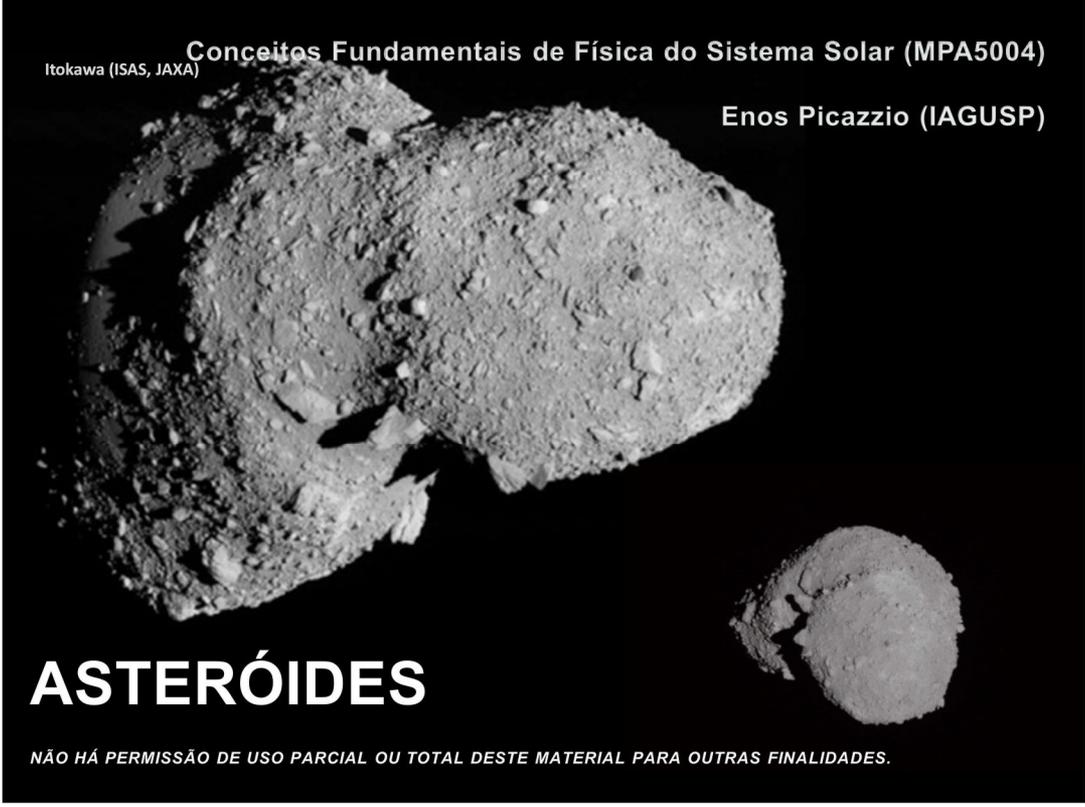


Conceitos Fundamentais de Física do Sistema Solar (MPA5004)
ItoKawa (ISAS, JAXA)

Enos Picazzio (IAGUSP)

The image shows two asteroids against a black background. The larger one is on the left, composed of two rounded, rocky fragments joined together. The smaller one is on the right, a single rounded fragment. Both have a textured, cratered surface.

ASTERÓIDES

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

Relação entre brilho 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 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

$$D = \frac{1329}{\sqrt{p}} 10^{-0.2H_0}$$

Diâmetro ← Magnitude absoluta ← Albedo ←
Fowler & Chillemi (1992)
Nikoletta Sipos and Magdalena Polińska

Asteroid size estimator NASA
https://cneos.jpl.nasa.gov/tools/ast_size_est.html

A expressão para diâmetro D em km em função da **magnitude absoluta** H e do **albedo** geométrico a é dada pela expressão acima, que admite um objeto esférico com uma superfície uniforme (sem variação de albedo). H_0 é a magnitude absoluta, que equivaleria à magnitude visual caso o asteroide estivesse a 1 UA do Sol e da Terra; p representa o albedo (normalmente definido com base em alguma classe espectral correspondente a uma composição específica do asteroide). Uma maneira de contornar essa incerteza é admitir valores extremos, do mais escuro (albedo elevado) ao mais brilhante (albedo baixo). Isso delimita um intervalo de tamanho do asteroide. Asteroide grande porém escuro pode ter magnitude semelhante a um asteroide pequeno porém claro.

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>

Na tabela acima os intervalos de diâmetro expressa o intervalo de albedo, do mais baixo (superfície escura) ao mais alto (superfície clara).

Nota-se que os asteroides menores apresentam magnitudes absolutas muito grandes, ou sejam brilhos muito pequenos, difíceis de serem percebidos ou observados. Em caso de queda na Terra, esse asteroides representam um perigo pois são percebidos apenas que quando estão muito próximos ou já em queda.

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

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?

Tipos de asteróides

Genericamente, existem três tipos principais de asteroides:

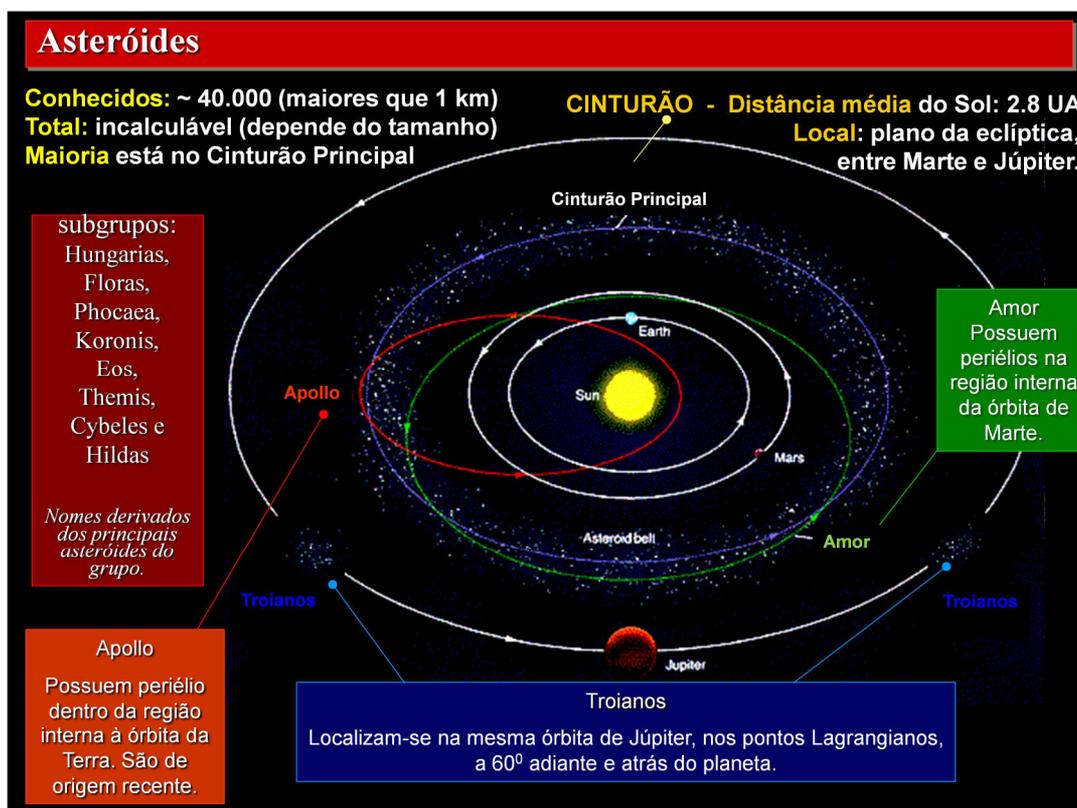
Asteróides C (carbonáceos) escuros, que compõem a maioria dos asteroides e estão na faixa externa. Acredita-se que estejam perto da composição do Sol, com pouco hidrogênio ou hélio ou outros elementos "voláteis".

Asteróides M (metálicos) brilhantes, que ficam no meio do cinturão de asteroides e são compostos principalmente de ferro metálico.

Asteróides S (silicáticos) brilhantes, que estão no cinturão interno, mais perto de Marte. Eles tendem a ser ferro metálico com alguns silicatos de ferro e magnésio.

Também existem o **tipo D**, conhecido como asteroides Troianos de Júpiter, de natureza escura e carbonácea, e o **tipo V**, que são asteroides distantes entre as órbitas de Júpiter e Urano, e podem ter se originado no Cinturão de Kuiper. Embora estes não tenham sido estudados extensivamente, foi sugerido que eles tenham uma composição de silicatos ricos em orgânicos, silicatos de carbono e anidro, possivelmente com gelo de água em seus interiores.

Fonte: <https://www.universetoday.com/37425/what-are-asteroids-made-of/>



Muitos asteroides compartilham órbitas semelhantes, o que levou à percepção de que um processo era responsável por esse agrupamento. Vários exemplos de asteroides que seguem órbitas semelhantes foram descobertos e agora são classificados em 'famílias'.

Durante a década de 1930, dois astrônomos começaram a competir para ver quem poderia descobrir o asteroide mais incomum. Aqueles no **cinturão principal** geralmente têm órbitas mais ou menos circulares. No entanto, se a órbita se tornar menor e mais elíptica, os asteroides poderão se aproximar - ou até colidir com - os planetas internos.

Eugene Delporte, na Bélgica, fez a primeira revelação em março de 1932, quando descobriu o asteroide Amor. Essa rocha espacial passa mais da metade de sua órbita fora do cinturão principal e cruza a órbita de Marte. Chega perto da órbita da Terra antes de voltar novamente.

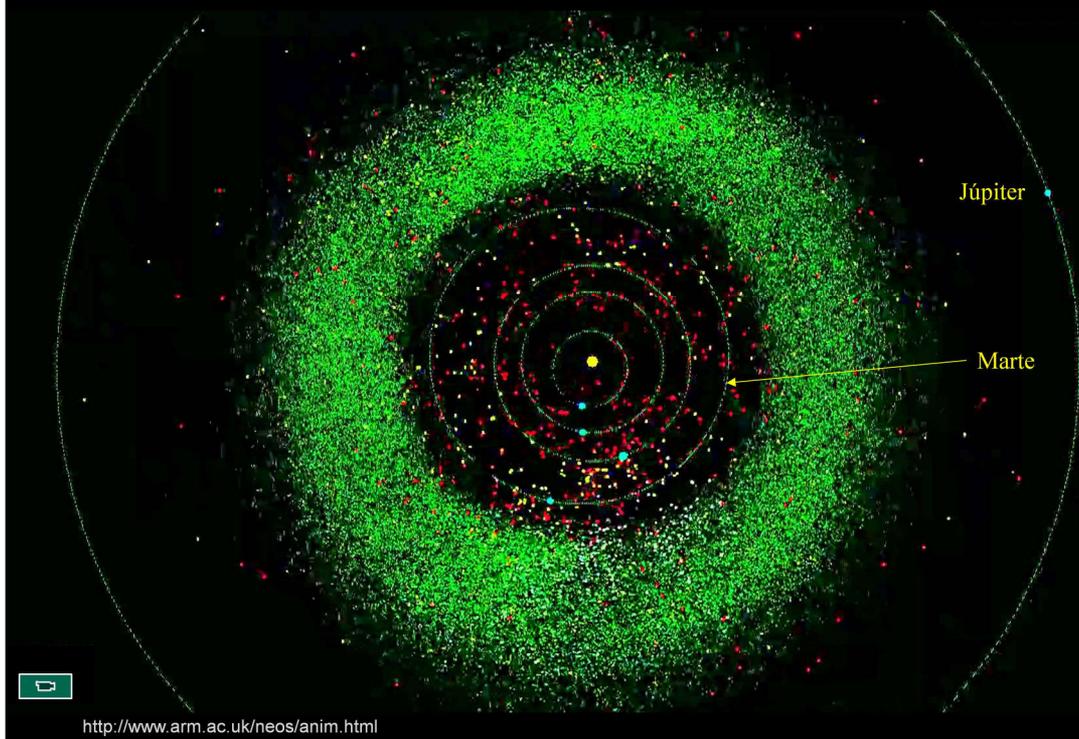
No mês seguinte, Karl Reinmuth, em Heidelberg, descobriu Apolo. Este asteroide passa muito menos tempo no cinturão principal, passando a maior parte do tempo dentro da órbita de Marte. De fato, Apolo também atravessa a órbita da Terra. Desde então, outros exemplos de asteroides que seguem órbitas semelhantes foram descobertos e agora são classificados nas **famílias Amor e Apolo**. O fato de muitos asteroides compartilharem órbitas semelhantes leva à percepção de que um processo sistemático é responsável por mantê-los nessas posições.

As melhores teorias sugerem que cutucadas gravitacionais de Júpiter podem lançar asteroides do cinturão principal nessas órbitas menores e mais elípticas. Em 1971, a família mais notável de asteroides foi descoberta. Estes são os **Atenas**, nomeados após seu protótipo, que foi descoberto por Eleanor Helin. Eles passam mais tempo dentro da órbita da Terra e, portanto, são escondidos de nós pelo brilho do céu diurno, além de quando cruzam a órbita da Terra por um breve período, antes de voltarem perto do Sol.

Pode haver outras famílias de pequenos asteroides dentro do Sistema Solar que, ainda hoje, ainda precisam ser descobertas.

Fonte: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Asteroids_Families_of_asteroids

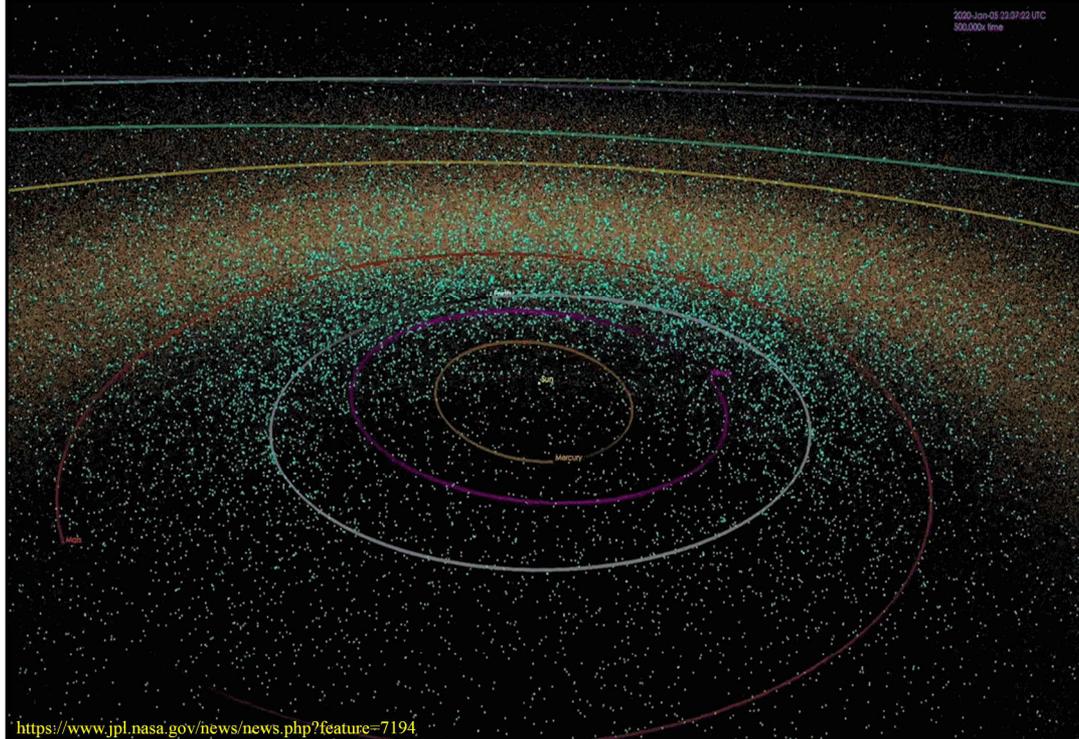
Asteróides



Órbitas de planetas internos são mostradas como grandes círculos neste instantâneo gerado por computador de objetos conhecidos reais em 20 de julho de 2002. Pontos verdes representam asteroides no cinturão principal entre Marte e Júpiter. Pontos vermelhos são asteroides que se afastam do cinturão principal e representam um risco pequeno, mas conhecido, de atingir a Terra.

(Imagem: © MPC, CBAT, Harvard CfA, IAU)

Asteróides



A animação mostra um mapeamento das posições de objetos conhecidos próximos à Terra (NEO – Near Earth Objects) em pontos no tempo nos últimos 20 anos e termina com um mapa de todos os asteroides conhecidos em janeiro de 2018. São cerca de 95% dos asteroides próximos à Terra conhecidos. Atualmente, existem mais de 18.000 NEOs conhecidas e a taxa de descoberta é em média de 40 por semana.

- Crédito da imagem: NASA / JPL-Caltech.

- Vídeo completo: https://youtu.be/vfvo-Ujb_qk

- Fonte: <https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=7194>

Asteróides do Cinturão – os mais conhecidos

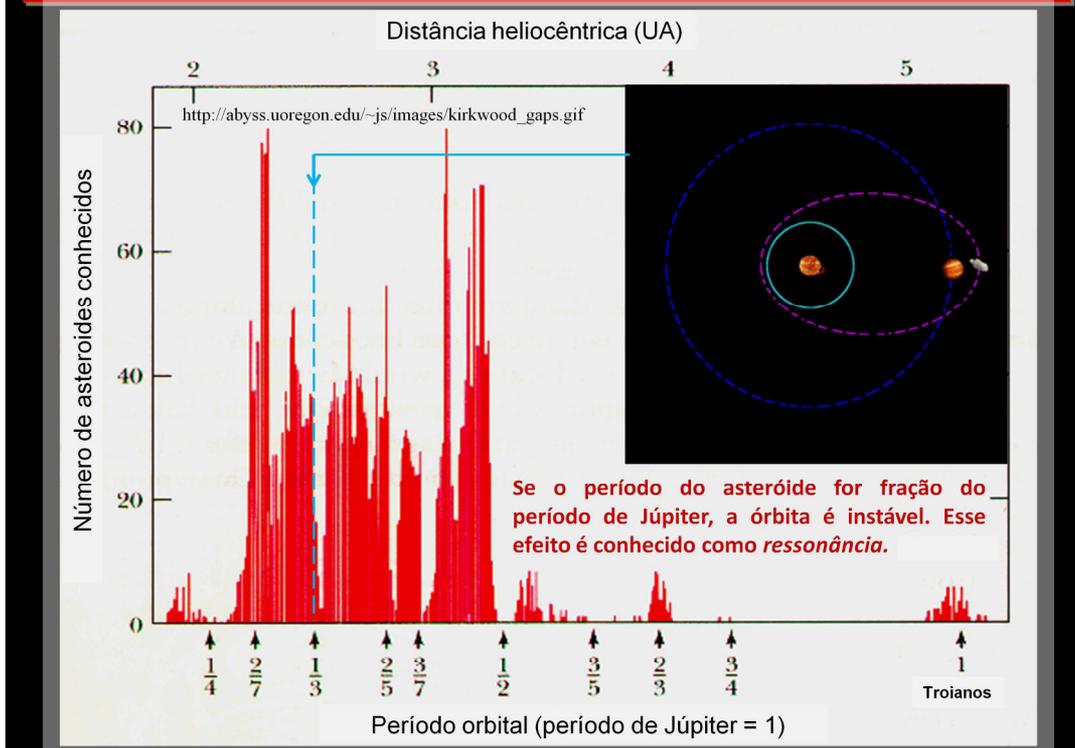
Asteróides	Diâmetro (km)	Massa (10 ¹⁵ kg)	Rotação (horas)	Distância do Sun (U.A.)	Período Orbital (anos)
1 Ceres Planeta-anão	960 x 932	870,000	9.075	2.767	4.60
2 Pallas	570 x 525 x 482	318,000	7.811	2.774	4.61
3 Juno	240	20,000	7.210	2.669	4.36
4 Vesta	530	300,000	5.342	2.362	3.63
45 Eugenia	226	6,100	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 são descobertos a distâncias maiores.

Asteróides do Cinturão – Lacunas de Kirkwood



Lacunas de Kirkwood

Se traçarmos o raio das órbitas dos asteroides teremos uma distribuição descontínua como mostra a figura acima. Nota-se com clareza a existência de lacunas correspondentes a períodos orbitais que são frações inteiras do período orbital de Júpiter.

Essas falhas foram percebidas por Daniel Kirkwood em 1860, por isso são denominadas Lacunas de Kirkwood. A razão da existência dessas lacunas é a ressonância. Esse fenômeno de ressonância faz com que Júpiter e o asteroide se aproximem e o asteroide sofra puxão gravitacional. Repetidas vezes essa aproximação acaba alterando a órbita do asteroide até que este adquira uma órbita mais estável.

Família dos Troianos:

Reparando no gráfico acima, vê-se uma concentração de asteroides com período orbital 1, ou seja, o mesmo de Júpiter. São asteroides que orbitam o Sol na mesma órbita de Júpiter, em duas posições principais: 60° à frente e 60° atrás de Júpiter. Nessas duas posições, as forças atrativas do Sol e de Júpiter são comparáveis o que torna essas regiões gravitacionalmente estáveis. Ambas as regiões são preenchidas com um aglomerado de asteroides que foram capturados nesses pontos estáveis.

Asteroides do Cinturão – Ressonância orbital



Nas duas figuras temos duas configurações possíveis para a ressonância orbital 2:1 entre um asteroide da cintura (órbita elíptica) e Júpiter (órbita circular). No primeiro caso, 1ª figura, no instante inicial o asteroide e Júpiter estão em conjunção no periélio das suas órbitas; Ao fim de um quarto do período de Júpiter, o asteroide 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 asteroide volta ao seu periélio, agora com Júpiter do lado oposto do Sol e ao fim de $3/4$ desse período o asteroide 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 asteroide, esses encontros são evitados pelo mecanismo da ressonância e as perturbações dominantes compensam-se ao longo do tempo.

<http://cftc.cii.fc.ul.pt/PRISMA/capitulos/capitulo2/modulo2/topico3.php>

Asteroides do Cinturão – Ressonância orbital



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.

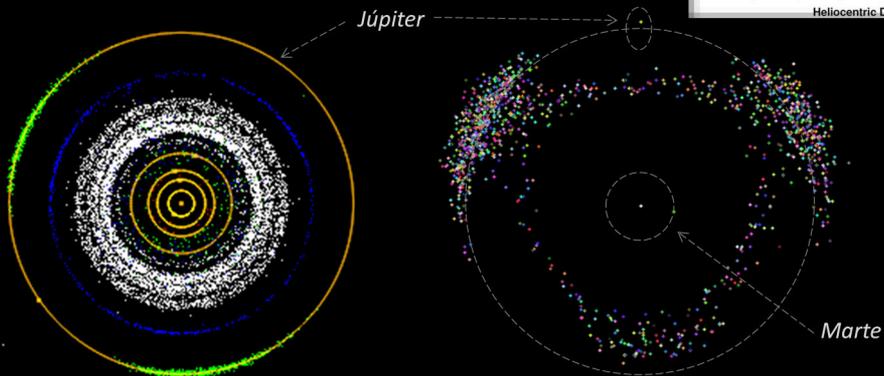
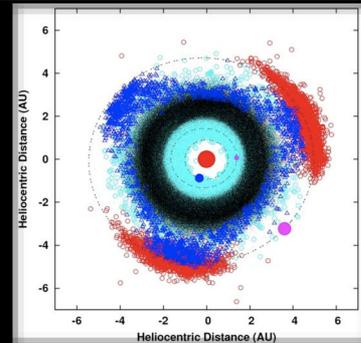
<http://cftc.cii.fc.ul.pt/PRISMA/capitulos/capitulo2/modulo2/topico3.php>

Asteróides Troianos

Pontos Lagrangianos

<http://www.princeton.edu/~rdb/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.



<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f3/Kirkwood-movie.gif>

Aldo Vitagliano, usando seu programa de simulação de N-corpos (SOLEX).

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

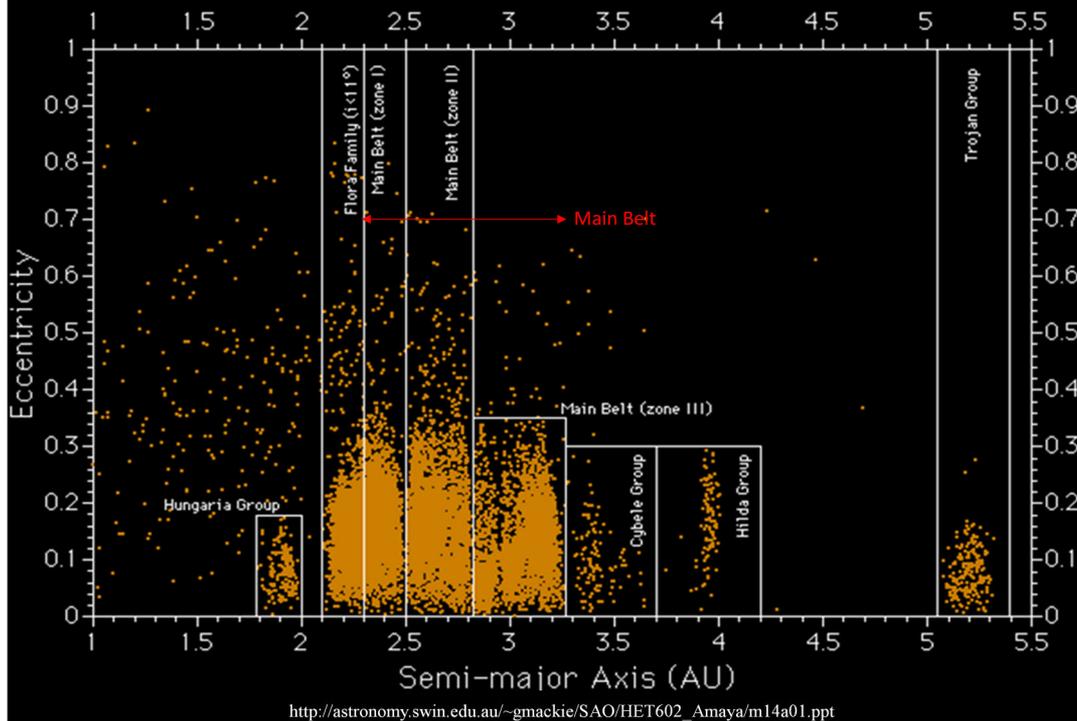
– **Grupo Apollo:**

- 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.

Grupos de Asteroides



Uma hipótese possível para a origem dos asteroides do cinturão principal é a destruição ou fragmentação de um corpo de dimensões planetárias que existia nessa região. Essa possibilidade explica melhor a existência de asteroides feitos essencialmente da liga ferro-níquel, pois esse material existia no núcleo de planetas.

Outra possibilidade é que esses corpos jamais se juntaram para formar um planeta, por influência gravitacional de Marte e, principalmente, de Júpiter.

O gráfico acima mostra como os asteroides se comparam entre si em termos de quão distantes estão do Sol (semi-eixo maior) e qual é a forma de sua órbita. De cada órbita circular, a excentricidade "0" é órbita circular. Excentricidade "1" é órbita parabólica, portanto órbita aberta; um corpo nessa órbita não é periódico.

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.

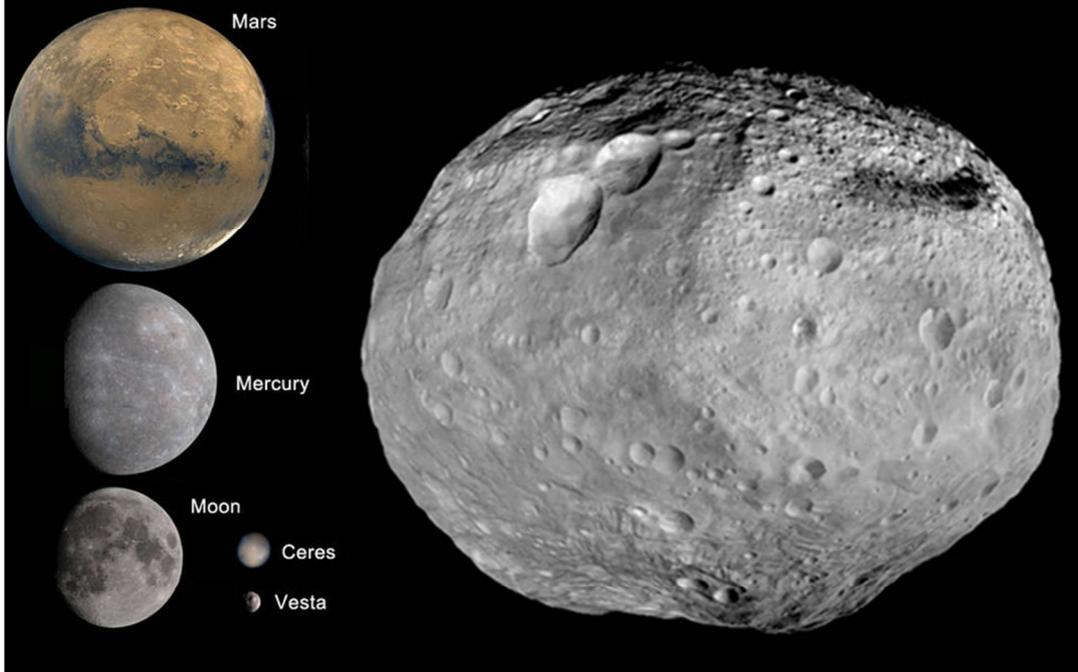
Vesta tem sofrido processos erosivos por escavação; a mais notável é a enorme cratera perto de seu pólo sul.

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.



Asteroide 4 Vesta

Missão DAWN (Vesta e Ceres) - NASA/JPL



4 Vesta é o segundo corpo mais massivo do cinturão principal de asteroides, representando quase 9% da massa total do cinturão. Apenas o planeta anão Ceres é mais maciço nessa região de detritos rochosos entre Marte e Júpiter. A sonda Dawn da NASA circunavegou Vesta de 16/7/2011 até 05/9/2012, para depois partir rumo ao planeta anão Ceres.

O asteroide gigante é quase esférico e quase foi classificado como planeta anão. Ao contrário dos asteroides mais conhecidos, Vesta é diferenciado, possui crosta, manto e núcleo, como a Terra.

Compreender por que isso é assim era um dos objetivos da missão Dawn. A resposta acabou sendo que Vesta se formou cedo, dentro de 1 a 2 milhões de anos após o nascimento do Sistema Solar. O material radioativo de curta duração que foi incorporado aos corpos formados durante essa época os aqueceu até o ponto em que - em casos como Vesta - os objetos derreteram, permitindo que os materiais mais densos afundassem no núcleo do asteroide e os materiais de menor densidade subissem.

Vesta tem uma das maiores faixas de brilho observadas em qualquer corpo rochoso em nosso Sistema Solar. Os materiais brilhantes parecem ser rochas nativas, enquanto se acredita que o material escuro tenha sido depositado por outros asteroides que colidiram com Vesta. A equipe científica da missão Dawn estima que cerca de 300 asteroides escuros com diâmetros variando de 1 a 10 km atingiram Vesta nos últimos 3,5 bilhões de anos. Isso bastaria para envolver o Vesta em um cobertor de material com cerca de um a dois metros de espessura.

Fonte: <https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/asteroids/4-vesta/in-depth/>

Asteroide Vesta



Um extenso sistema de valas circunda a região equatorial de Vesta. O maior, chamado Divalia Fossa, é maior que o Grand Canyon.

Vesta parece ser a fonte dos grupos de meteoritos Howardita, Eucrita e Diogenita que foram encontrados na Terra. Eles ajudam a entender o "Cataclismo Lunar", quando um reposicionamento dos planetas gigantes de gás bilhões de anos atrás desestabilizou as órbitas dos asteroides no início do cinturão de asteroides e desencadeou um bombardeio em todo o Sistema Solar. Eles também fornecem pistas sobre a evolução geoquímica de Vesta, uma história que foi testada e aprimorada pelas informações fornecidas pela sonda Dawn sobre a superfície e o interior do asteroide.

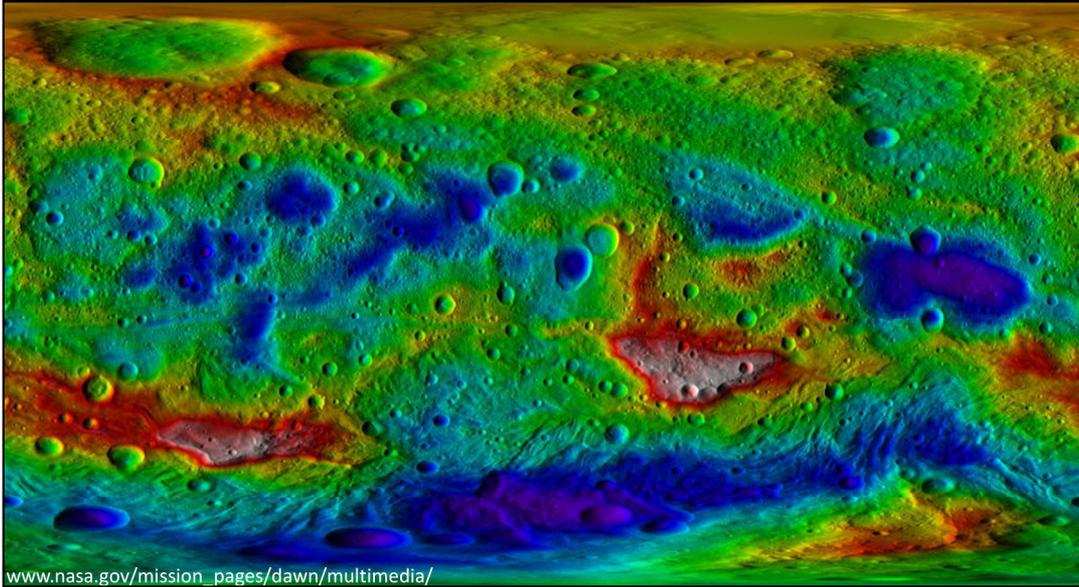
Acredita-se que Vesta tenha perdido cerca de 1% de sua massa há menos de um bilhão de anos atrás, em uma colisão maciça responsável pela cratera Rheasilvia, que tem cerca de 500 quilômetros de largura - cerca de 95% do diâmetro médio do asteroide. A família Vesta de asteroides é provavelmente detritos dessa colisão. Outra cratera imensa é a Veneneia, com cerca de 400 km de diâmetro.

Fonte: <https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/asteroids/4-vesta/in-depth/>

Asteroide 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.



www.nasa.gov/mission_pages/dawn/multimedia/

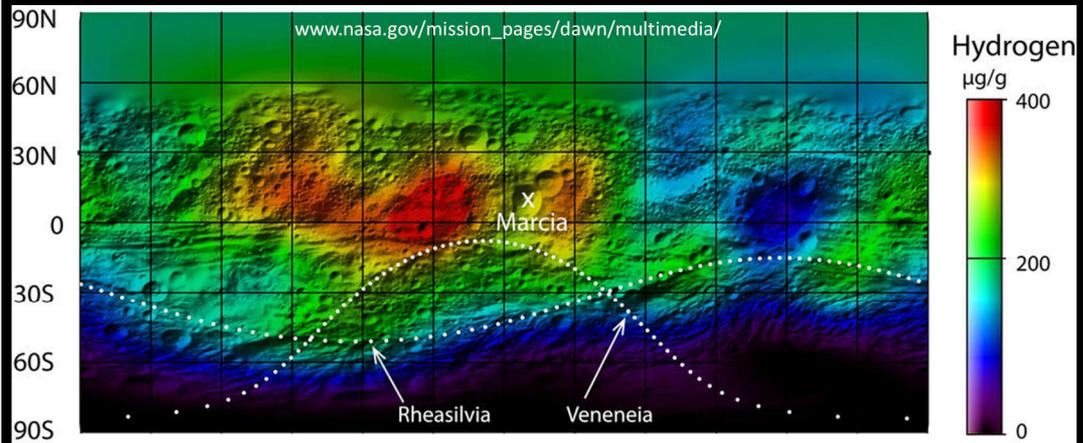
Asteroide Vesta

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

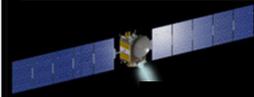
Ceres e Vesta: os corpos mais massivos do Cinturão Principal

Ceres

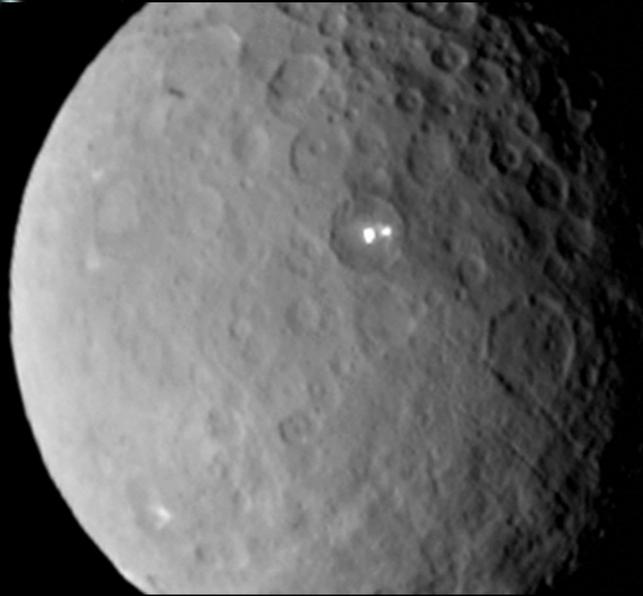
superfície muito primitiva, com minerais ricos em água e, possivelmente, com atmosfera muito rarefeita e geadas.

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



Animação: <https://solarsystem.nasa.gov/planets/dwarf-planets/ceres/in-depth/>

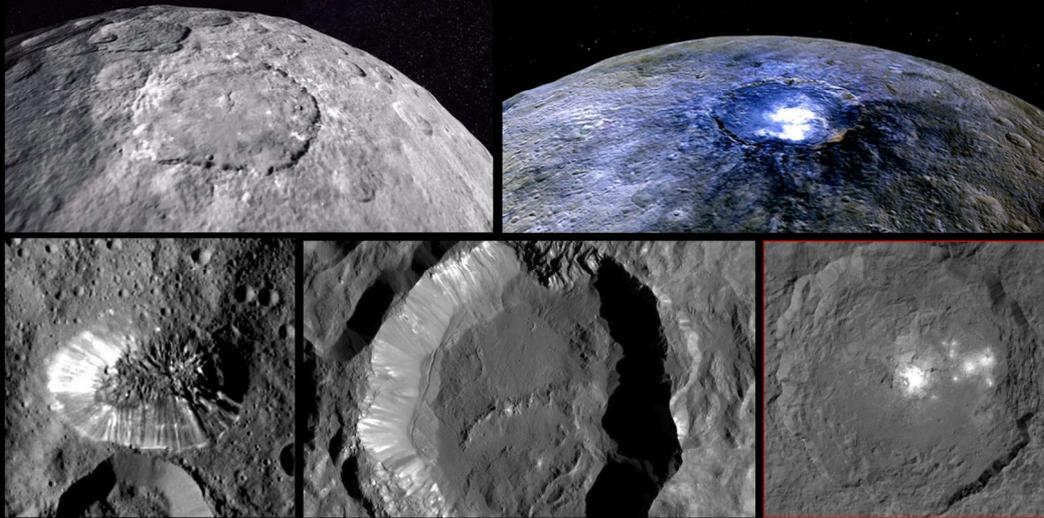
O planeta anão Ceres é o maior objeto no cinturão de asteroides entre Marte e Júpiter e o único planeta anão localizado no Sistema Solar interno. Foi o primeiro membro do cinturão de asteroides a ser descoberto por Giuseppe Piazzi em 1801. E quando a sonda Dawn chegou em 2015, Ceres se tornou o primeiro planeta anão a receber a visita de uma espaçonave.

Classificado como asteroide por muitos anos, Ceres é tão maior e tão diferente de seus vizinhos rochosos que acabou sendo reclassificado como planeta anão em 2006. Embora Ceres represente 25% da massa total do cinturão de asteroides, o minúsculo Plutão ainda é 14 vezes mais maciço.

Com um raio de 476 quilômetros, Ceres tem 1/13 do raio da Terra. A uma distância média de 413 milhões de quilômetros, Ceres fica a 2,8 unidades astronômicas do Sol. A luz leva 22 minutos para viajar do Sol até Ceres. Ceres leva 4,6 anos terrestres, para fazer uma viagem ao redor do Sol. Ceres completa uma rotação a cada 9 horas, tornando a duração do dia local uma das mais curtas do Sistema Solar. O eixo de rotação de Ceres é inclinado apenas 4 graus em relação ao plano de sua órbita. Isso significa que gira quase perfeitamente na vertical e não experimenta estações como outros planetas mais inclinados.

Fonte: <https://solarsystem.nasa.gov/planets/dwarf-planets/ceres/in-depth/>

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 ± 3,6 km
Área da superfície	1 800 000 km ²
Massa	9,5 × 10 ²⁰ kg
Densidade média	2,08 g/cm ³

Acredita-se que Ceres se formou junto com o resto do Sistema Solar há cerca de 4,5 bilhões de anos atrás. Ele é descrito como um "planeta embrionário", o que significa que começou a se formar, mas não terminou. Nas proximidades, a forte gravidade de Júpiter impediu que ele se tornasse um planeta totalmente formado. Cerca de 4 bilhões de anos atrás, Ceres se estabeleceu em sua localização atual entre os restos de formação planetária no cinturão de asteroides entre Marte e Júpiter.

Ceres é mais parecido com os planetas terrestres (Mercúrio, Vênus, Terra e Marte) do que seus vizinhos de asteroides, mas é muito menos denso. Uma das semelhanças é um interior em camadas, não muito bem definidas. Ceres provavelmente tem um núcleo sólido e um manto feito de gelo de água (cerca de até 25% de água). Se isso estiver correto, Ceres tem mais água potável do que a Terra. A crosta de Ceres é rochosa e poeirenta, com grandes depósitos de sal. Os sais de Ceres são feitos de diferentes minerais como sulfato de magnésio.

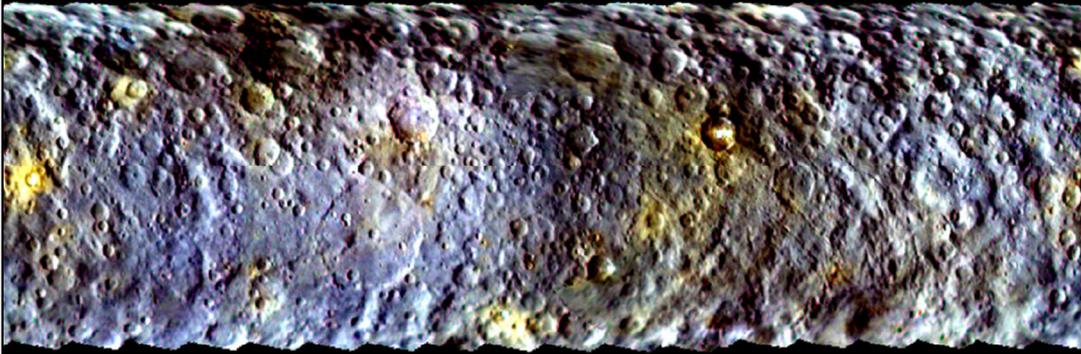
Ceres é coberto por inúmeras pequenas crateras jovens, mas nenhuma tem mais de 280 quilômetros de diâmetro. Isso é surpreendente, dado que o planeta anão deve ter sido atingido por numerosos asteroides grandes durante seus 4,5 bilhões de anos de vida. A falta de crateras pode ser devido a camadas de gelo logo abaixo da superfície. As características da superfície podem suavizar com o tempo se o gelo ou outro material de menor densidade, como o sal, estiver logo abaixo da superfície. Também é possível que atividades hidrotermais passadas, como vulcões de gelo, tenham apagado algumas grandes crateras. Dentro de algumas crateras de Ceres, há regiões que estão sempre na sombra. É possível que, sem a luz direta do sol, essas "armadilhas frias" possam ter gelo de água por longos períodos de tempo.

Ceres tem uma atmosfera muito fina e existem evidências de que ele contém vapor de água. O vapor pode ser produzido por vulcões de gelo ou por gelo próximo à sublimação da superfície (transformando de sólido em gás).

Fonte: <https://solarsystem.nasa.gov/planets/dwarf-planets/ceres/in-depth/>

Ceres (antes asteroide, agora planeta-anão)

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



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

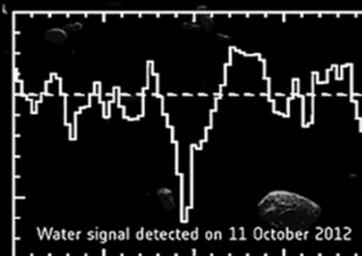
Ceres (antes asteroide, agora planeta-anão)

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 km^3 , sendo 41 milhões de km^3 de água doce. Ceres pode conter 200 milhões de km^3 de água doce.



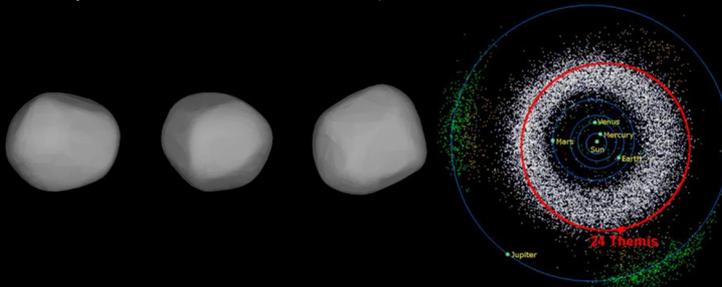
Asteroides úmidos

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

Água e moléculas orgânicas são encontradas no asteroide (~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 ^[1]	
Epoch 23 July 2010 (JD 2455400.5)	
Aphelion	529.4 Gm (3.539 AU)
Perihelion	406.8 Gm (2.719 AU)
Semi-major axis	468.1 Gm (3.129 AU)
Eccentricity	0.1310
Orbital period	2021 d (5.54 yr)
Mean anomaly	146.6°
Inclination	0.7595°
Longitude of ascending node	35.99°
Argument of perihelion	107.7°
Physical characteristics	
Dimensions	198 ± 20 km ^{[1][2]}
Mass	(1.13 ± 0.43) × 10 ¹⁹ kg ^[2] 2.3 × 10 ¹⁹ kg ^{[3][4]}
Mean density	2.78 ± 1.35 g/cm ^{3[2]}
Equatorial surface gravity	0.15 ^{+0.08} _{-0.07} m/s ^{2[2]}
Equatorial escape velocity	87 ⁺¹⁵ ₋₂₀ m/s ^[2]
Rotation period	0.348 92 d (8 h 23 min) ^[1]
Geometric albedo	0.067 ^[1]
Spectral type	C/B ^[1] (B-V=0.68)
Absolute magnitude (H)	7.08 ^[1]

Asteroides úmidos

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

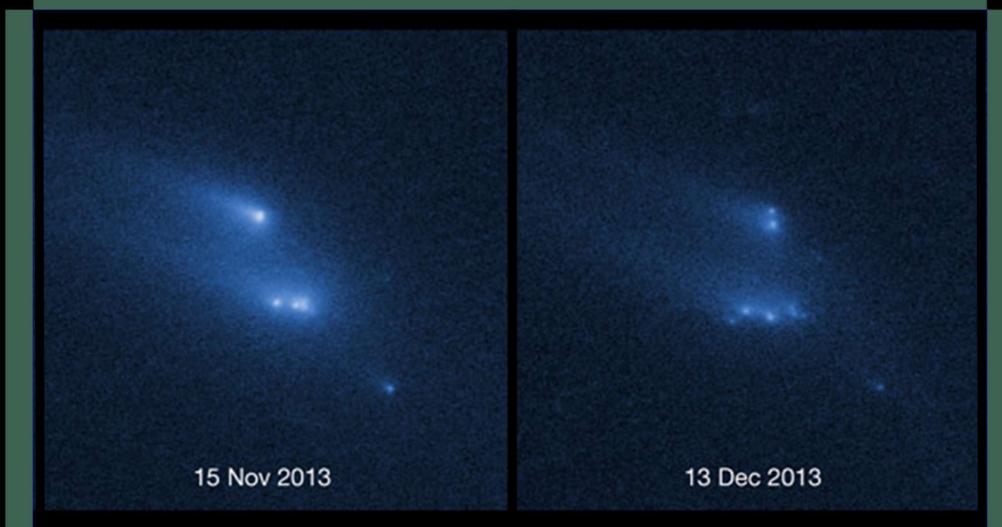
Nessa distância, a água congelada da superfície seria vaporizada. Isso significa que o gelo deve ser continuamente reabastecido, eventualmente, por um reservatório de água congelada dentro da rocha.

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 asteroides 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 H₂O e OH.

Ruptura de asteroides

- 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.



Nasa/ESA/D. Jewitt (UCLA) <http://scitechdaily.com/images/Hubble-Views-Asteroid-P2013-R3-Mysteriously-Disintegrating.jpg>

O Telescópio Espacial Hubble capturou a rara ruptura de um asteroide conhecido como P/2013 R3 durante um período de meses no final de 2013 e 2014. Esta imagem, a primeira de uma série, foi tirada em 29 de outubro de 2013. Imagem via NASA, ESA e D. Jewitt.

Observações do Telescópio Espacial Hubble - e subsequente modelagem computacional - mostraram que o P/2013 R3 provavelmente começou com menos de 400 metros de raio e provavelmente pesava cerca de 200.000 toneladas. Ele se partiu em pelo menos 13 pedaços, o maior dos quais provavelmente não tinha mais do que 200 metros de tamanho.

Núcleos frágeis de cometas já foram vistos em rompimento à medida que se aproximavam do Sol. Mas os asteroides não são, por definição, corpos gelados frágeis. Eles são pedaços de rocha ou metal.

Estudos posteriores à obtenção dessas imagens apontaram que, como o asteroide parecia desintegrar-se lentamente por um período de meses, era improvável que uma colisão violenta e repentina com outro asteroide causasse a ruptura. É pouco provável que o asteroide se partisse devido à pressão do material congelado do interior vaporizasse devido ao aquecimento à medida que o asteroide se aproximava do Sol. Os cometas gelados se tornam ativos por esse motivo e às vezes se desintegram, mas acreditava-se que o P/2013 R3 era muito frio para esse processo, além de, presumivelmente, manter sua distância heliocêntrica (~ 480 milhões de km) durante grande parte da idade do Sistema Solar.

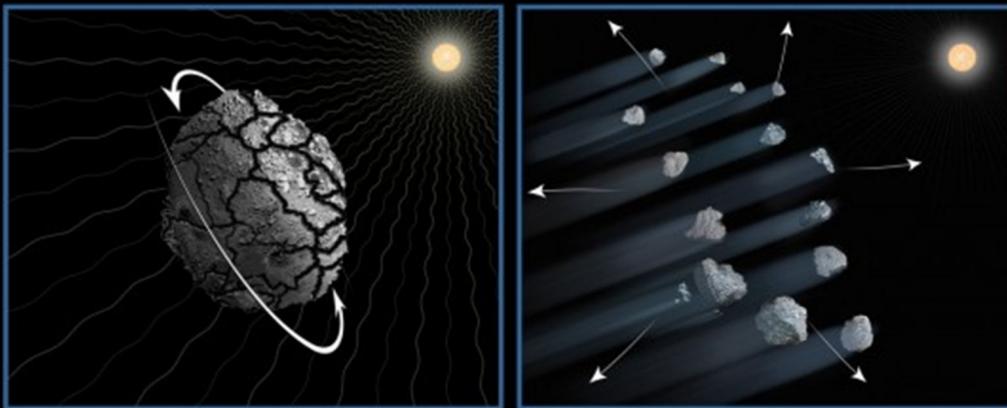
Isso deixou um cenário possível em que o asteroide se desintegrou devido a um efeito sutil da luz solar, conhecido como efeito YORP - que faria com que a taxa de rotação aumentasse lentamente ao longo do tempo. Eventualmente, as partes componentes do asteroide se separariam suavemente devido à força centrífuga.

Para que a separação ocorra dessa maneira, o P/2013 R3 precisaria ter um interior fraturado e fraco. Esse interior fraturado pode ter sido o resultado de inúmeras colisões antigas e não destrutivas com outros asteroides, no início da história do Sistema Solar. Pensa-se que a maioria dos asteroides pequenos tenha sido severamente danificada dessa maneira, dando-lhes uma estrutura interna de "pilha de entulho".

Assim, o próprio P/2013 R3 provavelmente foi o produto da quebra colisional de um corpo maior nos últimos bilhões de anos.

Fonte: <https://earthsky.org/space/this-date-in-science-breakup-of-an-asteroid>

Ruptura de asteroides



É possível que, no passado, o asteroide tenha sido fraturado por colisões com outros asteroides. O aquecimento pelo Sol fez com que o asteroide aumentasse lentamente sua taxa de rotação até que os fragmentos se separassem devido a forças centrífugas. A poeira escapa pelas rachaduras e faz as caudas parecerem cometas. Esse processo pode ser comum para corpos pequenos no cinturão de asteroides. Imagem via NASA, ESA, D. Jewitt (UCLA) e A. Feild (STScI).

Esta ilustração mostra uma possível explicação para a desintegração do asteroide P/2013 R3.

É provável que nos últimos 4,5 bilhões de anos o asteroide tenha sido fraturado por colisões com outros asteroides. Os efeitos da luz solar fizeram com que o asteroide aumentasse lentamente sua taxa de rotação até que os fragmentos fracamente ligados se separassem devido a forças centrífugas. A poeira que escapa pelas rachaduras e faz as caudas parecerem cometas. Esse processo pode ser comum para corpos pequenos no cinturão de asteroides. Imagem via NASA, ESA, D. Jewitt (UCLA) e A. Feild (STScI).

O P/2013 R3 é um dos vários objetos conhecidos como asteroides ativos (por vezes chamados *de cometas do cinturão principal*). Mas, de acordo com David Jewitt "... isso foi mal interpretado por muitas pessoas para significar que os objetos ativos são necessariamente gelados. Na maioria dos casos, não sabemos se são gelados. Em alguns casos, sabemos que eles não são.

Além do P / 2013 R3, a lista de asteroides ativos atualmente conhecidos inclui 133P/Elst-Pizarro , 176P/LINEAR, 238P/Read, 62412 e outros Mais informações aqui: <https://www2.ess.ucla.edu/~jewitt/mbc.html>

Fonte: <https://earthsky.org/space/this-date-in-science-breakup-of-an-asteroid>

Alguns exemplos

Gaspra

19x12x11 km



433 Eros

33km x 13km x 13km



Só os maiores têm forma esférica

Ida

1,6 x 1,2 km



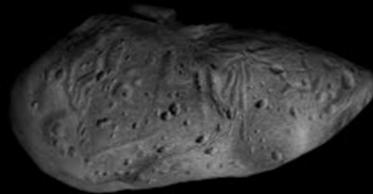
253 Matilde

59 x 47 km



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.

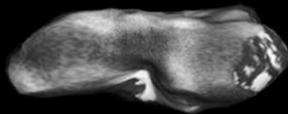


Asteróides 243 Ida e seu satélite Dáctilo

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 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.

Ida é um asteroide com crateras irregulares e situa-se no cinturão principal de asteroides. Ida é classificado como de classe S (meteoritos de ferro ou rocha). É um membro da família Koronis, que se acredita ter sido criado quando um corpo maior, com cerca de 200 a 300 quilômetros de diâmetro, foi fragmentado há relativamente pouco tempo, porém bem depois que o Sistema Solar se formou há cerca de 4,5 bilhões de anos atrás.

Em 28 de agosto de 1993, a sonda Galileu chegou a 2.400 quilômetros de Ida. Ele tem cerca de 56 x 24 x 21 quilômetros de tamanho, mais que o dobro do tamanho de Gaspra. Tem um período de rotação de 4 horas e 38 minutos. Sua densidade é estimada entre 2,2 e 2,9 g/cc. A idade de Ida não é bem determinada, mas sua superfície fortemente marcada por crateras sugere que ele existe em sua forma atual há pelo menos um bilhão de anos, talvez muito mais.

Dáctilo é um pequenino satélite que orbita Ida, o primeiro satélite natural de um asteroide já descoberto e fotografado. Dáctilo tem cerca de 1,2 por 1,4 por 1,6 km de tamanho. O nome é derivado de um grupo de seres mitológicos que viviam no Monte Ida.

Dáctilo é feito mais ou menos do mesmo tipo de material que Ida. Como um asteroide do tipo S, Ida é composta principalmente de rochas silicatadas. Não se sabe se esse satélite foi criado ao mesmo tempo que Ida - quando um asteroide maior e mais velho foi quebrado em uma colisão com outro asteroide, produzindo dezenas de asteroides menores - ou se Ida tenha sido atingida por um objeto menor ainda mais recentemente, deixando uma cratera no asteroide e jogando fora o material que se tornou Dáctilo. Mas, é provável que ele seja um objeto capturado, algo criado completamente separado de Ida que passou por perto do asteroide e foi pego pelo seu campo gravitacional. De acordo com as leis da mecânica celeste, esse evento desviaria o objeto menor, mas não seria capturado em órbita a menos que uma terceira força de algum tipo o desacelerasse.

Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/solar/ida.htm>

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.

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.



Toutatis foi descoberto por astrônomos franceses. Sua órbita excêntrica de quatro anos se estende do interior da órbita da Terra ao principal cinturão de asteroides. O plano da órbita de Toutatis está mais próximo do plano da órbita da Terra do que qualquer asteroide conhecido que atravessa a órbita da Terra.

Em dezembro de 1992, Toutatis passou a cerca de 4 milhões de quilômetros da Terra. Imagens de Toutatis foram obtidas usando radar e revelaram dois objetos de forma irregular, com diâmetro médio de 4 e 2,5 quilômetros, provavelmente unidos por gravitação mútua. Corpos "binários de contato" podem ser bastante comuns. O asteroide 4769 Castalia também apresenta-se como tal. Presume-se que numerosas características da superfície de Toutatis, incluindo um par de crateras de 800 metros de largura, lado a lado, e uma série de três saliências proeminentes - um tipo de cordilheira de asteroides - resultem de uma história complexa de impactos.

Toutatis é um dos objetos mais estranhos do Sistema Solar, com uma forma altamente irregular e uma rotação extraordinariamente complexa. Acredita-se que sua forma e rotação sejam o resultado de uma história de colisões violentas. Uma consequência dessa estranha rotação é que Toutatis não possui um polo norte fixo como a Terra. Em vez disso, seu polo norte vagueia ao longo de uma curva no asteroide a cada 5,4 dias.

A grande maioria dos asteroides parece estar em rotação simples com um polo fixo e períodos tipicamente entre uma hora e um dia, embora as violentas colisões que esses objetos possam ter experimentado significariam que cada um deles em algum momento no passado, deveria ter movimento complexo como Toutatis.

O atrito interno fez com que os asteroides mudassem para padrões rotacionais simples em quantidades relativamente curtas de tempo. No entanto, Toutatis gira tão lentamente que esse processo de "amortecimento" levaria muito mais tempo do que a idade do Sistema Solar. Isso significa que a rotação de Toutatis é uma relíquia notável e bem preservada da evolução de um asteroide relacionada à colisão.

Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/solar/toutatis.htm>

Asteróides 4769 Castália (NEA)



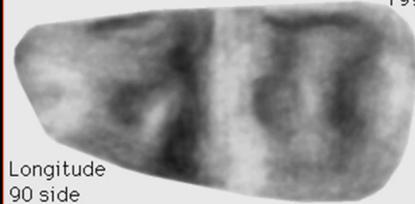
castalia



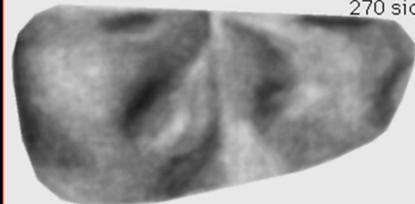
Descoberta: 9/8/1989, por Eleanor F. Helin
Tamanho: 1.8km x 0.8km
Período Rotacional: 4h42m
Período Orbital: 1,1 ano

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.



Eros foi o primeiro asteroide a ser orbitado por uma espaçonave e o primeiro em que uma espaçonave pousou. Mas ele era importante para os astrônomos já em 1898, quando se tornou o primeiro asteroide próximo à Terra (NEA) a ser descoberto.

A sonda NEAR voou pela primeira vez por Eros em 23 de dezembro de 1998 a uma distância de cerca de 3.800 quilômetros e descobriu que o asteroide era menor que o esperado e tinha duas crateras de tamanho médio, uma crista de superfície longa e uma densidade semelhante àquela da crosta terrestre. Depois de quase um ano em órbita, durante o qual a sonda foi renomeada como "NEAR Shoemaker" em homenagem ao pioneiro da astrogeologia Eugene Shoemaker, a missão realizou o primeiro pouso.

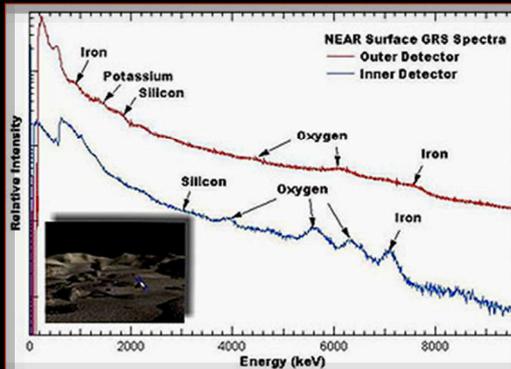
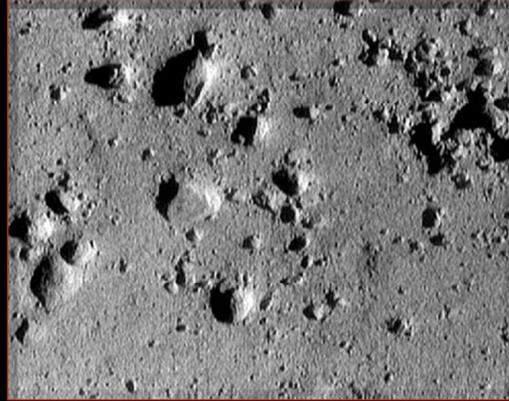
O Eros é um asteroide do tipo S, o tipo mais comum no cinturão principal de asteroides. É um membro típico do grupo "Amor" de NEAs, que cruzam a órbita de Marte, mas não alcançam a da Terra. Ao contrário dos muito mais numerosos asteroides do cinturão principal entre Marte e Júpiter, acredita-se que os NEAs sejam cometas ou fragmentos mortos de colisões de asteroides do cinturão principal.

Fonte: <https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/asteroids/433-eros/in-depth/>

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.

heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/misc/misc.html

Em 2000, a sonda Shoemaker do Near Asteroid Rendezvous Near Earth (NEAR) coletou um ano inteiro de dados sobre sua composição superficial, topografia, massa, campo de gravidade, estrutura interna e outras propriedades antes de tocar suavemente em sua superfície. O NEAR Shoemaker obteve dimensões precisas ($33 \times 13 \times 13$ km), encontrou evidências de fenômenos geológicos que poderiam ter se originado em um corpo parental muito maior do qual Eros foi derivado e obteve milhares de imagens revelando numerosas cordilheiras, sulcos, correntes de crateras e pedras. Uma descoberta significativa foi que o Eros é um asteroide indiferenciado - isto é, nunca foi submetido a derretimento e segregação extensivos em camadas de composição distinta - e, portanto, pode ser uma amostra primitiva de material primitivo do Sistema Solar.

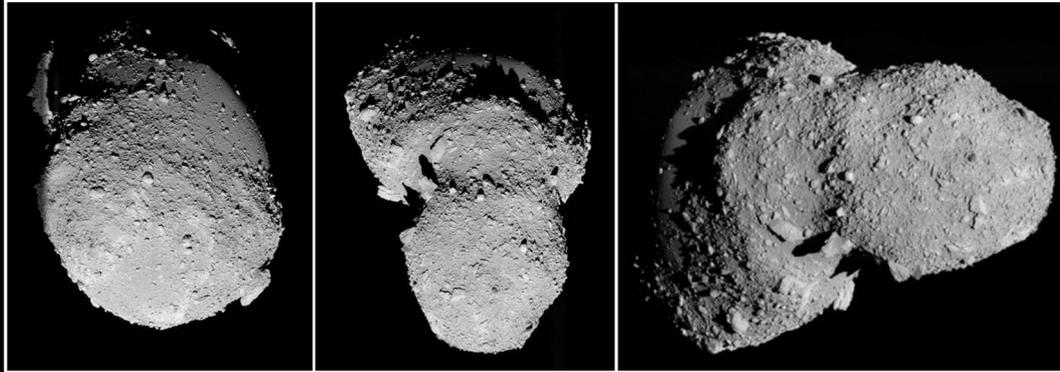
Fonte: <https://www.britannica.com/topic/Eros-asteroid>

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).

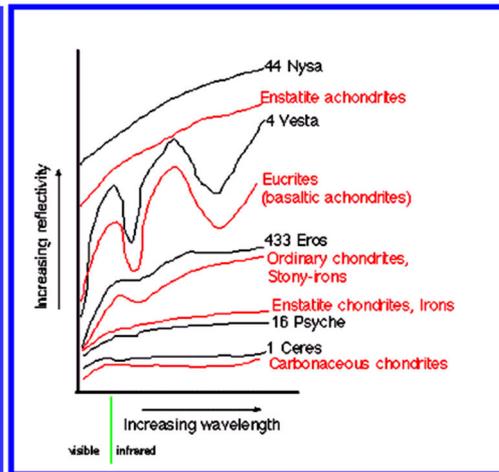
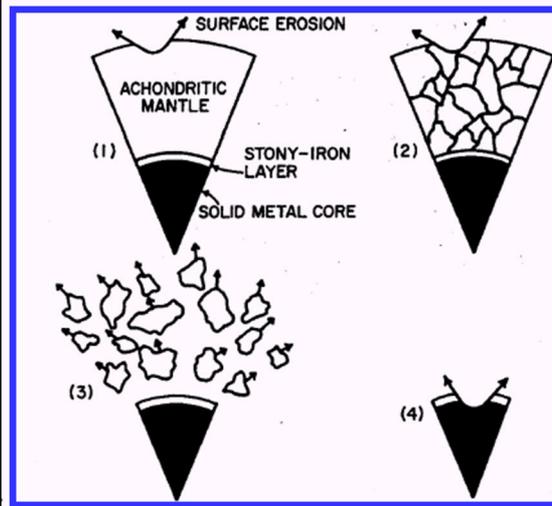
Origem dos meteoritos e poeira zodiacal

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
poeira zodiacal	asteróides e cometas



Semelhança espectral de meteoritos e asteroides



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

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

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