

## Capítulo 15

# Corpos menores do Sistema Solar

### 15.1 Asteróides

Asteróides são um grupo numeroso de pequenos corpos (planetas menores) que orbitam o Sol. A maior parte dos asteróides conhecidos têm órbitas situadas entre as órbitas de Marte e Júpiter, a uma distância da ordem de 2,8 unidades astronômicas (UA) do Sol. Essa região é conhecida como o **Cinturão de Asteróides**.

O maior objeto do Cinturão de Asteróides é Ceres, que foi também o primeiro asteróide a ser descoberto, em 1801, pelo italiano Giuseppe Piazzi (1746-1826). Ceres tem 1000 km de diâmetro e massa de um centésimo da massa da Lua. Outros asteróides grandes dessa região são Palas, descoberto em 1802, por Heinrich Wilhelm Matthäus Olbers (1758-1840) e Juno, descoberto em 1804 por Karl Ludwig Harding ((1765-1834).

A partir de 1992 foram descobertos vários asteróides situados além da órbita de Netuno, chamados objetos transnetunianos. Esses objetos formam o chamado **Cinturão de Kuiper**, um cinturão de restos gelados que está no plano do sistema solar e se estende desde após a órbita de Netuno até 150 UA do Sol. A forma achatada do cinturão de Kuiper indica que os objetos que o forma são remanescentes dos planetesimais formados no disco da nebulosa solar. Todos os asteróides, sejam do cinturão principal, sejam do cinturão de Kuiper, são menores do que a Lua. Atualmente, existem mais de 12000 asteróides catalogados, cerca de 30 têm diâmetros maiores do que 200m, mas devem existir acima de 100 mil com mais de 1 km de diâmetro. Devem existir no mínimo 70000 com diâmetros maiores do que 100 km no

cinturão de Kuiper.

## 15.2 Objetos do Cinturão de Kuiper

Este cinturão foi predito pelos cálculos dos astrônomos Kenneth Essex Edgeworth (1880-1972) em 1949 e Gerard Peter Kuiper (1905-1973) em 1951. Desde a primeira descoberta de um asteroide transnetuniano por David C. Jewitt & Jane X. Luu em 1992, foram descobertos mais de 600 asteroides candidatos a pertencerem ao Cinturão de Kuiper, a maioria com cerca de 100 km de diâmetro. Entre os maiores estão Varuna e 2002 AW197, ambos com 450 km de raio, Ixion, com 530 km de raio, e 1996TL66, com raio de 316 km. 1996TL66 e 2002AW197 não são objetos transnetunianos clássicos, pois sua órbita vai muito além da média do cinturão de Kuiper. 1966TL66, por exemplo, tem órbita com semi-eixo maior de 85 UA (o semi-eixo maior da órbita de Plutão é 39 UA), e uma excentricidade que o leva de uma distância mínima do Sol de 35 UA a uma distância máxima de 136 UA. Sua descoberta sugere que o Cinturão de Kuiper se estende além de 50 UA, e pode conter muito mais massa ( $\simeq 0,5 M_{\odot}$ ) do que anteriormente se pensava.

Em 2002 foi descoberto o objeto transnetuniano 2002LM60, com 1250 km de diâmetro, maior do que Ceres. Esse asteroide foi batizado de Quaoar, “força de criação” na língua da tribo Tongva, os primeiros habitantes da bacia de Los Angeles. Em fevereiro de 2004 foi descoberto o Sedna, com raio entre 550 e 900 km, a uma distância de 13 bilhões de km, que passou a ser considerado o maior asteroide do sistema solar.

Éris (2003 UB313), um asteroide do cinturão de Kuiper (asteroide transnetuniano), descoberto em 2005 por Michael E. Brown (1965-), Chadwick A. Trujillo (1973-) e David Lincoln Rabinowitz (1960-), é maior do que Plutão, conforme as medidas feitas com o Telescópio Espacial Hubble em 9 e 10 de dezembro de 2005, que resultaram em um diâmetro de  $2398 \pm 97$  km, comparado com 2288 km de Plutão. O asteroide Eris varia de distância ao Sol entre 38 UA e 98 UA ( $a=67,73$  UA,  $P=557,44$  anos), provavelmente foi deslocado de sua órbita por Netuno, e tem um plano de órbita bem inclinado em relação ao dos planetas ( $44^\circ$ ). O asteroide 2003 UB313 tem um satélite, S/2005 (2003 UB313) 1, fotografado pela primeira vez por Michael E. Brown com um dos telescópios de 10 m do W.M. Keck Observatory, no Hawai'i. O planeta anão 2003 UB313 recebeu em 13 de setembro de 2006 o nome oficial de Éris, a deusa da discórdia na mitologia grega. Seu satélite recebeu o nome Dysnomia, que na mitologia é o espírito demoníaco da falta de lei. Pela órbita de Dysnomia se mede que Eris é 27% mais massivo que

Plutão.

## 15.3 Meteoros

Meteoro é o fenômeno luminoso quando um pequeno asteróide, chamado meteoróide, se choca com a atmosfera da Terra. O termo vem do grego *meteoron*, que significa fenômeno no céu. Ao penetrar na atmosfera da Terra, gera calor por atrito com a atmosfera, deixando um rastro brilhante facilmente visível a olho nu. Existem aproximadamente 50 asteróides com diâmetro maior de 20 km, que se aproximam da Terra, colidindo com uma taxa de aproximadamente 1 a cada 1 milhão de anos. Dois a três novos são descobertos por ano e suas órbitas são muitas vezes instáveis.

Meteoritos são meteoros que atravessam a atmosfera da Terra sem serem completamente vaporizados, caindo ao solo. Do estudo dos meteoritos se pode aprender muito sobre o tipo de material a partir do qual se formaram os planetas interiores, uma vez que são fragmentos primitivos do sistema solar.

Existem 3 tipos de meteoritos: os metálicos, os rochosos, e os metálico-rochosos. Os rochosos são os mais abundantes, compreendendo 90% de todos meteoritos conhecidos. Um tipo de meteoritos rochosos são os condritos carbonáceos, que representam o tipo mais antigo de meteoritos, com aproximadamente 4,5 bilhões de anos, e não parecem ter sofrido alteração desde a época de sua formação. Os metálicos são compostos principalmente de ferro e níquel. Na Terra, caem aproximadamente 25 milhões por dia, a grande maioria com algumas microgramas.

O asteróide Ida, com 50 km de diâmetro, foi fotografado em 1993 pela sonda Galileo, e foi, então, descoberto que ele possui um satélite, Dactyl, de 1,5 km de diâmetro, a 100 km de distância.

Mais de 9000 asteróides têm órbitas bem determinadas. Eles orbitam o Sol aproximadamente na mesma direção dos planetas (de oeste para leste) e a maioria no mesmo plano.

O Cinturão de Asteróides principal contém asteróides com semi-eixo maior de 2,2 a 3,3 UA, correspondendo a períodos orbitais de 3,3 a 6 anos. Provavelmente, mais de 90% de todos os asteróides estão nesse Cinturão. Os grandes asteróides têm densidade da ordem de  $2,5 \text{ g/cm}^3$ .

Em agosto de 1996, cientistas da NASA revelaram evidências indiretas de possíveis fósseis microscópicos que poderiam ter se desenvolvido em Marte 3,6 bilhões de anos atrás no meteorito marciano ALH84001 (Figura 15.1). Sua denominação vem do fato de ter sido o meteorito número 001, coletado



Figura 15.1: Meteorito ALH84001.

em 1984, na região chamada Allan Hills, na Antártica. Esse meteorito, de 1,9 kg, é um dos 30 meteoritos já coletados na Terra, que, se acredita, foram arrancados de Marte por colisões de asteróides. ALH84001 cristalizou-se no magma de Marte 4,5 bilhões de anos atrás, foi arrancado de Marte 16 milhões de anos atrás, e caiu na Antártica 13 mil anos atrás. Ele mostra traços de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e depósitos minerais parecidos com os causados por nanobactérias na Terra e, portanto, indicando que poderia ter havido vida em Marte no passado remoto. Essa é a primeira evidência da possível existência de vida fora da Terra e levanta a questão de se a vida começou em outros pontos do Universo além da Terra, espontaneamente. Em outubro de 1996, cientistas ingleses descobriram traços de carbono orgânico em outro meteorito marciano, ETA79001, novamente uma evidência circunstancial, para a qual vida é somente uma das possíveis interpretações. A sonda Sojourner, da missão Mars Pathfinder de julho a setembro de 1997, comprovou que a composição química das rochas marcianas é, de fato, muito similar à composição dos meteoritos como o ALH84001.

## 15.4 Impactos na Terra

Duas vezes no século XX grandes objetos colidiram com a Terra. Em 30 de junho de 1908, um asteróide ou cometa de aproximadamente 100 mil toneladas explodiu na atmosfera perto do Rio Tunguska, na Sibéria, derrubando milhares de km<sup>2</sup> de árvores, e matando muitos animais. O segundo impacto ocorreu em 12 de fevereiro de 1947, na cadeia de montanhas Sikhote-Alin, perto de Vladivostok, também na Sibéria. O impacto, causado por um asteróide de ferro-níquel de aproximadamente 100 toneladas que se rompeu no



Figura 15.2: Foto da Meteor Crater, ou Cratera Barringer [Daniel Moreau Barringer (1860-1929), que demonstrou que a cratera era devido ao impacto de um meteorito], no Arizona, que tem 1,2 km de diâmetro e 50 mil anos.

ar, foi visto por centenas de pessoas e deixou mais de 106 crateras, com tamanhos de até 28 m de diâmetro. Mais de 28 toneladas em 9000 meteoritos metálicos foram recuperados. O maior pedaço pesa 1745 kg.

A extinção dos dinossauros, 65 milhões de anos atrás, é consistente com um impacto de um asteroide ou cometa de mais de 10 km de diâmetro, que abriu uma cratera de 200 km de diâmetro perto de Chicxulub, na península de Yucatan, no México. O impacto liberou uma energia equivalente a 5 bilhões de bombas atômicas como a usada sobre Hiroshima em 1945. A imagem mostra as variações gravimétricas do local, já que parte está sob o oceano. Outras crateras com a mesma idade têm sido descobertas, como a cratera Boltysh, de 24 km de largura na Ucrânia e a cratera Silverpit, no fundo do Mar do Norte na costa da Inglaterra, com 19 km de largura. A proposta de que a grande extinção de organismos terrestres e marinhos, vertebrados e invertebrados que ocorreu há 65 milhões de anos (transição do período Cretáceo para o Terciário) tem origem num grande impacto é do físico americano Luis Walter Alvarez (1911-1988), ganhador do prêmio Nobel em 1968 por seus estudos de partículas sub-atômicas, e seu filho Walter Alvarez (1940-), geólogo americano, que notaram que a extinção se deu por alterações climáticas que atingiram toda a Terra, com um esfriamento na superfície e pela existência de uma fina camada de barro com uma alta taxa de irídio (um metal raro, similar à platina) em várias partes do globo nesta época, consistente com uma grande nuvem de pó que se espalhou por todo o planeta, cobrindo a luz do Sol. Com a queda da fotossíntese, as plantas

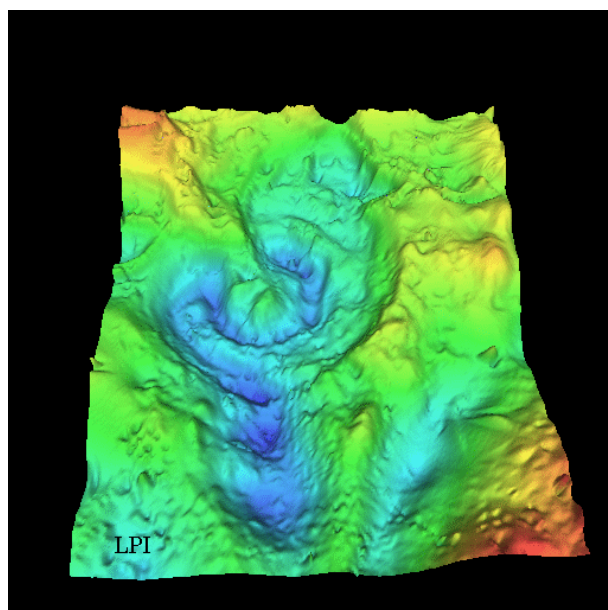


Figura 15.3: Medidas gravimétricas de Chicxulub.

morreriam e os dinossauros morreriam por falta de alimentos. Um evento similar poderia ser uma grande explosão vulcânica, mas isto não explicaria a deposição de irídio, nem a existência da cratera de Chicxulub. Asteróides são mais ricos em irídio do que a crosta da Terra.

Esse não é um evento único; a cada dia, a Terra é atingida por corpos interplanetários, a maioria deles microscópicos, com uma massa acumulada de 10 000 toneladas, e a cada aproximadamente 30 milhões de anos, um grande impacto ocorre na Terra.

## 15.5 Satélites

Em geral, o número de satélites de um planeta está associado à sua massa. O maior satélite do sistema solar é Ganimedes, um dos quatro satélites galileanos de Júpiter, com raio de 2631 km. O segundo é Titan, de Saturno, com 2575 km de raio. Ambos são maiores do que o planeta Mercúrio, que tem 2439 km de raio. Titan apresenta a notável característica de possuir uma atmosfera densa, rica em compostos de carbono e metano. Note que a Lua, com 3475 km de diâmetro, é maior do que Plutão, que tem 2350 km

de diâmetro.

A maioria dos satélites revolve em torno do respectivo planeta no sentido de oeste para leste e a maioria tem órbita aproximadamente no plano equatorial de seu planeta.

## 15.6 Anéis

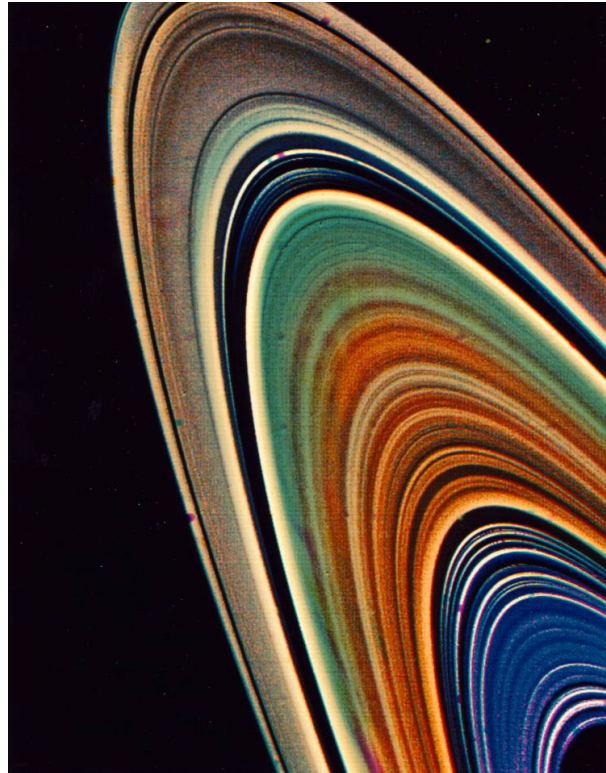


Figura 15.4: Anéis de Saturno.

Os quatro planetas jovianos apresentam um sistema de anéis, constituídos por bilhões de pequenas partículas orbitando muito próximo de seu planeta. Nos quatro planetas, os anéis estão dentro do limite de Roche, e devem ter se formado pela quebra de um satélite ou a partir de material que nunca se aglomerou para formar um satélite. Saturno é, de longe, o que possui anéis mais espetaculares. Eles são constituídos, principalmente, por pequenas

partículas de gelo, que refletem muito bem a luz. Já os anéis de Urano, Netuno e Júpiter (nessa ordem de massa constituinte), são feitos de partículas escuras, sendo invisíveis da Terra. Já em 1857, James Clerk Maxwell (1831-1879) demonstrou que os anéis só poderiam permanecer em órbitas estáveis se fossem constituídos de pequenas partículas.

## 15.7 Cometas

Os cometas constituem outro conjunto de pequenos corpos orbitando o Sistema Solar. Suas órbitas são elipses muito alongadas. Eles são muito pequenos e fracos para serem vistos mesmo com um telescópio, a não ser quando se aproximam do Sol. Nessas ocasiões, eles desenvolvem caudas brilhantes que algumas vezes podem ser vistas mesmo a olho nu.

Os cometas são feitos de uma mistura de gelo e poeira, como uma bola de gelo sujo, segundo o modelo proposto em 1950 por Fred Lawrence Whipple (1906-2004). À medida que se aproximam do Sol, parte do gelo sublima, formando uma grande nuvem de gás e poeira ao redor do cometa, chamada coma. A parte sólida e gelada no interior é o núcleo. A pressão de radiação do Sol empurra as partículas de gás e a poeira da coma formando a cauda. Essa cauda sempre aponta na direção oposta à do Sol e pode estender-se até 1 UA de comprimento.

Existem dois tipos de cauda: a cauda de Tipo I é reta, estreita e azulada; a cauda de Tipo II é curva, larga e amarelada. Um cometa pode apresentar apenas uma das caudas, mas frequentemente apresenta as duas. A cauda azulada é constituída de gases ionizados pela radiação ultravioleta do Sol, principalmente  $\text{CO}^+$ ,  $\text{N}_2^+$ , e  $\text{CO}_2^+$ , que brilham por fluorescência, emitindo luz azul (a emissão do monóxido de carbono ionizado fica em  $\lambda = 4200 \text{ \AA}$ ). Esses gases ionizados seguem as partículas ionizadas expelidas pelo Sol, o vento Solar. A cauda amarelada é constituída de grãos de poeira empurrados pela pressão de radiação do Sol, que brilham porque refletem a luz solar. As partículas de poeira seguem órbitas keplerianas, quanto mais distante do Sol mais devagar elas andam, portanto as mais distantes vão ficando para trás em relação às mais próximas, dando à cauda a forma curva característica. Muitos cometas apresentam um envoltório de hidrogênio neutro que é invisível no óptico, mas em rádio pode ser a componente mais extensa do cometa, chamada envelope de hidrogênio.

Algumas vezes, é observada também uma anticauda, isto é, uma cauda na direção do Sol. Essa cauda é um efeito de perspectiva, causado por partículas grandes (0,1 a 1 mm de diâmetro), ejetadas do núcleo, que não

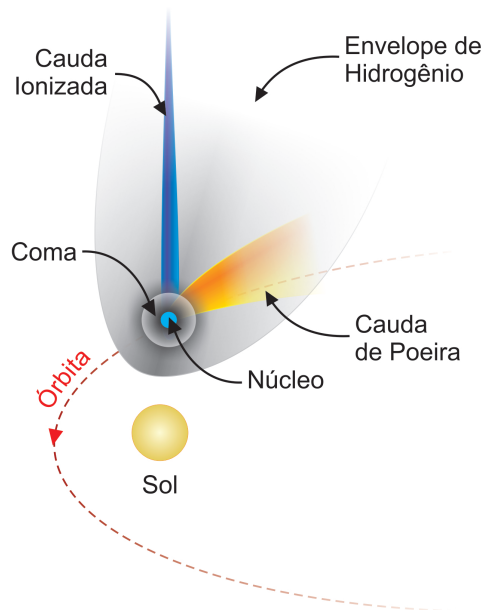


Figura 15.5: Representação esquemática das componentes de cometas: núcleo, coma, cauda ionizada, cauda de poeira e envelope de hidrogênio. A intensidade de cada componente varia de um cometa para outro.

são arrastadas pela pressão de radiação do Sol, permanecendo na órbita.

O núcleo irregular do Cometa Halley foi fotografado pela nave européia Giotto, que chegou a 1000 km do núcleo do cometa, que tem 13 por 8 km, densidade próxima a  $1,0 \text{ g/cm}^3$ , e massa de  $6 \times 10^{14} \text{ kg}$ .

Edmond Halley (1656-1742), astrônomo britânico amigo de Isaac Newton foi o primeiro a mostrar que os cometas vistos em 1531, 1607 e 1682 eram, na verdade, o mesmo cometa, e portanto periódico, que é, desde então, chamado de Cometa Halley.

No início de 1997, o Cometa Hale-Bopp esteve visível a olho nu em praticamente todo o mundo, inclusive todo o Brasil.

Em julho de 1994, o cometa Shoemaker-Levy 9, descoberto por Carolyn Jean Spellmann Shoemaker (1929-), Eugene Merle Shoemaker (1928-1997) e David H. Levy (1948-) em 24 de março de 1993, e que tinha se fragmentado em mais de 21 pedaços, os maiores de até 1 km, colidiu com Júpiter, explodindo nas nuvens de amônia da atmosfera de Júpiter.

Concluindo, se um corpo pequeno apresenta uma atmosfera volátil vi-

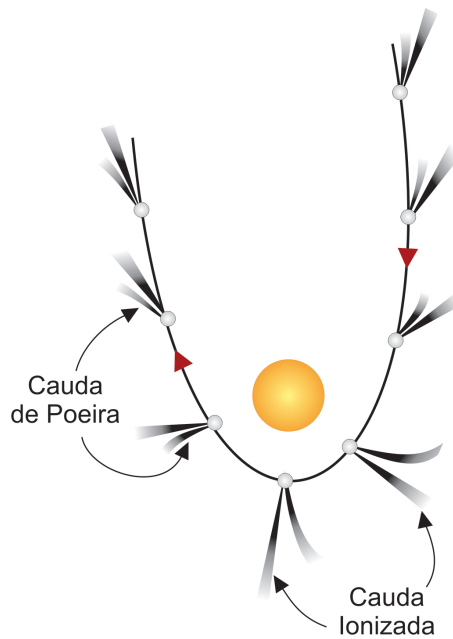


Figura 15.6: A cauda de um cometa aponta sempre na direção oposta ao Sol.

sível, chama-se cometa. Se não, chama-se asteróide.

### 15.7.1 Origem dos Cometas

Acredita-se que os cometas são corpos primitivos, presumivelmente sobras da formação do sistema solar, que se deu pelo colapso de uma nuvem molecular gigante. Esses corpos formariam uma vasta nuvem circundando o Sistema Solar, em órbitas com afélios a uma distância de aproximadamente 50 000 UA do Sol: a “Nuvem de Oort”. Haveria aproximadamente 100 bilhões de núcleos cometários nessa nuvem. Eventualmente, a interação gravitacional com uma estrela próxima perturbaria a órbita de algum cometa, fazendo com que ele fosse lançado para as partes mais internas do sistema solar. Por exemplo, a estrela GL710, da constelação do Sagitário, que se encontra hoje a 63 anos-luz do Sol, vai passar dentro da nuvem de Oort daqui a aproximadamente 6 bilhões de anos, chegando a 1,1 anos-luz de distância do Sol. Outras estrelas que perturbarão a Nuvem de Oort, nos próximos



Figura 15.7: Cometa West (1976).

bilhões de anos, são Sírius, Próxima Centauri e a estrela de Barnard [Edward Emerson Barnard (1857-1923)]. Uma vez que o cometa é desviado para o interior do sistema solar, ele não sobrevive a mais do que 1000 passagens periélicas antes de perder todos os seus elementos voláteis.

## 15.8 Planeta X

Desde a descoberta de Plutão por Clyde William Tombaugh (1906-1997), em 1930, muitos astrônomos procuraram evidências dinâmicas ou fotográficas da existência de um 10° planeta, muitas vezes chamado Planeta X. A razão dessa procura é que a massa de Plutão parece muito pequena para dar conta de todas as irregularidades observadas no movimento de Netuno, que foi o que já havia motivado as pesquisas que levaram à descoberta de Plutão. Nenhum outro planeta do tamanho de Plutão foi encontrado, mas foram descobertos muitos objetos menores, com diâmetros da ordem de algumas centenas de quilômetros. Essas descobertas sugeriram a idéia, atualmente defendida por muitos astrônomos, de que a região externa do sistema solar é povoada por milhares de corpos gelados do tipo de Plutão, que formam o cinturão de Kuiper.

## **15.9 Chuva de meteoros**

Cada vez que um cometa passa perto do Sol, ele perde, junto com seus componentes voláteis, parte de seus componentes sólidos, na forma de partículas que ficam orbitando em torno do Sol na mesma órbita do cometa. Cada vez que a Terra cruza a órbita de um cometa, ela encontra essa “nuvem” de partículas, e uma chuva de meteoros ocorre.

## **15.10 Luz zodiacal**

No plano do Sistema Solar, que no céu fica na região do Zodíaco, existe grande concentração de poeira cometária. A reflexão da luz solar nessa poeira chama-se luz zodiacal e pode ser vista algumas horas após o pôr-do-sol ou antes de seu nascer, em lugares suficientemente escuros.