

5.4 Os PLANETAS-ANÕES

As variações observadas na órbita de Urano, em meados do século 19, só podiam ser explicadas pela presença de outro planeta em suas vizinhanças. Assim, foi descoberto Netuno, o primeiro planeta a ser previsto por teoria. Posteriormente, perturbações de menor ordem na órbita de Urano indicavam uma possível presença de outro corpo adiante de Netuno. O astrônomo americano Percival Lowell passou os últimos dez anos de sua vida procurando por esse objeto. Chegou até a registrá-lo em uma placa fotográfica, mas não o distinguiu dos demais pontos luminosos. Quatorze anos após a morte de Lowell, o jovem astrônomo americano Clyde W. Tombaugh encontrou tal objeto. A descoberta de Plutão foi anunciada em 13 de março de 1930 como um "objeto aparentemente transnetuniano". Desde então, Plutão passou a ser considerado o menor planeta do Sistema Solar. Suas características orbitais, muito diferentes daquelas apresentadas pelos demais planetas, sempre foram um enigma. A dificuldade de se avaliar precisamente massa e volume de Plutão dificultava a determinação de sua densidade, que permitiria saber se ele era um planeta gasoso ou rochoso. Somente em 1978, com a descoberta de seu maior satélite, Caronte, foi possível estimar com precisão sua densidade e concluir que se tratava de um corpo composto por mistura de gelo e rocha, típico da região transnetuniana. Outro fato atípico é que Caronte é excessivamente grande se comparado a Plutão, a ponto de ambos orbitarem um baricentro (centro de massa) localizado fora de Plutão. Ambos formam um sistema de dois corpos. Em síntese, Plutão era muito diferente e não se adequava à definição de planeta.

Com o desenvolvimento tecnológico, nossa capacidade de observação melhorou muito. Passamos a observar objetos pequenos a grandes distâncias, o que fez crescer a população de objetos do cinturão de Edgeworth-Kuiper (ver item 5.7). Com a descoberta de Eris (2003 UB313), objeto maior que Plutão, uma definição mais técnica de "planeta" tornou-se necessária e inadiável. Eris e Plutão orbitam o Sol e têm massas suficientemente grandes para serem quase esféricos como os demais planetas, mas têm características orbitais muito diferentes daquelas apresentadas pelos planetas, porém típicas de objetos pequenos. Algo semelhante ocorre com Ceres, do cinturão principal de asteroides (item 5.6). A União Astronômica Internacional coordenou discussões a respeito, que resultou na criação de uma nova classe de objetos: os planetas-anões. Essencialmente, planeta-anão é um objeto que orbita o Sol, é grande o suficiente para ter formato esférico, porém

Nome	Diâmetro equatorial aproximado (km)	Massa aproximada (kg)	Distância do Sol (UA)	Período Orbital (anos)
Ceres	975	$0,95 \times 10^{21}$	2,77	4,6
Plutão	2306	$13,1 \times 10^{21}$	39,48	248,1
Haumea	1500	$4,2 \times 10^{21}$	43,34	285,4
Makemake	entre 1600 e 2000	$3,0 \times 10^{22}$	45,79	309,9
Éris	2400	$16,7 \times 10^{21}$	67,67	557

Tabela 4- Parâmetros orbitais e físicos dos planetas-anões.

não é gravitacionalmente dominante na sua órbita. Os planetas-anões que têm características parecidas com as de Plutão são classificados como plutoides.

Atualmente há cinco planetas-anões: Ceres (do cinturão principal de asteroides), Eris, Plutão, Makemake e Haumea, mas há vários candidatos à espera de classificação. Na tabela 4 têm-se os parâmetros orbitais e físicos mais importantes destes objetos

Metano parece ser o constituinte básico de Plutão, mas sua densidade (2 g/cm^3) sugere a presença de material rochoso. A forma esférica, a densidade e a rotação indicam tratar-se de corpo diferenciado com manto e núcleo provavelmente sólido. O manto concentra 25% da massa total e pode ser composto majoritariamente de água congelada enquanto que seu núcleo deve ser rochoso. Sua superfície deve ser composta de minerais ricos em água e amônia. Caronte é parecido com Plutão. Acredita-se que Plutão e seus três satélites sejam o resultado de fragmentação decorrente de uma colisão.

Eris é o maior objeto transnetuniano conhecido até o momento. Ele é um pouco maior que Plutão e tem um satélite, Disnomia. Eris é relativamente uniforme, claro e mais brilhante que Plutão.

Makemake é o terceiro maior planeta-anão, também do cinturão de Edgeworth-Kuiper. Seu diâmetro é cerca de três quartos do diâmetro de Plutão. Sua superfície é coberta por metano e, possivelmente, etano congelados. Até o momento, não se sabe se ele possui satélites.

Haumea é um planeta-anão do tipo plutoide, pertencente ao cinturão de Edgeworth-Kuiper. Ele tem dois satélites pequenos que, acredita-se, sejam também destroços de colisão antiga. Haumea tem características pouco comuns, tais como a rápida rotação, alongação extrema e superfície muito brilhante (possivelmente de gelo de água) e sua forma ovalada.

Ceres, ao contrário dos demais planetas-anões, se encontra no cinturão principal de asteroides. Com seu diâmetro de aproximadamente 950 km ele é o corpo mais maciço do cinturão e contém quase um terço da massa total do cinturão. Ceres é praticamente esférico, com uma pequena protuberância de 30 km no equador. Internamente acredita-se que ele seja estruturado em camadas, com um núcleo rochoso denso recoberto por um manto de água doce congelada, por sua vez envolto por uma crosta fina. Estima-se que o manto represente 25% da massa de Ceres, e pode conter mais água doce que a Terra.

Diâmetro equatorial	3476,2 km	Distância média	378.000 km
Diâmetro polar	3472 km	Apogeu	406.000 km
Massa	$7,35 \times 10^{22}$ kg	Perigeu	363.000 km
Variação de temperatura	de 100 K a 400 K	Período de revolução	27,322 dias

Tabela 5- Parâmetros orbitais e físicos da Lua.

5.5 OS SATÉLITES

Satélites são corpos que orbitam planetas, planetas-anões e asteroides, sendo que estes orbitam o Sol. Todos os satélites são sólidos. Alguns são rochosos como a Lua, outros são recobertos por gelo, porém apenas alguns têm atmosfera. Os satélites Ganimedes e Titã são maiores que Mercúrio, mas Calisto é quase do mesmo tamanho. Io é um pouco maior que a Lua e Europa é um pouco menor. Oito satélites têm entre 1.000 e 1.500 km de diâmetro, mas a grande maioria é de objetos pequenos. Io, satélite de Júpiter, é o corpo que apresenta a maior atividade vulcânica do Sistema Solar. Pela diversidade das características que apresentam os satélites nos ajudam a desvendar detalhes da formação deles e de seus planetas.

• LUA

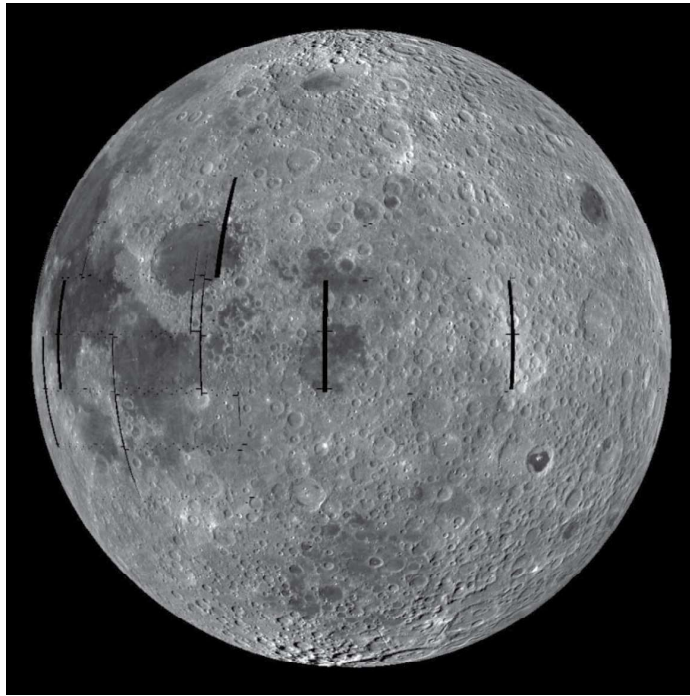
É o satélite que conhecemos melhor. A tabela 5 apresenta os parâmetros físicos e orbitais mais importantes.

- Interior

A Lua é um corpo diferenciado, isto é, seu material está distribuído de acordo com a densidade: os materiais mais densos estão em profundidades maiores. A densidade média das rochas trazidas pelos astronautas da missão Apollo (3 g/cm^3) é muito próxima da densidade média da própria Lua ($3,3 \text{ g/cm}^3$). Isto nos permite concluir que nosso satélite não deve possuir um núcleo metálico maciço. A deficiência de ferro na Lua corrobora esta conclusão.

Estruturalmente, a Lua pode ser dividida em três camadas básicas: (a) uma crosta assimétrica com espessura de 60 km no hemisfério voltado para a Terra, e de 100 km no hemisfério oposto; (b) um manto com 935 km de espessura; (c) um núcleo possivelmente sólido, com 738 km de raio.

Sismômetros deixados na Lua durante as missões americanas Apollo revelaram dois tipos de eventos. O mais frequente acontece quando a Lua está no apogeu (mais afastada da Terra) ou no perigeu (mais próxima da Terra), portanto decorrente de efeito de maré (de formação provocada pela força gravitacional da Terra sobre a Lua). O outro provém de camadas mais profundas e pode estar relacionado com o impacto de meteoroides.



11- Visão rara da Lua, mostrada pela sonda americana Lunar Reconnaissance Orbiter. A metade esquerda é parte da face voltada para a Terra, a metade direita é parte do hemisfério invisível da Terra (NASA/GSFC/Arizona State University).

- Superfície

A Lua apresenta, basicamente, dois tipos de terreno: (a) mares - regiões planas, baixas, escuras e de composição basáltica. Eles se formaram de um processo duplo, onde impactos violentos, provocados pela queda de corpos com diâmetros acima de 30 km, geraram atividade vulcânica. (b) continentes - terras altas, acidentadas, de alta refletividade (brilhantes) e marcadas por crateras de impacto (figura 11). Toda a superfície lunar é recoberta por uma camada relativamente espessa de poeira, chamada regolito, originada da pulverização das rochas pelo bombardeamento de corpos cadentes durante sua história. A variação rápida de temperatura, decorrente da inexistência de atmosfera, ajuda a trincar e pulverizar as rochas.

A análise laboratorial do material lunar comprovou que nos continentes predominam os anortositos (rochas ígneas formadas por feldspatos do tipo plagioclásico). Essas rochas têm no mínimo quatro bilhões de anos. Já a região dos mares é dominada por material de origem vulcânica muito comum na Terra e nos outros planetas rochosos. Suas idades oscilam entre 3,8 e 4,0 bilhões de anos.

A comparação das abundâncias do oxigênio e seus isótopos nas rochas terrestres e lunares revelam uma semelhança entre os dois corpos. Os mares são quimicamente homogêneos e diferem dos continentes porque possuem menor abundância de alumínio.

- Crateras

A maioria das crateras lunares tem origem colisional, por isso têm paredes baixas e pouco inclinadas. As maiores possuem diâmetros superiores a 1.000 km, picos centrais (formados por ondas sísmicas deflagradas durante o impacto) e raios brilhantes (figuras retilíneas que emanam dos bordos na direção radial e se estendem a grandes distâncias, formadas pela ejeção de material da colisão). Um exemplo típico é a cratera Copérnico (figura 11).

A superfície lunar apresenta ainda inúmeras caldeiras vulcânicas com escoamento de lavas, parecidas com aquelas encontradas na Terra, mas em menor escala.

- Idade

A idade do terreno lunar pôde ser determinada com precisão através da análise do material trazido para a Terra. Amostras colhidas nos mares revelam idade entre 3,2 e 4,0 bilhões de anos, semelhante



12- A cratera Copernico, com 93 km de diâmetro, está localizada na região do Mar Imbrium, do lado nordeste da Lua (NASA/JPL/USGS).

às rochas terrestres mais antigas. Isto significa que se passaram cerca de 800 milhões de anos entre a fusão e a solidificação desse material. Já amostras de material característico dos continentes têm idades entre 3,8 e 4,0 bilhões de anos, ou seja, os continentes são mais antigos.

- Atmosfera

Atmosfera lunar é praticamente desprezível, sua massa não ultrapassa dez toneladas de matéria. Os elementos mais abundantes são Na, K, ^{222}Rn , ^{210}Po , ^{40}Ar , ^4He , O_2 , CH_4 , N_2 , CO e CO_2 . Esses gases provêm de degasamento interno ou de bombardeamento das rochas superficiais por micrometeoritos, íons e elétrons oriundos do Sol. Na ausência de atmosfera, a mudança da luminosidade entre dia e noite é repentina, não há crepúsculos, e a temperatura oscila entre $-233\text{ }^\circ\text{C}$ e $123\text{ }^\circ\text{C}$.

- Origem

A Lua deve ter se formado a partir de um impacto violentíssimo entre um corpo com as dimensões de Marte e a Terra, há quatro bilhões de anos. Nessa época a Terra já estava diferenciada em núcleo metálico e manto silicático. O material que formou Lua teria sido arrancado da crosta dos dois corpos, formando um anel em torno do nosso planeta, que, aos poucos, se agregou para formar a Lua. Este processo colisional explica detalhes importantes, como, a crosta ser rica em silicatos e deficiente em ferro, o baixo teor de água nas rochas, a semelhança da composição isotópica do oxigênio, e a abundância de ouro e platina na superfície terrestre.

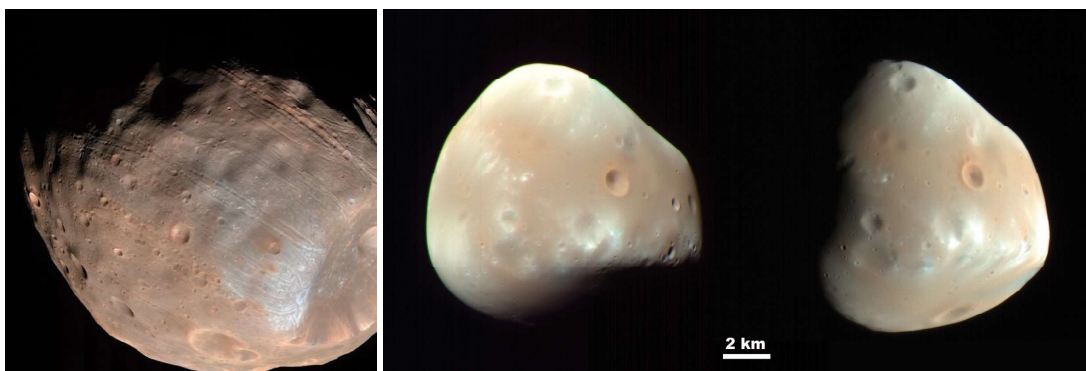
· *Satélites de Marte*

Marte tem dois satélites rochosos, pequenos e assimétricos: Fobos e Deimos. A tabela 6 apresenta suas principais propriedades, e a figura 13 mostra partes de suas superfícies.

Vistos da superfície marciana Deimos nasce a leste e põe-se a oeste, e Fobos transita em sentido oposto. A razão está nos períodos orbitais (veja tabela 6): Fobos dá uma volta em torno de Marte em apenas 7,7 horas, enquanto Deimos demora 30,2 horas. Como o dia marciano tem aproximadamente 24 horas, Fobos cruza o céu de Marte de oeste para leste em 11 horas, e Deimos de leste para oeste em 2,7 dias locais.

Satélite (descoberta)	Distância (1.000 km)	Período Orbital (dia)	Tamanho (km)	Massa ($M_{LUA} = 1$)	Densidade (g/cm^3)
Fobos (1877)	9,4	0,32	14 ' 11 ' 9	$1,3 \cdot 10^{-7}$	1,9
Deimos (1877)	23,5	1,26	8 ' 6 ' 6	$2,7 \cdot 10^{-8}$	2,1

Tabela 6- Parâmetros orbitais e físicos dos satélites de Marte.



13- Fobos (esquerda) e Deimos. Imagens fora de escala (Mars Reconnaissance Orbiter <http://mars.jpl.nasa.gov/mro/gallery/press/20080409a.html>).

A superfície de Fobos é marcada por crateras pequenas e apenas uma cratera grande. A superfície de Deimos é mais lisa, sem grandes crateras, porém com numerosas figuras brilhantes, cuja natureza ainda não é bem conhecida.

Quimicamente, esses satélites são feitos de rocha menos densa que Marte, são mais escuros que a Lua e mais parecidos com Ceres (planeta-anão). É possível que ambos sejam dois asteroides capturados por Marte. A órbita de Fobos está encolhendo e, em futuro distante, ele poderá chocar-se com a superfície marciana.

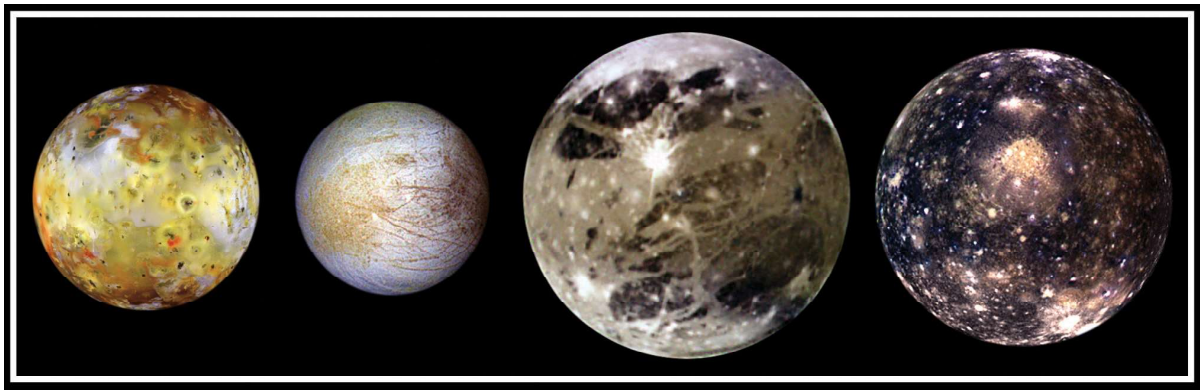
· Satélites de Júpiter

Até o momento são conhecidos 63 satélites jovianos. Os maiores são Io, Europa, Ganimedes e Callisto, também conhecidos como satélites galileanos, pois foram descobertos por Galileu Galilei (figura 14).

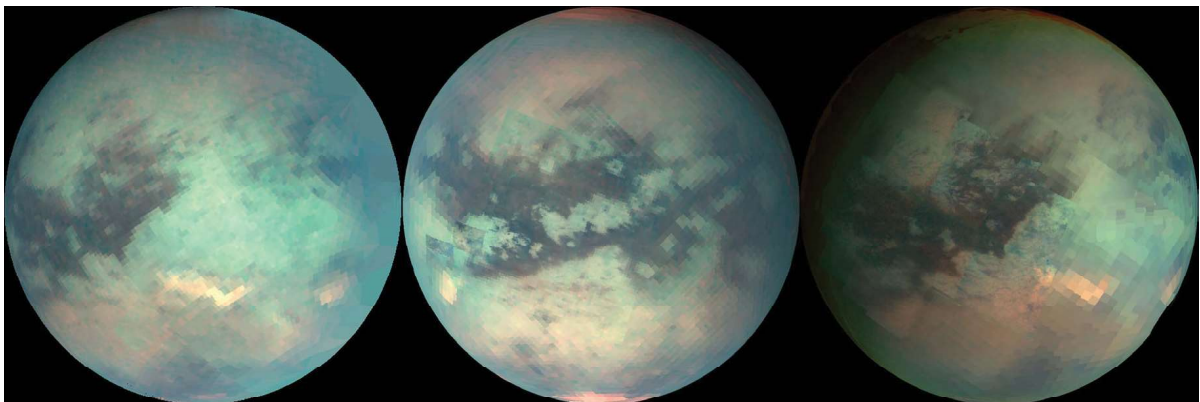
Io é o satélite mais próximo de Júpiter, por isso sofre maré intensa que o deforma e dissipa energia suficiente para provocar vulcanismo. É um corpo pouco maior que a Lua, de temperatura elevada, que apresenta continuamente violentas e gigantescas erupções vulcânicas, com jatos de matéria que podem atingir 200 km de altura acima de sua superfície. Sua cor amarelada é decorrente das erupções contínuas, que incluem enxofre líquido e compostos sulfurosos.

Europa, o segundo satélite a partir de Júpiter, tem superfície recoberta de gelo e com poucas crateras. Trata-se, portanto, de superfície geologicamente jovem. Figuras como rachaduras, enrugamentos, trincas e desalinhamento de blocos, lembram aquelas encontradas nas regiões polares terrestres, típicas de oceanos com superfícies congeladas.

Ganimedes, o terceiro satélite, é o maior satélite do Sistema Solar e maior que Mercúrio. O relevo de sua superfície lembra o da Lua, com a diferença que ela é de gelo, não de rochas. As regiões



14- Da esquerda para a direita, Io, Europa, Ganimedes e Calisto (Sonda Galileu - NASA/JPL/DLR).



15- Titã fotografado pela sonda Cassini entre 2005 e 2006, na região do infravermelho (que penetra sua espessa atmosfera) [NASA/JPL/University of Arizona].

escuras, como a conhecida por Galileo Regio, são fortemente marcadas por crateras de impacto, portanto são muito antigas. As regiões claras são geologicamente mais jovens, têm poucas crateras, e devem ter sido formadas por impactos violentos que provocaram afloramento de água do interior do satélite e se congelaram como planícies. Há indícios de que Ganimedes tenha sido fundido (derretido) por colisões violentas no passado remoto. As rochas mais densas afundaram em direção ao centro.

Calisto se parece muito com Ganimedes, porém tem maior quantidade de crateras. Sua superfície é mais antiga, provavelmente formada há cerca de quatro bilhões de anos, e a estrutura interior não é similar a de Ganimedes.

Os demais satélites jovianos são bem menores que os galileanos, alguns com diâmetros de apenas algumas dezenas de quilômetros ou menos.

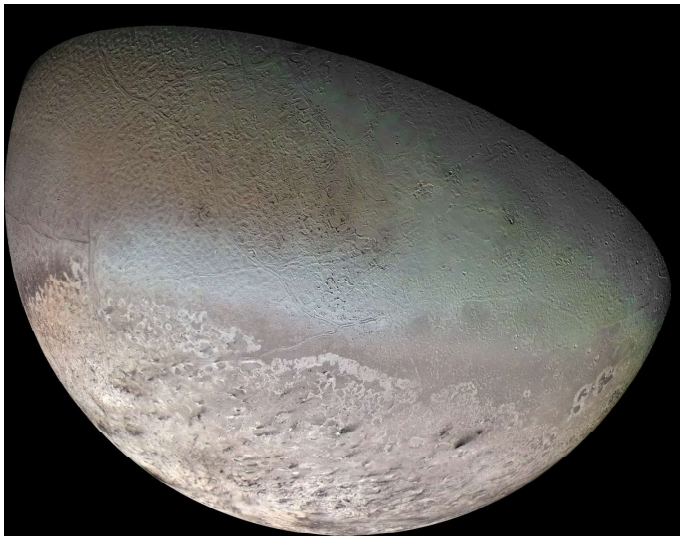
• Satélites de Saturno

Titan, o maior satélite de Saturno, desperta grande interesse científico. Ele é um pouco maior que Mercúrio e ligeiramente menor que Ganimedes, possui extensa atmosfera, rica em metano e etano, e superfície com relevo acidentado e lagos de metano. Durante o inverno, o metano atmosférico é parcialmente congelado nas partes elevadas e os lagos se congelam. No verão, o metano congelado se liquefaz e escorre para as partes mais baixas na forma de riachos e rios que desembocam nos lagos, em um ciclo parecido com o da água na Terra. A atmosfera primitiva da Terra pode ter sido parecida com a de Titã.

Além de Titã, há quatro satélites de ultrapassam 1.000 km de diâmetro: Reia, Iapetus, Dione e Tétis. Os demais satélites são bem menores, alguns com apenas algumas dezenas de quilômetros.



16- Titânia é o maior satélite de Urano (Voyager 2 images taken Jan. 24, 1986 – NASA/JPL).



17- Tritão tem a superfície mais fria do Sistema Solar, $-235\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Voyager 2, 1989, NASA/JPL).

· Satélites de Urano

Urano tem apenas quatro satélites grandes: Titânia, Oberão, Umbriel e Ariel, em ordem decrescente de tamanho. Aparência, estrutura e história de Titânia e Oberão lembram as de Réia, satélite de Saturno. Umbriel é o corpo mais escuro do Sistema Solar, mas apresenta uma atípica região esbranquiçada na face mais voltada para o Sol. Ariel, que tem quase o mesmo tamanho, tem superfície bem mais clara, com sinais de atividade geológica antiga.

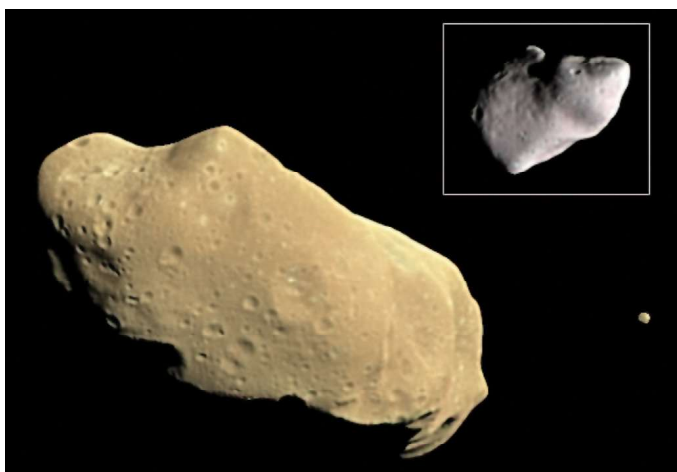
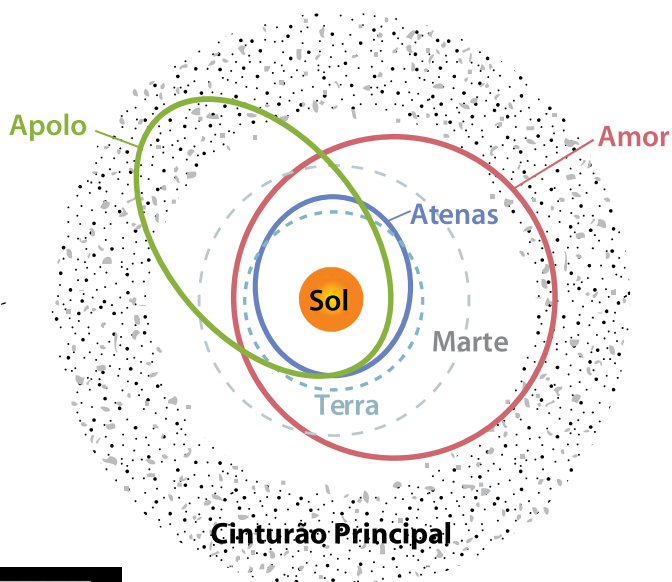
Os demais satélites são muito menores.

· Satélites de Netuno

O planeta mais distante tem apenas um satélite de grandes proporções: Tritão, pouco maior que Plutão. Os demais satélites netunianos são bem menores. Tritão tem variedade de terrenos, de penhascos profundos a planícies e lagos congelados, provavelmente de água. A temperatura em sua superfície é muito baixa, $-236\text{ }^{\circ}\text{C}$, e ele possui uma atmosfera muito tênue de nitrogênio. Nessa temperatura o gelo adquire resistência equivalente a de materiais metálicos. Na região polar sul há regiões cobertas por neve de nitrogênio. A sonda Voyager 2 mostrou jatos de nitrogênio líquido, semelhantes aos gêiseres terrestres. Provavelmente, eles sejam as fontes que mantêm a atmosfera de Tritão.

Com cerca de 470 km de diâmetro, o satélite Miranda tem, provavelmente, a superfície mais bizarra do Sistema Solar. Ela apresenta terrenos distintos, com ranhuras, fissuras, sulcos etc. que demonstram um passado violento, possivelmente de colisões com outros corpos.

18- O cinturão Principal de asteroides, entre Marte e Júpiter, e os grupos Atenas, Apolo e Amor.



19- O asteroide Ida ($56 \times 24 \times 21$ km) e seu satélite Dáctilo ($1,2 \times 1,4 \times 1,6$ km) pertencem ao Cinturão Principal (Sonda Galileu, 1993, NASA/JPL/USGS).

5.6 ASTEROIDES E FRAGMENTOS ROCHOSOS (METEOROIDES)

Asteroide é palavra de origem grega que significa "semelhante à estrela". Visto de longe, um asteroide se parece com um ponto luminoso. Qualquer objeto pequeno ou muito distante terá tal aparência. Neste livro, o termo asteroide será aplicado aos corpos menores de composição química rochosa (ver tabela 1).

Os asteroides são objetos rochosos, relativamente pequenos, com formas e tamanhos diversos. Os maiores são aproximadamente esféricos. A maior parte deles está concentrada entre Marte e Júpiter, no cinturão asteroidal, ou cinturão principal, orbitando o Sol em trajetórias quase circulares. Mas há asteroides com órbitas bem elípticas, alguns cruzando a órbita da Terra.

Os asteroides foram descobertos apenas no século 19. No primeiro dia do ano de 1801, o astrônomo italiano Giuseppe Piazzi descobriu um objeto novo que se movimentava com maior rapidez que os planetas. Ele foi batizado como Ceres, hoje classificado como planeta-anão. Sua órbita estava entre as órbitas de Marte e Júpiter. Nos anos seguintes, foram descobertos Pallas, Juno e Vesta, todos nessa região. Os asteroides maiores receberam nomes próprios, mas a grande maioria é identificada por sigla.

• Cinturão Principal de Asteroides

A tabela 7 apresenta algumas características físicas e orbitais dos principais asteroides do cinturão. A figura 18 ilustra a região principal dos asteroides, entre 2 e 4 UA.