

## Capítulo 16

# O Sol - a nossa estrela

O Sol, nossa fonte de luz e de vida, é a estrela mais próxima de nós, e a que melhor conhecemos. Basicamente, é uma enorme esfera de gás incandescente, em cujo núcleo acontece a geração de energia através de reações termo-nucleares. O estudo do Sol serve de base para o conhecimento das outras estrelas, que de tão distantes aparecem para nós como meros pontos de luz.



Figura 16.1: Foto do Sol na linha  $H\alpha$  do hidrogênio, obtida pelo National Solar Observatory, EUA. Os filamentos escuros são proeminências.

Apesar de parecer tão grande e brilhante (seu brilho aparente é 200 bilhões de vezes maior do que o de Sírius, a estrela mais brilhante do céu noturno), na verdade o Sol é uma estrela bastante comum. Suas principais características são:

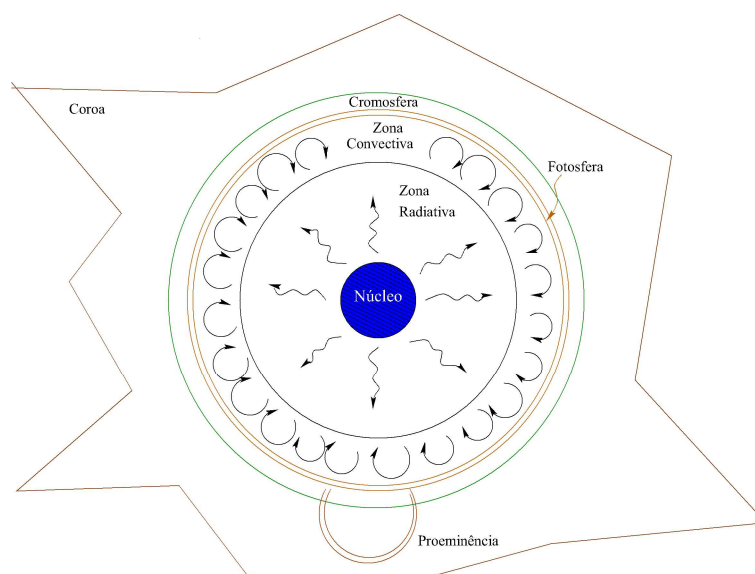
Massa	$M_{\odot} = 1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$
Raio	$R_{\odot} = 6,960 \times 10^8 \text{ m}$
Densidade média	$\rho = 1409 \text{ kg m}^{-3}$
Densidade central	$\rho_c = 1,6 \times 10^5 \text{ kg m}^{-3}$
Distância	$1 \text{ UA} = 1,496 \times 10^8 \text{ km}$
Luminosidade	$L_{\odot} = 3,9 \times 10^{33} \text{ ergs/s}$
Temperatura efetiva	$T_{\text{ef}} = 5785 \text{ K}$
Temperatura central	$T_c = 1,5 \times 10^7 \text{ K}$
Magnitude absoluta bolométrica	$M_{\text{bol}} = 4,72$
Magnitude absoluta visual	$M_V = 4,79$
Tipo espectral e classe de luminosidade	G2 V
Índices de cor	$B - V = 0,62$ $U - B = 0,10$
Composição química principal	Hidrogênio = 91,2 % Hélio = 8,7% Oxigênio = 0,078 % Carbono = 0,049 %
Período rotacional no equador	25 d
na latitude 60°	29 d

Algumas das características listadas acima são obtidas mais ou menos diretamente. Por exemplo, a **distância** do Sol, chamada *Unidade Astronômica*, é medida por ondas de radar direcionadas a um planeta em uma posição favorável de sua órbita (por exemplo Vênus, quando Terra e Vênus estão do mesmo lado do Sol e alinhados com ele). O **tamanho** do Sol é obtido a partir de seu tamanho angular e da sua distância. A **massa** do Sol pode ser medida a partir do movimento orbital da Terra (ou de qualquer outro planeta) usando a terceira lei de Kepler. Sabendo então sua massa e seu raio temos a **densidade média** do Sol. Pela densidade média podemos inferir sua **composição química média**.

Outras características são determinadas a partir de modelos. Por exemplo, a equação de equilíbrio hidrostático, descrita no capítulo Evolução Estelar, permite determinar a **pressão** e a **temperatura** no centro do Sol, supondo que elas têm que ser extremamente altas para suportar o peso das camadas mais externas.

## 16.1 Estrutura do Sol

O modelo representado na figura mostra as principais regiões do Sol. A **fotosfera**, com cerca de 330 km de espessura e temperatura de 5785 K,



é a camada visível do Sol. Logo abaixo da fotosfera se localiza a **zona convectiva**, se estendendo por cerca de 15% do raio solar. Abaixo dessa camada está a **zona radiativa**, onde a energia flui por radiação. O **núcleo**, com temperatura de cerca de 10 milhões de Kelvin, é a região onde a energia é produzida, por reações termo-nucleares. A **cromosfera** é a camada da atmosfera solar logo acima da fotosfera. Ela tem cor avermelhada e é visível durante os eclipses solares, logo antes e após a totalidade. Estende-se por 10 mil km acima da fotosfera e a temperatura cresce da base para o topo, tendo um valor médio de 15 mil K. Ainda acima da cromosfera se encontra a **coroa**, também visível durante os eclipses totais. A coroa se estende por cerca de dois raios solares.

### 16.1.1 A fotosfera

A fotosfera do Sol tem a aparência da superfície de um líquido em ebulição, cheia de bolhas, ou grânulos. Este fenômeno é chamado de **granulação fotosférica**. Os grânulos têm em torno de 1500 km de diâmetro, e duram cerca de 10 min cada. Eles marcam os topos das colunas convectivas de gás quente, que se forma na zona convectiva, logo abaixo da fotosfera. As regiões escuras entre os grânulos são regiões onde o gás mais frio e mais denso escorrem para baixo. A maior parte do espectro visível do Sol tem origem em uma camada com cerca de 1000 km de extensão, em que a temperatura



Figura 16.2: Foto do Sol na linha de 584 Å do hélio (HeI), obtida pelo satélite SOHO (The Solar and Heliospheric Observatory), da ESA/NASA

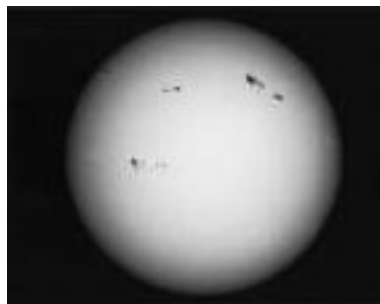


Figura 16.3: Foto do Sol em luz branca, mostrando algumas manchas solares

varia de cerca de 9000 K a 4000 K. A gravidade superficial do Sol é de  $g = 2,738 \times 10^4 \text{ cm/s}^2 = 273,8 \text{ m/s}^2$  (Jorge E. Vernazza, Eugene H. Avrett & Rudolf Loeser, 1973, *Astrophysical Journal*, 184, 605).

O fenômeno fotosférico mais notável é o das **manchas solares**, regiões irregulares que aparecem mais escuras do que a fotosfera circundante e que muitas vezes podem ser observadas mesmo a olho nu, embora olhar diretamente para o Sol só não é perigoso quando ele está no horizonte. As manchas foram registradas na China já no ano 28 a.C., mas seu estudo científico começou com o uso do telescópio, sendo observadas (por projeção da imagem do Sol) por Galileo e Thomas Harriot (1560-1621) já em 1610, e por Johannes (1587-1616) e David Fabricius (1564-1617) e por Christoph Scheiner (1575-1650) em 1611. São constituídas de duas partes: a **umbra**, parte

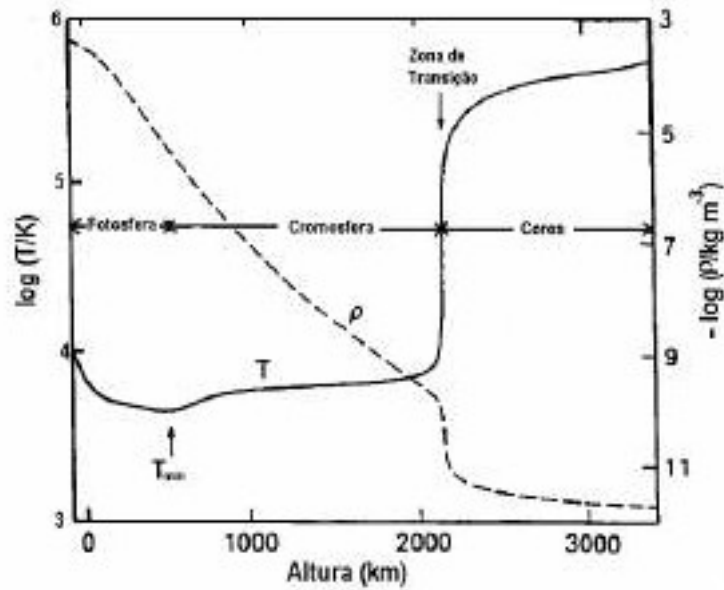


Figura 16.4: Distribuição de temperatura e densidade na atmosfera do Sol.

central mais escura, com temperaturas em torno de 3800 K, e a **penumbra**, região um pouco mais clara e com estrutura radial em torno da umbra. As manchas solares tendem a se formar em grupos, e estão associadas a intensos campos magnéticos no Sol. As manchas solares seguem um ciclo de 11 anos em que o número de manchas varia entre máximos e mínimos, descoberto em 1843 pelo astrônomo amador alemão Samuel Heinrich Schwabe (1789-1875).

### 16.1.2 A cromosfera

A cromosfera do Sol normalmente não é visível, porque sua radiação é muito mais fraca do que a da fotosfera. Ela pode ser observada, no entanto, durante os eclipses, quando a Lua esconde o disco da fotosfera. Veremos, no capítulo de espectroscopia, que o Sol tem um espectro contínuo com linhas escuras (de absorção). Esse espectro é o da fotosfera. No entanto, olhando a borda do Sol com um espectroscópio, durante um eclipse, temos a oportunidade de ver por alguns instantes o espectro da cromosfera, feito de linhas brilhantes, que mostram que a cromosfera é constituída de gases quentes que emitem luz na forma de linhas de emissão. Essas linhas são difíceis de serem observadas



Figura 16.5: Foto do eclipse total de 4 de novembro de 1994, obtida pelos autores em Santa Catarina, Brasil, mostrando a cromosfera.

contra a luz brilhante da fotosfera, por isso não as vemos no espectro solar normal.

Uma das linhas cromosféricas de emissão mais brilhantes é a linha de Balmer  $H\alpha$ , no comprimento de onda  $6563 \text{ \AA}$ , que no espectro solar normal aparece em absorção. A linha  $H\alpha$  está no vermelho, por isso a cromosfera tem cor avermelhada.

Uma fotografia do Sol tirada com filtro  $H\alpha$  deixa passar a luz da cromosfera, e permite ver que a cromosfera tem uma aparência ondulada devido à presença de estruturas chamadas **espículas**, jatos de gás que se elevam a até 10 mil km acima da borda da cromosfera, e duram poucos minutos. As espículas, observadas contra o disco do Sol, aparecem como filamentos escuros; nas bordas, aparecem como labaredas brilhantes.

A temperatura na cromosfera varia de 4300 K na base a mais de 40 000 K a 2500 km de altura. Esse aquecimento da cromosfera deve ter uma fonte de energia que não são os fótons produzidos no interior do Sol, pois se a energia fosse gerada por fótons a cromosfera deveria ser mais fria do que fotosfera, e não mais quente. Atualmente se pensa que a fonte de energia são campos magnéticos variáveis formados na fotosfera e transportados para a coroa por correntes elétricas, deixando parte de sua energia na cromosfera.



Figura 16.6: Foto do Sol obtida pela estação espacial Skylab da NASA em 19 de dezembro de 1973, com um dos mais espetacular flares solares já gravados. A proeminência abrange mais de 588 000 km. Os pólos solares apresentam pouca super-granulação, e um tom mais escuro do que o centro do disco.

### 16.1.3 A Coroa

A cromosfera gradualmente se funde na coroa, a camada mais externa e mais rarefeita da atmosfera do Sol. A coroa também é melhor observada durante eclipses, pois apesar de ter um brilho equivalente ao da lua cheia, ela fica obscurecida quando a fotosfera é visível.

O espectro da coroa mostra linhas muito brilhantes que, até 1940, não eram conhecidas. Atualmente sabemos que elas são produzidas por átomos de ferro, níquel, neônio e cálcio altamente ionizados, e não por algum elemento estranho, como anteriormente foi pensado. O fato de existirem esses elementos várias vezes ionizados na coroa implica que sua temperatura deve ser muito alta, pois é necessária muita energia para arrancar muitos elétrons de um átomo. A coroa deve ter uma temperatura em torno de 1 milhão de Kelvin.

A elevação da temperatura na coroa deve ter origem no mesmo processo físico que aquece a cromosfera: transporte de energia por correntes elétricas induzidas por campos magnéticos variáveis.

Da coroa emana o **vento solar**, um fluxo contínuo de partículas emitidas da coroa que acarretam uma perda de massa por parte do sol em torno de  $10^{-13}M_{\odot}$  por ano. O vento solar que atinge a Terra (aproximadamente  $7$  prótons/cm<sup>3</sup> viajando a cerca de  $400$  km/s) é capturado pelo campo magnético da Terra, formando o **cinturão de Van Allen**, na magnetosfera terrestre. Este cinturão, descoberto pelo físico americano James Alfred Van

Allen (1914-2006) em 1958, só permite que as partículas carregadas entrem na atmosfera da Terra pelos pólos, causando as **auroras**, fenômenos luminosos de excitação e des-excitação dos átomos de oxigênio.

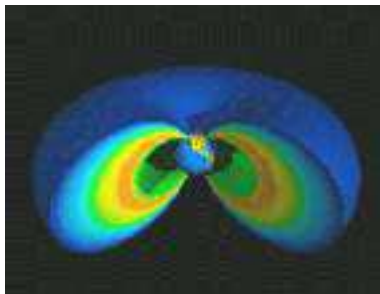


Figura 16.7: Magnetosfera da Terra - cinturão de Van Allen.

Além das partículas do vento solar, existem grandes ejeções de massa associadas às proeminências, que quando atingem a Terra causam danos às redes elétricas e aos satélites. O último máximo do ciclo de 11 anos ocorreu em 1989, e logo após uma grande proeminência solar, a rede elétrica na província de Quebec, no Canadá, sofreu uma grande sobrecarga elétrica que causou vários danos aos equipamentos. Algumas regiões da província ficaram até duas semanas sem luz elétrica. Em 1994, o satélite de comunicações E2 teve alguns circuitos queimados por uma sobrecarga estática, também associada com a ejeção de uma nuvem de plasma solar. O máximo do ciclo solar atual ocorreu em 15 de fevereiro de 2001, quando o campo magnético solar reverteu de polaridade. Uma ejeção coronal de massa também pode causar grandes ondas nas camadas externas do Sol, que podem estar relacionadas com o aquecimento da coroa.

Normalmente as partículas carregadas são desviadas pelo campo magnético da Terra para o Cinturão de Van Allen, e somente chegam à Terra próximo aos pólos. Entretanto o campo magnético terrestre não é um simples dipolo e existe uma depressão no campo, no Atlântico Sul, que faz com que partículas carregadas também cheguem ao solo na região conhecida como Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul. A Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul é uma mancha de fluxo invertido, isto é, uma mancha com fluxo magnético direcionado para dentro dentro do hemisfério de fluxo direcionado para fora. Existem outras manchas menores, tanto no hemisfério norte quanto no hemisfério sul, de acordo com as medições de campo magnético pelos satélites Magsat em 1980 e Oersted em 2000. Estas reversões de fluxo



são similares às que causam as manchas solares: o fluxo de material líquido e ionizado no núcleo da Terra é convectivo, turbulento e distorcido também por rotação diferencial do núcleo externo, líquido (2900 km a 5100 km de profundidade), sobre o núcleo sólido interno, cristalizado e que libera calor latente na cristalização das camadas externas e de separação de elementos menos densos, como sulfeto de ferro e óxido de ferro. Estas manchas mudam de tamanho com o tempo e, quando aumentam até dominar o hemisfério, causam a reversão do campo magnético da Terra. A última reversão ocorreu há 780 mil anos. As ejeções coronais de massas são bolhas de gás quente (plasma), de bilhões de toneladas, aquecidas pelos campos magnéticos do Sol. Os campos magnéticos do Sol se enrolam devido ao movimento turbulento de convecção mas também devido à rotação diferencial, que faz com que o equador solar complete uma volta em 25 dias, enquanto que as regiões próximas aos pólos completam uma volta em 36 dias. A desconexão do campo magnético solar pode ocorrer em alguns minutos e tem uma energia equivalente a milhares de bombas atômicas.

A radiação ultravioleta tem comprimentos de onda menores do que a radiação visível e é normalmente dividida em três faixas: UV-A, UV-B and UV-C. O UV-B, com comprimentos de onda entre 2900 e 3200 Å, é a faixa mais perigosa que alcança a superfície da Terra. O ozônio ( $O_3$ ) atmosférico, além do próprio oxigênio molecular ( $O_2$ ) e nitrogênio, protegem os seres na superfície das componentes mais danosas (energéticas) da radiação solar. Mas processos químicos na atmosfera podem romper as moléculas de ozônio. Desde o início da década de 1990 tem-se detectado um buraco na camada de ozônio sobre a Antártica. A redução na camada de ozônio pode levar ao aparecimento de câncer de pele e cataratas nos seres vivos.

## 16.2 A energia do Sol

Tão logo foi conhecida a distância do Sol, em 1673, por Jean Richer (1630-1696) e Giovanni Domenico Cassini (1625-1712) que determinaram a paralaxe de Marte e com esta estimaram a unidade astronômica como 140 milhões de km, foi possível determinar a sua luminosidade, que é a potência que ele produz. As medidas mostram que cada metro quadrado na Terra recebe do sol uma potência (energia/segundo) de 1400 watts [James Watt (1736-1819)], ou seja, a potência de 14 lâmpadas de 100 watts. O valor mais preciso da constante solar é  $1367,5 \text{ W/m}^2$ , e varia 0,3% durante o ciclo solar de 11 anos. Por essa potência recebida na Terra, determina-se a luminosidade do Sol em  $4 \times 10^{26}$  watts, ou  $4 \times 10^{33}$  ergs/s.

Essa quantidade de energia é equivalente à queima de  $2 \times 10^{20}$  galões de gasolina por minuto, ou mais de 10 milhões de vezes a produção anual de petróleo da Terra. Já no século XIX os astrônomos sabiam que essa energia não poderia ser gerada por combustão, pois a energia dessa forma poderia manter o Sol brilhando por apenas 10 mil anos. Tampouco o colapso gravitacional, fonte de energia proposta pelo físico alemão Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894) em 1854, resultou eficiente, pois a energia gravitacional poderia suprir a luminosidade do Sol por 20 milhões de anos, e evidências geológicas indicam que o Sol tem uma idade de bilhões de anos.

Em 1937 Hans Albrecht Bethe (1906-2005) propôs a fonte hoje aceita para a energia do Sol: as **reações termo-nucleares**, na qual quatro prótons são fundidos em um núcleo de hélio, com liberação de energia. O Sol tem hidrogênio suficiente para alimentar essas reações por bilhões de anos. Gradualmente, à medida que diminui a quantidade de hidrogênio, aumenta a quantidade de hélio no núcleo. Veja mais sobre este assunto no (Cap.22) na página 241.

Segundo os modelos de evolução estelar, daqui a cerca de 1,1 bilhão de anos o brilho do Sol aumentará em cerca de 10%, que causará a elevação da temperatura aqui na Terra, aumentando o vapor de água na atmosfera. O problema é que o vapor de água causa o efeito estufa. Daqui a 3,5 bilhões de anos, o brilho do Sol já será cerca de 40% maior do que o atual, e o calor será tão forte que os oceanos secarão completamente, exacerbando o efeito estufa. Embora o Sol se torne uma gigante vermelha após terminar o hidrogênio no núcleo, ocorrerá perda de massa gradual do Sol, afastando a Terra do Sol até aproximadamente a órbita de Marte, mas exposta a uma temperatura de cerca de 1600 K (1327 C). Com a perda de massa que levará a transformação do Sol em uma anã branca, a Terra deverá ficar a aproximadamente 1,85 UA.