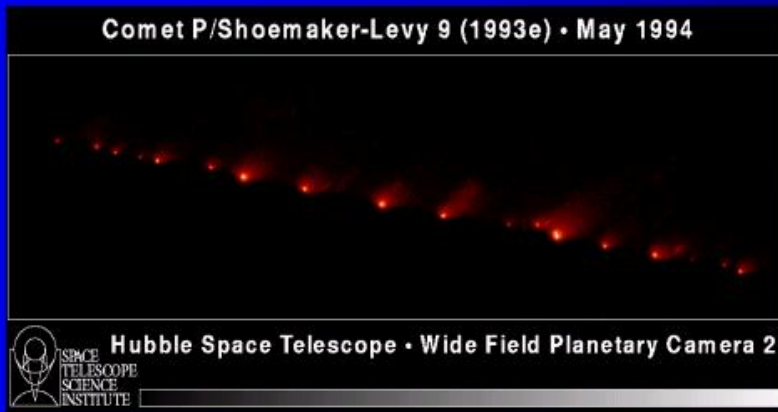
- **V<sub>impact</sub>** - Velocity at atmospheric entry.
- **V<sub>infinity</sub>** - Relative velocity at atmospheric entry neglecting the acceleration caused by the Earth's gravity field, often called the hyperbolic excess velocity. ( $V_{\text{infinity}}^2 = V_{\text{impact}}^2 - V_{\text{escape}}^2$ , where  $V_{\text{escape}} = \sim 11.2$  km/s is the Earth escape velocity.)
- **H** - Absolute Magnitude, a measure of the intrinsic brightness of the object.
- **Diameter** - This is an estimate based on the absolute magnitude, usually assuming a uniform spherical body with visual albedo  $p_V = 0.154$  (in accordance with the [Palermo Scale](#)) but sometimes using actual measured values if these are available. Since the albedo is rarely measured, the diameter estimate should be considered only approximate, but in most cases will be accurate to within a factor of two.
- **Mass** - This estimate assumes a uniform spherical body with the computed diameter and a mass density of  $2.6 \text{ g/cm}^3$ . The mass estimate is somewhat more rough than the diameter estimate, but generally will be accurate to within a factor of three.
- **Energy** - The kinetic energy at impact:  $0.5 * \text{Mass} * V_{\text{impact}}^2$ . Measured in Megatons of TNT.

# Apofis: perigo à vista?



## Quebra por maré

- Requer tensão de resistência baixa



Casos como o do cometa D/SL9 pode provocar cadeias de crateras

Quebra de asteróidee pode explicar figura lunar

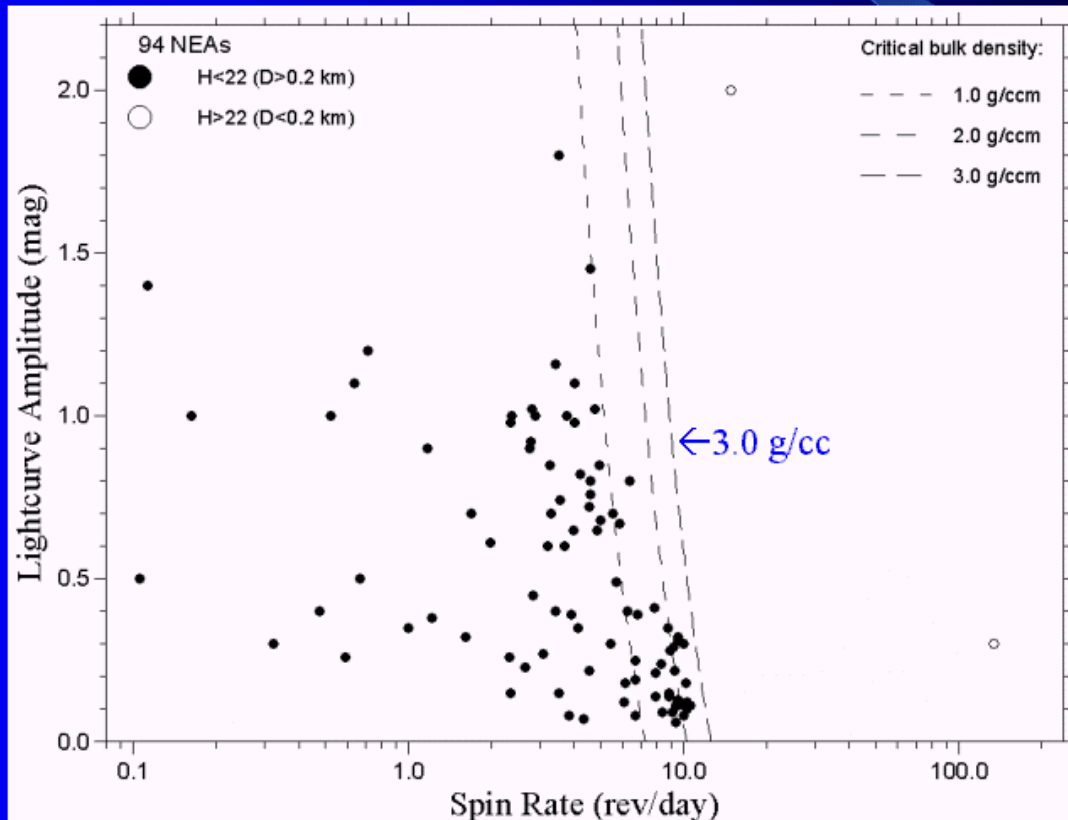
Davy Chain, ~47 km



## Rotação de Asteróides

- Maioria dos grandes asteróides ( $> 150$  m) giram mais lentamente que o limite de rompimento de agregado gravitacional (“rubble breakup limit”).

Pravec & Harris 2000



# Origem dos meteoritos e poeira zodiacal

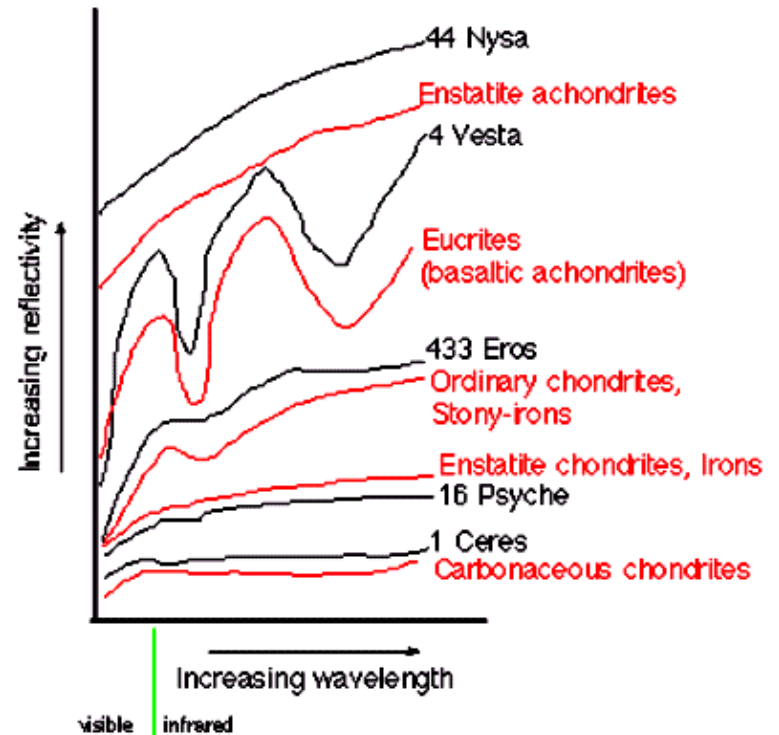
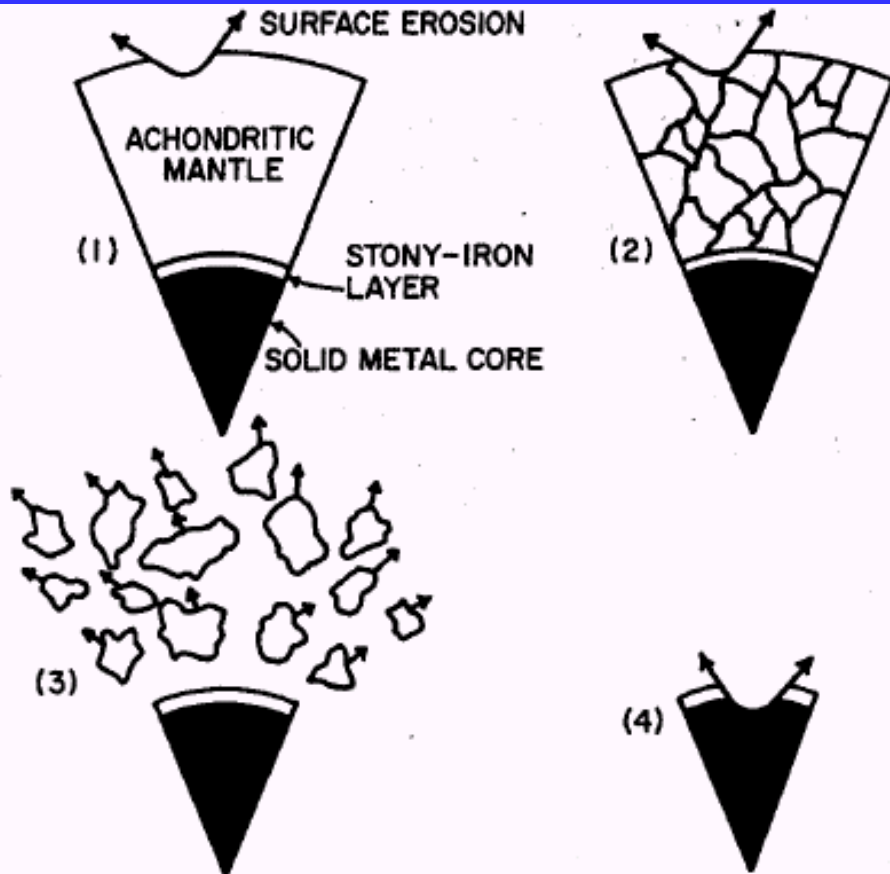
A análise comparativa da composição química revela:

metálicos .....	asteróides tipo M
ferropétreos .....	asteróides tipo S
condritos ordinários .....	manto e crosta de planetas
condritos carbonáceos .....	asteróides tipo C
acondritos .....	Lua e Marte
poeria zodiacal .....	asteróides e cometas





# Semelhança espectral de meteoritos e asteroides



Piroxênios:  $XY(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6$ ,  
X = Cálcio, Sódio, Ferro<sup>+2</sup>, Magnésio ou, mais raramente, Zinco, Manganês e Lítio;

Y = íons de Cromo, Alumínio, Ferro<sup>+3</sup>, Magnésio, Manganês, Escândio, Titânio, Vanádio ou, raramente, Ferro<sup>+2</sup>.

E – enstatite (Mg-rich pyroxene)  
S – silicate – related to stony meteorites  
M – metallic – related to iron meteorites  
C – related to carbonaceous chondrites  
P & D – very dark  
V – Vesta

