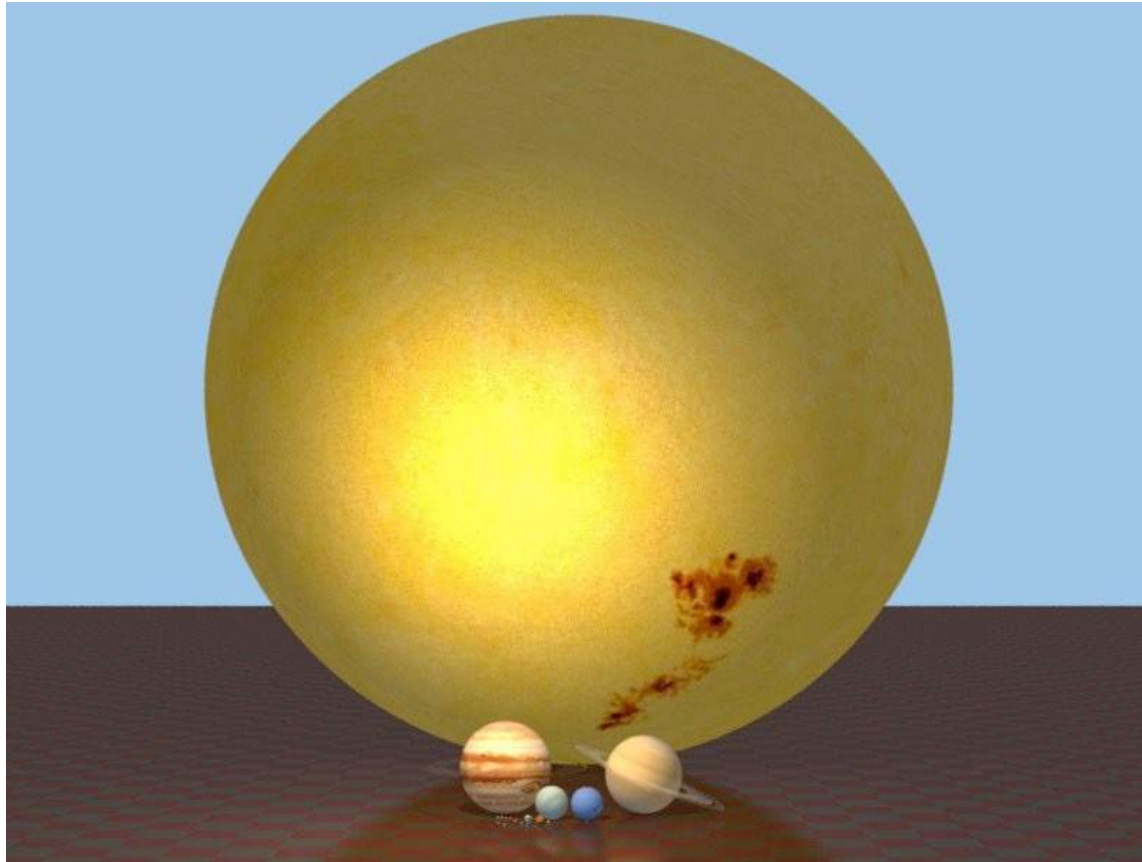


O Sol

Vera Jatenco-Pereira
IAG/USP

Agradecimentos: Prof. Enos Picazzio

Sol: características



Massa do Sol (M_{\odot}): 333.000 vezes a massa da Terra.

Raio do Sol (R_{\odot}): ~ 109 vezes o raio da Terra (1,392 milhões de km).

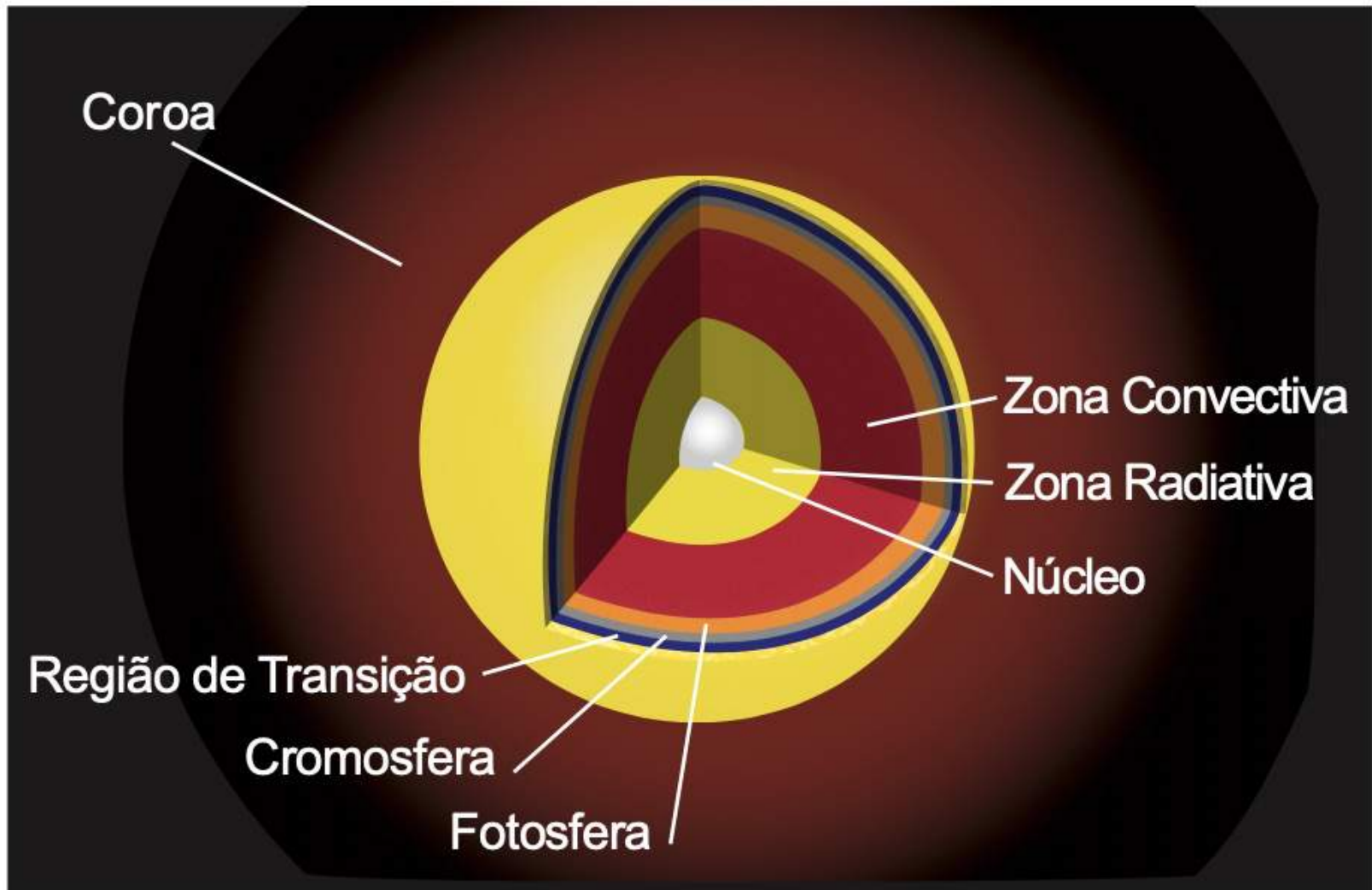
Densidade média: $1,41 \text{ g/cm}^3$ (quase como a da água).

central: 160 g/cm^3 .

superfície: 1 bilionésimo g/cm^3 .

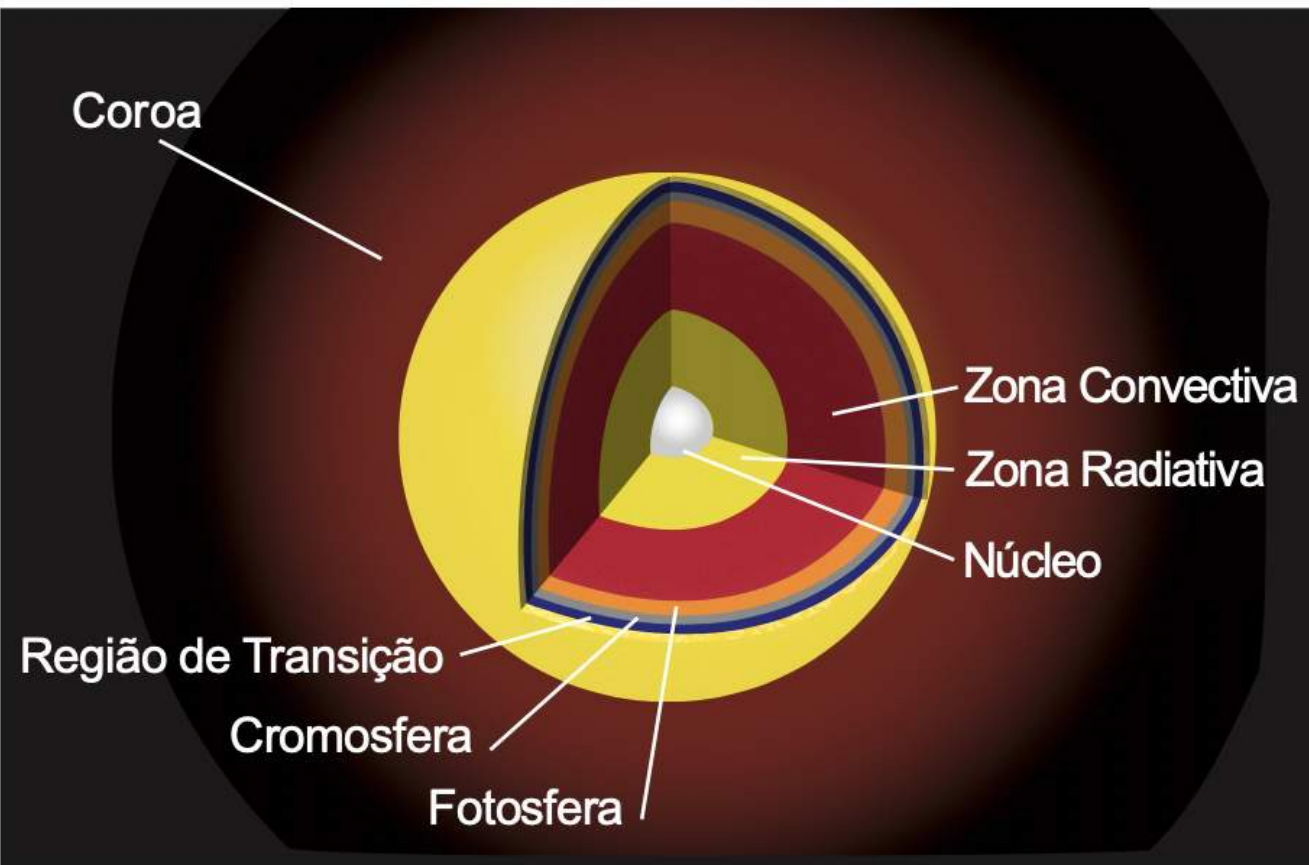
Estrutura do Sol

Esquema da estrutura do Sol (fora de escala).



Estrutura do Sol

Esquema da estrutura do Sol (fora de escala).



- A estrutura interna do Sol é obtida por modelagem matemática e heliosismologia.
- Hipótese: estrutura em equilíbrio, sem expansão ou contração.
- Dimensões: núcleo 0,2 do raio solar, zona radiativa 0,5 e zona convectiva 0,3.

Créditos: O Céu que nos envolve – Enos Picazzio (org.) (2011)

https://www.iag.usp.br/sites/default/files/2023-01/2011_picazzio_ceu_envolve-c.pdf

Interior solar

Tacoclina

Interface entre a zona convectiva e a zona radiativa.

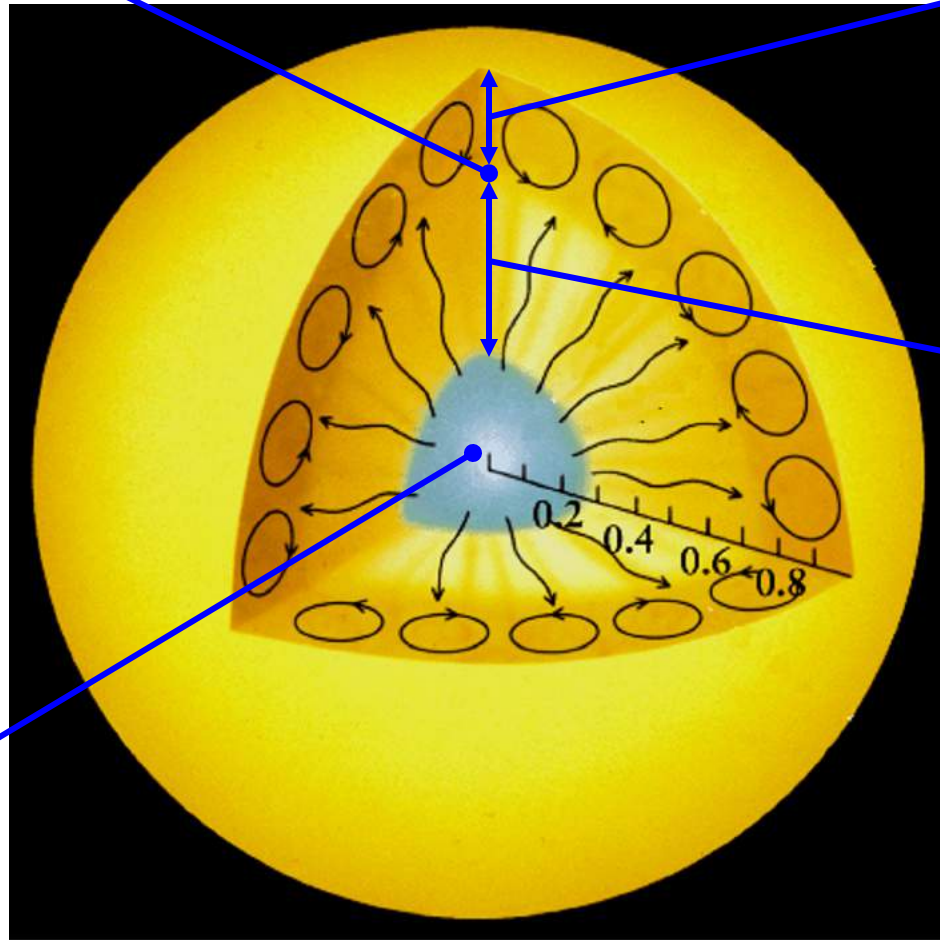
Camada com campo magnético complexo.

Núcleo

(15.000.000 K)

Fusão nuclear

$4\text{H} \Rightarrow \text{He} + \text{partículas sub-atômicas} + \text{energia}$



Zona convectiva

energia transportada por convecção

Zona radiativa

energia transportada através de absorção e reemissão

Kelvin (K): unidade de temperatura padrão do Sistema Internacional de Unidades.

$$T \text{ (K)} = T \text{ (}^\circ\text{C)} + 273,15$$

Propriedades de cada componente da estrutura do Sol

| REGIÃO | ESPESSURA (km) | DENSIDADE (g/cm ³) | TEMPERATURA (K) |
|---------------------|---|--------------------------------|-----------------------|
| Interior | | | |
| Núcleo | $\sim 2 \times 10^5$ | ~ 150 | 15.000.000 |
| Zona Radiativa | $\sim 3 \times 10^5$ | cai de 20 a 0,2 | 7.000.000 - 2.000.000 |
| Zona Convectiva | $\sim 2 \times 10^5$ | < 0,2 | 2.000.000 - 6.400 |
| Superfície | | | |
| Fotosfera | ~ 500 | $\sim 4.0 \times 10^{-7}$ | 6.400 - 4.400 |
| Atmosfera | | | |
| Cromosfera | $\sim 2,5 \times 10^3$ | $\sim 2.0 \times 10^{-7}$ | 4.400 - 20.000 |
| Região de transição | $\sim 8,5 \times 10^3$ | 1.0×10^{-16} | 20.000 - 1.000.000 |
| Coroa | tamanho indefinido, atinge vários raios solares | $< 2.0 \times 10^{-17}$ | > 1.000.000 |

- Densidade sempre diminui com a distância ao centro.
- A temperatura diminui inicialmente, mas aumenta a partir da cromosfera.

Parte externa do Sol

- As partes externas do Sol, acessíveis à observação direta, apresentam grande variação das condições físicas com a altura:
 - Temperatura, pressão e composição química.
- A parte externa pode ser dividida em:
 - Superfície → Fotosfera.
 - Atmosfera → Cromosfera e coroa.

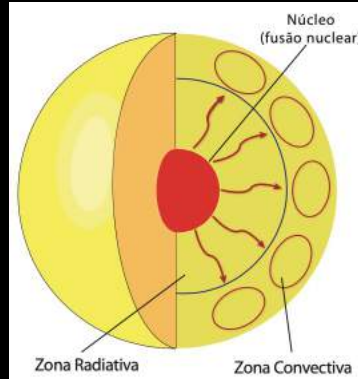
Fotosfera: a superfície solar

Espessura ~ 500 km

Temp. ~ 5800 K

Muito rarefeita

mancha solar



Grânulos

(topos das células convectivas)

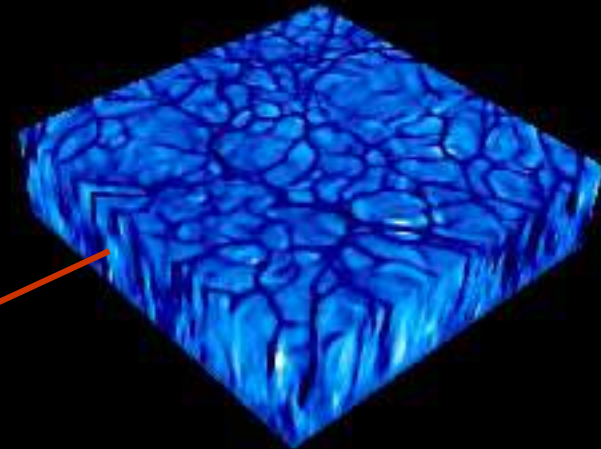
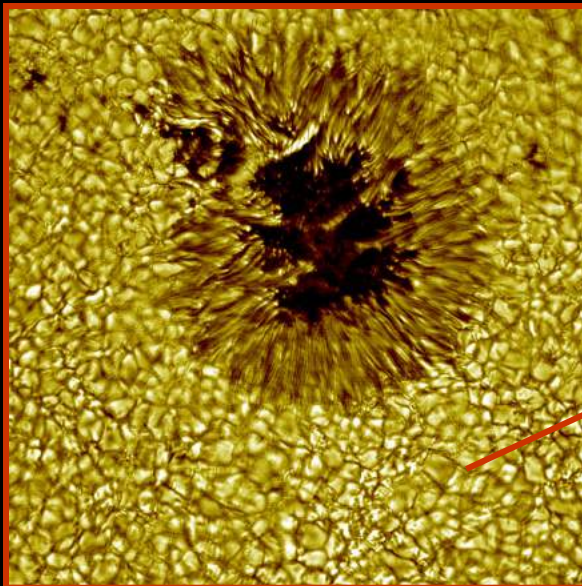
tamanho: ~700 km,

vida: 10-20 minutos

velocidade. de convecção:

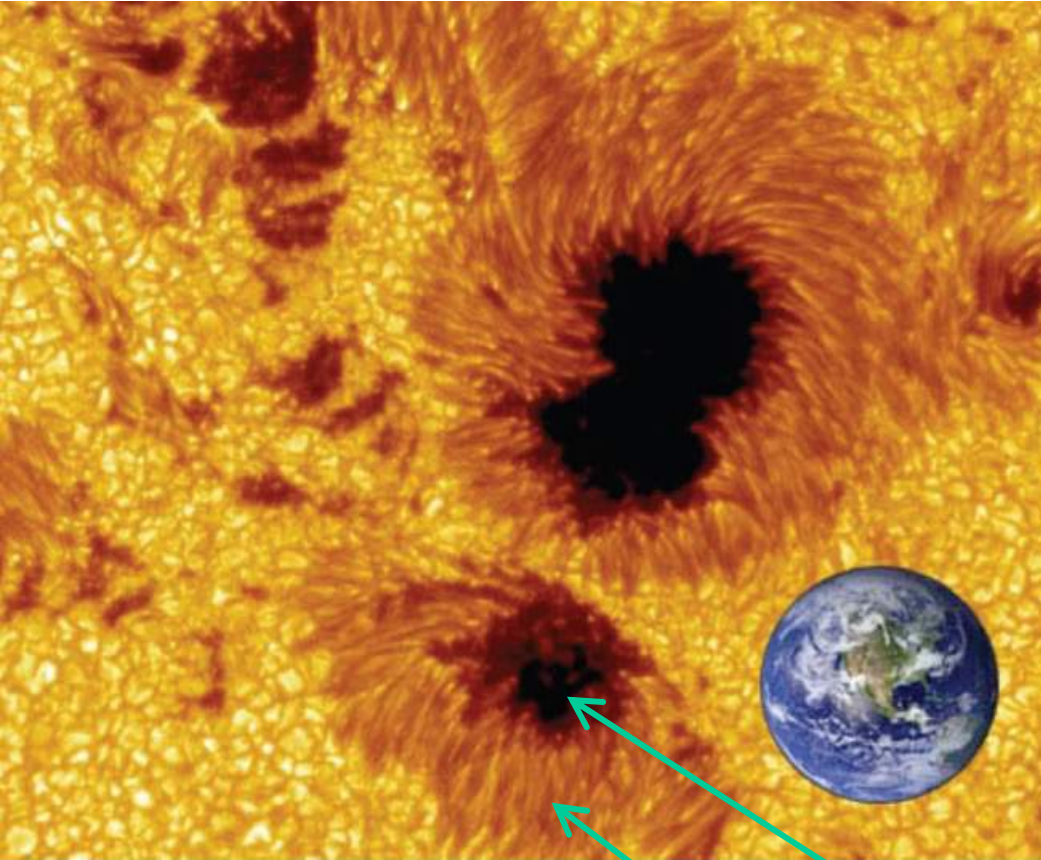
7 km/s (25.000 km/h)

Regiões
escuras
associadas a
fortes
campos
magnéticos.



Matéria quente aflora pelo centro da célula, esfria e precipita pelos bordos, num processo contínuo.

Manchas Solares



- As manchas solares são as formações mais marcantes da fotosfera.
- Variam em tamanho, abundância e posição ao longo do tempo.
- Estão associadas a fortes campos magnéticos e têm, em média, 10 mil km de diâmetro.
- Tendem a se formar em grupos e duram ~ 1 semana.

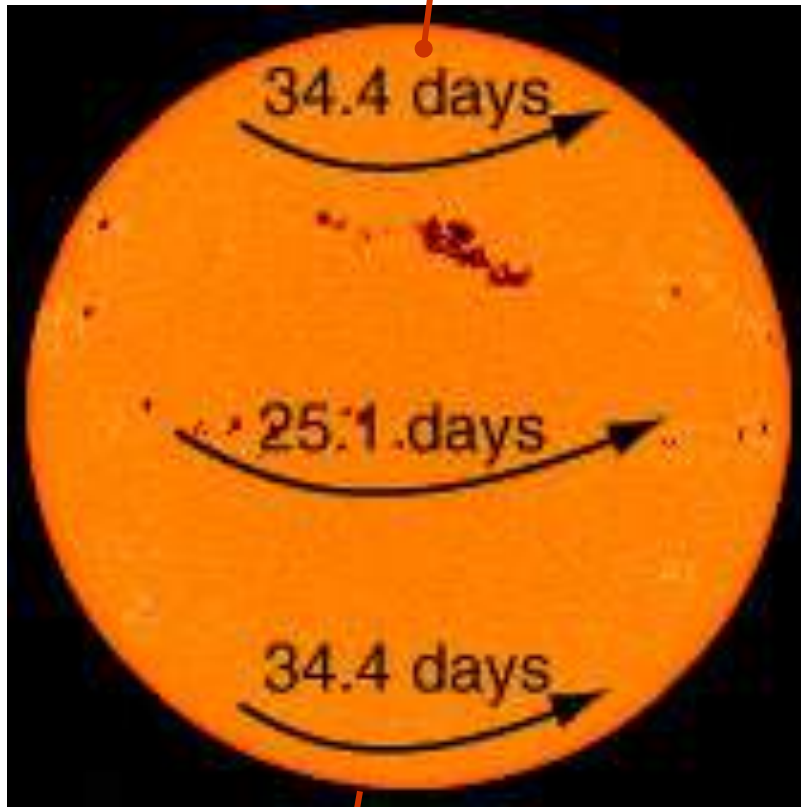
Umbra: $T \sim 4500 \text{ K}$

Penumbra: $T \sim 5500 \text{ K}$

Créditos:

- Trabalho de arte: Randy Russel
- imagens: Academia Real Sueca (mancha), NASA (Terra)

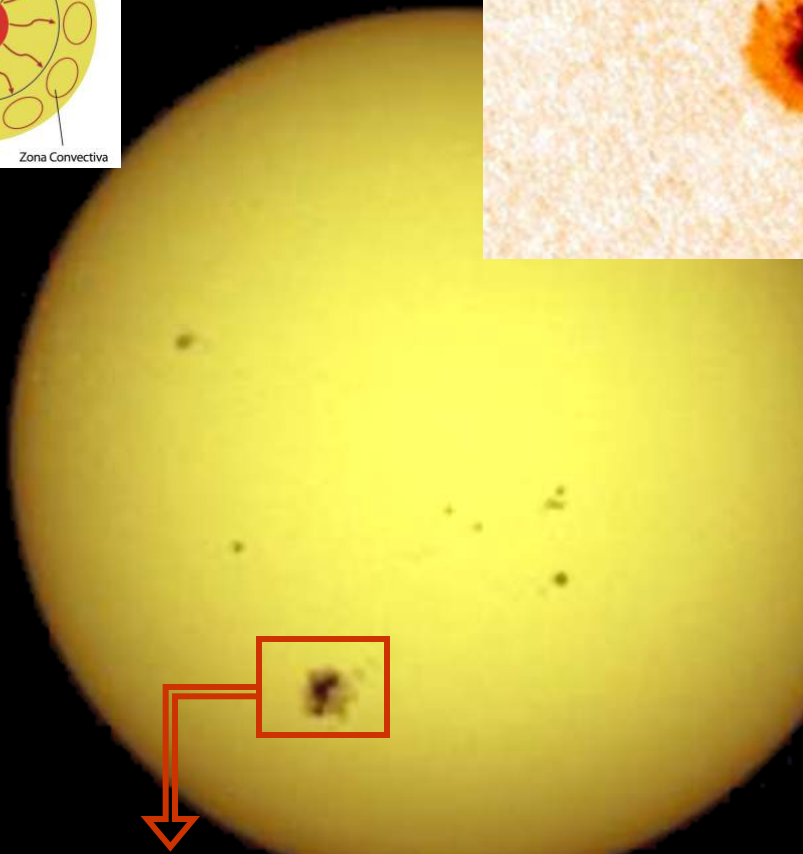
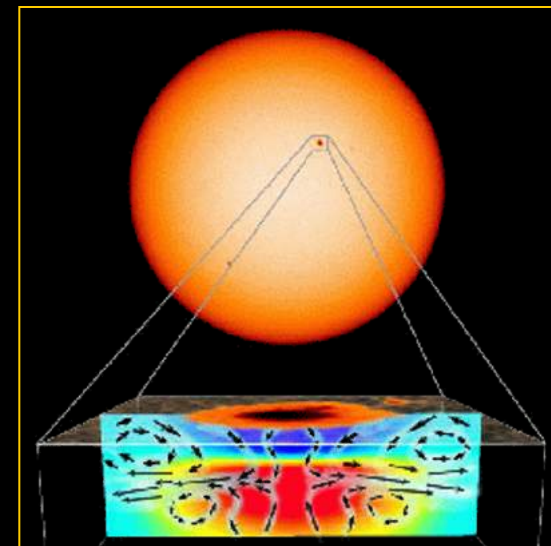
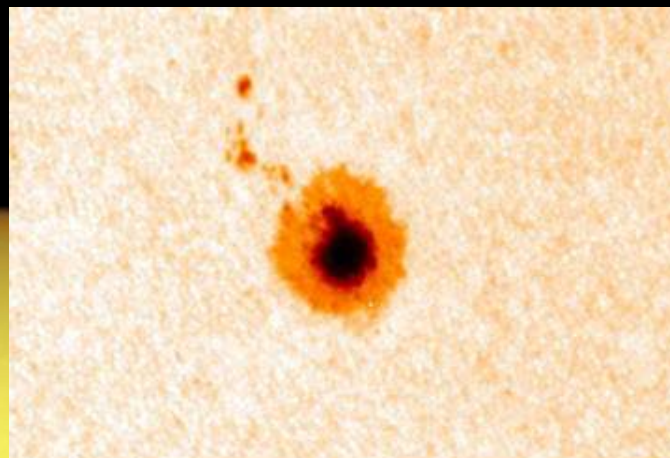
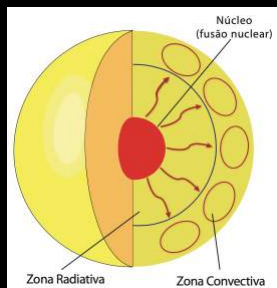
Manchas Solares



- As **manchas solares** fornecem uma referência para a medida do período de **rotação** a diferentes latitudes.
- O Sol (como os planetas gigantes gasosos) não giram como um corpo sólido, possuem uma **rotação diferencial**: o equador gira mais rápido do que os polos.
- A inclinação do eixo de rotação do Sol é de $7,3^\circ$ em relação à eclíptica.

Manchas Solares

Estrutura da mancha



A mancha circula o Sol com a velocidade de rotação solar típica da latitude em que se encontra.



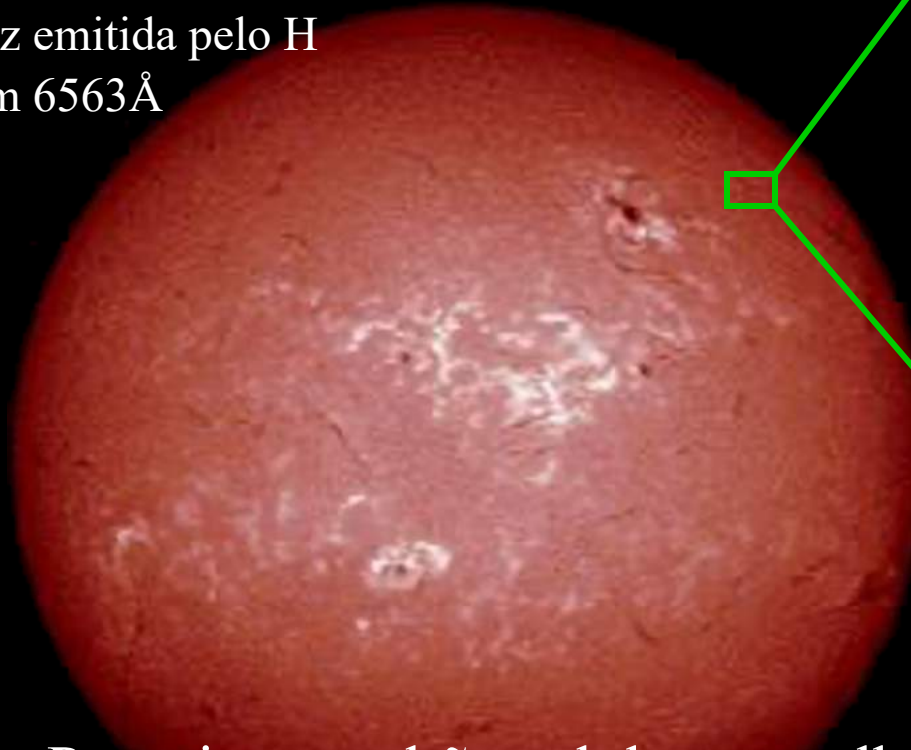
Cromosfera: a baixa atmosfera

Espessura: ~2500 km

Temperatura: ~ 5.000 a 25.000K

Do grego: esfera colorida

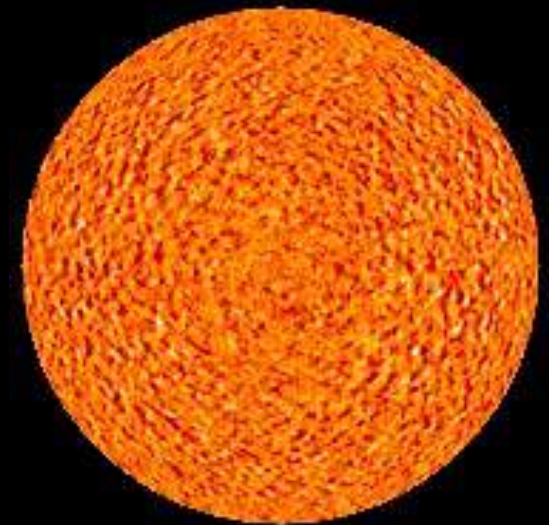
luz emitida pelo H
em 6563Å



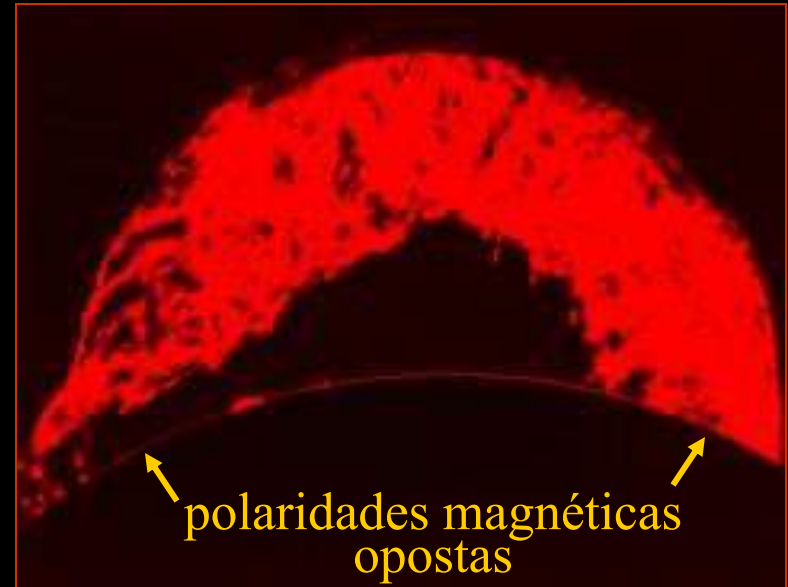
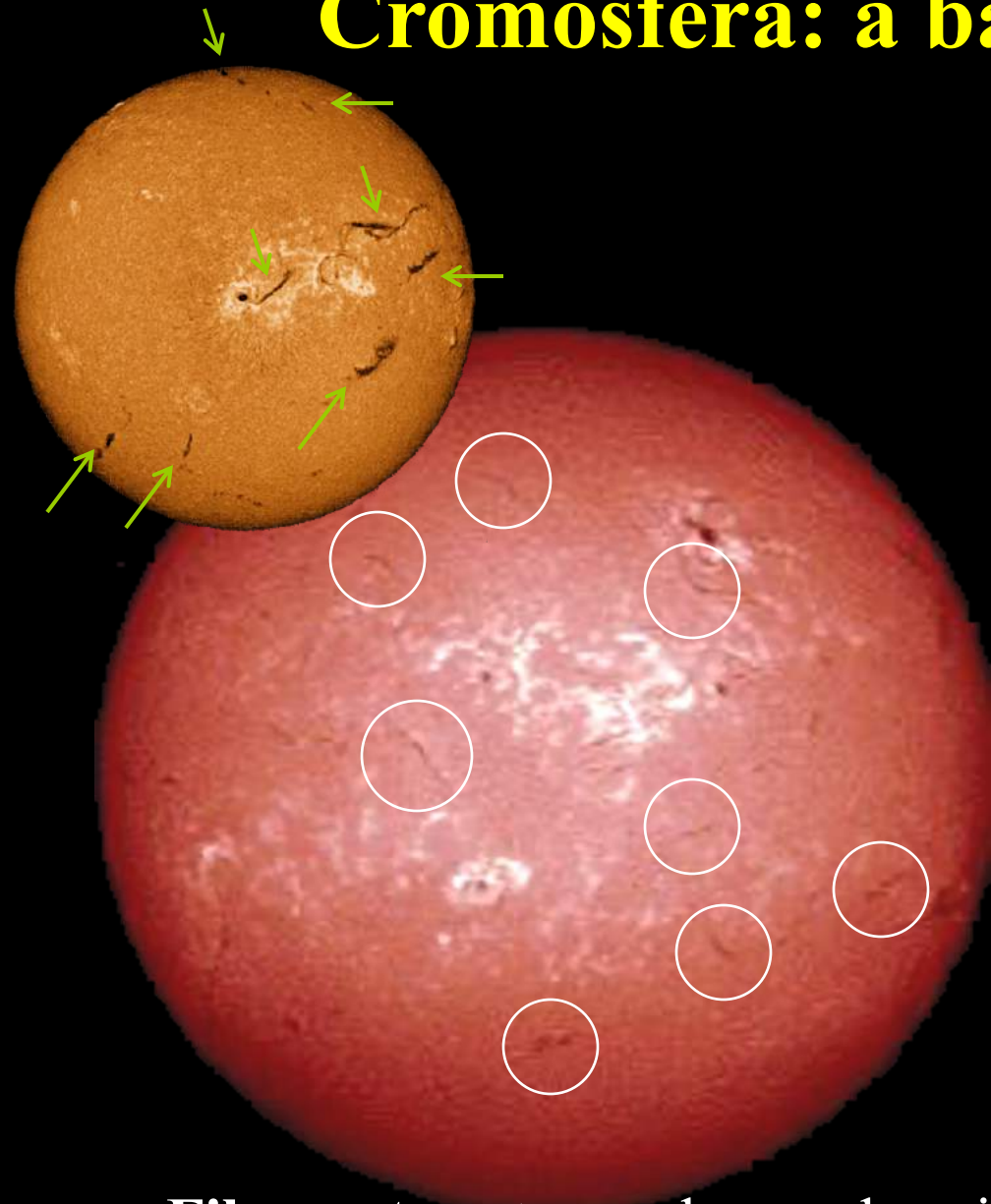
supergranulação

**tamanho: ~ 30000 km;
vida: 40-50 h**

Possui um padrão celular semelhante ao fotosférico. Mas as dimensões e o tempo de vida das células cromosféricas são bem maiores.



Cromosfera: a baixa atmosfera



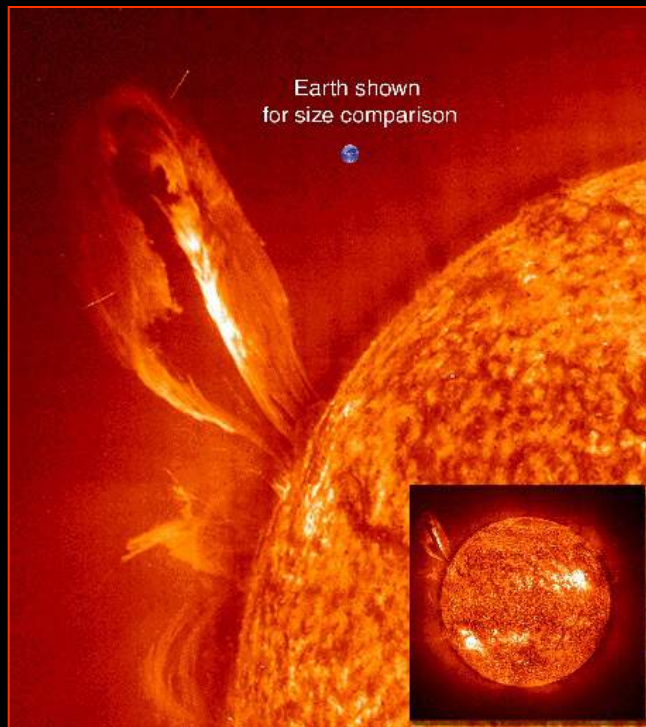
Protuberâncias

arcadas magnéticas vistas no limbo, por elas circulam a matéria cromosférica

Filamentos: topos de arcadas vistos contra o disco solar, são mais frios e brilham menos

Cromosfera: a baixa atmosfera

1. A configuração de uma protuberância é muito complexa.
2. Suas bases estão apoiadas sobre regiões com polaridades magnéticas opostas, formando um arco magnético por onde circula a matéria cromosférica.
3. As dimensões podem ser enormes, e a duração pode atingir horas.
4. Essas figuras cromosféricas permeiam a coroa solar, que é muito mais quente.

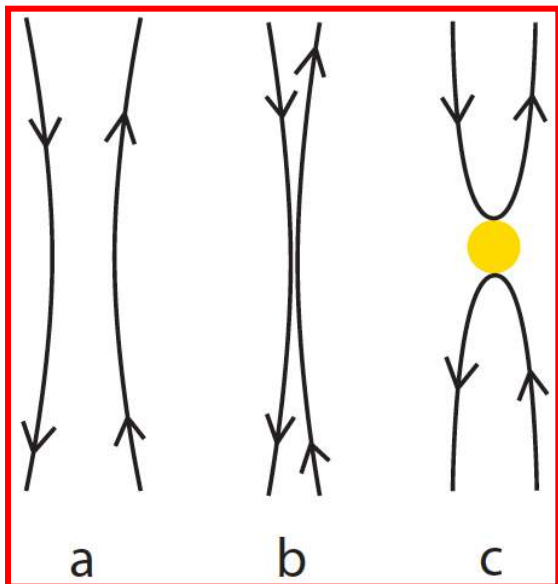


Clarão (*Flare*)

Observações em raios-X e ultravioleta: as áreas mais compactas, nas regiões centrais dos “flares”, podem atingir temperaturas da ordem de 100.000.000 K.



Ocorrem entre a alta cromosfera e baixa coroa.

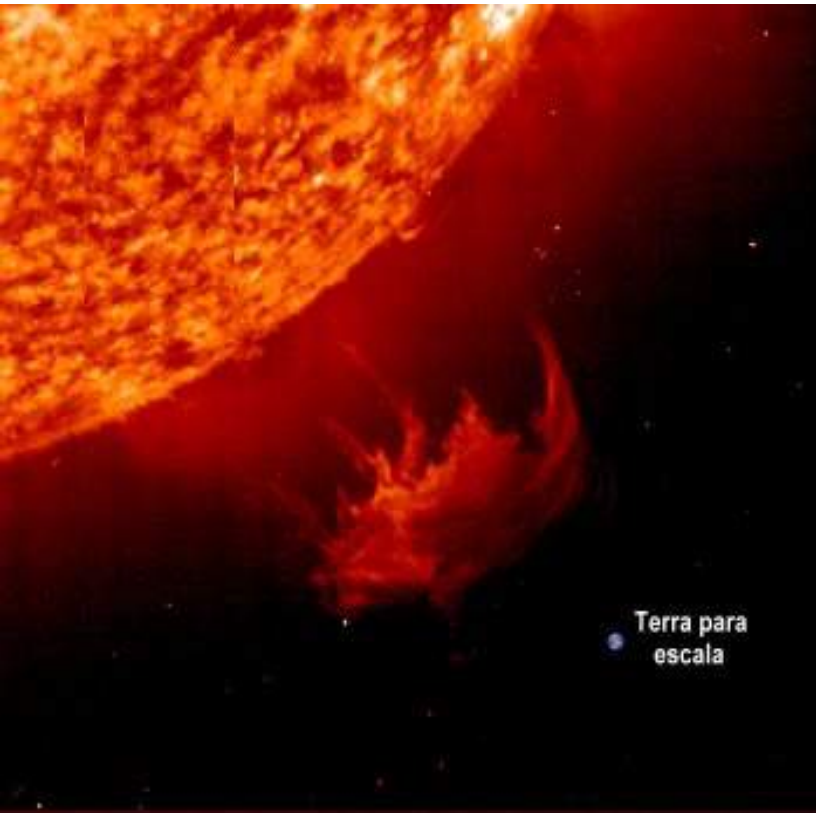


- (a) Linhas magnéticas de polaridades opostas,
- (b) sob circunstâncias favoráveis, podem se recombinar em ciclos opostos,
- (c) liberando instantaneamente energia aprisionada no tubo magnético.

Ejeção de Massa Coronal - CME

do inglês: *Coronal Mass Ejections*

Gigantescas explosões na forma de bolhas, que abandonam o Sol a altas velocidades.



Geralmente acontecem independentemente, mas às vezes estão associados aos flares solares e protuberâncias.

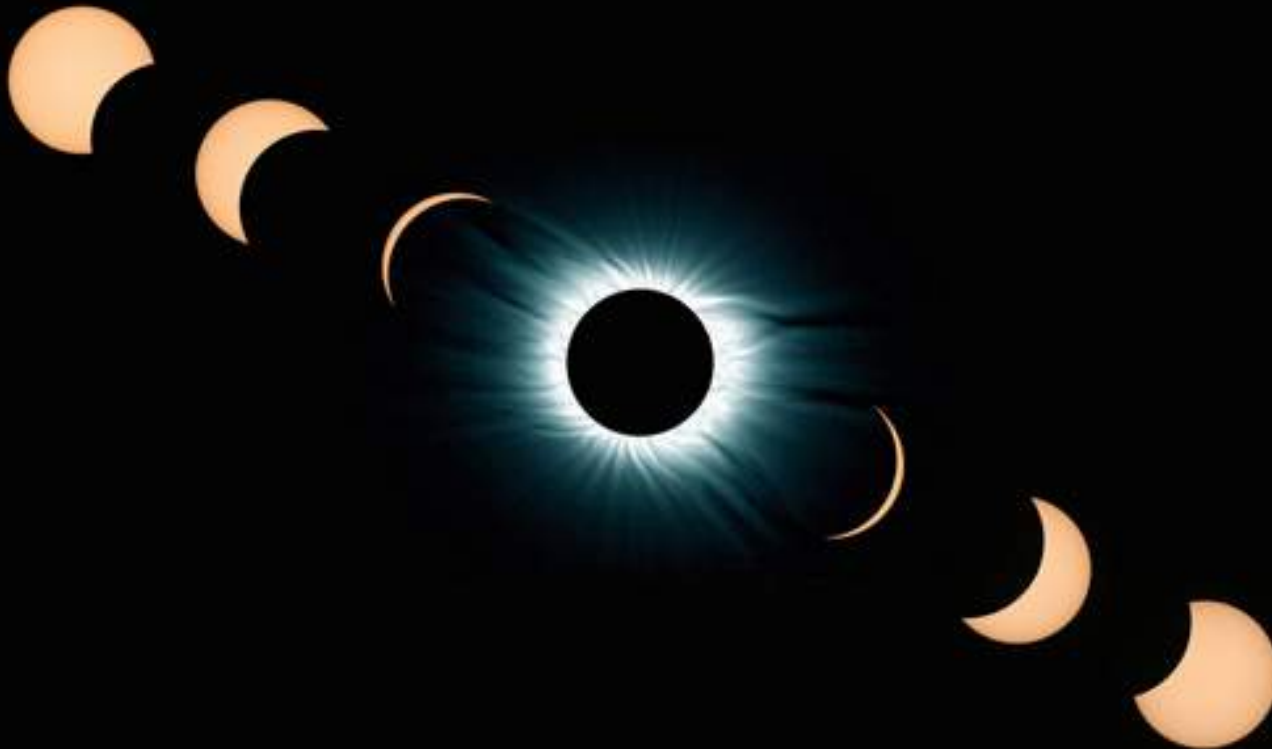
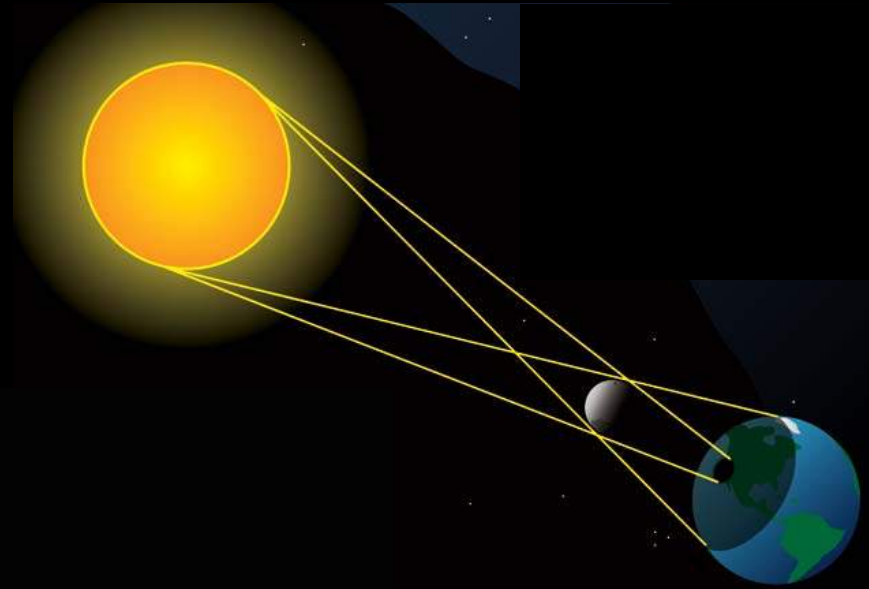
A ocorrência das CMEs varia com o ciclo de manchas solares:

- No mínimo solar, observa-se ≈ 1 CME por semana.
- Próximo do máximo solar, observa-se uma média de 2 a 3 delas por dia.

Imagem do satélite SOHO: SOLar and Heliospheric Observatory
CME em 14 de setembro de 1999

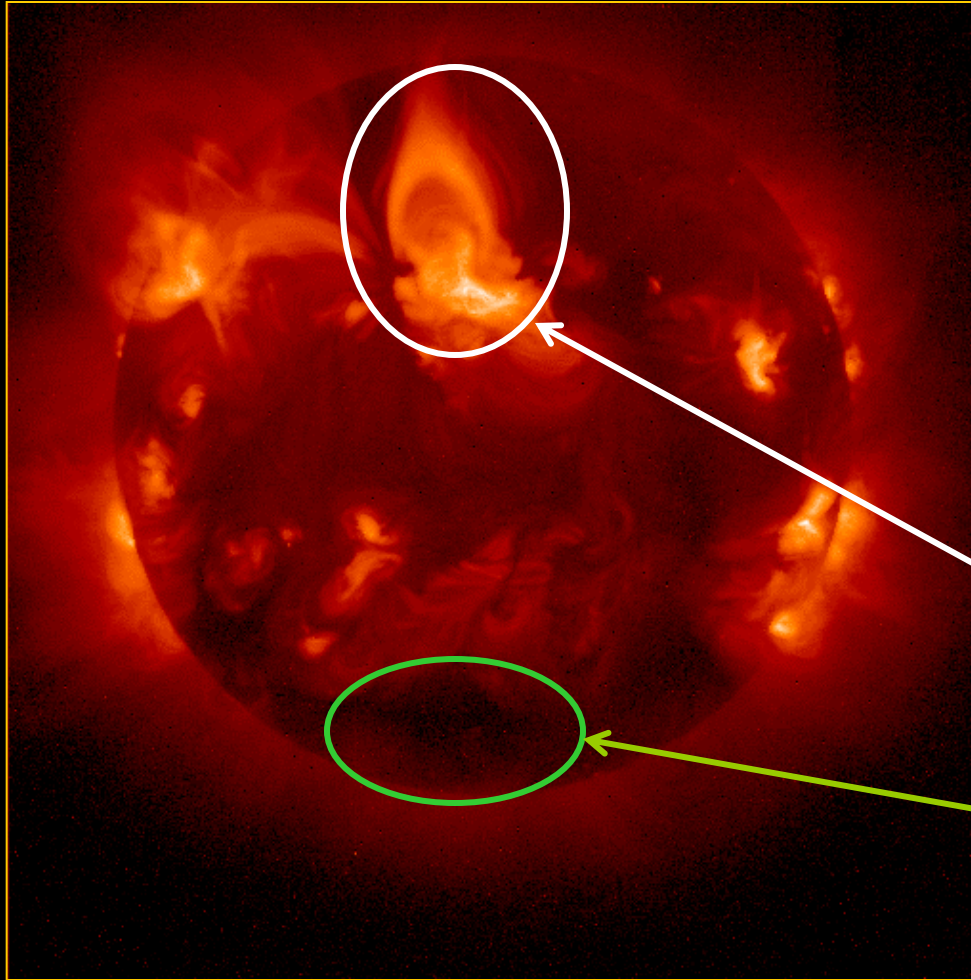
Coroa: a alta atmosfera

Sol, lua e Terra alinhados



Alta atmosfera:
visível a olho nu
apenas durante os
eclipses totais

Coroa em raio-X



Regiões de campo magnético fechado, por onde a matéria quente circula

Buracos coronais, regiões de campo magnético aberto; a matéria flui para o espaço interplanetário

Estas regiões giram com a rotação típica da latitude solar em que se encontram. As temperaturas locais podem ultrapassar 2.000.000 K.

Arcos coronais

(uma configuração instantânea)

**Caberiam 30 Terras no
meio do arco.**

**Uma visão detalhada
revela uma configuração
complexa e diversificada,
e mostra que eles são formados
por inúmeros arcos mais finos.**



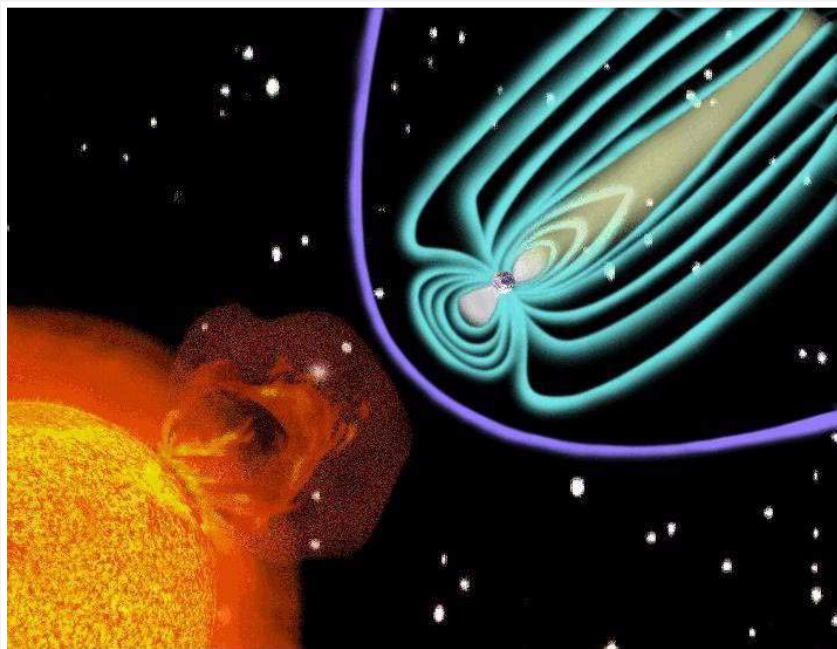
Vento Solar

- O vento solar emana do Sol em todas as direções.
- O vento carrega 1 milhão de toneladas de matéria por segundo (prótons, núcleos de Hélio e elétrons).
- A velocidade varia entre 300 a 800 km/s.

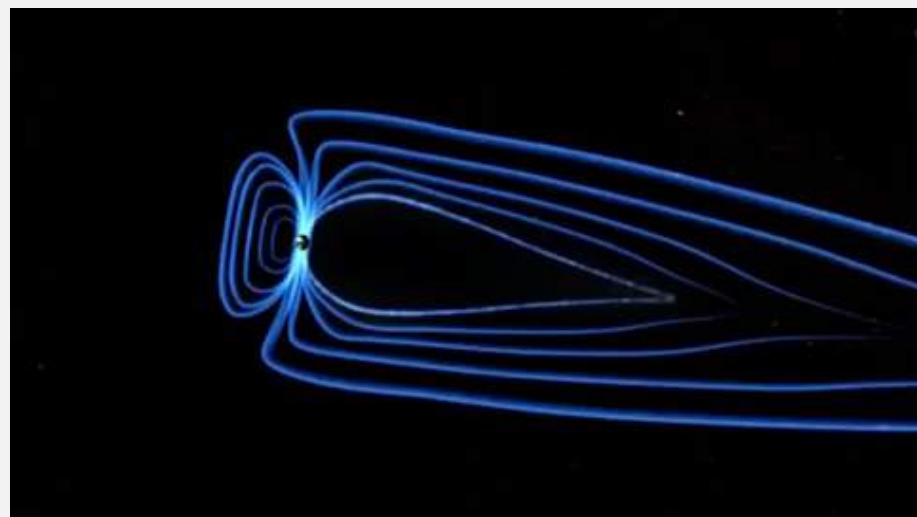


Coroa solar e vento solar (créditos: NASA's Goddard Space Flight Center/Lisa Poje)

Vento Solar

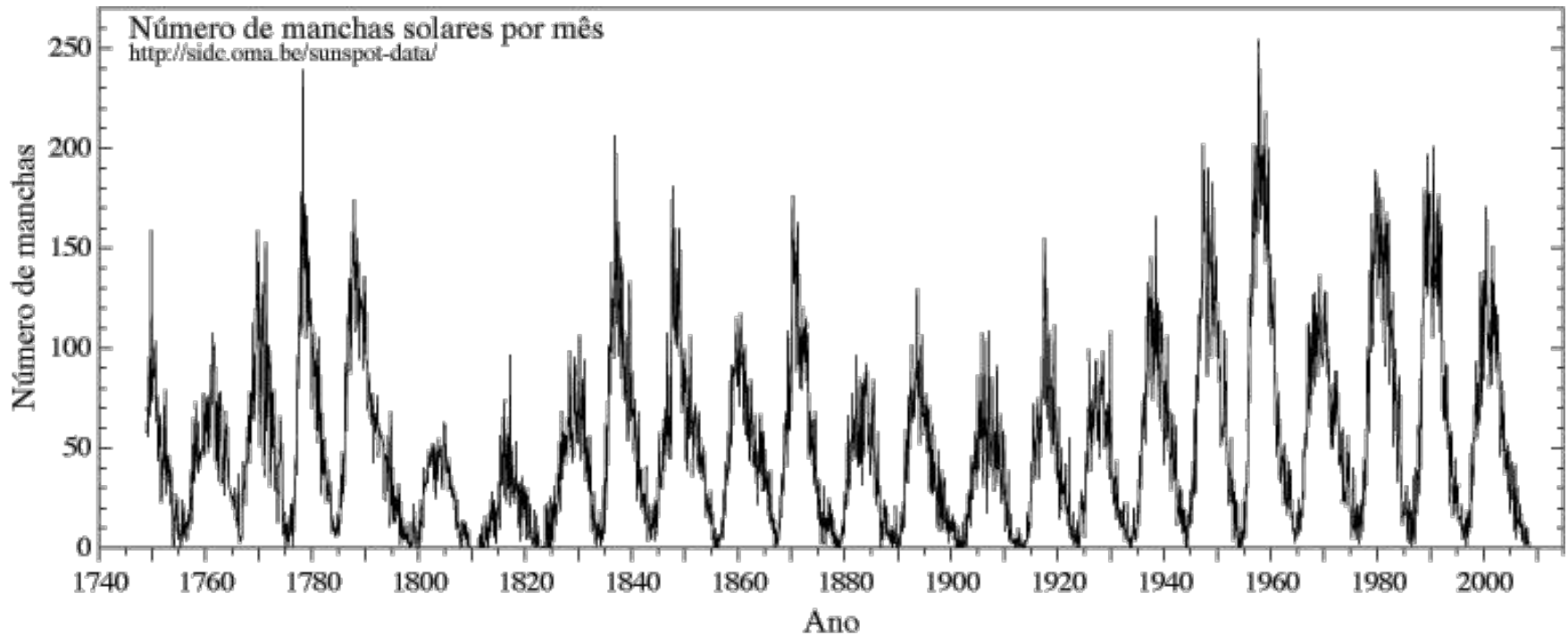


Fluxo de prótons ($\sim 96\%$), núcleos de hélio ($\sim 4\%$) e resquícios de núcleos de elementos mais pesados proveniente do Sol.



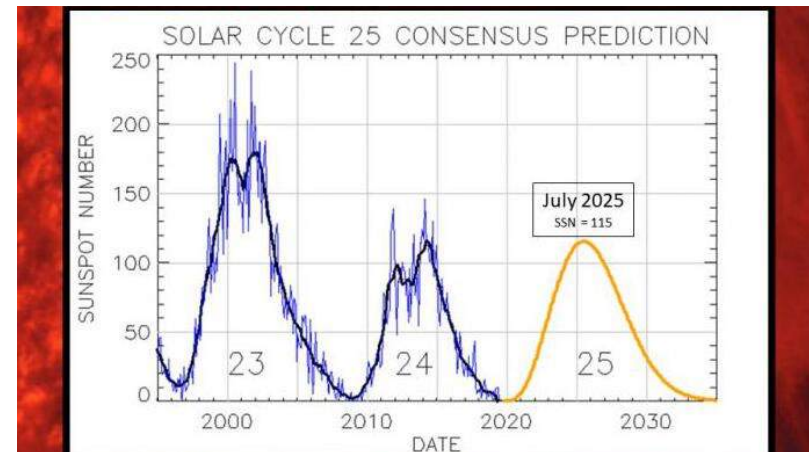
As partículas eletricamente carregadas da magnetosfera interagem com o **vento solar**, escoam em direção dos polos, chocam-se com a atmosfera e excitam o gás atmosférico. Ao retornar ao estado normal o gás emite luz produzindo as **auroras polares**.

O Ciclo das Manchas Solares (Atividade Solar)



O número de manchas solares varia entre máximos e mínimos com um intervalo médio de 11 anos.

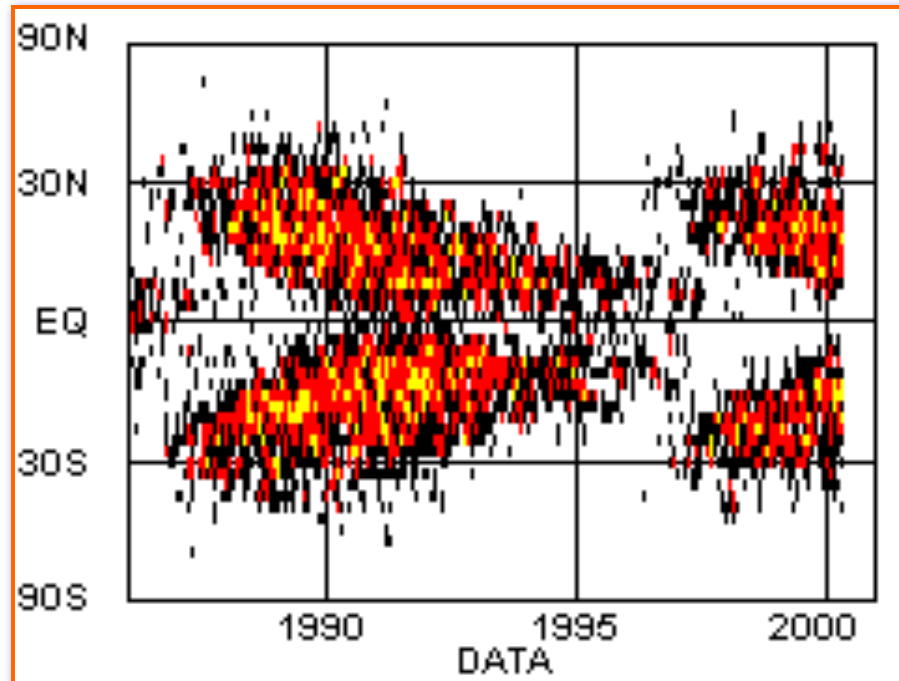
Descoberto em 1843 pelo astrônomo alemão Samuel Heinrich Schwabe.



Créditos: NOAA/NASA

O Ciclo das Manchas Solares (Atividade Solar)

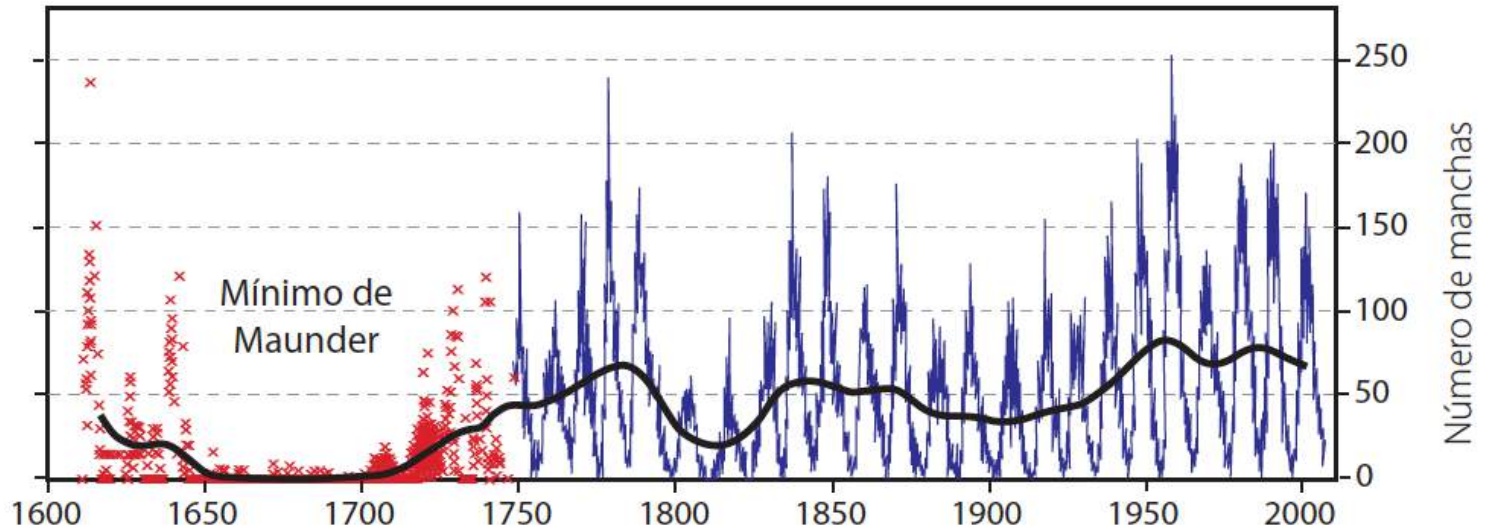
Diagrama da borboleta



A quantidade de manchas aumenta com a atividade solar. As manchas são escassas na fase de mínima atividade e aparecem próximas às latitudes 35° norte e sul. Com a evolução do ciclo, a quantidade aumenta e elas surgem em latitudes menores, até o pico de máxima atividade. A partir daí, elas desaparecem gradativamente e começam a surgir novamente próximas às latitudes 35° .

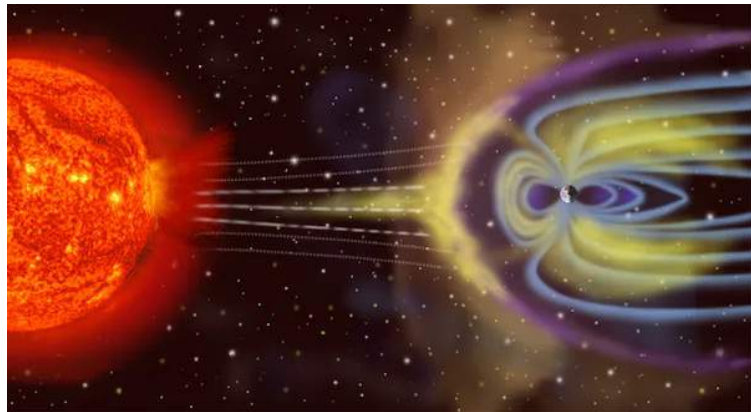
Mínimo de Maunder

Período de 70 anos (1645 a 1715), o Sol esteve em atividade mínima, praticamente sem manchas.



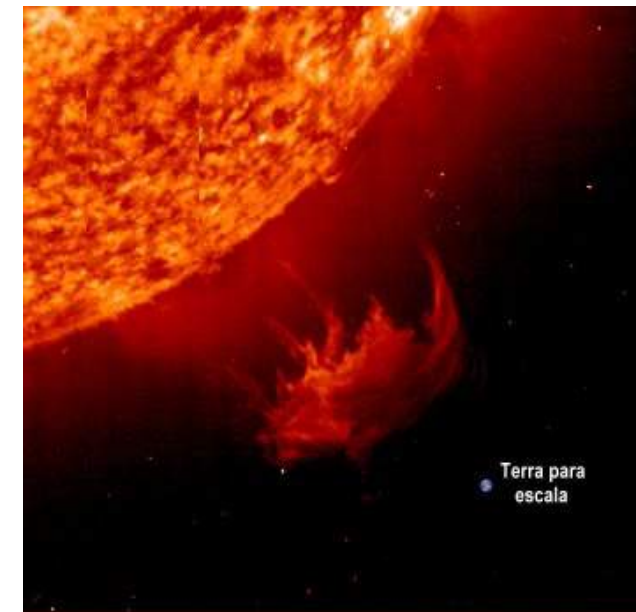
O clima da Terra pode ter sido afetado por esse fenômeno.

Clima Espacial



A ejeção de energia e radiação e partículas do Sol pode causar sérios danos a:

- Astronautas no espaço
- Satélites artificiais terrestres
- Passageiros e tripulação em voos de alta altitude
- Criar apagões na Terra quando eles causarem surtos nas redes elétricas.



Monitorar o clima espacial: várias missões entre elas

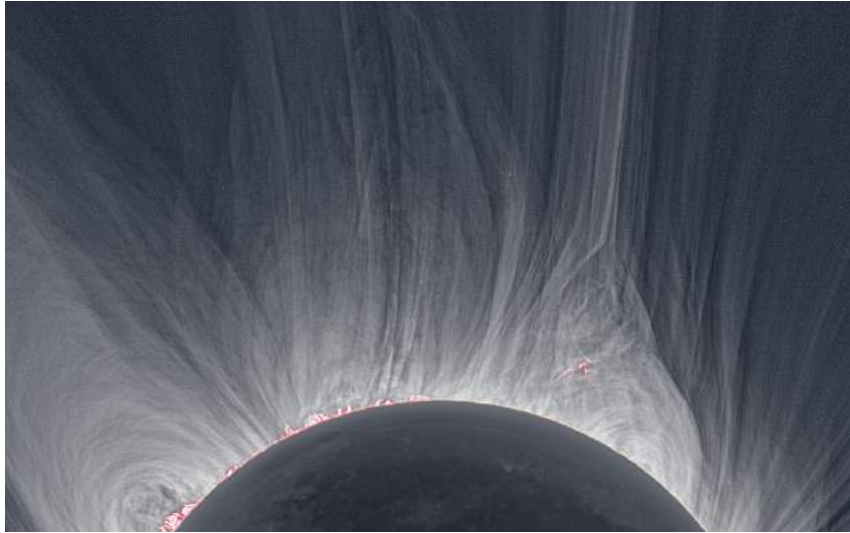
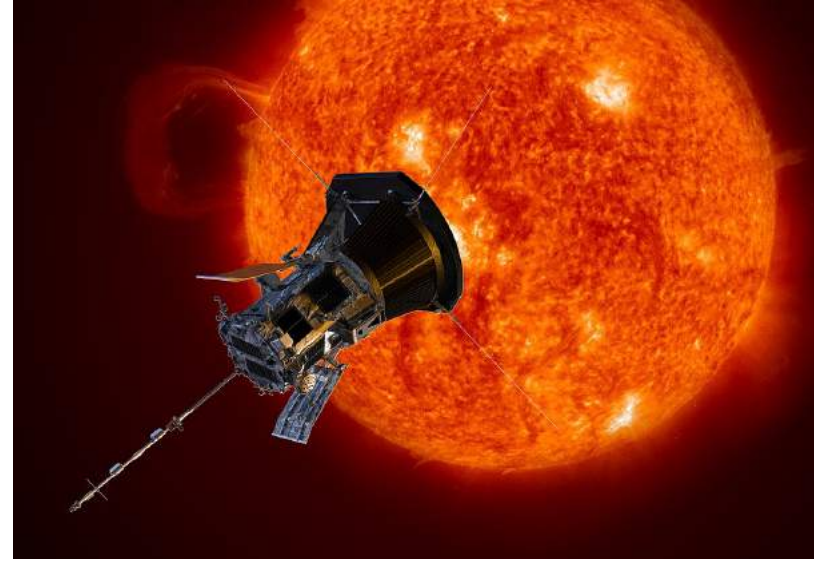
- GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite da NOAA/NASA)

SOHO (SOlar and Heliospheric Observatory da ESA/NASA)

Sonda Solar Parker

Nome em homenagem ao astrofísico Eugene Parker (1927 - 2022) pioneiro no estudo do vento solar.

By NASA/Johns Hopkins APL/Steve Gribben
<http://parkersolarprobe.jhuapl.edu/Multimedia/Images.php>, Public Domain,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=69306218>



Lançamento: 12 de agosto de 2018.

Entre agosto de 2018 e agosto de 2025 serão 24 translações ao redor do Sol.

Desafios:

Chegar a $8,8 R_{\odot}$ de distância da fotosfera.

Resistir às altas temperaturas.

Objetivos:

Determinar a estrutura e a dinâmica do campo magnético coronal do Sol.

Entender como a coroa solar e o vento são aquecidos e acelerados.

Obrigada!