

CAPÍTULO 6

Sol

Vera Jatenco-Pereira

6.1 O ESTUDO DO SOL ATRAVÉS DA HISTÓRIA

6.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS

6.3 A ESTRUTURA DO SOL

6.3.1 FOTOSFERA

• *Espectro de Absorção*

• *Granulação*

• *Borda do Sol*

• *Manchas Solares*

6.3.2 CROMOSFERA

• *Espectro*

• *Atividade cromosférica*

6.3.3 REGIÃO DE TRANSIÇÃO

6.3.4 COROA SOLAR

6.4 ATIVIDADE SOLAR

6.4.1 MANCHAS SOLARES E O CICLO DE 11 ANOS

6.4.2 CAMPO MAGNÉTICO GERAL E O CICLO MAGNÉTICO

6.4.3 CENTROS DE ATIVIDADE

6.5 VENTO SOLAR

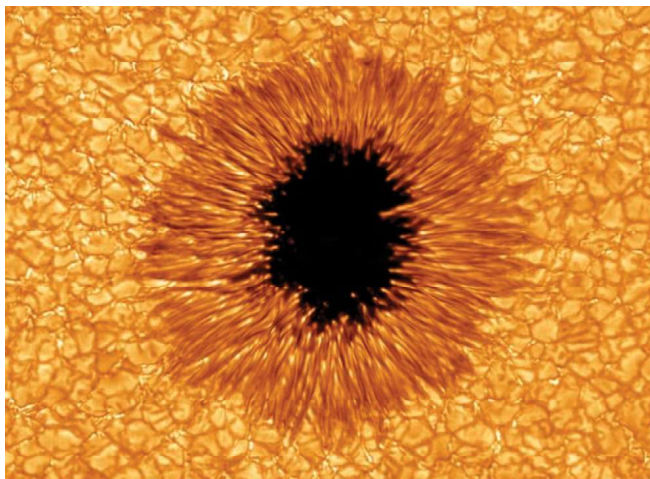
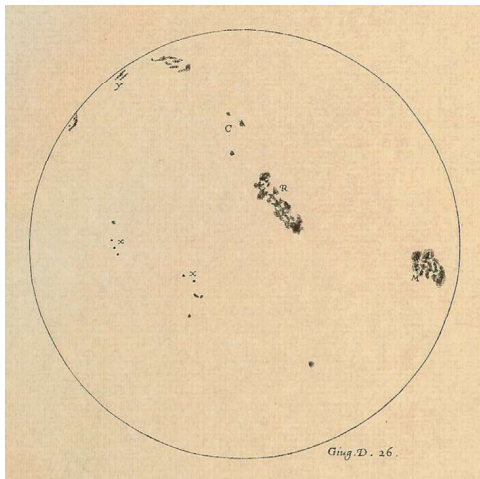
Sem o Sol o Sistema Solar não existiria. Mas o Sol também é uma estrela e de tipo bem definido. Ele exibe algumas semelhanças com outras estrelas da Galáxia, ao mesmo tempo em que se diferencia de inúmeras outras. Com base nisso, podemos analisar o Sol sob dois pontos de vista: como componente do Sistema Solar, considerando apenas suas características mais gerais. E, também, sua interação com a Terra e demais corpos do Sistema Solar.

O Sol é a principal fonte de energia para a Terra. A quantidade de luz solar por unidade de área no topo da atmosfera terrestre define a constante solar, de aproximadamente 1.368 W/m^2 . Considerando toda a superfície, a cada segundo a Terra recebe $50.000.000 \text{ GW}^1$ do Sol. Parte dessa energia é atenuada pela atmosfera. Em dia de céu livre de nuvens, com o Sol no zênite, ou seja, sobre a cabeça de um observador, a potência incidente é aproximadamente 1.000 W/m^2 .

A energia solar pode ser coletada por uma variedade de processos sintéticos e naturais. Essa energia é indispensável para a manutenção da biosfera e da água nos três estados, especialmente no líquido e no gasoso. A energia solar também pode ser captada direta ou indiretamente do Sol. O processo de conversão de energia luminosa em energia elétrica é feito por células fotoelétricas ou fotovoltaicas. A energia solar pode ser transformada diretamente em calor, ou em várias outras formas. Os ventos (energia eólica), embora possa não parecer à primeira vista, é subproduto da energia solar. Mesmo os combustíveis fósseis, como petróleo, foram produzidos com energia solar, via fotossíntese, no passado remoto da Terra.

A luz ultravioleta emitida pelo Sol tem propriedades antissépticas e é utilizada em atividades de saneamento. Ela também desempenha papel importante na síntese de vitamina D no corpo humano, ainda que, em excesso, possa provocar queimaduras sérias e produzir danos como câncer de pele. A exposição direta do olho à luz solar provoca queimadura irreversível na retina, levando à cegueira. Issac Newton foi uma das vítimas de lesão da retina provocada por observação direta do Sol. Não ficou cego, mas teve um longo e complicado período de recuperação desse acidente. A luz ultravioleta é fortemente atenuada pela camada de ozônio presente na atmosfera da Terra. A disponibilidade desse gás, tóxico para os humanos, varia com a latitude e influencia adaptações biológicas em seres vivos, incluindo, surpreendentemente, na variação da cor da pele humana.

1. $1\text{G (giga)} = 10^9$.



1- (esquerda) Esquema das manchas solares de 26/06/1613, feito por Galileu Galilei (imagem de domínio público). (direita) Imagem de uma mancha solar de 02/07/2010, obtida com o Novo Telescópio do Observatório Solar Big Bear (Califórnia, EUA), operado pelo Instituto de Tecnologia de Nova Jersey (EUA).

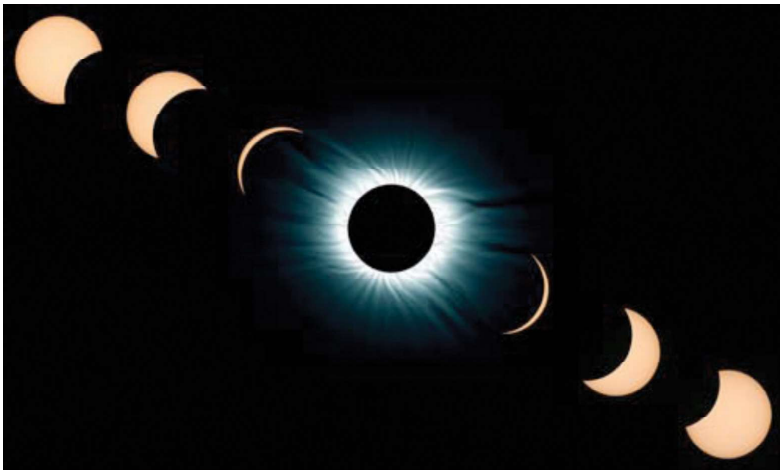


2- Stonehenge (do inglês arcaico “stan” = pedra, e “hencg” = eixo). Este monumento megalítico da Idade do Bronze (de 3300 a 1100 a.C.), localizado na planície de Salisbury, condado de Wiltshire, sul da Inglaterra, pode ter sido um observatório solar (University of Exeter, <http://www.exeter.ac.uk/>).

6.1 O ESTUDO DO SOL ATRAVÉS DA HISTÓRIA

Da idade da pedra à era espacial o Sol tem sido observado com entusiasmo. No passado distante foram construídos observatórios como o Stonehenge, no que é hoje a Inglaterra, para registrar o caminho aparente percorrido pelo Sol no céu. Assim foram obtidas informações que revelam dados importantes como as estações do ano, dado fundamental para a construção do calendário, conquista indispensável para a fundação da agricultura, há aproximadamente 12 mil anos.

Pode-se considerar o eclipse total do Sol como um dos mais impressionantes fenômenos astronômicos, capaz de ser observado com certa regularidade a olho nu. O registro mais antigo de um eclipse solar foi gravado em uma argila e descoberto na antiga cidade de Ugarit, atual território da Síria, com duas datas plausíveis: 3 maio de 1375 a.C. ou 5 de março de 1223 a.C.. Por volta do século 18 a.C., os babilônios mantiveram um registro sistemático de eclipses solares, e podem até ter sido capazes de prevê-los com precisão.



3- Sequência do eclipse do Sol (créditos: Greenville County School).

4- Registro de um eclipse em argila (Nature vol. 338, págs 238 – 240, 16/03/1989; doi:10.1038/338238a0).



5- Ilustração da Pequena Era Glacial [Pieter Bruegel the Elder (1525 – 1569)].

No século 3 a.C. a distância da Terra ao Sol foi calculada pela primeira vez pelo astrônomo grego Aristarco de Samos, que já admitia o modelo heliocêntrico. Quando, no século 17, Galileu Galilei apontou um telescópio astronômico para o céu também pela primeira vez, abriu uma nova era para o conhecimento desse astro. As observações da superfície solar com telescópio começaram por volta de 1610. A partir dessa época, as manchas solares passaram a ser sistematicamente observadas. Johann Fabricius (1587-1616) e Christoph Scheiner (1517-1650), astrônomos alemães, e Thomas Harriot (1560-1621), astrônomo inglês, foram alguns dos observadores desse fenômeno que se seguiram a Galileu.

Entre 1645 e 1715 o número de manchas solares teve uma redução significativa. Durante esses 70 anos, não muito mais que 15 manchas solares foram observadas. Curiosamente, nesse intervalo de tempo, as temperaturas, registradas na Europa, foram mais baixas que o normal. Isso sugeriu que as variações ocorridas no Sol influenciaram diretamente o clima da Terra. Esse período acabou conhecido como “a pequena era glacial” e a escassez de manchas solares como “mínimo de

Maunder”, em referência ao astrônomo norte-americano Edward W. Maunder (1851-1928) que investigou esses fenômenos.

A massa do Sol e a distância que o separa da Terra só foram determinadas com precisão razoável no século 18. A primeira estimativa quantitativa da massa do Sol é atribuída a Isaac Newton. Ele apresentou o cálculo no seu famoso *Principia Mathematica*, fazendo uso da gravitação universal, formulada por ele mesmo em 1686/7.

Para investigação astronômica, num desdobramento do trabalho de Galileu, novos maiores telescópios foram construídos e instalados em observatórios, em diferentes países. Alguns deles dedicados especificamente à observação solar. Esses instrumentos permitiram conhecer fenômenos e processos dinâmicos. E cada uma dessas descobertas trouxe junto um conjunto igualmente inédito de questionamentos. O que provoca as misteriosas manchas solares? Porque o número de manchas varia ao longo de um período com certa regularidade? O que explica as violentas explosões associadas às manchas observadas no Sol? Como, mais especificamente, esse fenômeno afeta a Terra?

Com a chegada da era espacial abriram-se novas janelas para a investigação solar a partir do espaço. Sem a limitação observacional imposta pela atmosfera terrestre, sofisticados observatórios espaciais começaram a responder boa parte das perguntas sobre o complexo comportamento do Sol.

6.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Como outras estrelas, o Sol é uma esfera de gás ionizado (plasma) brilhante, sustentada por sua própria gravidade e pela energia de reações nucleares que ocorrem no seu núcleo. O Sol tem a idade do Sistema Solar (4,6 bilhões de anos) e é um astro de meia idade. À medida que envelhece, vai se expandindo, com consequências dramáticas para a Terra em um futuro distante.

O Sol brilha intensamente, observado da Terra, pela proximidade entre esses dois corpos. Se estivesse à mesma distância da estrela alfa do Cão Maior, Sirius, por exemplo, o Sol brilharia 22 vezes menos. Mas o Sol está a oito minutos-luz da Terra, enquanto Sirius, a estrela mais brilhante do céu, fica a aproximadamente 8,7 anos-luz. Acrux, alfa do Cruzeiro, observável a olho nu talvez na

Raio	$6,96 \times 10^8 \text{ m}$	$\sim 109 R_{\oplus}$
Massa	$1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$	$\sim 330.000 M_{\oplus}$
Densidade	1.410 kg/m^3	
Luminosidade	$3,8 \times 10^{33} \text{ erg/s}^{-1}$	
Temperatura superficial	5.780 K	
Período de rotação	25 dias (no equador)	34 dias (nos polos)

Tabela 1- Parâmetros físicos mais importantes do Sol. Na terceira coluna são apresentados os valores comparativamente aos terrestres. R_{\oplus} e M_{\oplus} são, respectivamente, raio e massa da Terra.

constelação mais conhecida do hemisfério sul, seria aproximadamente 5.500 vezes mais brilhante, se estivesse à mesma distância do Sol. Comparado a outras estrelas, em termos de massa, raio, luminosidade e composição química, o Sol ocupa uma faixa média de valores. Aqui, certamente faz sentido uma consideração. Uma estrela pode ser muito luminosa, mas aparecer com pouco brilho no céu da Terra, por sua enorme distância. Ou não ser intrinsecamente tão luminosa, mas parecer brilhante no céu, como ocorre com o Sol, devido à comparativa pouca distância a que a Terra se encontra dele.

A tabela 1 apresenta algumas das propriedades do Sol.

6.3 A ESTRUTURA DO SOL

Internamente o Sol é composto basicamente de três camadas sem nítidas fronteiras entre elas. Um núcleo central com alta densidade e temperatura, onde ocorrem as reações de transformação de hidrogênio em hélio. A cada segundo, 600 milhões de toneladas de hidrogênio são convertidas em 596 milhões de toneladas de hélio e quatro milhões de toneladas são eliminadas sob a forma de energia.

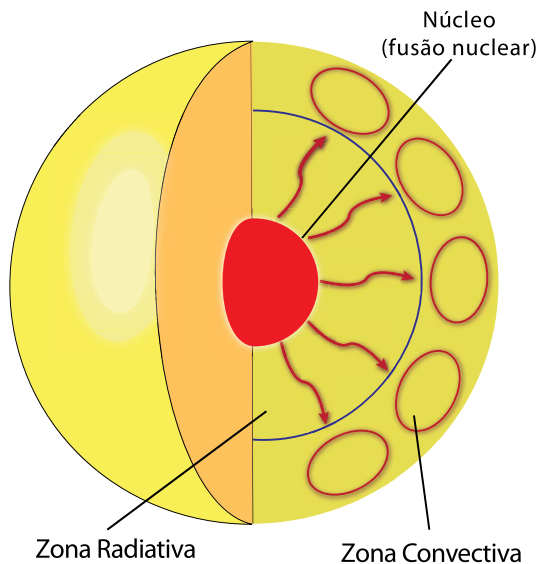
Utilizando a equação de Einstein ($E = m.c^2$), pode-se verificar que 1 kg de matéria fornece cerca de 9×10^{23} ergs de energia. A luminosidade do Sol (potência de energia emitida) medida na Terra é cerca de $3,8 \times 10^{33}$ ergs/s ($3,8 \times 10^{26}$ Watts). Para saber a quantidade de matéria que o Sol converte em energia a cada segundo dividimos este por aquele:

$$E = \frac{3,8 \times 10^{33} \text{ erg/s}}{9 \times 10^{23} \text{ erg}} = 4,2 \times 10^9 \text{ kg/s} \quad (1)$$

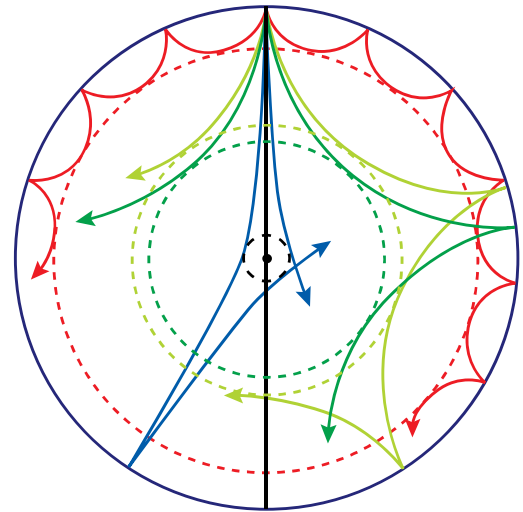
ou cerca de quatro milhões de toneladas.

Outra estimativa simples que se pode fazer é o tempo de vida que ainda resta ao Sol se ele continuar produzindo energia nessa taxa. A massa solar pode ser estimada pela 3ª Lei de Kepler modificada por Newton:

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G(M+m)}{4\pi^2} \quad (2)$$



6- Representação do interior solar.



7- Ilustração da propagação de ondas no interior solar.

sendo: a - distância média da Terra ao Sol, P - período de translação, G - constante universal da gravitação, M e m - massas do Sol e da Terra, respectivamente. Como a massa da Terra é muito menor que a do Sol, podemos considerar no numerador apenas a massa do Sol. Com isto, chega-se ao valor da massa solar (tabela 1). Convertida em energia, a massa solar equivale a $1,8 \times 10^{54}$ ergs. Admitindo que apenas 0,7 % dessa massa pode ser convertida em energia, teremos $1,52 \times 10^{52}$ ergs. Assim, dividindo esta energia pela luminosidade solar obteremos o tempo de vida do Sol:

$$t = \frac{1,52 \times 10^{52} \text{ erg/s}}{3,8 \times 10^{33} \text{ erg/s}} = 3,5 \times 10^{19} \text{ s} \approx 10^{11} \text{ anos} = 10 \text{ bilhões de anos} \quad (3)$$

Como o Sol já viveu 4,6 bilhões de anos resta ainda 5,4 bilhões de anos de vida. Um cálculo mais preciso leva ao valor de 5 bilhões de anos.

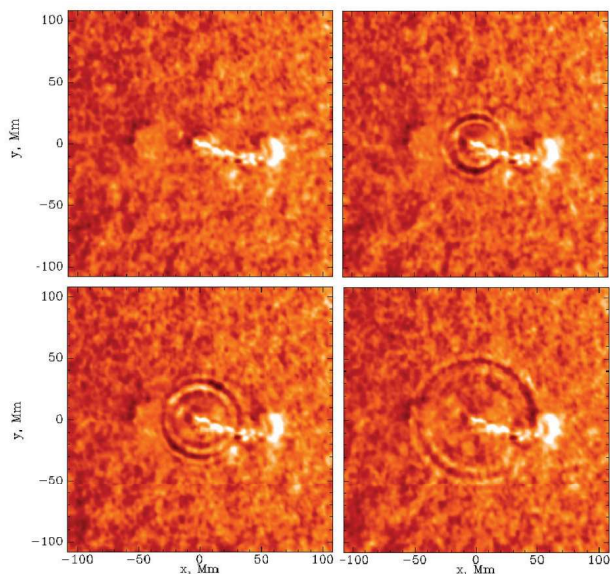
Envolvendo o núcleo solar há uma camada denominada zona radiativa. Nela a energia é transportada pelos íons do plasma, através de absorção e reemissão de fótons. Acima dela está um envoltório convectivo onde a energia é transportada por células de convecção. Na interface entre a zona radiativa e a convectiva há uma camada de transição com um complexo campo magnético.

A energia gerada no núcleo é transportada gradualmente até a superfície solar (fotosfera), de onde escapa sob a forma de calor, luz e outras formas de radiação. Todo esse trajeto leva em torno de 1,5 milhão de anos.

O estudo da estrutura interna do Sol é possível por modelagem matemática. A hipótese básica aqui é admitir que o Sol está em equilíbrio hidrostático, ou seja, não há contração nem expansão. Em outras palavras, a pressão e a temperatura no núcleo são altas o suficiente para contrabalançar a compressão gravitacional, ou o peso das camadas externas. Portanto, a força interna que atua na expansão do Sol é contrabalançada pela força gravitacional que atua na contração.

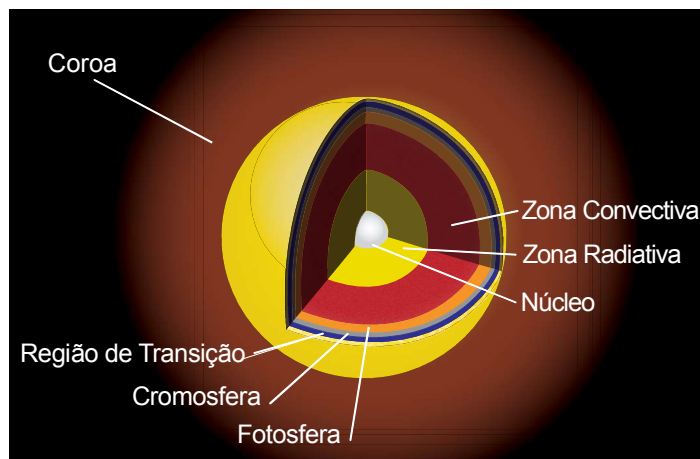
Elaborar um modelo solar significa expressar pressão, temperatura e composição química em função da massa ou raio solar. Dessa forma, chegamos às seguintes dimensões: o núcleo tem raio equivalente a 0,20 do raio solar, a zona radiativa tem 0,50 e a convectiva 0,30 do raio solar.

Pode-se investigar o interior do Sol da mesma maneira forma como se procede na Terra, isto é, pela propagação de ondas no seu interior, como ocorrem com os sismos na Terra. No caso do Sol, essa abordagem é denominada de heliosismologia, atualmente o melhor método para comprovar



8- Sismo observado em julho de 1996 provocado por uma explosão solar (bolha branca com cauda à esquerda). Acompanhamos da esquerda para a direita a evolução das ondas sísmicas (SOHO/EIT. SOHO é um projeto de cooperação internacional entre ESA e NASA).

9- Esquema da estrutura do Sol (fora de escala).



REGIÃO	ESPESSURA (km)	DENSIDADE (g/cm ⁻³)	TEMPERATURA (K)
Interior			
Núcleo	~ 2 × 10 ⁵	~ 150	150.000.000
Zona Radiativa	~ 3 × 10 ⁵	cai de 20 a 0,2	7.000.000 - 2.000.000
Zona Convectiva	~ 2 × 10 ⁵	< 0,2	2.000.000 - 6.400
Superfície			
Fotosfera	~ 500	~ 4,0 × 10 ⁻⁷	6.400 - 4.400
Atmosfera			
Cromosfera	~ 2,5 × 10 ³	~ 2,0 × 10 ⁻⁷	4.400 - 20.000
Região de transição	~ 8,5 × 10 ³	1,0 × 10 ⁻¹⁶	20.000 - 1.000.000
Coroa	tamanho indefinido, atinge vários raios solares	< 2,0 × 10 ⁻¹⁷	> 1.000.000

Tabela 2- Dimensões de cada componente do Sol.

os modelos teóricos. Os sismos solares de maior frequência ocorrem próximos à superfície e os de menor frequência nas regiões mais internas. Como a propagação das ondas depende das condições físicas locais, as observações permitem construir modelos teóricos do interior solar.

A primeira detecção de um sismo solar ocorreu em 1996 com a análise de dados de um instrumento do satélite SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*). O SOHO vem operando desde 1995 em órbita de 1,5 milhão de quilômetros do Sol.

As partes mais externas do Sol, acessíveis à observação direta, apresentam grande variação das condições físicas com a profundidade, como temperatura, pressão e composição química. Elas podem ser divididas em três regiões: fotosfera (superfície), cromosfera e coroa (atmosfera).

A tabela 2 resume as dimensões de cada componente do Sol.

As estrelas emitem energia em espectro eletromagnético contínuo (todas as frequências) segundo a Lei de Planck, que expressa a radiação de corpo negro. A radiação proveniente do interior estelar sofre absorção ao atravessar regiões mais frias na fotosfera. A absorção ocorre seletivamente em função dos átomos que compõem a fotosfera, formando as linhas de absorção específicas desses elementos químicos. Conhecendo-se o espectro estelar temos informações a respeito da temperatura, da composição química e das condições físicas, como gradientes² de temperatura e pressão da região onde as linhas são formadas.

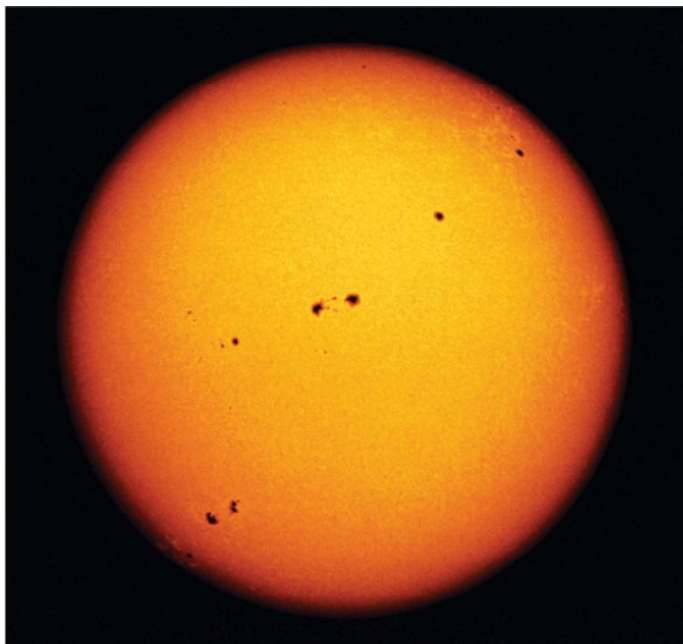
As próximas seções são dedicadas à descrição das regiões mais externas do Sol, onde se apresentam os fenômenos diretamente observáveis.

6.3.1 FOTOSFERA

As camadas mais internas do Sol apresentam um alto grau de opacidade que impede a visão direta de regiões mais profundas. A fotosfera (esfera de luz) é uma camada bastante estreita, com cerca de 500 km de espessura. A maior parte da luz solar emitida vem da região mais profunda, os primeiros 150 km. A temperatura média da fotosfera é de 5.800 K, mas ela varia de 6.400 K na base a 4.400 K no topo. A densidade diminui consideravelmente quando comparada às camadas mais internas. O valor médio é 5×10^{15} partículas/cm³). Uma densidade menor favorece a diminuição da opacidade, permitindo que a radiação se propague livremente.

Na região espectral da luz visível, é possível observar apenas o disco solar de contorno bem definido, a fotosfera, uma fina camada com espessura menor que 0,1% do raio do Sol. Um corpo gasoso, o Sol não exibe uma superfície sólida ou líquida como a Terra. A fotosfera é considerada a superfície solar, e apesar de relativamente fina, é opaca e isso impede a visão de camadas mais internas.

2. Gradiente: alteração no valor de uma quantidade (como luz, temperatura, pressão etc.) por unidade de medida de distância em uma direção especificada.



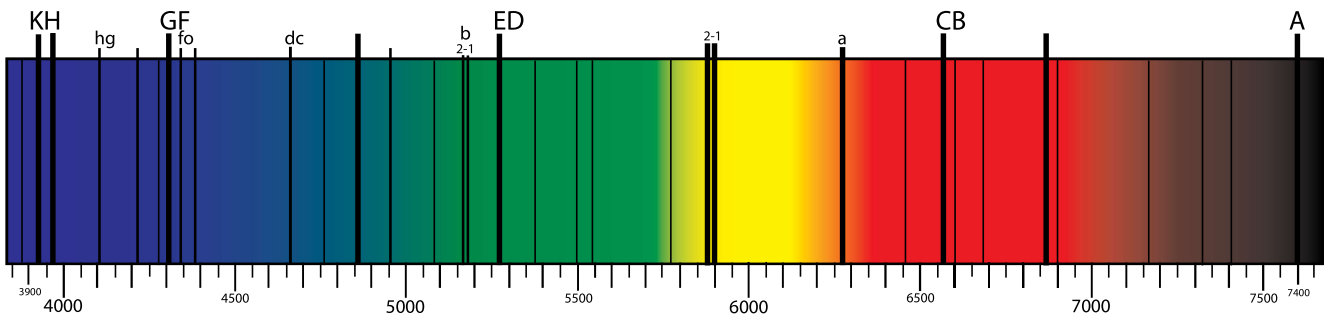
10- Presença de manchas no disco solar registrado na luz visível (NASA).

• Espectro de Absorção

Embora linhas de absorção no espectro solar sejam conhecidas desde 1802, o estudo sistemático (medidas e catalogação) delas foi feito pelo óptico alemão Joseph Von Fraunhofer (1787-1826) nos anos seguintes (figura 11). Para identificá-las, ele utilizou a nomenclatura de letras maiúsculas, para denotar as linhas mais fortes, e minúsculas para as mais fracas. As mais referidas, atualmente, são as linhas D do dubleto de sódio, as linhas H e K do Ca II (uma vez ionizado) e as linhas b do magnésio. Identificações mais recentes incluem as linhas do hidrogênio, da série de Balmer. Na região do ultravioleta o espectro é dominado por linhas de emissão produzidas na cromosfera e na coroa solar. Até então não se conhecia a origem química dessas linhas. As letras usadas por Fraunhofer para identificar linhas nada tinham a ver com símbolos químicos, nem com os símbolos que designam os tipos espectrais das estrelas. O uso atual de algumas designações deve-se simplesmente à conveniência.

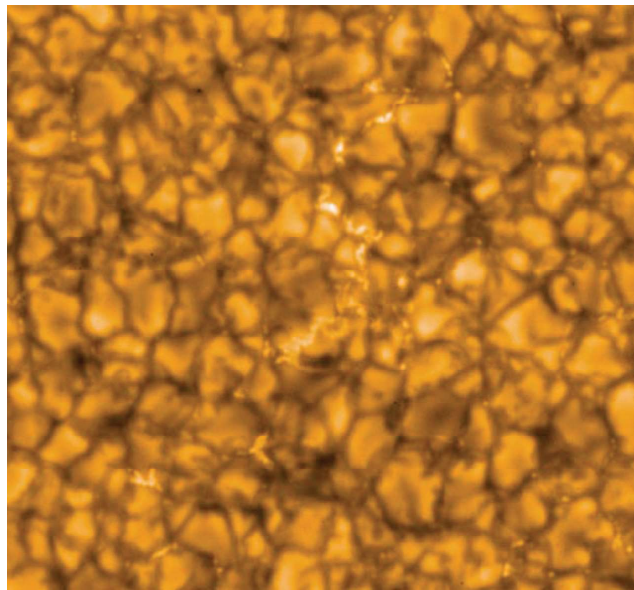
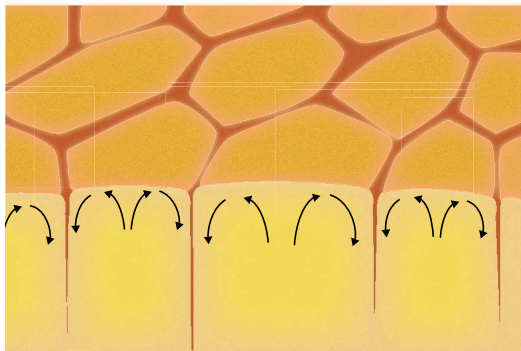
Sabe-se, agora, que cada linha de absorção é produzida pela transição de um elétron entre níveis de energia em um átomo. Cada elemento químico apresenta um padrão típico de linhas. Assim, conhecendo o padrão de linhas em laboratório podemos compará-los aos padrões observados em qualquer parte do Universo e identificar os elementos químicos responsáveis. As linhas de absorção mais fracas são produzidas nas regiões mais internas da fotosfera, enquanto que as mais fortes são geradas nas regiões mais externas, como o caso das linhas H e K do Ca II – as mais fortes, formadas principalmente na base da cromosfera. A análise das linhas espectrais permite deduzir propriedades da fotosfera, além da composição química. Em número, o elemento mais abundante é o hidrogênio (92%) seguido do hélio (6%)³, enquanto elementos mais pesados como carbono, nitrogênio, oxigênio, neônio, magnésio, silício, enxofre e ferro somam cerca de 2% da massa total. Em menor percentual ainda estão outros elementos como sódio, alumínio, fósforo, potássio e cálcio.

3. Em massa os valores são H (71%) e He (27%).



11- Linhas de Fraunhofer no espectro solar [nl:Gebruiker:MaureenV (26 Jan 2005)].

12- À esquerda representação das células convectivas. À direita, granulação solar. Os tamanhos típicos dos grânulos são comparáveis aos continentes terrestres (NASA).



• *Granulação*

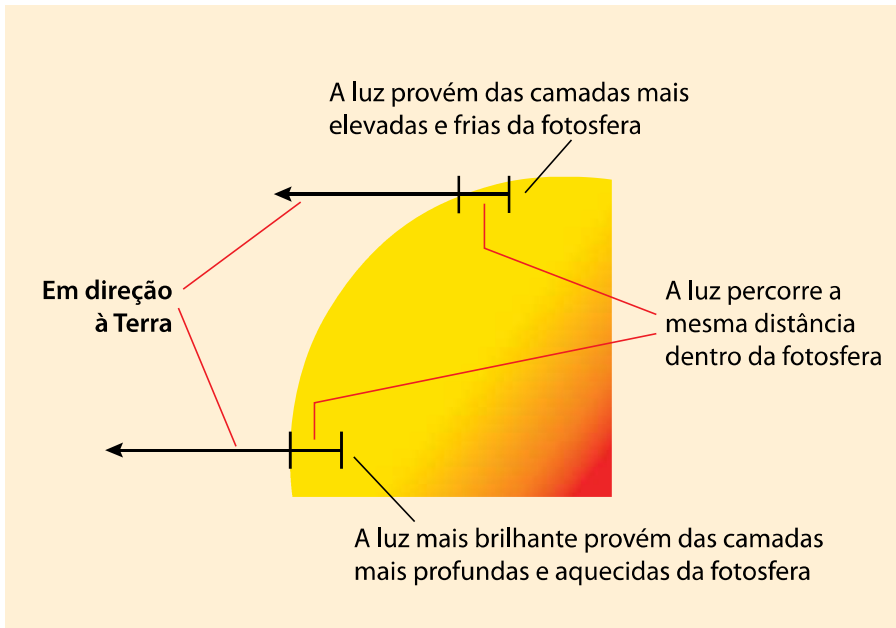
Imagens diretas da fotosfera mostram que ela não é homogênea e que seu brilho também não é uniforme. Ela apresenta uma textura granular, formada por células convectivas com cerca de 700 km de diâmetro e tempo de vida médio de alguns minutos. A granulação solar é formada no topo da zona convectiva, região em que as chamadas células de convecção crescem em tamanho e transportam, por convecção, energia que será dissipada na fotosfera. Com o esfriamento, os gases voltam a mergulhar pelas bordas escuras das células.

• *Borda do Sol*

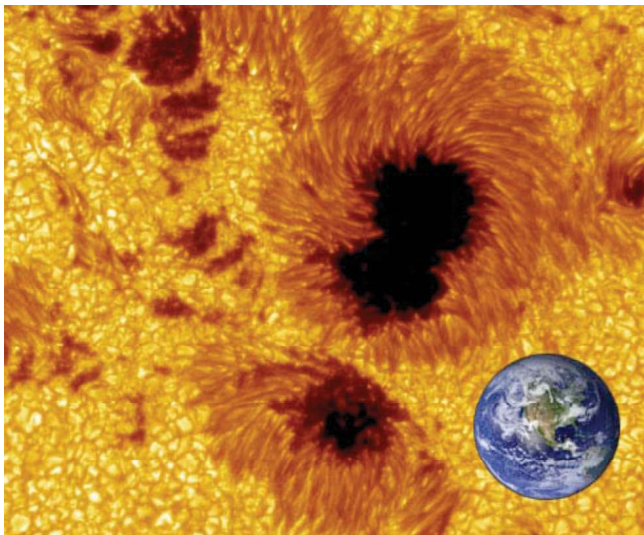
Como se vê, o brilho superficial do disco solar não é uniforme. Nas bordas solares há uma diminuição de brilho (figuras 10 e 13) definida como obscurecimento de limbo, provocado pela variação de temperatura na fotosfera. Quanto mais profunda estiver a camada vista, mais quente ela será. Na direção do centro do disco solar o brilho provém de todas as camadas da fotosfera, mas nos bordos ele se origina de camadas mais externas e mais frias e menos brilhantes (figura 13).

• *Manchas Solares*

As manchas solares são as formações mais marcantes da fotosfera (figura 14). Elas variam em tamanho, abundância e posição ao longo do tempo. Essas manchas estão associadas a poderosos



13- Geometria que implica no obscurecimento do limbo. A radiação do limbo é proveniente de camadas mais externas, mais frias, portanto, menos brilhantes.



14- Mancha solar em detalhes e comparação com o diâmetro da Terra [trabalho de arte: Randy Russell. Imagens: Royal Swedish Academy of Sciences (mancha) e NASA (Terra)].

campos magnéticos e têm, em média, 10 mil quilômetros de diâmetro, e podem superar o diâmetro da Terra. A parte central da mancha (umbra) é mais escura por ser mais fria, com temperatura aproximada de 4.500 K. A penumbra, estrutura que circunda a umbra, é mais clara, com temperatura média de 5.500 K.

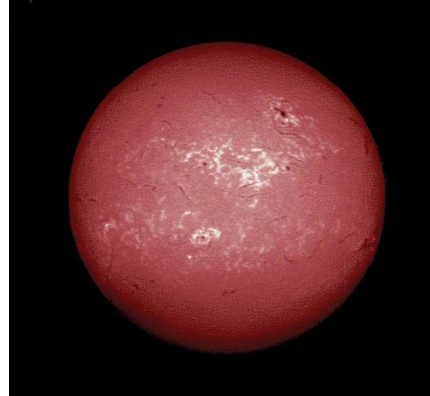
A longevidade da mancha é de alguns meses. Quando surge ela é pequena, mas aos poucos ela aumenta, até se fragmentar e desaparecer. As manchas aparecem em grupos, segundo a bipolaridade do campo magnético. Uma mancha associada à polaridade norte vem sempre acompanhada por outra associada à polaridade sul do campo magnético. Podem apresentar-se tanto dispersas como centradas.

Os campos magnéticos associados às manchas são intensos, cerca de 50 mil vezes mais poderosos que o campo magnético terrestre medido nos polos. Esse campo inibe o transporte de energia das camadas mais profundas do Sol. Observações do deslocamento das manchas, no sentido de leste para oeste, permitem determinar o período de rotação do Sol em função da latitude. Em valores aproximados, o período de rotação solar varia entre 34 dias nos polos (rotação mais lenta) e 25 dias no equador (mais rápida). A dependência da rotação com a latitude é chamada rotação diferencial.



15- As quatro linhas de emissão da série de Balmer do Hidrogênio. A linha vermelha à direita é $H\alpha$.

16- O Sol observado através de um telescópio utilizando filtro $H\alpha$ (SOHO/NASA/ESA0).



6.3.2 CROMOSFERA

Essa é a camada da atmosfera solar logo acima da fotosfera. A densidade na cromosfera é bem menor que a da fotosfera e sua espessura é de aproximadamente 2.500 km. A densidade diminui de 10^{12} partículas/cm³ na base até 10^9 partículas/cm³ na parte mais externa. Em massa essas densidades são aquelas da tabela 2. Nessa camada, a temperatura aumenta da base para o topo, mas tem média de 10.000 K. Acredita-se que esse aquecimento se origine na turbulência do envelope convectivo, onde as ondas seriam excitadas e amplificadas em choques, produzidos pela propagação nas regiões menos densas. O aquecimento seria devido à dissipação desses choques na cromosfera.

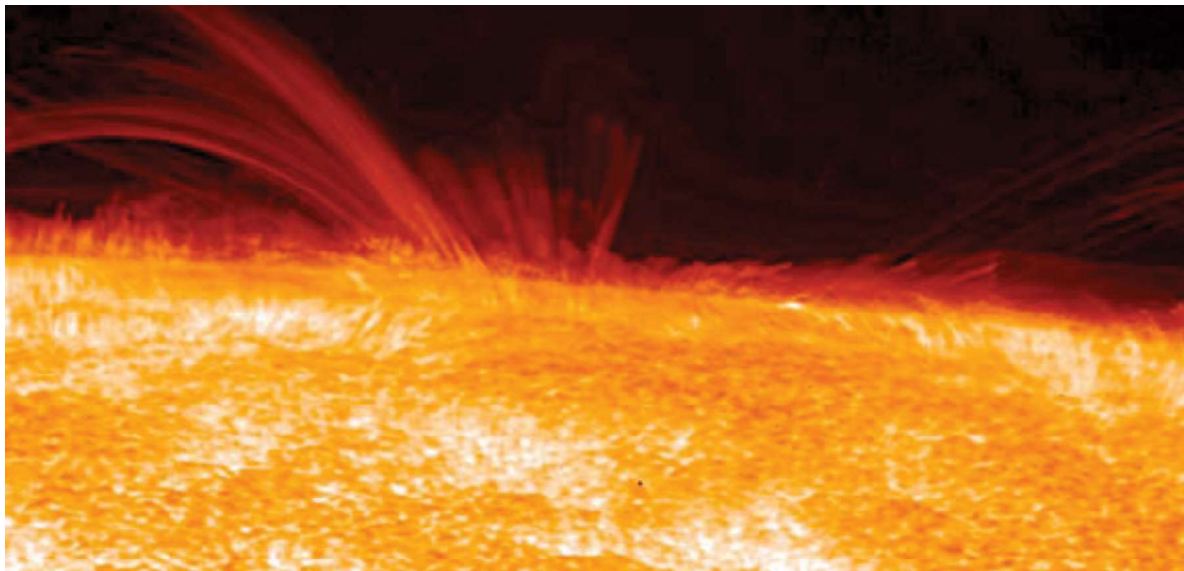
• Espectro

O nome cromosfera (literalmente, significa esfera colorida) é baseado em sua cor avermelhada, devido a emissão da linha de hidrogênio da série de Balmer (referência a Johann Jakob Balmer, físico-matemático suíço, 1825-1898) ($H\alpha$) em 656,3 nm (figura 15) e visível durante eclipses solares, quando o brilho intenso da fotosfera é obscurecido. A figura 16 mostra a imagem do Sol observado em $H\alpha$.

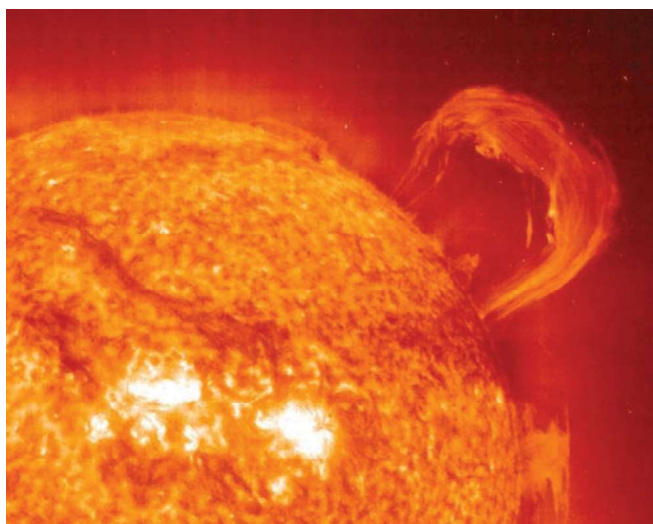
A principal linha de emissão no espectro cromosférico é a linha do hélio, que requer altas temperaturas para ser excitado. O hélio foi detectado no Sol em 1868 pelo astrônomo inglês Joseph Lockyer (1836-1920) antes de ser descoberto na Terra, daí a origem do seu nome – em grego *helios* significa Sol. Quando um átomo absorve fótons de baixa energia, ou colide com partícula de baixa energia cinética (de movimento), adquire energia. Na realidade, essa energia é absorvida por um de seus elétrons que passa a circular o núcleo em estado mais energético. A tendência é que esse elétron volte ao estado de menor energia, liberando o excesso de energia na forma de um fóton. Essas transições são chamadas transições atômicas de baixo potencial de excitação. Na base da cromosfera elas ocorrem em metais neutros (não ionizados), mas em altitudes maiores se apresentam nas linhas espectrais do cálcio e do ferro ionizado.

• Atividade cromosférica

As regiões esbranquiçadas visíveis na figura 16 são chamadas praias. Elas apresentam maior atividade e são mais quentes, por isso brilham mais. Nessa mesma imagem pode-se observar regiões



17- Espículos solares: jatos estreitos de gases aparecem escuros por serem mais frios (NASA).

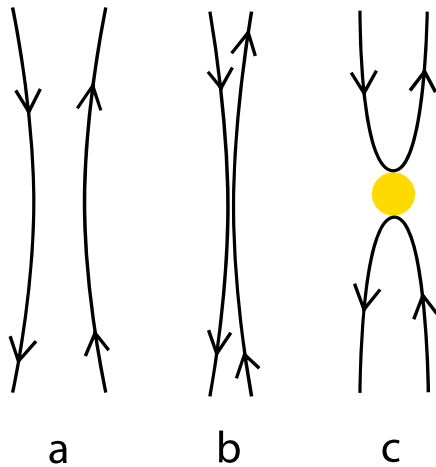


18- Protuberância solar. Imagem de setembro de 1999 feita pelo satélite SOHO (NASA).

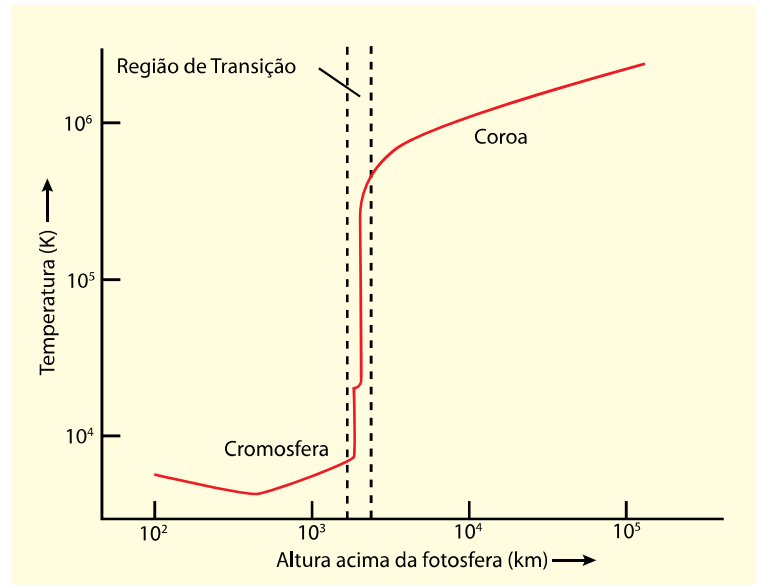
escuras, com característica de segmento, chamados de filamentos. Eles são nuvens de material denso e frios suspenso acima da superfície solar por arcos de campo magnético. A cromosfera exibe um padrão de células semelhante ao da fotosfera. As células cromosféricas têm dimensão e tempo de vida bem maior em relação às suas contrapartidas da fotosfera, cerca de 30.000 km e 25 horas de vida, respectivamente. Por isso, são chamadas supergranulações.

Contornando as supergranulações, há jatos tênues de gás brilhante com extensões de 500 a 1.500 km, elevando-se até 10.000 km acima da cromosfera. Esses fenômenos de ejeção de gases recebem o nome de espículos e emitem principalmente radiação $H\alpha$. Eles são vistos com facilidade no limbo do Sol. Apesar de ocuparem apenas uma fração da superfície solar e durarem pouco menos que 15 minutos, os espículos podem representar um papel importante no equilíbrio de massa da cromosfera, da coroa e do vento solar.

As estruturas mais típicas da cromosfera são as protuberâncias, arcos magnéticos vistos no limbo. Por elas circulam o plasma cromosférico (figura 18). Com configuração complexa as bases das protuberâncias estão apoiadas sobre regiões com polaridades magnéticas opostas, formando arcos magnéticos por onde circula a matéria cromosférica. Suas dimensões podem ser enormes e a duração prolongar-se por horas. Essas estruturas permeiam a coroa solar, que é muito mais quente.



19- Esquema de reconexão magnética. Linhas magnéticas de polaridades opostas (a), sob circunstâncias favoráveis (b), podem se recombinar em ciclos opostos (c) liberando instantaneamente energia aprisionada no tubo magnético.



20- Variação de temperatura na região de transição entre a cromosfera e a coroa solar.

Quando observadas na linha $H\alpha$ do hidrogênio e sobre o disco solar (vista do topo da arcada), as protuberâncias aparecem como filamentos escuros. O tempo de vida das protuberâncias pode variar de dias a semanas.

As linhas de campo magnético em forma de arcos que ligam manchas solares de polaridades opostas formam estruturas denominadas tubos magnéticos. Esses tubos podem movimentar-se de modo a acabarem retorcidos. Isso implica em armazenamento crescente de energia no interior do tubo à medida que a torção das linhas de campo aumenta. Quando as linhas se cruzam ocorre seu rompimento e posterior reconexão com a liberação violenta de toda energia armazenada, provocando erupções de brilho (figura 19). Essas erupções podem liberar mais energia que as grandes protuberâncias e são denominadas “flares” (clarões). Observações em raios X e ultravioleta mostram que as áreas mais compactas, localizadas nas regiões centrais dos flares, podem atingir temperaturas da ordem de 100 milhões K.

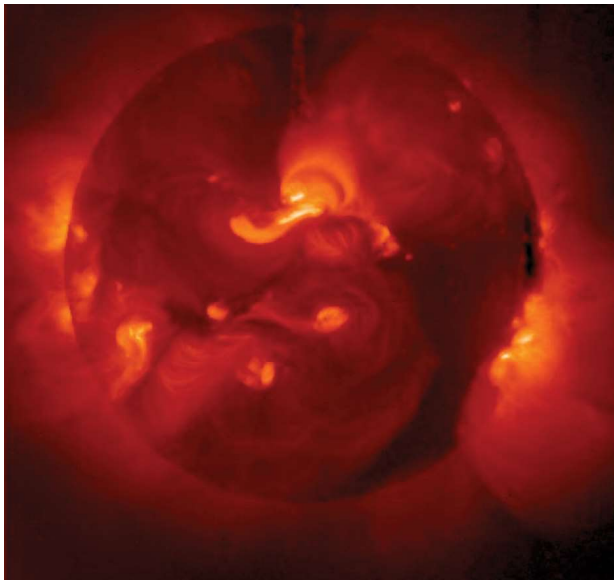
6.3.3 REGIÃO DE TRANSIÇÃO

Algumas linhas da região espectral do ultravioleta são formadas nas temperaturas cromosféricas mais altas, o que demonstra a existência de uma região de transição entre a cromosfera e a coroa solar. Nessa região, a temperatura cresce rapidamente. Em uma faixa da cromosfera de apenas algumas centenas de quilômetros a temperatura sobe de 10.000 K a 50.000 K, chegando a 1 milhão K na coroa. Nas altas temperaturas, nas regiões mais externas da atmosfera solar, os átomos e íons são excitados por colisão⁴, produzindo linhas de emissão quando voltam para seus estados fundamentais. A mais intensa das linhas do ultravioleta é a de Lyman- α , produzida pelo hidrogênio no comprimento de onda 121,5668 nm (1.215,668Å).

4. Durante as colisões parte da energia cinética das partículas colidentes é transformada em energia de excitação, isto é, elétrons dos átomos e íons absorvem energia e saltam para níveis mais elevados de energia. Ao retornarem aos estados mais baixos de energia, os elétrons liberam energia excedente na forma de radiação eletromagnética, em comprimentos de onda específicos.



21- Fotografia da coroa solar na luz visível feita com coronógrafo (telescópio específico para observar a coroa). É a luz fotosférica espalhada apenas pelos elétrons (<http://www.mreclipse.com/SEphoto/TSE1991/TSE1991galleryB.html>).

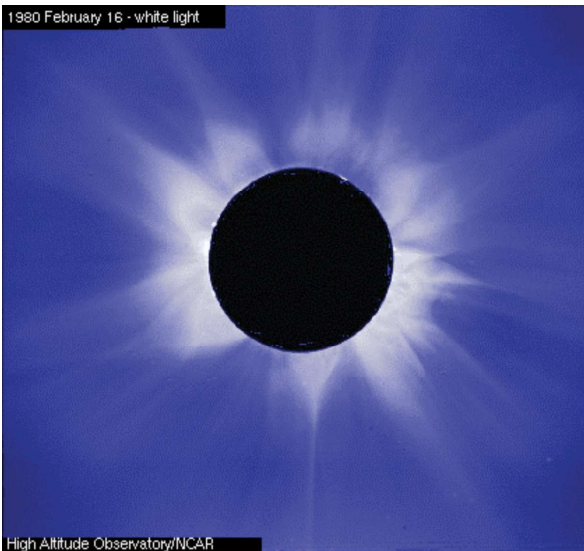


22- Coroa solar vista em raio-X (NASA, http://sunearthday.nasa.gov/2008/multimedia/gal_002.php).

6.3.4 COROA SOLAR

Durante um eclipse total, a região coronal na luz branca aparece como um halo que se estende muito além do limbo solar, correspondendo à região mais externa e mais extensa da atmosfera solar (figura 21).

O gás coronal é muito tênue e quente atingindo temperaturas da ordem de 1 a 2 milhões K. Ainda faltam detalhes para entendermos completamente esse repentino aumento da temperatura, mas já se sabe que o campo magnético exerce um papel fundamental neste processo. A essa temperatura o hidrogênio está ionizado e a coroa é um gás formado essencialmente por elétrons e prótons livres, o plasma.



23- Elmos coronais, com suas formas pontiagudas (http://umbra.nascom.nasa.gov/spartan/the_corona.html).



24- Arcos coronais formados pelo magnetismo solar (créditos: NASA).

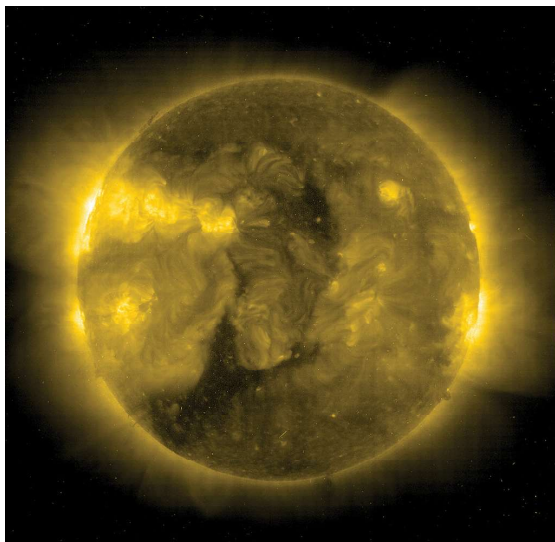
A luz coronal pode ser dividida em três tipos: luz branca, linhas de emissão e raio X. Na luz branca a coroa é formada pela luz proveniente da fotosfera. Essa luz pode ser espalhada pelos elétrons livres da coroa e formar a coroa K. Ou, pode ser espalhada por grãos de poeira zodiacal, e formar a coroa de Fraunhofer. A coroa de emissão (ou coroa E) é formada de luz emitida por átomos altamente ionizados (que perderam muitos elétrons), como o Fe X (perdeu 9 elétrons), o Ca XV (sem 14 elétrons) e o Fe XIV (com menos 13 elétrons). A luz emitida desta forma não é contínua como a luz branca, mas em comprimentos de onda específicos. Portanto, essa coroa só aparece em linhas espectrais. Átomos ainda mais ionizados (portanto bem mais quentes) emitem luz em raio X. Essa luz é que forma a coroa de raio X...

Como os elétrons interagem com o campo magnético, a configuração da coroa é a do campo magnético global. O brilho coronal varia em função da atividade solar. Em fases de máximos de manchas solares a coroa é brilhante e uniforme, enquanto que nos períodos de mínimo de manchas solares a coroa se estende mais no equador que nos polos.

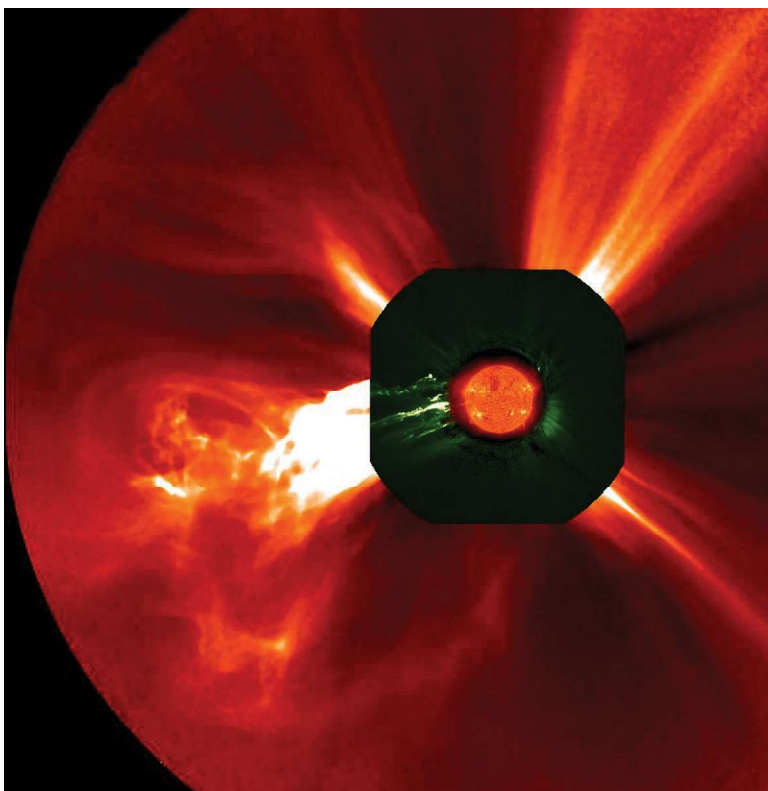
Estrutura comum entre as formadas na interação entre elétrons e o campo magnético são os elmos (*helmet streamers*). Eles são construções coronais semelhantes a chapéus cônicos que cobrem as manchas solares e regiões ativas. Usualmente encontra-se protuberâncias ou filamentos situados na base dessas estruturas. Os elmos são formados por um emaranhado de linhas de campo originários das manchas e das regiões ativas. As linhas magnéticas fechadas têm força suficiente para aprisionar o plasma solar e ajuda na suspensão do material da protuberância acima da superfície solar. Sua forma pontiaguda deve-se ao vento solar.

Plumas polares são estruturas alongadas que se projetam para fora do Sol nas regiões polares norte e sul. Frequentemente encontra-se áreas brilhantes em sua extremidade na fotosfera associadas a pequenas regiões magnéticas na superfície solar. Essas estruturas estão relacionadas a linhas abertas do campo magnético polar. Assim como os elmos, sua forma é devida à ação do vento solar.

Outra estrutura tipicamente coronal encontrada sobre as manchas solares e regiões ativas é o arco coronal. Os arcos são formados por linhas fechadas de campo magnético que conectam regiões magnéticas de polaridades opostas. São formações temporárias que podem durar vários dias, em alguns casos sobrevivem por algumas semanas. Os arcos associados aos flares solares são efêmeros. A densidade de matéria nos arcos é muito maior que a do meio no entorno.



25- Buracos coronais são regiões (escuras) com configuração aberta das linhas de campo magnético por onde elétrons e prótons podem escapar para o meio interplanetário (crédito: SOHO - EIT Consortium, ESA, NASA).

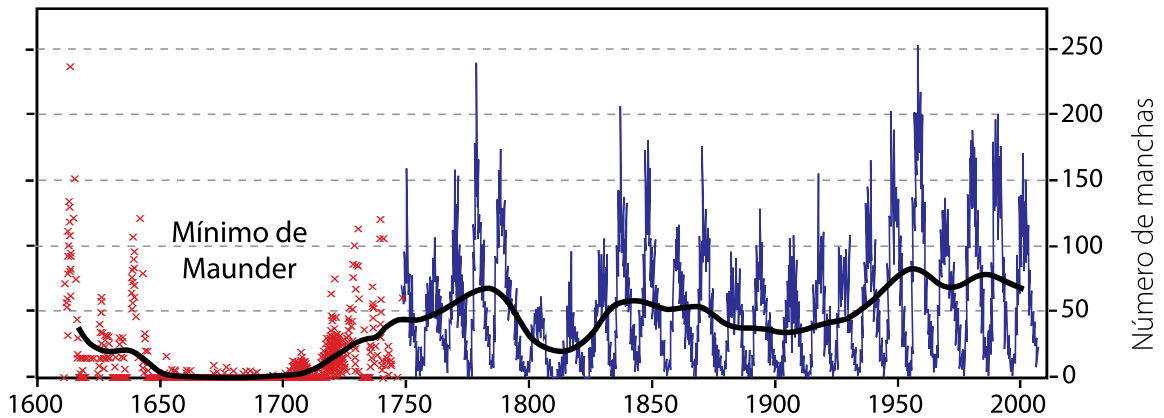


26- Ejeção de massa coronal observada em 07/06/2011. Esta imagem é resultante da sobreposição de imagens obtidas com diferentes instrumentos dos telescópios espaciais STEREO. As imagens estão na mesma escala (crédito: STEREO, NASA).

Uma imagem da coroa solar em raios X apresenta regiões escuras que contrastam com as regiões brilhantes. Essas regiões são mais frias e de menor densidade que a vizinhança e estão associadas a linhas de campo magnético abertas semelhantes às que ocorrem nas regiões polares. O vento solar de alta velocidade escapa do Sol por essas regiões escuras, por isso elas são chamadas buracos coronais.

Um dos fenômenos mais impressionantes no Sol são as gigantescas explosões de plasma na forma de bolhas, que abandonam o Sol a altas velocidades. Elas são conhecidas por ejeção de massa coronal e designadas pela abreviação CME (do inglês *Coronal Mass Ejections*). À medida que as explosões ascendem na coroa solar, elas se movem ao longo das linhas de campo magnético e aumentam de temperatura até dezenas de milhões de graus. Essas explosões liberam até 100 milhões de toneladas de plasma. As CMEs podem provocar sérios danos a satélites artificiais terrestres. Elas geralmente se manifestam de forma independente, mas podem estar associadas aos

Observação de manchas solares



27- Ciclos das manchas solares observados anualmente desde 1600. O período de 70 anos (1645 a 1715) em que não ocorreu atividade solar intensa é chamado de mínimo de Maunder (Robert A. Rohde / *Global Warming Art*, http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Sunspot_Numbers_png).

flares solares e protuberâncias. A ocorrência das CMEs varia com o ciclo de manchas solares. No mínimo, observa-se aproximadamente uma CME por semana. Próximo do máximo solar observa-se uma média de duas a três delas por dia.

6.4 ATIVIDADE SOLAR

A radiação e o fluxo de elétrons, prótons e íons mais densos que emanam do Sol variam de acordo com a atividade solar. Esse fenômeno contribui pouco para a variação da luminosidade solar e afeta pouco a evolução do Sol. Mas afeta significativamente o meio interplanetário.

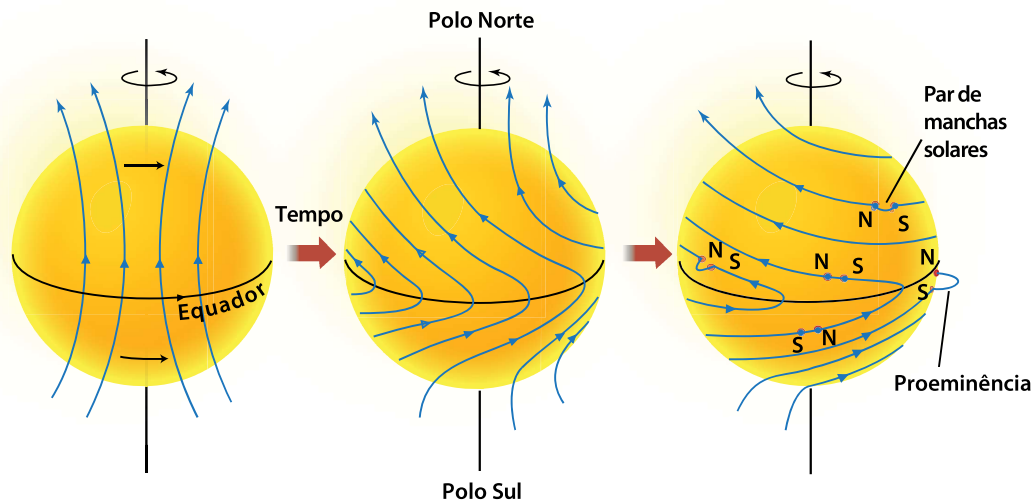
6.4.1 MANCHAS SOLARES E O CICLO DE 11 ANOS

Desde a época de Galileu são feitas contagens do número de manchas solares visíveis contribuindo para definir um fenômeno cíclico, com intervalo médio de 11 anos entre picos ou vales de manchas. Neste ciclo de 11 anos ocorre também uma variação da distribuição das manchas em relação à latitude solar. No início do ciclo, elas aparecem preferencialmente nas altas latitudes ($\pm 35^\circ$), mas no pico de intensidade encontram-se a $\pm 15^\circ$, e, no mínimo, concentram-se em torno de latitudes $\pm 8^\circ$. Entre 1645 e 1715, quando o número de manchas foi anormalmente baixo (mínimo de Maunder), definiu uma das três anomalias dos últimos mil anos. As outras ocorreram entre 1460 e 1550 (mínimo de Spörer) e 1280 e 1350 (mínimo de Wolf).

O ciclo de 11 anos é o mais evidente, mas há outros de períodos mais longos que se correlacionam às idades de gelo: as eras glaciais terrestres. É praticamente consenso entre a comunidade de astrofísicos solares que a quantidade de manchas solares está associada à atividade solar. Quanto mais manchas, mais ativo o Sol.

6.4.2 CAMPO MAGNÉTICO GERAL E O CICLO MAGNÉTICO

O campo magnético solar não está presente apenas nas manchas, mas em todo o Sol. Com configuração bipolar, o campo magnético geral apresenta polaridades opostas nos hemisférios: um he-



28- Como o Sol gira mais rapidamente no equador as linhas do campo magnético são distorcidas e acabam adquirindo direções opostas nos dois hemisférios. Nas manchas do hemisfério solar norte, o norte magnético das manchas está à direita (a linha emergente) e o sul magnético à esquerda (linha imergente). No hemisfério solar sul a situação se inverte (adaptado de Chaisson & McMillan, fig. 16.19, pág. 366).

misfério tem polaridade norte e o outro tem polaridade sul. Um fato marcante é que durante o ciclo médio de 11,2 anos de variabilidade da quantidade das manchas, essa polaridade se inverte, isto é, o hemisfério que tinha polaridade norte adquire polaridade sul, e o outro que tinha polaridade sul passa a norte. Depois de 11,2 anos, tudo se inverte novamente. Portanto, o período de variabilidade do campo magnético global solar é de 22,4 anos.

As polaridades magnéticas das manchas seguem ordem inversa nos dois hemisférios: se num hemisfério os polos norte das manchas estão a leste, no hemisfério sul esses polos estão a oeste. Depois de 11,2 anos, as polaridades dos hemisférios também se invertem e essa situação se altera. O diagrama da figura 28 ilustra como a rotação diferencial do Sol influencia a polaridade magnética geral e porque as manchas de hemisférios opostos apresentam polaridades invertidas.

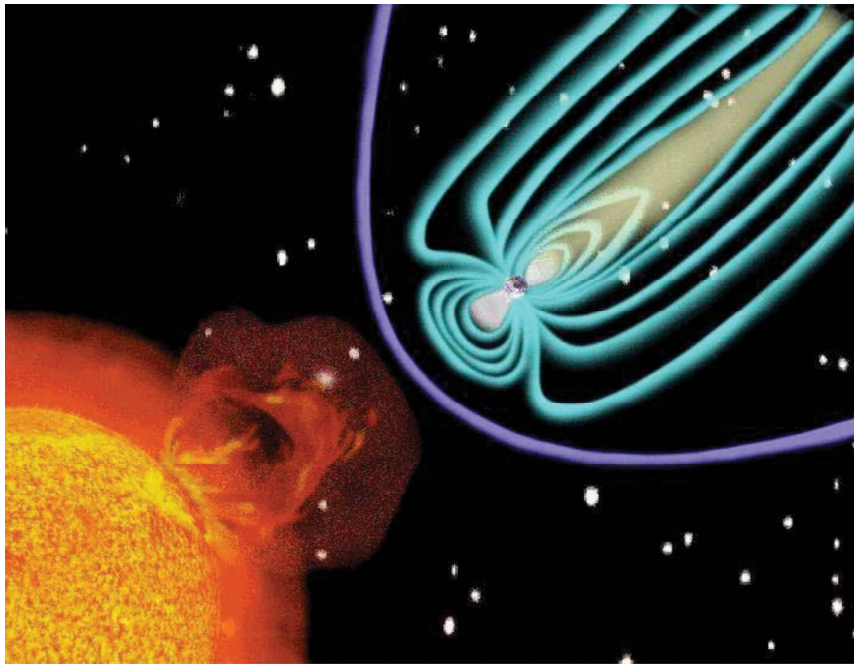
Observações recentes com o satélite solar SOHO mostram que o campo magnético geral do Sol está associado a velocidade diferencial entre as camadas convectiva e radiativa e os complexos movimentos do gás no envelope convectivo. Esse mecanismo é denominado efeito dínamo.

6.4.3 CENTROS DE ATIVIDADE

Longe de serem fenômenos isolados, as manchas estão associadas a outros fenômenos de superfície que ocasionalmente emergem com violência e expõem em direção à coroa grandes quantidades de partículas energéticas. Os locais onde ocorrem esses eventos são conhecidos por centros de atividade. Embora possam sobreviver por várias rotações solares, o tempo de vida média dos centros de atividade é de apenas algumas semanas.

As camadas fotosféricas que circundam as manchas são aquecidas por essas atividades e tornam-se mais brilhantes, formando as fáculas. As camadas cromosféricas acima das fáculas também respondem a essas atividades com regiões brilhantes denominadas praias. Elas são vistas pela emissão do hidrogênio (linha $H\alpha$ em 656,3 nm, no vermelho) e do cálcio ionizado (linha H em 396,9 nm e linha K em 393,3 nm, ambas no ultravioleta).

Outro fenômeno caracterizado pela atividade solar são as protuberâncias. Essas estruturas cromosféricas se estendem por centenas de milhares de quilômetros dentro da coroa. Frequentemente estão acima das zonas ativas (figura 18).



29- Representação da interação do vento solar com a magnetosfera terrestre. A linha violeta representa a zona de choque entre o vento e a magnetosfera e linhas azuis o campo magnético terrestre deformado pelo vento, formando uma cauda magnética (SOHO, NASA, ESA).

Os clarões (do inglês *flares*) são fulgurações decorrentes da liberação súbita de grandes quantidades de energia magnética no centro das regiões ativas. Observações espaciais no ultravioleta e em raios X indicam que a temperatura da matéria num clarão pode atingir 100 milhões K. A energia liberada por uma erupção típica poderia abastecer as necessidades energéticas da humanidade por milhões de anos.

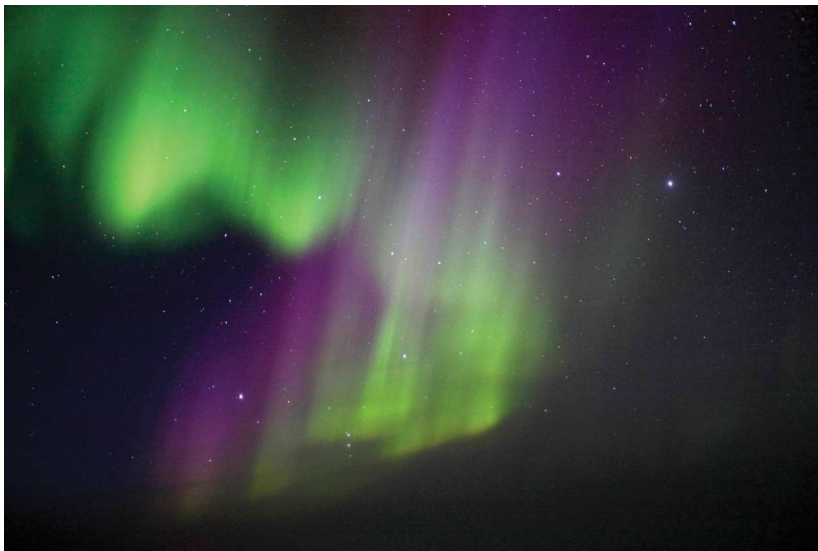
Os clarões podem liberar tanta energia quanto as maiores protuberâncias, mas em questão de minutos ou, no máximo, horas. Descobertas recentes mostram que um clarão pode produzir tremores sísmicos gigantescos que se propagam pelo interior solar. Um fenômeno desses foi observado em 6 de julho de 1996: após um clarão, ondas sísmicas se propagaram pela superfície solar por mais de 100.000 km (figura 8). Os tremores solares assemelham-se aos terrestres, mas as intensidades são mais elevadas.

6.5 VENTO SOLAR

A ação gravitacional do Sol sobre o gás coronal não é suficiente para retê-lo, ocorrendo assim um constante fluxo de matéria na forma de vento liberado pelo Sol. A composição do vento solar é basicamente a de um plasma eletricamente neutro, com elétrons e prótons em iguais proporções, átomos ionizados e campos magnéticos. A condutividade térmica (habilidade de conduzir calor) do plasma é muito grande, garantindo as elevadas temperaturas mesmo a grandes distâncias. À medida que o vento se expande, sua velocidade aumenta e a densidade de partículas diminui. Nas proximidades da Terra a densidade varia de 400 mil a 80 milhões de partículas/m³ e a velocidade varia de 300 km/s (nos elmos) a 800 km/s nos buracos coronais. Embora o vento solar carregue cerca de um milhão de toneladas de matéria solar a cada segundo, menos que 0,1% da massa solar foi perdida desde o nascimento do Sol, há 4,6 bilhões de anos. Ainda não se conhece em detalhes como e onde o vento



30- Ao se aproximar do Sol um cometa pode desenvolver uma cauda ionizada (azulada) quase retilínea, direcionada para a posição contrária à do Sol (crédito: Associazione Astronomia Cortina – www.sunrise.it/associazioni/aac/comete/95ol.html).



31- Aurora Austral sobre o polo sul (crédito Keith Vanderlinde / NSF http://www.nsf.gov/news/news_images.jsp?cntn_id=114540&org=NSF).

é acelerado a essas altas velocidades. Provavelmente, o fenômeno está associado ao mecanismo de aquecimento coronal.

O vento solar emana do Sol em todas as direções. Além de afetar os planetas, cometas e o meio interplanetário como um todo, também define a heliosfera, uma imensa bolha magnética que envolve a região mais externa do Sistema Solar. Estima-se que na direção de movimento do Sol na Galáxia, a heliosfera possa atingir até 160 UA, mas ela é bem maior na direção oposta, formando uma espécie de cauda magnética, a heliocausta. No interior da heliosfera predominam o ambiente típico do Sistema Solar e o magnetismo do Sol. Mas fora dela, prevalece o ambiente interestelar e o campo magnético de estrelas vizinhas. A nuvem de Oort, um berçário de cometas de longo período, tem dimensões muito maiores que a heliosfera, alguns milhares de vezes maior. Na região de transição (heliopausa) as partículas interestelares sofrem redução de velocidade, de supersônica a subsônica.

Uma propriedade do vento solar é sua capacidade de congelar o campo magnético e arrastá-lo consigo enquanto se expande. Como o Sol gira enquanto o vento escapa, a configuração espacial do vento acaba sendo a de uma espiral de Arquimedes. O vento solar interage fortemente com os planetas com campos magnéticos como a Terra. Dois exemplos desta interação são as auroras polares e a cauda ionizada (Tipo I) dos cometas.

Nuvens magnéticas são produzidas no vento solar quando clarões (*flares*) e ejeção de massa coronal levam consigo material do Sol embebido no campo magnético. Essas nuvens magnéticas podem ser detectadas por observações de características do vento solar como velocidade do vento, densidade e intensidade e direção do campo magnético. Esses dados foram obtidos pela sonda espacial Ulysses (ESA e NASA) lançada em 6 de outubro de 1990 e que ficou operacional por

18 anos e 8 meses. Durante seu percurso passou sobre os polos norte e sul do Sol. Suas medições deram uma nova visão do vento solar.

A magnetosfera terrestre é fortemente afetada pelo vento solar. Os cinturões de Van Allen e as auroras são intensificados por ocorrência de erupções solares que aumentam com o ciclo de atividade solar. A Terra está sendo continuamente bombardeada por partículas aceleradas provenientes não só do Sol, mas também de outras fontes do meio interestelar e da Galáxia.

A sonda espacial *Advanced Composition Explorer* (ACE), da NASA, lançada em 25 de agosto de 1997, ficará em órbita em um ponto do espaço distante 1,5 milhão de quilômetros da Terra e 148,5 milhões de quilômetros do Sol. Nessa posição, conhecida como um dos pontos lagrangianos (o L1), as forças gravitacionais da Terra e do Sol se equilibram. Isso mantém o satélite em posição estável relativamente à Terra e ao Sol. Dessa posição, a ACE terá uma visão do vento solar, do campo magnético interplanetário e das partículas de alta energia aceleradas pelo Sol, na heliosfera e na Galáxia. A ACE permanecerá operacional até 2024.