

Sob a influência do Sol: como o clima espacial afeta nosso planeta

Adriana Valio

Universidade Presbiteriana Mackenzie

Resumo

Nossa estrela, o Sol, apresenta atividade magnética na forma de manchas escuras em sua superfície, além de produzir explosões e ejeções de massa de sua atmosfera. Este artigo explora a dinâmica do Sol e seus efeitos no Sistema Solar, particularmente na Terra. A atmosfera solar, que inclui a fotosfera, cromosfera, região de transição e coroa, juntamente com o vento solar desempenham um papel crucial na compreensão da atividade solar. O campo magnético do Sol, fonte de energia de toda a atividade, é discutido em detalhe, incluindo as manchas solares e seu ciclo de 11 anos, além dos grandes mínimos como o Mínimo de Maunder e seu impacto no clima terrestre. As explosões solares e ejeções de massa coronais são o principal fator do clima espacial, afetando vários aspectos do ambiente do nosso planeta. Partículas energéticas de explosões e ejeções de massa interagem com a magnetosfera da Terra, causando tempestades geomagnéticas que podem impactar significativamente os sistemas tecnológicos. Estas tempestades podem causar falhas em satélites, interrupções em sistemas de comunicação, apagões e auroras, além de afetar a ionosfera. Compreender os fenômenos da atividade solar é essencial para melhorar as previsões do clima espacial e mitigar os impactos dos eventos solares sobre a tecnologia e infraestrutura modernas.

Abstract

Our star, the Sun, exhibits magnetic activity in the form of dark spots on its surface, and also produces flares and mass ejections from its atmosphere. This article delves into the dynamics of the Sun and its effects on the Solar System, especially on Earth. The solar atmosphere, which includes the photosphere, chromosphere, transition region, and corona, along with the solar wind play a crucial role in understanding solar activity. The Sun's magnetic field, the energy source of solar activity, is discussed in detail, including sunspots and the 11-year cycle, as well as notable grand minima such as the Maunder Minimum and its impact on Earth's climate. Solar flares and coronal mass ejections are major drivers of space weather, affecting various aspects of the Earth's environment. Energetic particles from flares and mass ejections interact with the terrestrial magnetosphere, leading to geomagnetic storms that can significantly impact technological systems. These storms can cause satellite malfunctions, communication systems failures, blackouts, and auroras, as well as affect the ionosphere. Understanding solar active phenomena is essential for improving space weather predictions and mitigating the impacts of solar-related events on modern technology and infrastructure.

Palavras-chave: Sol, atmosfera solar, atividade solar, clima espacial, tempestades geomagnéticas.

Keywords: Sun, solar atmosphere, solar activity, space weather, geomagnetic storms.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n2.45935](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n2.45935)

1 Introdução

O Sol, nossa estrela central e principal fonte de energia, determina o ambiente do Sistema Solar. Sua atmosfera, composta pela fotosfera, cromosfera, região de transição e coroa, é palco dos fenômenos mais energéticos do Sistema Solar, tais como explosões e ejeções de massa. O vento solar que emana da coroa é um fluxo contínuo de partículas que molda a heliosfera e interage com

os planetas, cometas e outros corpos do Sistema Solar.

O campo magnético solar, com sua estrutura complexa e dinâmica, é a fonte de energia de toda a atividade solar, como as explosões e as ejeções de massa. Atividade esta que determina o clima espacial, afetando tanto o nosso planeta quanto os outros planetas do Sistema Solar. Por causa do processo de dínamo que rege o campo magnético

do Sol, toda atividade solar varia periodicamente com um ciclo de 11 anos. Tanto a ocorrência de manchas solares, quanto de explosões e ejeções de massa seguem este ciclo, aumentando e diminuindo com um período de 11 anos. Exceções a este ciclo ocorrem esporadicamente perfazendo períodos de décadas quando não foi detectada quase nenhuma atividade solar. Estes períodos são conhecidos como Grandes Mínimos, do qual o de Maunder é o mais famoso.

Embora não seja uma estrela especialmente ativa em comparação com as demais estrelas, suas explosões e ejeções de massa podem ter consequências danosas para a Terra e nossa sociedade altamente dependente de tecnologia. O primeiro evento registrado, denominado Carrington, ocorreu em 1859 e foi o mais energético que se tem notícia. Outros eventos de impacto foram o apagão na cidade de Quebec em 1989 e a perda de satélites de comunicação.

Neste artigo, exploraremos as camadas atmosféricas do Sol, a natureza do seu campo magnético, o impacto da atividade solar, e como tudo isso contribui para o clima espacial que afeta o nosso planeta.

2 Atmosfera solar

O Sol emite radiação em todo o espectro eletromagnético, das ondas de rádio com comprimentos de km até os raios X com comprimentos de onda de 10^{-12} m [1]. Porém a maior parte do fluxo solar se dá principalmente na faixa do espectro visível (400 - 700 nm), fazendo com que o Sol tenha um aspecto amarelado, além do infravermelho (700 - 50.000 nm). Entretanto, cada uma das camadas da atmosfera solar emite em intervalos específicos de comprimento de onda, dependendo de sua temperatura e densidade. Portanto, a aparência do Sol varia de acordo com o instrumento utilizado para sua observação.

A atmosfera, assim como o interior solar, é composta em número basicamente de Hidrogênio (91,2%), Hélio (8,7%) e outros elementos (0,1%) [2]. As camadas da atmosfera solar têm estruturas distintas, cada uma com suas características únicas de densidade e temperatura. Para fins didáticos, separamos as camadas em fotosfera, cromosfera, região de transição e coroa que serão de-

talhadas a seguir.

2.1 Fotosfera

A fotosfera, ou esfera de luz em grego, também considerada a superfície do Sol, é a parte que podemos ver com nossos olhos.¹ A luz e calor que nos envolve provém da fotosfera solar, sendo a camada mais baixa da atmosfera solar, mas de onde se origina a maior parte do fluxo solar. A radiação oriunda da fotosfera se dá predominante na faixa do visível do espectro eletromagnético (Figura 1).

Com uma espessura de pouco mais de 300 km, a fotosfera é uma camada completamente opaca à radiação na sua parte inferior, se transformando para completamente transparente na parte de cima. Isto ocorre porque tanto a densidade quanto a temperatura do plasma diminuem com a altitude nesta camada. Em sua base, a fotosfera tem uma temperatura efetiva de cerca de 5780 K e densidade de 2×10^{-4} kg cm⁻³ [3,4]. É a camada mais fria de toda a atmosfera solar.

Na fotosfera estão localizadas as manchas solares, que são áreas mais frias e escuras devido à concentração de fortes campos magnéticos. A temperatura das partes mais escuras das manchas é da ordem de 1000 a 1900 K mais fria do que a fotosfera ao redor [5]. As manchas serão mais detalhadas na Seção 4.1.

Já as fáculas são regiões brilhantes, geralmente localizadas em torno de manchas solares ou em áreas da fotosfera onde o campo magnético é maior. Ao contrário das manchas, as fáculas são visíveis como áreas mais claras e brilhantes na superfície solar, em relação à fotosfera circundante. As fáculas são mais facilmente observadas nas bordas do disco solar, onde o contraste com a fotosfera é maior.

2.2 Cromosfera

Localizada logo acima da fotosfera, a cromosfera, ou esfera de cor em grego, tem uma espessura de cerca de 2500 - 3000 km [6,7], e é mais difícil de ser observada diretamente, sendo visível

¹Nunca olhe diretamente para o Sol sem o uso de proteção adequada, como filtros solares certificados ou óculos de proteção específicos para observação solar. Porém é seguro olhar diretamente quando o Sol estiver no horizonte, ao amanhecer ou entardecer.

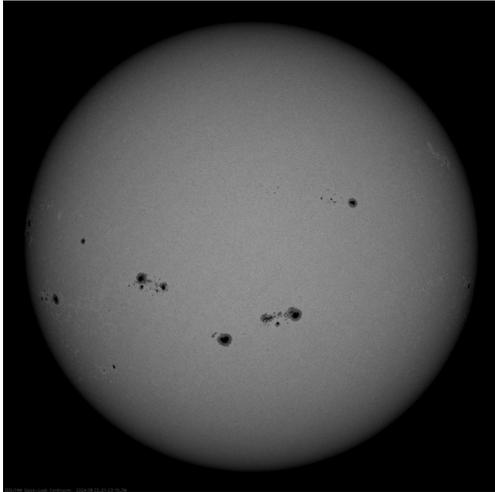


Figura 1: Imagem do Sol em luz visível obtida pelo instrumento Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) do Solar Dynamics Observatory (SDO) em 21 de agosto de 2024. Fonte: <https://sdo.gsfc.nasa.gov/data/>.

principalmente durante eclipses solares, quando aparece como um anel avermelhado ao redor do Sol. A temperatura da cromosfera aumenta com a altitude, variando do mínimo de temperatura de 4200 em sua base até cerca de 40.000 K na parte superior [3]. Já a densidade decresce de 5×10^{-6} para $10^{-11} \text{ kg m}^{-3}$ [3].

A cor avermelhada da cromosfera, observada durante eclipses solares (painel superior à esquerda da Figura 2), deve-se à sua composição predominante do gás hidrogênio. A emissão de luz vermelha ocorre em um comprimento de onda específico, conhecido como H-alfa (656,3 nm), quando o elétron do átomo de hidrogênio decai do nível 3 para o nível 2, liberando energia. Rotineiramente é possível visualizar a cromosfera utilizando um filtro H-alfa que deixa passar somente a luz em torno deste comprimento de onda (painel superior à direita da Figura 2).

Por outro lado, devido à densidade e temperatura da cromosfera, a mesma pode ser observada em frequências de rádio, mais especificamente micro-ondas e ondas milimétricas. Imagens reconstruídas das observações em 230 GHz do ALMA (Chile) e em 17 GHz do interferômetro de Nobeyama (Japão) são mostradas nos painéis inferiores da Figura 2, à esquerda e à direita, respectivamente.

As proeminências ou filamentos solares são estruturas também observadas na atmosfera do Sol, especificamente na cromosfera. Embora se-

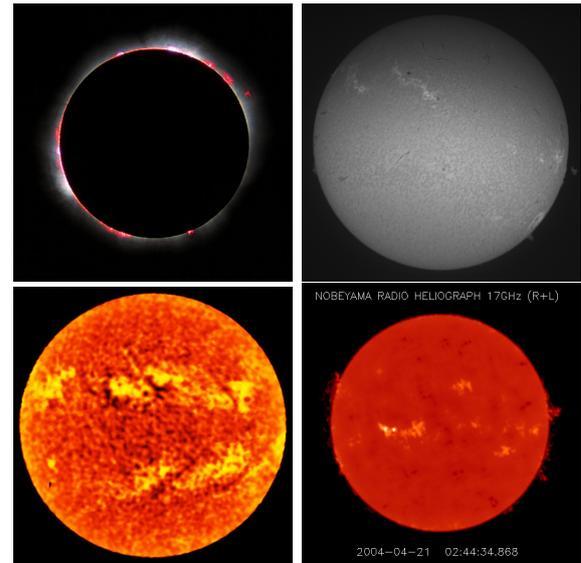


Figura 2: Superior à esquerda: Eclipse solar de 11 de agosto de 1999, tirada na França por Luc Viatour. Superior à direita: Imagem do Sol em H-alfa de 20 de agosto de 2024, obtida no Observatório Solar Mackenzie. Inferior à esquerda: Mapa rádio do Sol em 230 GHz do Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), obtido pela técnica de *fast-scanning* no dia 17 de dezembro de 2015. Inferior à direita: Mapa rádio do Sol em 17 GHz pelo Rádio Heliógrafo de Nobeyama (Japão) em 21 de abril de 2004 a partir de interferometria.

jam essencialmente o mesmo fenômeno, a forma como são vistas a partir da Terra determina o termo usado: “proeminências” quando vistas projetando-se para fora do limbo solar, e “filamentos” quando observados contra o disco solar. A sequência diária de fotos H-alfa mostrada na Figura 3 evidencia o exemplo de uma proeminência primeiramente avistada no limbo oeste do Sol e que com a rotação solar passou a ser vista contra o disco solar e, portanto, como filamento.

Os filamentos solares parecem linhas escuras serpenteando sobre a superfície do Sol, devido ao contraste com o fundo mais brilhante da fotosfera. Aparentam ser escuros pois o plasma da proeminência é mais frio (6.000 - 14.000 K, [8]) e denso do que a atmosfera subjacente, fazendo com que absorvam mais luz do que emitem. Geralmente, os filamentos se formam em regiões onde os campos magnéticos do Sol formam estruturas que os suportam contra sua gravidade. Alguns filamentos são estáveis e permanecem por longos períodos de tempo. Porém eventualmente, pode ocorrer destes arcos magnéticos se tornarem instáveis e o filamento ser ejetado para o meio interplane-

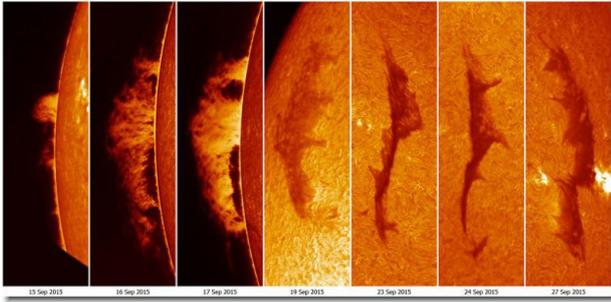


Figura 3: Sequência de imagens dos dias 15 a 27 de setembro de 2015 de uma proeminência no limbo oeste do Sol, que posteriormente é vista como um filamento devido à rotação solar. Fonte: <https://www.cloudynights.com/topic/513515-march-of-the-prominence-filament/>.

tário, podendo contribuir para o clima espacial.

As proeminências solares são enormes estruturas de plasma (gás ionizado) que se estendem para fora da superfície do Sol (primeiras 3 imagens à esquerda da Figura 3). Típicos valores de comprimento são centenas de milhares de quilômetros, por 5000 km de espessura [3]. Embora se localizem na cromosfera, estão ancoradas na fotosfera e são vistas como arcos brilhantes que se destacam em contraste com o escuro do espaço ao redor do Sol.

2.3 Região de transição

Situada entre a cromosfera e a coroa, a região de transição é uma camada muito fina (~ 100 km) onde a temperatura aumenta drasticamente, passando de algumas dezenas de milhares de Kelvin para cerca de 1 milhão de Kelvin [1]. Esse aumento abrupto de temperatura ainda não é completamente compreendido e é conhecido como o problema do aquecimento coronal [9].

2.4 Coroa

A camada mais externa da atmosfera solar é a coroa, uma camada bastante inhomogênea que se estende por milhões de quilômetros no espaço e é composta por plasma extremamente quente, com temperaturas que podem ultrapassar 2 milhões de Kelvin. A coroa é visível durante eclipses totais do Sol como um halo brilhante ao redor da Lua (painel à esquerda da Figura 4). A coroa é muito menos densa do que a cromosfera ou fotosfera, o que contribui para sua aparência difusa.

Rotineiramente, a coroa pode ser observada

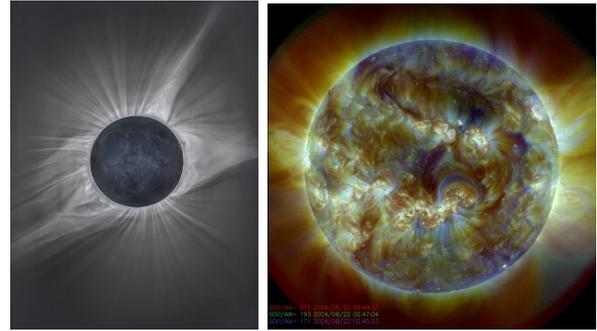


Figura 4: Esquerda: Eclipse solar em 21 de agosto de 2017, evidenciando a coroa solar. Direita: Composição de imagens em EUV (211 Å, 193 Å, 171 Å) do Atmospheric Imaging Assembly (AIA) do SDO em 22 de agosto de 2024.

em luz visível utilizando-se um coronógrafo. Coronógrafos são instrumentos ópticos projetados para observar a coroa solar, normalmente ofuscada pela luz intensa da fotosfera solar. Um coronógrafo usa um disco de ocultação para bloquear a luz da fotosfera solar, criando um eclipse artificial. Isto reduz a intensidade da luz direta do Sol, permitindo que a luz mais fraca da coroa solar, resultado do espalhamento da luz da fotosfera pelos elétrons da coroa, seja detectada.

Dada sua altíssima temperatura de milhões de K, o plasma coronal emite ondas de ultra-violeta extremo e raio X e, portanto, pode ser observada por satélites que operam nestes comprimentos de onda. A análise das imagens de raios X da coroa solar revela uma estrutura complexa e dinâmica, composta por arcos coronais e buracos coronais (painel à direita da Figura 4).

Um problema atual da física solar é a fonte do aquecimento da coroa [9]. Pois como é possível uma camada externa alcançar uma temperatura de milhões de K enquanto a fotosfera abaixo está a apenas 5780 K? Uma proposta para esta fonte de energia extra são as nanoflares [10], que existindo ao milhares poderiam suprir esta energia. Mas este assunto ainda é bastante debatido na comunidade científica.

3 Vento solar e heliosfera

Os ventos solares são fluxos contínuos de partículas carregadas (principalmente prótons, elétrons e partículas alfa - núcleos de He) que são expelidos da atmosfera superior do Sol, especialmente da sua coroa. A perda de massa

anual do Sol atualmente devido ao vento é de $2 \times 10^{-14} M_{\text{Sol}} \text{ yr}^{-1}$ [11]. O vento é gerado por causa da alta temperatura da coroa, que faz com que as partículas solares escapem da gravidade do Sol e se propaguem pelo espaço [12]. Isto se dá porque a energia cinética das partículas, graças à temperatura de milhões de K, ultrapassa a energia gravitacional do Sol.

A sonda espacial Ulysses (NASA e ESA) [13], lançada em outubro de 1990, operou por 18 anos e foi a primeira a sair do plano da eclíptica e sobrevoar os polos do Sol. Os dados da Ulysses mostrou que o vento solar apresentava dois regimes: o vento solar lento e o vento solar rápido, com quase o dobro da velocidade do lento [14]. Os dois tipos de vento diferem em sua velocidade, origem, composição e impacto no espaço interplanetário.

O vento solar lento se move a uma velocidade relativamente baixa, geralmente entre 300 e 500 km/s. A origem exata do vento solar lento é mais complexa e menos compreendida que a do vento rápido. Acredita-se que sua origem seja principalmente nas regiões equatoriais do Sol, onde o campo magnético tem uma configuração fechada. O vento lento é mais abundante em elementos pesados, como oxigênio e ferro, em comparação ao vento rápido. Além disso, possui uma maior variabilidade de temperatura e densidade.

Devido à sua velocidade mais baixa e variabilidade, o vento solar lento tem um impacto significativo no Clima Espacial, pois é capaz de interagir de maneira mais eficaz com o campo magnético da Terra. Desta forma tem uma maior contribuição para causar tempestades geomagnéticas e a ocorrência de auroras, além de afetar satélites em órbita da Terra e outras tecnologias.

Por outro lado, o vento solar rápido é caracterizado por velocidades muito maiores, variando de 600 a 800 km/s [13]. Este vento se origina nas regiões polares do Sol, nas áreas conhecidas como “buracos coronais”, que são regiões onde o campo magnético solar se abre diretamente para o espaço, permitindo que as partículas escapem mais facilmente em altas velocidades. Como resultado, o vento solar rápido é mais estável e uniforme. Além de ser também mais homogêneo em termos de composição, contendo uma menor proporção de elementos pesados em relação ao vento lento. O vento solar rápido tem efeitos distintos

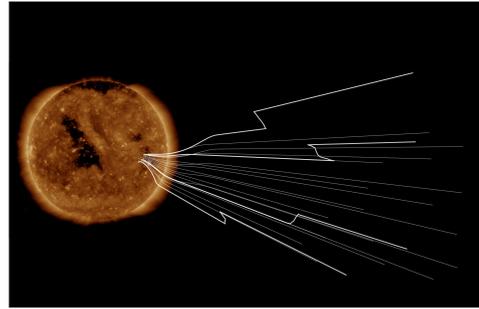


Figura 5: O Sol, em luz UV, durante a aproximação da Parker Solar Probe em sua primeira órbita a 35 raios solares. Linhas brancas do campo magnético são mostradas originando-se de um pequeno buraco coronal. Torções, baseadas em medições reais de Parker, mostram os ziguezagues observados durante o encontro. Fonte: <https://svs.gsfc.nasa.gov/13494/>

no espaço interplanetário. Devido à sua alta velocidade, pode criar frentes de choques e perturbações no meio interplanetário, afetando a propagação de raios cósmicos.

No espaço interplanetário, esporadicamente ocorrem interações entre o vento solar lento e o rápido [15], as quais podem afetar o nosso planeta. Quando o vento solar rápido alcança o vento lento, pode criar regiões de compressão, conhecidas como “regiões de interação corrotante”. Estas regiões de interação dos ventos aceleram partículas energéticas, modulam a intensidade dos raios cósmicos galácticos e podem desencadear tempestades geomagnéticas além de causar auroras boreais (no hemisfério norte) e austrais (no hemisfério sul).

Recentemente, em 2019, a sonda Parker Solar Probe da NASA [16], ao chegar a uma distância de apenas 35 raios solares do Sol, fez uma descoberta fascinante ao revelar a existência de fenômenos que ficaram conhecidos como *switchbacks* [17] nos ventos solares. Os *switchbacks* são reversões bruscas e rápidas no campo magnético do vento solar, que fazem com que o campo magnético mude temporariamente de direção, formando uma espécie de “S”, ou ziguezagues, no fluxo do vento solar (Figura 5). Estas complexas estruturas não são observadas no vento solar próximo à órbita da Terra.

A origem exata dos *switchbacks* ainda é desconhecida, mas acredita-se que esteja ligada à dinâmica complexa e às reconexões magnéticas na superfície do Sol ou na coroa solar. Estes *switch-*

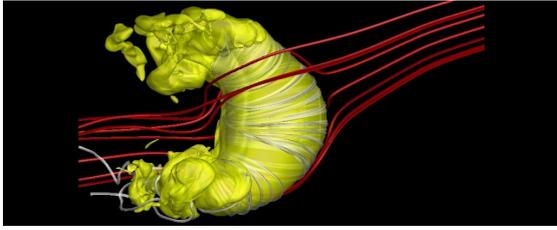


Figura 6: Estrutura da heliosfera como um *croissant* com jatos ao norte e ao sul. A superfície amarela representa a heliopausa, fronteira entre a heliosfera e o meio interestelar local. O Sol está localizado no centro desta bolha. As linhas cinzas ilustram as linhas do campo magnético solar, enquanto as linhas vermelhas representam o campo magnético interestelar [18].

backs podem desempenhar um papel importante na aceleração do vento solar e na transferência de energia do Sol para o espaço interplanetário.

A heliosfera é a região do espaço sob domínio do Sol e engloba todo o Sistema Solar, incluindo as órbitas dos planetas. Esta bolha é inflada pelo fluxo contínuo de partículas carregadas dos ventos e pelo campo magnético do Sol. A heliosfera pode ser visualizada como uma grande bolha com uma forma um tanto alongada, devido ao movimento do Sol através do espaço interestelar. Esta bolha é moldada pela interação entre o vento solar e o meio interestelar.

As duas sondas Voyager e a New Horizons são três espaçonaves que viajaram para os confins do Sistema Solar. Na verdade, as sondas Voyager até já cruzaram a fronteira da heliosfera e estão atualmente transitando pelo espaço interestelar. Em 2016, com dados dessas sondas, Opher e colaboradores [18] determinaram que a heliosfera deve ter a forma de um *croissant* cósmico (Figura 6).

4 Campo magnético e seu ciclo

O campo magnético global do Sol tem a forma de um dipolo, como o campo magnético da Terra e dos planetas gigantes do Sistema Solar. Este campo é gerado por um dínamo cujos ingredientes são a rotação e também a rotação diferencial do Sol [19]. O dínamo atua predominantemente na *tacoclina*, camada delgada localizada no interior solar, a 70% do raio solar, onde existem altos gradientes de velocidade do plasma. Os tubos de fluxo magnético produzidos no interior do Sol, flutuam até a superfície e ao atravessá-la for-

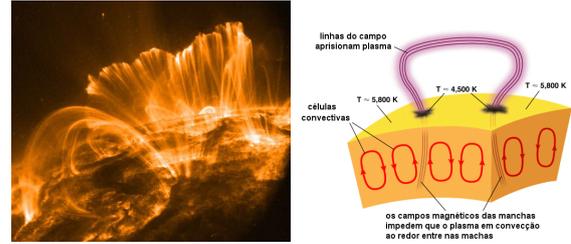


Figura 7: **Esquerda:** Imagem de arcos magnéticos coronais obtida pelo Transition Region And Coronal Explorer spacecraft (NASA/LMSAL) Fonte: <https://nso.edu/for-public/sun-science/coronal-loops/>. **Direita:** Representação de um tubo de flux magnético perfurando a fotosfera solar. As manchas solares se formam nos pés dos arcos. O bloco amarelo representa o interior solar, com a zona convectiva. Fonte: Ref. [1].

mam os arcos magnéticos observados na coroa solar em imagens de UV e raio X (Figura 7, painel à esquerda). Nos pés dos arcos, onde interceptam a fotosfera, formam-se as manchas solares, regiões escuras observadas em imagens do visível (Figura 7, painel à direita).

4.1 Manchas solares

Quando Galileu e seus contemporâneos apontaram as primeiras lunetas para os céus em 1611, notaram pequenas manchas escuras no Sol. Porém há evidências de observação de manchas no disco solar em meados do século IV a.C. por Teofrasto de Atenas, e relatos dos chineses já terem detectado manchas no Sol em 165 a.C. [20].

As manchas solares são regiões escuras e relativamente frias na superfície do Sol, a fotosfera. Embora tenham temperaturas entre 4500 a 5500 K [21], aparecem escuras em comparação com a fotosfera ao redor, cuja temperatura é de 5780 K. Manchas solares aparecem em regiões de intenso campos magnéticos (centenas a milhares de Gauss [21]), e são mais frias pois estes campos magnéticos inibem a convecção, o processo pelo qual o calor é transferido das camadas internas do Sol para sua superfície. Como resultado, a energia não consegue escapar tão eficientemente, e a temperatura na região da mancha diminui, tornando-a mais escura.

Manchas solares podem ocorrer aos pares ou em grupos e geralmente duram de algumas horas a poucos meses [5], com uma média de alguns dias. Existe uma relação do tempo de vida das manchas com seu tamanho, sendo que manchas

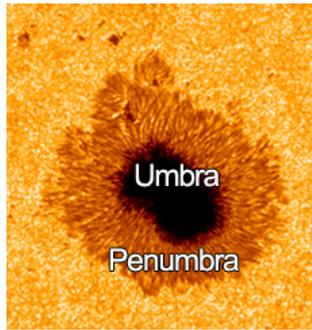


Figura 8: Imagem de uma mancha solar. A região central mais escura é denominada umbra, enquanto a região circundante mais clara é a penumbra. Fonte: https://global.jaxa.jp/article/special/astro/shimizu02_e.html.

maiores duram mais tempo. As manchas solares são compostas de duas regiões principais: a umbra e a penumbra (ver Figura 8), cada uma com características distintas.

A umbra é a parte central da mancha solar, sendo a região mais escura e fria da mancha, com temperaturas que variam entre 3.900 a 4.800 K [5], significativamente mais baixas do que a fotosfera ao redor. Na umbra, o campo magnético é mais intenso e concentrado e, portanto, mais eficiente em impedir a convecção e, conseqüentemente, o transporte de calor, contribuindo para a aparência mais escura da umbra. Também, este campo magnético é mais vertical em relação à superfície solar.

Já a penumbra é a região mais clara que circunda a umbra. Embora ainda mais fria que a fotosfera (geralmente entre 5.400 e 5.500 K [5]), a penumbra é mais quente do que a umbra. O campo magnético na penumbra é mais fraco e menos concentrado do que na umbra. Além disso, as linhas do campo magnético na penumbra são mais inclinadas, o que permite algum grau de convecção, resultando em temperaturas mais elevadas em comparação com a umbra. A penumbra tem uma aparência filamentar, com estrias que se estendem radialmente a partir da umbra (Figura 8).

As duas regiões juntas formam a estrutura completa de uma mancha solar. A presença de uma penumbra indica que a mancha solar é relativamente grande e madura. Manchas solares pequenas ou jovens podem não ter penumbra, consistindo apenas de uma umbra, e são denominadas de poros.

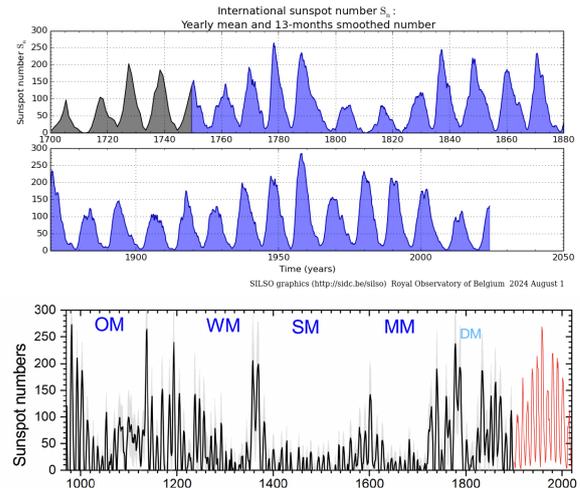


Figura 9: Superior: Número internacional de manchas (ISS) solares ao longo dos anos, de 1700 a 2024. Fonte: <https://sidc.be/SILSO/yearlyssnplot>. **Inferior:** Número anual de manchas solares reconstruídas a partir de ^{14}C (curva preta) desde 970 d.C.. A curva vermelha representa o número internacional de manchas (ISS) desde 1900. As siglas em azul denotam grandes mínimos de atividade solar: Mínimos de Oort (OM), Wolf (WM), Spörer (SM) e Maunder (MM) [20].

As manchas constituem os pés de arcos magnéticos que se estendem pela atmosfera alcançando a coroa (painel da direita da Figura 7). As regiões ativas localizadas acima das manchas são geralmente mais brilhantes do que o entorno, por serem regiões onde o plasma atrelado aos arcos magnéticos é mais quente. Estas regiões ativas podem ser vistas em imagens de rádio (painéis inferiores da Figura 2), ou no ultravioleta e em raio X (painel da direita da Figura 4). São denominadas de ativas pois é onde ocorrem os fenômenos como explosões solares e ejeções de massa coronal, que podem afetar o clima espacial e, por extensão, a Terra.

4.2 Ciclo de 11 anos

A quantidade de manchas solares varia com um período de aproximadamente 11 anos, conhecido como ciclo solar. Durante o máximo solar, o número de manchas é maior (podendo chegar a 100 – 200 manchas diárias), enquanto durante o mínimo solar, elas podem desaparecer quase que completamente (Figura 9, painel superior). Não apenas o número de manchas varia periodicamente em 11 anos, mas também a quantidade de explosões e ejeções de massa do Sol, assim como

o seu brilho total, conhecido como irradiância solar total [22]. Sabe-se que durante o máximo do ciclo, o brilho do Sol aumenta de 0,1%. Embora o número de manchas escuras aumente durante os máximos solares, a presença adicional de fáculas brilhantes compensa e supera a diminuição de brilho causada pelas manchas.

A descoberta do ciclo solar de 11 anos, também conhecido como ciclo de Schwabe, se deu no início do século XIX. A partir de 1826, o astrônomo amador alemão Samuel Heinrich Schwabe começou a observar sistematicamente o Sol [23]. Durante suas observações diárias, Schwabe percebeu que o número de manchas solares na superfície do Sol variava com o tempo. Durante cerca de 17 anos, Schwabe registrou meticulosamente o número de manchas solares visíveis a cada dia. Finalmente em 1843, Schwabe notou um padrão distinto, ao perceber que o número de manchas solares aumentava e diminuía regularmente ao longo do tempo, atingindo um máximo e um mínimo em intervalos de aproximadamente 10 anos. Em 1844, Schwabe publicou em alemão suas descobertas em um artigo intitulado “Observações Solares em 1843” [23], onde sugeriu que o ciclo completo de aumento e diminuição de manchas solares durava cerca de uma década. Hoje sabemos que o ciclo solar pode variar de 8 a 15 anos, com uma média de 11 anos [20].

Enquanto os fenômenos como manchas, explosões e ejeções apresentam uma periodicidade de 11 anos, aumentando e diminuindo sua ocorrência, o ciclo magnético global do Sol é de 22 anos. A cada 11 anos, o campo magnético solar reverte a sua polaridade, portanto, demora 22 anos para o campo magnético retornar à polaridade original.

4.3 Mínimo de Maunder e outros mínimos

A sorte de Galileu foi ter iniciado suas observações do Sol antes de 1640, pois as manchas desapareceram quase que por completo depois disto por uns 70 anos. Este período ficou conhecido como Mínimo de Maunder em homenagem ao seu descobridor [24]. O Mínimo de Maunder é um dos eventos mais conhecidos de redução na atividade solar, durante o qual o número de manchas solares e a atividade solar em geral diminuíram drasticamente. Esse período, que ocorreu entre



Figura 10: Quadro de pessoas patinando no rio Sena (Escola Flamenca).

aproximadamente 1645 e 1715, é o mais famoso de uma série de “mínimos solares” que ocorreram ao longo da história (painel inferior da Figura 9).

Utilizando registros de ^{14}C obtidos da análise de anéis de árvores do últimos 1000 anos, Eddy [25] identificou cinco grandes mínimos solares distintos (painel inferior da Figura 9). Estes mínimos de atividade solar são conhecidos como o Mínimo de Oort (1040-1080 d.C.), Mínimo de Wolf (1280-1350 d.C.), Mínimo de Spörer (1460-1550 d.C.), Mínimo de Maunder (1645-1715 d.C.) e Mínimo de Dalton (1790-1820 d.C.).

O astrônomo inglês Edward Walter Maunder e sua esposa Annie Maunder estudaram os registros históricos de manchas solares e identificaram que no final do século XVII, por uns 70 anos, o número de manchas solares observadas era extremamente baixo, cerca de 50 vezes menor do que o observado em outros períodos normais de atividade solar [24].

Curiosamente, este período coincidiu com a fase mais fria da chamada “Pequena Era do Gelo”, uma época de temperaturas mais baixas na Europa e América do Norte, quando rios como o Tâmesa em Londres e o Sena em Paris congelaram. As pinturas da época mostram pessoas patinando nestes rios (Figura 10). Este período também está associado a invernos excepcionalmente frios e colheitas fracassadas na Europa e América do Norte. Embora a relação direta entre atividade solar e clima terrestre seja complexa e envolva diversos fatores, acredita-se que a redução na atividade solar contribuiu para essas condições climáticas severas.

Além do Mínimo de Maunder, a história registra outros períodos de baixa atividade solar. O Mínimo de Spörer ocorreu entre 1450-1550, nomeado em homenagem ao astrônomo alemão Gustav Spörer, que, como Maunder, estudou os

registros históricos de manchas solares. Mais longo, o Mínimo de Spörer durou cerca de 100 anos e apresentou uma baixa atividade solar semelhante à do Mínimo de Maunder, com poucas manchas solares observadas.

Menos estudado, o Mínimo de Wolf é um período de 1280 a 1350, mas ainda assim significativo de baixa atividade solar. Assim como outros mínimos solares, este mínimo se caracterizou por uma redução no número de manchas solares. Esse período também está associado a condições climáticas mais frias, embora menos extremas do que a dos mínimos subsequentes.

Durante 1790-1830, ocorreu o Mínimo de Dalton quando o número de manchas solares diminuiu significativamente, embora não tão drasticamente quanto durante os Mínimos de Maunder ou Spörer. Este período durou cerca de 40 anos e não é considerado um grande mínimo [20], mas sim um mínimo do ciclo secular de Gleissberg (modulação da intensidade dos máximos do ciclo de 11 anos que tem uma periodicidade de ~ 90 anos).

A existência de grandes mínimos solares indica que o Sol pode passar por períodos prolongados de atividade reduzida, com possíveis implicações para o clima terrestre. A correlação entre mínimos solares e mudanças climáticas na Terra sugere que a atividade solar desempenha um papel, embora não totalmente compreendido, no sistema climático do nosso planeta.

5 Atividade solar

A atividade solar se manifesta de várias formas, desde manchas solares até eventos mais energéticos, como explosões solares e ejeções de massa coronal. Estes são fenômenos dinâmicos e complexos que ocorrem na superfície e na atmosfera do Sol. Toda esta atividade não apenas influencia o clima espacial, mas também têm o potencial de impactar significativamente uma sociedade cada vez mais dependente da tecnologia como a nossa.

5.1 Explosões

As explosões solares são súbitas e intensas liberações de energia da ordem de $10^{27} - 10^{32}$ erg que ocorrem na atmosfera solar, geralmente associadas às regiões ativas acima das manchas solares

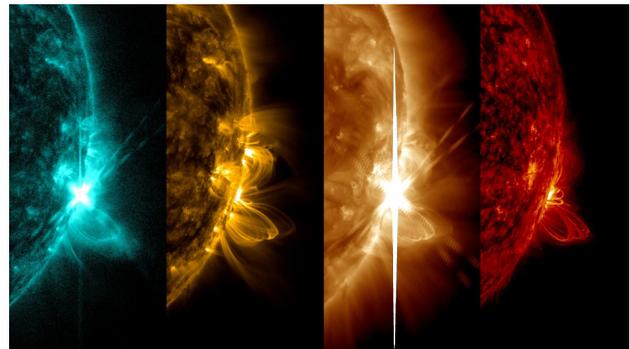
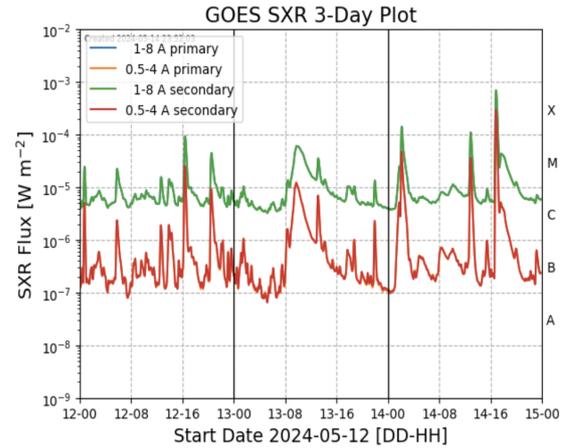


Figura 11: Superior: Emissão em raio X observada pelo satélite GOES para o período de 12 a 14 de maio de 2024. **Inferior:** Explosão solar classe X8.7 observada pelo AIA do satélite *Solar Dynamics Observatory* (SDO) da NASA às 16:46 UT do dia 14 de maio de 2024, em diferentes comprimentos de onda do EUV (da esquerda para direita: 131, 171, 193 e 304 Å).

(Figura 11, painel inferior). A energia liberada em uma explosão solar é maior que 10 milhões de vezes a energia liberada em uma explosão vulcânica. Por outro lado, esta energia é menos do que um décimo da energia emitida pelo Sol a cada segundo.

As explosões são classificadas de acordo com sua intensidade medida em raios X (1–8 Å) pelo *Geostationary Environmental Satellite System* (GOES). O sistema de classificação é logarítmico e utiliza as letras A, B, C, M e X, que correspondem a fluxos de pico das explosões de 10^{-8} W m $^{-2}$ para a classe A, menos energética, a 10^{-4} W m $^{-2}$ para as explosões X, as de mais alta energia. A Figura 11 (painel superior) mostra a curva de intensidade em raios X observada pelo GOES para o período de maio de 2024 quando ocorreram vários eventos X. Os raros eventos extremos ultrapassam intensidades de pico $\gtrsim 10^{-3}$ W m $^{-2}$ são denominados X10 e acima [26].

A fonte de energia das explosões são os processos de reconexão magnética que ocorrem acima dos arcos coronais, onde as linhas de campo magnético do Sol se reconfiguram. Durante a explosão, esta energia de origem magnética acelera partículas a velocidades relativísticas, aquece o plasma local e produz radiação eletromagnética em todo o espectro eletromagnético, desde raios X até ondas de rádio [27].

As explosões solares podem durar de alguns minutos a várias horas. A radiação emitida por uma explosão solar leva 8 minutos para atingir a Terra e as partículas aceleradas algumas poucas horas. A dose radiação X e UV de uma grande explosão pode ser fatal para um astronauta desprotegido, fora da estação espacial. Para a tripulação e passageiros de voos transpolares a dose chega a ser equivalente a várias chapas de raios X [28].

5.2 Ejeções de massa

As ejeções de massa coronal são eventos onde vastas quantidades de plasma (elétrons, prótons e íons), envoltas pelo campo magnético solar, são lançadas da coroa para o espaço interplanetário (Figura 12). Diferentemente das explosões solares, que são eventos de radiação e confinados na atmosfera solar, as ejeções de massa envolvem a expulsão física de material solar. Uma única ejeção de massa contém bilhões de toneladas (10^{12} kg) de plasma e atinge velocidades que variam de centenas de km/s a mais de 2.000 km/s, com valor médio de ~ 470 km/s [29].

Geralmente, as ejeções de massa coronal estão associadas à erupção de proeminências solares e/ou explosões. Porém não há uma relação direta entre as ejeções de massa e as explosões solares. Muitas ejeções são observadas sem a ocorrência de explosões, assim como a maioria das explosões tampouco está associada às ejeções de massa. Quando ejeções de massa coronal e explosões ocorrem juntas, o início da ejeção de massa parece preceder o das explosões em muitos casos. Em geral, as ejeções de massa mais rápidas e energéticas tendem a acontecer simultaneamente a explosões [30].

Ainda mais, as ejeções de massa coronal são bem mais energéticas do que a energia irradiada pela explosão propriamente dita. Entretanto, atualmente acredita-se que as ejeções de massa

coronal e as explosões fazem parte de um único “evento” de origem magnética e, portanto, é mais apropriado considerar um modelo unificado que explique ambos fenômenos [29]. De qualquer forma, a combinação dos efeitos de ambos tipos de atividade pode intensificar os impactos no clima espacial e, conseqüentemente, na Terra.

Às vezes uma quantidade de massa é arremessada em direção à Terra, nestes casos é chamada de ejeção de massa coronal do tipo halo. As ejeções halo têm um alto potencial de causar tempestades geomagnéticas quando interagem com a magnetosfera terrestre, principalmente se o seu campo magnético está voltado para o Sul (contrário à direção do campo magnético terrestre) [31]. Dependendo da velocidade com que são lançadas, as ejeções levam de um a quatro dias para alcançar a órbita da Terra.

5.3 Eventos extremos

O Evento Carrington, ocorrido em 1º de setembro de 1859, foi a primeira observação de uma explosão solar e menos de um dia depois aconteceu uma das maiores tempestades geomagnéticas já registradas [26]. Este evento é considerado um marco na história do clima espacial por ter causado uma série de efeitos na Terra, destacando a influência direta da atividade solar sobre o nosso planeta. O evento foi observado simultaneamente pelos astrônomos britânicos Carrington [32] e Hodgson [33]. Enquanto monitorava o Sol com um telescópio em seu observatório particular, Carrington notou uma explosão de luz intensa e brilhante na superfície solar. Estes tipos de eventos são atualmente conhecidos como explosão de luz branca.

Hoje sabe-se que esta observação coincidiu com a liberação de uma gigantesca ejeção de massa coronal em direção à Terra. Apenas cerca de 17,6 horas após a observação da explosão, a ejeção de massa coronal atingiu a magnetosfera terrestre, desencadeando uma poderosa tempestade geomagnética, a mais forte já registrada na história [26].

Os efeitos foram sentidos globalmente, com intensas auroras sendo visíveis em latitudes muito baixas, como no Havaí, no Caribe e na América Central. O Evento Carrington ocorreu durante a era do telégrafo, e os sistemas de telégrafo fo-

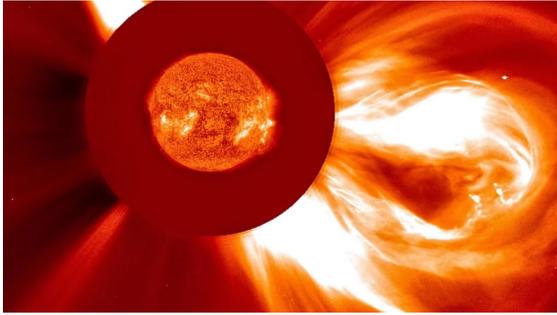


Figura 12: Uma ejeção de massa coronal observada pelo satélite *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO) da NASA/ESA em 2 de dezembro de 2003. Fonte: <https://soho.nascom.nasa.gov/gallery/images/20031202c2eit304.html>.

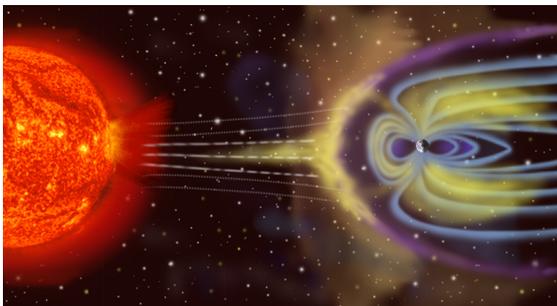


Figura 13: Concepção artística de uma ejeção de massa colidindo com a magnetosfera terrestre. <https://www.bas.ac.uk/project/extreme-sw/>.

ram severamente impactados. Correntes elétricas induzidas pela tempestade geomagnética fizeram com que muitos operadores de telégrafo recebessem choques elétricos, e os sistemas falharam ou operaram de forma errática. Em alguns casos, os telégrafos continuaram a funcionar mesmo depois de serem desconectados das baterias, alimentados apenas pela corrente geomagnética.

6 Clima espacial

Quando a radiação e as partículas produzidas pela atividade solar alcançam a Terra (Figura 13), estas podem causar: doses letais de radiação X para astronautas; alteração nas órbitas de satélites; tempestades geomagnéticas; variações na ionosfera que afetam as comunicações de longa distância; picos de correntes nas linhas de alta tensão; apagões; comportamento errático de instrumentos de navegação; mudanças na camada de ozônio; auroras espetaculares; e até influenciar o clima terrestre [1].

6.1 Tempestades geomagnéticas

As tempestades geomagnéticas são perturbações temporárias e intensas do campo magnético da Terra, causadas quando uma quantidade significativa de energia proveniente de ejeções de massa coronal ou do vento solar é transferida para a magnetosfera.

Quando uma ejeção de massa ou uma corrente de vento solar acelerado atinge a Terra, o choque de partículas carregadas pode causar compressão e distorção da magnetosfera. A reconexão magnética, um processo em que as linhas de campo magnético da ejeção ou do vento solar se conectam com as da Terra, permite a transferência de energia para a magnetosfera, intensificando as correntes elétricas e perturbando o campo magnético terrestre [31]. A chegada de uma ejeção de massa coronal geralmente produz tempestades mais intensas do que as originadas pela interação das correntes do vento solar (Seção 3).

As tempestades geomagnéticas são monitoradas por meio de índices de atividade como o Índice Kp² [34] e o Índice Dst³ (*Disturbance Storm Time*), que medem a intensidade da atividade geomagnética. Tempestades geomagnéticas intensas apresentam índices Dst < 100 nT e índice Kp \gtrsim 5.

6.2 Redes elétricas e apagões

Grandes tempestades geomagnéticas podem induzir correntes elétricas em redes de energia, causando sobrecargas e apagões, como o que ocorreu em Quebec, Canadá, em 1989. Em 10 de março ocorreu uma grande explosão (X4.5 na escala GOES) acompanhada por uma ejeção de massa coronal, que atingiu a Terra em 13 de março [35]. Quando a ejeção de massa colidiu com o campo magnético da Terra, induziu uma forte tempestade geomagnética causando rápidas flutuações nos campos geomagnéticos em todo o planeta, especialmente em altas latitudes, como a de Quebec.

Estas grandes flutuações nos campos magnéticos durante a tempestade geomagnética induziram correntes elétricas nas linhas de transmissão de energia de alta tensão. Por sua vez, as cor-

²<https://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index>

³<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/>

rentes induzidas sobrecarregaram os transformadores da rede elétrica de Quebec, desencadeando o apagão.

Na madrugada de 13 de março de 1989, a rede elétrica de Quebec colapsou. A falha começou em um dos transformadores da Hidro-Québec [35], que foi danificado pelas correntes induzidas, e se espalhou rapidamente por todo o sistema, levando ao desligamento completo da rede. O apagão durou aproximadamente 9 horas, deixando cerca de 6 milhões de pessoas sem eletricidade durante o inverno rigoroso. O apagão afetou serviços públicos, transporte, comunicações, e causou interrupções generalizadas em toda a província de Quebec.

6.3 Instrumentos de navegação

Instrumentos de navegação que dependem de medições precisas do campo magnético da Terra, como bússolas e alguns sistemas de navegação baseados em magnetômetro, podem ser afetados por alterações temporárias e irregulares no campo geomagnético. Estes instrumentos podem apresentar leituras incorretas ou erráticas devido às flutuações do campo magnético durante as tempestades geomagnéticas, induzindo erros na determinação da sua direção e localização.

Tempestades geomagnéticas também podem afetar a operação de satélites, que são usados para navegação por satélite (como o GPS [26]). As partículas carregadas podem danificar os componentes eletrônicos dos satélites além de interferirem nos sinais transmitidos e recebidos, afetando a precisão dos dados de navegação, devido à interferência e distorções causadas pelas tempestades geomagnéticas. As correções necessárias para compensar estes efeitos podem ser mais difíceis durante eventos de intensa atividade solar. Estes problemas são perigosos para decolagem ou aterrissagem automáticas de aviões.

6.4 Satélites artificiais e comunicação

A atividade solar pode danificar satélites, ao induzir correntes elétricas que podem causar curto-circuitos além de danificar painéis solares pela colisão de partículas energéticas. Também interfere na propagação dos sinais dos satélites de comunicação devido às alterações do meio interplanetário próximo.

Durante uma tempestade geomagnética, a energia depositada na atmosfera superior, especialmente na termosfera, aquece essa região, causando sua expansão. Nestes casos, a termosfera pode expandir centenas de quilômetros, aumentando a densidade do ar nas altitudes onde normalmente seria muito tênue. Satélites em órbitas baixas (LEO, *Low Earth Orbit*) experimentam um leve arrasto devido à presença de partículas atmosféricas, mesmo em condições normais. Esse arrasto é geralmente muito pequeno, mas durante a expansão da termosfera, a densidade do ar nessas altitudes aumenta significativamente.

O aumento do arrasto atmosférico provoca um rápido decaimento orbital dos satélites, fazendo com que percam altitude mais rapidamente do que o previsto. Se o arrasto for grande o suficiente, os satélites podem não conseguir manter sua órbita e acabar reentrando na atmosfera, onde são destruídos.

Em fevereiro de 2022, a SpaceX lançou 49 satélites Starlink em uma órbita inicial baixa, como parte do procedimento normal antes de movê-los para sua órbita operacional mais alta. No entanto, logo após o lançamento, uma tempestade geomagnética causou uma expansão da termosfera, aumentando o arrasto atmosférico. Devido ao aumento inesperado do arrasto, os satélites da SpaceX recém-lançados não conseguiram elevar sua órbita conforme planejado. Como resultado, mais de 40 dos 49 satélites lançados acabaram reentrando na atmosfera e foram destruídos [36]. Acredita-se que neste dia houve o efeito amplificado de duas ejeções de massa, quando uma mais rápida alcançou outra mais lenta que já estava a caminho da Terra.

6.5 Ionosfera

O fluxo solar tem um impacto significativo na ionosfera terrestre, uma camada da atmosfera que fica entre aproximadamente 60 km e 2.000 km de altitude [37]. Apesar de ser uma fração pequena da nossa atmosfera, a ionosfera é crucial para as comunicações de longa distância, pois age como um guia de onda, especialmente para as ondas de rádio de baixa frequência (< 300 MHz) que são refletidas nessa camada.

Durante períodos de alta atividade solar, a radiação ultravioleta extrema (EUV) e os raios X

provenientes do Sol aumentam a ionização na ionosfera [38]. Isto ocorre porque a radiação UV e X têm energia suficiente para remover elétrons dos átomos na atmosfera superior, criando mais íons e elétrons livres. O aumento da ionização infla a ionosfera abaixando seu limite inferior e, portanto, alterando a altura de reflexão das ondas de rádio, reduzindo a eficácia das comunicações. Em algumas regiões, as ondas de rádio podem ser desviadas, atenuadas ou até bloqueadas completamente, dificultando as comunicações. Tempestades intensas podem até causar interrupções de comunicações em certas frequências.

A ionosfera também afeta diretamente a precisão dos sinais de GPS, que passam por essa camada ao viajarem do satélite ao receptor na Terra. A atividade solar intensa pode causar atrasos e erros de posicionamento. Esses erros podem ser críticos para sistemas de navegação e sincronização de tempo, afetando tanto operações civis quanto militares.

6.6 Auroras

As auroras, fenômenos luminosos fascinantes, são vistas no céu noturno como um brilho difuso ou como “cortinas” coloridas que se estendem aproximadamente na direção leste-oeste (Figura 14). As auroras boreais (no hemisfério norte) e austrais (no hemisfério sul) ocorrem quando partículas carregadas das ejeções de massa ou do vento solar interagem com o campo magnético da Terra e conseguem penetrar na nossa atmosfera acima de 80 km. Devido à configuração do campo geomagnético, a entrada destas partículas se dá mais facilmente pelas regiões polares, pois o campo magnético as canaliza para essas áreas.

Ao atingir a atmosfera, estas partículas, principalmente elétrons e prótons, colidem com os átomos e moléculas dos gases atmosféricos. As colisões transferem energia das partículas solares para os gases atmosféricos ionizando ou excitando os átomos e moléculas para um estado de energia mais alto. Quando esses átomos e moléculas se recombinam com um elétron ou voltam ao seu estado normal, a energia é liberada na forma de luz (fóton), que é o que observamos como auroras.

A coloração das auroras é resultado da interação dessas partículas com diferentes gases presen-



Figura 14: Imagem de aurora boreal salientando suas várias cores. Fonte: extraído de BGR.

tes na atmosfera terrestre. A cor específica das auroras depende do tipo de átomo ou molécula que está sendo excitado e da altitude em que essa excitação ocorre. O verde (comprimento de onda de cerca de 557,7 nm) é a cor mais comum das auroras e é produzido por átomos de oxigênio (Figura 14). Essa cor é emitida a altitudes entre 100 e 300 km, com pico em 110 km [39]. Abaixo de 100 km, há brusca diminuição da concentração de oxigênio atômico, causando um término abrupto das bordas inferiores das “cortinas”.

O vermelho também é emitido por átomos de oxigênio ($\lambda = 630$ nm), mas em altitudes mais altas, acima de 150 km com pico em 250 km, onde a densidade é muito baixa [39]. Já as auroras azuis ($\lambda = 427,8$ nm) e violetas são bem mais raras e são produzidas por moléculas de nitrogênio, emitindo em altitudes abaixo de 100 km [39]. A cor rosa resulta de uma combinação das emissões de nitrogênio e oxigênio. Geralmente ocorre em altitudes médias, onde ambas as moléculas podem ser excitadas.

A intensidade das auroras também depende da energia e da quantidade de partículas solares atingindo a Terra. Tempestades solares intensas produzem auroras mais brilhantes e com uma gama maior de cores. Um dos efeitos mais visíveis das tempestades geomagnéticas é a intensificação das auroras, que podem ser vistas em latitudes mais baixas do que o normal [26].

6.7 Clima terrestre

A relação entre o clima terrestre e a atividade solar é bastante complexa e às vezes controversa. Além da relação entre o período do Mínimo de Maunder (1645-1715) [24, 25], uma fase de baixa atividade solar, que coincidiu com um período de

resfriamento global conhecido como Pequena Era do Gelo [40], pode existir uma influência do ciclo de 11 anos.

A radiação solar que atinge a Terra varia 0,1% ao longo do ciclo de atividade solar de 11 anos [22]. Durante períodos de alta atividade solar, como o máximo solar, o Sol emite uma quantidade ligeiramente maior de radiação, o que pode ter um efeito sutil sobre o clima da Terra, podendo acarretar um ligeiro aumento nas temperaturas globais. No entanto, esse efeito é pequeno em comparação com os fatores internos do clima, como as concentrações de gases de efeito estufa.

A radiação UV do Sol também varia com a atividade solar. Mudanças na radiação UV, por exemplo, durante explosões intensas, podem afetar a temperatura da estratosfera e, por conseguinte, influenciar a dinâmica da circulação atmosférica. Também, estas variações na atividade solar podem afetar a concentração de ozônio na estratosfera. Alterações na camada de ozônio influenciam a distribuição da radiação solar na superfície da Terra e, por conseguinte, impactam o clima. A atividade solar pode ainda influenciar padrões de circulação atmosférica e sistemas meteorológicos, embora essas interações sejam complexas e muitas vezes difíceis de quantificar.

Entretanto, a atividade solar é apenas um dos muitos fatores que influenciam o clima da Terra. Gases de efeito estufa, como dióxido de carbono e metano, têm um impacto muito mais significativo e direto sobre o clima, especialmente no contexto das mudanças climáticas atuais.

7 Considerações finais

Viver em torno de uma estrela ativa pode ser problemático para uma sociedade tão dependente de tecnologia como a nossa. Portanto, as pesquisas em Física Solar visam um melhor entendimento das causas da atividade solar. A partir deste conhecimento, espera-se poder prever como e quando eventos extremos ocorrerão. Nestes casos, medidas preventivas como o desligamento de satélites, por exemplo, podem ser tomadas a fim de diminuir o impacto destes eventos.

O Evento Carrington foi um dos primeiros a demonstrar claramente a conexão entre atividades solares e seus efeitos na Terra, destacando a

importância de monitoramento do clima espacial. Também serviu como um alerta para os potenciais danos que eventos solares extremos podem causar em tecnologias.

Se um evento similar ao de Carrington ocorresse hoje, poderia ter consequências devastadoras, devido à nossa dependência de tecnologia eletrônica e satélites. As redes de energia, comunicações por satélite, GPS e outras infraestruturas críticas estariam em risco. Como resultado, a comunidade científica e as agências governamentais têm investido em monitoramento e preparação para mitigar os efeitos de futuras tempestades solares intensas.

Monitorar a atividade solar é crucial para prever seus impactos no espaço próximo à Terra. As explosões solares e ejeções de massa são detectadas e monitoradas por uma variedade de satélites e telescópios espaciais, como o GOES, SOHO, TRACE, Wind, ACE, STEREO, e Solar Dynamics Observatory (SDO). Estas observações fornecem alertas antecipados de tempestades solares, permitindo que medidas de mitigação sejam tomadas para proteger satélites, astronautas, e infraestruturas sensíveis na Terra.

No Brasil, o EMBRACE⁴ (Estudo e Monitoramento Brasileiro de Clima Espacial) é um programa de monitoramento do clima espacial. Criado em agosto de 2007 pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) tem a missão de monitorar o ambiente do espaço Sol-Terra, a magnetosfera, a atmosfera superior e os efeitos de correntes induzidas no solo para prever possíveis influências nas atividades tecnológicas e econômicas.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos os meus colaboradores que ao longo dos anos contribuíram para as minhas pesquisas sobre o Sol. Principalmente, sou grata à parceria de meus alunos de graduação e pós-graduação.

Sobre a autora

Adriana Valio (avalio@craam.mackenzie.br) é

⁴<https://www2.inpe.br/climaespacial/portal/pt/>

especialista em atividade solar, principalmente em explosões e manchas. Escreveu o livro “Nossa Estrela: o Sol” [1] para professores e alunos do ensino médio e alunos de graduação. É pesquisadora do Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie. Entre 2013 e 2023 foi coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

Referências

- [1] A. V. R. Silva, *Nossa Estrela: o Sol* (Livraria da Física, 2006), 1 ed.
- [2] S. O. Kepler e M. F. O. Saraiva, *Astronomia & Astrofísica* (Livraria da Física, 2014), 3 ed. Disponível em <http://astro.if.ufrgs.br/livro.pdf>.
- [3] M. Stix, *The Sun. An Introduction* (1991).
- [4] J. P. Rozelot, *Solar photosphere* (Springer Netherlands, Dordrecht, 1997), 754–756.
- [5] S. K. Solanki, *Sunspots: An overview*, *The Astronomy and Astrophysics Review* **11**(2-3), 153 (2003).
- [6] J. E. Vernazza, E. H. Avrett e R. Loeser, *Structure of the solar chromosphere. III. Models of the EUV brightness components of the quiet sun.*, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **45**, 635 (1981).
- [7] C. L. Selhorst, A. V. R. Silva e J. E. R. Costa, *Solar atmospheric model with spicules applied to radio observation*, *Astronomy & Astrophysics* **433**(1), 365 (2005).
- [8] P. Schwartz et al., *2D non-LTE modelling of a filament observed in the H α line with the DST/IBIS spectropolarimeter*, *Astronomy & Astrophysics* **631**, A146 (2019). [ArXiv:1910.03607](https://arxiv.org/abs/1910.03607).
- [9] S. R. Cranmer e A. R. Winebarger, *The Properties of the Solar Corona and Its Connection to the Solar Wind*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **57**, 157 (2019). [ArXiv:1811.00461](https://arxiv.org/abs/1811.00461).
- [10] J. A. Klimchuk, *On Solving the Coronal Heating Problem*, *Solar Physics* **234**(1), 41 (2006). [ArXiv:astro-ph/0511841](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0511841).
- [11] A. A. Vidotto, *The evolution of the solar wind*, *Living Reviews in Solar Physics* **18**(1), 3 (2021). [ArXiv:2103.15748](https://arxiv.org/abs/2103.15748).
- [12] E. Parker, *Extension of the Solar Corona into Interplanetary Space*, *Journal of Geophysical Research* **64**(11), 1675 (1959).
- [13] R. G. Marsden, *The heliosphere after Ulysses*, *Astrophysics and Space Science* **277**, 337 (2001).
- [14] J. L. Phillips et al., *Ulysses Solar Wind Plasma Observations at High Southerly Latitudes*, *Science* **268**(5213), 1030 (1995).
- [15] I. G. Richardson, *Solar wind stream interaction regions throughout the heliosphere*, *Living Reviews in Solar Physics* **15**(1), 1 (2018).
- [16] S. D. Bale et al., *The FIELDs Instrument Suite for Solar Probe Plus. Measuring the Coronal Plasma and Magnetic Field, Plasma Waves and Turbulence, and Radio Signatures of Solar Transients*, *Space Science Reviews* **204**(1-4), 49 (2016).
- [17] F. S. Mozer et al., *Switchbacks in the Solar Magnetic Field: Their Evolution, Their Content, and Their Effects on the Plasma*, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **246**(2), 68 (2020).
- [18] M. Opher et al., *Magnetized jets driven by the Sun: The structure of the heliosphere revisited—Updates*, *Physics of Plasmas* **23**(5), 056501 (2016).
- [19] P. Charbonneau, *Dynamo models of the solar cycle*, *Living Reviews in Solar Physics* **17**(1), 4 (2020).
- [20] I. G. Usoskin, *A history of solar activity over millennia*, *Living Reviews in Solar Physics* **20**(1), 2 (2023).
- [21] A. Valio et al., *Correlations of Sunspot Physical Characteristics during Solar Cycle 23*, *Solar Physics* **295**(9), 120 (2020).

- [22] C. Fröhlich, *Total Solar Irradiance: What Have We Learned from the Last Three Cycles and the Recent Minimum?*, [Space Science Reviews](#) **176**(1-4), 237 (2013).
- [23] H. Schwabe, *Die Sonne. Von Herrn Hofrath Schwabe*, [Astronomische Nachrichten](#) **20**(17), 283 (1843).
- [24] E. W. Maunder, *The Prolonged Sunspot Minimum, 1645-1715*, [Journal of the British Astronomical Association](#) **32**, 140 (1922).
- [25] J. A. Eddy, *The Maunder Minimum*, [Science](#) **192**(4245), 1189 (1976).
- [26] E. W. Cliver et al., *Extreme solar events*, [Living Reviews in Solar Physics](#) **19**(1), 2 (2022). [ArXiv:2205.09265](#).
- [27] A. O. Benz, *Flare observations*, [Living Reviews in Solar Physics](#) **14**(1), 2 (2017).
- [28] D. S. Smith e J. M. Scalo, *Risks due to X-ray flares during astronaut extravehicular activity*, [Space Weather](#) **5**(6), S06004 (2007). [ArXiv:astro-ph/0701314](#).
- [29] D. F. Webb e T. A. Howard, *Coronal Mass Ejections: Observations*, [Living Reviews in Solar Physics](#) **9**(1), 3 (2012).
- [30] N. Gopalswamy, S. Yashiro e S. Akiyama, *Geoeffectiveness of halo coronal mass ejections*, [Journal of Geophysical Research \(Space Physics\)](#) **112**(A6), A06112 (2007).
- [31] W. D. Gonzalez e B. T. Tsurutani, *Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ($D_{st} < -100$ nT)*, [Planetary and Space Science](#) **35**(9), 1101 (1987).
- [32] R. C. Carrington, *Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, 1859*, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#) **20**, 13 (1859).
- [33] R. Hodgson, *On a curious Appearance seen in the Sun*, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#) **20**, 15 (1859).
- [34] J. Bartels, N. H. Heck e H. F. Johnston, *The three-hour-range index measuring geomagnetic activity*, [Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity](#) **44**(4), 411 (1939).
- [35] D. H. Boteler, *A 21st Century View of the March 1989 Magnetic Storm*, [Space Weather](#) **17**(10), 1427 (2019).
- [36] T. Dang et al., *Unveiling the Space Weather During the Starlink Satellites Destruction Event on 4 February 2022*, [Space Weather](#) **20**(8), e2022SW003152 (2022).
- [37] D. Bilitza et al., *The International Reference Ionosphere Model: A Review and Description of an Ionospheric Benchmark*, [Reviews of Geophysics](#) **60**(4), e2022RG000792 (2022).
- [38] L. R. Cander, *Ionospheric research and space weather services*, [Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics](#) **70**(15), 1870 (2008).
- [39] S. R. N. Gupta, *Review of Aurora borealis spectacular manifestations of solar wind and atmosphere*, [International Research Journal of Science & Engineering](#) **80**(1), 5 (2020).
- [40] W. K. Schmutz, *Changes in the Total Solar Irradiance and climatic effects*, [Journal of Space Weather and Space Climate](#) **11**, 40 (2021).