

---

# TEXT O COMPLEMENTAR PARA O AGA-215

---

## INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA AGA-210

### 5. Sistema Solar Parte II: Planetas



(NASA)

“Quando as fotografias da Voyager-1, tiradas em fevereiro de 1990, além da órbita de Plutão, foram reveladas pôde-se ver, entre o fundo estrelado, a Terra, um pálido ponto azul que se tornava cada vez mais esmaecido”. (Carl Sagan)

IAG/USP  
ENOS PICAZZIO

## 5. Sistema Solar

### II. Planetas

#### 5.1 Órbitas planetárias

##### 5.1.1 As leis de Kepler.

A concepção de figuras geométricas perfeitas como a circunferência e a esfera marcaram fortemente nossa cultura, durante longo período. Por influência cultural e religiosa, o Universo era visto como uma manifestação divina, uma obra perfeita cuja estrutura só poderia ser explicada através das formas geométricas perfeitas. Essa estrutura universal foi, por mais de 14 séculos, representada pelo modelo ptolomaico<sup>1</sup>: a Terra ocupava o centro do Universo, e ao seu redor giravam todos os astros. Os planetas, aqui incluídos Sol e Lua, orbitavam a Terra em trajetórias circulares, e as estrelas, assentadas sobre a superfície de uma esfera imaginária, giravam em conjunto, isto é, com mesmo período.

A maior dificuldade do sistema ptolomaico era explicar o movimento retrógrado que os planetas apresentam periodicamente. O artifício utilizado para explicar essa anomalia não tinha qualquer fundamento científico, era representando essencialmente pelos *epiciclos* e as *deferentes* (veja a Figura 5.5). Os planetas giravam nos epiciclos, cujos centros giravam nas deferentes. Em ordem crescente de afastamento estavam os “planetas”: Lua, Mercúrio, Vênus, Sol, Marte, Júpiter e Saturno.

Este sistema foi posteriormente modificado, desta vez com o Sol ocupando o centro do universo. Era o sistema copernicano<sup>2</sup>. Este modelo explicava o movimento retrógrado dos planetas prescindindo dos epiciclos e das deferentes (Figura 5.6)

Entretanto, ambos os sistemas ainda se baseavam na geometria perfeita, uma proposta que resistiu até o início do séc.17. Podemos dizer que coube à astronomia a tarefa de mostrar pela primeira vez, de forma realmente científica, que a estrutura do universo não era tão “perfeita” como se imaginava, pelo menos em relação ao conceito de perfeição que se tinha.

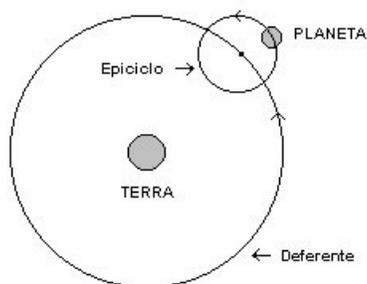
Embora Johannes Kepler seja lembrado como a pessoa que demonstrou a elipticidade das órbitas planetárias, Tycho Brahe<sup>3</sup> desempenhou papel fundamental na evolução histórica. Ele era defensor de um sistema próprio, no qual Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno orbitavam o Sol, mas este e a Lua orbitavam a Terra. Até a sua época, os dados observacionais consistiam numa coletânea de observações individuais, com imprecisões de medidas diversas. O raciocínio de Brahe, embora simples, era de fundamental importância para aproximar-se da realidade. Pensava ele que, para se chegar a uma conclusão confiável sobre a estrutura do universo, era absolutamente imprescindível ter-se em mãos um conjunto homogêneo de dados (observações), da melhor qualidade possível. E foi esta a tarefa que ele abraçou durante boa parte de sua vida: observar. Para tanto, buscou recursos financeiros para edificar um

---

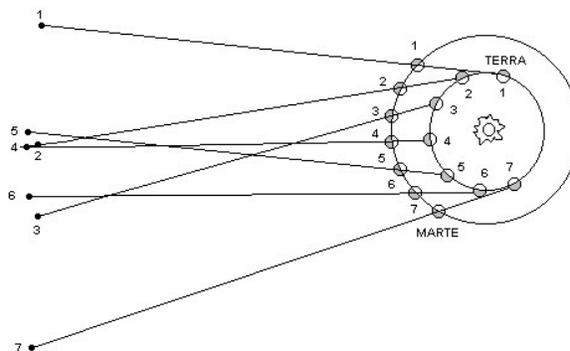
<sup>1</sup> Claudio Ptolomeu era greco-egípcio, e viveu em Alexandria no início do séc. 2 d.C. O modelo geocêntrico não é criação sua, mas foi ele quem reuniu ordenadamente as idéias geocentristas concebidas até então e a completou com explicações do movimento planetário, em termos de epiciclos. Sua obra ficou conhecida como *Almagesto*, palavra árabe que significa “o maior”.

<sup>2</sup> Nicolau Copérnico, era um prelado polonês que viveu entre 1473 e 1543. A proposta heliocêntrica já havia sido apresentada pelo grego Aristarcus de Samos, no séc. 3 a.C. No entanto, foi através de sua obra *Sobre a Revolução dos Corpos Celestes*, que o heliocentrismo se firmou.

<sup>3</sup> Tycho Brahe, dinamarquês descendente de família nobre, viveu entre 1546 e 1601. Ao que parece, era genioso, muito social e politicamente habilidoso.



**Figura 5.5** O sistema geocêntrico utilizava como artifício *deferentes* e *epiciclos* para explicar o movimento retrógrado dos planetas. Este esboço genérico, repete-se para cada um dos planetas.



**Figura 5.6** No sistema heliocêntrico, o movimento retrógrado dos planetas é uma consequência natural.

observatório e equipá-lo com a melhor instrumentação disponível. Além de habilidoso observador, era engenhoso construtor de instrumentos (veja a capa da apostila 4). Até o advento do telescópio em 1608, ele foi o maior observador da história; observou planetas e estrelas, e acumulou um volume significativo de dados referentes às posições de Marte.

Um ano antes de sua morte, já vivendo em Praga, Tycho conheceu Kepler<sup>4</sup>, um jovem astrônomo alemão que defendia o sistema copernicano, e que tornou-se discípulo de Brahe. Após a morte deste, Kepler passou longos anos calculando precisamente as posições de Marte, a partir das observações de Tycho. Para facilitar os cálculos, ele supôs que a Terra tivesse órbita circular (para manter fixa sua distância heliocêntrica) e período de translação de exatamente 365 dias. O resultado desses cálculos é bem conhecido: a órbita de Marte não era circular, mas elíptica. Esta foi a primeira demonstração matemática da elipticidade das órbitas. Estava falido o “sistema perfeito” das órbitas circulares! As duas primeiras leis de Kepler foram anunciadas simultaneamente, após as conclusões dos cálculos. São elas:

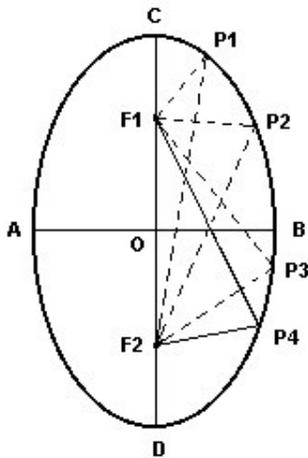
*Primeira: Os planetas se movem em órbitas elípticas, e o Sol ocupa um dos focos.*

*Segunda: O raio vetor que une o planeta ao Sol varre áreas iguais, em intervalos idênticos de tempo.*

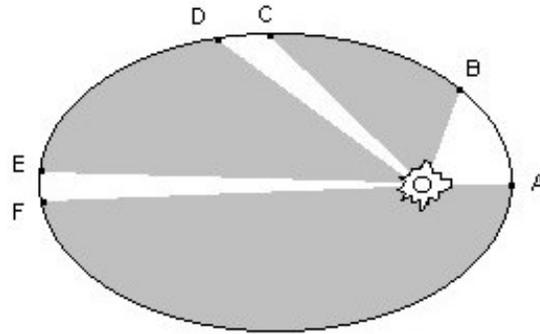
A Figura 5.7 mostra uma elipse. O segmento AB e CD representam, respectivamente, os eixos *menor* e *maior*. O ponto O é o centro da elipse. F1 e F2, são os seus focos. A *excentricidade* mede o “achatamento” da elipse: quanto mais separados estiverem os focos, maior é a excentricidade. O círculo tem excentricidade *zero*, o que equivale a dizer que “seus focos” coincidem com o centro, isto é, os pontos F1, F2 e O são coincidentes. Uma particularidade da elipse é que os comprimentos dos segmentos F1P1F2, F1P2F2, F1P3F2 etc., são iguais e constante.<sup>5</sup> As duas primeiras Leis de Kepler estão ilustradas na Figura 5.8. Representando o centro do Sol (foco) por S, vemos que as áreas dos triângulos ASB, CSD, ESF

<sup>4</sup> Kepler viveu entre 1571 e 1630. Ao contrário de Tycho, Kepler vinha de classe econômica baixa, sempre vivendo com grandes dificuldades.

<sup>5</sup> Uma receita prática para se desenhar uma elipse: fixe as duas pontas de uma linha (você escolhe o comprimento) nos focos. Com a ponta de um lápis, ou caneta, estique a linha, e faça um movimento em círculo ao redor dos focos. Após uma volta completa, a elipse estará desenhada. Quanto mais se afastar os focos, mais achatada será a elipse. Seja curioso (a), tente desenhar uma.



**Figura 5.7** A elipse. (veja explicação no texto)



**Figura 5.8** Aqui estão representadas as duas primeiras Leis de Kepler. O Sol está em um dos focos (S). O planeta percorre os segmentos AB, CD e EF no mesmo intervalo de tempo. (veja explicação no texto)

são iguais. É bom lembrar que o planeta percorre os segmentos AB, CD e EF no mesmo intervalo de tempo.

A terceira Lei de Kepler foi anunciada apenas em 1618:

*Terceira: A razão entre o quadrado do período e o cubo do semi-eixo maior é constante*

$$(P^2 / a^3 = cte)$$

$P$  (período orbital sideral) é dado em anos, e  $a$  (=  $CD/2$ ) em U.A.

Um fato curioso nesta história são algumas coincidências. A primeira é que Kepler simplificou os cálculos admitindo que a órbita da Terra era circular. De fato, ela é quase circular. A segunda coincidência é o fato de Kepler ter iniciado seus cálculos com o planeta Marte, segundo consta, por sugestão de Tycho. As órbitas mais excêntricas do SS são as de Marte e Plutão (que não era conhecido na época), Ou seja, ele começou exatamente com o caso mais extremo. E se ele tivesse começado por Vênus, que tem órbita ainda mais circular que a da Terra?

Com o surgimento do telescópio, a precisão das observações aumentou, e a universalidade das leis de Kepler passou a ser comprovada. Galileu Galilei<sup>6</sup>, provavelmente o primeiro a utilizar o telescópio (em 1609) como instrumento de pesquisa, descobriu os quatro maiores satélites de Júpiter, e verificou que o sistema joviano era uma espécie de miniaturização do sistema planetário, ou seja, os quatro satélites circulavam Júpiter de maneira semelhante aos planetas orbitando o Sol<sup>7</sup>.

<sup>6</sup> Galileu viveu entre 1564 e 1642, portanto foi contemporâneo de Kepler.

<sup>7</sup> Esta sua descoberta lhe trouxe sérios problemas com a Inquisição, que não aceitava outra proposta que não fosse antropocêntrica. Por isto, Galileu foi forçado a renegar suas convicções, pelo menos em público, e a viver em regime de prisão semi-aberto, isto é, preso em sua casa. Foram necessários quase 4 séculos para que a Igreja se conscientizasse do erro que cometeu, e reconhecesse o trabalho de Galileu, que, afinal, não era outra coisa senão a descrição da própria natureza, que a Igreja tanto venera como obra divina.

As pesquisas de Galileu sobre o movimento dos corpos, contribuíram significativamente para o desenvolvimento da mecânica planetária. Sabia-se que os planetas tinham órbitas elípticas, portanto órbitas fechadas, mas não se sabia a razão disso.

Os estudos de Galileu levaram-no a introduzir o conceito de *inércia* (resistência que um corpo oferece à mudança de movimento): *um corpo tende a manter-se em repouso ou em movimento uniforme, a menos que haja influência externa sobre ele.*

### 5.1.2 Lei universal de gravitação.

Isaac Newton<sup>8</sup> estudou profundamente o movimento dos corpos. Para tanto, ele criou duas ferramentas matemáticas apropriadas: o cálculo diferencial e o cálculo integral<sup>9</sup>. Ao estudar o movimento dos corpos, ele introduziu o conceito de *aceleração*, para explicar alterações de direção e/ou módulo (valor) da *velocidade*. Em síntese, esta é a *Primeira Lei*:

*Na ausência de influência externa, um corpo em repouso permanece em repouso, enquanto um corpo em movimento continua a mover-se com velocidade constante e em linha reta.*

Para explicar o que era *influência externa*, Newton introduziu o conceito de *força*, que é a essência da sua *Segunda Lei*:

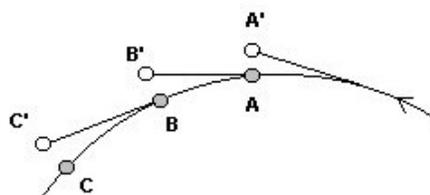
*A força total sobre um corpo é dada pelo produto da sua massa pela aceleração a que está submetido ( $F = m \times a$ ).*

Sua *terceira Lei*, conhecida por “ação e reação”, é a seguinte:

*Para toda força que atua sobre um corpo existe outra de reação, com mesma intensidade, mesma direção porém em sentido oposto.*

Onde está a essência da mecânica newtoniana, relativamente as órbitas planetárias? O grande avanço veio quando Newton interpretou a órbita fechada de um planeta como decorrência de uma força que atuava sobre o planeta, e era dirigida para dentro da órbita, mais precisamente dirigida para o Sol. Isto significa que o planeta está sempre submetido a uma aceleração. A existência de uma força lateral, força uma mudança de direção no movimento (veja e Figura 5.9). Na ausência de força lateral, a trajetória deveria ser uma reta. Quando a força lateral atua, tudo se passa como se o planeta “caísse” da posição A' para A, B' para B, etc. Assim, ele acaba descrevendo um órbita fechada.

Essa força lateral é de origem gravitacional, é a força de atração gravitacional do Sol sobre o planeta. Pela terceira lei de Newton, o planeta também exerce atração gravitacional sobre o Sol. No entanto, como a massa deste é muito maior, a aceleração por ele sofrida é proporcionalmente muito menor.

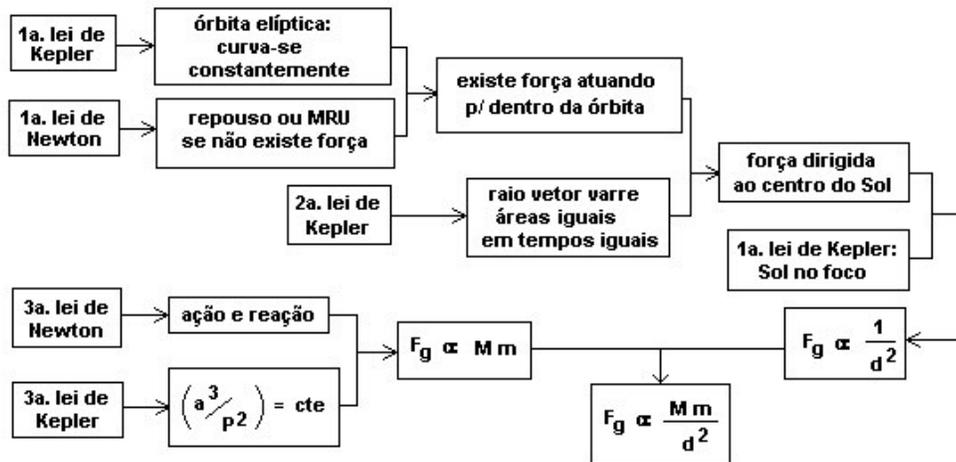


**Figura 5.9** Mudança de direção no movimento de um planeta, pela influência de uma força lateral.

<sup>8</sup> Isaac Newton nasceu na Inglaterra em 1642, ano em que Galileu morreu. Ele viveu até 1727, e é considerado um dos maiores físicos de toda a história.

<sup>9</sup> Gottfried Wilhelm Leibniz, alemão de Hannover, viveu entre 1646 e 1716. Concomitante e independentemente, ele também inventou os cálculos diferencial e integral. As anotações usuais  $df/dt$  e  $\int f dx$  são de Leibniz.

Esquemáticamente, podemos representar o desenvolvimento da mecânica das órbitas através do diagrama em bloco da Figura 5.10. A partir das três leis de Kepler e das três leis de Newton, chega-se à Lei Universal de Gravitação: *a força de atração gravitacional entre dois corpos é diretamente proporcional ao produto de suas massas, e inversamente proporcional ao quadrado da distância que os separa.* A constante de proporcionalidade é  $G$ .



**Figura 5.10** Diagrama em bloco do desenvolvimento da mecânica das órbitas. (veja explicação no texto)

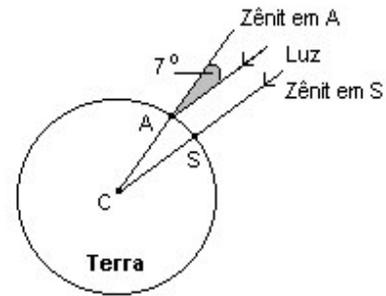
## 5.2 O sistema Terra – Lua

Por que parte do hemisfério norte não é visível aos observadores do hemisfério sul, e vice-versa, e a Lua é visível a todos? Por que vemos sempre a mesma face lunar? Por que acontecem os eclipses e as marés? Estas são provavelmente as perguntas mais comuns sobre nosso satélite, e vamos aproveitá-las para analisar um pouco o sistema dinâmico formado por esses dois corpos.

Embora o movimento lunar passou a ser bem explicado pelo modelo heliocêntrico, a Lua já era apontada como o planeta mais próximo da Terra. Aristarco de Samos (300 anos a.C.) demonstrava que a Lua estava bem mais próxima da Terra que o Sol, através de um raciocínio simples: o tempo decorrido entre as fases quarto crescente e quarto minguante, era praticamente igual ao tempo decorrido entre as fases quarto minguante e quarto crescente. Isto só acontece porque os raios de luz incidentes nas duas fases são praticamente paralelos; se não fosse assim, sempre haveria uma diferença entre os intervalos de tempo entre as lunações. Logo, o Sol estava bem distante do sistema Terra-Lua.

Aristarco também estimou os tamanhos relativos da Lua e da Terra. Pela duração de um eclipse lunar, ele calculava o tamanho do cone de sombra provocado pela Terra relativamente ao tamanho da Lua. Como o cone de sombra é proporcional ao diâmetro da Terra, ele determi-

va também o tamanho da Terra. No entanto, foi Eratóstenes de Cirene (276-194 anos a.C.) quem mediu mais precisamente o diâmetro da Terra. A Figura 5.1 esquematiza o seu método: ele conhecia a distância (cerca de 800 km) entre as cidades de Alexandria (representada pelo ponto A) e Siena (ponto S), atual Assuã no Egito. Ao meio dia do solstício de verão (de inverno para o hemisfério sul), o Sol estava a pino em Siena, mas em Alexandria os raios solares estavam inclinados de 7° em relação ao zênite. Utilizando regra de três, ele calculou a circunferência da Terra, ou seja: a distância AS está para 7°, assim como a circunferência da Terra está para 360°.



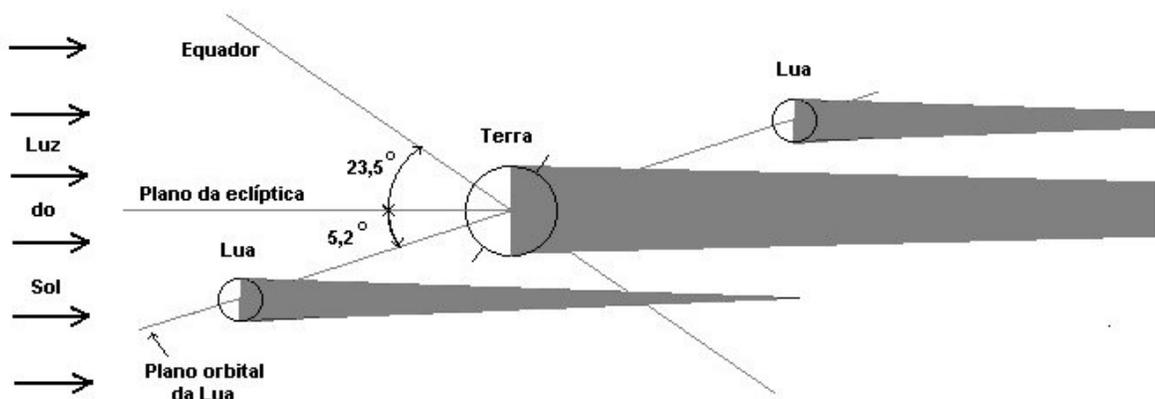
**Figura 5.11** Determinação da circunferência da Terra por Eratóstenes (vide texto).

Matematicamente isto se escreve:

$$(AS / 7) = (2\pi R_T / 360) \quad \text{ou} \quad (800 / 7) = (2\pi R_T / 360);$$

A precisão dos seus cálculos está em cerca de 10% relativamente aos valores atuais, sobretudo porque não se sabe a conversão exata entre a *stadia*, unidade de comprimento utilizada na época, e o km. Os valores precisos dos raios são: equatorial = 6.378,140 km; polar = 6.356,755 km.

A Lua gira ao redor da Terra em sentido anti-horário, ou direto, com período de 27,321662 dias. Como vimos, este é o *mês sideral*. O plano orbital da Lua está inclinado de 5,2° relativamente ao plano da eclíptica (Figura 5.12). Isto significa que, durante uma revolução completa, a Lua circula pelos hemisférios norte e sul. Devido às perturbações gravitacionais causadas pela Terra e o pelo Sol, a órbita lunar precede (veja precessão do eixo terrestre) com período de 18,6 anos. Por esta razão, o afastamento máximo da Lua



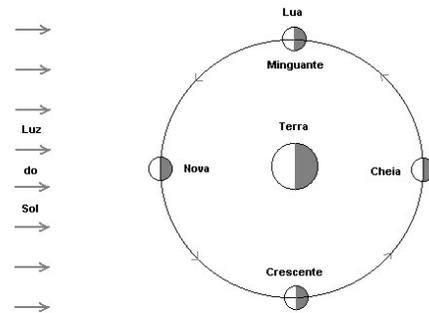
**Figura 5.12** Configuração geométrica do plano orbital da Lua relativamente aos planos da eclíptica e do equador terrestre. As proporções foram exageradas para facilitar a visualização. (veja explicação no texto)

relativamente ao equador celeste não é constante: ele varia entre  $28,7^\circ$  ( $23,5^\circ + 5,2^\circ$ ) e  $18,3^\circ$  ( $23,5^\circ - 5,2^\circ$ ), ao norte ou ao sul do equador celeste. Portanto, os observadores dos dois hemisférios vêem a Lua.

O período sideral de rotação da Lua é 27,321662 dias, idêntico ao mês sideral. Isto significa que a Lua gira sobre si mesma no mesmo intervalo de tempo que demora para dar uma volta completa ao redor da Terra, daí a razão de mostrar sempre a mesma face para a Terra. Esta sincronização de movimento não é casual; na realidade, a longo prazo um sistema planeta-satélite tende a sincronizar os movimentos.

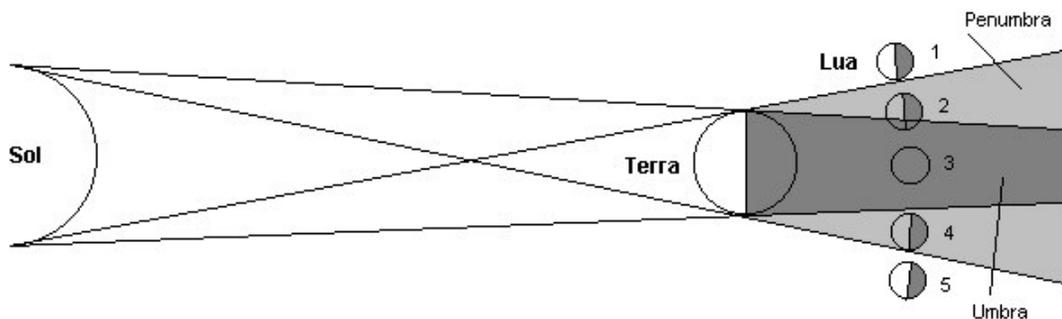
Durante um mês sinódico (29,530589 dias) a Lua passa pelas quatro fases lunares, esquematizadas na Figura 5.13. Com base nesta figura e na Figura 5.12, podemos compreender como acontecem os eclipses lunar e solar.

Na fase Nova, a Lua se interpõe entre a Terra e o Sol; na fase Cheia, ao contrário, é a Terra que está entre o Sol e a Lua. Se as órbitas lunar e terrestre fossem coplanares nas fases lunares Cheia e Nova haveriam eclipses. Como a situação real das órbitas é aquela mostrada na Figura 5.12, vê-se que a única possibilidade de ocorrência de eclipses é quando a Lua estiver próxima ao plano da

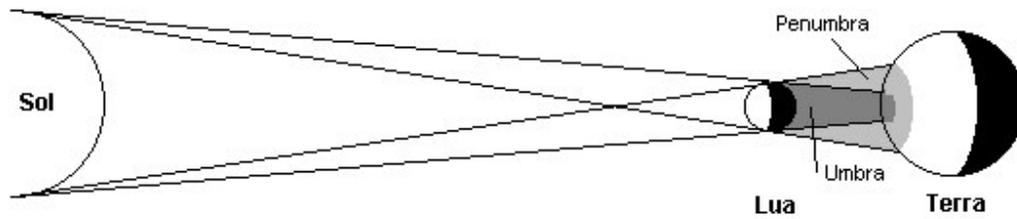


**Figura 5.13** Configuração geométrica das fases lunares.

eclíptica. Nesta condição, os cones de sombra estarão alinhados. Portanto, teremos um eclipse sempre que essas duas condições forem satisfeitas, isto é, que as fases Cheia ou Nova ocorram quando a Lua estiver próxima do plano da eclíptica. Se a fase for Cheia, o eclipse será lunar; se a fase for Nova, ele será solar. As Figuras 5.14 e 5.15, ilustram estas situações.



**Figura 5.14** O eclipse lunar acontece na fase de Lua Cheia. À medida em que a Lua caminha da posição 1 para a posição 5, ela entra no cone de sombra da Terra. Na posição 1, a Lua começa a entrar no cone da penumbra, onde apenas parte dos raios solares são bloqueados pela Terra. Neste instante, o brilho da Lua diminui levemente. O eclipse só acontecerá quando a Lua entrar no cone da umbra, escuridão total. A duração do eclipse é o tempo que a Lua demora para atravessar o cone da umbra.



**Figura 5.15** O eclipse solar acontece durante a fase de Lua Nova. Apenas os observadores situados na zona coberta pela umbra presenciarão um eclipse total do Sol. Os observadores das zonas cobertas pela penumbra, verão o eclipse parcial do Sol. Nas demais regiões da superfície terrestre, não haverá eclipse.

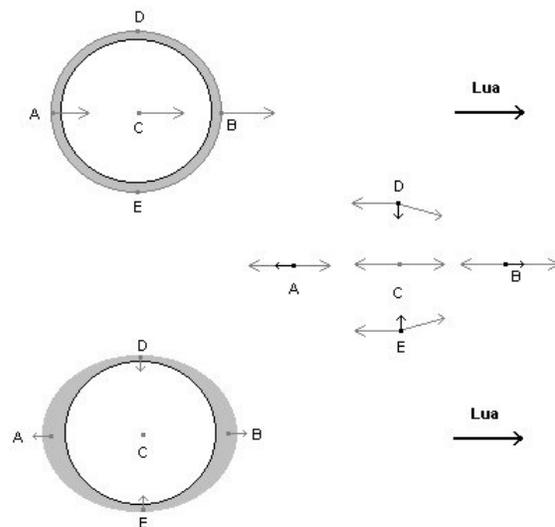
Como a distância da Lua varia, porque a órbita não é circular, seu tamanho aparente também varia. Quando este é igual ou maior que o disco solar, ocorre eclipse total. Quando o disco lunar for menor que o solar ocorre um *eclipse anular*; parte do disco solar ainda permanece visível durante o eclipse.

É fácil perceber que o eclipse lunar é visto por todos os observadores que tiverem a Lua acima do horizonte, ao contrário do solar que só pode ser observado por aqueles que estiverem nas regiões cobertas pela umbra (parcial) e pela penumbra (parcial).

O campo gravitacional é uma propriedade da matéria, isto é, um corpo cria ao seu redor um campo de forças que é proporcional à sua massa. Num sistema de corpos como o Sistema Solar, todos os objetos interagem entre si, uns atraindo os outros.

Dentre os objetos do SS, os que exercem maiores influências sobre a Terra são o Sol, que tem massa muito grande, e a Lua, que tem massa relativamente pequena, porém se encontra muito próxima da Terra. Os efeitos dessas influências são visíveis através das *marés*.

Acompanhe o esquema da Figura 5.16 ao lado. Os pontos A, B e C encontram-se a distâncias diferentes da Lua, aqui representada pela seta. Por estar mais próximo, o ponto B é atraído mais fortemente que A e C. Pela razão oposta, a força de atração em A será a menor. Nos pontos D e E as forças de



**Figura 5.16** O efeito de maré. (veja a explicação no texto)

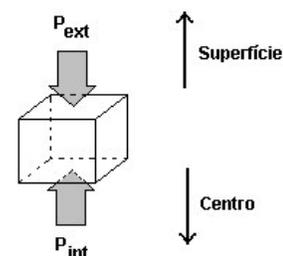
atração têm praticamente a mesma intensidade, mas direções ligeiramente diferentes. Para se obter o efeito líquido dessas forças sobre a Terra, é necessário analisá-las em termos relativos, isto é, devemos procurar a *força diferencial* ou *força de maré*. Para tanto, em cada ponto vamos subtrair a força de atração atuante no centro da Terra, isto é, a força em C. Vetorialmente, essa operação é feita somando-se a cada ponto uma força vetorial idêntica àquela que atua no ponto C, porém com sentido oposto (veja a parte intermediária do desenho). É fácil perceber que as forças resultantes em cada caso são aquelas mostradas na parte de baixo da figura: ao longo da linha que une a Terra à Lua (pontos A e B), as forças de maré atuam em direção oposta ao centro da Terra. Na direção perpendicular (pontos C e D), as forças resultantes atuam na direção do centro da Terra. Por esta razão, as águas oceânicas adquirem o formato de elipsóide prolato. De acordo com o desenho da Figura 5.16, as marés serão *altas* nos pontos A e B, e *baixas* em C e D.

Este raciocínio é idêntico quando se analisa o efeito de maré provocado pelo Sol. Quando Sol e Lua estão alinhados com a Terra, isto é, ao longo da linha que passa por A, B e C, os efeitos se somam e a maré resultante é máxima: é a *maré de sizígia*; que acontece durante as fases Cheia e Nova. Quando Sol e Lua estão em quadratura (Sol ao longo da direção DCE, e Lua ao longo da direção ACB), as forças de maré do Sol e da Lua se subtraem e a maré resultante é a mais baixa: porque, e chama-se *maré de quadratura*; que acontece durante as fases de quartos Crescente e Minguante.

### 5.3 Interior planetário

Estudar o interior dos planetas é conhecer de que forma parâmetros físicos importantes como *pressão*, *temperatura*, *densidade de massa*, *composição química* e *mineralógica*, etc., variam com a profundidade. Em outras palavras, é como estratificar o planeta em distintas camadas, umas sobrepostas as outras, e verificar de que forma tais parâmetros físicos variam de camada para camada. Para simplificar o estudo, é comum admitir-se camadas homogêneas. Em pequena escala, esta hipótese não é válida porque há inhomogeneidades locais. Mas em grande escala a hipótese é válida.

A pressão é governada pelo *equilíbrio hidrostático*, isto é, equilíbrio de forças ou de pressões. Imaginemos um elemento de massa qualquer numa posição intermediária entre o centro e a superfície do planeta (Figura 3.17). Sobre esse elemento de massa há, basicamente, duas pressões concorrentes:  $P_{ext}$ , *pressão externa*, exercida pela matéria que se encontra acima do elemento, que o empurra para baixo; e  $P_{int}$ , *pressão interna*, exercida pela matéria que se encontra abaixo do elemento de massa, e o empurra para cima. Quando estas duas pressões se igualam em intensidade, chega-se à posição de equilíbrio.



**Figura 3.17** Equilíbrio hidrostático. (veja a explicação no texto)

Na teoria dos gases a expressão matemática que relaciona temperatura e pressão é a *equação de um gás perfeito*. Um gás é dito perfeito quando sua temperatura depende diretamente da pressão a que está submetido. Quanto maior for a pressão, maior será a temperatura (exemplo: quando uma bomba de encher pneu tem seu orifício de saída tapado e o

êmbolo é pressionado, a temperatura do corpo da bomba aumenta. Isto ocorre porque o gás contido dentro da câmara da bomba ficou comprimido, a pressão aumentou, o gás se aqueceu e esquentou as paredes da bomba). É evidente que a equação de um gás perfeito não se aplica ao material sólido das camadas mais superficiais dos planetas. As camadas mais internas estão sob pressão, e quando esta pressão superar a força de coesão do material, este torna-se plástico e passa a se comportar como um fluido. Portanto, a partir deste ponto a temperatura da matéria passa a depender diretamente da pressão. Quanto maior for a profundidade considerada, tanto mais justificada será a aplicação deste formalismo.

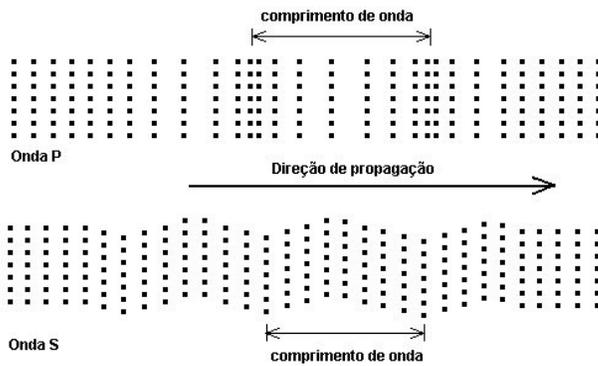
A densidade média pode ser estimada através da massa (calculada pelas Leis de Kepler) e do diâmetro do planeta. Um cálculo mais refinado pode ser feito através do conceito de *momento de inércia*. Um corpo em rotação gira tanto mais rápido quanto maior for a concentração da massa em direção ao centro, isto é, um corpo com concentração de massa no centro gira mais rapidamente que outro de mesma massa, porém com distribuição homogênea. O achatamento visual dos pólos é também uma indicação da rotação do planeta: quanto mais rápido girar o planeta, mais achatados serão os seus pólos. Júpiter e Saturno são os planetas que apresentam os maiores achatamentos dos pólos.

A massa é um parâmetro fundamental na determinação da estrutura e da composição química.

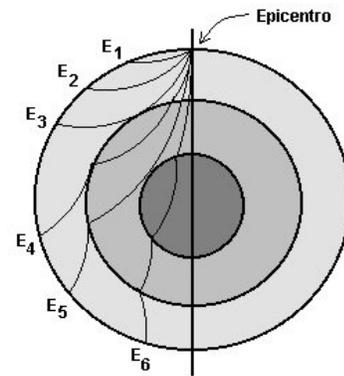
A Terra é o laboratório natural onde a teoria de interior de planetas é desenvolvida e testada. A constatação das condições em que se encontram os materiais mais superficiais pode ser feita através de sondagem por perfuração. O poço artificial mais profundo encontra-se em território russo do círculo ártico, e tem apenas 12 km. Para a sondagem de camadas mais profundas, usam-se os abalos sísmicos naturais.

As ondas são geradas durante os abalos sísmicos (terremotos). Há dois tipos de ondas sísmicas: as *longitudinais*, ou *ondas P*, e as *transversais*, ou *ondas S*. A Figura 5.18 ilustra os dois casos. As ondas P vibram ao longo da direção de propagação, através da compressão e expansão do material do meio. Ao se propagarem elas comprimem as rochas, submetendo-as a uma pressão, daí o nome “ondas P” (de pressão). As ondas S, ao contrário, oscilam perpendicularmente à direção de propagação. Ao se propagarem, elas deformam as rochas, sem comprimi-las, como numa ação de cisalhamento. Além destas diferenças, há outras marcantes: (a) as ondas P se propagam em meios sólido e líquido, as ondas S só em sólidos; (b) a velocidade de propagação das ondas P é maior que a das ondas S, por isso elas atingem os sismógrafos das estações sismológicas antes das ondas S. O esquema da Figura 5.19 ilustra a propagação das ondas sísmicas na Terra. Fora de escala, são representados o *manto* (camada mais externa), o *núcleo externo líquido* (camada intermediária) e o *núcleo interno sólido* (camada central). A *crosta*, camada superficial, é muito fina quando comparada às demais, por isso não é mostrada no esquema. As ondas se originam no *epicentro*, e se propagam para dentro da Terra. E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, ..., E<sub>6</sub>, representam estações sismológicas espalhadas pela superfície terrestre. Nas estações E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> e E<sub>3</sub> chegam as ondas P e S, e nas demais estações, E<sub>4</sub>, E<sub>5</sub> e E<sub>6</sub>, chegam apenas as ondas P. Os registros desses abalos são feitos com muita precisão pelos sismógrafos, e o cruzamento das informações coletadas por diferentes estações sismológicas permitem avaliar com precisão todo o processo.

Analisados com ajuda de modelos teóricos, os dados revelam como o material terrestre está distribuído. Essencialmente, a matéria terrestre está distribuída em três camadas: *crosta*, *manto* e *núcleo* (Figura 5.20). No centro está o *núcleo* composto de uma liga de ferro e níquel. A parte mais central, *núcleo interno*, é sólida porque é submetida à pressão mais elevada. Acima vem o *núcleo externo* de ferro fundido. Acima deste núcleo vêm os *mantos inferior*,



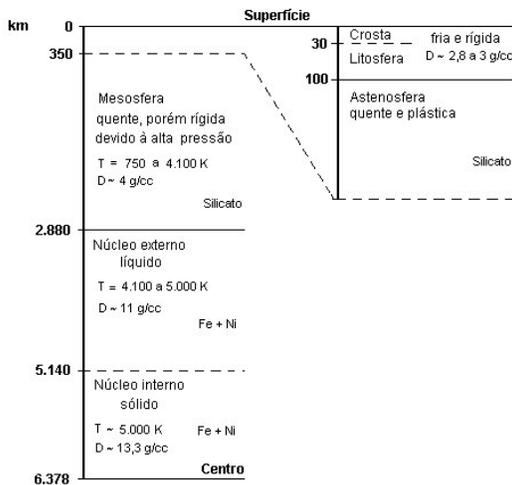
**Figura 5.18** Dois tipos de ondas sísmicas: *longitudinais* ou *ondas P*, e *transversais* ou *ondas S*. (veja a explicação no texto).



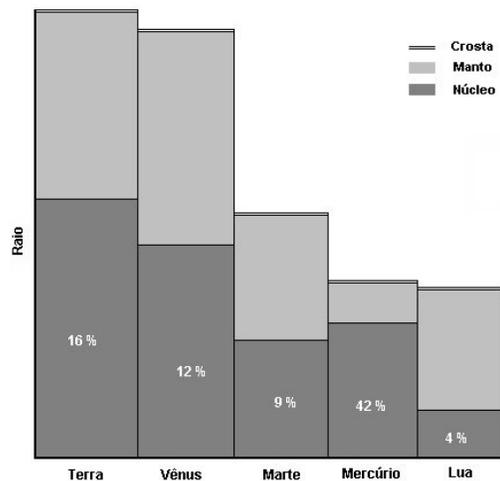
**Figura 5.19** Propagação das ondas sísmicas longitudinais e transversais (veja a explicação no texto).

composto de silicatos, e o *superior*. Finalmente, temos a *crosta* que é a parte mais superficial onde ocorrem os movimentos das placas.

Os demais planetas terrestres têm estruturas internas semelhantes, respeitadas as composições diferenças de composição química, tamanho, etc. A Figura 5.21 mostra a estrutura interna e os tamanhos relativos aproximados destes planetas. A crosta está fora de escala.



**Figura 5.20** Estrutura interna da Terra.



**Figura 5.21** Estrutura interna e tamanhos relativos dos planetas telúricos.

Para os planetas jovianos a aplicação desse formalismo é mais justificada, já que eles constituídos essencialmente de gases. As estruturas internas dos planetas jovianos são ilustradas na Figura 5.22. Na região mais externa de Júpiter os gases encontram-se na fase molecular. À medida em que se aprofunda, o hidrogênio muda de fase. Primeiro forma-se o hidrogênio molecular líquido, uma espécie de mar de hidrogênio líquido. Se pudéssemos falar em *superfície*, esta seria a de Júpiter. Abaixo dessa camada a pressão aumenta gradativamente e o hidrogênio molecular líquido passa para a fase de hidrogênio metálico líquido. É que sendo a pressão tão elevada, as moléculas são comprimidas umas contra as outras e uma parte dos

elétrons passam a circular entre as moléculas, como se fossem livres. Isto dá surgimento à condutividade elétrica, e o meio porta-se como um metal (bom condutor elétrico).

No centro, Júpiter possui um núcleo composto de ferro e silicatos, tal qual os planetas terrestres. Aqui a temperatura atinge 30.000 K.

Saturno apresenta semelhanças na estrutura interna, se comparado a Júpiter. Como ele é menor, a pressão interna é menor que a de Júpiter, diminuindo o tamanho da região formada por hidrogênio metálico líquido. Outra diferença é a presença de um núcleo externo composto de gelo.

Os modelos de interior de Urano e Netuno são praticamente iguais, e não apresentam hidrogênio metálico líquido. A composição química deles difere daquela apresentada por Júpiter e Saturno; há menos

hidrogênio e hélio, e mais gases mais pesados.

Plutão é um caso à parte. Pelo seu tamanho reduzido e sua distância enorme, a coleta de informações se torna uma tarefa difícil. Ele foi descoberto por Clyde W. Tombaugh, em 1930. Em 1976, descobriu-se a presença do gás metano (CH<sub>4</sub>). Dois anos depois, com a descoberta do seu satélite Caronte, sua massa foi determinada com bastante precisão. Com a ocultação<sup>10</sup> de duas estrelas ocorrida em 9/6/88, o tamanho de Plutão e a espessura de sua atmosfera foram determinados mais precisamente. As informações então disponíveis revelavam que Plutão não tinha as características de um planeta joviano. A descoberta de água, nitrogênio molecular e monóxido de carbono confirmaram essa conclusão.

Embora o metano seja o constituinte básico de Plutão, sua densidade média (cerca de 2,1 g/cc) sugere a presença de uma quantidade substancial de material rochoso. Pelas suas características, sabe-se que ele não deve possuir um núcleo líquido; as informações

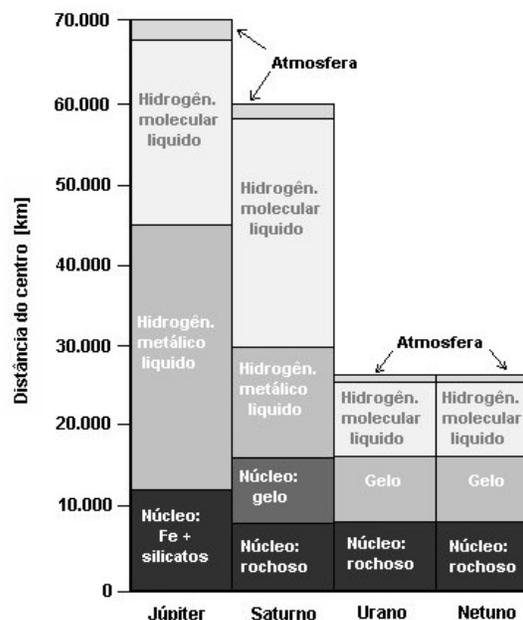


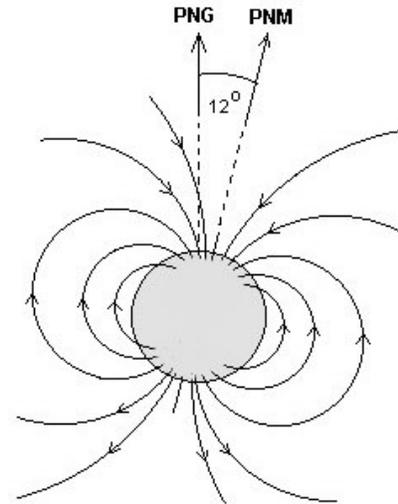
Figura 5.22 Estrutura interna e tamanhos relativos dos planetas jovianos. (veja explicação no texto)

<sup>10</sup> Devido ao movimento orbital, um planeta oculta as estrelas de fundo. Esta pode ser uma oportunidade para se obter informações importantes (tamanho, superfície, atmosfera, etc.) do planeta.

disponíveis, no entanto, ainda não nos permite afirmar se ele é ou não fracionado, isto é, se seu interior está dividido em camadas com composição química distinta.

### 5.3.1 O campo magnético terrestre.

A Terra tem um campo magnético *dipolar*, isto é, tem dois pólos magnéticos: o *norte* (PNM) e o *sul* (PSM). As linhas de campo emergem do pólo sul magnético e retornam à Terra através do pólo norte magnético (Figura 5.23). O eixo do campo magnético está inclinado em  $12^\circ$ , relativamente ao eixo de rotação da Terra. As coordenadas geográficas do PNM são, aproximadamente,  $\phi = 79^\circ \text{ N}$ ,  $\lambda = 70^\circ \text{ O}$ . A bússola é orientada pelo campo magnético, logo ela indica os pólos magnéticos não os geográficos. O desvio entre o pólo magnético e o geográfico sobre a superfície terrestre não é constante, mas varia localmente. Esse desvio local é denominado *declinação magnética*. Com a ajuda de uma carta magnética, é possível orientar-se corretamente pela bússola.



**Figura 5.23** O eixo do campo magnético terrestre não coincide com o de rotação. (veja explicação no texto)

As linhas do campo magnético se estendem a distâncias muito maiores que as dimensões da Terra, e não formam uma estrutura esfericamente simétrica. O campo magnético que se estende em direção ao Sol, é por este “pressionado”, isto é, o fluxo de partículas eletricamente carregadas expelido pelo Sol interage com o campo magnético terrestre e o “empurra” de volta à Terra. Visto do Sol, esse efeito assemelha-se ao da fonte quando vista de cima para baixo: a água é ejetada do centro da fonte e para cima, atinge uma altura máxima, abre-se em forma de leque na direção das bordas da fonte, e retorna para baixo, formando uma espécie de invólucro simétrico que envolve a fonte. Assim se parece a *magnetosfera*: na direção do Sol ela atinge uma distância aproximada de 10 raios terrestres, mas na direção oposta ela pode atingir 1.000 raios terrestres.

O mecanismo gerador do campo magnético é a movimentação de cargas elétricas, conhecido por *efeito dínamo*. O núcleo externo líquido está eletricamente carregado, e a movimentação desse fluido cria o campo magnético. Pesquisas em paleomagnetismo<sup>11</sup> revelam reversão de direção do campo magnético terrestre, de forma aleatória, com período médio de 10.000 a 100.000 anos. Atualmente, a intensidade do campo magnético está diminuindo.

Portanto, aceitando o efeito dínamo como o mecanismo gerador do campo magnético, o estudo da magnetosfera de um planeta revela informações importantes de sua estrutura interna. Júpiter tem campo magnético mais intenso que o da Terra, mas Lua, Vênus, Marte e Saturno têm campos magnéticos mais fracos que o terrestre. Os eixos magnéticos também não coincidem com os de rotação. Saturno é exceção; os eixos são praticamente coincidentes.

<sup>11</sup> Estudo do magnetismo antigo, primitivo.

## 5.4 Superfície planetária

O estudo das superfícies planetárias fornece informações dos processos que ocorrem não apenas nas próprias superfícies, mas também nos interiores e nas atmosferas.

Os planetas telúricos e os satélites possuem superfícies sólidas e, excetuando-se Vênus que possui uma atmosfera muito espessa, acessíveis à observação. Nestes casos, a investigação pode começar pela medição do *albedo*. Albedo de uma superfície é a razão entre a quantidade de luz refletida em todas as direções e a quantidade de luz sobre ela incidente. Portanto, seu valor varia entre 0 (superfície totalmente absorvora) e 1 (superfície totalmente refletora). Entre os planetas telúricos, os albedos médios do disco planetário são, em ordem crescente: 0,06 (Mercúrio), 0,16 (Marte), 0,36 (Terra) e 0,76 (Vênus). Para os planetas jovianos, os albedos médios são: 0,73 (Júpiter), 0,76 (Saturno), 0,84 (Netuno) e 0,93 (Urano). Plutão, tem albedo médio 0,47. Nota-se que Vênus e os planetas jovianos, que têm atmosferas densas, refletem mais luz que os demais.

### 5.4.1 Figuras de superfície

A estrutura interna dos planetas telúricos demonstra ter havido no passado um processo de diferenciação dos materiais, através do qual os elementos químicos mais pesados se concentram nas partes centrais, e os mais leves na superfície. Esse processo ocorreu durante a fase de agregação de massa dos planetas, que deve ter sido extremamente violenta pois os planetas foram crescendo às custas da agregação colisional de blocos rochosos. A estrutura inicial era a de um corpo muito quente, fundido, que, cessada a agregação colisional, foi perdendo calor e criando uma crosta sólida. Essa crosta, flutuava sobre o material fundido, e foi espessando à medida em que o planeta perdia calor.

O calor interno provém da energia liberada por decaimento radioativo de elementos químicos instáveis e da conversão de energia gravitacional em energia térmica. O calor interno é transportado para a superfície por *convecção* (transporte de calor em meio fluido) e *condução* (transporte de calor em meio sólido). Quanto maior for a massa do planeta, maior será a produção de calor interno e mais lento será o resfriamento. Não havendo atmosfera a superfície, aquecida pelo calor proveniente do interior, resfria-se rapidamente.

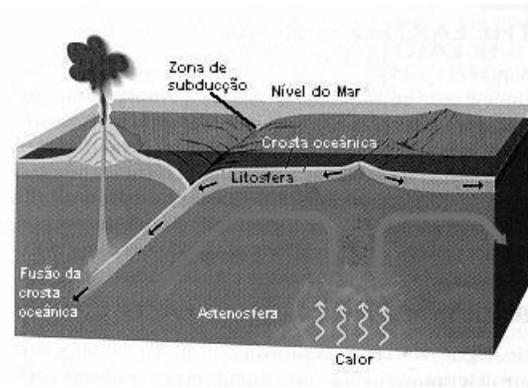
Formada a superfície primitiva, processos físicos posteriores provocaram alterações morfológicas da crosta. Esses processos físicos são discutidos a seguir.

#### Atividade geológica

Ao se resfriar o volume do planeta diminui, assim como a área de sua crosta sólida. A crosta é formada por placas extensas, apoiadas sobre um manto plástico (maleável) que se deforma sob a ação de lentos movimentos convectivos. Sob pressão, as placas se comprimem, e se movimentam da forma como está esboçado na Figura 5.24. Com o resfriamento, a crosta torna-se mais espessa e a atividade geológica diminui. Portanto, a escala de tempo para que esse processo ocorra depende do tamanho do planeta; os corpos maiores devem ser geologicamente mais ativos, e demoram mais para se tornarem inativos. É essa acomodação geológica que cria figuras de superfície, como montanhas, vulcões, enrugamento, falhas, vales, etc.

A história de cada planeta é única, traçada pelos processos decorrentes da sua evolução. A litosfera lunar, por exemplo, é cerca de mil vezes mais espessa que a terrestre. Não há

atividades sísmicas na Lua. Outro exemplo é Marte: lá existe um vulcão extinto enorme, o Monte Olimpo. Sua base mede cerca de 600 km, e sua altura quase 27 km (três vezes a altura do Monte Everest). Isto evidencia que a rachadura que permitiu que o material fundido escoasse para a superfície permaneceu estacionária por muito tempo; um indício de crosta espessa. Na Terra a crosta é mais fina e se acomoda com mais facilidade. Devido ao movimento da litosfera, muitos vulcões vão se tornando inativos, enquanto outros vão surgindo. A cadeia de vulcões do Havaí retrata esta



**Figura 5.24** Acomodação da camada mais externa da crosta terrestre. As colisões entre as placas conduzem a evolução da estrutura da superfície.

situação. Entre os planetas telúricos, a Terra apresenta a maior atividade geológica; Marte, a menor (hoje extinta). Os dois hemisférios de Marte (Figura 5.25) apresentam diferenças significativas; o hemisfério norte é mais elevado, mais plano e mais recente. A atividade vulcânica praticamente se restringiu a esse hemisfério; nele está o Monte Olimpo.

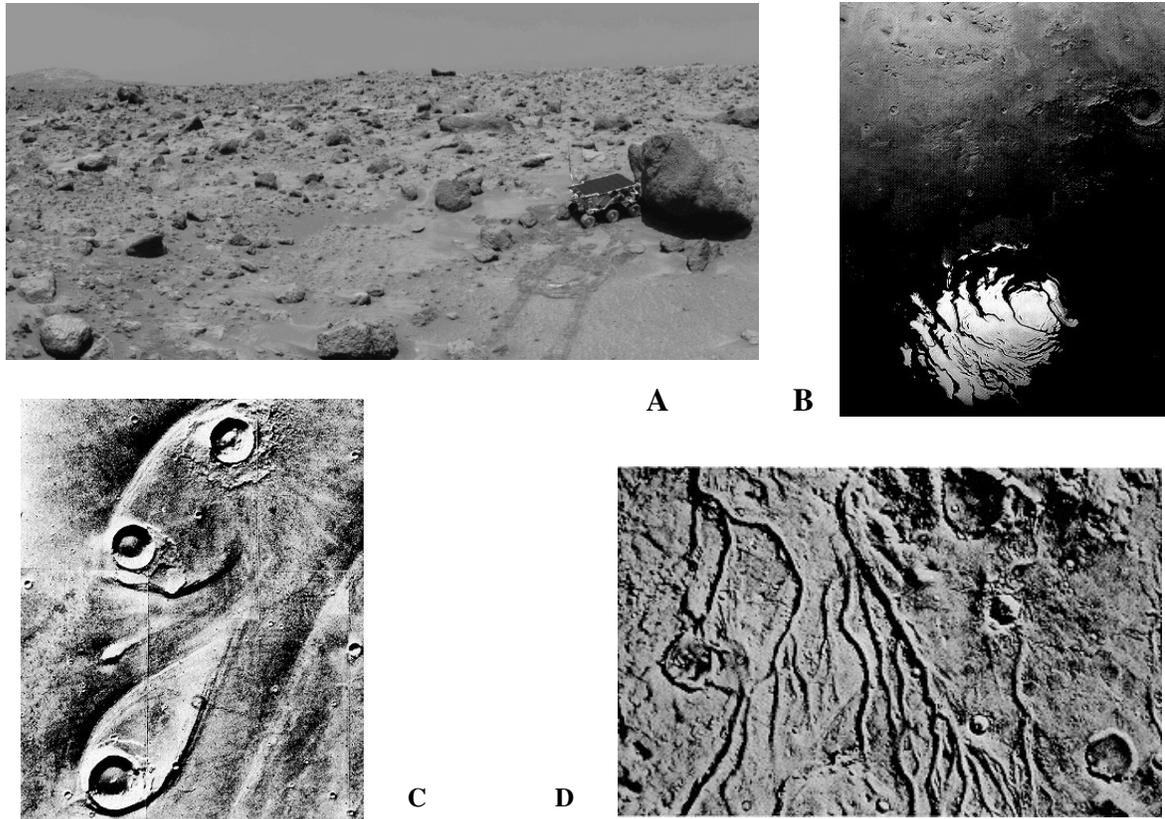
Cerca de 60% da superfície de Vênus (Figura 5.26) consiste de planícies onduladas de formação granítica primitiva, com crateras rasas de diâmetros entre 500 km e 800 km. Do restante, cerca de 25% da superfície é região baixa e escura, preenchida com lava solidificada. Duas elevações, correspondendo cerca de 15% da área superficial, marcam a superfície venusiana: (1) a Terra de Afrodite, na zona equatorial, é do tamanho do continente sul-americano; e (2) a Terra de Ishtar, a 70° de latitude norte, onde se encontram os Montes Maxwell, que têm cerca de 12 km de altura. Essa estrutura superficial de Vênus deve ter sido de alguma forma influenciada pela elevada temperatura superficial (cerca de 500 K).

Mercúrio tem a superfície marcada por crateras e grandes áreas circulares causadas por impacto. Sua superfície é muito antiga (3 a 4 bilhões de anos), e não apresenta indícios de deriva de continentes ou vulcanismo (Figura 5.27).

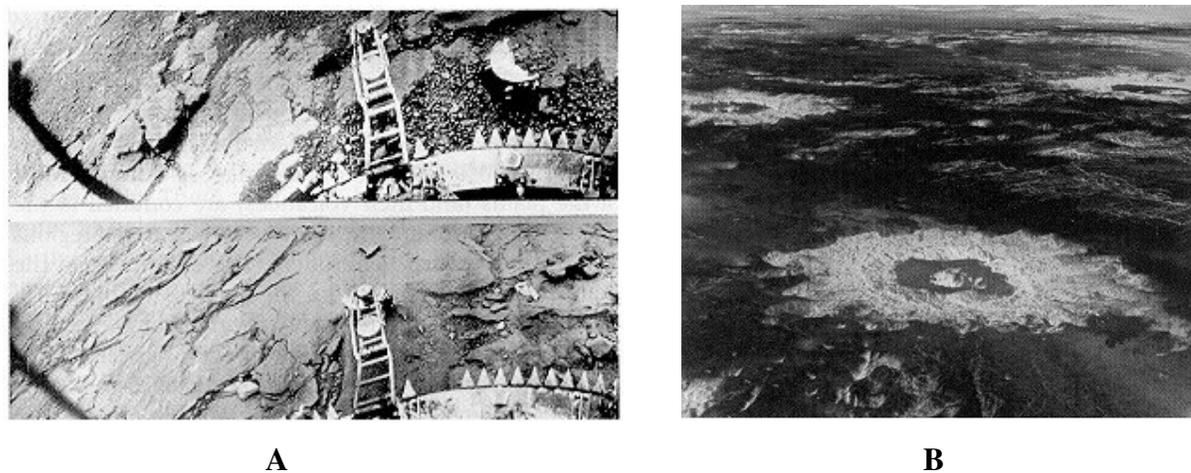
Entre os satélites, vários apresentam resquícios de atividade geológica e vulcanismo. Este assunto será tratado adiante, em seção específica.

### Erosão

Erosão é um processo resultante da ação da atmosfera, da hidrosfera e da sublimação. A movimentação padronizada de massas gasosas se manifesta através dos ventos, que erodem a superfície e arrastam partículas sólidas. Na Terra, um resultado claro da erosão é a existência de rochas sedimentares cobrindo vastas extensões. A superfície de Marte, praticamente desértica (Figura 5.25A), é recoberta por uma camada relativamente homogênea de poeira (argila), e apresenta dunas, que são figuras de superfície que denunciam a existência de fortes rajadas de vento. As tempestades de poeira em Marte são conhecidas há muito, e alteram tanto a aparência que provocou no passado discussões acaloradas, incluindo a possibilidade de existência de organismos vivos e, até mesmo, de seres inteligentes. Os dados das sondas *Mariners* (após 1965) descartaram definitivamente essas interpretações.

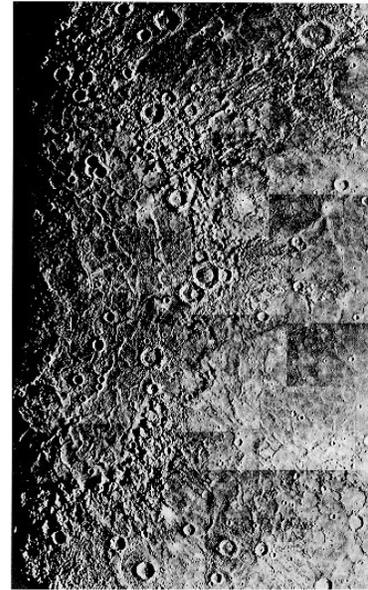


**Figura 5.25** Em cima. (A) A superfície marciana é desértica, composta basicamente de argila. (B) Compostas essencialmente de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  congelados, as capas polares crescem no inverno e encolhem no verão. Embaixo. (C) Ilhas, construídas através da erosão por escoamento de líquido. (D) Canais, possivelmente cavados pelo escoamento de água. (Imagens da NASA)



**Figura 5.26** A superfície de Vênus. (A) Imagem obtida pela sonda russa no.14, do programa espacial russo Venera, na década de 70. (B) Crateras de impacto reveladas pela sonda americana Magalhães (lançada no início da década de 90). Esta imagem artificial foi construída a partir de dados de radarmetria. (NASA)

A erosão fluvial, provocada pelo escoamento de líquidos, é bem exemplificada pelo caso terrestre. Os rios, com seus leitos tortuosos erodidos pelo escoamento da água das regiões mais elevadas para as mais baixas, são a melhor evidência. A sinuosidade não é definitiva, pode evoluir com o tempo. Desaparecendo as águas, os leitos permanecem até que outros processos erosivos os destruam. Escorrimento de lavas vulcânicas também provoca efeito similar. Neste caso, elas estão concentradas nas regiões vizinhas aos vulcões. Erosão semelhante pode ser também provocada por movimentação de gelo. O gelo das montanhas, escoam para baixo num movimento muito lento, mas de forma semelhante à água. O atrito entre o gelo e a superfície cria leitos, que se tornariam evidentes caso o gelo desaparecesse. Índícios de erosão fluvial e/ou vulcânica são encontrados nas superfícies dos planetas telúricos e de alguns satélites, inclusive da Lua.



**Figura 5.27** A Base Caloris de Mercúrio. Um impacto violento que provocou enrugamento do terreno na região antipodal.

## Crateras

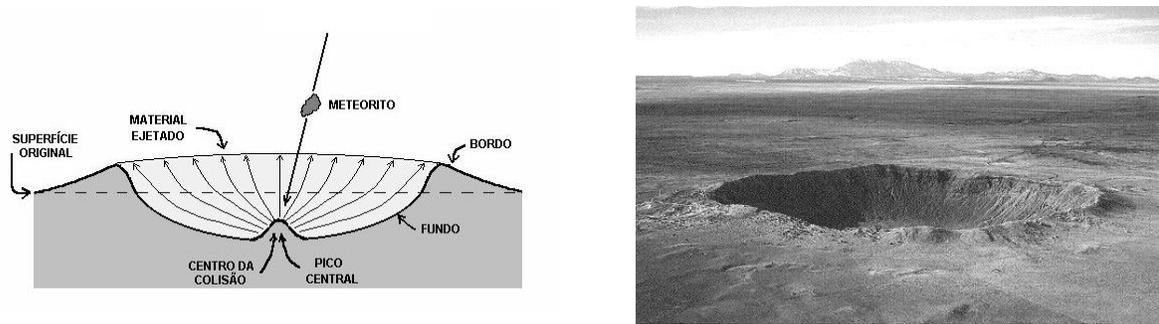
Uma figura de superfície muito comum é a cratera de impacto, provocada pela queda de *meteoróides*<sup>12</sup>. Devido à velocidade elevada de queda (11-53 km/s), quantidades enormes de energia<sup>13</sup> são liberadas durante o impacto, resultando numa cratera. A Figura 5.28A mostra o esboço do perfil de uma cratera de impacto. O diâmetro e a profundidade da cratera são governados pela violência do impacto. A característica marcante de uma cratera de impacto é o seu perfil: seus bordos são pouco elevados e de inclinação suave, e a parte central apresenta um pico. O material do fundo da cratera é uma mistura de solo (da superfície e das camadas mais profundas) e material meteorítico. O impacto pode provocar fusão e *metamorfismo*<sup>14</sup>. Nos impactos mais violentos podem surgir crateras com bordos duplos, ou mesmo detonar um processo vulcânico, isto é, a escavação da crosta pode torná-la mais fina e menos resistente à pressão interna, facilitando a liberação de lava. Assim surgiram os mares lunares. A Figura 5.28B mostra a Cratera do Meteoro (Arizona, EUA), com cerca de 1,2 km de diâmetro e 240 m de profundidade. Na Serra da Cangalha, Maranhão, há uma cratera de bordo duplo com diâmetros aproximados de 3 km (interno) e 12 km (externo). A intempérie e a vegetação praticamente desfiguram essa cratera.

Através de uma análise estatística da distribuição de crateras por unidade de área, é possível determinar as idades relativas. Combinando-se estes dados com os obtidos da datação radioativa, pode-se inferir as idades dos terrenos. Na Lua, por exemplo, o bombardeamento foi intenso durante 500 milhões de anos, isto há 3,9 bilhões de anos. A maioria das crateras marcianas têm idades superiores a 3 bilhões de anos. Portanto, a presença de crateras evidencia

<sup>12</sup> Blocos rochosos que vagam pelo espaço interplanetário. Quando caem no solo, são chamados *meteoritos*.

<sup>13</sup> A energia por unidade de massa (erg/g) liberada pelo impacto pode ser dezenas de vezes maior que aquela liberada pelo TNT.

<sup>14</sup> Transformação que sofre uma rocha sob a ação de temperatura, pressão, gases e vapor de água, que produzem uma recristalização parcial ou total, formando-se novos minerais e novas texturas sem ocorrer fusão da rocha.



**Figura 5.28** **A** (esquerda): Perfil de uma cratera de impacto. **B** (direita): Cratera do Meteoro, no Arizona (EUA).

a idade da superfície. Assim, uma superfície com poucas ou nenhuma cratera é uma superfície recente, que pode ter sido formada por obliteração das crateras antigas através de preenchimento de material fluido, como lava ou líquidos. Io, satélite de Júpiter, só apresenta crateras vulcânicas ativas; Europa têm superfície recoberta por gelo. Estes são apenas dois exemplos.

## 5.5 Atmosfera planetária

Nem todos os planetas e os satélites possuem atmosferas. Essencialmente, os parâmetros que controlam a existência e manutenção de uma atmosfera são massa e temperatura. Admitamos por um momento (adiante discutiremos este assunto detalhadamente) que os planetas e os satélites surgiram através de um processo de acúmulo de massa, que nos corpos maiores foi marcado pela violência dos impactos. A despeito das diferenças de composição química, durante esse processo de crescimento houve liberação de gases, portanto houve uma atmosfera primitiva, mesmo que tênue. A evolução posterior depende da atividade do próprio planeta e da sua capacidade de reter essa atmosfera.

Sir James Jeans (1916) propôs um mecanismo de retenção atmosférica, baseado na temperatura e na gravidade locais. Em um gás à temperatura  $T$ , átomos e moléculas agitam-se com velocidades proporcionais às suas temperaturas e inversamente proporcionais às suas massas; matematicamente a velocidade térmica média é dada por:

$$\langle v \rangle = 2 \times \sqrt{\frac{2kT}{\pi m}}$$

onde  $k$  ( $1,38 \times 10^{-11}$  joule/K) é a constante de Boltzmann.

Para um corpo esférico de massa  $M$  e raio  $R$ , a velocidade de escape é dada por:

$$\langle v_{esc} \rangle = \sqrt{\frac{2GM}{R+h}}$$

onde  $G$  ( $6,67 \times 10^{-11}$   $\text{Nm}^2/\text{kg}^2$ ) é a Constante Universal de Gravitação, e  $h$  a altura acima da superfície. Qualquer objeto que abandona a superfície com velocidade igual ou superior à velocidade de escape jamais retornará se seu movimento for orientado radialmente para fora e se não for freado por colisão. Os átomos e as moléculas atmosféricas estão sob a ação da força gravitacional. Portanto, quando  $\langle v \rangle$  for maior ou igual a  $\langle v_{esc} \rangle$ , ocorrerá perda atmosférica.

Olhando para as duas equações vê-se que quanto maior for a temperatura atmosférica e/ou menor a massa do planeta, ou satélite, maior será a chance de inexistência de atmosfera.

Ainda, é mais fácil reter gases pesados que gases leves. A perda dos gases mais pesados pode ocorrer através da quebra das moléculas. Por exemplo, na atmosfera terrestre, o vapor de água ao atingir alturas elevadas absorve a radiação ultravioleta solar, e a molécula é dissociada em um radical hidroxila (OH) e um átomo de hidrogênio (H). Se não houver recombinação, o átomo de hidrogênio poderá se perder, destruindo assim uma molécula de água. Isto acontece com outros gases.

Merúrio é um planeta pequeno e está muito próximo do Sol, por isso ele praticamente não tem atmosfera. Marte é ligeiramente maior e está mais afastado do Sol, por isso ainda retém uma atmosfera tênue, basicamente composta de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ , que são gases pesados. Vênus e Terra são praticamente iguais em tamanho, mas a Terra está mais afastada do Sol; ambos têm atmosferas, porém de elementos pesados como  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ .

Os planetas jovianos têm grandes massas e estão distantes do Sol, o que facilita a retenção atmosférica. Júpiter e Saturno têm atmosferas ricas em  $\text{H}_2$  e He, que são os dois gases mais leves. Já Urano e Netuno possuem atmosferas ricas em gases mais pesados como  $\text{CH}_4$  e  $\text{NH}_3$ . Todos, porém, têm atmosferas espessas. Veja a Tabela 5.1.

### 5.5.1 Atmosferas primitivas e secundárias

Atmosfera primitiva é aquela que o planeta tinha na época em que foi formado. Sua composição química deve ser a mesma da nebulosa primitiva que deu origem ao Sistema Solar. A reciclagem de compostos atmosféricos através da crosta, hidrosfera e biosfera modificam a composição química inicial, dando origem a uma atmosfera secundária.

Nos planetas telúricos, as atmosferas atuais apresentam alterações químicas significativas se comparadas à composição química primitiva. Na Terra, por exemplo, há deficiência do Ne, que não pode ser justificada nem pelo mecanismo de perda, porque é um gás pesado, nem através de reações químicas, porque trata-se de um gás nobre. Portanto, se ele estava presente no passado então a atmosfera primitiva foi perdida, provavelmente pela ação de um vento solar<sup>15</sup> intenso.

O hidrogênio é um outro caso. Ele é mais abundante na Terra que em Vênus e Marte. Existindo hidrogênio atômico em qualquer um destes planetas, ele se perderá; é apenas uma questão de tempo. Portanto, o hidrogênio só poderá existir se estiver retido quimicamente. Na Terra, ele é abundante sobretudo porque a água é abundante. Em forma de vapor, a molécula da água sofrerá dissociação sob a luz ultravioleta, produzindo o hidrogênio atômico. Ou seja, o calor e a luz ultravioleta podem colaborar para a transformação química da atmosfera. O oxigênio atômico, sendo um elemento pesado, precipita-se sobre a crosta e reage quimicamente com as rochas incorporando-se sob a forma de silicatos e óxidos. Este parece ter sido o mecanismo que atuou na evolução química das atmosferas de Vênus e Marte. Nitrogênio e carbono, ao contrário, aparecem em proporções praticamente iguais nesses três planetas.

O degasamento provocado por atividade vulcânica atua como mecanismo importante de evolução atmosférica, introduzindo principalmente gases pesados. Quando presente, a biosfera tem papel fundamental na liberação do oxigênio.

### 5.5.2 Estrutura atmosférica

---

<sup>15</sup> Fluxo de partículas eletricamente carregadas emitido pelo Sol (assunto discutido adiante).

A atmosfera se apresenta de forma estruturada, isto é, com temperatura e composição química variando com a altura. A Figura 5.29 mostra a estrutura atmosférica terrestre típica (não localizada), que pode variar ligeiramente no decorrer do dia e com as estações sazonais.

A *troposfera*, camada mais baixa, interage diretamente com a superfície, por isso nela a temperatura cai com a altura. O calor emanado da superfície é transportado por correntes ascendentes de ar quente (convecção) ou por difusão da radiação infravermelha. Aqui acontecem os fenômenos meteorológicos, e onde a concentração de vapor d'água é maior.

Acima, vem a *estratosfera*, uma camada onde a temperatura cresce com a altura, porque o aquecimento é devido à absorção da luz ultravioleta Solar pelo ozônio ( $O_3$ ) que se concentra próximo ao limite superior desta camada. A diminuição da concentração do ozônio, provocada, por exemplo, pela emissão do gás CFC (clorofluor carbono) utilizado em “sprays” e refrigeradores, permitirá que a radiação ultravioleta, extremamente prejudicial à biosfera, atinja camadas mais baixas, até mesmo a superfície.

A terceira camada atmosférica é a *mesosfera*; nela a temperatura volta a cair com a altura porque a quantidade de absorveres de luz ultravioleta diminui e aumenta a perda de calor pelo  $CO_2$ .

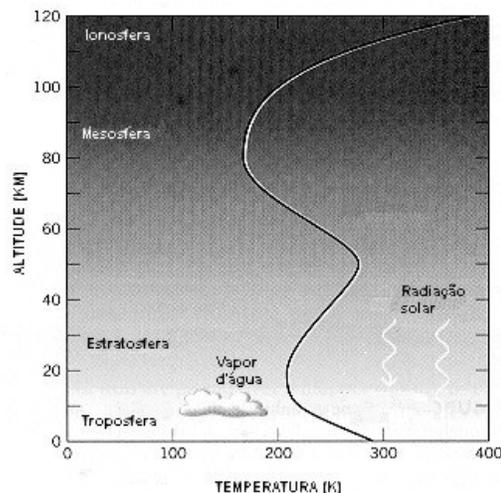
Por último, vem a *termosfera*, camada onde o temperatura volta a crescer com a altura, graças à absorção da luz solar pelo oxigênio, que se ioniza e se dissocia. Por esta razão, esta camada pode ser apresentada apenas como *ionosfera*.

A região atmosférica acima dos 500 km é denominada *exosfera*. A temperatura cinética dos gases é superior a 1.500 K, por isso qualquer átomo que aqui chegar certamente abandonará a Terra.

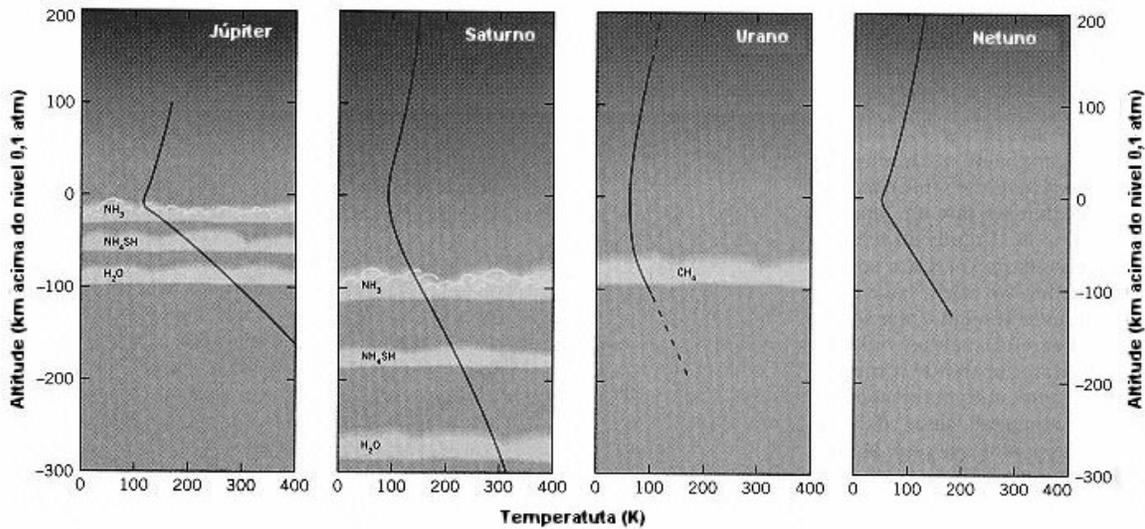
A Figura 5.30 mostra as previsões teóricas das estruturas atmosféricas dos planetas jovianos.

### 5.5.3 Circulação atmosférica terrestre

Diariamente temos acesso às previsões meteorológicas, que nos informam sobre a existência de nuvens, sistemas de alta e baixa pressões, chuvas e fenômenos mais violentos como os furacões. Esta dinâmica não é tão simples, mas é fortemente governada pelo conteúdo de vapor d'água, muito eficiente no aprisionamento do calor. Cerca de 75% da superfície terrestre é coberta por água. Como o solo retém mais calor que a água os continentes são mais quentes. O gás aquecido expande-se e altera a pressão atmosférica. Essas mudanças alteram a densidade do ar, força o ar quente a mover-se para cima, iniciando a convecção. Isto dá origem às zonas de alta e baixa pressões (Figura 5.31). No equador, o ar aquecido expande-se fazendo a pressão diminuir. Os gases mais frios das regiões vizinhas movem-se para essas



**Figura 5.29** Estrutura da atmosfera da Terra. (Adaptado de R.R.Robbins *et al.*, fig.8-11, p.153)



**Figura 5.30** Estrutura atmosférica dos planetas jovianos. (Adaptada de R.R.Robbins, fig. 10-7, p.212)

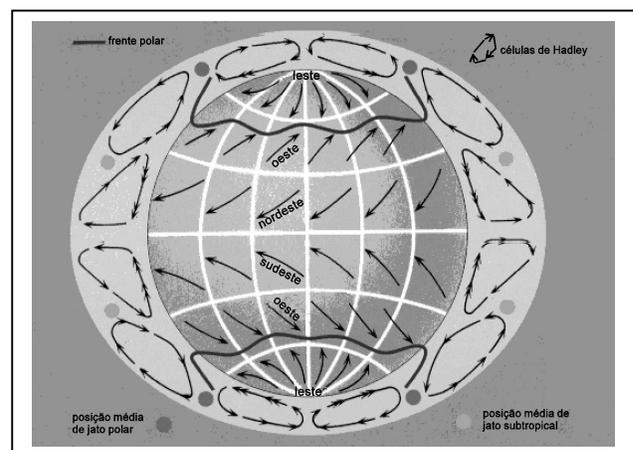
regiões de baixa pressão, causando os ventos de superfície. Os gases aquecidos do equador que se moveram para altitudes maiores, deslocam-se para as regiões polares, esfriam, descem novamente para a superfície, e movem-se para as regiões do equador, fechando assim o circuito.

Uma das conseqüências do movimento de rotação da Terra é o desvio de direção provocado pelo Efeito Coriolis. Quando algo se move em linha reta para o norte, seu movimento é desviado para leste. Portanto, a trajetória final não é retilínea, mas encurvada para leste. Isto

impede os gases de se moverem conjuntamente, e os força a se moverem em células. Células ascendentes (gases aquecidos) ocorrem nas zonas de baixa pressão, e células descendentes (gases frios) são encontradas nas zonas de alta pressão. Essa movimentação celular quando ocorre nas latitudes  $30^\circ$  e  $60^\circ$  produz ventos de alta velocidade. O padrão final de movimento é aquele mostrado na Figura 5.31. Os planetas que têm rotação mais rápida devem apresentar um padrão de circulação mais complexo.

#### 5.5.4 Efeito estufa

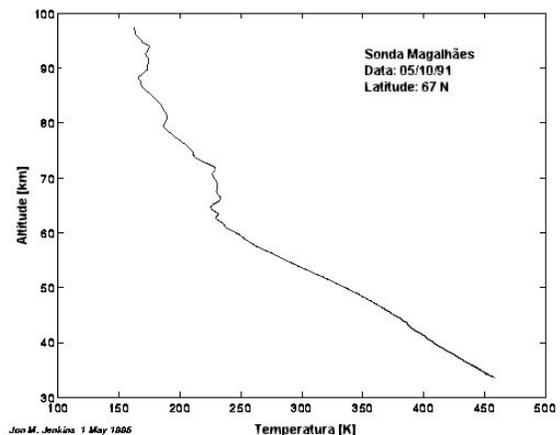
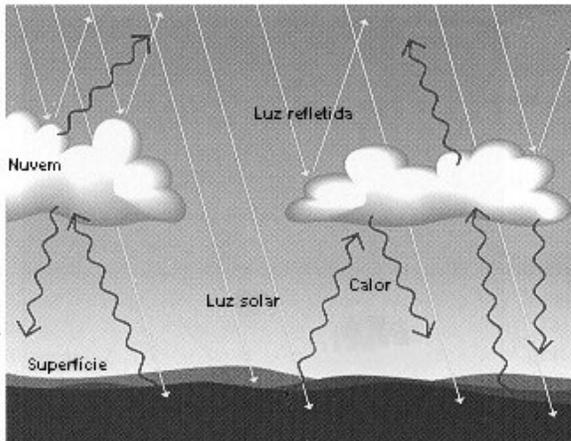
Dentro de uma estufa a temperatura é maior do que a externa porque a luz solar que passa pelo vidro, aquece o meio, e o calor fica ali retido porque a radiação infravermelha não passa pelo vidro. Na atmosfera, alguns elementos químicos desempenham o papel do vidro, retendo o calor proveniente da superfície planetária. Na Terra, o calor é parcialmente retido pelo vapor de água, e pelo  $\text{CO}_2$ . O processo de retenção do calor é representado na Figura



**Figura 5.31** Padrão de circulação atmosférica terrestre.

5.32A. Parte da radiação solar é refletida no topo das nuvens. A luz incidente que passa pela atmosfera aquece a superfície, e esta emite calor em forma de radiação infravermelha. Esta radiação é refletida na base das nuvens, voltando para o solo. Assim, o calor fica retido e a temperatura aumenta até que haja um equilíbrio térmico.

Em Vênus, 87% da atmosfera é composta de  $\text{CO}_2$ . A pressão atmosférica na superfície é 100 vezes maior que a correspondente na Terra. Por esta razão, o efeito estufa lá é muito eficiente, fazendo com que a temperatura na superfície atinja quase 500 K. Se existir água, ela estará em forma de vapor e presente apenas em altitudes elevadas. A Figura 5.32B mostra a dependência da temperatura com a altura, baseada nos dados colhidos pela sonda americana Magalhães.



**Figura 5.32** O calor produzido pela insolação fica retido na atmosfera, criando o efeito estufa. **A** (esquerda): na Terra, ele é produzido essencialmente pela água e pelo dióxido de carbono. (Adaptado de R.R.Robbins, fig.8-12, p.154) **B** (direita): em Vênus, ele é produzido pelo dióxido de carbono, provocando temperaturas muito elevadas. (NASA)

### 5.5.5 Auroras polares

*Auroras* são efeitos luminosos observados nas regiões polares: aurora *boreal*, no hemisfério norte, e aurora *austral*, no hemisfério sul. Elas ocorrem entre 80 e 300 km de altitude, e podem durar de minutos até horas. Forma, cor e intensidade variam muito rapidamente no tempo. As cores podem ser: verde, amarelo esverdeado ou vermelha.

O fenômeno é provocado pela colisão entre partículas solares eletricamente carregadas (elétrons e prótons) e o oxigênio e/ou nitrogênio atmosféricos. Liberadas pelo Sol a grandes velocidades, essas partículas interagem com a magnetosfera, e penetram a atmosfera terrestre através dos pólos magnéticos norte e sul. Isto provoca a excitação dos átomos e moléculas atmosféricos, que acabam emitindo radiação visível. A Figura 5.33 mostra uma aurora boreal.



**Figura 5.33** Aurora boreal.

### 5.5.6 A Grande Mancha Vermelha de Júpiter

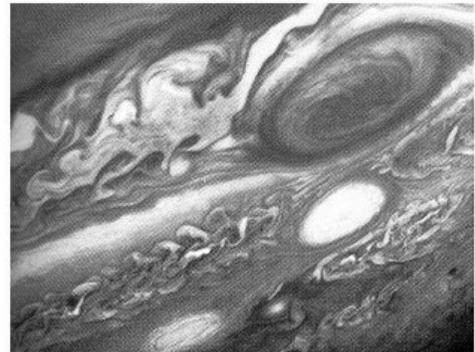
O padrão atmosférico de Júpiter é extremamente complexo e marcado por faixas de circulação atmosférica, paralelas ao seu equador, de cores, formato e tonalidades diferentes. Dentre as figuras expostas, a Grande Mancha Vermelha (GMV) é certamente a mais marcante. Ela já é conhecida a cerca de 300 anos, gira em sentido anti-horário, e seu tamanho (cerca de 14.000 km × 30.000 km) tem permanecido praticamente o mesmo.

Semelhante a um anticiclone terrestre, ela contém gases ascendentes que transportam a energia proveniente das regiões mais internas. Como Júpiter tem rotação rápida, o Efeito Coriolis é mais acentuado, fazendo com que a velocidade de rotação da mancha seja elevada, e sua morfologia complexa. Embora haja quem advogue que a GMV seja uma figura perene, numa atmosfera densa e enorme como a de Júpiter a escala de tempo de vida de uma tempestade ciclônica, prevista por modelos teóricos, é da ordem de 300 anos.

Como as faixas de circulação atmosférica giram com velocidades diferentes, nas zonas fronteiriças ocorre uma espécie de sisalhamento, provocando padrões turbulentos semelhantes àqueles causados no ar pela passagem de um avião.

Pode-se distinguir, pelos menos, três componentes: (a) zonas mais elevadas de cor clara, constituída de cristais de amônia congelados, (b) zonas intermediárias de cor ligeiramente marrom e (c) zonas mais profundas de cor azulada. A sonda americana Galileu registrou uma abundância de He menor que a solar, mas isto pode estar associado a um processo de diferenciação, através do qual esse elemento químico estaria migrando para as partes mais profundas. Outros compostos identificados na atmosfera joviana incluem metano, etano e amônia. A temperatura no topo da atmosfera é da ordem de 130K.

Saturno também apresenta um padrão de circulação semelhante, porém bem menos complexo. Urano, ao contrário, apresenta uma atmosfera de cor azulada (o metano reflete a luz de cor azul e absorve a de cor vermelha) praticamente homogênea. Já Netuno, apresenta duas estruturas atmosféricas que lembram um pouco as de Júpiter: a Grande Mancha Escura e a “Scooter”, uma pequena mancha branca vizinha àquela.



**Figura 5.34** Padrão de circulação atmosférica joviana destacando a Grande Mancha Vermelha. (NASA)

## Referência

R.R.Robbins, W.H.Jefferys and S.J.Shawl, *Discovering Astronomy*, John Wiley & Sons, Inc. (1995)