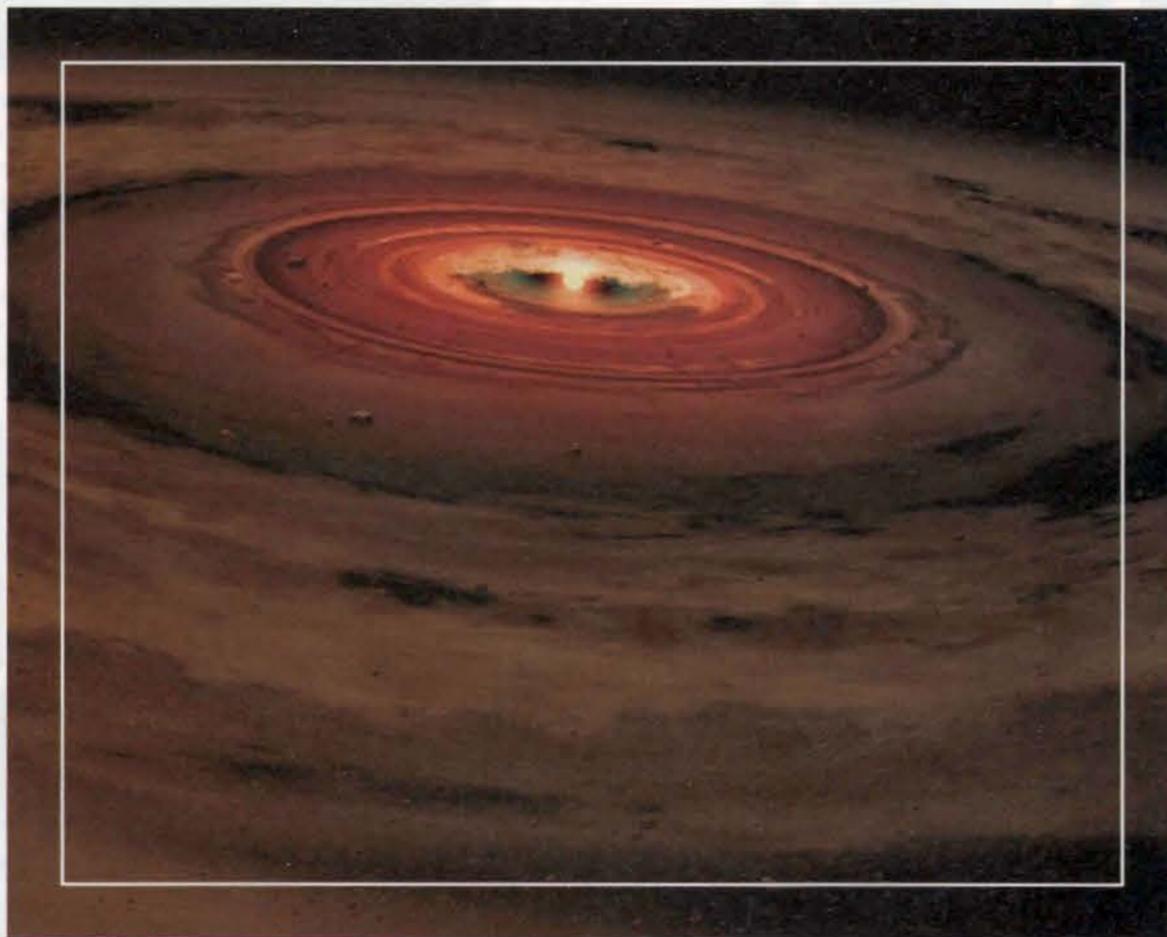


CAPÍTULO 5

Formação do Sistema Solar e Outros Sistemas Planetários



Estrelas e sistemas planetários se formam de nuvens de gás e poeira que se contraem e giram (NASA/JPL-Caltech)

R I V U X I G

O QUE VOCÊ ACHA?

- 1** O Sol e os planetas fazem parte da primeira geração de objetos criados no universo?
- 2** A Terra existe há quanto tempo, e como sabemos disso?
- 3** Qual(is) forma(s) típica(s) as luas possuem, e por quê?

- 4** Existe algum planeta como a Terra em órbita de estrelas parecidos com o Sol?

As respostas a essas questões aparecem no texto ao lado dos correspondentes números nas margens e no final do capítulo.



O Sol e todos os corpos que estão em órbita dele – planetas, luas e várias espécies de fragmentos (chamados asteroides, cometas e meteoroides) – constituem o sistema solar, cuja formação daria um filme bastante dramático. As coisas começam sossegadamente, com um grande número de encontros entre inúmeros pequenos atores (minúsculas moléculas de gás e partículas de poeira). A maioria deles rapidamente se precipita para o centro do teatro e juntos eles formam o Sol, a estrela do espetáculo. O enredo se desenvolve enquanto a matéria remanescente interage. As coisas começam a esquentar à medida que a matéria se aglutina por causa de colisões progressivamente mais violentas, com impactos ocorrendo a cada segundo. Partículas se aglomeram para formar pedrinhas, pedregulhos e rochas do tamanho de montanhas. Algumas vezes, grandes blocos de entulho se chocam uns com os outros e se fragmentam. Até que, os pesos-pesados (neste caso, corpos destinados a se tornarem planetas e grandes luas) entram em cena e ofuscam os atores menores. O drama também conduziu uma evolução até o surgimento da vida, um outro enredo protagonizado pela terceira rocha a partir do Sol.

Sim, *A Construção do Sistema Solar* seria um grande filme – mas em “câmera lenta”. Até a parte em que os planetas estão bem estabelecidos em seus papéis, você teria de assistir ao filme por aproximadamente uma centena de milhões de anos. Além disso, como os astrônomos e os geólogos estão continuamente fazendo novas descobertas sobre o sistema solar, o roteiro teria de ser continuamente revisado e as cenas, refilmadas. Na verdade, passados muitos anos, os astrônomos decidiram que alguns corpos que se pensava serem os atores principais representavam apenas papéis secundários. Talvez a maneira mais interessante de assistir a tal filme seria fazendo uma comparação com filmes que mostram a formação de sistemas planetários em torno de outras estrelas, uma área de intensa pesquisa atualmente.

Neste capítulo, você descobrirá:

- como o sistema solar se formou;
- por que o ambiente original do sistema solar era muito mais violento do que hoje;
- como os astrônomos definem os vários tipos de objetos do sistema solar;

- como os planetas são agrupados;
- como as luas se formaram por todo o sistema solar;
- de que é feito os detritos do sistema solar;
- que discos de gás e poeira, assim como os planetas, foram observados em torno de um número crescente de estrelas;
- que estrelas e sistemas planetários recém formados estão sendo observados.

O SISTEMA SOLAR CONTÉM ELEMENTOS PESADOS, FORMADOS PELAS ESTRELAS DE UMA GERAÇÃO ANTERIOR

Quando estudamos um campo novo de conhecimento, frequentemente é útil olhar a “grande pintura” antes de explorar os detalhes. Por essa razão, começaremos inspecionando os principais tipos de objetos do universo, junto com suas escalas de tamanho e as escalas de distância entre eles.

5-1 Estrelas transformam a matéria de elementos mais leves em elementos mais pesados

Nosso estudo da formação do sistema solar começa com uma inconsistência, isto é, a Terra, a Lua e muitos outros objetos que orbitam o Sol são compostos principalmente de elementos pesados, incluindo, entre outros, oxigênio, silício, alumínio, ferro, carbono e cálcio. Além disso, a maioria desses corpos contém muito pouco hidrogênio e hélio. Entretanto, observações do espectro do Sol, de outras estrelas e da matéria interestelar revelam que hidrogênio e hélio são, de longe, os elementos mais abundantes no universo. Esses dois elementos perfazem 99,9% de todos os átomos observados (ou, de uma maneira equivalente, 98% da massa observada). Todos os outros elementos combinados respondem por menos de 1% dos átomos observados (ou então, por 2% da massa observada do universo). Como é que a Terra, a Lua, Marte, Vênus, Mercúrio e muitos outros corpos menores do sistema solar podem conter menos do que 0,15% de hidrogênio e hélio? Por alguma razão, esses objetos familiares se formaram de matéria que tinha sido enriquecida com elementos mais pesados e exaurida de hidrogênio e hélio.

Existe uma boa razão para a abundância de hidrogênio e hélio no universo. Os astrônomos acreditam que o universo se formou entre 13,5 e 14 bilhões de anos atrás, com um violento evento chamado *A Grande Explosão* (*The Big Bang*). Apenas os elementos mais leves – hidrogênio,

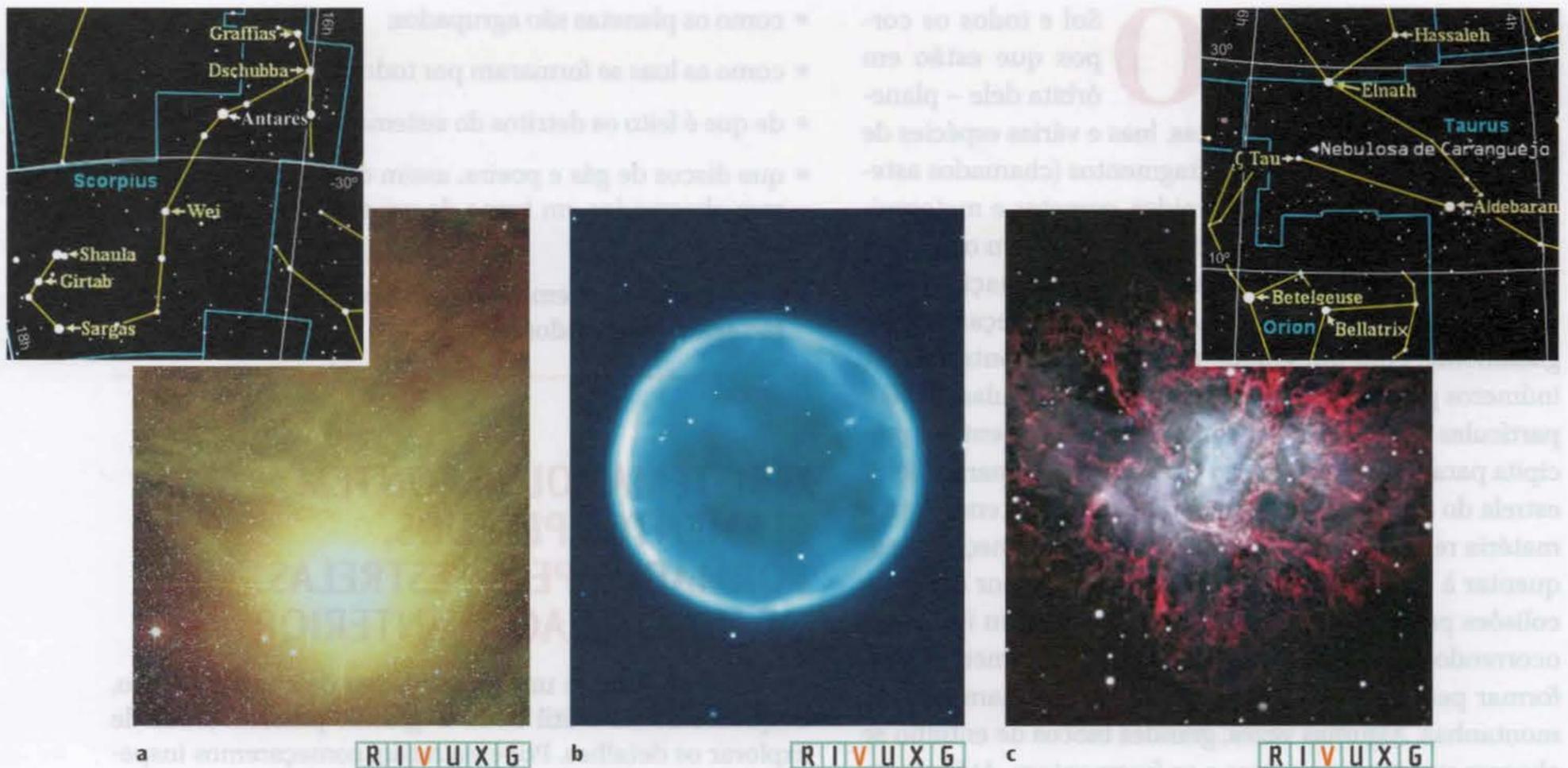


FIGURA 5-1 Como as estrelas perdem massa (a) A estrela mais brilhante em Scorpius (o Escorpião), Antares, está próxima do fim de sua existência. Fortes ventos provenientes de sua superfície estão expelindo grandes quantidades de gás e poeira, criando esta nebulosa que lembra uma pintura impressionista. O espalhamento da luz das estrelas por esse material faz com que ela seja especialmente brilhante, mesmo a uma distância de 604 anos-luz. (b) A nebulosa planetária Abell 39 se encontra a 7 mil anos-luz da Terra. Em sua relativamente suave emissão de matéria,

a estrela central projeta suas camadas externas de gás e poeira em uma casca esférica que se expande atualmente com 6 anos-luz de extensão. (c) Uma supernova é um dos mais poderosos mecanismos conhecido de perda de massa por uma estrela. A estrela que gerou a Nebulosa do Caranguejo, mesmo estando a 6 mil anos-luz da Terra, ficou visível durante o dia por três semanas no ano de 1054. (a: David Malin/Anglo-Australian Observatory; b: George Jacoby [WIYN Obs.] et. al., WIYN, AURA, NOAO, NSF; c: Malin/Pasachoff/Caltech)

hélio e uma ínfima quantidade de lítio – foram criados nesse processo. As primeiras estrelas, compostas apenas desses três elementos, condensaram-se desta matéria primitiva, provavelmente em algumas centenas de milhões de anos depois da Grande Explosão.

I A diferença na composição química entre o universo primitivo e o sistema solar mostra que o sistema solar não se formou como um resultado *direto* da Grande Explosão. Vamos explorar esta transformação química brevemente, que começou no interior profundo das primeiras estrelas. Uma vez formadas, as estrelas comprimem a matéria em seus núcleos centrais com tal intensidade que o hidrogênio é transformado em hélio, em um processo chamado *fusão*. A fusão do hidrogênio tem uma interessante propriedade: parte da massa do hidrogênio é convertida em energia eletromagnética (fótons), e uma porção dessa energia escapa pela superfície da estrela, permitindo que ela brilhe. Em seguida, o hélio do núcleo se funde para criar carbono, convertendo também parte de sua massa em energia. Se a estrela tiver bastante pressão em seu núcleo, o carbono transforma-se em elementos ainda mais pesados, como nitrogênio, oxigênio, néon, silício e ferro. Vamos explorar os detalhes da criação da matéria mais pesada nos Capítulos 12 e 13.

As estrelas também espalham matéria no espaço (Figura 5-1). Parte dos elementos pesados formados dentro

delas são ejetados, junto com a maioria do hidrogênio e do hélio restantes em suas camadas externas. As camadas externas das estrelas são expelidas em diferentes taxas, variando de um fluxo contínuo chamado *vento estelar* (Figura 5-1a), passando por explosões mais energéticas conhecidas como *nebulosas planetárias* [assim chamadas não por terem alguma conexão com planetas reais, mas porque se pareciam com planetas quando vistas com os primeiros telescópios de baixa resolução (Figura 5-1b)], até detonações espetaculares chamadas *supernovas* (Figura 5-1c). As supernovas são eventos tão poderosos que ocorre fusão durante a explosão, criando elementos ainda mais densos que são expelidos da estrela. As nebulosas planetárias e as supernovas deixam apenas diminutos núcleos estelares, remanescentes de estrelas outrora brilhantes e quentes.

Da matéria ejetada pelas estrelas, parte se torna pequenas partículas de poeira, como a fuligem formada em um escapamento de motor a diesel ou na chaminé de uma lareira. Com o passar do tempo, bastante gás e poeira foram emitidos por muitas estrelas para formar nuvens interestelares ricas em hidrogênio e hélio, mas contendo também metais. (Em um uso alternativo curioso de uma palavra comum, os astrônomos definem **metais** como qualquer elemento do universo que não seja hidrogênio e hélio.) É para essas nuvens que voltaremos nossa atenção



FIGURA 5-2 **Regiões de formação estelar cheias de poeira** (a) Estas três brilhantes estrelas jovens na constelação de Monoceros (o Unicórnio) estão ainda circundadas por grande parte do gás e da poeira que as formaram. Isto é uma minúscula parte de uma nuvem muito maior, conhecida como *Nebulosa do Cone*. Os astrônomos supõem que o sistema solar se formou de um fragmento de uma nuvem de gás e poeira seme-

para entender a formação do sistema solar e de planetas densos como a Terra.

5-2 Gravidade, rotação e calor modelaram o jovem sistema solar

O sistema solar se formou de um fragmento de uma enorme nuvem de gás e poeira interestelar. A região da nuvem onde o sistema solar se desenvolveu é chamada **nebulosa solar**. Ela tem um diâmetro de pelo menos 100 UA e uma massa total de 2 a 3 vezes a massa do Sol. A matéria entra em colapso para formar um sistema estelar, tal como nosso Sol, pelo menos por quatro razões. Primeira, ventos de algumas estrelas próximas comprimem o gás e a poeira. Segunda, a força explosiva de uma supernova comprime regiões de nuvens interestelares preexistentes. Terceira, pares de nuvens algumas vezes colidem e uma comprime a outra. Quarta, regiões do gás e da poeira irradiam bastante calor para longe o suficiente para esfriar e condensar sem ajuda externa. Em todas essas situações, quando um fragmento de nuvem torna-se suficientemente denso, a atração gravitacional mútua entre as partículas de gás e poeira obriga a nuvem a se colapsar, criando assim novas estrelas e sistemas planetários (Figura 5-2).

Evolução estelar e formação de estrelas são processos contínuos. Podemos ver atualmente, a olho nu, uma nuvem no processo de formação de estrelas, a saber, a “estrela” do meio da espada de Orion (Figuras 1-4 e 3-29), que se parece com um chumaço de algodão no céu noturno. Chamada de Nebulosa de Orion ou Grande Nebulosa de Orion, ela é parte de uma região com uma nuvem interestelar gigantesca na qual novas estrelas e planetas estão sendo criados. Relembrando o Capítulo 3, quando vimos a limitada informação que a luz visível pode fornecer,

lhante a este. (b) Estrelas recém formadas na Nebulosa de Orion. Embora a luz visível de muitas delas esteja bloqueada pela nebulosa, sua emissão infravermelha passa através do gás e da poeira até nós. (a: ACS Science & Engineering Team, NASA; b: NASA; K. L. Luhman/Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics and G. Schneider, E. Young, G. Rieke, A. Coiera, H. Chen, M. Rieke, R. Thomson/Steward Observatory, University of Arizona, Tucson, AZ)

você pode também ver nas Figuras 3-30 e 5-2b que as imagens ultravioleta e infravermelha revelam algo mais dessa região.

Inicialmente, a nebulosa solar era um ajuntamento muito frio de gás e poeira – bem abaixo do ponto de congelamento da água. Embora a maior parte dela fosse de hidrogênio e hélio, havia gelo e grãos de poeira de elementos pesados cobertos de gelo que estavam dispersos abundantemente por todo este vasto volume. Profundamente dentro da nebulosa, a atração gravitacional provocou a queda rápida em direção ao centro do gás e da poeira. (Em termos da física apresentada no Capítulo 2, a energia potencial da nuvem foi se convertendo em energia cinética – energia de movimento). Consequentemente, a densidade, a pressão e a temperatura no centro da nebulosa começaram a crescer, produzindo uma concentração de matéria chamada **protossol**.

Enquanto a massa do protossol continuava a aumentar e a contrair, átomos dentro dele colidiam uns com os outros com velocidade e frequência cada vez maiores. Tais colisões geravam calor, causando a elevação da temperatura do protossol. Assim, a primeira luz e calor emitidos pelo nosso Sol vieram de gás em colisão e não da fusão nuclear, como é atualmente.

A rotação representou um papel-chave na evolução do sistema solar. Quando ele se formou, a nebulosa solar era um conjunto de partículas que girava muito lentamente. Esta rotação ocorreu porque a formação das nuvens interestelares é turbulenta, o que significa que elas são criadas com muitas das suas partes girando devagar como redemoinhos, muito semelhantes à fumaça que se eleva de uma chama. Como consequência dessa rotação, a nebulosa pas-

Quais elementos da Terra podem ter ficado imutáveis desde que o universo começou?

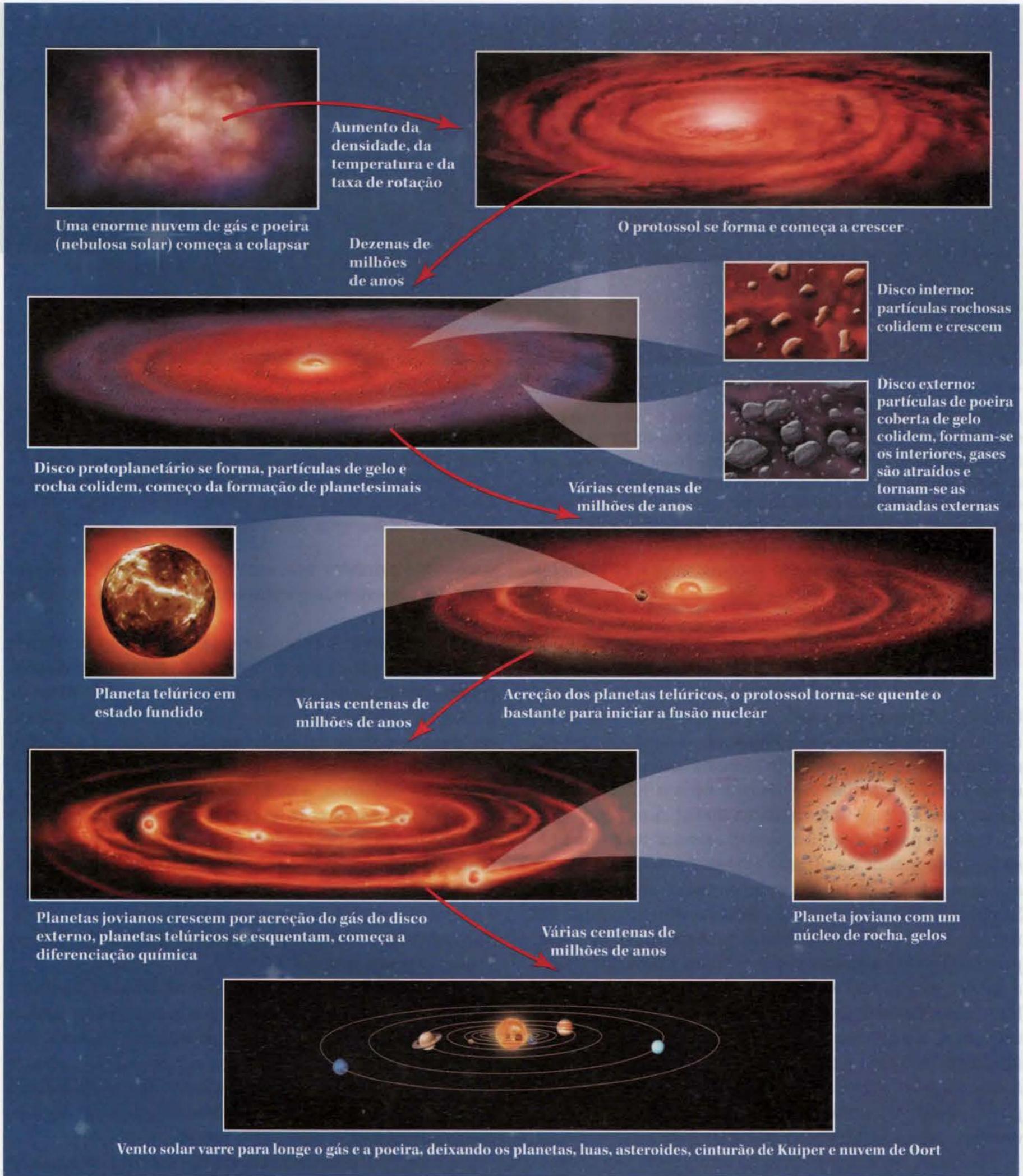


FIGURA 5-3 A formação do sistema solar Esta seqüência de desenhos mostra os estágios da formação do sistema solar.

...os continentes. ...no processo de formação de ...do tipo de ...se parece com um ...Chamada de ...Oort, ela é ...talvez ...também ...a limitada ...

sa a ter um momento angular (veja *Caixa de Ferramentas do Astrônomo 2-2*), que impede o colapso de suas regiões externas no protossol. Um colapso sem rotação teria criado uma estrela sem qualquer planeta ou outra matéria em órbita. A conservação do momento angular (veja Seção 2-7) nos diz que a matéria em rotação caindo para o interior da nebulosa solar gira cada vez mais rápido, como a patinadora da Figura 2-12 quando encolhe os braços. Mesmo os detritos que formaram o protossol estavam orbitando quando caíram em direção ao centro, da mesma maneira que a água girando ao descer pelo ralo. Então, o protossol estava girando e o Sol que se formou dele estaria também girando. E é assim, como veremos no Capítulo 10.

As partes externas da nebulosa solar colapsaram na direção do centro mais lentamente do que a matéria central que formou o protossol. Esta região mais externa era provavelmente muito irregular, mas estudos matemáticos mostram que os efeitos combinados da gravidade, colisões e rotação transformam um fragmento de nuvem completamente irregular em um disco que gira com um centro quente e extremidades frias (Figura 5-3a, b). Podemos ver um efeito de rotação análogo na maneira como a saia de uma patinadora no gelo é forçada para um plano horizontal à medida que ela gira. Apesar de não podermos ver como era o nosso sistema solar antes da formação dos planetas, os astrônomos supõem que ele era semelhante aos discos de gás e poeira que rodeiam outras estrelas jovens, incluindo aquelas mostradas na Figura 5-4. Chamados **discos protoplanetários** ou *proplyds* (abreviatura de *protoplanetary disks*), esses sistemas estão passando pelo mesmo estágio inicial de evolução como aquele aqui descrito para o nosso sistema solar.

A temperatura do protossol aumentou à medida que ele se tornou mais denso e a taxa de colisões de um número cada vez maior de átomos dentro dele se elevou. Irradiando cada vez mais calor, a temperatura ao seu redor começou a aumentar. A temperatura cada vez maior vaporizou todas as substâncias comuns congeladas na região interna da nebulosa solar e empurrou os gases leves, tais como hidrogênio e hélio, para a região externa. Na região interna, onde a Terra se encontra em órbita atualmente, a maioria dos elementos mais pesados permaneceu. Esses elementos mais pesados acabaram se juntando e formaram os quatro planetas internos: Mercúrio, Vênus, Terra e Marte. A remoção dos elementos mais leves pelo protossol de sua vizinhança imediata explica por que os planetas internos são compostos principalmente de elementos pesados. *Em outras palavras, somos literalmente feitos de poeira estelar!*

5-3 Colisões no sistema solar primitivo provocaram a formação dos planetas

Embora tenhamos usado a palavra *planeta* em seu uso cotidiano ao longo deste livro, é agora apropriado introduzir uma definição formal. Um **planeta** é um objeto que orbita diretamente uma estrela (em vez de orbitar outro

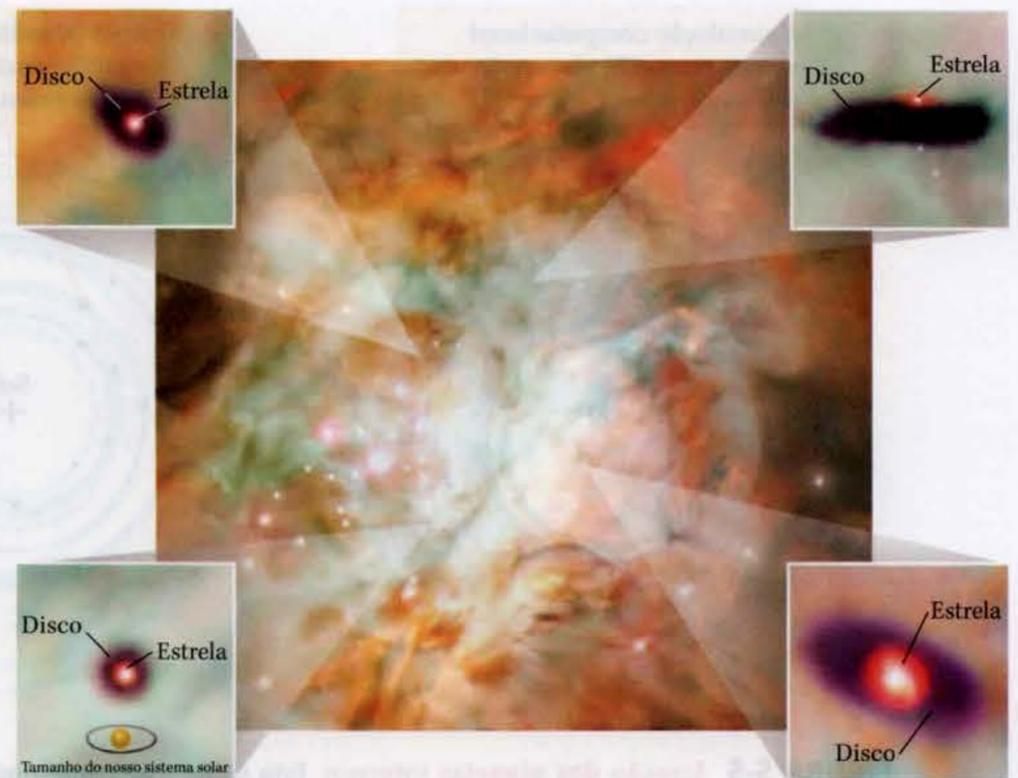


FIGURA 5-4 Disco jovem de matéria circum-estelar Coração da Nebulosa de Orion quando visto pelo Telescópio Espacial Hubble. As quatro figuras suplementares são imagens em falsa cor de discos protoplanetários dentro da nebulosa. Uma estrela formada recentemente se encontra no centro de cada disco. O disco no lado direito superior é visto quase de perfil. Nosso sistema solar é desenhado em escala no lado esquerdo inferior da imagem. (C. R. O'Dell e S. K. Wong, Rice University; NASA)

corpo, tal como a Lua orbita a Terra). Um planeta também deve ter bastante massa para se condensar em uma forma essencialmente esférica e bastante força gravitacional de maneira a conseguir limpar sua vizinhança orbital da maioria dos fragmentos menores. Se o planeta está rodando, sua forma esférica será modificada de tal modo que ele fica mais largo no equador do que nos polos. Corpos que orbitam objetos grandes, que por sua vez orbitam estrelas, são chamados **luas** ou **satélites naturais**.

A formação dos planetas internos foi o resultado de incontáveis impactos de pequenas partículas rochosas do disco protoplanetário do sistema solar. Inicialmente, grãos de poeira próximos e pedras um pouco maiores da nebulosa solar colidiram e se aglutinaram. Então, em um período de alguns milhões de anos, esta acumulação de poeira e pedras coalesceu em grandes objetos, chamados **planetesimais**, com diâmetros de alguns quilômetros (Figura 5-3).

Os planetesimais colidem com qualquer coisa em seu caminho. Muitos estavam pulverizados, outros caíam em direção ao Sol, mas suas atrações gravitacionais mútuas acabaram levando alguns deles a se juntarem para formar objetos maiores, chamados **protoplanetas**. Simulações do sistema solar interno feitas por computadores, baseadas nas leis de Newton (veja Seção 2-7), sugerem que a **acrecção** – a aglutinação de pequenos pedaços de matéria para formar pedaços maiores – continuou por mais de 100 milhões de anos e levaria à formação de menos do que uma dúzia de planetas

Uma vez que o colapso da nebulosa solar tenha começado, qual é a força que assegura a continuação do processo?

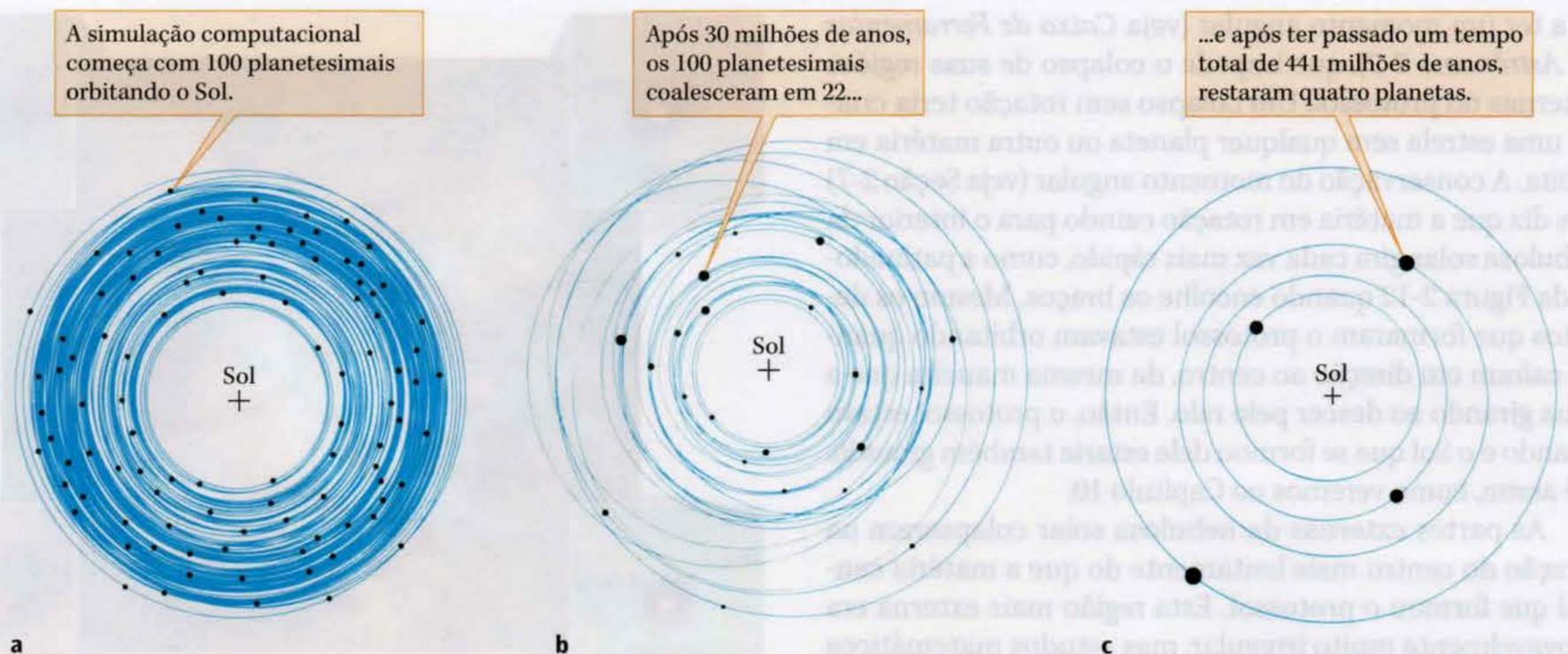


FIGURA 5-5 Acreção dos planetas internos Esta simulação computacional mostra a formação de planetas internos ao longo do tempo.

rochosos (Figura 5-5). A concordância entre as previsões da quantidade de planetas e seu real número em nosso sistema solar (quatro) é encorajadora. Observações feitas em 2004 de sistemas estelares que passaram por todos os estágios da formação de planetas indicam que este processo completo, frequentemente atrasado por causa de colisões entre grandes protoplanetas, leva várias centenas de milhões de anos para se completar.

PERCEPÇÃO CIENTÍFICA

Análise apoiada por computadores Muitas equações são tão complexas que requerem análise computacional para nos permitir o entendimento de suas implicações. Um exemplo é a física da formação de planetas e do Sol. Por isso, as observações comandam o refinamento dos modelos computacionais.

A tradicional teoria da formação de planetas gigantes, chamada **modelo de acreção com núcleo**, pressupõe que enquanto as regiões internas do sistema solar estavam esquentando, as temperaturas nas regiões externas da nebulosa solar permaneceram bastante baixas. Gelo e poeira coberta de gelo, junto com os gases hidrogênio e hélio, foram capazes de subsistir nessas regiões mais frias. Os planetas externos – Júpiter, Saturno, Urano e Netuno – começaram a se formar através da acreção de planetesimais. Para cada um, um núcleo rochoso, até mesmo maior do que a Terra, aparentemente serviu como uma “semente”, e em cerca de um milhão de anos o núcleo tornou-se coberto com rocha adicional, gás e gelo. Quando o envelope rico em gás tornou-se tão massivo quanto o núcleo rochoso, o gás e o gelo começaram a se acumular em um ritmo descontrolado à medida que o crescimento da atração gravitacional do planeta puxava mais material para a sua superfície. A partir daí, o envelope arrasta a maior parte do gás e

do gelo da vizinhança, criando uma casca de água cercada por um imenso volume de hidrogênio e hélio.

Os planetas externos contêm diferentes quantidades de hidrogênio, hélio, metano, amônia e água. Muitas de suas luas são também parcialmente compostas de substâncias de baixas densidades. Descoberto em 1930 pelo astrônomo americano Clyde Tombaugh, Plutão foi originalmente relacionado como um planeta, título que perdeu em 2006. Ele agora é chamado de *planeta anão*. A diferença entre planetas anões e planetas é que planetas anões não têm força gravitacional (isto é, massa) suficiente para limpar sua vizinhança de outros fragmentos em órbita. Veja *Apêndice I: Mudando o Status de Plutão como Planeta* para detalhes da mudança da classificação de Plutão.

Desde a década de 1980, uma segunda teoria, chamada **modelo da instabilidade gravitacional**, baseada em complexas simulações computacionais, tem apresentado uma visão diferente da formação dos planetas gigantes. Essas simulações indicam que os planetas gigantes se condensaram para começar a existir em uma centena de milhares de anos sem núcleos telúricos (tipo Terra) massivos atuando como sementes de sua formação.

Em sistemas como o nosso próprio sistema solar, é provável que o modelo de acreção do núcleo esteja mais próximo de ser correto, mas, como veremos, muitas estrelas têm planetas gigantes bem mais próximos do que Mercúrio está do Sol. Para esses sistemas, o modelo de acreção do núcleo funciona muito lentamente, enquanto a instabilidade gravitacional pode permitir a formação de tais planetas antes que o gás próximo da estrela tenha evaporado.

Durante os milhões de anos em que os planetas estavam se formando, o Sol também estava evoluindo. Durante esse tempo, a temperatura e a pressão no centro do protossol em contração continuou a aumentar. Até que seu núcleo atingiu cerca de 10^7 K, que é bastante quente para permitir a ignição da fusão do hidrogênio. Este processo

parou o colapso do protossol, e o Sol nasceu. A fusão continua até hoje e fornece a energia necessária para a Terra sustentar a vida.

Estrelas como o Sol levam 100 milhões de anos para se formar a partir da nebulosa e se estabelecer, o que significa que o Sol provavelmente tornou-se uma estrela madura antes de a acreção dos planetas internos estar completa. A radiação do Sol esquentou e dispersou os gases restantes do sistema solar, limitando assim os tamanhos dos planetas e impedindo uma nova formação de planetesimais.

Como os planetas se formam em um disco, todos orbitariam mais ou menos no mesmo plano que a Terra (isto é, aproximadamente no plano da eclíptica). Observações sustentam esta conclusão. Os ângulos dos planos orbitais dos outros planetas em relação à eclíptica são chamados **inclinações orbitais**, todos com 7° ou menos (Figura 5-6). Além disso, de acordo com este modelo, todos os planetas orbitariam o Sol no mesmo “sentido” que a Terra. Subindo acima do Polo Norte da Terra e olhando para baixo para ver a órbita desta, veremos que o nosso planeta se movimenta em torno do Sol no sentido anti-horário. Todos os outros planetas também orbitam o Sol no sentido anti-horário quando observados do mesmo ponto estratégico.

2

Para saber mais sobre as origens do sistema solar, os astrônomos estudam o resto dos detritos interplanetários: asteroides, meteoroides e cometas. Acredita-se que muitos desses corpos são remanescentes quase imutáveis da formação do sistema solar. De acordo com a datação radioativa dos mais antigos fragmentos espaciais (veja *Caixa de Ferramentas do Astrônomo* 4-2), o sistema solar estava mais ou menos na forma que conhecemos hoje há 4,6 bilhões de anos.

A maioria das luas do sistema solar são planetesimais capturados por atração gravitacional dos planetas. As maiores que orbitam Júpiter e Saturno provavelmente se formaram de discos de gás e poeira que orbitavam esses mundos de uma maneira análoga ao disco que orbitava o Sol no qual os planetas coalesceram. Uma lua, a nossa, foi criada como resultado de uma colisão da Terra com um corpo do tamanho de Marte em uma órbita altamente elíptica (veja Capítulo 6). Os impactos dominaram o desenvolvimento inicial da superfície dos planetas e das luas durante centenas de milhões de anos. A jovem Terra, junto com todos os outros corpos que orbitavam o Sol, foi atingida por incontáveis impactos, criando escoriações chamadas **crateras**. Embora a maioria das crateras na superfície

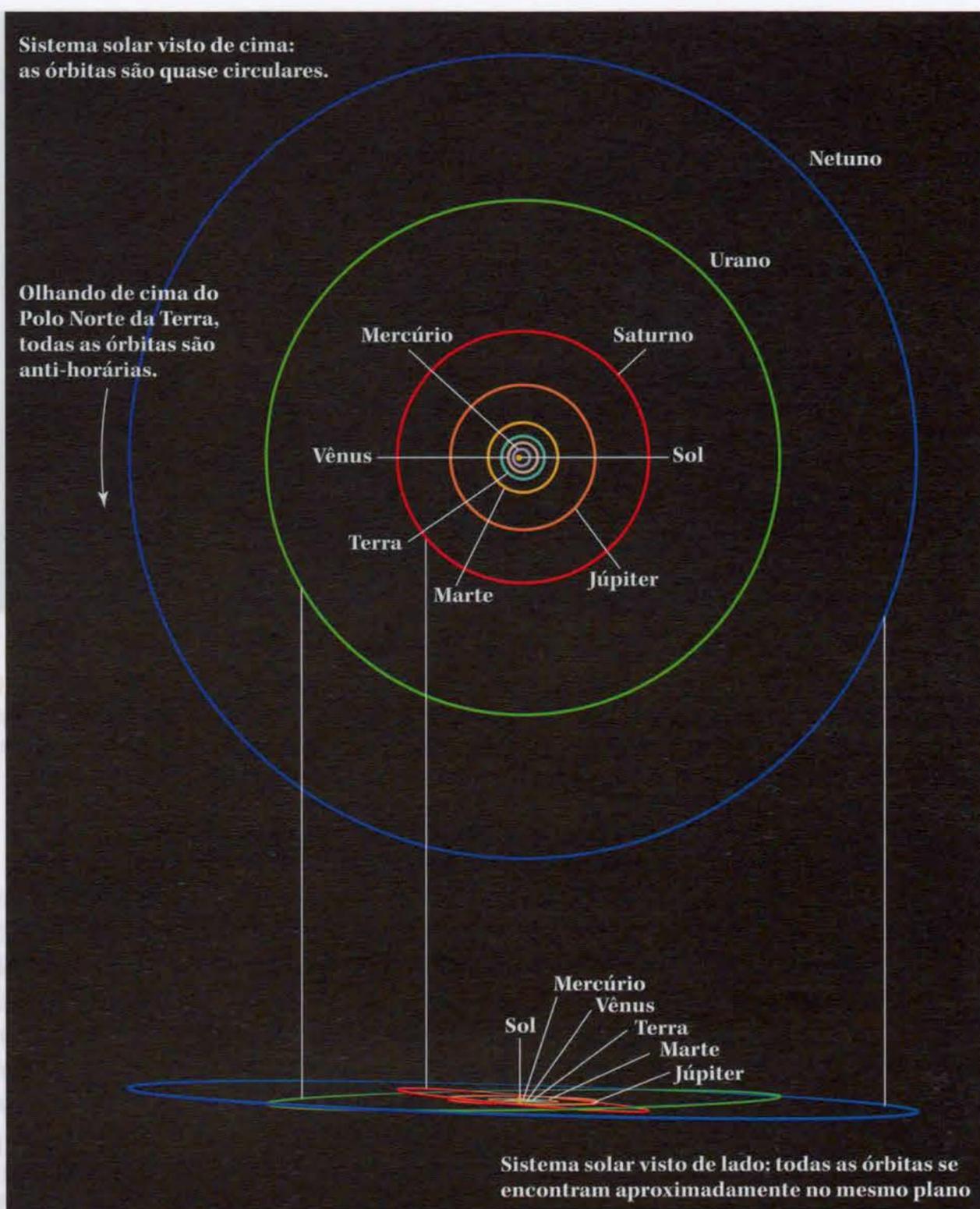


FIGURA 5-6 O sistema solar Este desenho em escala mostra a distribuição das órbitas em torno do Sol. Todas as órbitas são anti-horárias quando vistas acima do Polo Norte da Terra. Os quatro planetas telúricos estão localizados próximos ao Sol; os quatro planetas gigantes orbitam o Sol em distâncias muito maiores. Olhando de uma posição acima do disco do sistema solar, a maioria das órbitas parece quase circular. Mercúrio tem a órbita mais elíptica de todos os planetas.

do nosso planeta tenha sido apagada, como estudaremos no próximo capítulo, podemos ainda vê-las na Lua (Figura 5-7). Com efeito, o ambiente quase sem ar da Lua preservou importantes informações sobre a história passada do sistema solar. (Note que, quando nos referimos à Lua da Terra, usamos a inicial maiúscula.)

A datação radioativa das rochas da Lua trazidas pelos astronautas da *Apolo* indica que a taxa de impactos diminuiu drasticamente por volta de 3,8 bilhões de anos atrás. Após este tempo, os impactos capazes de produzir crateras passaram a acontecer em um nível muito baixo. Assim, a maioria das crateras da Lua e dos planetas foi formada durante os primeiros 800 milhões de anos da histó-



R I V U X G

FIGURA 5-7 Nossa Lua Esta fotografia, tirada por astronautas em 1972, mostra milhares de crateras produzidas por impactos de fragmentos rochosos que sobraram da formação do sistema solar. A determinação da idade das rochas lunares trazidas por astronautas indica que a Lua tem aproximadamente de 4,5 bilhões de anos. A maioria das crateras lunares foi formada durante os primeiros 700 milhões de anos de sua existência, quando a taxa de bombardeio era muito maior do que agora. (NASA)

ria do sistema solar, quando os jovens planetas atraíam os fragmentos de rochas que sobraram da nebulosa solar nos anos de sua formação.

Certas condições se desenvolveram na jovem Terra, especialmente a presença de água líquida, o que permitiu que a evolução biológica pudesse ocorrer. Forte evidência indica que existia água líquida em Marte e que pode ainda existir no seu interior e no interior das luas de Júpiter, Europa e

Ganímedes, aumentando o debate caloroso sobre a questão da evolução de vida simples também em outros mundos.

A camada externa de Saturno é constituída principalmente de quais dois elementos?

5-4 Detritos menores da formação do sistema solar ainda existem

Além dos oito planetas e suas luas, muitos outros objetos que ainda orbitam o Sol foram criados quando o sistema solar se formou. Entre as órbitas de Marte e Júpiter existem milhões de asteróides, corpos compostos, na maior parte deles, de rochas e metais e que têm tipicamente extensões menores que um quilômetro. Esta região é chamada de **cinturão de asteróides**. O maior asteroide, Ceres, tem um diâmetro de aproximadamente 900 km. Em seguida temos Palas e Vesta, cada um com aproximadamente 500 km de diâmetro. Asteróides menores são incrivelmente numerosos. Mais de cem mil asteróides de dimensões da ordem de quilômetro foram observados. Uma fotografia em *close-up* do asteroide Gaspra é mostrada na Figura 5-8.



R I V U X G

FIGURA 5-8 Um asteroide Esta fotografia do asteroide Gaspra foi tirada em 1991 pela espaçonave *Galileo* em seu caminho para Júpiter. O asteroide mede $12 \times 20 \times 11$ km. Milhões de enormes pedaços de rocha semelhantes a este orbitam o Sol entre as órbitas de Marte e Júpiter. (NASA)

Outros asteroides têm órbitas altamente elípticas que os fazem cruzar os caminhos de alguns planetas. Alguns asteroides têm suas próprias luas, como o asteroide Ida, que é orbitado por Dactil, um corpo cheio de crateras.

Fragmentos metálicos e rochosos ainda menores que os asteroides são chamados **meteoroides**. Os meteoroides costumam ser do tamanho de *boulders* (rochas que são roladas pelas geleiras, tomando a aparência de enormes seixos) ou ainda menores e aparentemente existem ao longo de todo o disco do sistema solar, embora a maioria se encontre no cinturão de asteroides. Estudos químicos mostram que muitos meteoroides são pequenos fragmentos de asteroides que se quebraram ao se chocarem uns com os outros.

Além da órbita de Netuno se encontram centenas de bilhões de enormes fragmentos de rocha e gelo, chamados **cometas**, ou, mais precisamente, *núcleos cometários*. Alguns desses núcleos cometários orbitam o Sol em uma região que tem a forma de uma rosquinha e se encontra além da órbita de Netuno, chamada *cinturão de Kuiper*, que está centrado na eclíptica. Eles são chamados de *Objetos do Cinturão de Kuiper* ou *KBOs* (do inglês *Kuiper Belt Objects*). Acredita-se que outros núcleos cometários estejam localizados ainda mais longe do Sol em uma distribuição esférica, chamada *nuvem cometária de Oort*. Muitos núcleos cometários têm órbitas bastante alongadas que ocasionalmente os trazem para perto do Sol. Quando isso acontece, a radiação do Sol vaporiza parte de seu gelo, produzindo a longa cauda que associamos aos cometas (Figura 5-9).

Como você provavelmente ouviu pela imprensa, objetos semelhantes a Plutão foram descobertos no cinturão



R I V U X G

FIGURA 5-9 Um cometa O núcleo cometário, a parte sólida de um cometa, é uma grande pedra de gelo e fragmentos rochosos geralmente com 10 km de diâmetro. Quando um cometa passa próximo ao Sol, a radiação solar vaporiza parte do gelo que ele carrega, e os gases e a poeira resultantes formam uma ou duas caudas de milhões de quilômetros de extensão. (Dennis diCicco/CORBIS)

de Kuiper. Como Plutão, eles têm órbitas mais elípticas do que os planetas. É provável que os KBOs sejam compostos de rocha e gelo. Colisões provavelmente quebraram muitos objetos do cinturão de Kuiper e da nuvem de Oort, criando assim os núcleos cometários e enviando alguns deles para o sistema solar interno para se tornarem cometas. Exemplos de KBOs especialmente extensos que foram observados são Plutão, Eris, Quaoar e Sedna.

PLANETOLOGIA COMPARATIVA

Existem duas maneiras de estudar objetos do sistema solar. Uma delas é comparar e analisar os contrastes das estruturas de todos os objetos semelhantes, tais como as atmosferas ou as superfícies de todos os planetas, e então ir para uma próxima estrutura. Isso tem a vantagem de mostrar “o grande quadro” para cada estrutura à medida que ela surge. A outra abordagem é escolher um objeto e explorar todas as suas propriedades antes de ir para o próximo. Isso tem a vantagem de conectar todas as propriedades de cada objeto diretamente com outro, para que você não relacione, digamos, a atmosfera de Vênus com a superfície de Mercúrio. Como as duas abordagens são valiosas, faremos ambas.

5-5 Comparações entre os oito planetas mostram semelhanças nítidas e diferenças significativas

Os planetas que surgiram da acreção dos planetesimais no jovem sistema solar foram Mercúrio, Vênus, Terra, Marte,

Júpiter, Saturno, Urano e Netuno. Antes de explorar as propriedades dos planetas individuais nos próximos capítulos, é instrutivo comparar a variedade de suas propriedades orbitais e físicas.

Órbitas A Tabela 5-1 lista algumas características orbitais dos oito planetas. Como mostrado na Figura 5-6, os quatro planetas internos – Mercúrio, Vênus, Terra e Marte – estão compactados próximos ao Sol. Em contraste, as órbitas dos quatro grandes planetas mais externos – Júpiter, Saturno, Urano e Netuno – estão largamente espaçadas em distâncias do Sol bem maiores. As leis de Kepler (veja Capítulo 2) nos mostraram que todos os planetas têm órbitas elípticas. Mesmo assim, a maioria de suas órbitas é quase circular. A exceção é Mercúrio, cuja órbita é notavelmente oval.

Como os asteroides estão relacionados a muitos dos meteoroides do sistema solar?

Tamanhos Os planetas caem em três grupos de tamanho (Figura 5-10). Os quatro planetas internos formam um grupo, Júpiter e Saturno formam o segundo grupo, e Urano e Netuno formam o terceiro, um grupo de tamanho intermediário. Júpiter é o maior planeta, com diâmetro 11 vezes maior do que o da Terra, enquanto Mercúrio, com aproximadamente um terço do diâmetro da Terra, é o menor planeta. Com efeito, duas luas, Ganimedes e Titã, são maiores do que Mercúrio. Netuno e Urano são ambos 4 vezes maiores do que a Terra em diâmetro, o maior dos quatro planetas internos. Os diâmetros dos planetas são dados na Tabela 5-2.

Massa A massa, uma medida da quantidade total de matéria que um corpo contém, é outra característica que distingue os planetas internos dos planetas externos. Os quatro planetas internos têm pequenas massas quando comparados com os gigantes externos. Novamente, o primeiro lugar vai para Júpiter, cuja massa é 318 vezes maior do que a da Terra (veja Tabela 5-2).

Massa específica ou densidade Tamanho e massa podem ser combinados em uma maneira útil para fornecer informação sobre a composição química de um planeta (ou qualquer outro objeto). A matéria composta de ele-

TABELA 5-1 Características orbitais dos planetas

	Distância média do Sol		Período orbital
	(UA)	(10 ⁶ km)	(anos)
Mercúrio	0,39	58	0,24
Vênus	0,72	108	0,62
Terra	1,00	150	1,00
Marte	1,52	228	1,88
Júpiter	5,20	778	11,86
Saturno	9,54	1.427	29,46
Urano	19,19	2.871	84,01
Netuno	30,06	4.497	164,79



Os quatro planetas internos são pequenos, têm altas densidades e são feitos de materiais rochosos.

Os quatro planetas externos são grandes, têm baixas densidades e são feitos principalmente de elementos leves.

RIVUXIG



FIGURA 5-10 O Sol e os planetas Esta figura mostra os oito planetas desenhados com os tamanhos em escala na ordem de suas distâncias ao Sol (as distâncias não estão em escala). Os quatro planetas que orbitam mais próximos do Sol (Mercúrio, Vênus, Terra e Marte) são pequenos e feitos de

mentos pesados, como ferro ou chumbo, tem mais átomos empacotados no mesmo volume do que a matéria composta de elementos leves, como hidrogênio, hélio e carbono. Então, os objetos feitos principalmente de elementos mais pesados têm uma massa específica ou densidade média maior do que os objetos compostos principalmente de elementos mais leves, nos quais a densidade média é dada pela equação

$$\text{Densidade média} = \frac{\text{Massa total}}{\text{Volume total}}$$

A composição química (tipos de elementos químicos) de qualquer objeto determina a sua **massa específica** ou **densidade média** – a quantidade de massa de um objeto em um volume unitário. Por exemplo, um quilograma de cobre ocupa menos espaço (é mais denso) do que um quilograma de água, mesmo que ambos tenham a mesma massa (Figura 5-11). A densidade média é expressa em quilogramas por metros cúbicos. Para nos ajudar a assimilar este conceito, frequentemente comparamos a densidade média dos planetas com a densidade média de algo que nos seja familiar, como a água líquida, que tem a densidade de 1.000 kg/m³.

rocha e metal. Os dois planetas seguintes (Júpiter e Saturno) são grandes e compostos principalmente de hidrogênio e hélio. Urano e Netuno, também constituídos principalmente de hidrogênio e hélio, são intermediários em tamanho e contêm muito mais água. (Calvin J. Hamilton e NASA/JPL)

Os quatro planetas internos têm densidades altas quando comparados com a água (veja Tabela 5-2). Em particular, a densidade média da Terra é de 5.520 kg/m³. Como a densidade de uma superfície rochosa é de aproximadamente 3.000 kg/m³, sua alta densidade implica que a Terra contém uma grande quantidade de material em seu interior (a saber, ferro e níquel) que é muito mais denso do que as rochas da superfície. O fato de que os quatro planetas internos têm densidades semelhantes à da Terra significa que eles são compostos de elementos químicos semelhantes. Consequentemente, são chamados de **planetas telúricos** ou **terrestres**. Vamos explorá-los nos Capítulos 6 e 7.

Em um claro contraste, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno têm densidades médias relativamente baixas (veja Tabela 5-2). De fato, a densidade média de Saturno é menor do que a da água. As baixas densidades dos planetas gigantes externos sustentam a opinião de que eles contêm quantidades significativas de elementos mais leves, hidrogênio e hélio, como discutido anteriormente. Veremos que Júpiter e Saturno compartilham composições semelhantes, principalmente hidrogênio e hélio, enquanto Urano e Netuno contêm grandes quantidades de água, além de hi-

TABELA 5-2 Características físicas dos planetas

	Diâmetro		Massa		Densidade média
	(km)	(Terra = 1)	(kg)	(Terra = 1)	(kg/m ³)
Mercúrio	4.878	0,38	3,3 × 10 ²³	0,06	5.430
Vênus	12.100	0,95	4,9 × 10 ²⁴	0,81	5.250
Terra	12.756	1,00	6,0 × 10 ²⁴	1,00	5.520
Marte	6.786	0,53	6,4 × 10 ²³	0,11	3.950
Júpiter	142.984	11,21	1,9 × 10 ²⁷	317,94	1.330
Saturno	120.536	9,45	5,7 × 10 ²⁶	95,18	690
Urano	51.118	4,01	8,7 × 10 ²⁵	14,53	1.290
Netuno	49.528	3,88	1,0 × 10 ²⁶	17,14	16.40



R I V U X G

FIGURA 5-11 **Volumes de objetos com diferentes densidades** Todos os objetos desta imagem têm a mesma massa (número total de partículas). Entretanto, eles são formados de elementos químicos que têm diferentes densidades (número de partículas por volume), de modo que todos ocupam diferentes quantidades de espaço (volume). (Richard Megna/Fundamentals Photographs, NYC)

drogênio e hélio. Esses quatro são muitas vezes chamados de *planetas jovianos* (o deus romano Júpiter foi também chamado de Jove), porque todos têm densidades relativamente baixas e grandes massas comparados com a Terra. De qualquer maneira, a diferença na química de Júpiter e Saturno, quando comparada com a de Urano e Netuno, torna o nome *planetas gigantes* (gigantes quando comparados com a Terra) mais apropriado para descrevê-los. Vamos explorá-los como dois grupos no Capítulo 8.

Espectros Mais informação sobre a composição química dos corpos do sistema solar é obtida de seus espectros. Para objetos do sistema solar, esta radiação é principalmente luz solar espalhada pela superfície ou por nuvens que circundam cada objeto. Como vimos no Capítulo 4, o espectro nos fornece detalhes da composição química da atmosfera ou da superfície do objeto. Por meio dele, podemos confirmar que as camadas externas dos planetas gigantes são formadas principalmente de hidrogênio e hélio, e que a superfície de Marte é rica em óxidos de ferro, entre outras coisas.

Albedo As superfícies ou as camadas de nuvens superiores dos vários planetas espalham (enviam em todas as direções) diferentes quantidades de luz. A fração da luz incidente que retorna, ou que é refletida, diretamente para o espaço é chamada de **albedo** do corpo. Um objeto que não

PERCEPÇÃO CIENTÍFICA

Medidas astronômicas Os astrônomos usam as leis da física para inferir coisas que não podemos medir diretamente. Por exemplo, podemos obter uma ideia geral da composição química de um planeta por meio de sua massa e seu volume: as leis de Kepler nos permitem determinar a massa de cada planeta a partir dos períodos das órbitas de suas luas. A medida dos diâmetros dos planetas (determinados através de suas distâncias até a Terra e de seus tamanhos angulares no céu) produz seus volumes. Como mostrado na equação da página anterior, dividir a massa total pelo volume total produz a densidade média. A comparação dessa densidade com a densidade de substâncias conhecidas nos fornece informação sobre a química do interior dos planetas.

reflete nenhuma fração da luz que chega até ele tem um albedo igual a 0.0; por exemplo, carvão pulverizado tem um albedo próximo de 0.0. Um objeto que reflete toda a luz que o atinge (um espelho de alta qualidade chega perto disso) tem um albedo de 1.0. O albedo multiplicado por 100 fornece a porcentagem de luz diretamente refletida por aquele corpo. Três planetas (Mercúrio, Terra e Marte) têm albedo de 0,37 ou menos. Tais albedos são resultantes de superfícies secas e escuras ou de uma mistura de superfícies leves (água e nuvens) e escuras (continentes) expostas ao espaço. Em contraste, Vênus, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno têm albedo de 0,47 ou mais. Albedos altos como esses implicam materiais brilhantes expostos ao espaço. Os albedos de Vênus, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno são altos porque todos eles estão completamente envolvidos por nuvens.

Luas Todo planeta, com exceção de Mercúrio e Vênus, tem luas. Existem pelo menos 166 luas planetárias conhecidas no sistema solar (mais de 99 eram conhecidas em 2001), e mais ainda estão sendo descobertas. Ao contrário da nossa Lua, a maioria dessas luas tem formas irregulares e se parece mais com uma batata do que com uma esfera. Descobriremos que existe uma variedade maior entre as luas do que entre os planetas.

Por que o albedo da Terra muda constantemente?

PLANETAS EXTERNOS AO NOSSO SISTEMA SOLAR

O entendimento do processo pelo qual o sistema solar foi formado está sendo ajudado por observações de diferentes estágios da formação planetária em torno de outras estrelas. Embora os astrônomos tenham procurado por planetas fora do sistema solar durante séculos, foi apenas na década de 1980 que observações os levaram a fazer a primeira descoberta de um deles.