

**ASTRONOMIA DO SISTEMA SOLAR (AGA-292)**

# **ASTERÓIDES**



Itokawa (ISAS, JAXA)

**Enos Picazzio**  
**IAGUSP - 2006**

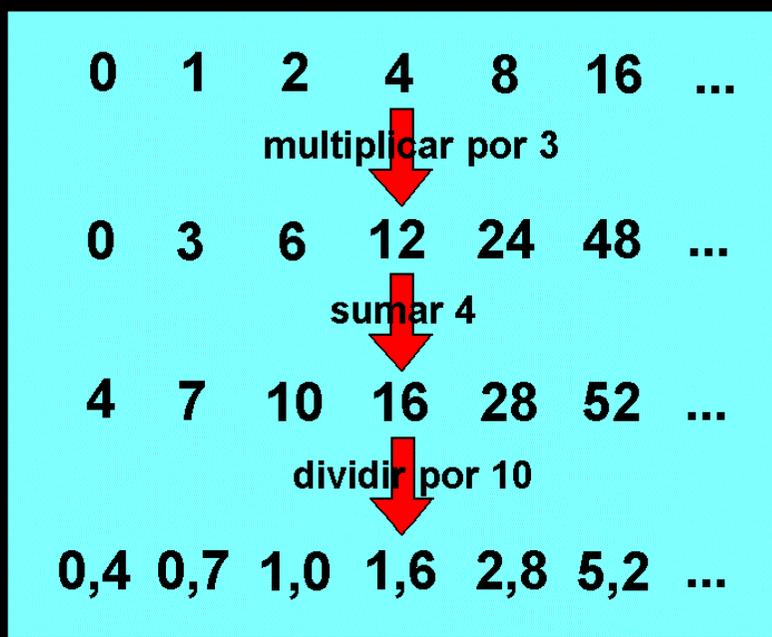
**NOTAS DE AULA - NÃO HÁ PERMISSÃO DE USO PARCIAL OU TOTAL DESTE MATERIAL PARA OUTRAS FINALIDADES.**

# Relação de Titius-Bode

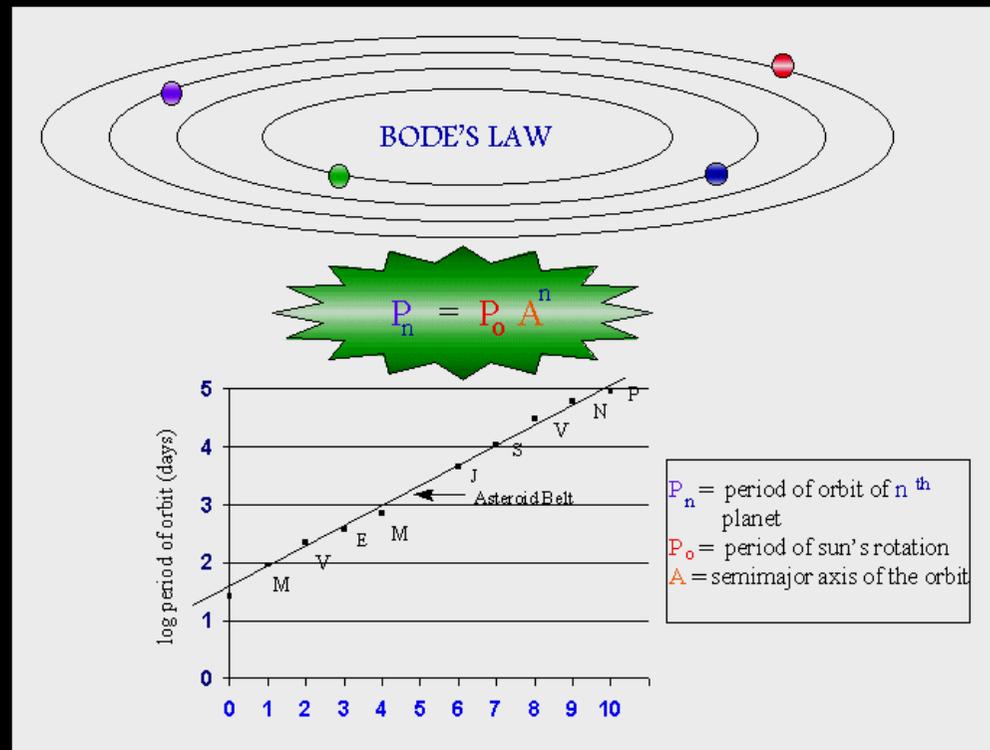
1766: Johann Titius descobriu a relação entre as distâncias dos planetas.

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

Há várias representações dessa relação.



<http://www.uam.es/departamentos/ciencias/fisicateoricamateria/especifica/hojas/kike/PLANETOLOGIA/2.2.html>



[astrosun.tn.cornell.edu/courses/astro201/bodes\\_law.htm](http://astrosun.tn.cornell.edu/courses/astro201/bodes_law.htm)

## 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

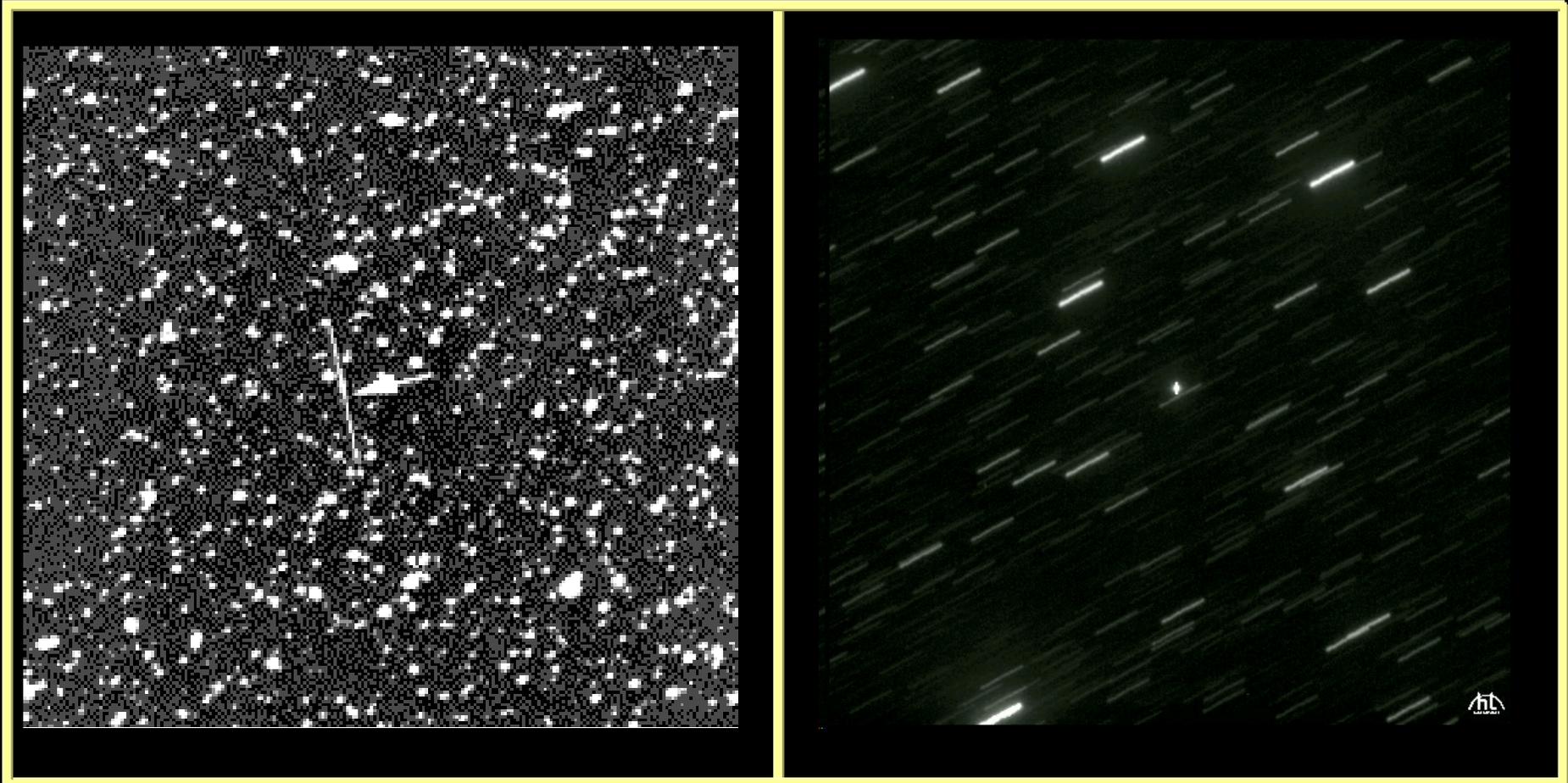
Tabela com diâmetros, admitindo albedo entre 0,25 e 0,05

| 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

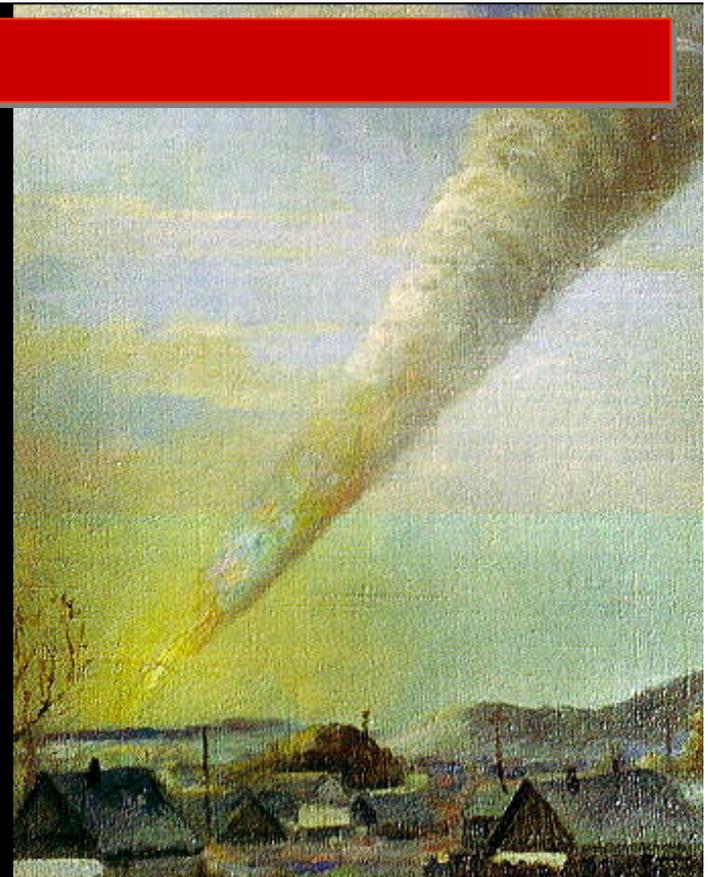
Sikhote-Alin

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

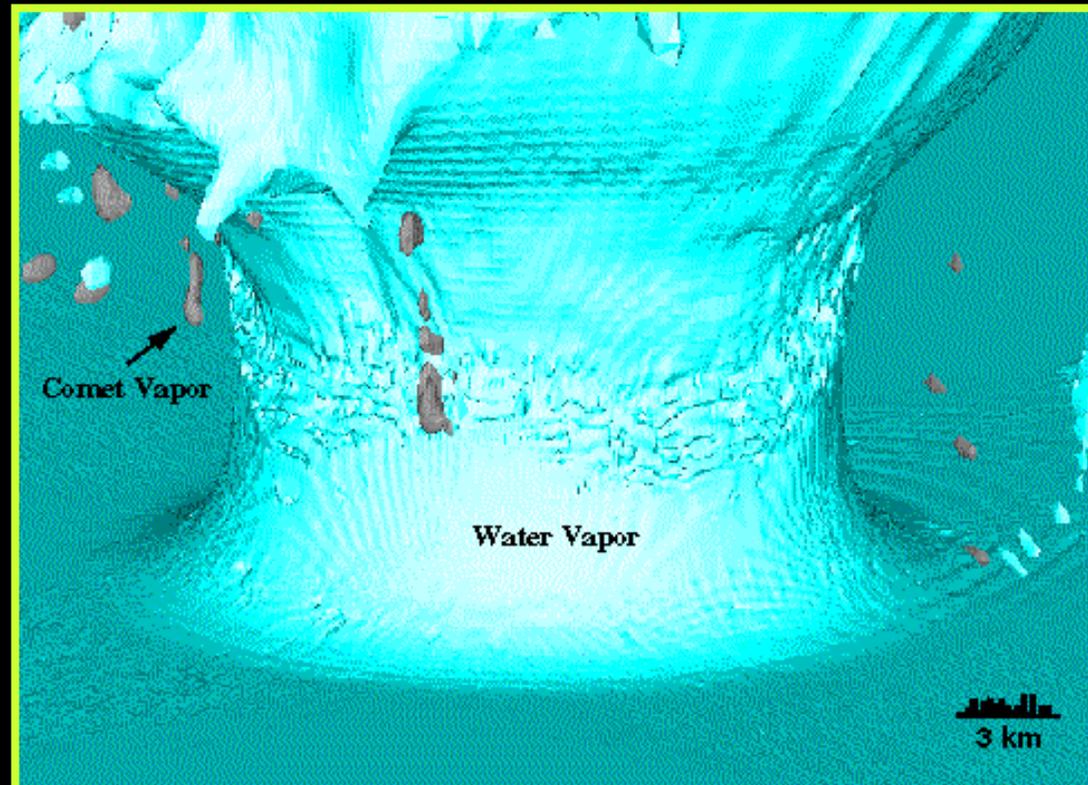
A dissipação instantânea da energia cinética provoca o efeito da explosão.

## Energia Cinética

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

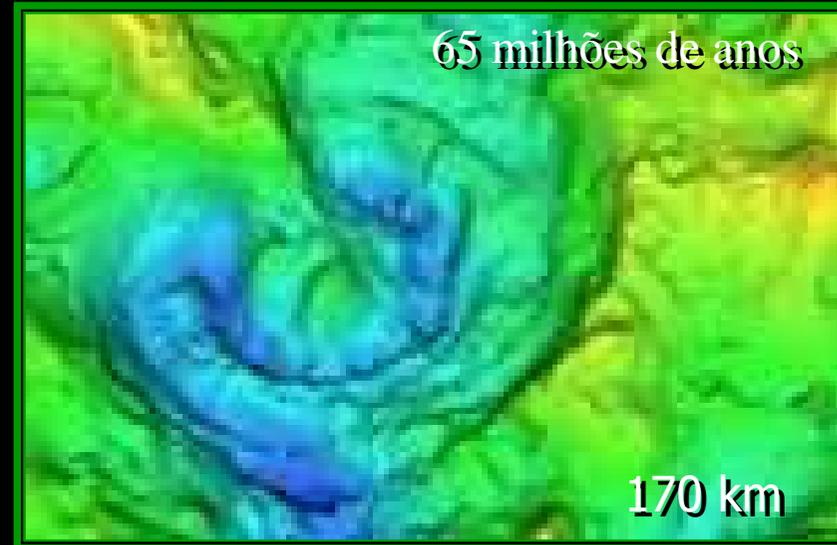
Embora com menor massa os cometas podem provocar colisões mais violentas que os asteróides porque movem-se com velocidades bem maiores.

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/>

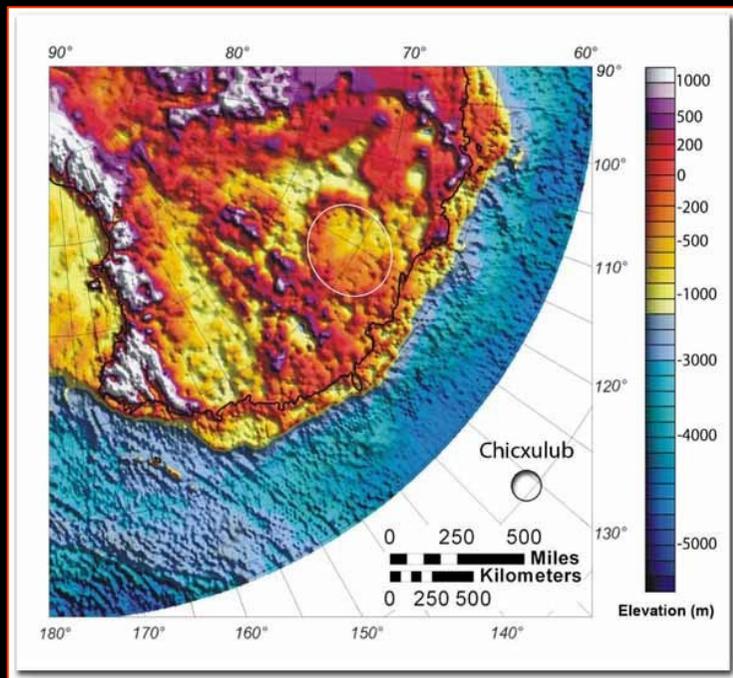
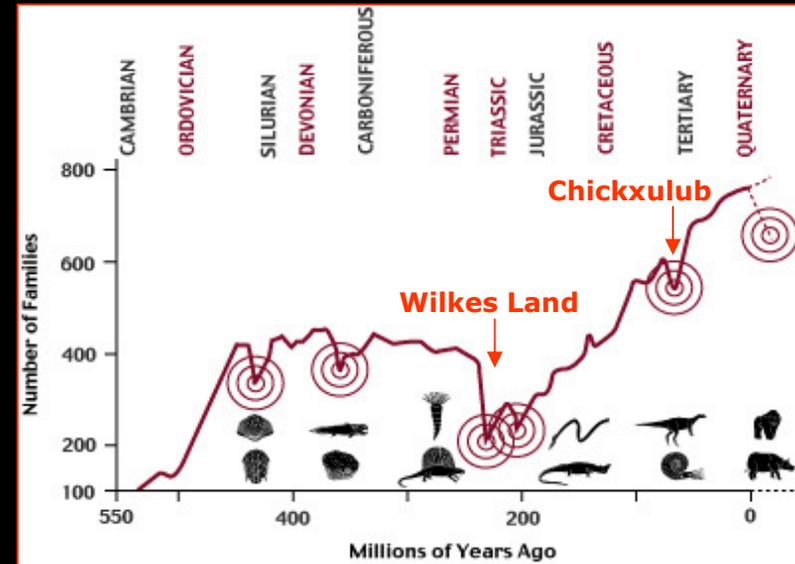
# Terra

Wilkes Land

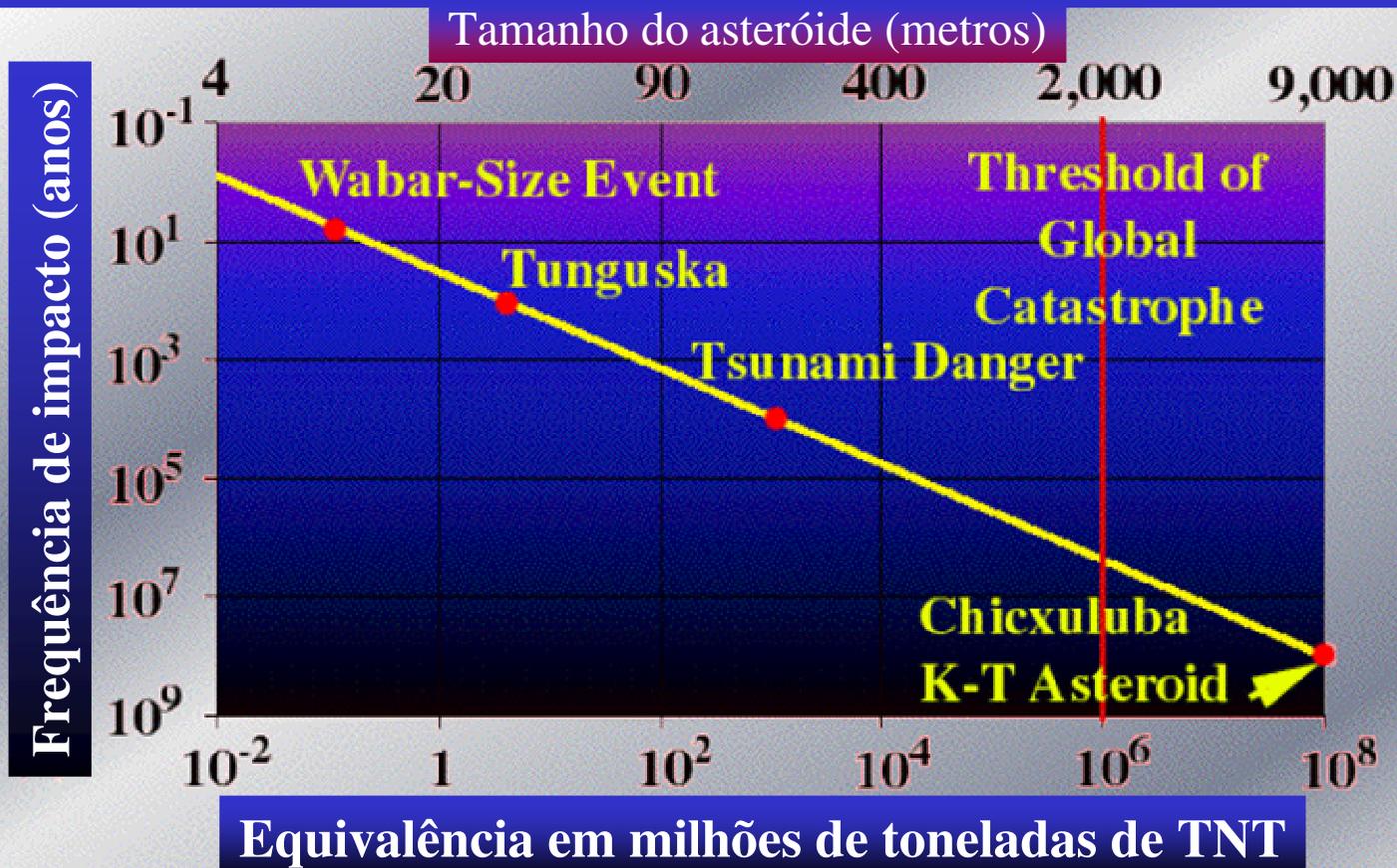
~480km

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%                                      | $\leq 10\%$            | $\approx 30\%$                         |
| Composição predominante | C + Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>       | metais                 | silicatos                              |
| Albedo                  | $< 5\%$                                  | $\approx 10\%$         | $\approx 15\%$                         |
| Cor                     | escuros                                  | intermediário          | claros                                 |
| Posição                 | cinturão externo<br>(próximo de Júpiter) | cinturão intermediário | cinturão interno<br>(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**

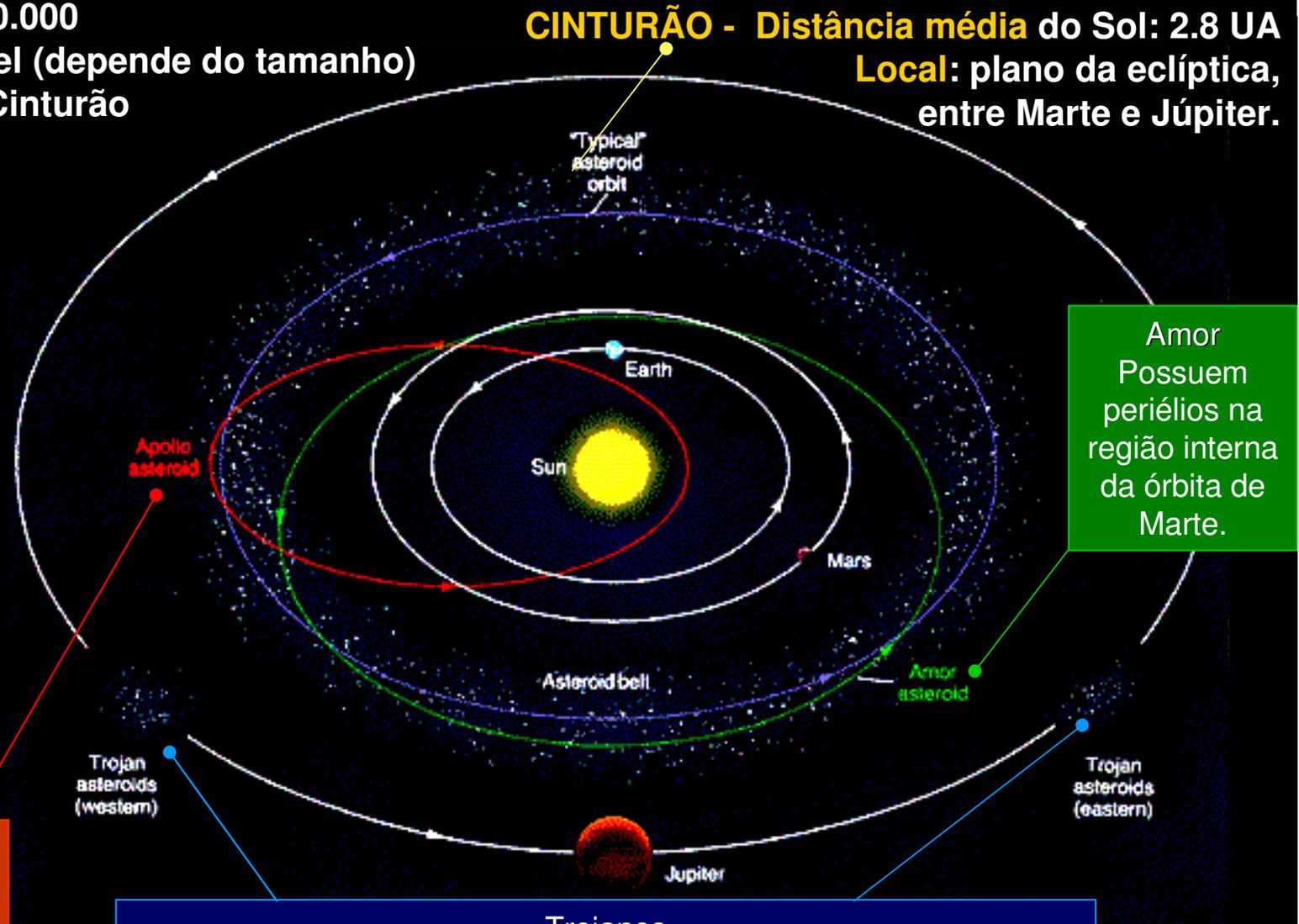
Possuem periélio dentro da região interna à órbita da Terra. São de origem recente.

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 periélio 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

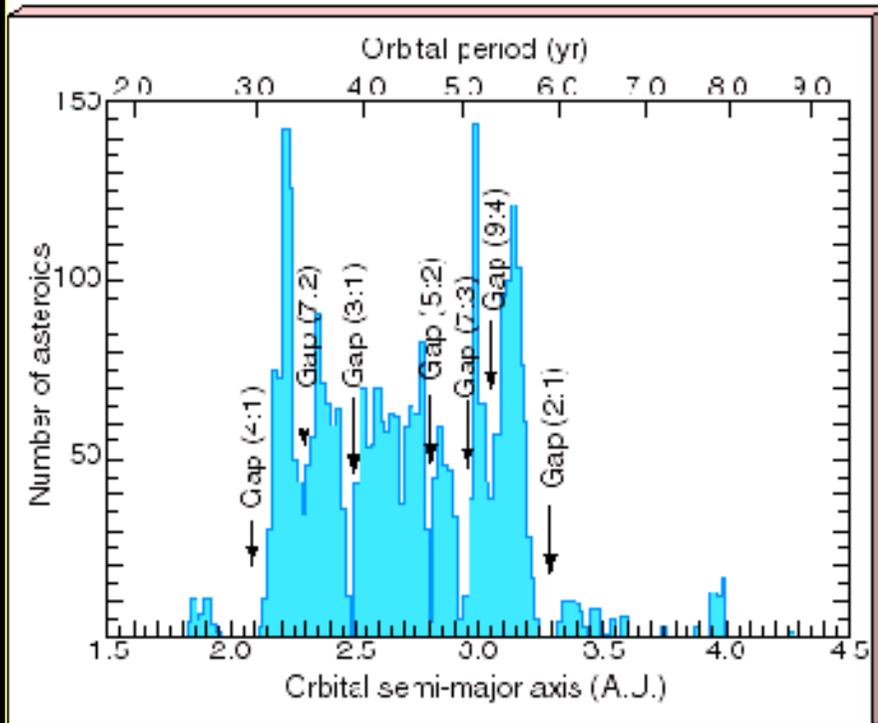
## Asteróides do Cinturão – os mais conhecidos

| Asteróides                  | Diâmetro (km)   | Massa<br>( $10^{15}$ kg) | Rotação (horas) | Distância do<br>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                   |

## 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*.**



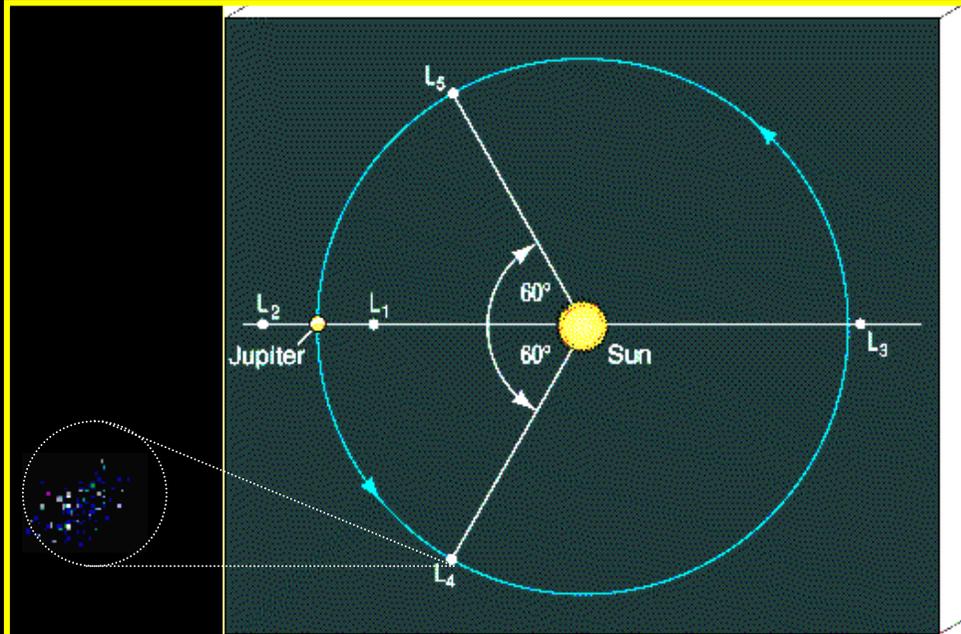
(b)

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

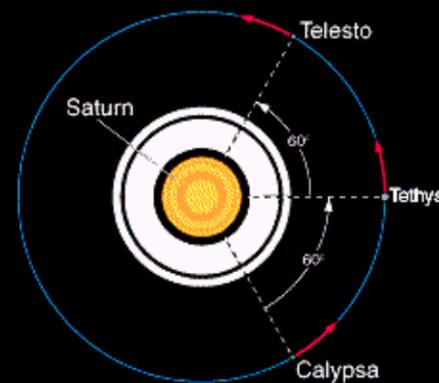
Em cada aproximação máxima há forte interação gravitacional, que acaba instabilizando (portanto modificando) a órbita.

# 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.

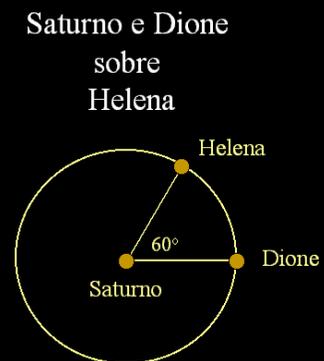


Os Pontos Lagrangianos representam regiões de equilíbrio de forças. L1, L2 e L3: o equilíbrio é instável; L4 e L5: regiões de estabilidade



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

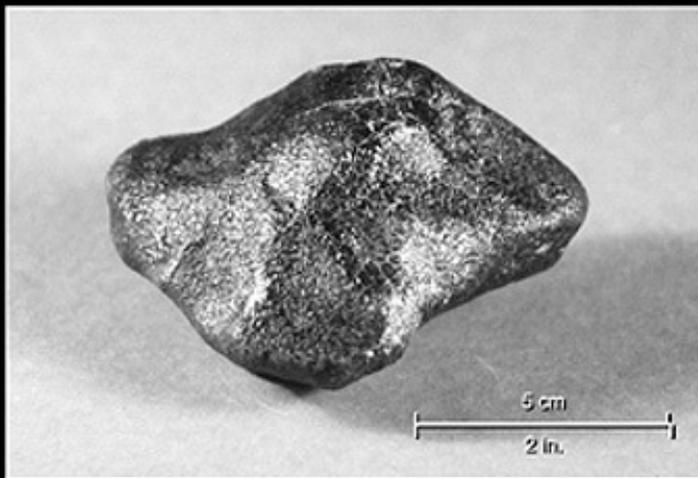
### – Grupo Apollo:

- 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

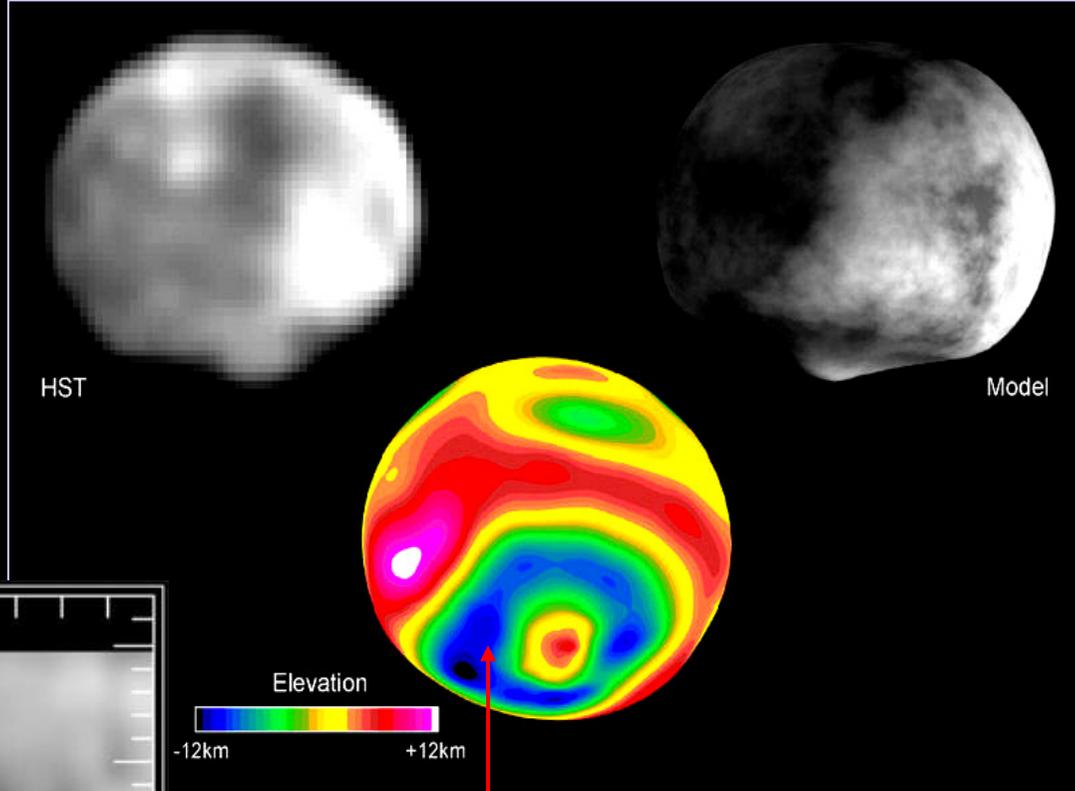
### – Grupo Amor:

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

# Asteróide Vesta

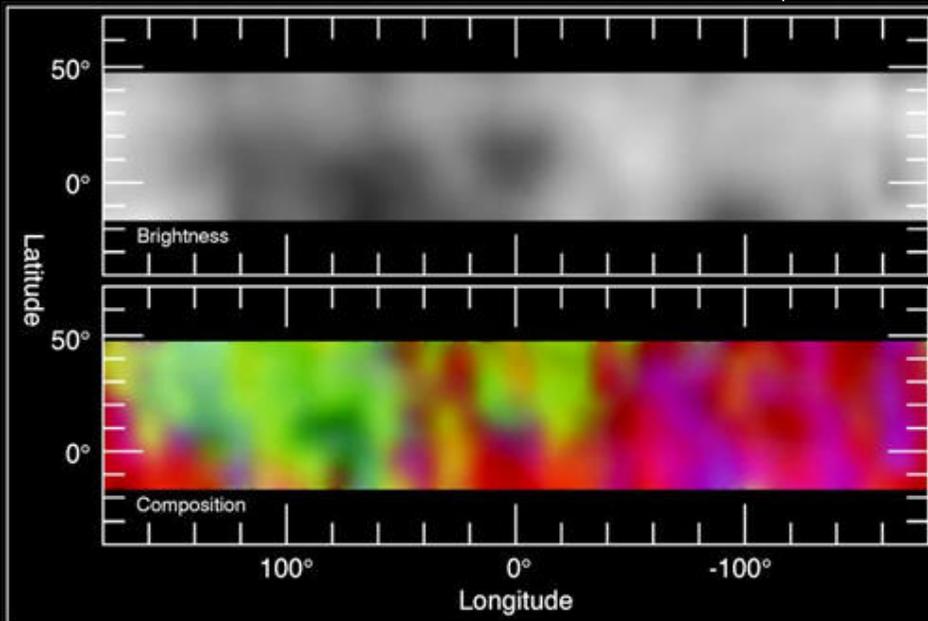


Meteorite - Fragment of Vesta  
Lab Photograph - Russel Kempton, New England Meteoritical Services  
PRC95-208 - ST Scl OPO - April 19, 1995 - B. Zellner (GA Southern Univ.), NASA



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

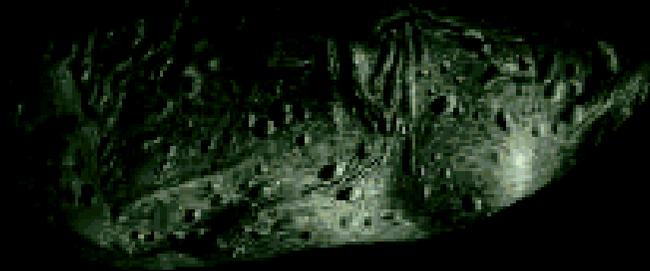


Só os maiores têm forma esférica



## 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 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>

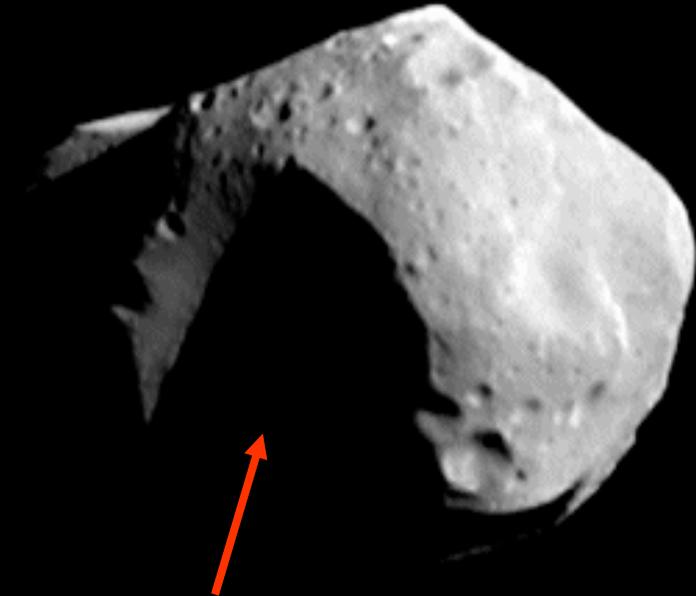
Distância: 90-km

- 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.

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.

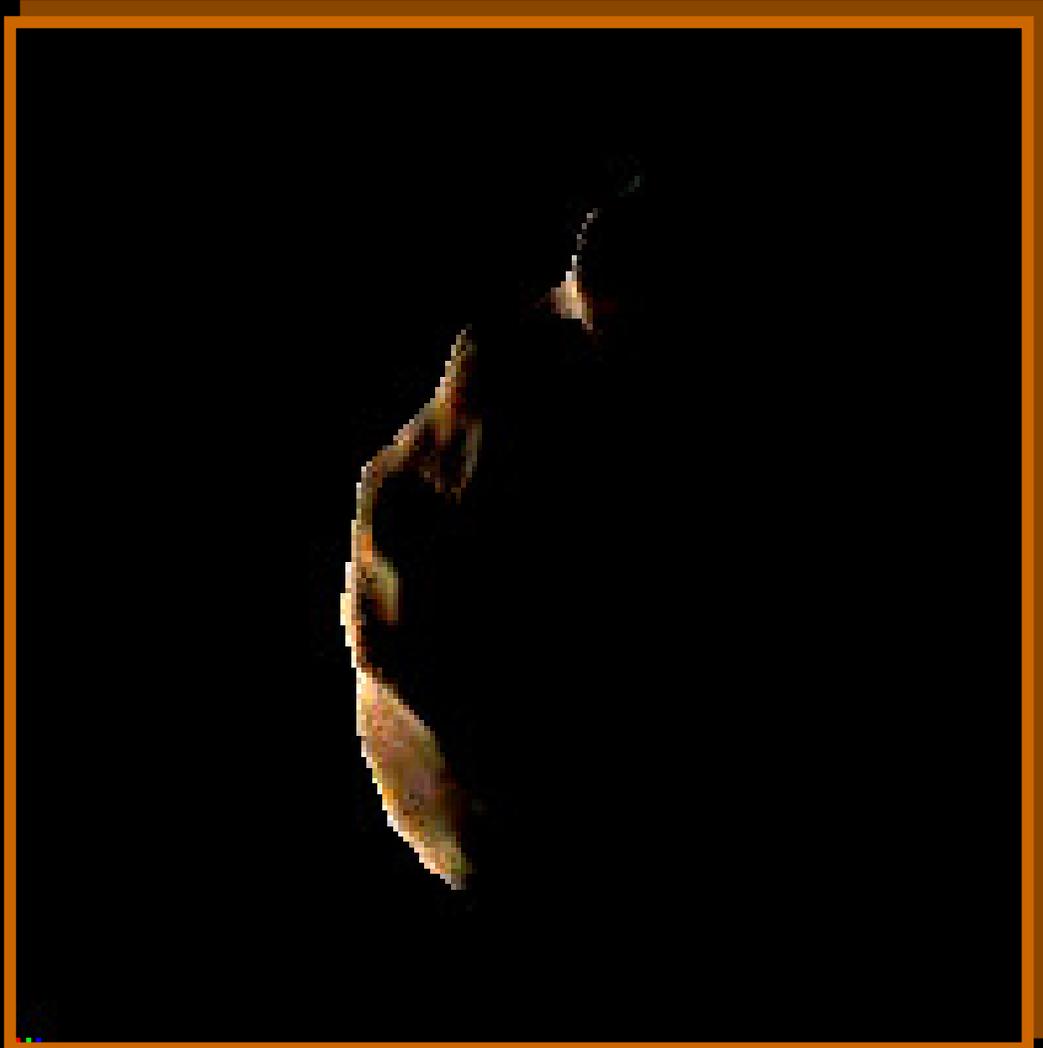
Tamanho: 4.6km x 2.4km x 1.9km

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

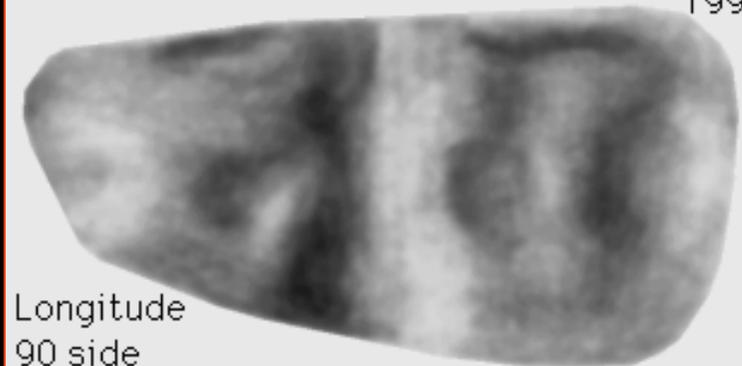
Período Rotacional: 4h42m

Período Orbital: 1,1 ano

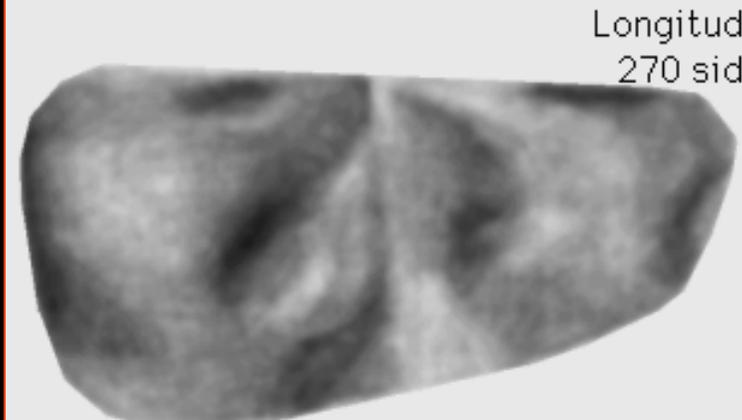


4769 Castalia

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

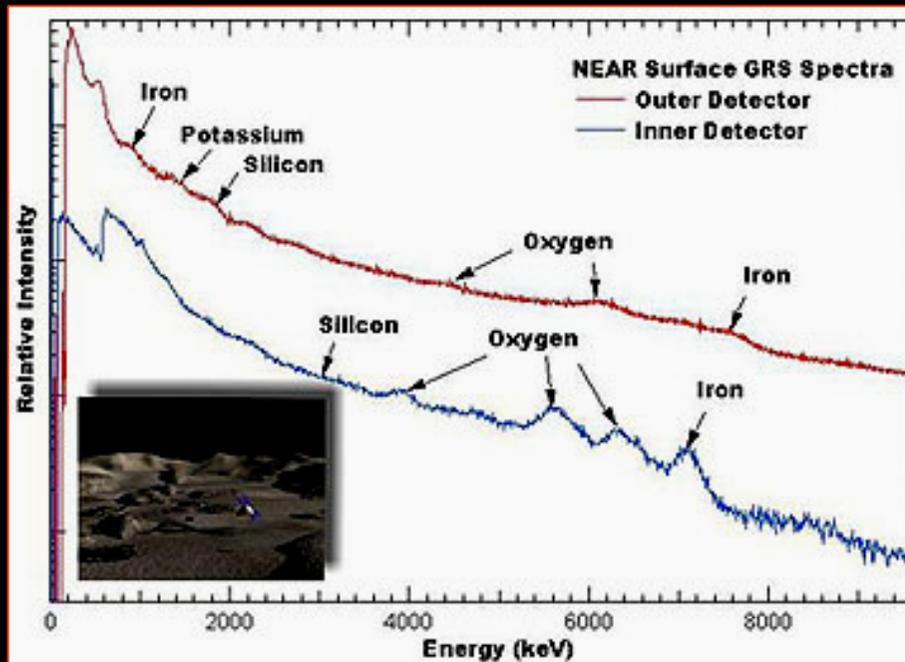
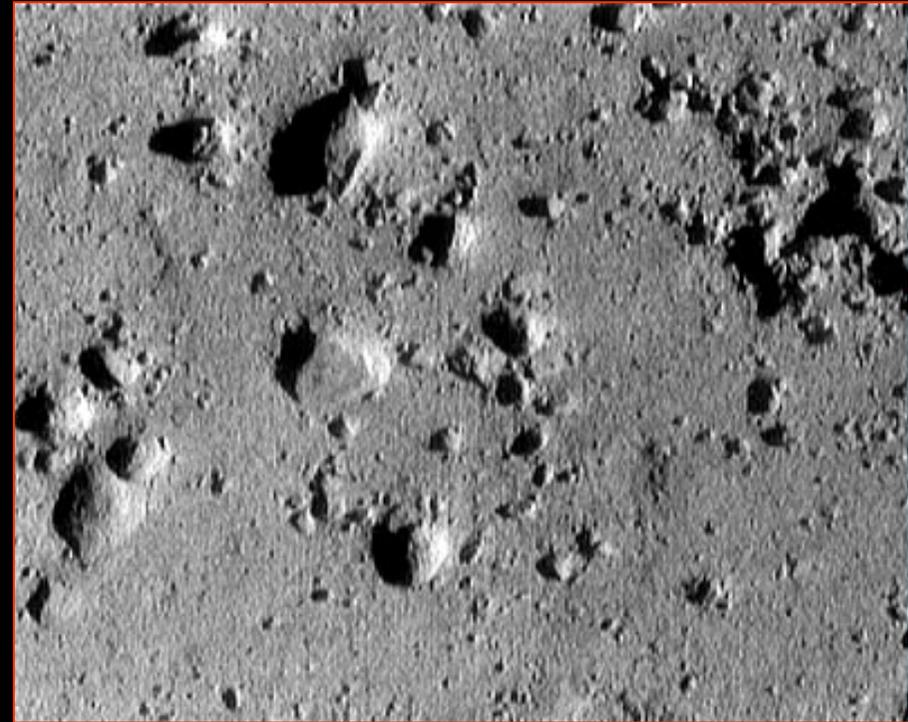
- A sonda NEAR–Shoemaker pousou em Eros 2001
- Asteróide do tipo S
- Tem interior sólido, ao contrário de Matilde.
- Superfície fortemente marcada por crateras.



# 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.

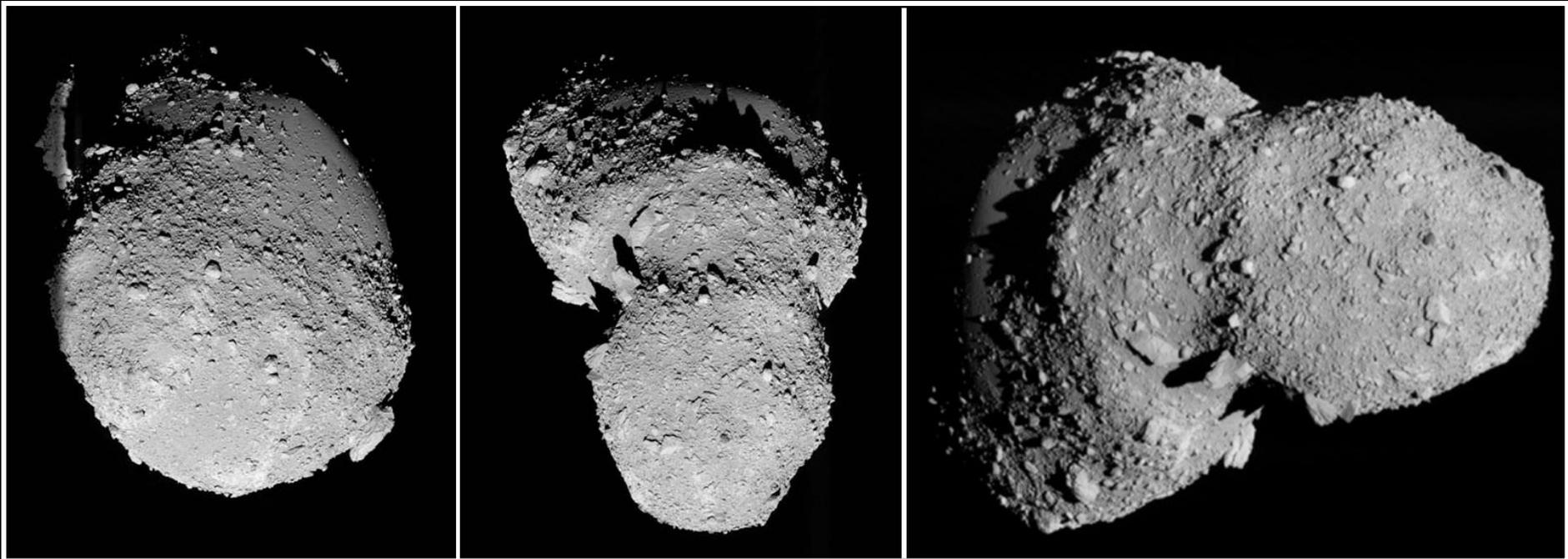


- Após o pouso, foram feitas medidas espectrométricas, que derminaram a composição do material de superfície.

# 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



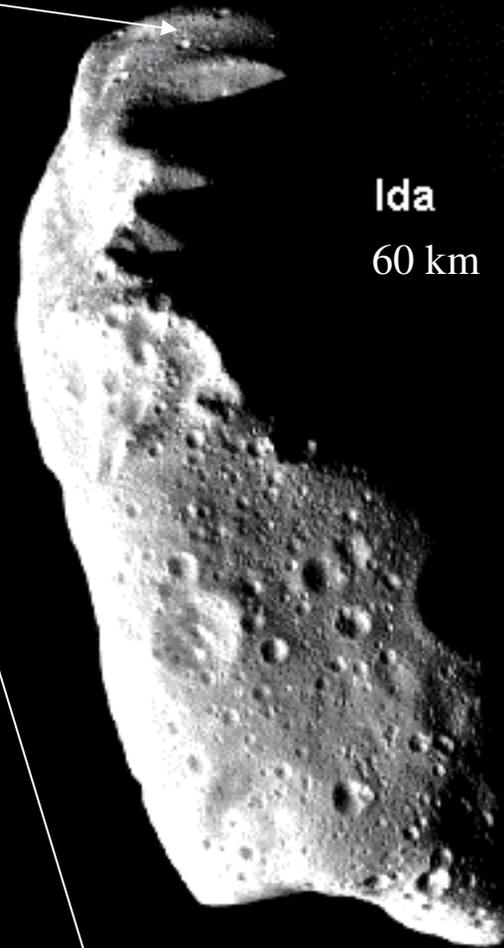
Graspa  
20 km



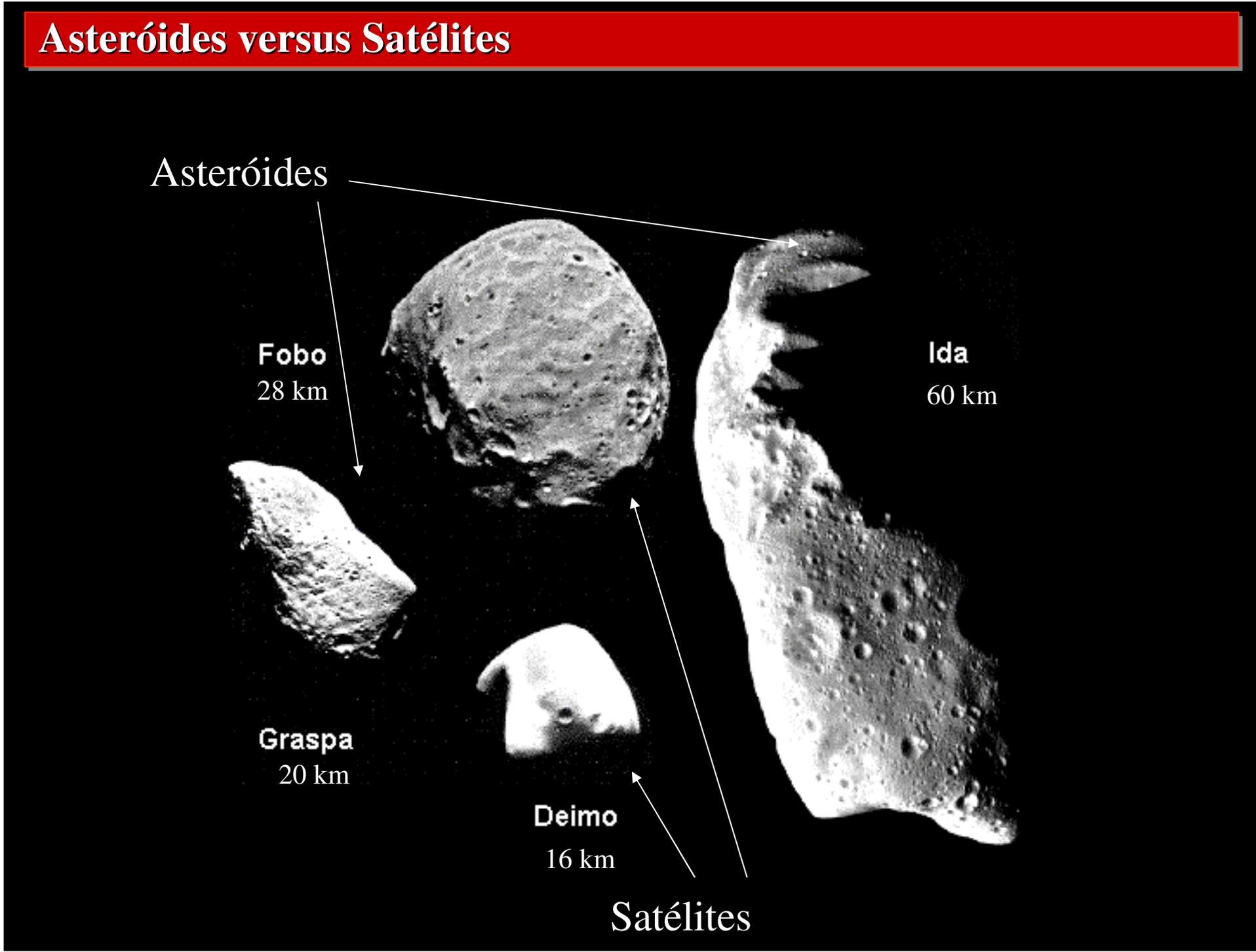
Deimo  
16 km



Ida  
60 km

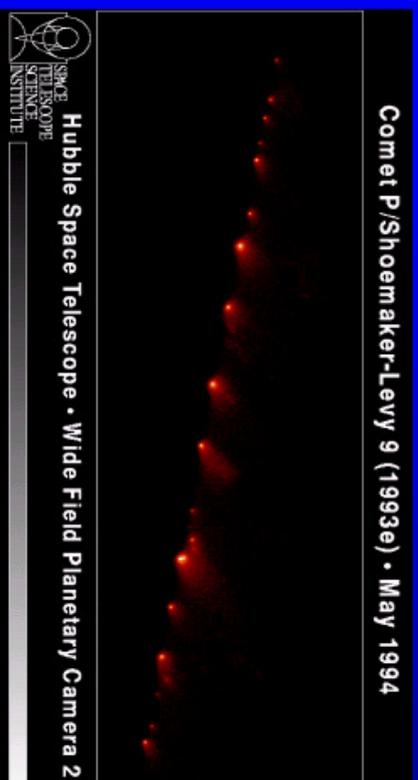


Satélites



## 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

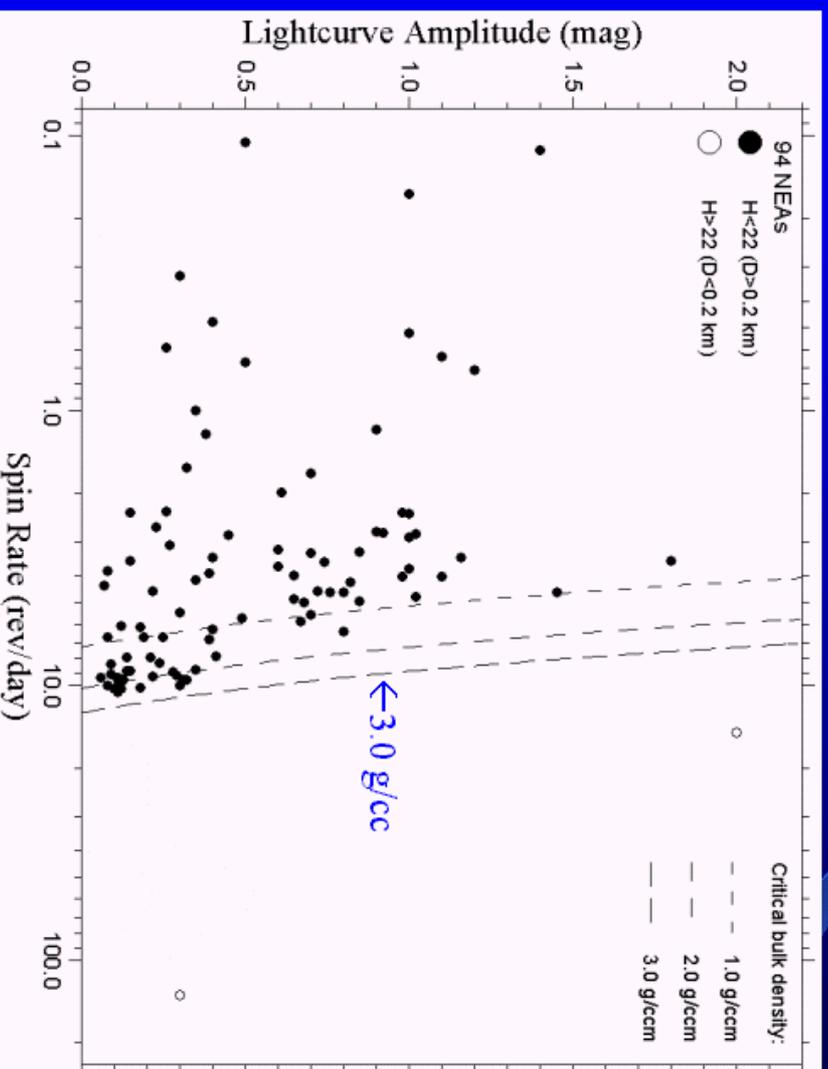
Davy Chain, ~47 km



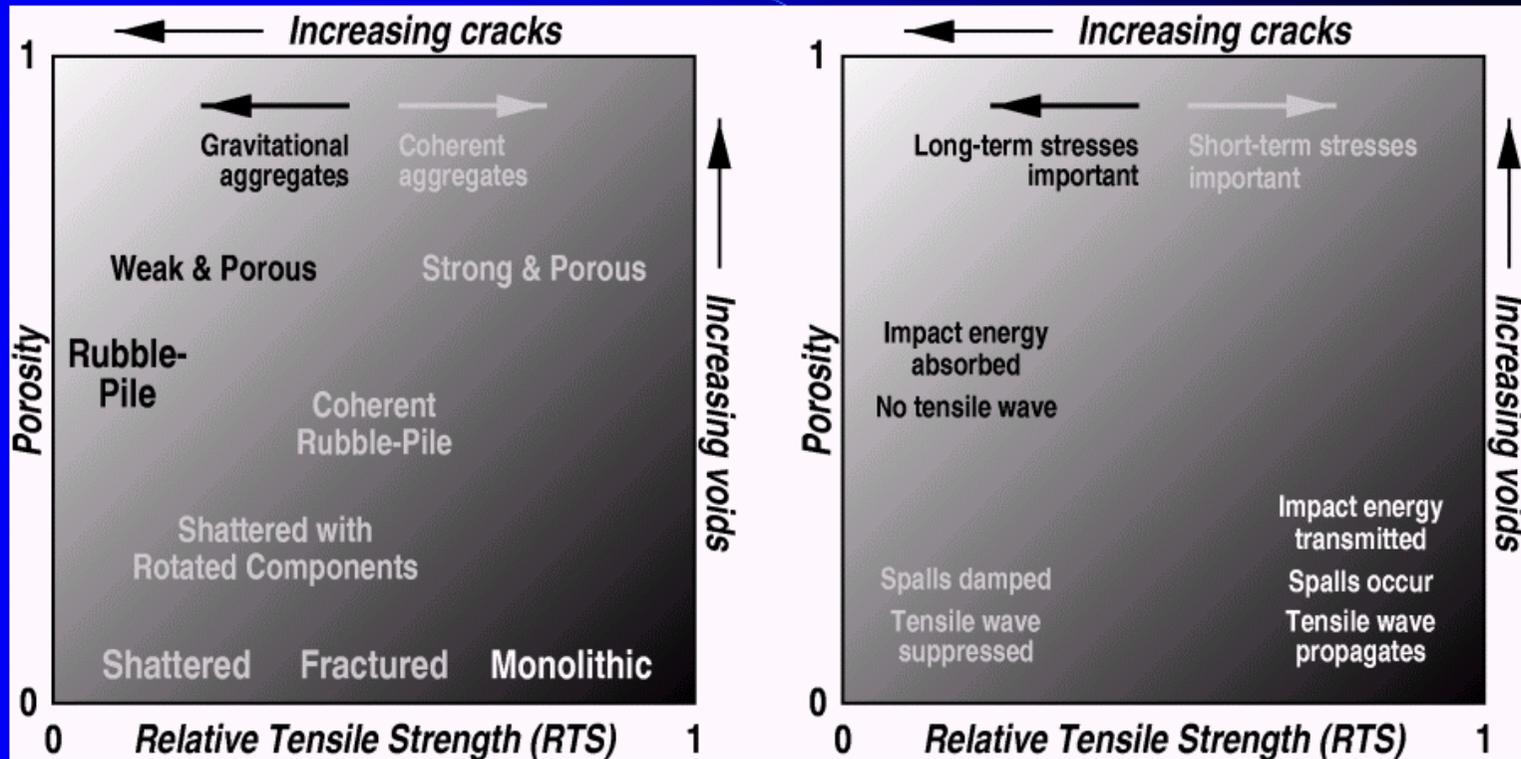
## Rotação de Asteróides

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

Pravec & Harris 2000



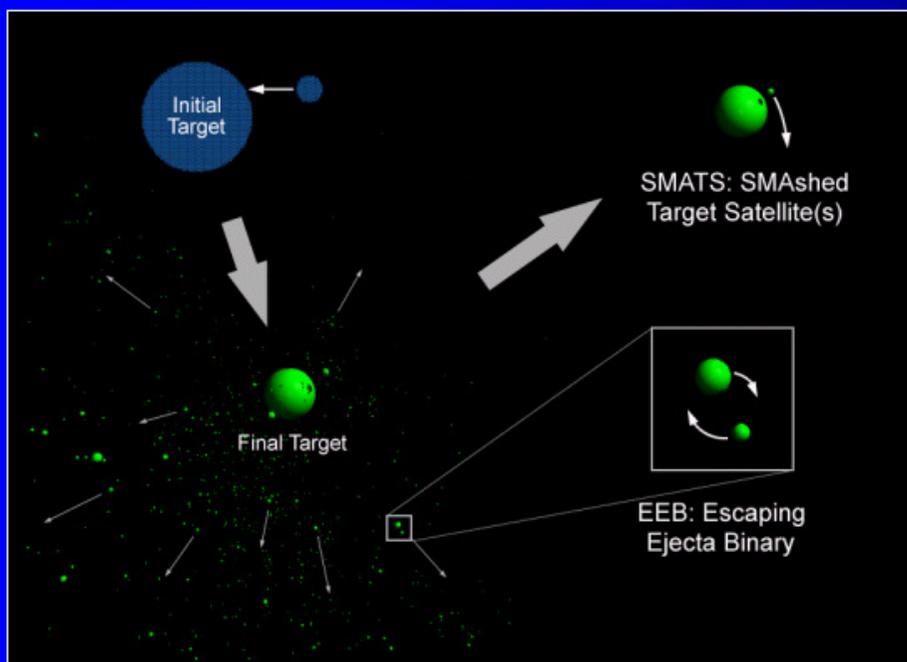
## Classificação



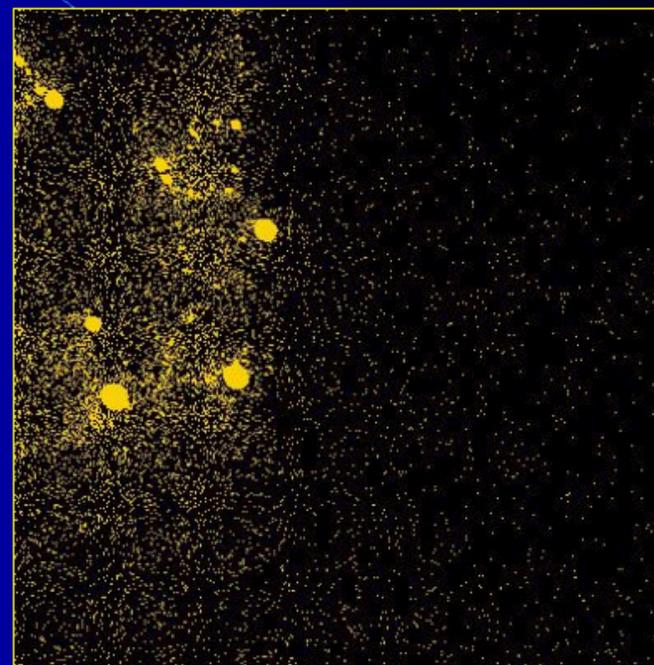
Richardson *et al.* 2003

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;

$\rho$  = 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  $\text{cm}^{-2}$  para materiais ordinários e

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

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