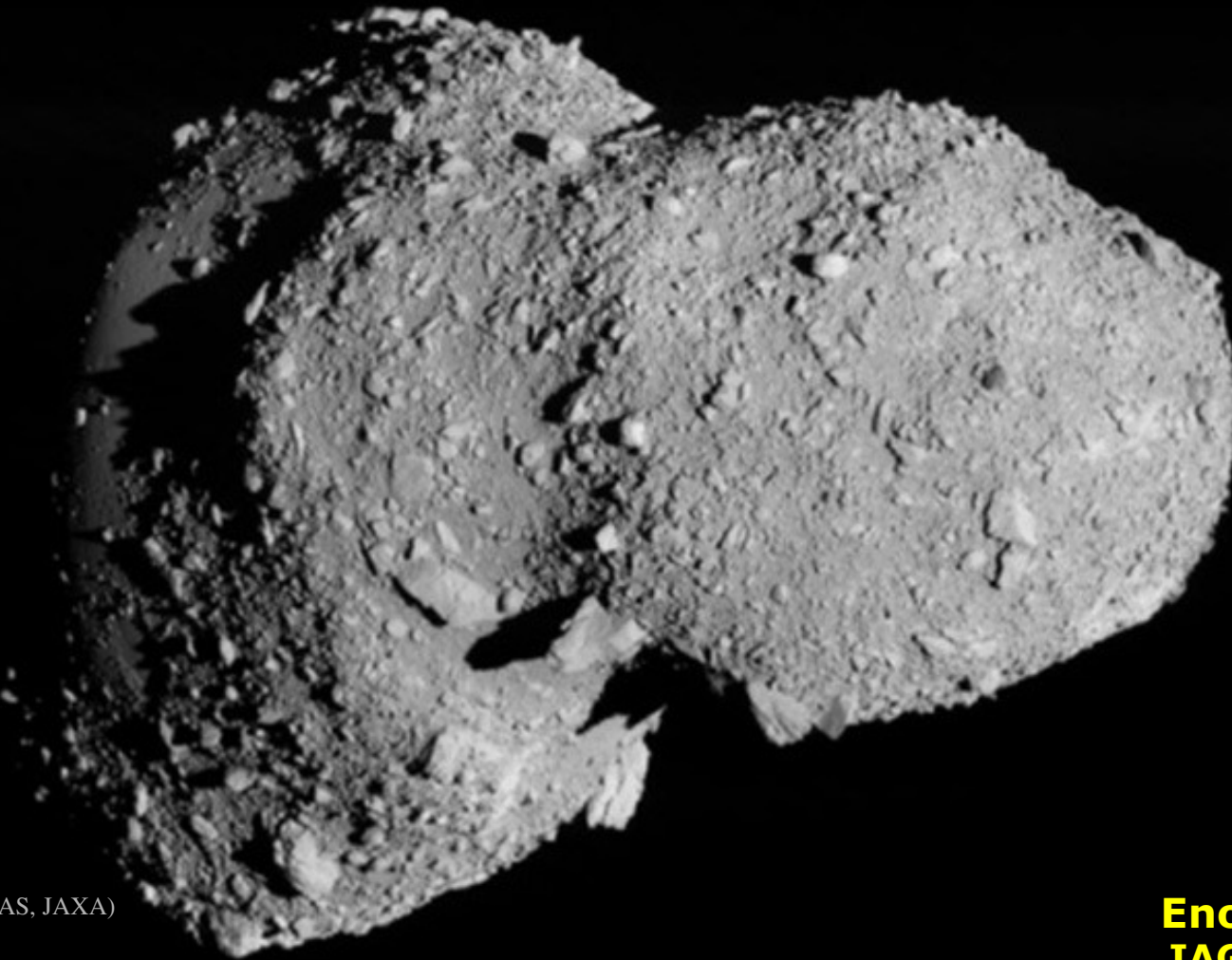


ASTRONOMIA DO SISTEMA SOLAR (AGA-292)

ASTERÓIDES



Itokawa (ISAS, JAXA)

Enos Picazzio
IAGUSP - 2006

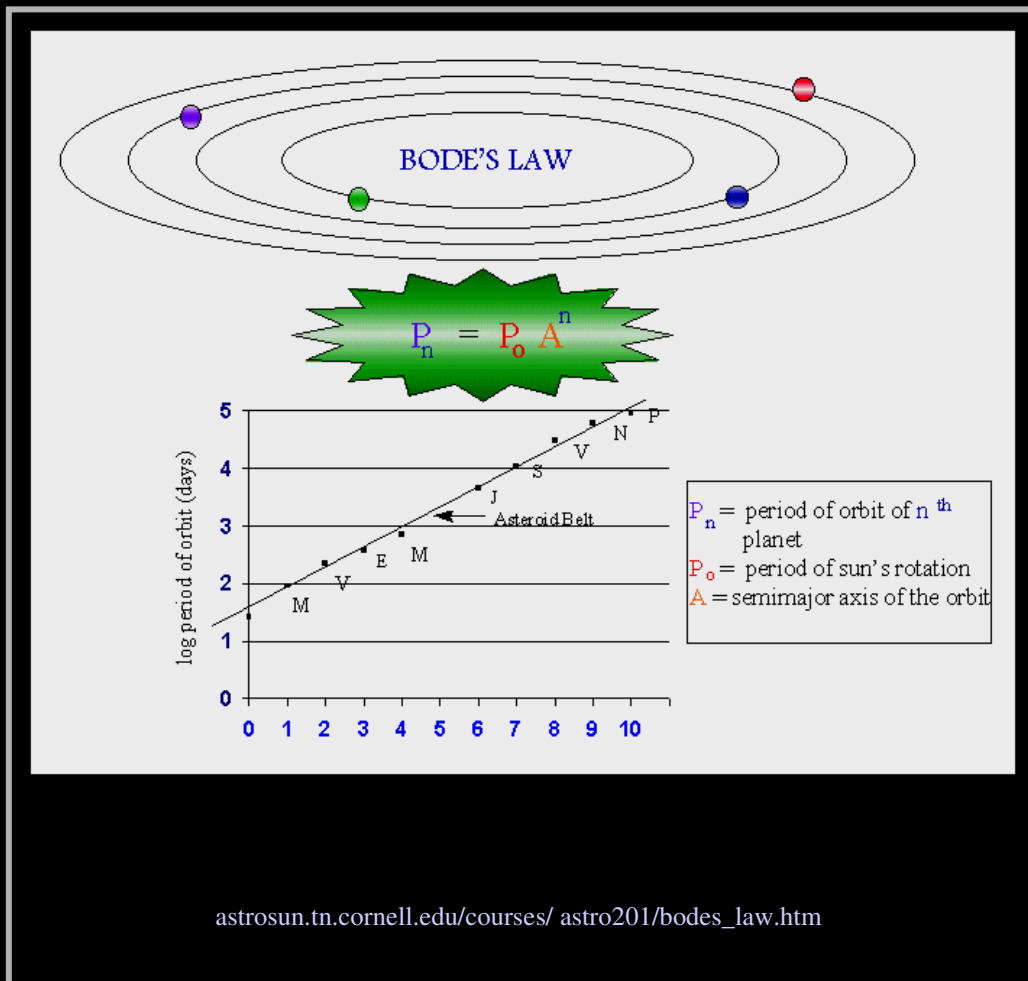
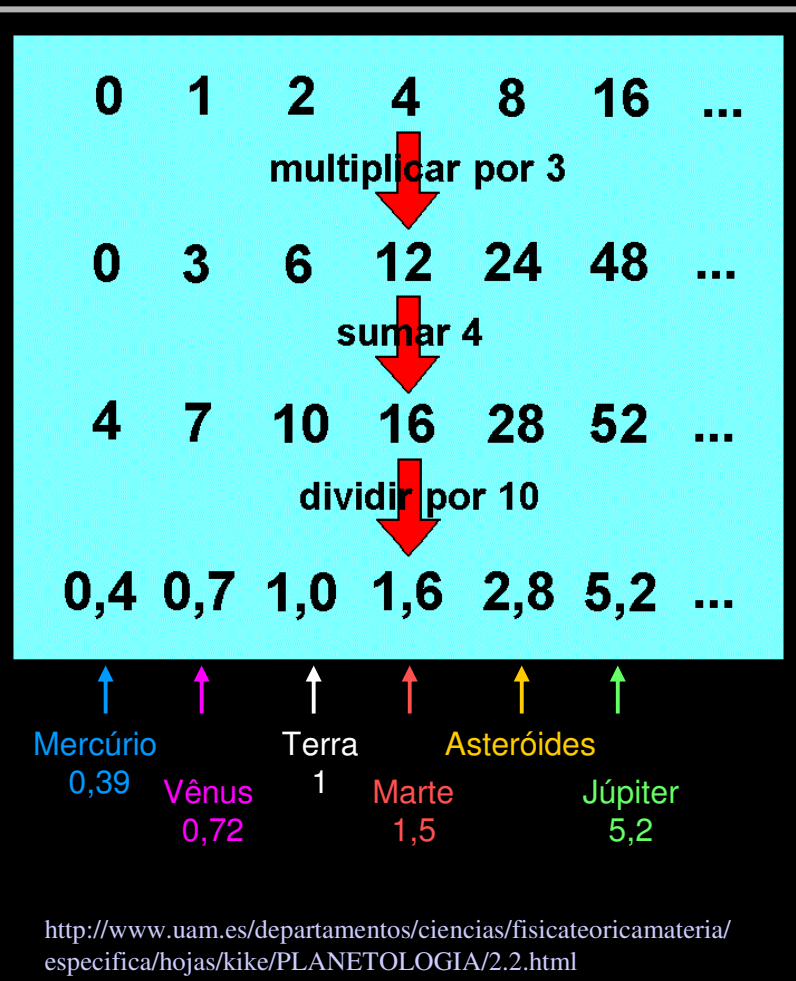
NOTAS DE AULA - NÃO HÁ PERMISSÃO DE USO PARCIAL OU TOTAL DESTE MATERIAL PARA OUTRAS FINALIDADES.

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.

Há várias representações dessa relação.



Magnitude e tamanho

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

Conversion of Absolute Magnitude to Diameter for Minor Planets

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

Diâmetro

Magnitude absoluta

Albedo

Fowler & Chillemi (1992)

Magnitude e tamanho

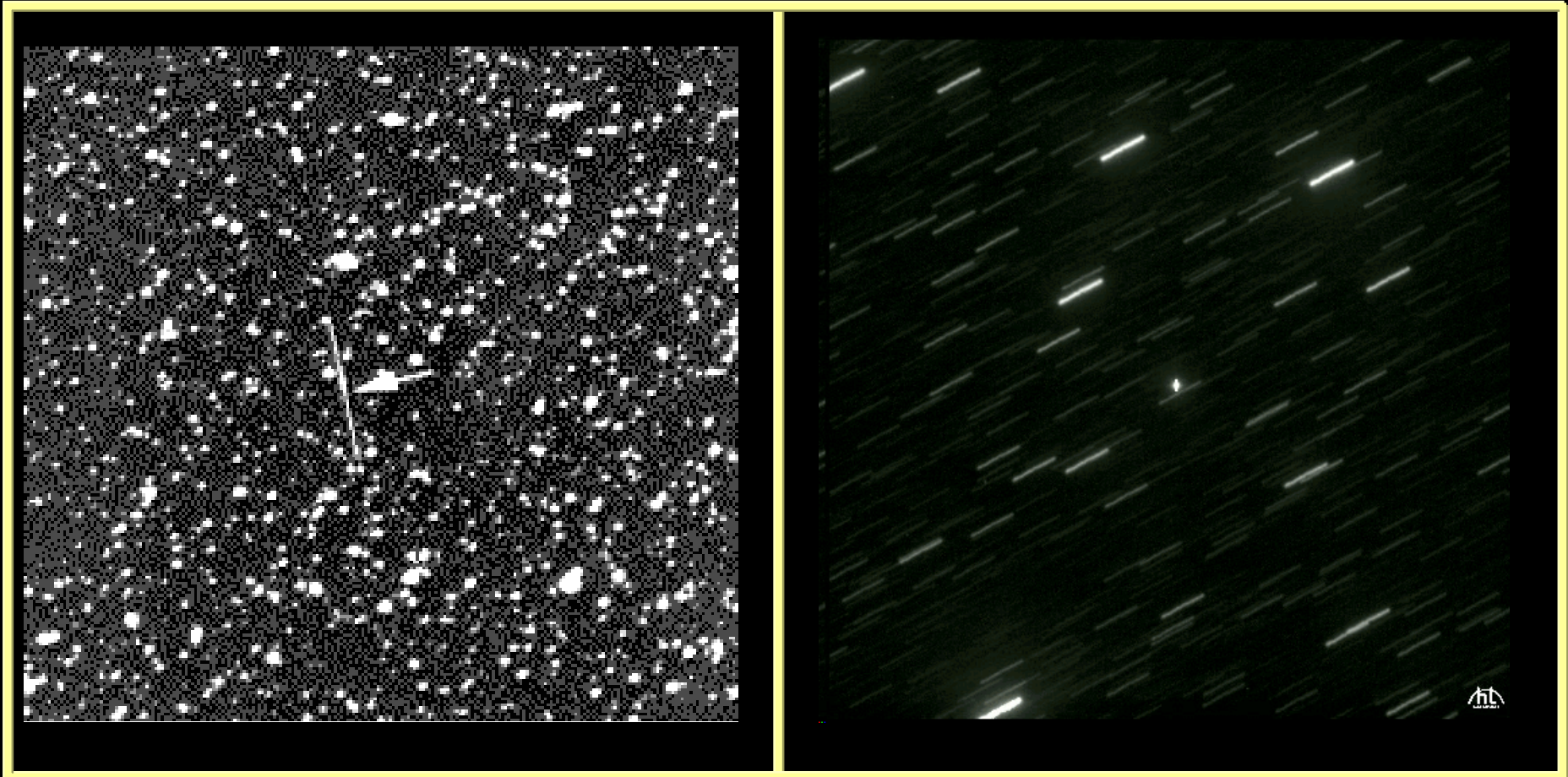
Tabela com diâmetros, admitindo albedo entre 0,25 e 0,05

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

Conversão de magnitude absoluta em diâmetro, on line: <http://www.physics.sfasu.edu/astro/asteroids/sizemagnitude.html>

Movimento de um asteróide

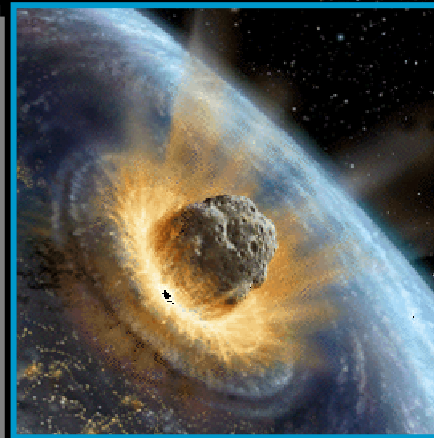
Ele tem movimento próprio, maior que o sideral.
Portanto, move-se contra o fundo estrelado.



Telescópio em movimento sideral:
asteróide traça uma trajetória

Telescópio em movimento próprio do asteróide

Impacto



Tunguska

Sibéria

30/06/1908, às 7h



Visão atual

A poeira permaneceu semanas na atmosfera.

A luz solar refletida clareava as noites numa extensão que ia das montanhas do Cáucaso às Ilhas Britânicas.

Nenhum fragmento foi encontrado no solo.

Impacto

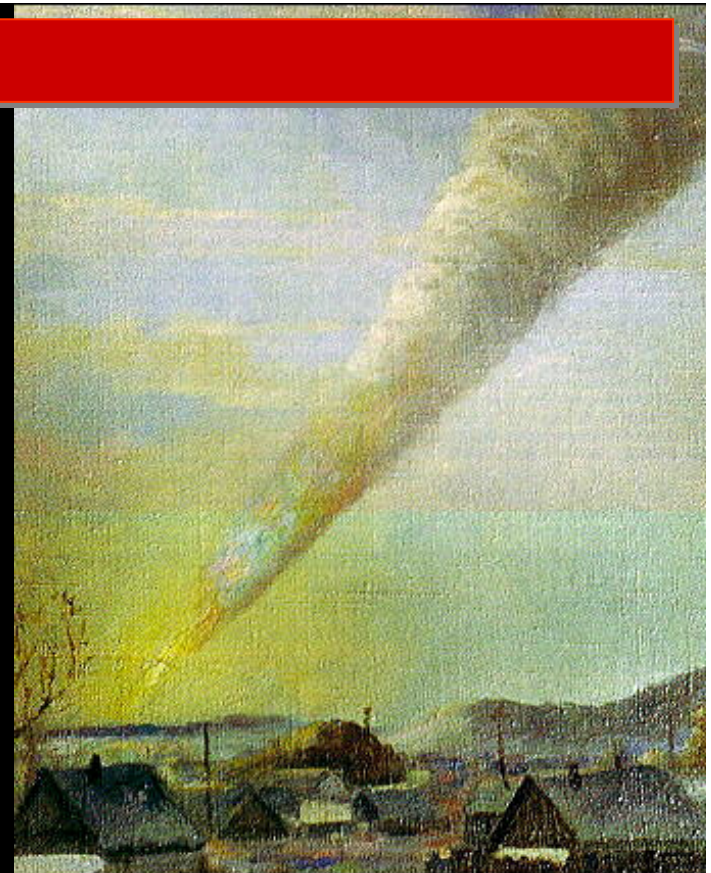
Sikhote-Alin

Sibéria

12/02/1947, às 10:30h

Pintura retratando a queda
em Sikhote-Alin

um dos fragmentos



Brasil

Domo de Araguainha **Mato Grosso**

40 km, 249 milhões de anos.



Serra da Cangalha **Tocantins**

12 km, 300 milhões de anos



Brasil

Domo de Araguainha Mato Grosso

40 km, 249 milhões de anos.



Serra da Cangalha Tocantins

12 km, 300 milhões de anos



Cratera de Vargem Grande



Panorâmica



Violência de um Impacto

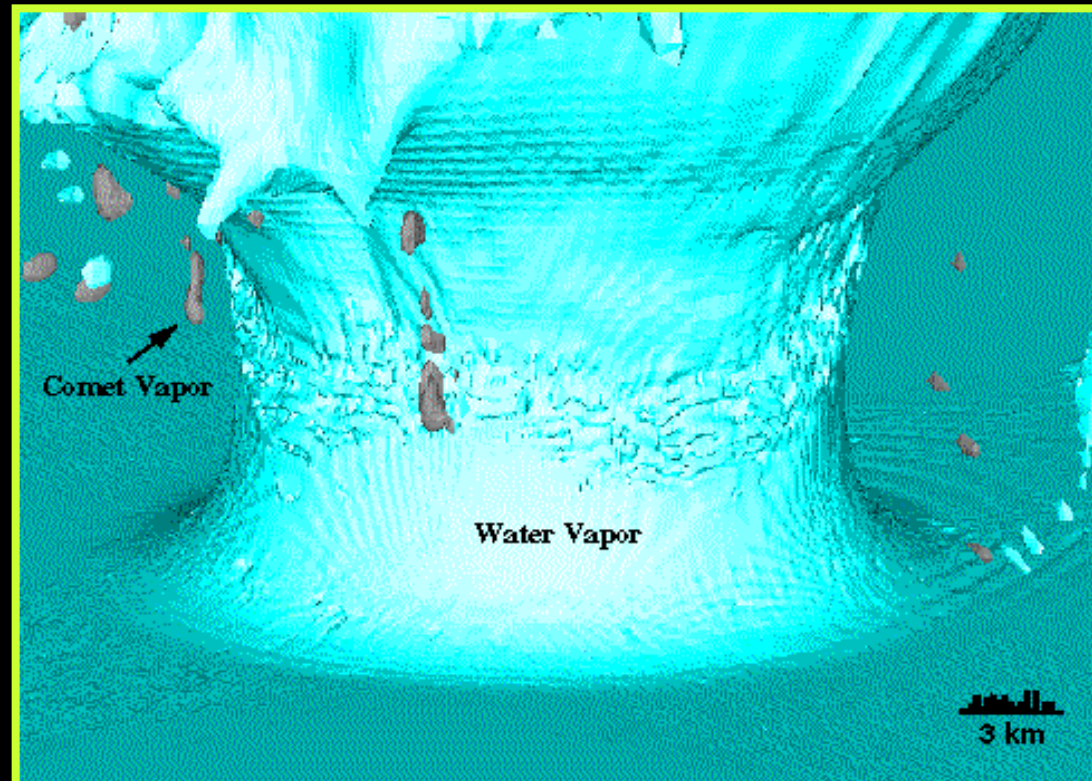
A dissipação instantânea da energia cinética provoca o efeito da explosão.

Energia Cinética

$$\text{massa} \rightarrow \frac{M \times V^2}{2} \leftarrow \text{velocidade}$$

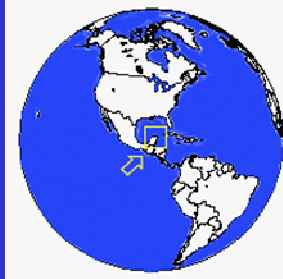
Embora com menor massa os cometas podem provocar colisões mais violentas que os asteróides porque movem-se com velocidades bem maiores.

Ao lado uma simulação de um impacto de grandes proporções no mar. A altura do jato de água lançada ao ar pode ultrapassar o teto de circulação dos vãos civis. O Tsumani decorrente atinge proporções jamais vistas.



Chicxulub

Península de Yukatan
(México)



**Este evento catastrófico
ocorreu na época da
extinção dos dinossauros.**

Simulador de Impacto, on line:
<http://www.lpl.arizona.edu/impacteffects/>

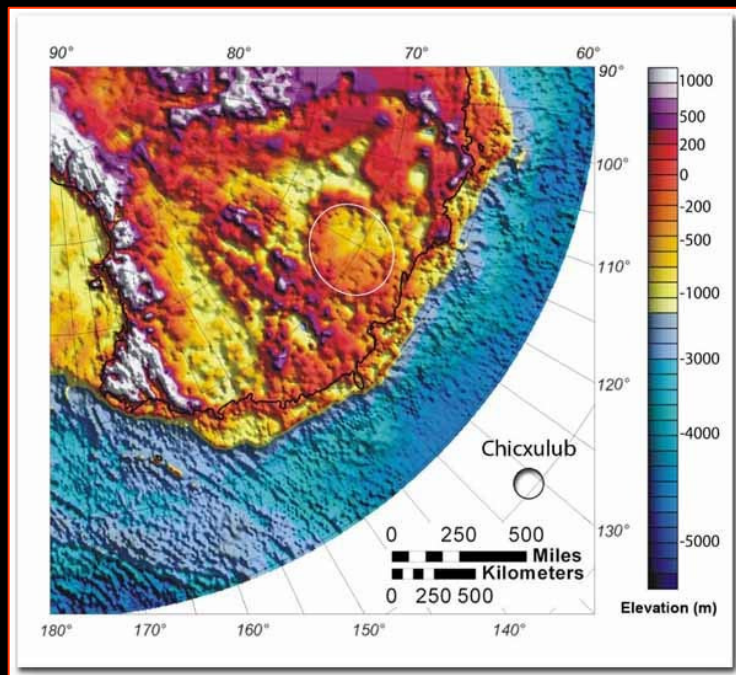
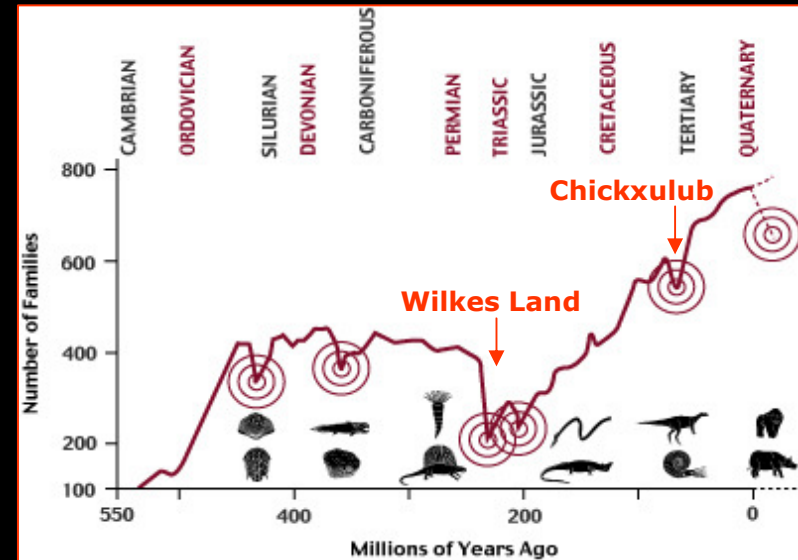
Terra

Wilkes Land

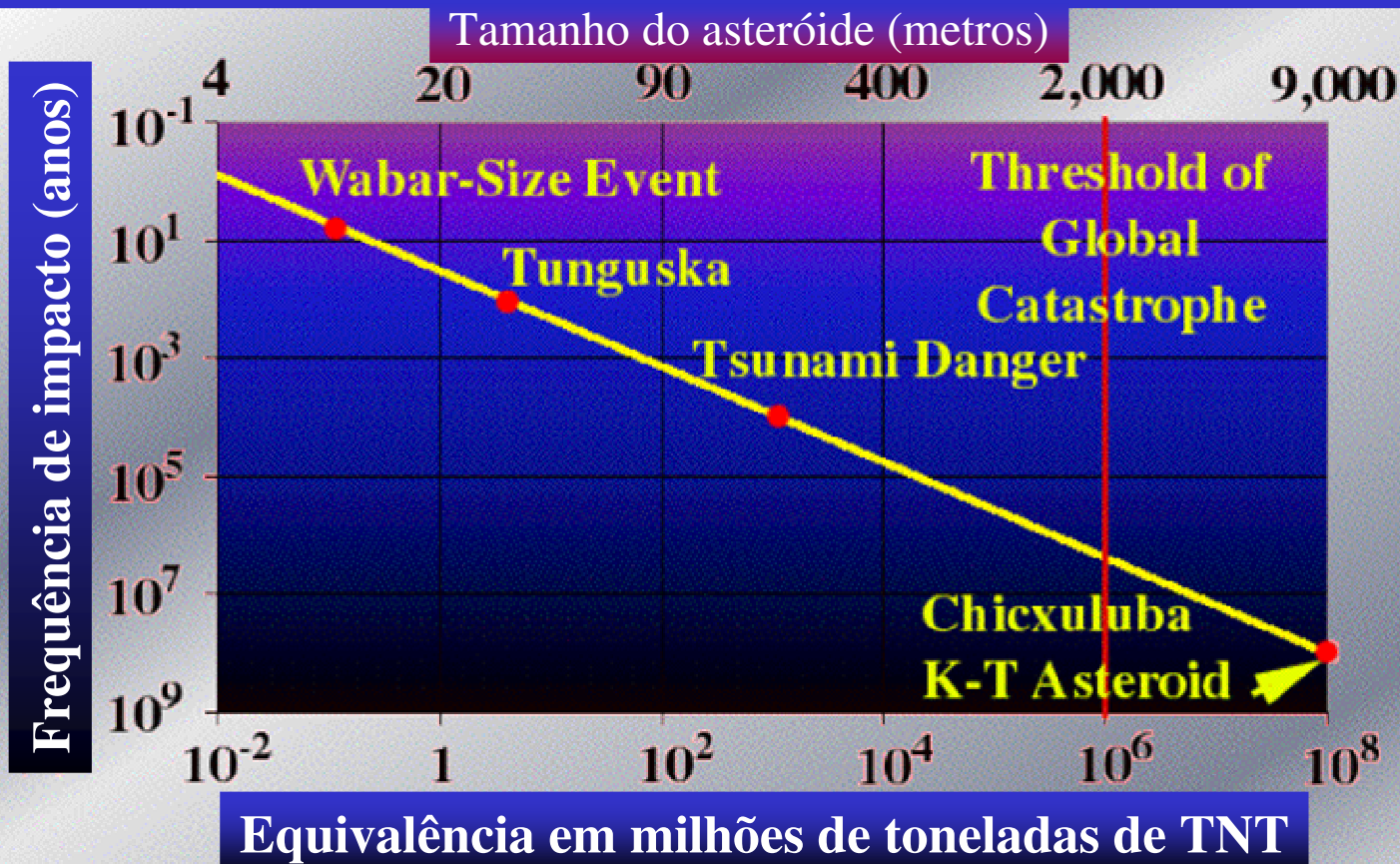
~480km

250 milhões de anos

Esta cratera, recentemente descoberta, foi produzida por um impacto de grandes proporções ocorrido na época da maior extinção em massa registrada.



Frequência das colisões



<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.

Asteróides do Cinturão

Asteróide (descoberta)	Diâmetro (1) (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

Asteróides do Cinturão

Características

Tipo	C	M	S
Abundância	60%	≤ 10%	≈ 30%
Composição predominante	C + Fe ₃ O ₄	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

Total: incalculável (depende do tamanho)

Maioria está no Cinturão

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

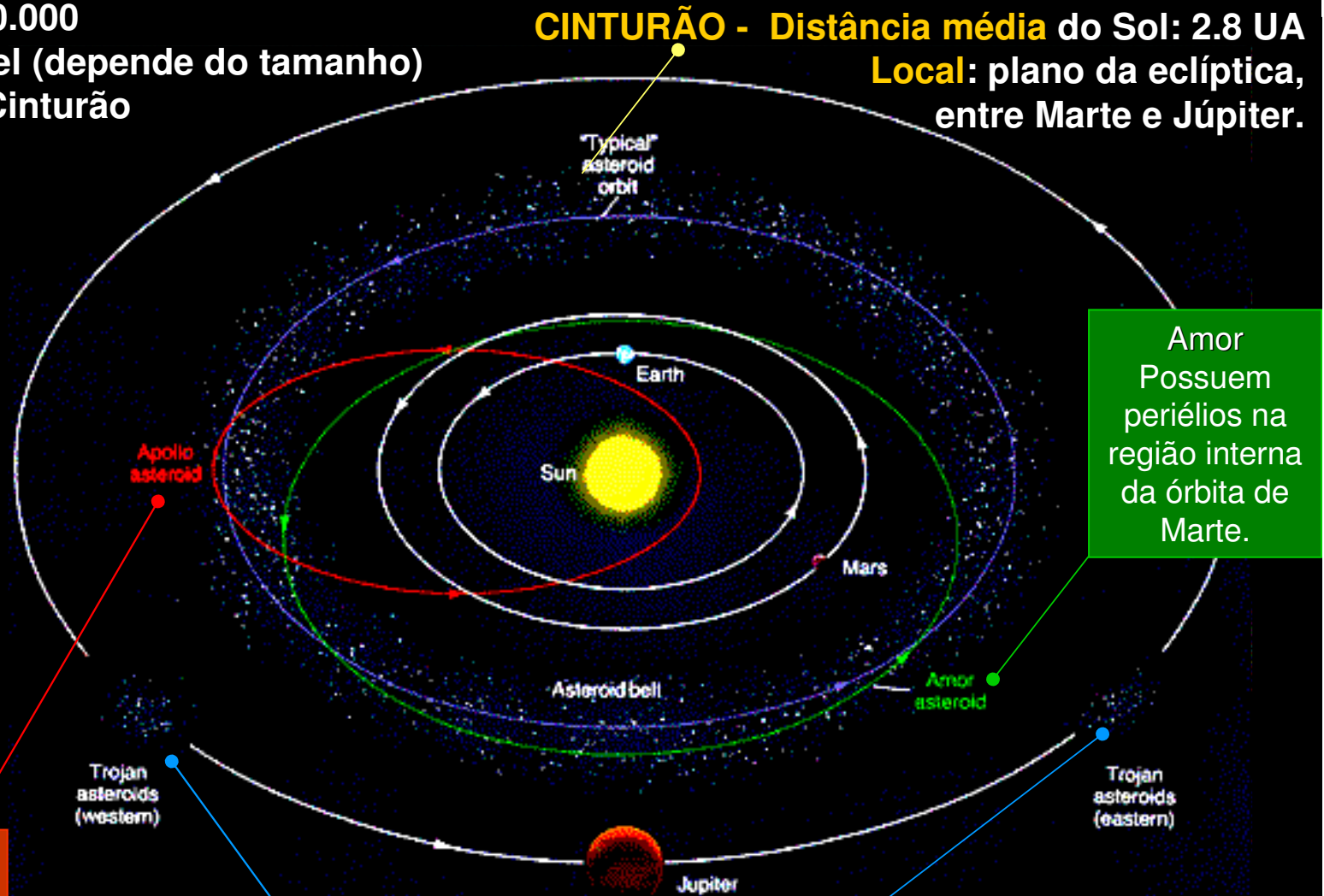
Possuem periélio dentro da região interna à órbita da Terra. São de origem recente.

Trojan asteroids (western)

Troianos

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

Voyager passou pelo Cinturão sem incidentes



Amor
Possuem periélios na região interna da órbita de Marte.

Trojan asteroids (eastern)

Asteróides do Cinturão

- 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 and 10 Hygiea**
 - Diâmetros entre 400 e 525 km
- Os demais asteróides são menores que 340 km

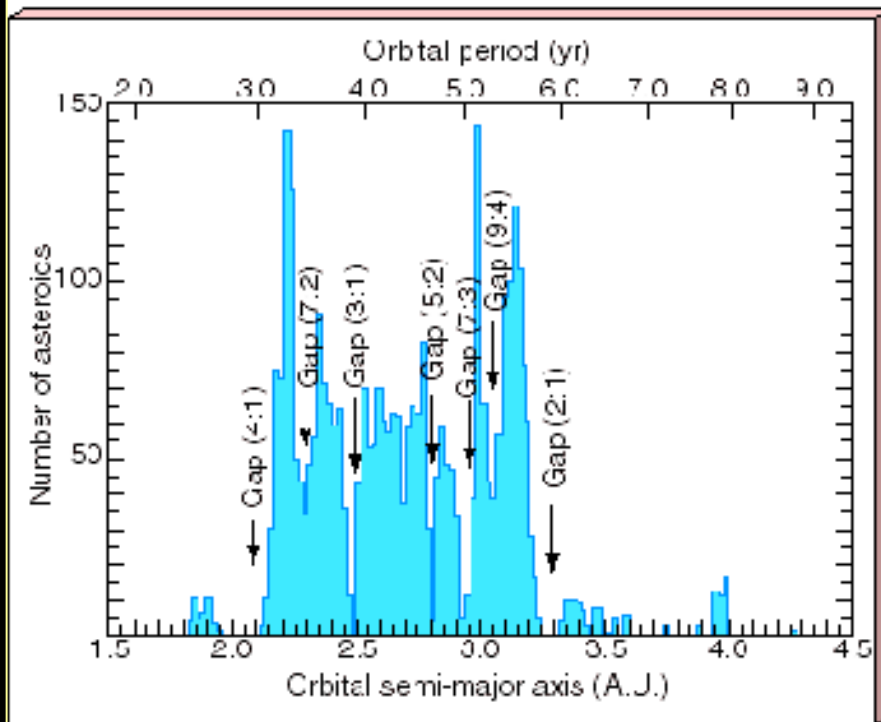
Asteróides do Cinturão – os mais conhecidos

Asteróides	Diâmetro (km)	Massa (10^{15} kg)	Rotação (horas)	Distância do Sun (U.A.)	Período Orbital (anos)
1 Ceres Planeta-anão	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

Asteróides do Cinturão

- **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 C e D são descobertos a distâncias maiores.

Asteróides do Cinturão – Lacunas de Kirkwood



(a)

Se o período do asteróide for fração do período de Júpiter, a órbita é instável. Esse efeito é conhecido como *ressonância*.



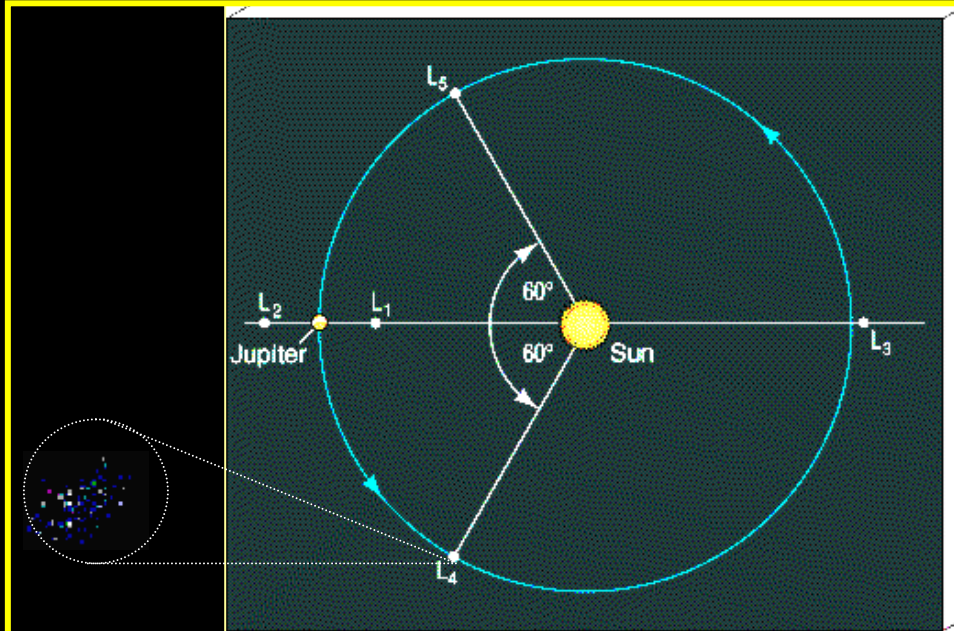
(b)

Asteróide em ressonância 2:1
– a cada duas voltas do asteróide (ou uma de Júpiter) a distância entre eles é mínima.

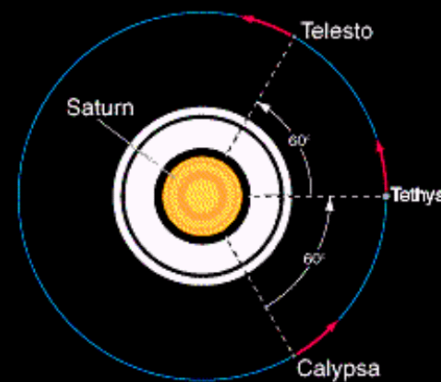
Em cada aproximação máxima há forte interação gravitacional, que acaba instabilizando (portanto modificando) a órbita.

Asteróides Troianos

- 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.

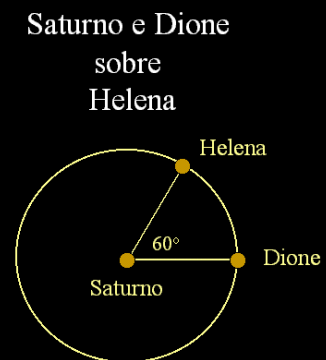


Os Pontos Lagrangianos representam regiões de equilíbrio de forças. L1, L2 e L3: o equilíbrio é instável; L4 e L5: regiões de estabilidade



Saturno e Tetis sobre Teleso a Calipsa

Situação parecida em Saturno



Saturno e Dione sobre Helena

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

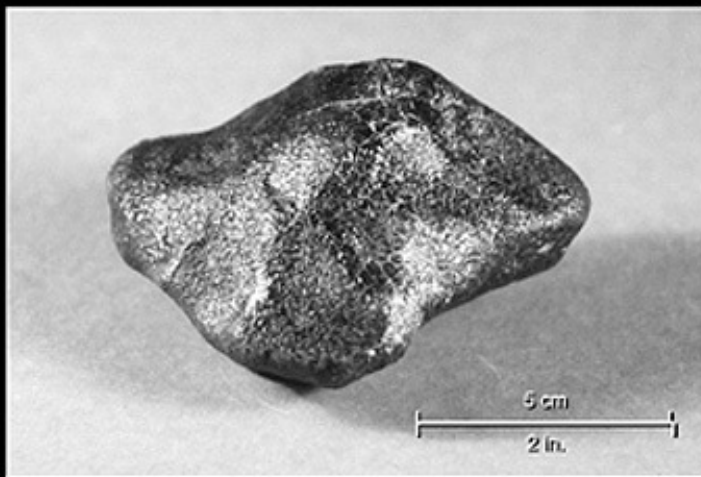
– Grupo Apollo:

- 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

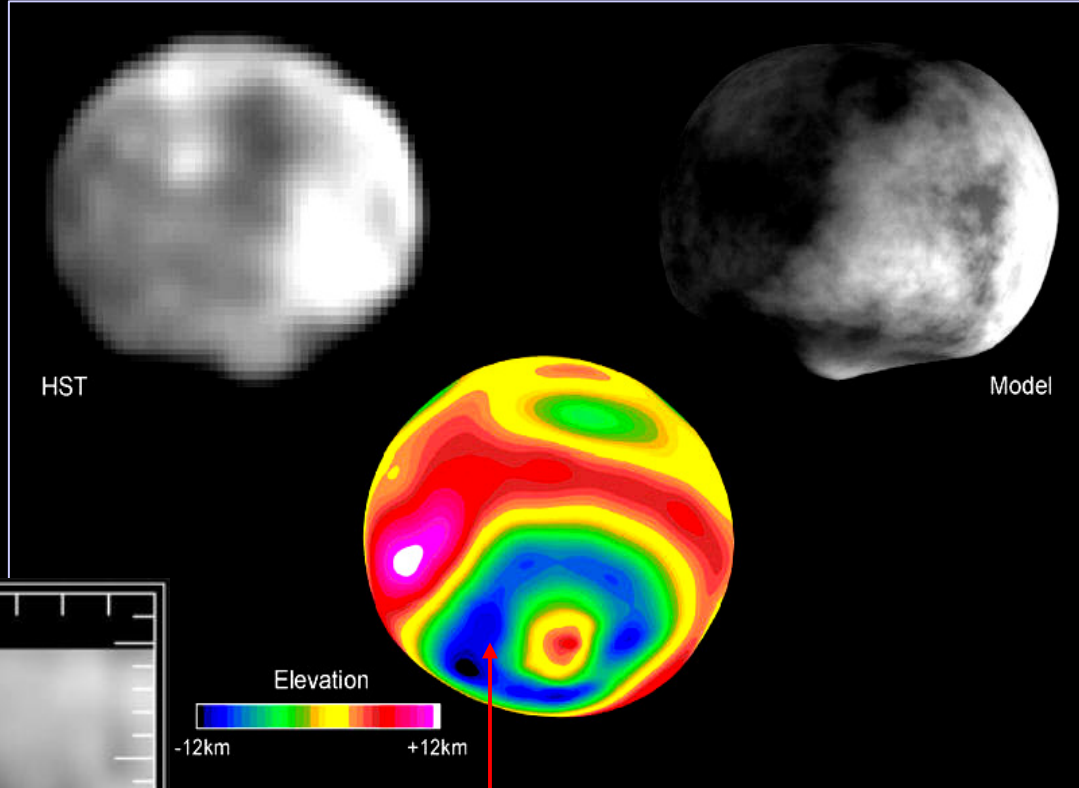
– Grupo Amor:

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

Asteróide Vesta



Meteorite - Fragment of Vesta
Lab Photograph - Russel Kempton, New England Meteoritical Services
PRC95-208 - ST Scl OPO - April 19, 1995 - B. Zellner (GA Southern Univ.), NASA



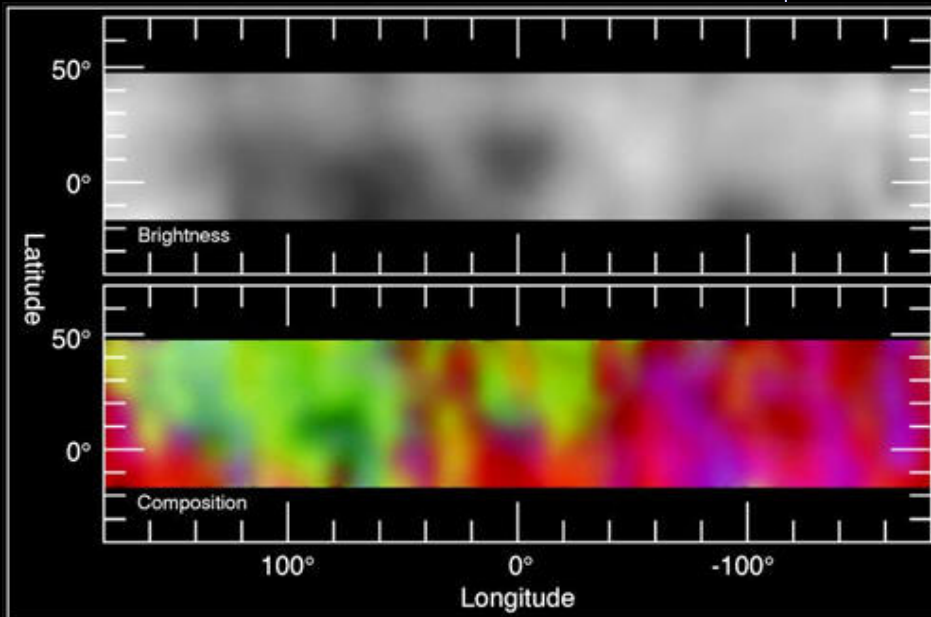
HST

Model

Elevation
-12km +12km

Cratera com formato típico de colisão
Seria uma prova da fragmentação de um corpo maior?

Cores falsas ressaltam o desnível da superfície



Surface of Asteroid Vesta HST · WFPC2
PRC95-40 · ST Scl OPO · October 9, 1995 · B. Zellner (GA Southern Univ.), NASA

Alguns exemplos

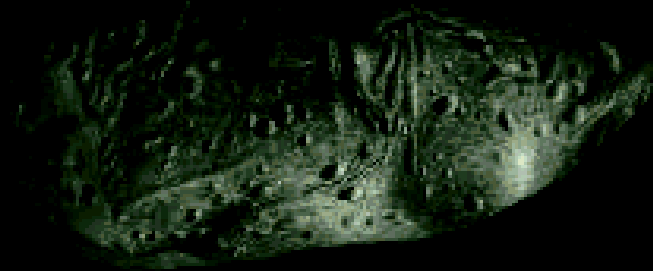


Só os maiores têm forma esférica



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 cratera 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 km²
Idade: 1 bilhão de anos



Tamanho: ~ 1,6 x 1,2 km²

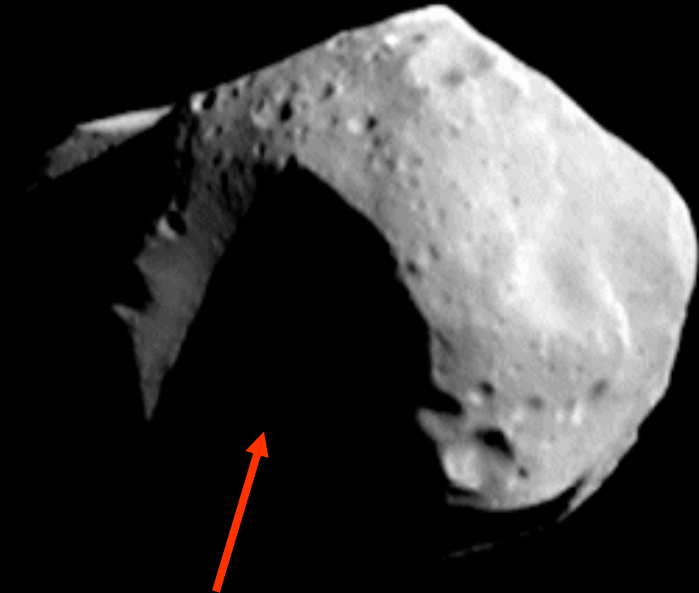
Distância: 90-km

- surpreendentemente esférico apesar de seu pequeno tamanho.

- densidade (2,9 g/cm³) 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/cm³, 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.

Matilde resistiu ao choque porque não seria rígido; o choque foi amortecido pela estrutura de aglomerado.

Asteróides 179 Toutatis

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

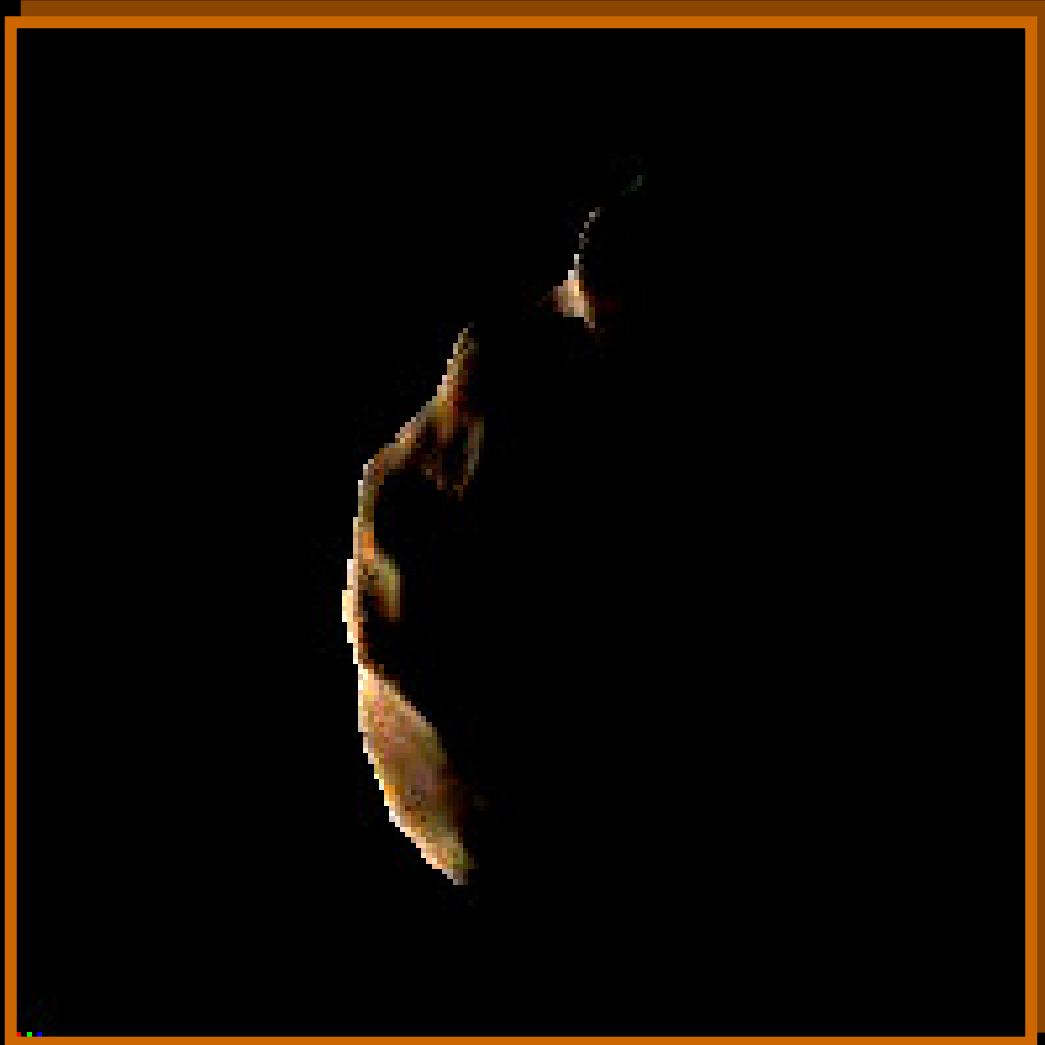
Tamanho: 4.6km x 2.4km x 1.9km

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)



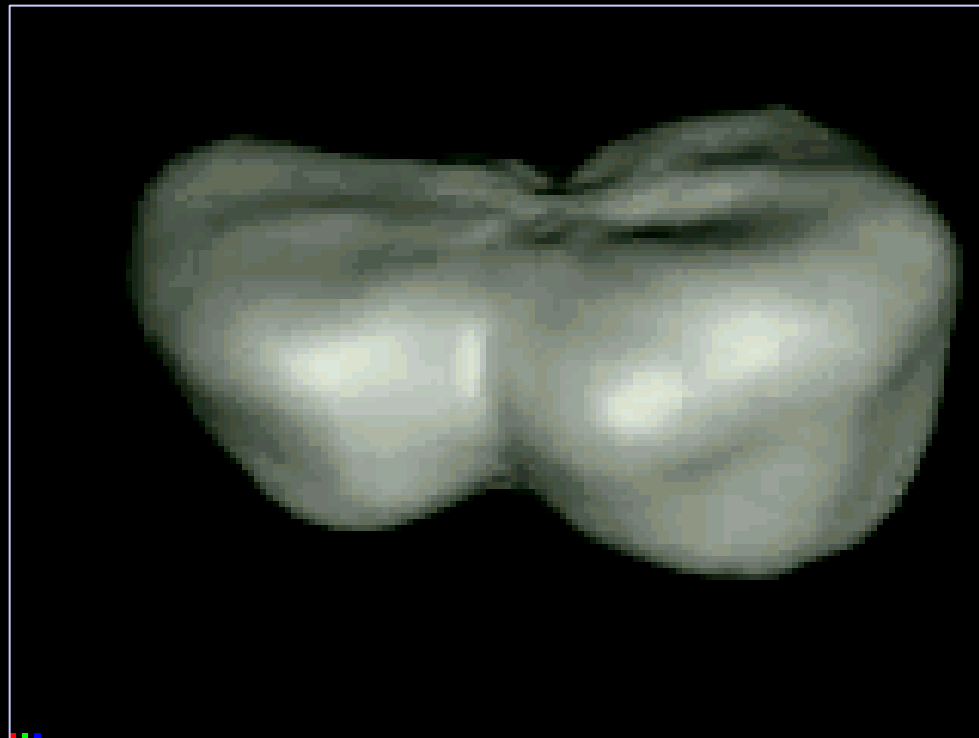
castalia

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

Tamanho: 1.8km x 0.8km

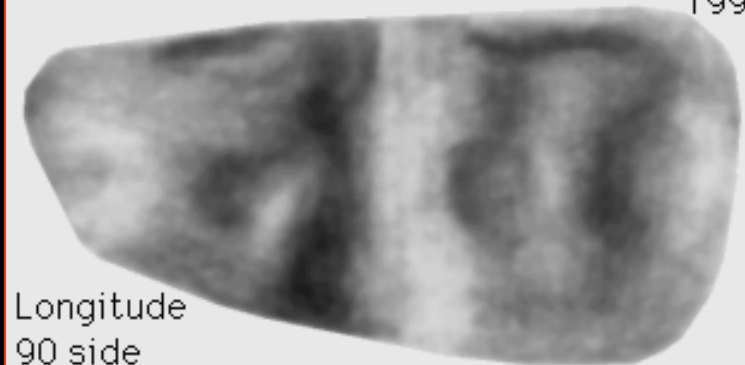
Período Rotacional: 4h42m

Período Orbital: 1,1 ano

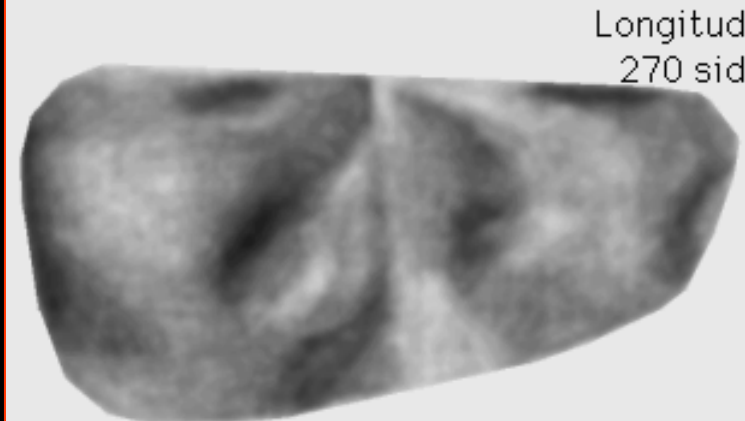


4769 Castalia

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

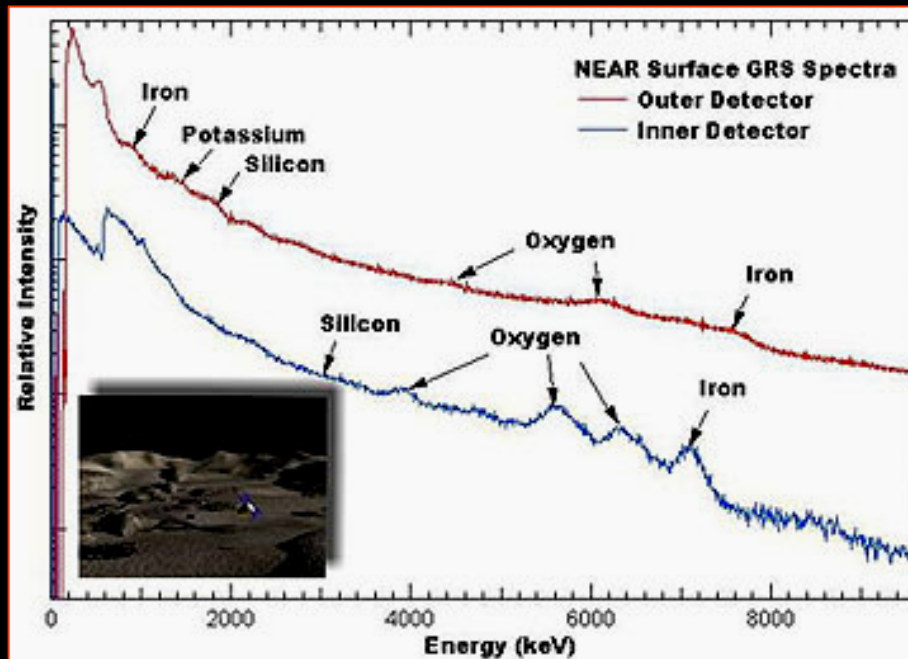
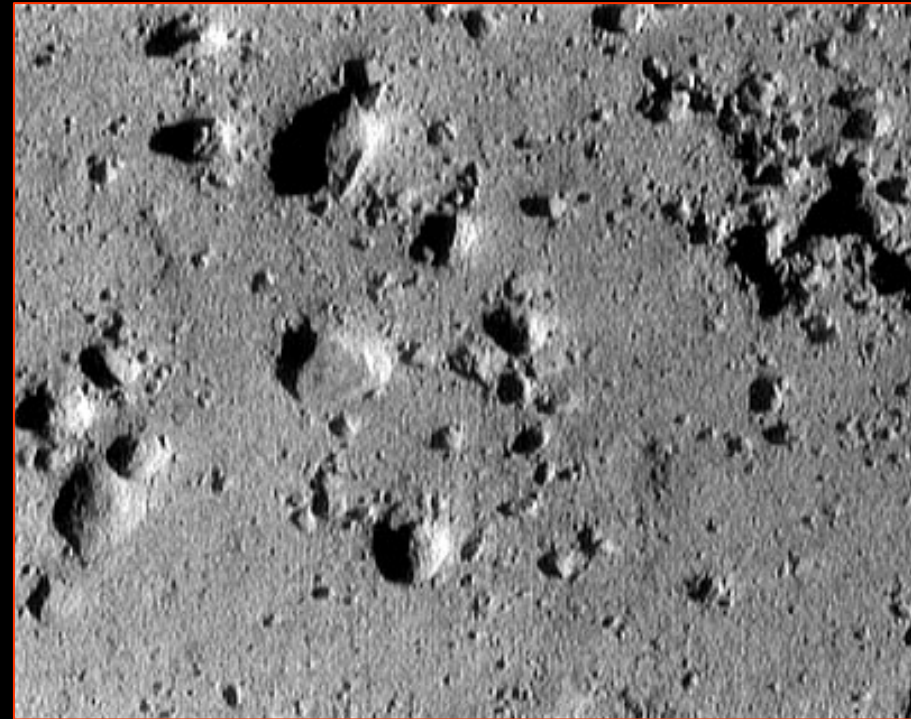
- A sonda NEAR–Shoemaker pousou em Eros 2001
- Asteróide do tipo S
- Tem interior sólido, ao contrário de Matilde.
- Superfície fortemente marcada por crateras.



Asteróides 433 Eros

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

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

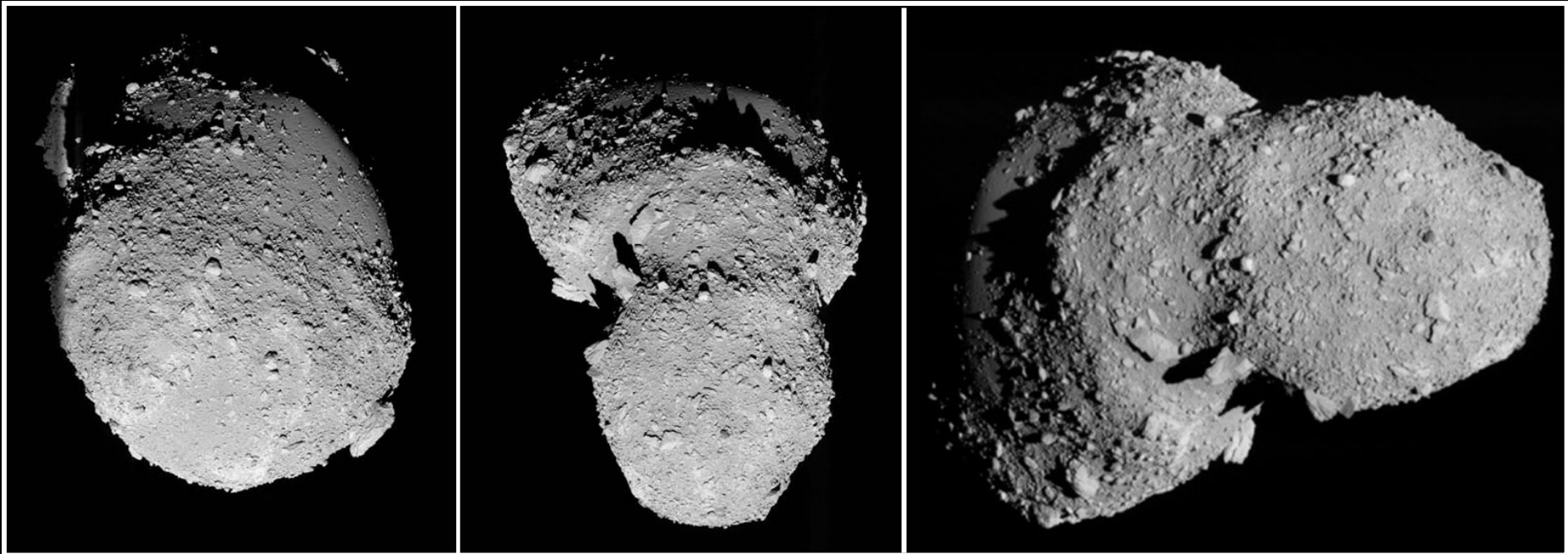


- Após o pouso, foram feitas medidas espectrométricas, que derminaram a composição do material de superfície.

Asteróide Itokawa Aglomerado de cascalhos?

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).

Asteróides versus Satélites

Asteróides

Fobo
28 km



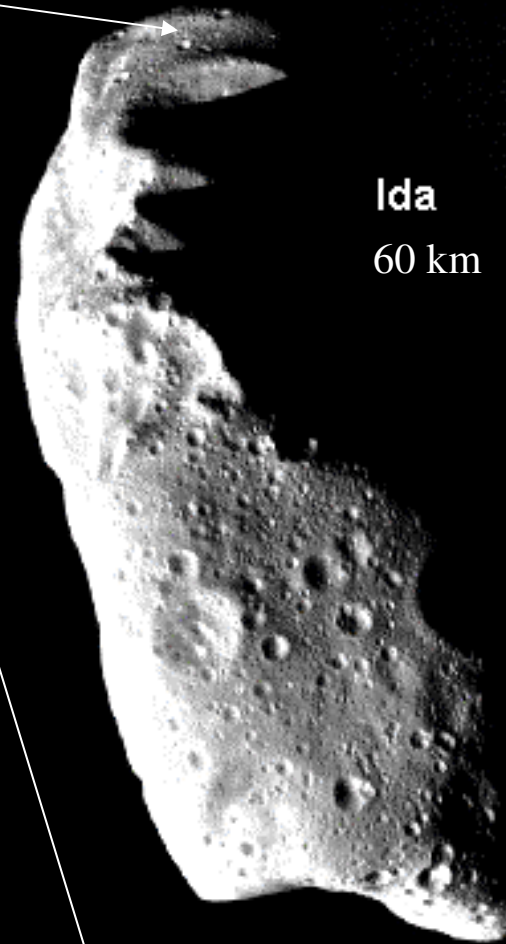
Graspa
20 km



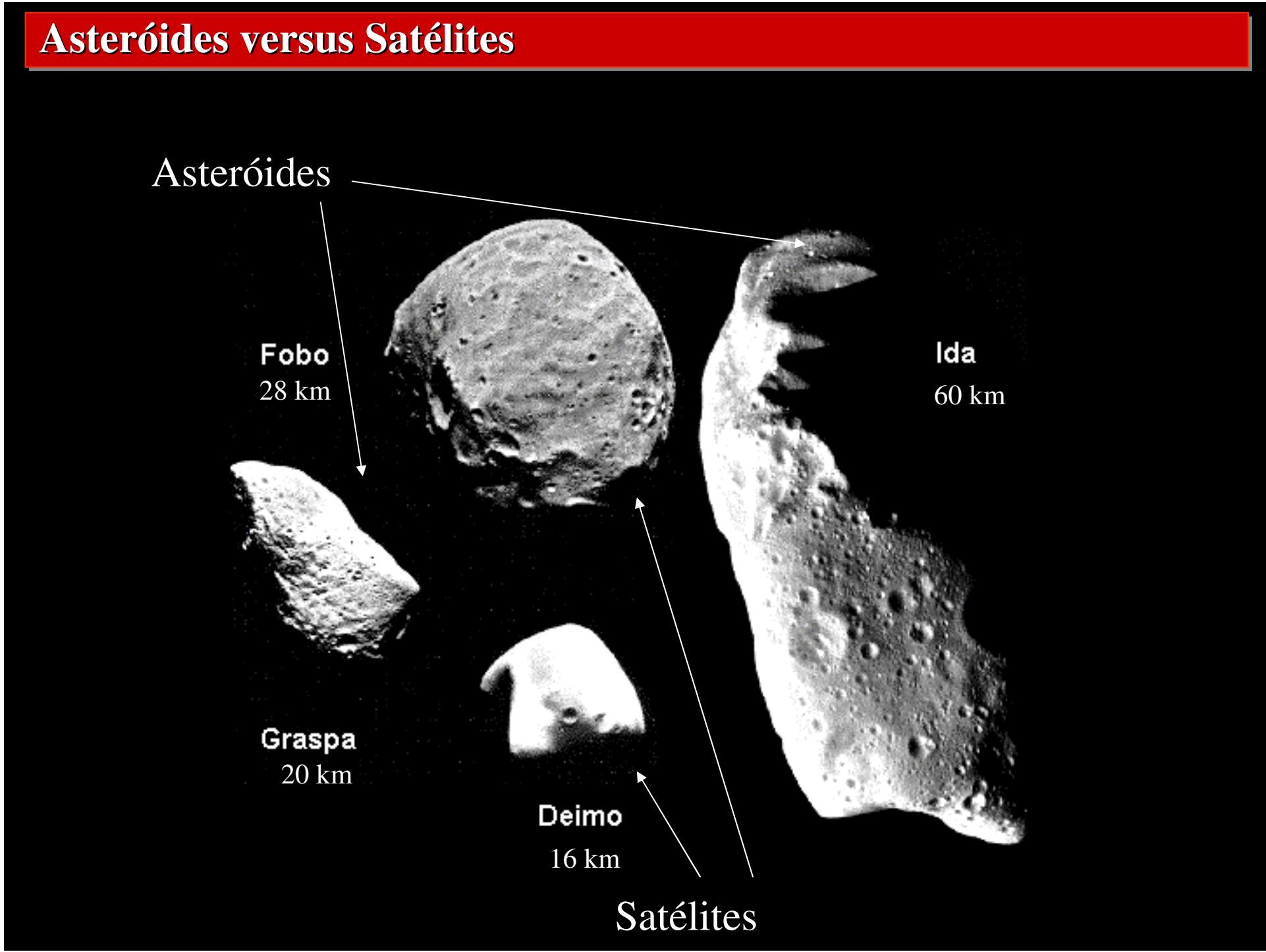
Deimo
16 km



Ida
60 km

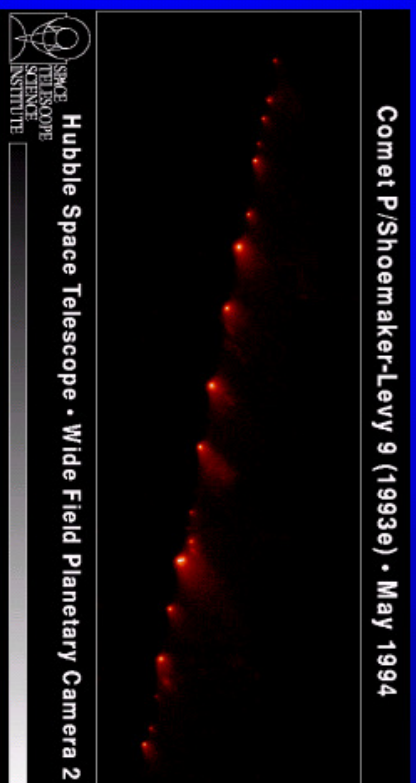


Satélites



Quebra por maré

- Requer tensão de resistência baixa



Casos como o do cometa
D/SL 9 pode provocar cadeias
de crateras

Quebra de asteroídees pode
explicar figura lunar

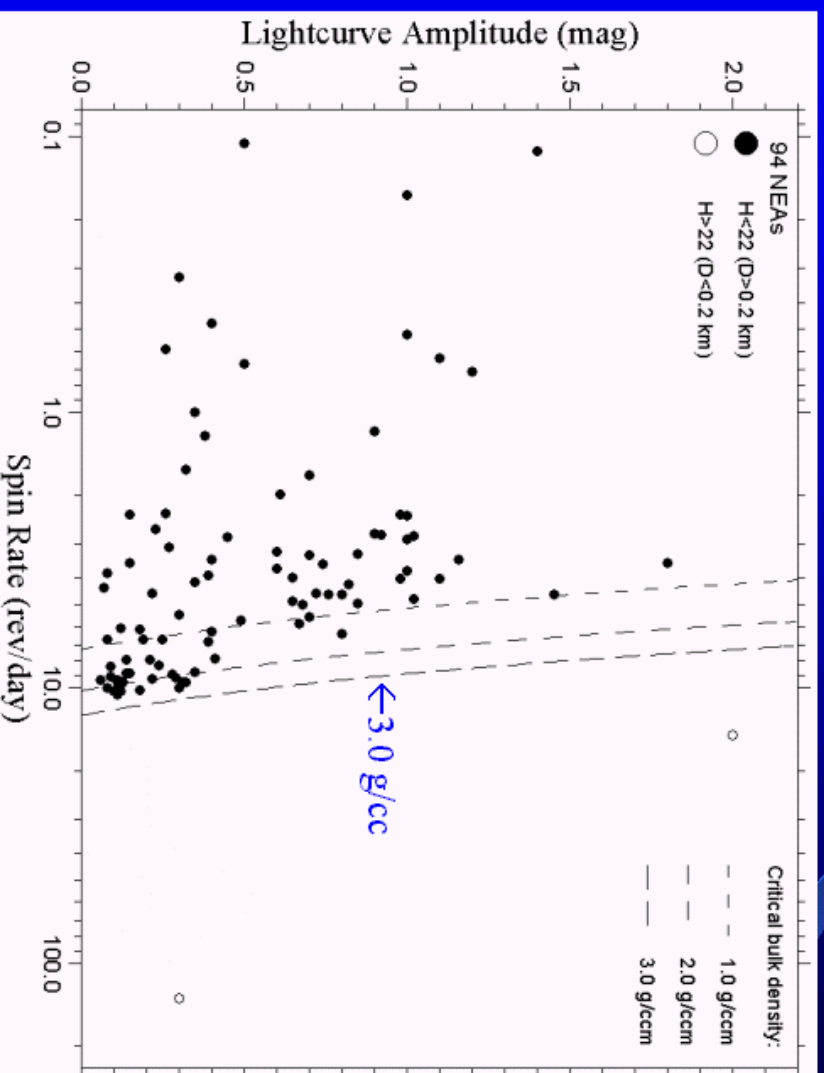
Davy Chain, ~47 km



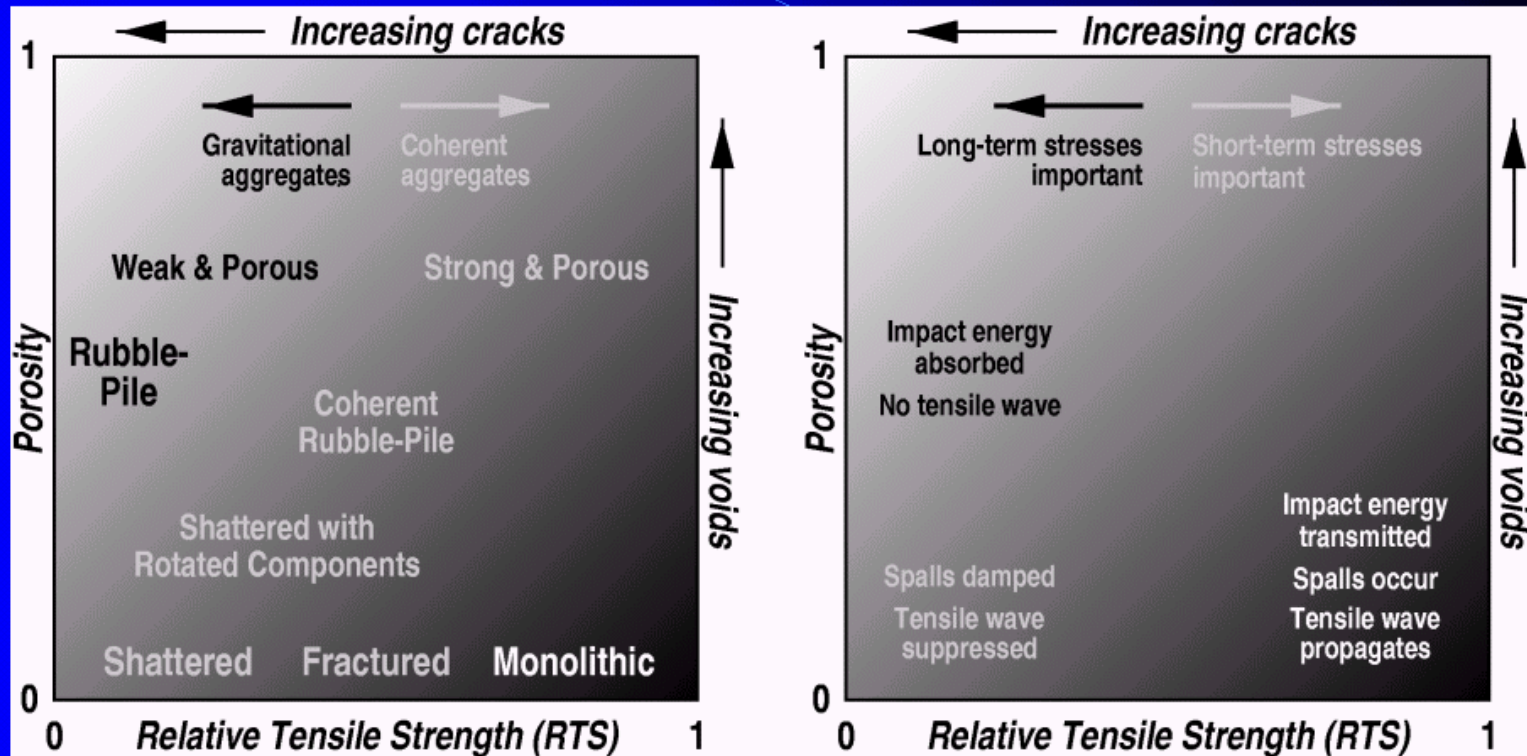
Rotação de Asteróides

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

Pravec & Harris 2000



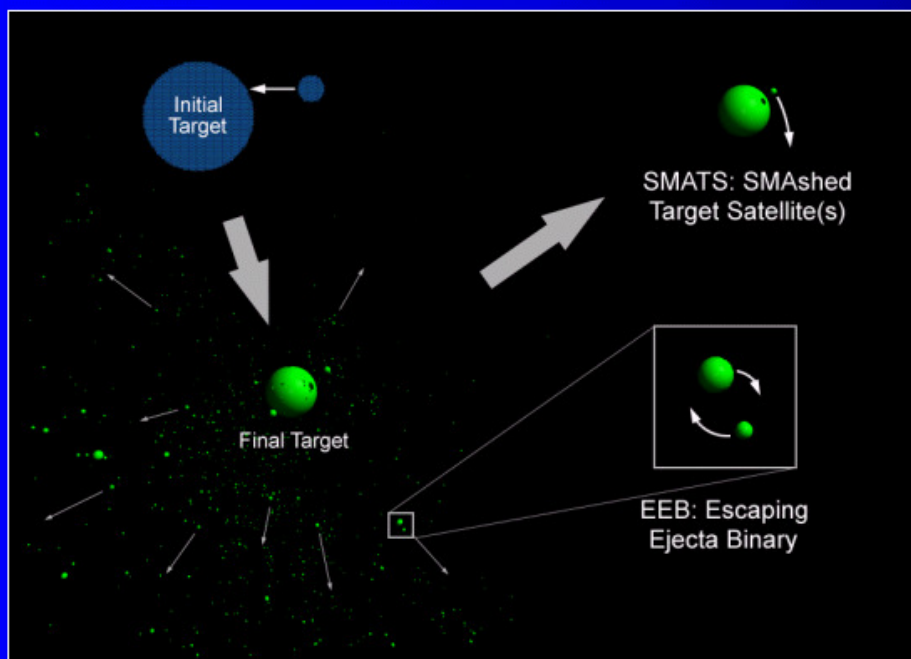
Classificação



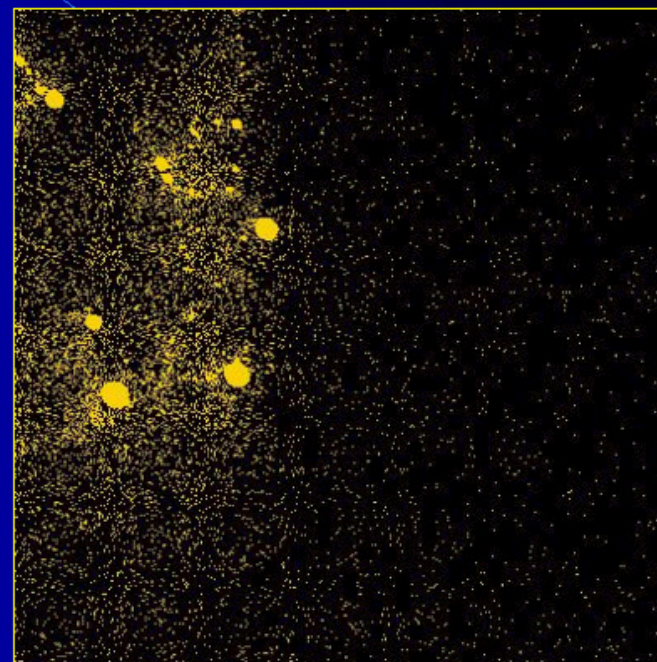
Richardson *et al.* 2003

Resposta ao esforço pode ser predita através de gráfico “tensão (resistência ao estiramento) vs. porosidade”

Reacumulação Gravitacional



Satélites asteroidais (Durda et al.)



famílias de asteróides (Michel et al.)

Condição para forma esferoidal

Forma

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

ρ = densidade de massa

P_c = pressão crítica

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

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

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

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

O raio crítico obtém-se fazendo $R = l$; 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 cm^{-2} para materiais ordinários e

$\langle\rho\rangle = 4$ g cm^{-3} para asteróides,

$R_c = 150$ km \rightarrow **Corpos menores são irregulares**