

Capítulo 4

O SOL

José Roberto Cecatto*

* e-mail: jrc@das.inpe.br

O SOL

LISTA DE FIGURAS	4-5
LISTA DE TABELAS	4-7
4.1 INTRODUÇÃO	4-9
4.2 A ESTRUTURA DO SOL	4-10
4.2.1 O INTERIOR E A ENERGIA SOLAR	4-10
4.2.2 A ATMOSFERA SOLAR	4-11
4.3 CAMPOS MAGNÉTICOS DO SOL	4-19
4.4 REGIÕES ATIVAS	4-22
4.5 CICLO DE ATIVIDADE SOLAR	4-23
4.6 EXPLOSÕES ("FLARES") SOLARES	4-25
4.7 EJEÇÕES DE MASSA CORONAL (CME)	4-26
4.8 RELAÇÕES SOLARES-TERRESTRES	4-28
4.9 VENTO SOLAR	4-28
4.10 IMPORTÂNCIA DAS PESQUISAS CIENTÍFICAS SOBRE O SOL	4-31
4.11 BIBLIOGRAFIA	4-31

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 4.1 - ESQUEMA REPRESENTANDO AS CAMADAS INTERNAS DO SOL: NÚCLEO, ZONA RADIATIVA E ZONA CONVECTIVA.	4-11
FIGURA 4.2 - IMAGENS MOSTRANDO O FENÔMENO DE GRANULAÇÃO NA FOTOSFERA SOLAR.	4-12
FIGURA 4.3 - DISCO SOLAR COM MANCHAS SOLARES.	4-13
FIGURA 4.4 - EXEMPLO DE GRUPO DE MANCHAS SOLARES.	4-14
FIGURA 4.5 - IMAGEM DE UMA MANCHA SOLAR.	4-14
FIGURA 4.6 - IMAGEM DO SOL EM LUZ BRANCA.	4-15
FIGURA 4.7 - IMAGEM DO SOL EM H-ALFA.	4-16
FIGURA 4.8 - PROEMINÊNCIA SOLAR OBSERVADA EM H-ALFA.	4-17
FIGURA 4.9 - IMAGEM EM RAIOS-X DO SOL OBTIDA PELO SATÉLITE SKYLAB, EM 19 DE DEZEMBRO DE 1973.	4-17
FIGURA 4.10 - EXEMPLOS DE ECLIPSES SOLARES TOTAIS MOSTRANDO A COROA. ..	4-18
FIGURA 4.11 - EVOLUÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO SOLAR DURANTE UM CICLO DE ATIVIDADE.	4-20
FIGURA 4.12 - CONFIGURAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO DE UMA REGIÃO ATIVA SOLAR EM ESTÁGIO EVOLUÍDO.	4-21
FIGURA 4.13 POLARIDADES DAS MANCHAS "PRECURSORA" E "SEGUIDORA" DO CAMPO MAGNÉTICO DE REGIÕES ATIVAS SOLARES NOS HEMISFÉRIOS NORTE E SUL DO SOL DURANTE UM CICLO DE ATIVIDADE SOLAR.	4-22

FIGURA 4.14 - DIAGRAMA DE EVOLUÇÃO DOS CICLOS SOLARES DESDE 1600. 4-30

FIGURA 4.15 - "DIAGRAMA BORBOLETA" MOSTRANDO AS LATITUDES DE SURGIMENTO DAS MANCHAS SOLARES AO LONGO DOS CICLOS SOLARES. 4-24

FIGURA 4.16 - SEQUÊNCIA DE IMAGENS MOSTRANDO A OCORRÊNCIA DE UMA CME 4-27

FIGURA 4.17 - ILUSTRAÇÃO DAS DIMENSÕES DE UMA CME EM COMPARAÇÃO COM O TAMANHO DA TERRA 4-27

FIGURA 4.18 - VENTO SOLAR E SUA INTERAÇÃO COM A MAGNETOSFERA TERRESTRE.... 4-29

FIGURA 4.19 - EXEMPLOS DE FOTOS DE AURORAS OBTIDAS EM ALTAS LATITUDES. 4-30

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 - CARACTERÍSTICAS DO SOL.....	4-10
---	-------------

4.1 INTRODUÇÃO

Do ponto de vista dos seres humanos a Terra e o Sol, não necessariamente nesta ordem, são os astros mais importantes do sistema solar. O primeiro por se tratar de nossa "casa", e o segundo por ser aquele que mantém a Terra um planeta bastante agradável e propício para a existência da vida em suas diversas formas que conhecemos. Além disso, aprendemos a conhecer o Sol desde a infância como fonte de luz e calor intensos que nos permite as primeiras percepções visuais a respeito do mundo que nos cerca. Com o passar dos anos aprendemos a tirar proveito de sua luz e calor e a admirar sua imponência no céu diurno, como fazemos com a Lua no céu noturno. Além disso, desde os primórdios da civilização o homem aprendeu a admirar o Sol como o responsável pela existência e manutenção da vida na Terra e por isso mesmo, na maioria das culturas antigas, o Sol era adorado como um Deus. O Sol já foi chamado de Helios pelos gregos, de Mítras pelos persas e de Rá pelos egípcios.

Entretanto, a despeito de aceitarmos a presença do Sol no céu não deixamos de nos perguntar de onde vem toda sua energia - luz e calor - que somos capazes de ver e sentir, e que o caracteriza como uma estrela que é a mais próxima da Terra. Por estar relativamente próximo da Terra, há milhares de anos o homem na Terra já identificava as principais características do Sol, como por exemplo, as manchas solares escuras e as regiões mais brilhantes na superfície, além da rotação do disco solar. Mais recentemente, com o advento de técnicas poderosas e avançadas, temos nos aproximado de desvendar alguns de seus mistérios.

O Sol encontra-se a uma distância média de 150 milhões de quilômetros da Terra. Esta distância equivale a cerca de 8 minutos-luz. A Tabela 4.1 mostra um resumo das principais características do Sol.

O Sol encontra-se no centro geométrico e gravitacional do sistema solar. Em torno dele orbitam todos os outros corpos, como planetas, asteróides e cometas.

TABELA 4.1 - CARACTERÍSTICAS DO SOL.

Massa	$1,989 \times 10^{30}$ kg
Raio Equatorial	695.000 km
Raio Médio	109,2 raios terrestres
Densidade Média	$1,41 \text{ g/cm}^3$
Densidade Central	162 g/cm^3
Período de Rotação Equatorial*	609 horas (~25 dias)
Velocidade de Escape	618,02 km/s
Distância Média à Terra	149,6 milhões de km
Luminosidade	$3,83 \times 10^{33}$ ergs/s
Temperatura Média na Superfície	5.500° C

- O Sol apresenta rotação diferencial, isto é, o período de rotação depende da latitude. Nas regiões polares, a rotação dura cerca de 30 dias.

4.2 A ESTRUTURA DO SOL

O Sol pode ser dividido em interior solar e atmosfera solar. O interior é composto de Núcleo, Zona radiativa e Zona convectiva. A parte mais externa do Sol, referida de atmosfera solar é composta de 3 camadas: a fotosfera, a cromosfera e a coroa.

4.2.1 O INTERIOR E A ENERGIA SOLAR

Nem todas as estrelas têm a mesma estrutura interna. Esta depende da massa da estrela. Para o Sol, a estrutura interna é composta de um núcleo, zona radiativa e um envelope convectivo que pode chegar até a superfície. A Figura 4.1, mostra um esquema das camadas do interior solar.

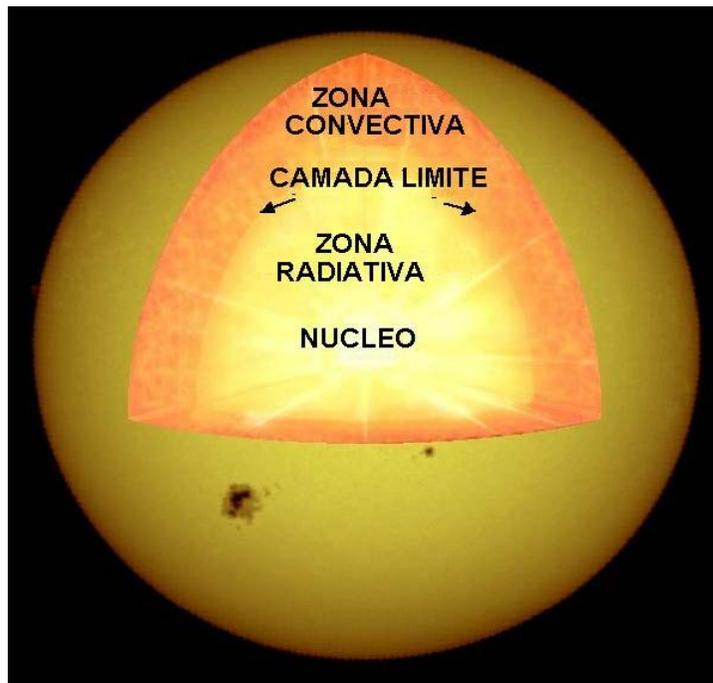


FIGURA 4.1 - ESQUEMA REPRESENTANDO AS CAMADAS INTERNAS DO SOL: NÚCLEO, ZONA RADIATIVA E ZONA CONVECTIVA. O NÚCLEO DO SOL ENCONTRA-SE EM EQUILÍBRIO RADIATIVO COBERTO POR UMA CAMADA ONDE OCORRE CONVECÇÃO (FONTE: [HTTP://SCIENCE.MSFC.NASA.GOV/SSL](http://science.msfc.nasa.gov/ssl))

O Sol emite uma potência de $3,9 \times 10^{26}$ W. Toda essa energia se origina de reações nucleares que ocorrem no seu centro interior e demora 10^7 anos para ser transportada pela zona radiativa e em seguida pela zona convectiva acima desta até atingir a superfície, onde a temperatura é aproximadamente 5.800 K.

O estudo científico das condições físicas no interior e na atmosfera das estrelas nos permitiram determinar seus processos de produção de energia. Sabemos que as estrelas são gigantescas massas de gás (predominantemente hidrogênio) que se mantêm coesas pela própria força gravitacional. Por este motivo, tanto a pressão quanto a temperatura do gás são altíssimas no núcleo das estrelas. Por exemplo, a temperatura é da ordem de dezenas a centenas de milhões de graus (cerca de 15 milhões de graus no caso do Sol). A estas temperaturas e pressões o gás encontra-se no estado ionizado - plasma - estabelecendo um ambiente propício para a ocorrência de reações nucleares de fusão dos elementos mais leves (hidrogênio - e seus isótopos, deutério e trítio - e hélio). Devido a alta pressão no centro, o gás apresenta propriedades que podem ser melhor

descritas no estado de fluido ao invés do estado gasoso. Da energia produzida pela fusão dos elementos no núcleo das estrelas - em especial, o Sol - parte é usada para manter as condições de temperatura e pressão interna e parte é emitida na forma de radiação que escapa pela superfície iluminando e aquecendo os astros do espaço interplanetário.

Observando-se a superfície solar com grande aumento pode-se ver grãos semelhantes a bolhas de água em ebulição dentro de uma panela (Figura 4.2). No caso do Sol, são bolhas de gás muito quente transportando a energia do interior para a superfície. No envoltório abaixo da superfície, a energia é transportada por convecção do gás. A convecção ocorre devido a grande opacidade dessa camada à transferência de energia pelo processo radiativo. Assim, as porções mais internas do gás, aquecidas pela radiação que vem do núcleo, expandem-se e sobem até a superfície, onde perdem energia e esfriam. Ao esfriarem tornam-se mais densas e pesadas, tornando a descer. As células de convecção têm cerca de 5.000 km e se movimentam em escalas de 10 minutos.

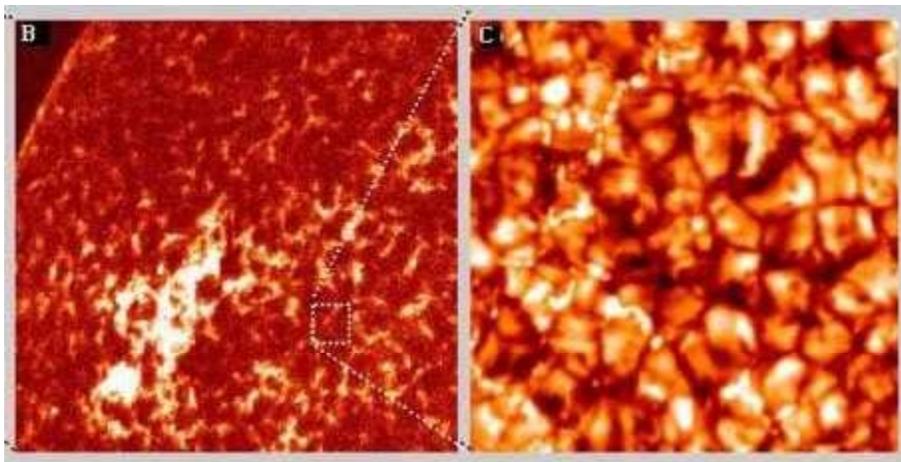


FIGURA 4.2 - IMAGENS MOSTRANDO O FENÔMENO DE GRANULAÇÃO DA FOTOSFERA SOLAR. (FONTE: [HTTP://ASTRO.IF.UFRGS.BR/ESOL/ESOL.HTML](http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.html))

4.2.2 A ATMOSFERA SOLAR

A atmosfera solar é composta basicamente por 3 camadas: fotosfera - visível a olho nu, cromosfera acima da primeira, e coroa solar, a camada mais externa e tênue.

4.2.2.1 FOTOSFERA

Trata-se da camada visível do Sol. É uma estreita camada de cerca de 500 km de espessura, o que equivale a cerca de meio milésimo do raio solar. É da fotosfera que vem a maior parte da luz visível. Entretanto, o gás desta camada não é totalmente transparente, e devido a sua opacidade o interior solar não pode ser visto. A densidade é de cerca de 10^{13} - 10^{15} partículas por centímetro cúbico. Além da granulação, nesta camada, podem ser observadas manchas escuras que surgem e praticamente desaparecem por completo em períodos regulares de cerca de 11 anos. A Figura 4.3 mostra exemplos de grupos de manchas solares observadas sobre o disco solar.

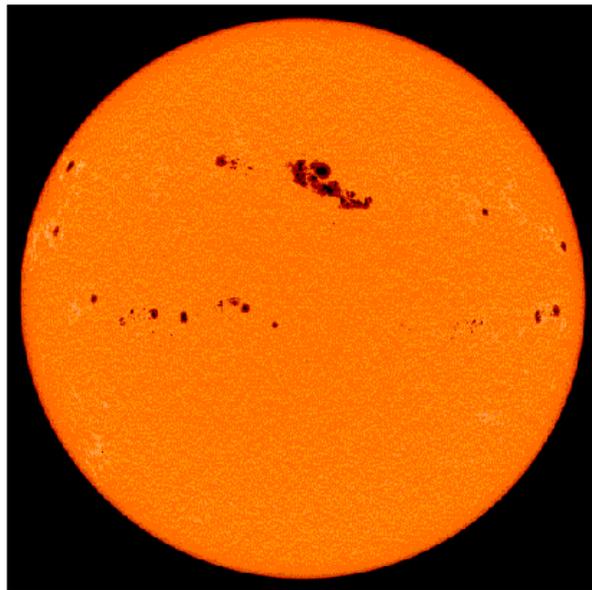


FIGURA 4.3 - DISCO SOLAR COM MANCHAS SOLARES. (FONTE: [HTTP://WWW.SPACEWEATHER.COM](http://www.spaceweather.com))

Essas manchas já eram observadas pelos chineses milhares de anos antes de Cristo e ficaram conhecidas como manchas solares. Entretanto, o estudo mais sistemático e científico das manchas solares só começou com o uso do telescópio, sendo observadas (por projeção da imagem do Sol) desde Galileo, já em 1610. Como ficará claro mais tarde, estão relacionadas com o ciclo de atividade solar.

As manchas solares tendem a se formar em grupos (Figura 4.4) e são constituídas de duas partes: a umbra, parte central mais escura, com temperaturas em torno de 3.800 K,

e a penumbra, região um pouco mais clara e com estrutura radial em torno da umbra. A Figura 4.5 mostra manchas solares onde pode-se identificar a umbra e a penumbra.

A presença de manchas solares nos informa a respeito da existência de campos magnéticos intensos na atmosfera solar. Uma vez que o campo magnético inibe o processo convectivo, o transporte de energia nas manchas é bem menor, e conseqüentemente as manchas são significativamente mais frias emitindo bem menos radiação que o restante da superfície solar. Por este motivo, devido ao contraste com a superfície solar mais brilhante é que as manchas aparecem escuras. Normalmente, as manchas aparecem na superfície solar em grupos que evoluem em número e área total e podem durar até 2 rotações solares.

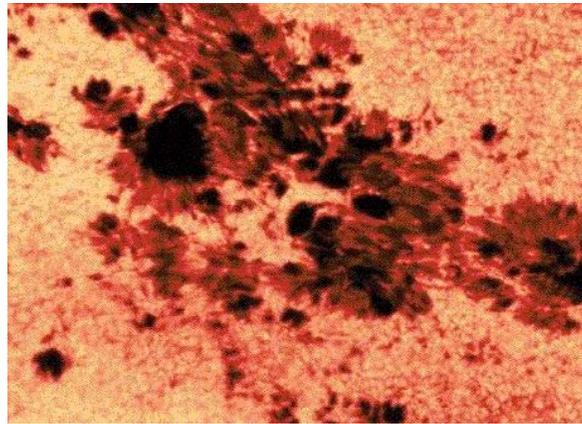


FIGURA 4.4 - EXEMPLO DE GRUPO DE MANCHAS SOLARES. (FONTE: [HTTP://SCIENCE.MSFC.NASA.GOV/SSL](http://science.msfc.nasa.gov/ssl))

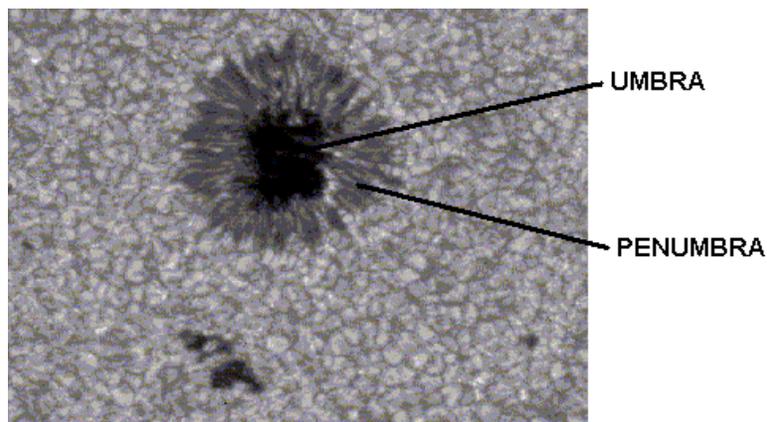


FIGURA 4.5 - IMAGEM DE UMA MANCHA SOLAR. PODEM SER IDENTIFICADAS A UMBRA E A PENUMBRA. (FONTE: [HTTP://WWW.HAO.UCAR.EDU:80/PUBLIC](http://www.hao.ucar.edu:80/public))

O número de manchas presentes no disco solar está diretamente relacionado ao nível de atividade do ciclo que é explicado adiante. Observando-se um determinado grupo de manchas ao longo de vários dias constata-se que o Sol possui rotação com um período médio de 27 dias (possui rotação diferenciada de 25 dias no Equador e 30 dias nas proximidades dos pólos). O escurecimento - opacidade - observado do limbo é uma informação de que a temperatura cai com a altura na fotosfera (Figura 4.6) Esta camada apresenta uma temperatura que vai de ~ 5.800 K na superfície solar até cerca de 4.200 K na sua parte mais elevada, próximo à base da cromosfera.

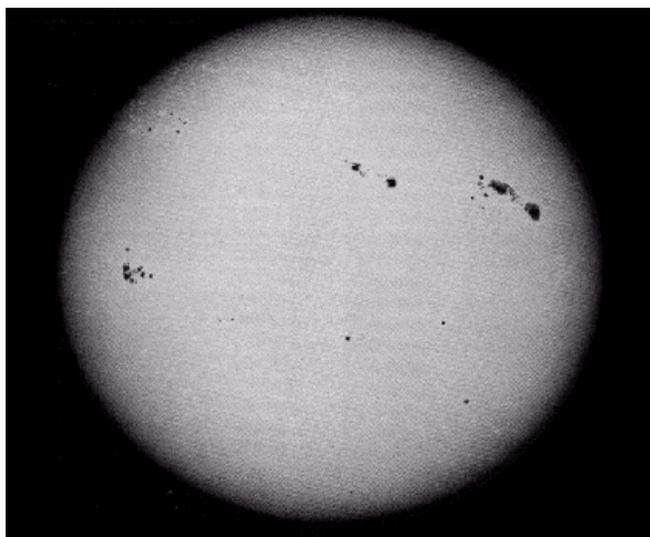


FIGURA 4.6 - IMAGEM DO SOL EM LUZ BRANCA. PODE-SE OBSERVAR O OBSCURECIMENTO DO LIMBO. (FONTE: [HTTP://WWW.HAO.UCAR.EDU:80/PUBLIC](http://www.hao.ucar.edu:80/public))

4.2.2.2 CROMOSFERA

Estendendo-se até cerca de 10.000 km acima da fotosfera esta camada possui uma temperatura de dezenas a centenas de milhares de graus. A densidade cai de 1-2 ordens de grandeza relativamente a fotosfera. Esta camada pode ser vista observando-se o Sol com um filtro especial na luz vermelha conhecido como H-alfa (correspondendo a primeira linha da serie de Balmer do átomo de Hidrogênio) (Figura 4.7). Utilizando este filtro pode-se distinguir as várias estruturas cromosféricas: proeminência, "praias" brilhantes, filamentos, fáculas, "plages" e espículos (Figura 4.7). A fronteira cromosfera-coroa é conhecida como região de transição, uma fina camada de poucas centenas de quilômetros na qual a temperatura se eleva dos valores cromosféricos até

cerca de 1-2 milhões de graus, já na base da coroa. Enquanto isso, a densidade decresce a valores de $10^9 - 10^8 \text{ cm}^{-3}$, valores estes típicos da coroa solar calma (característica de períodos de baixa atividade solar).

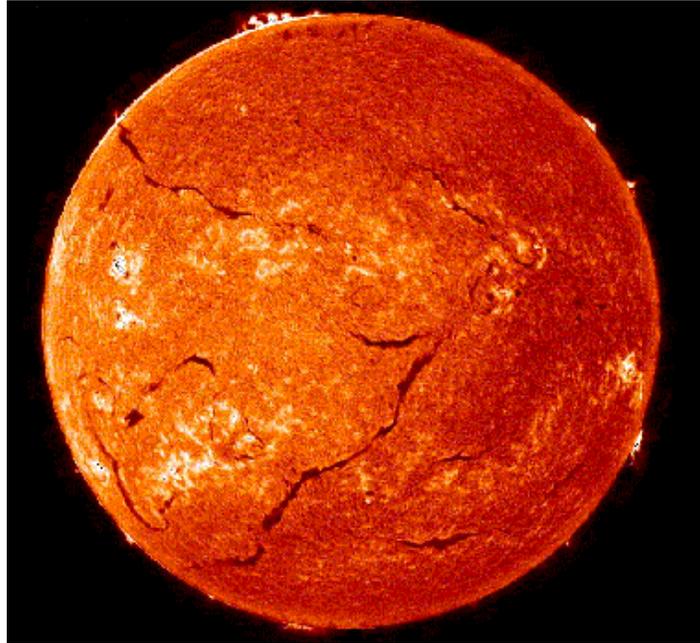


FIGURA 4.7 - IMAGEM DO SOL EM H-ALFA. PODE-SE IDENTIFICAR ESTRUTURAS COMO: FILAMENTOS - ESCUROS, FÁCULAS - CLARAS - E ESPÍCULOS - NO LIMBO. (FONTE: [HTTP://WWW.HAO.UCAR.EDU:80/PUBLIC](http://www.hao.ucar.edu:80/public))

Com um filtro H-alfa pode-se identificar a cromosfera e distinguir as proeminências, que são estruturas que se erguem do limbo ou formam nuvens escuras sobre o disco. "Praias" brilhantes podem ser vistas sobre o disco associadas as manchas.

Qualquer nuvem de material visível acima da superfície solar observada no H-alfa pode ser chamada de proeminência. Quando observada no limbo aparece brilhante em contraste ao céu escuro, quando observada no disco é chamada por filamento escuro, apresentando-se assim por possuir apenas 10% do brilho do disco solar em H-alfa. Podem ser observadas em alguns pontos ao redor do disco escuro da Lua quando ocorre o máximo de eclipses solares totais. As proeminências podem ser classificadas pela forma como se apresentam em:

1- Calmas (de longa duração): proeminências ou filamentos localizados em ou próximos a regiões ativas.

2- Ativas (transitórias): proeminências geralmente associadas a "flare" no limbo ou precipitação de arcadas.

A proeminência eruptiva está entre os mais espetaculares eventos solares (Figuras 4.8 e 4.9), e é responsável por uma grande parcela das ejeções de massa coronal - CME.

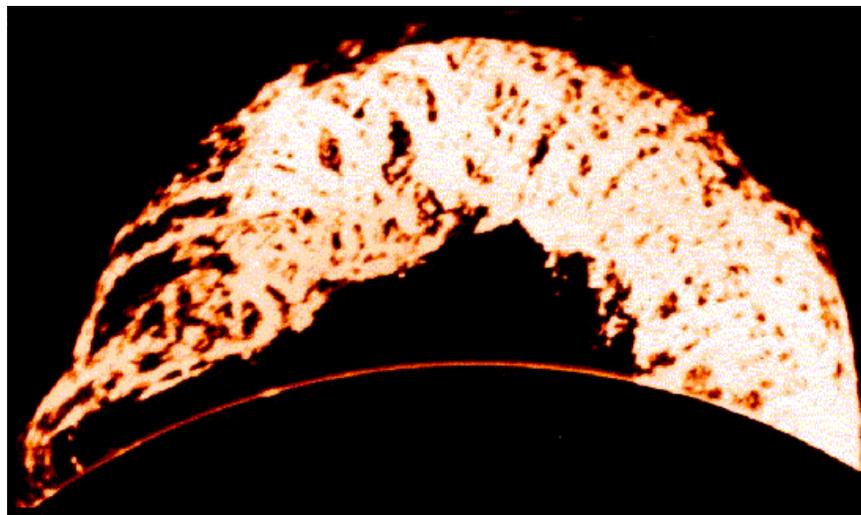


FIGURA 4.8 - PROEMINÊNCIA SOLAR OBSERVADA EM H-ALFA. (FONTE: [HTTP://SCIENCE.MSFC.NASA.GOV/SSL](http://science.msfc.nasa.gov/ssl))

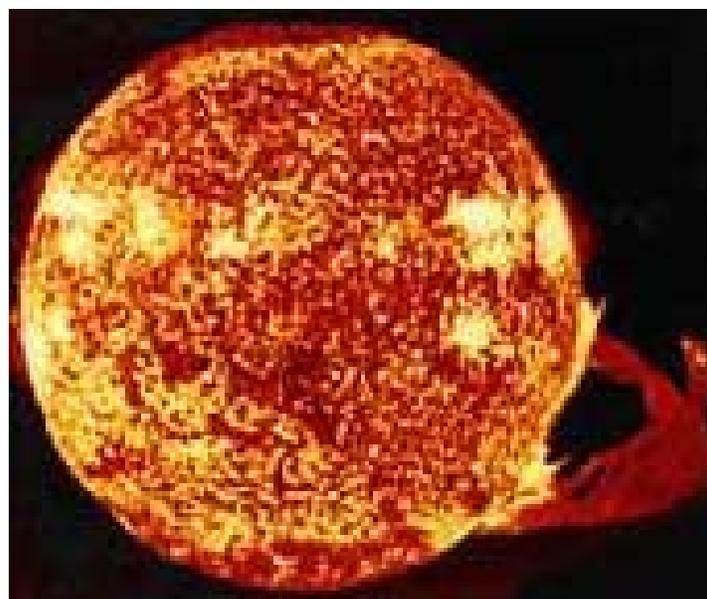


FIGURA. 4.9 - IMAGEM EM RAIOS-X DO SOL OBTIDA PELO SATÉLITE SKYLAB, EM 19 DE DEZEMBRO DE 1973. É MOSTRADA UMA DAS MAIS IMPRESSIONANTES PROEMINÊNCIAS JÁ REGISTRADAS. (FONTE: LABORATORIO ESPACIAL SKYLAB - NASA).

Todos os "flares" estão associados a filamentos, que normalmente desaparecem por erupção para cima. Os filamentos grandes se formam gradualmente. O primeiro passo ocorre quando uma região ativa se rompe em duas regiões unipolares. A seguir, as linhas neutras que se formam do rompimento desta e outras regiões ativas se unem para produzir um filamento extenso. Às vezes duram por várias rotações solares. Um filamento típico é menor, dura por apenas uma rotação solar e sofre ligeira alteração de forma quase todo dia. Além disso, podem ser usados para estimativas da rotação solar.

Espículos são pequenos jatos de matéria que se projetam em direção à coroa solar, com velocidades de cerca de 20 km/s a alturas de até 15.000 km. Estas estruturas, que surgem em aglomerados semelhantes a placas de grama, só podem ser vistas quando se observa a atmosfera solar - com um filtro H-alfa - em direção ao limbo (contorno) do disco solar. Esses aglomerados normalmente aparecem na borda de estruturas magnéticas, têm uma largura de aproximadamente 2.000 km e duração de cerca de 10 minutos, quando surgem novos conjuntos de espículos.

4.2.2.3 COROA

A coroa é a parte mais externa da atmosfera solar e estende-se por milhões de quilômetros a partir do Sol. A coroa solar é melhor observada durante os eclipses totais do Sol, pois apesar de ter um brilho equivalente ao da lua cheia, ela fica obscurecida quando a fotosfera é visível. Desta forma durante o eclipse, como o disco solar é ocultado pela Lua, é possível observar e estudar a coroa (Figura 4.10).



FIGURA. 4.10- EXEMPLOS DE ECLIPSES SOLARES TOTAIS MOSTRANDO A COROA (FONTE: [HTTP://SUNEARTH.GSFC.NASA.GOV/ECLIPSE/ECLIPSE.HTML](http://sunearth.gsfc.nasa.gov/eclipse/eclipse.html))

A densidade desta camada é de 2-3 ordens de grandeza mais baixa do que aquela da cromosfera e sua temperatura é de 1-2 milhões de graus. Como a temperatura é extremamente alta, a coroa emite grande quantidade de raios-X. Além disso, a esta temperatura o gás encontra-se na forma de plasma - gás ionizado - produzindo assim os elétrons e íons que podem formar o chamado vento solar. Este vento se propaga por todo o sistema solar e eventualmente atinge a Terra.

Nesta camada também são observadas as chamadas regiões ativas, locais onde temperatura e densidade são elevadas além de possuírem campos magnéticos intensos (de centenas a poucos milhares de Gauss) distribuídos em formato de arcos com as pontas - pólos magnéticos - situados na fotosfera.

E' nas regiões ativas que se observam os fenômenos conhecidos como explosões ("flares") solares que ocorrem com maior frequência nos períodos de máximo de atividade do ciclo solar (explicado adiante).

4.3 CAMPOS MAGNÉTICOS DO SOL

No início de um ciclo de atividade, o campo magnético solar é basicamente bipolar com os pólos, a princípio, coincidentes com os pólos heliográficos. Neste período, as linhas do campo magnético solar seguem a direção de meridianos que atravessam o Sol do pólo norte até o pólo Sul, ou vice-versa, passando perpendicularmente pelo Equador solar. A partir daí, como a rotação diferencial do Sol no Equador é mais rápida do que nos pólos, o gás que está preso às linhas de campo as arrasta consigo causando uma distorção em sua direção a partir de médias latitudes em direção ao Equador. A cada rotação, as linhas de campo vão sendo mais e mais arrastadas e distorcidas nas proximidades do Equador, até que a densidade de linhas de campo torna-se muito elevada e sua direção passa a ser praticamente paralela à linha equatorial solar. Nesse período, começa a ocorrer o afloramento das linhas de campo subsuperficial à superfície em forma de arcos e a emergência desses arcos magnéticos a partir da superfície em direção à cromosfera e coroa solares. A Figura 4.11 ilustra bem este processo durante um ciclo de atividade solar.

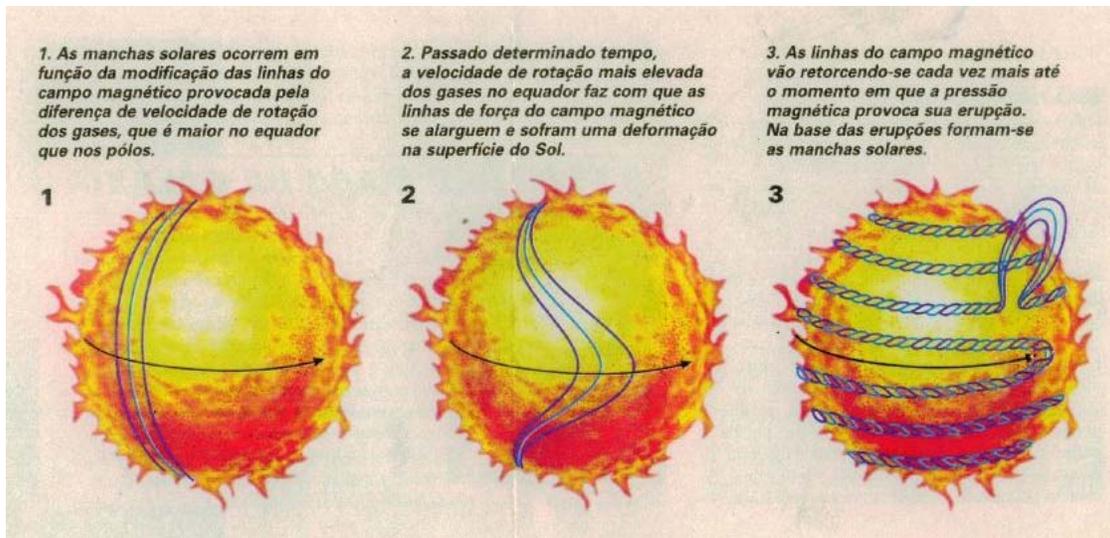


FIGURA. 4.11- EVOLUÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO SOLAR DURANTE UM CICLO DE ATIVIDADE (FONTE: REVISTA CIÊNCIA HOJE)

Passados cerca de 11 anos, o ciclo solar seguinte se inicia com as linhas de campo novamente seguindo os meridianos da superfície terrestre, porém com sentido invertido ao do ciclo solar anterior. Quando do início do próximo ciclo de atividade as linhas de campo novamente invertem seu sentido, desta forma repetindo o mesmo sentido do penúltimo ciclo. É por este motivo que se costuma dizer que o período do ciclo magnético solar é de cerca de 22 anos, correspondendo ao intervalo de tempo de 2 ciclos de atividade solar.

O campo magnético das chamadas regiões ativas, associadas às manchas solares, se estende para a atmosfera solar, cromosfera e coroa, assumindo uma forma característica de arco, na sua configuração mais simples, com seus extremos presos à superfície e correspondendo às polaridades magnéticas opostas. Entretanto, na grande maioria dos casos a geometria da configuração do campo magnético destas regiões é extremamente complexa, envolvendo a interação de vários arcos de tamanhos e dinâmica distintos. A Figura 4.12 representa de forma esquemática a possível geometria do campo magnético de uma região ativa evoluída.



FIGURA. 4.12- CONFIGURAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO DE UMA REGIÃO ATIVA SOLAR EM ESTÁGIO EVOLUÍDO (FONTE: EXPERIMENTO EIT, SATÉLITE SOHO)

É esta complexidade que propicia as condições necessárias para a ocorrência de instabilidades que levam à liberação da energia armazenada no campo magnético gerando o fenômeno conhecido como “flare”, associado à explosão solar observada em outras faixas de comprimentos de onda que não o ótico.

Na superfície as polaridades magnéticas das manchas se distribuem de forma característica com a mancha “precursora”, caracterizando uma polaridade magnética, enquanto a mancha “seguidora”, possui a outra polaridade magnética. Entretanto, as polaridades magnéticas das manchas “precursora” e “seguidora” são opostas nos hemisférios norte e sul do Sol (vide Figura 4.13), invertendo suas polaridades a cada ciclo de atividade.

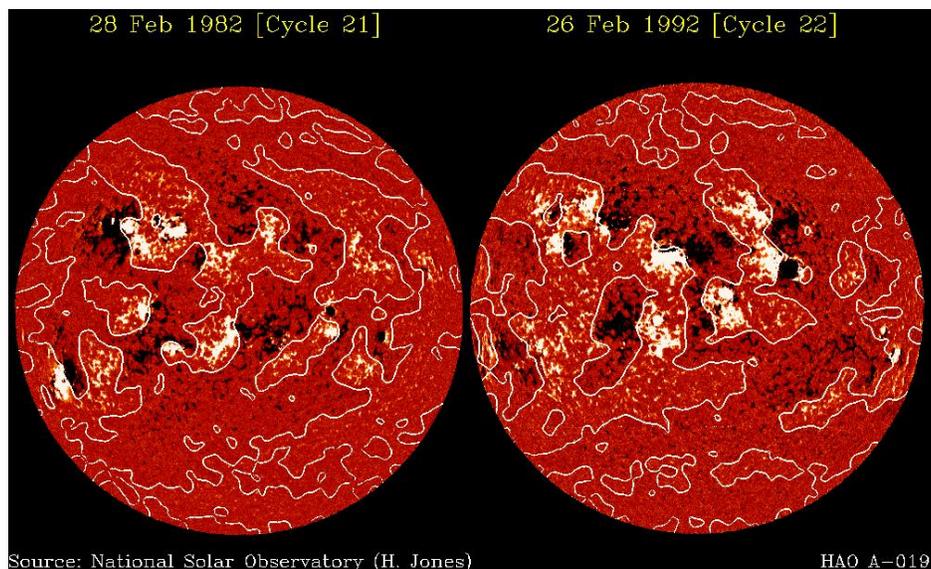


FIGURA. 4.13- (ESQUERDA) POLARIDADES DAS MANCHAS “PRECURSORA” E “SEGUIDORA” DO CAMPO MAGNÉTICO DE REGIÕES ATIVAS SOLARES NOS HEMISFÉRIOS NORTE E SUL DO SOL DURANTE UM CICLO DE ATIVIDADE SOLAR. (DIREITA) INVERSÃO DAS POLARIDADES MAGNÉTICAS DAS MANCHAS “PRECURSORA” E “SEGUIDORA” NO CICLO SEGUINTE DE ATIVIDADE (FONTE: NATIONAL SOLAR OBSERVATORY)

4.4 REGIÕES ATIVAS

Estas regiões estão situadas no interior de configurações de campo magnético em forma de ferradura ou arco, com linhas de fluxo magnético que se projetam pela cromosfera até a coroa solar, cujas extremidades - pólos magnéticos norte e sul - estão presas na fotosfera associados às manchas, como se fosse um ímã gigante. Devido a ação destes campos, é nas regiões ativas que se observam os fenômenos conhecidos como explosões solares - "flare", que em português significa fulguração, historicamente devido às observações pioneiras efetuadas na luz visível. Estas explosões ocorrem com frequência muito maior nos períodos de máxima atividade do ciclo solar.

4.5 CICLO DE ATIVIDADE SOLAR

A maioria das características da emissão solar está diretamente relacionada a atividade solar. O aspecto mais marcante da atividade é o ciclo de 11 anos, período no qual o número de manchas solares cresce e atinge um máximo, decrescendo em seguida. A Figura 4.14 mostra a evolução dos ciclos solares desde 1.600.

Estamos aproximadamente no máximo do atual ciclo (ciclo 23) de atividade solar. No início de um ciclo, as manchas pequenas surgem em número reduzido em latitudes solares mais elevadas, e vão se formando cada vez maiores e mais próximas ao equador solar aumentando em número, conforme o ciclo evolui em direção ao máximo de atividade, decrescendo gradativamente quando o ciclo decai em direção ao fim (Figura 4.15).

Este período leva cerca de 11 anos em média. Entretanto, como uma mesma polaridade magnética do Sol se repete somente a cada 2 ciclos de atividade, o ciclo magnético solar é de cerca de 22 anos.

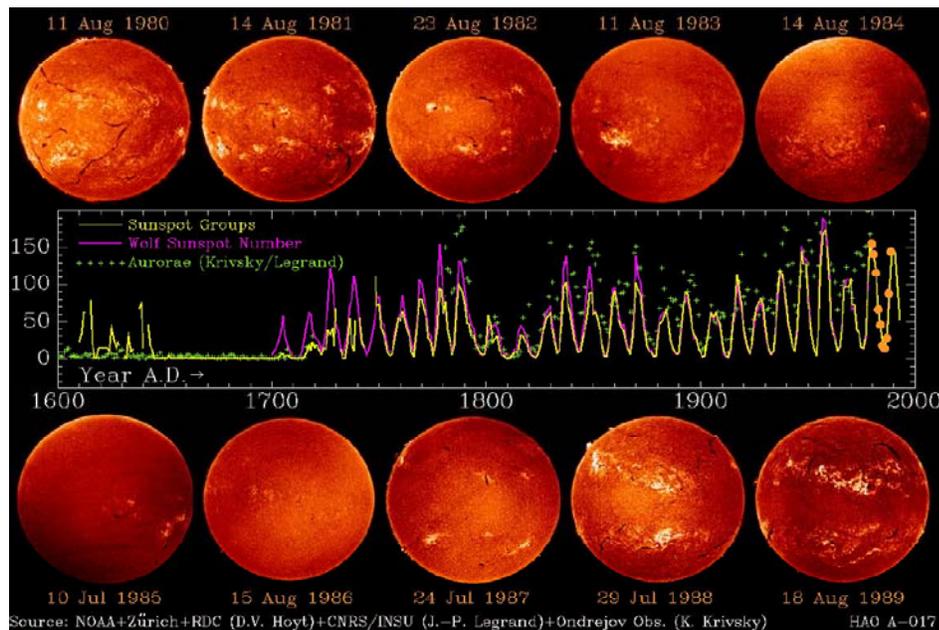


FIGURA 4.14 - DIAGRAMA DA EVOLUÇÃO DOS CICLOS SOLARES DESDE 1.600 (CENTRO). AS IMAGENS DO TOPO E DE BAIXO REPRESENTAM ASPECTOS DO DISCO SOLAR EM DIFERENTES ÉPOCAS AO LONGO DE UM CICLO: DE 1980 A 1989. (FONTE: [HTTP://WWW.HAO.UCAR.EDU:80/PUBLIC](http://www.hao.ucar.edu:80/public))

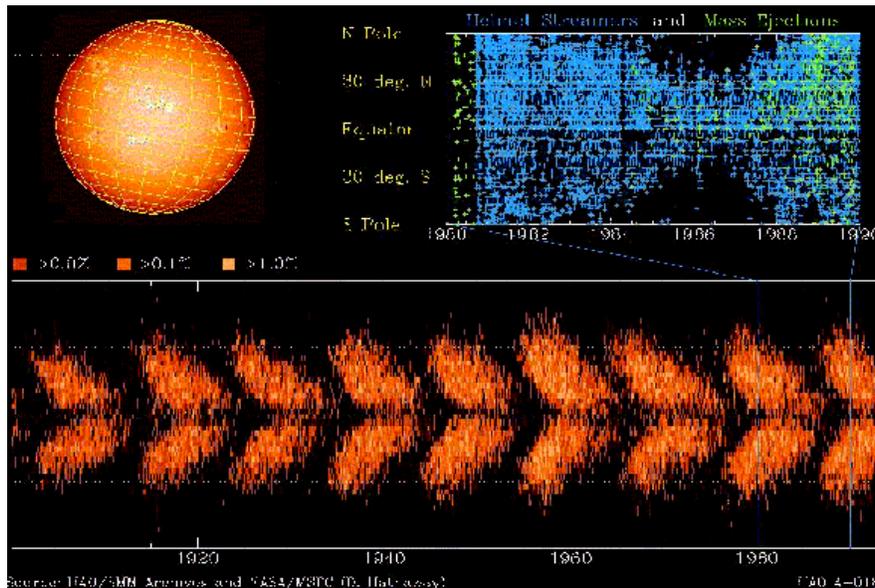


FIGURA 4.15 - "DIAGRAMA BORBOLETA" MOSTRANDO AS LATITUDES DE SURGIMENTO DAS MANCHAS SOLARES AO LONGO DOS CICLOS SOLARES. (FONTE: [HTTP://WWW.HAO.UCAR.EDU:80/PUBLIC](http://www.hao.ucar.edu:80/public))

Durante o máximo do ciclo também ocorre um grande aumento na ocorrência de fenômenos energéticos que ocorrem nas regiões ativas associados as manchas. Estes fenômenos são chamados de explosões ou "flares" solares e estão descritos em detalhes a seguir.

A explosão solar pode estar associada a "ejeção de massa coronal" e também à ocorrência das chamadas tempestades magnéticas na Terra.

Outros efeitos importantes da atividade solar são os prejuízos causados em: comunicações, sistemas de navegação, órbita de satélites, exploração de recursos minerais, sistema de fornecimento de energia, oleodutos, sistemas biológicos e também os danos das radiações ionizantes de origem solar que podem atingir missões espaciais tripuladas colocando em risco a vida dos astronautas pela exposição a grande quantidade de radiação.

4.6 EXPLOSÕES ('FLARES') SOLARES

As explosões solares foram observadas pela primeira vez, em 1 de Setembro de 1859, por R. C. Carrington and R. Hodgson, enquanto eles observavam manchas solares. Estas fenômenos caracterizam-se pela emissão de grandes quantidades de energia (10^{26} - 10^{32} erg), em intervalos de tempo relativamente curtos, variando de alguns segundos até poucas horas, para os fenômenos mais intensos.

A energia cinética/térmica liberada é proveniente da energia magnética armazenada na atmosfera solar, no interior de locais conhecidos como regiões ativas, como descrito anteriormente. Toda essa energia, que não chega a 10% de toda a energia emitida pelo Sol durante 1 segundo, provoca o aquecimento e aceleração dos elétrons, prótons e íons mais pesados presentes nos locais de liberação de energia e em sua vizinhança próxima. A interação das partículas energizadas com o meio ambiente provoca emissão de energia, na forma de radiação, que se distribui por grande parte do espectro eletromagnético (ver capítulo 2 para referência), estendendo-se desde ondas de radio quilométricas a raios-X e raios-gama, podendo produzir também a emissão de partículas (íons e elétrons) energéticos. Uma explosão solar típica produz uma quantidade de energia equivalente a cerca de 40 bilhões de vezes a energia da bomba atômica lançada em Hiroxima.

Uma explosão solar também pode estar associada a expulsão de grandes quantidades de matéria a velocidades que variam de centenas a poucos milhares de quilômetros por segundo. Este fenômeno é conhecido como ejeção de massa coronal - designado por CME - e também pode ocorrer dissociado de qualquer explosão solar.

Algumas explosões solares também estão associadas a ocorrência das chamadas tempestades magnéticas na Terra. Quando muito intensas causam grande perturbação na magnetosfera terrestre, podendo até mesmo causar um "blecaute". Uma explosão solar pode apresentar 3 fases distintas: 1) fase precursora, caracteriza o período em que a liberação de energia é ativada. Neste estágio são emitidos raios-X moles; 2) fase impulsiva, na qual as partículas - elétrons e prótons - são energizados até energias acima de 1 MeV - esta fase pode ser observada em cerca de 90% das explosões - 3) fase de decaimento onde um aumento e decaimento graduais em raios-X moles podem ser observados.

Não é possível ver uma explosão solar olhando para o Sol. JAMAIS DEVEMOS OLHAR DIRETAMENTE PARA O SOL. ISTO PODE CAUSAR CEGUEIRA E DISTÚRBIOS DA VISÃO TEMPORÁRIOS OU ATÉ PERMANENTES. Instrumentos científicos desenvolvidos para esta finalidade são utilizados para registrar as características da radiação emitida durante uma explosão solar. Radiotelescópios e telescópios ópticos são utilizados para as observações em solo terrestre. Enquanto isso, a observação das emissões em ultravioleta, raios-X e raios-gama só é possível através de instrumentos específicos a bordo de satélites no espaço. Isto porque as faixas de alta e media atmosfera bloqueiam a passagem destes comprimentos de onda até a superfície terrestre.

4.7 EJEÇÕES DE MASSA CORONAL (CME)

Como o próprio nome diz, são grandes quantidades de matéria (10^{15} - 10^{16} g), entremeadas de linhas de campo magnético, que são expulsas do Sol durante um período de várias horas, formando uma enorme erupção que se expande para o espaço exterior a velocidades de várias centenas a poucos milhares de km/s (Figura 4.16). Os CME são acelerados conforme vão se movendo para o espaço exterior. As primeiras evidências deste tipo de evento dinâmico foram obtidas a partir das observações de um coronógrafo a bordo do satélite OSO-7, durante o período de 1971 a 1973.

Ainda não se sabe qual a causa destes fenômenos, e também não está certo de onde se originam. Mais de metade destes fenômenos encontram-se associados a proeminências eruptivas. O restante que acompanha os "flares" costuma aparecer na forma de "surges" ou "sprays". Entretanto, em ambos os casos existe associação com instabilidades em proeminências. Além disso, também podem ocorrer na ausência de "flares" ou proeminências eruptivas. A frequência dos CME varia com o ciclo de atividade solar, podendo ser observado cerca de um evento por semana, no mínimo do ciclo, enquanto que podem ocorrer até 2-3 eventos por dia nos períodos do máximo de atividade do ciclo. Sua morfologia varia desde um formato aproximado de jato até um halo (arco), que pode circundar todo o disco solar (360°) em casos extremos. A maioria dos CME produzem ondas de choque que, quando se propagam em direção à Terra, percorrem a distância a partir do Sol em cerca de 2 dias.

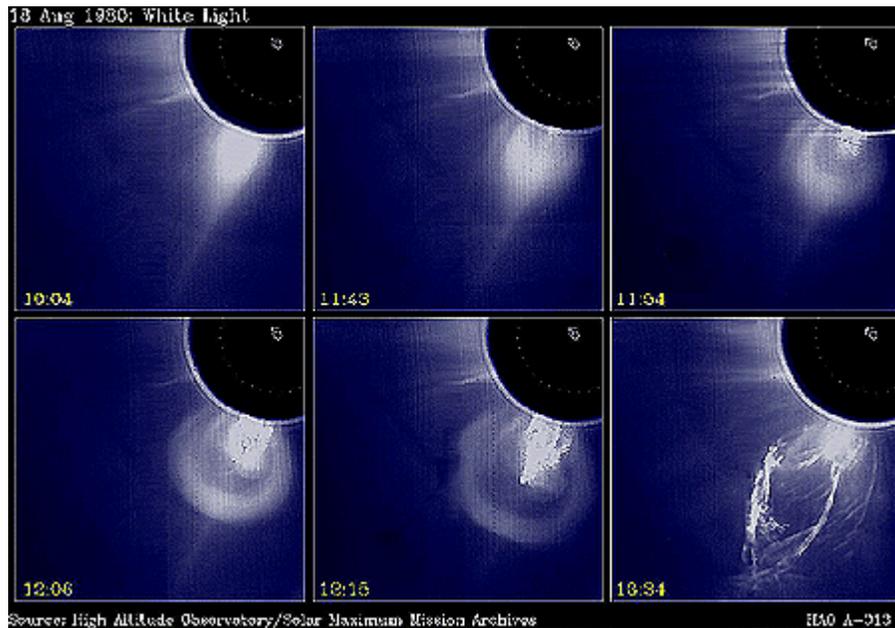


FIGURA 4.16 - SEQUÊNCIA DE IMAGENS MOSTRANDO A OCORRÊNCIA DE UMA CME. (FONTE: [HTTP://WWW.HAO.UCAR.EDU:80/PUBLIC](http://www.hao.ucar.edu:80/public))

A Figura 4.17 mostra uma comparação das dimensões de uma CME.

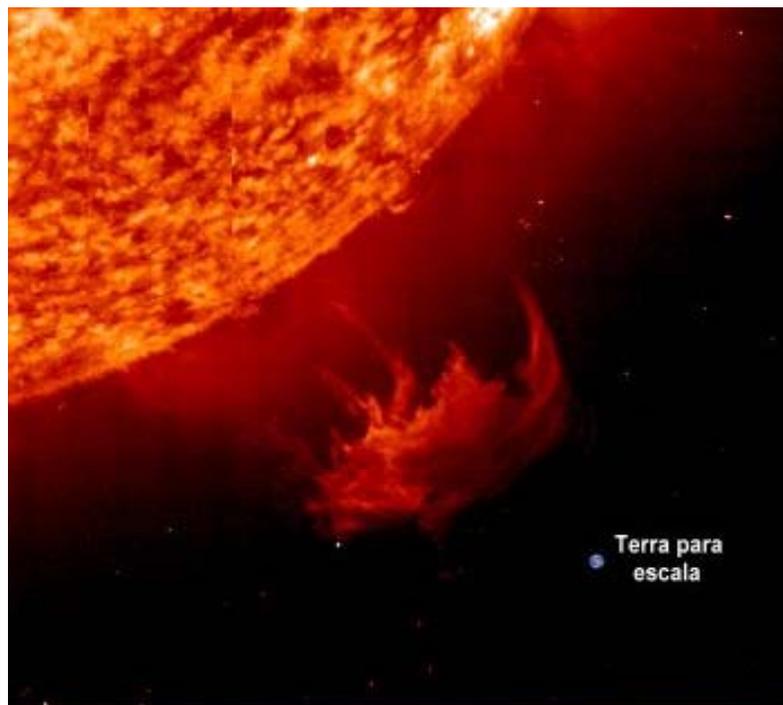


FIGURA 4.17 - ILUSTRAÇÃO DAS DIMENSÕES DE UMA CME EM COMPARAÇÃO COM O TAMANHO DA TERRA. (FONTE: [HTTP://ASTRO.IF.UFRGS.BR/ESOL/ESOL.HTML](http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.html))

Os CME podem quebrar o fluxo do vento solar - explicado a seguir - e produzir perturbações que atingem a Terra as vezes com resultados perigosos e nocivos as atividades humanas. Este fenomeno, em conjunto com os "flares" solares afeta diretamente o chamado "clima espacial". Atualmente, o experimento "Large Angle and Spectroscopic Coronagraph (LASCO)", a bordo do satellite "Solar Heliospheric Observatory (SOHO)", observa o Sol para registro de CMEs diariamente.

4.8 RELAÇÕES SOLARES-TERRESTRES

Os fenômenos associados a atividade solar estão mais estreitamente relacionados com alguns fenômenos que ocorrem na Terra do que podemos imaginar. Tal como os "flares", o estudo dos CME também tem implicações importantes para a compreensão e a previsão dos efeitos da atividade solar na Terra e espaço. Quando um CME atinge a Terra pode gerar uma tempestade geomagnética cujos efeitos vão desde danos nas comunicações via satellite ate a producao de "blecautes". Além disso, as ondas de choque produzidas pelos CME, na sua interação com o meio interplanetário, geram partículas energéticas que podem danificar equipamentos eletrônicos e irradiar os astronautas de missões tripuladas no espaço com doses excessivas de radiações ionizantes. Isto ocorre porque no espaço não existem a magnetosfera e as camadas protetoras da atmosfera terrestre que absorvem e espalham a quase totalidade dessas radiações originadas fora da Terra. Por sua vez, os "flares" solares ionizam diretamente a ionosfera terrestre e também liberam partículas energéticas no espaço.

Portanto, é necessário um maior conhecimento dos fenômenos de CME e "flares" para se entender melhor e prever o "clima espacial" e os efeitos da atividade solar na Terra.

4.9 VENTO SOLAR

Trata-se de um fluxo de elétrons e íons positivos que são expulsos da coroa solar em alta velocidade (cerca de 600 km/s) e propagam-se pelo meio interplanetário. Estas partículas se originam dos chamados buracos coronais e escapam do Sol para o espaço através das linhas abertas do campo magnético. Eventualmente, este vento atinge e interage com a Terra causando tanto o fenômeno conhecido como aurora - quando

interagindo com os gases da alta atmosfera - quanto perturbações no campo magnético - quando interagindo com a magnetosfera terrestre. O vento solar quando interage com a magnetosfera terrestre causa sua deformação na direção da linha Sol-Terra, tanto no espaço entre o Sol e a Terra como na direção do espaço exterior, como pode ser visto na Figura 4.18.

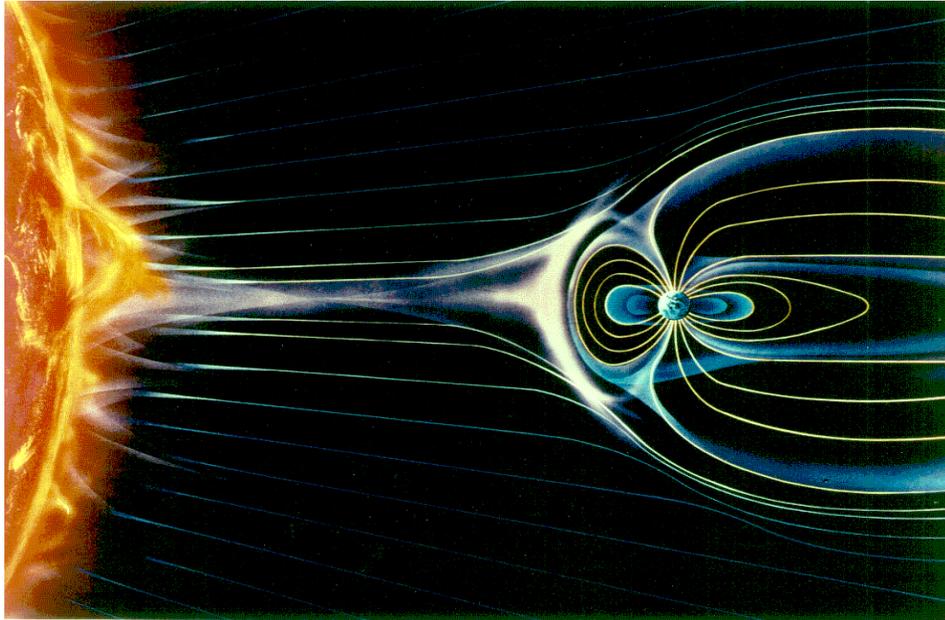


FIGURA 4.18 - VENTO SOLAR E SUA INTERAÇÃO COM A MAGNETOSFERA TERRESTRE. A AÇÃO DO VENTO SOLAR PRESSIONA A MAGNETOSFERA EM DIREÇÃO AO ESPAÇO EXTERIOR.

Quando as partículas energéticas emitidas pelo Sol interagem com os gases da alta atmosfera terrestre, nas proximidades das regiões polares da magnetosfera terrestre, ionizam os átomos desses gases. Os íons e elétrons desses átomos ionizados, por sua vez, se recombina para formar um átomo neutro. No momento em que isto acontece é emitida uma luz de cor característica do átomo que está se recombina, e que também depende da energia das partículas que provocaram a ionização daquele átomo. Como a atmosfera terrestre é composta por vários gases e a energia das partículas incidentes não é fixa pode-se observar luz de várias cores e com diversos padrões difusos. Este fenômeno é chamado de aurora (dois exemplos na Figura 4.19). Ocorre em altas latitudes terrestres podendo ser observado a olho nu, com as designações de boreal, no hemisfério norte, e austral, no hemisfério sul.



FIGURA 4.19 - EXEMPLOS DE FOTOS DE AURORAS OBTIDAS EM ALTAS LATITUDES. NA FIGURA SUPERIOR E MOSTRADA UMA AURORA OBSERVADA EM 20/03/01, ENQUANTO NA INFERIOR OUTRA AURORA OCORRIDA EM 17/04/01. (FONTE: [HTTP://WWW.SPACEWEATHER.COM](http://www.spaceweather.com)).

4.10 IMPORTÂNCIA DAS PESQUISAS CIENTÍFICAS SOBRE O SOL

As atividades humanas estão cada vez mais dependentes de alta tecnologia. Por sua vez, os produtos dessa alta tecnologia são extremamente sensíveis a atividade solar e seus efeitos associados que podem atingir a Terra. Logo, as atividades humanas são direta ou indiretamente perturbadas pelos efeitos da atividade solar. Então, por questão de segurança, saúde e manutenção das atividades humanas, é muito importante a investigação científica das origens dos fenômenos solares explosivos e da atividade solar, e seus possíveis efeitos na Terra com o intuito de minimizar os prejuízos que causam nas atividades humanas.

4.11 BIBLIOGRAFIA

Bishop Web Works. **Spaceweather.com.** [on-line]. <<http://www.spaceweather.com>>, 22/06/2001.

Bishop Web Works. **Sunspots and the solar cycle.** [on-line]. <<http://www.sunspotcycle.com>>, 22/06/2001.

Charbonneau, P.; White, O. R.. **The sun: a pictorial introduction.** [on-line]. <<http://www.hao.ucar.edu:80/public/slides/slides.html>>, 22/06/2001.

Hathaway, D. H. **Solar physics.** [on-line]. <<http://science.msfc.nasa.gov/ssl/pad/solar>>, 22/06/2001.

Kippenhahn, R. **Discovering the secrets of the sun.** Chichester: John Wiley & Sons, 1994.

Oliveira Filho, K. S.; Saraiva, M. F. O. **O Sol - a nossa estrela.** [on-line]. <<http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm>>, 22/06/2001.

Zirin, H. **Astrophysics of the sun.** New York: Cambridge University Press, 1988.