

Estrutura Solar

Vitor Ferrari



DFI | UEM

Departamento de Física

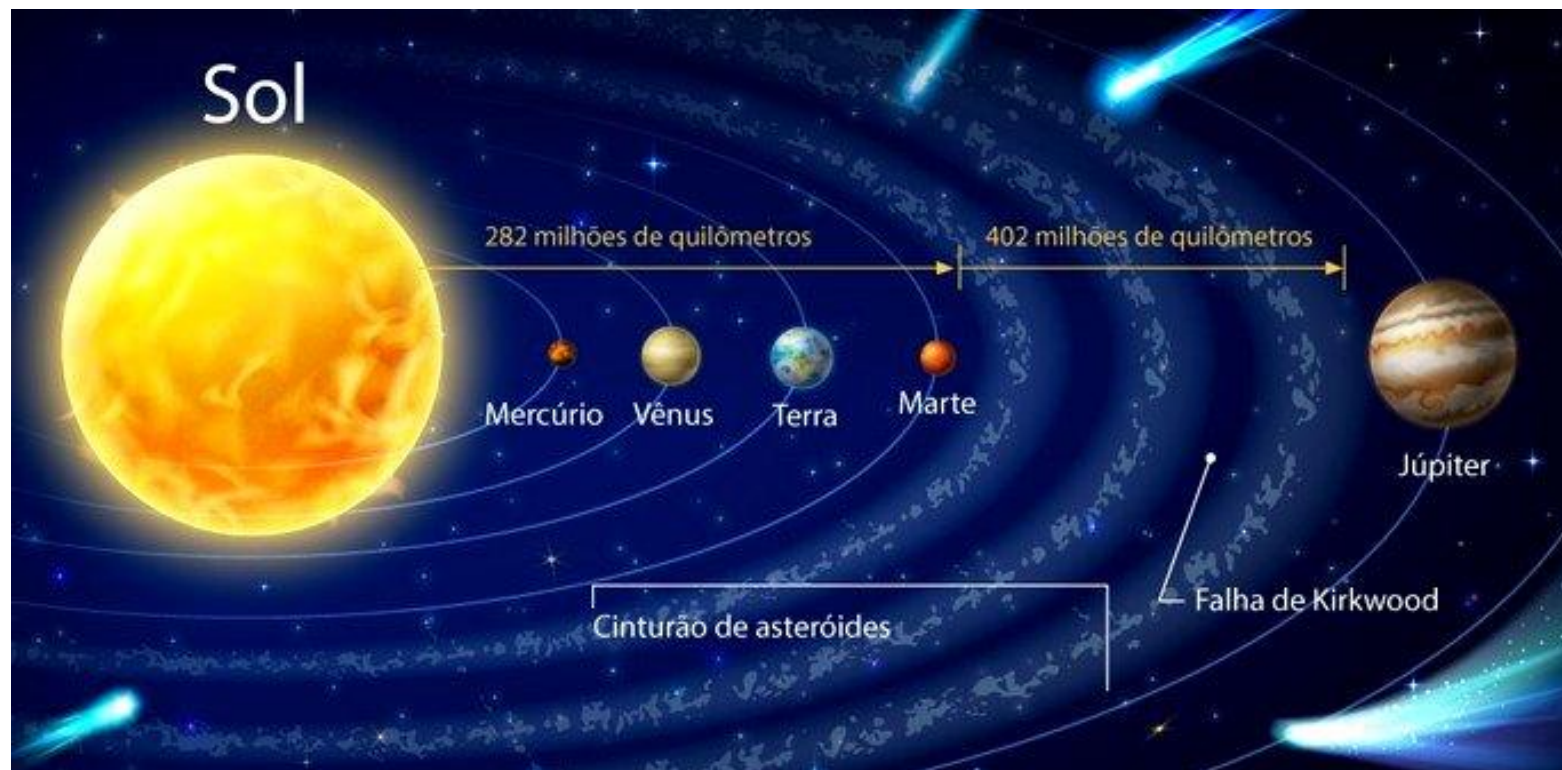


Introdução

O Sol é uma estrela, uma esfera de plasma quente e luminosa, que está localizada no centro do nosso sistema solar, cerca de 149,6 milhões de quilômetros da Terra, em média.

- Ele é uma das centenas de bilhões de estrelas na Via Láctea, nossa galáxia, e é responsável por manter todos os planetas do sistema solar em órbita por meio de sua gravidade.

Localização do Sol



Importância do Sol

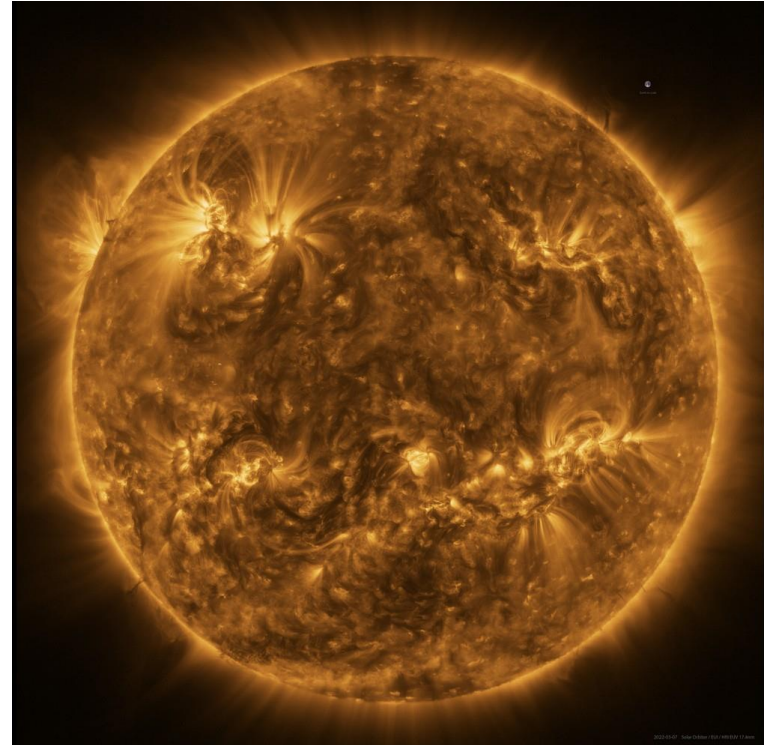
O Sol é essencial para a existência e sustentação da vida na Terra. Sua luz e calor são fundamentais para:

- O clima;
- O ciclo da água;
- O desenvolvimento das plantas através da fotossíntese.

A energia não pode ser nem criada nem destruída apenas transformada/transferida de uma forma em outra, ou seja, a quantidade de energia total permanece constante

Características Gerais

A composição química do Sol é principalmente composta de hidrogênio (cerca de 74% de sua massa) e hélio (cerca de 24% de sua massa), com pequenas quantidades de elementos mais pesados, como oxigênio, carbono, nitrogênio e metais.

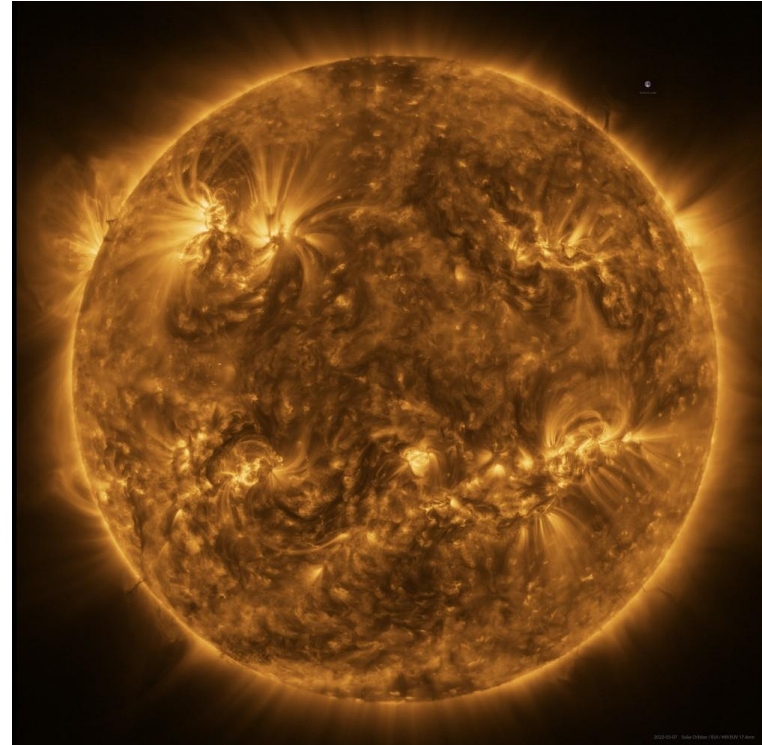


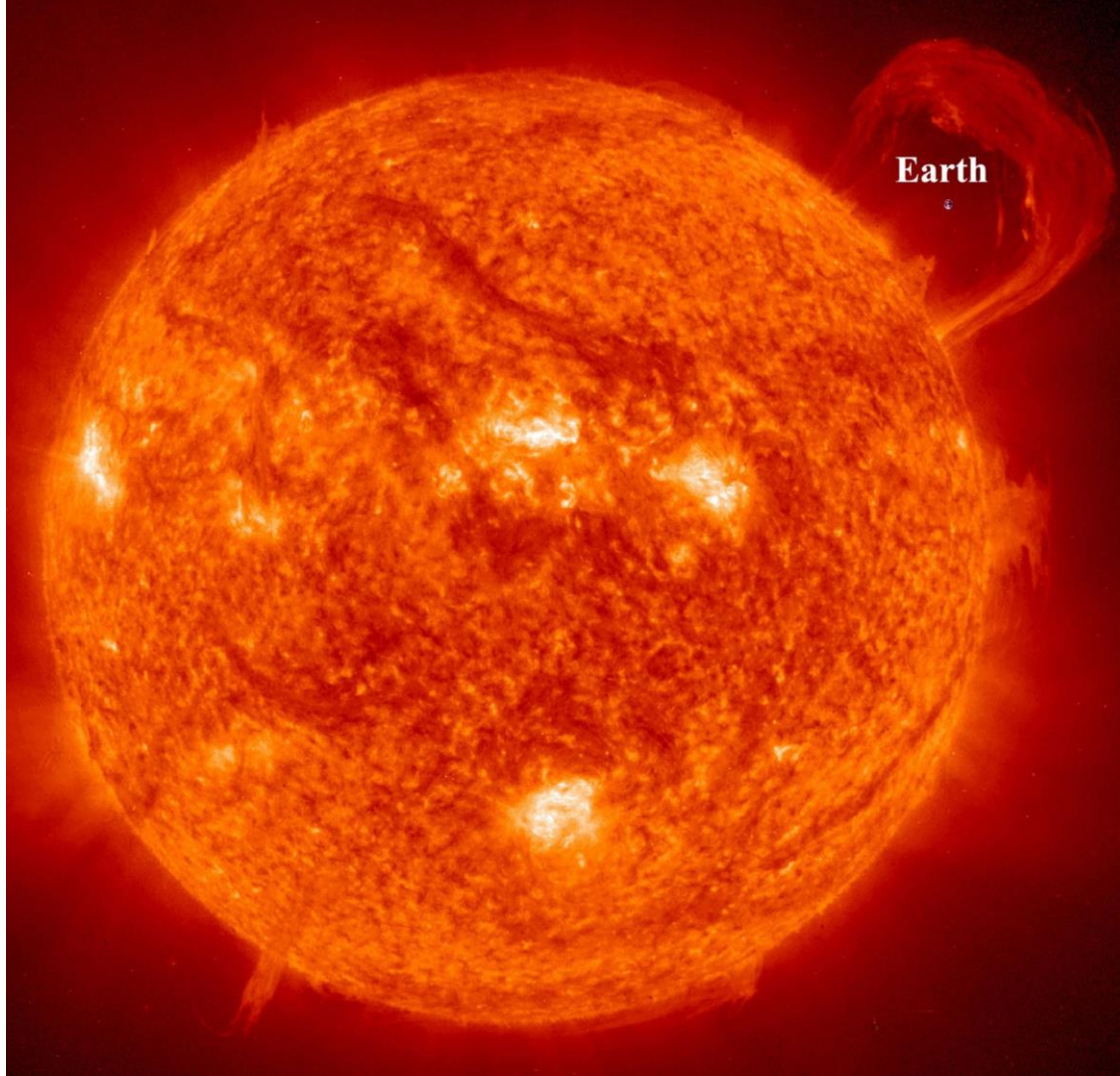
Características Gerais

Raio	$\sim 696.340 \text{ km}$ ($109 R_{\oplus}$)
Massa	$\sim 1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$ ($333.000 M_{\oplus}$)
Temperatura (Superfície)	$\sim 5.500 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Temperatura (Núcleo)	$\sim 15 \times 10^6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (milhões)
Período de Rotação	25 dias terrestres (equador), 34 dias terrestres (polos)
Idade	$\sim 4,6 \times 10^9$ anos (bilhões)
Gravidade	$\sim 274 \text{ m/s}^2$ (28 vezes a gravidade da Terra)
Distância Média	$\sim 149,6 \times 10^6 \text{ km}$ (1 Unidade Astronômica - UA)

Características Gerais

- O Sol é tão grande que caberiam dentro dele 1,3 milhão de planetas do tamanho da Terra.
- Ele não possui uma superfície sólida.
- A massa do Sol corresponde a 99,8% da massa do nosso sistema solar.





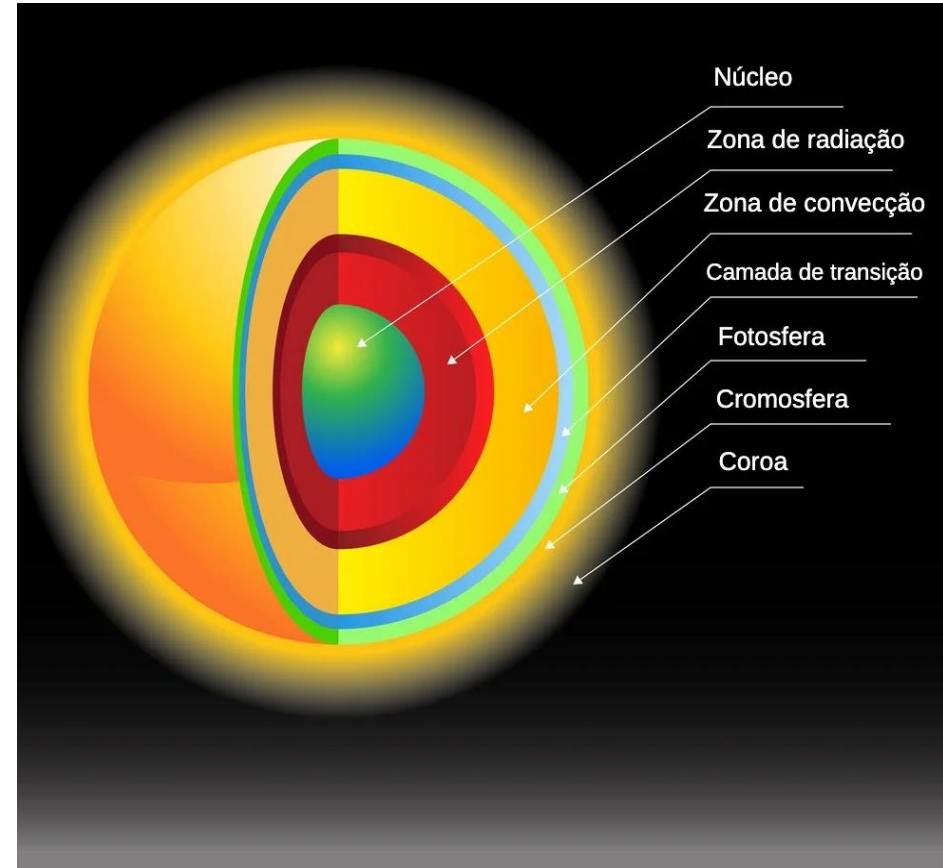
Ciclo de Vida do Sol



Estrutura Interna do Sol

Estrutura Interna do Sol

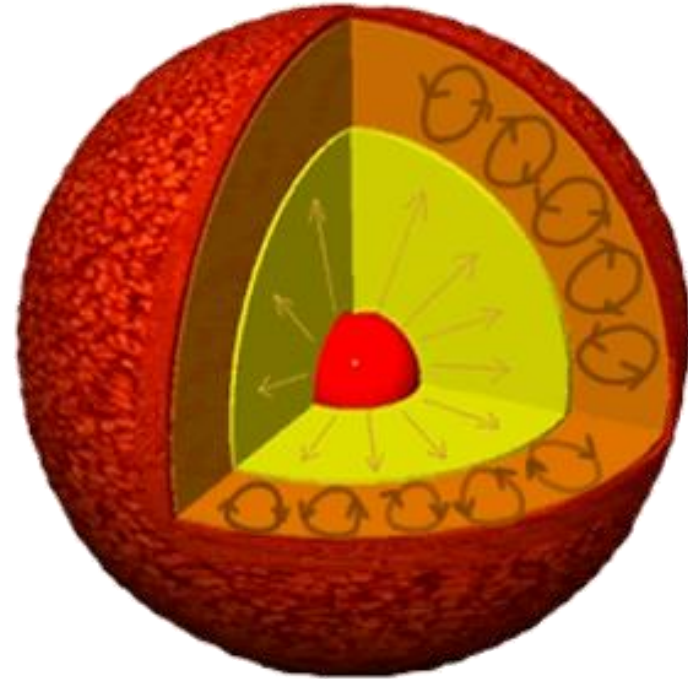
O Sol é composto por várias camadas distintas, cada uma com suas próprias características e propriedades.



Estrutura Interna do Sol

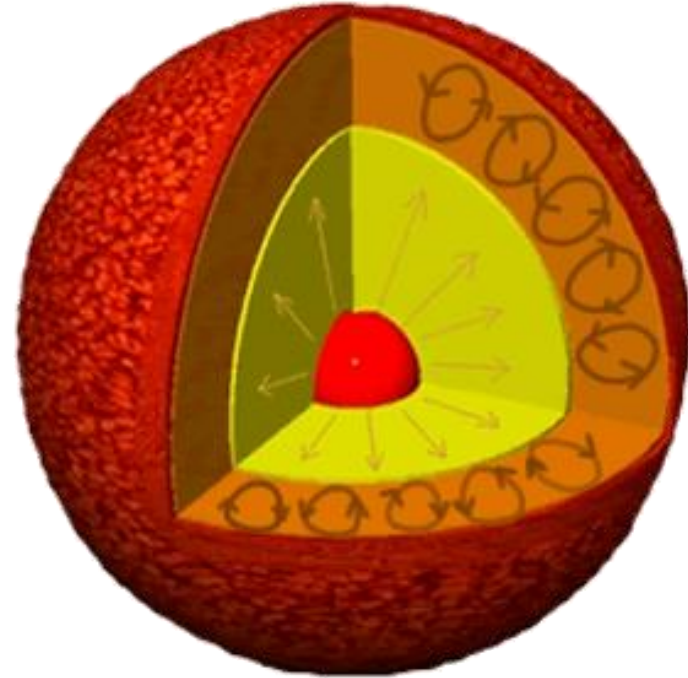
Núcleo: O núcleo solar é a região central onde ocorrem as reações nucleares que fornecem a energia do Sol.

- Temperaturas extremamente altas ($15.000.000^{\circ}\text{C}$) e pressões gigantescas são encontradas nessa região, permitindo a fusão nuclear do hidrogênio em hélio.



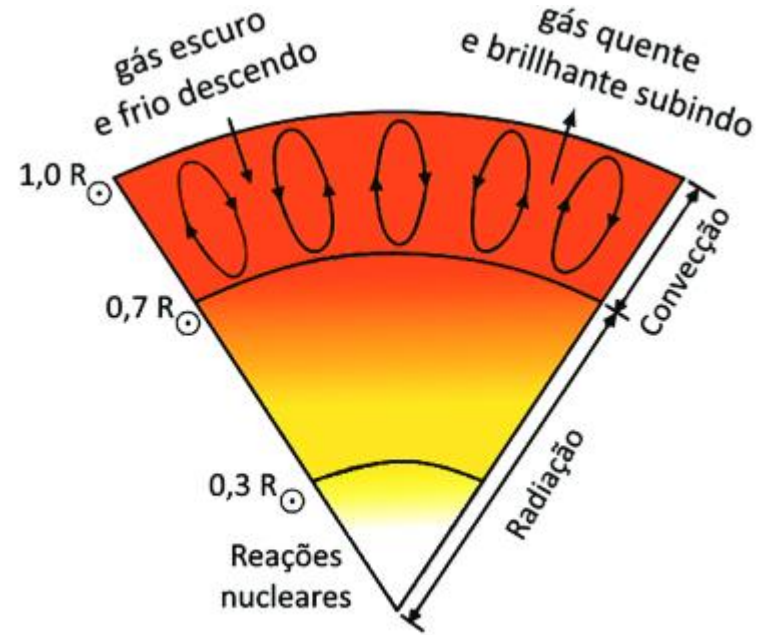
Estrutura Interna do Sol

Zona Radiativa: Nesta zona, a energia gerada no núcleo é transportada para a superfície do Sol principalmente através de radiação eletromagnética, em forma de partículas que viajam lentamente através do plasma solar.

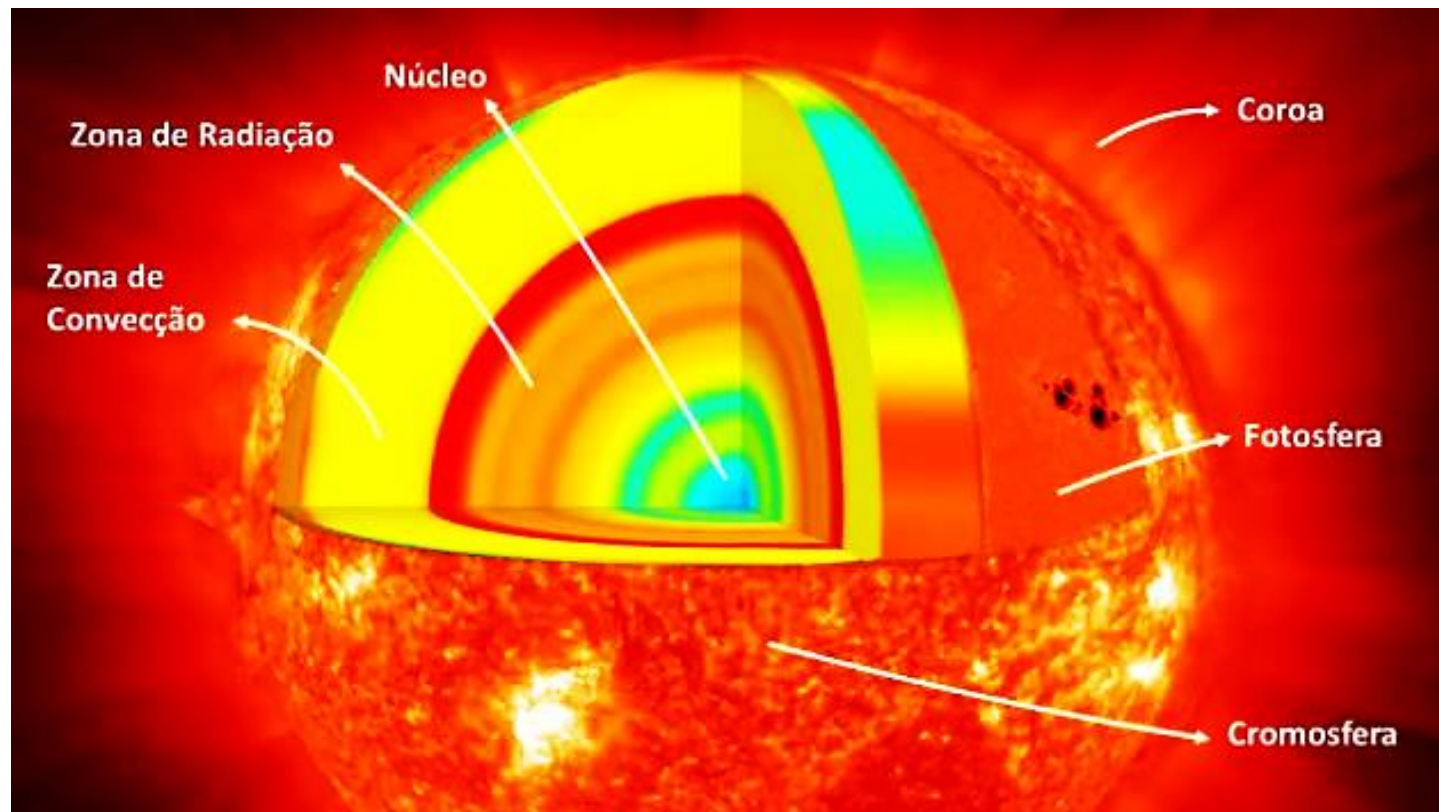


Estrutura Interna do Sol

Zona Convectiva: Nesta região, a energia é transportada por correntes de convecção, onde material quente sobe para a superfície do Sol, libera sua energia e resfria, antes de cair novamente em direção ao núcleo.



Estrutura Solar



Estrutura Externa do Sol

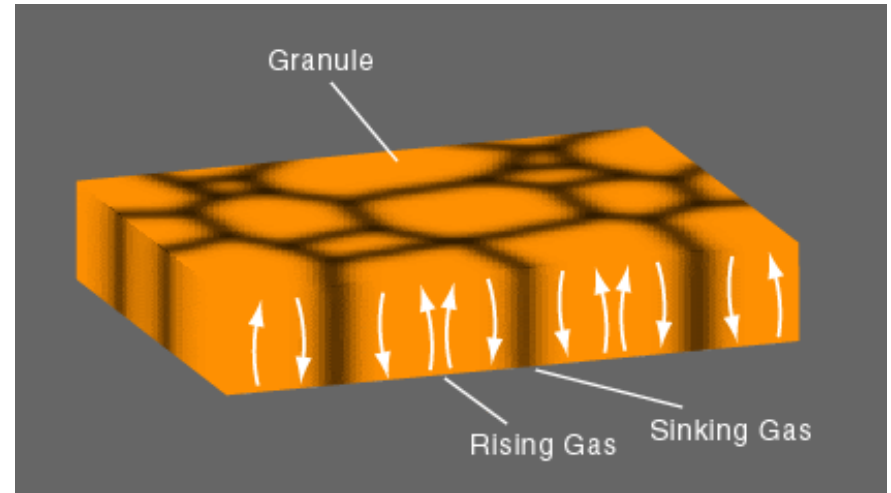
Superfície Solar – Fotosfera

A fotosfera é a camada mais externa do Sol e é a camada visível a partir da Terra.

- A temperatura média da fotosfera é de cerca de 5.500°C .
- Ela tem uma aparência granulada (líquido em ebulição) devido à convecção solar, conhecida como granulação, que são pequenas células convectivas que se formam devido ao movimento de plasma na superfície solar.

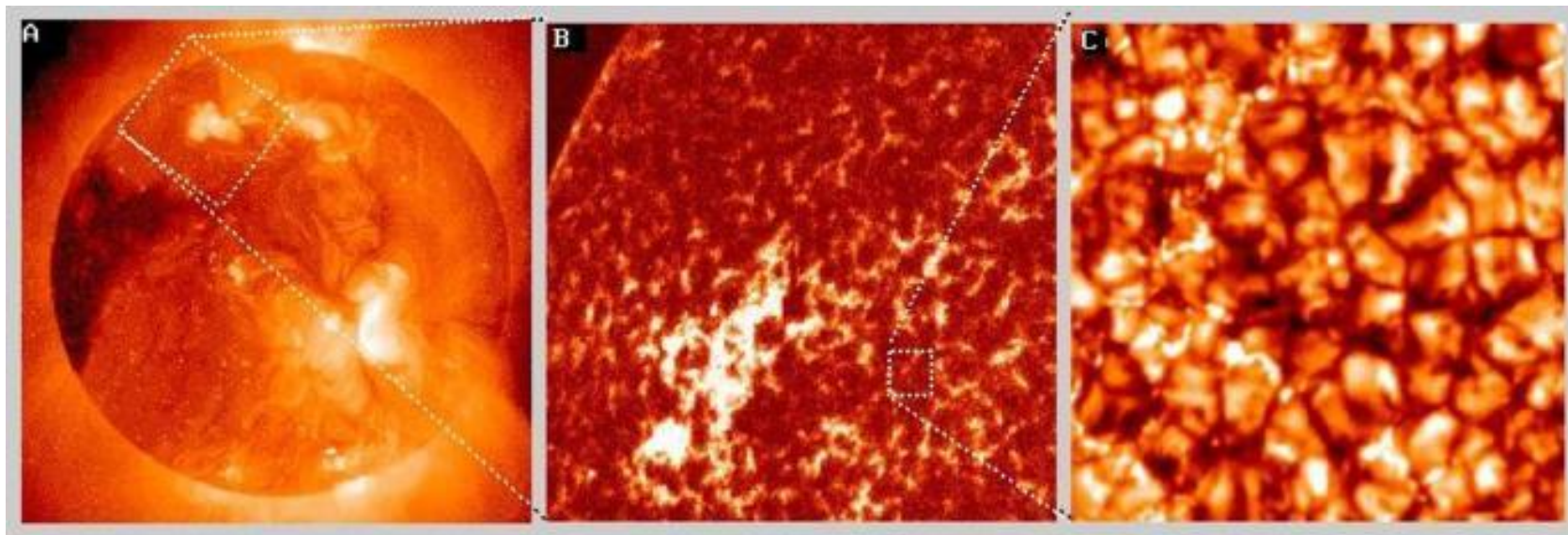
Superfície Solar – Fotosfera

Granulação: É um padrão celular observado na fotosfera, composto por regiões brilhantes (células de plasma quente em ascensão) cercadas por regiões escuras (células de plasma mais frio em queda).



Superfície Solar – Fotosfera

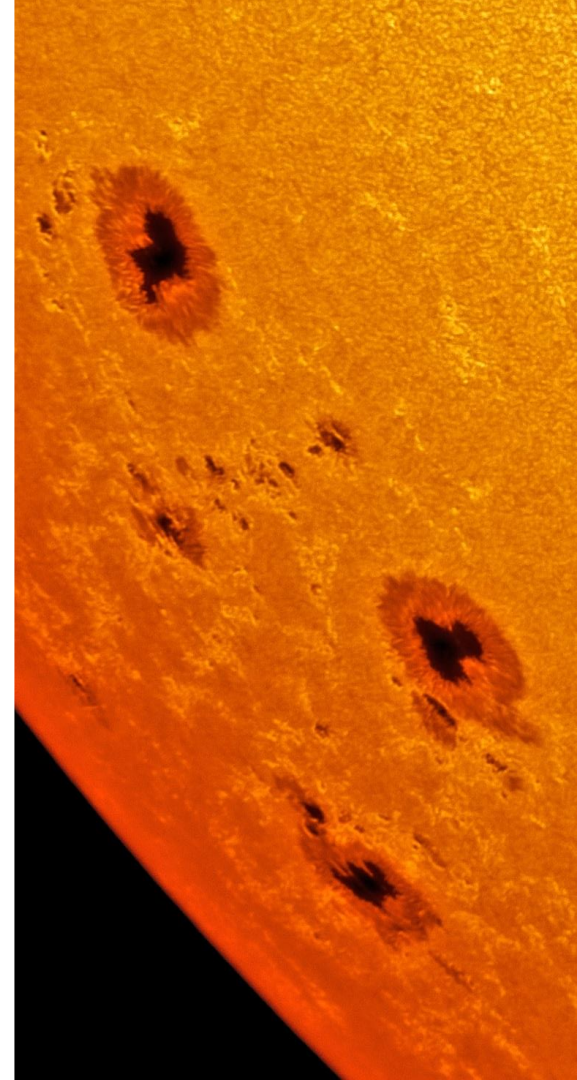
Granulação



Superfície Solar – Fotosfera

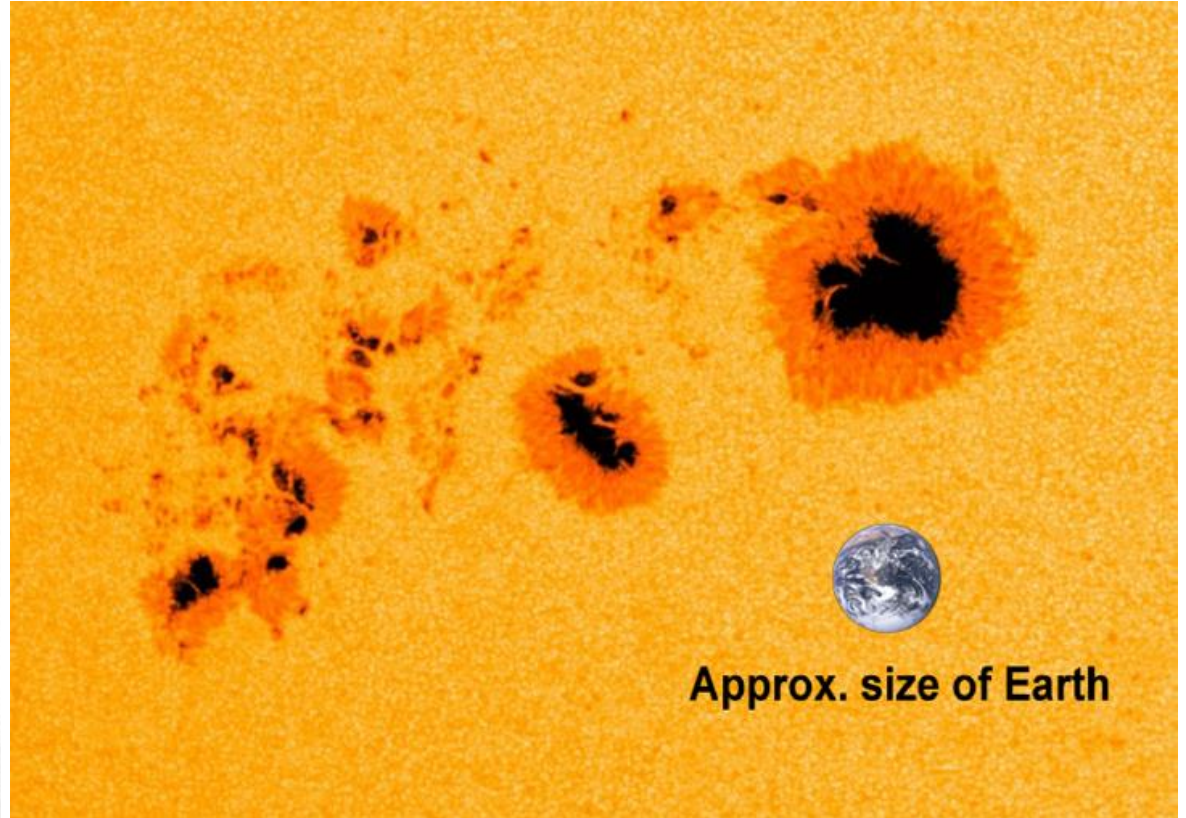
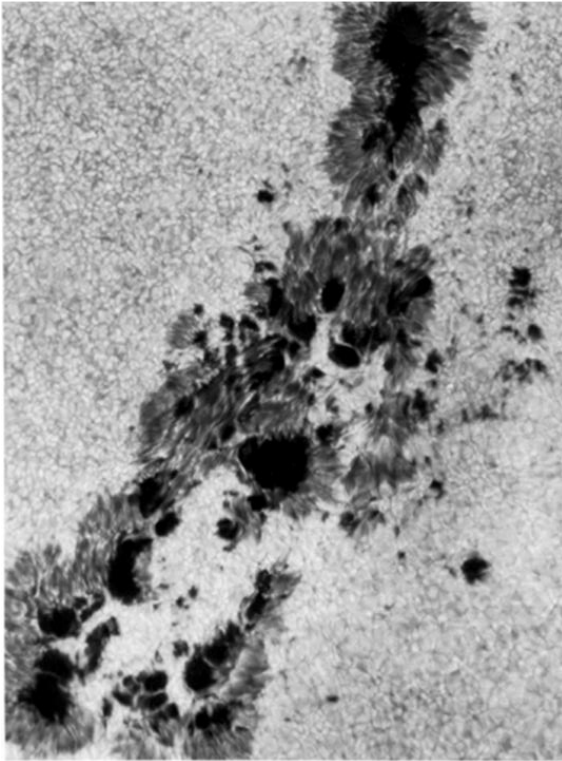
Manchas Solares: Outro fenômeno importante na fotosfera são as manchas solares, que são áreas mais escuras causadas por campos magnéticos intensos que inibem o transporte de calor.

- Algumas regiões registram campos 1000 vezes acima do normal.
- Elas podem durar de alguns dias a vários meses, dependendo de suas características magnéticas.



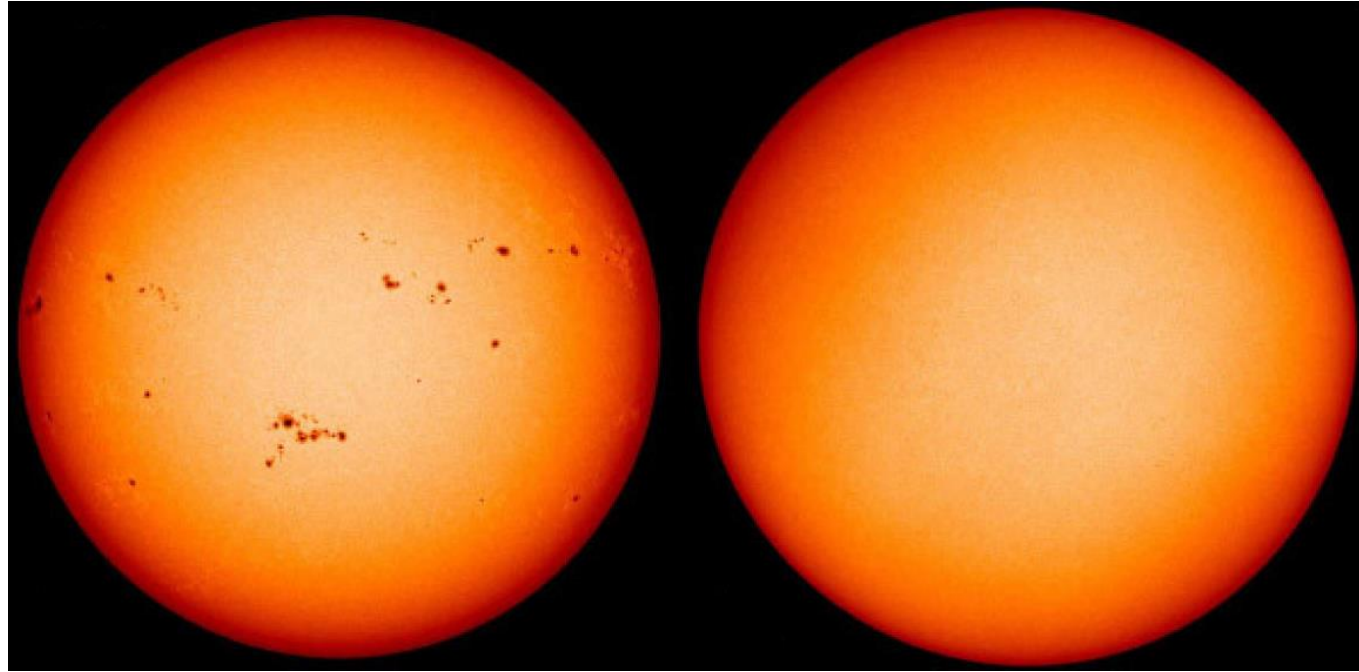
Superfície Solar – Fotosfera

Manchas Solares:



Superfície Solar – Fotosfera

Manchas Solares:



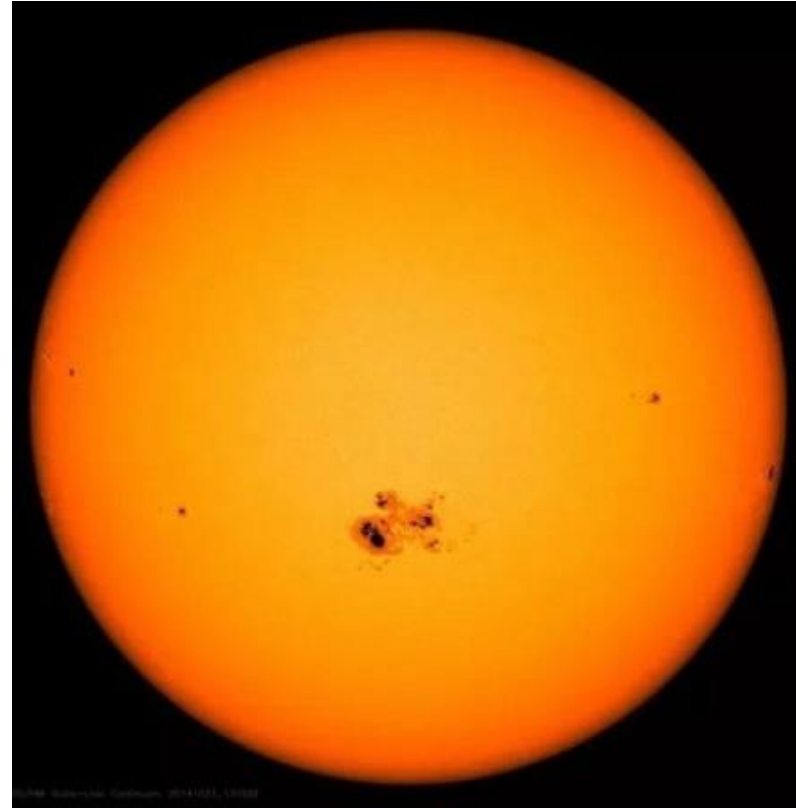
A quantidade e localização das manchas solares varia periodicamente. Nestas fotos podemos comparar um período de máximo (19/07/2000) e de mínimo (18/03/2009).

Superfície Solar – Fotosfera

Manchas Solares

As manchas solares geralmente aparecem em pares ou grupos e podem variar em tamanho, desde pequenas manchas até grandes complexos.

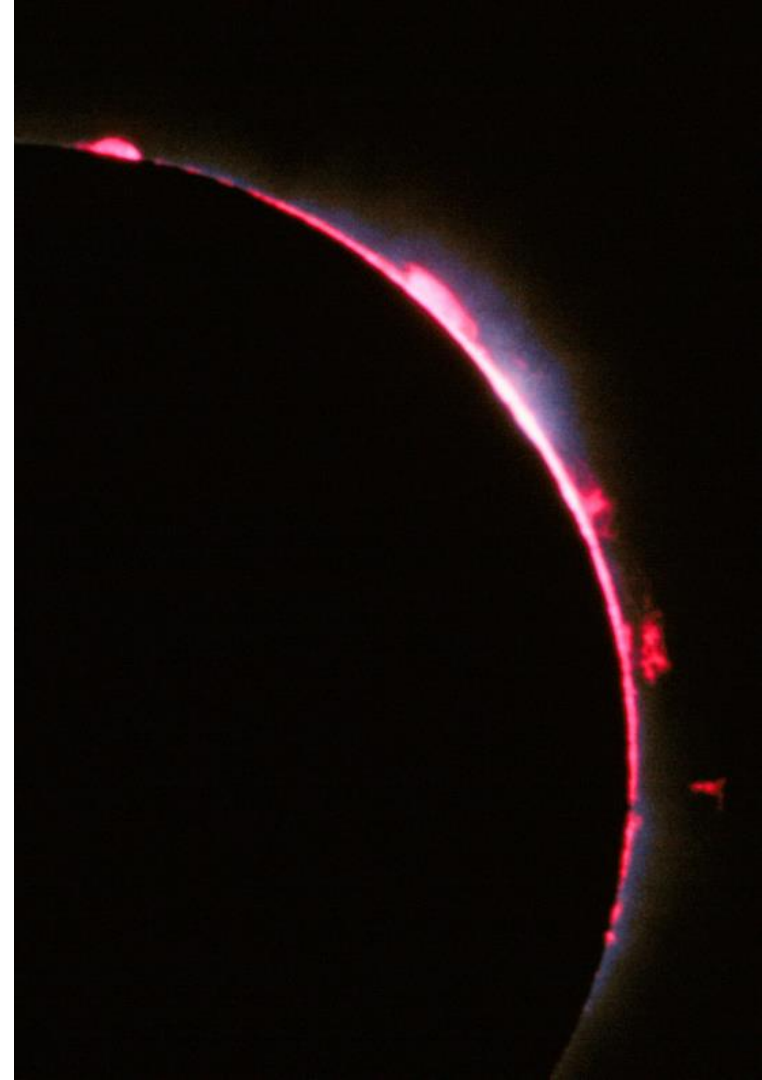
- Já foram registradas manchas de 50.000 *km* de diâmetro.



Estrutura Externa do Sol

Cromosfera: A cromosfera é a camada intermediária da atmosfera solar; localizada acima da fotosfera, é uma região de transição entre a fotosfera e a coroa solar.

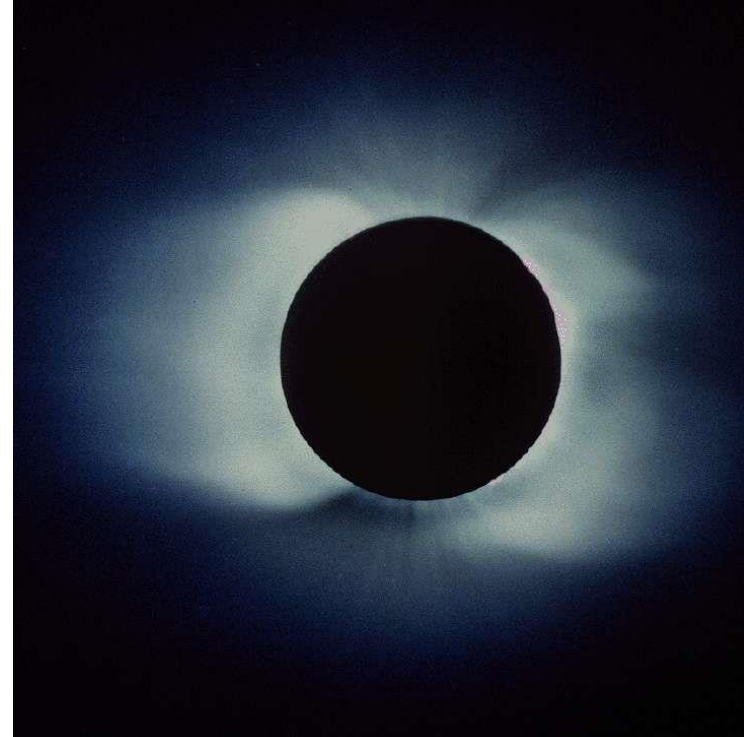
- Geralmente não é visível porque sua radiação é muito mais fraca do que a fotosfera.
- Tem cerca de 10.000 *km* de espessura.



Estrutura Externa do Sol

Coroa: A coroa é a camada mais externa e mais tênue da atmosfera solar. Ela se estende por milhões de quilômetros no espaço.

- A coroa é melhor observada durante um eclipse solar total.



Características das Camadas do Sol

REGIÃO	ESPESSURA (km)	DENSIDADE (g/cm ⁻³)	TEMPERATURA (K)
Interior			
Núcleo	$\sim 2 \times 10^5$	~ 150	150.000.000
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	$< 2.0 \times 10^{-17}$	$> 1.000.000$

Fenômenos da Atmosfera Solar

Ejeção de Massa Coronal (EMCs)

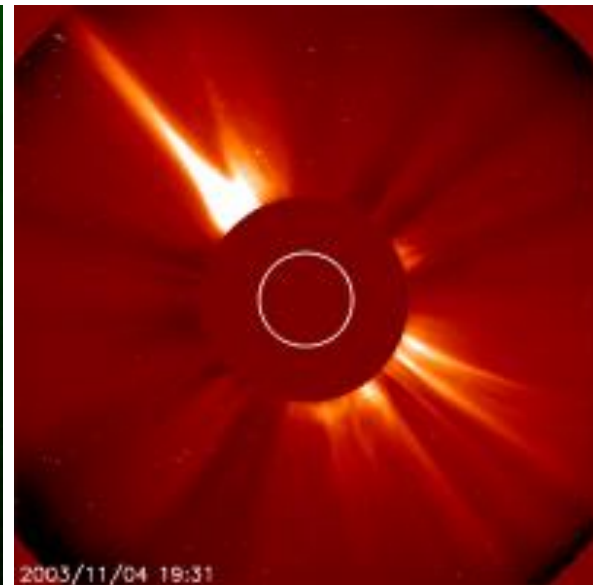
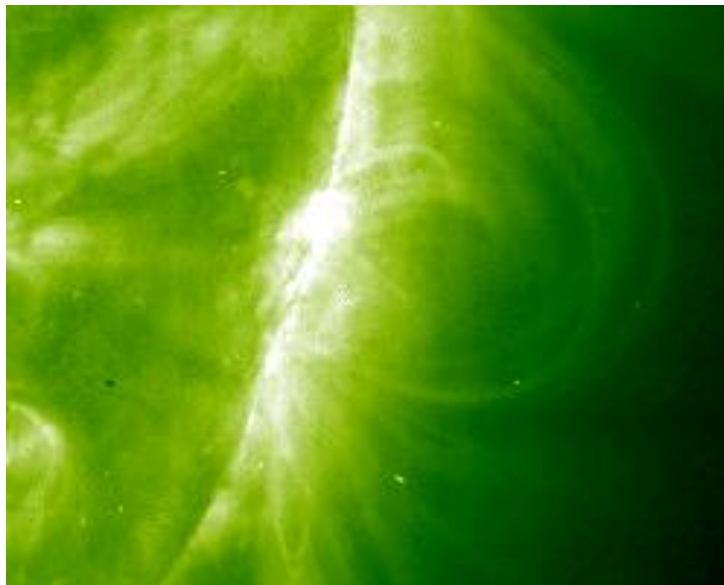
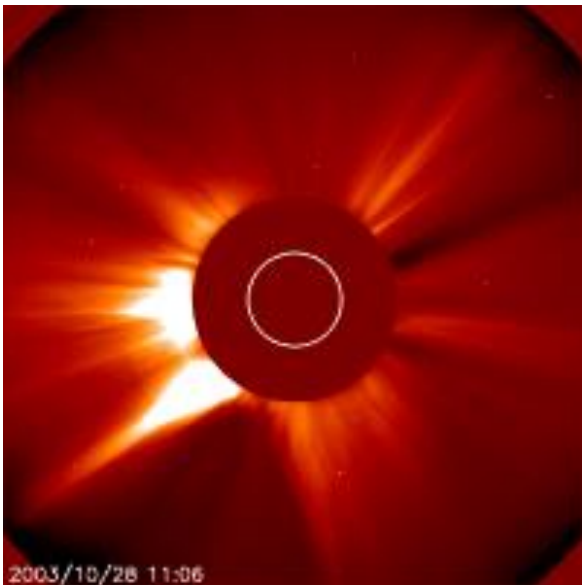
São erupções violentas na coroa solar, onde grandes quantidades de massa coronal são lançadas para o espaço.

Massa Coronal – É simplesmente um pedaço do Sol, ou seja, uma nuvem de gás ionizado que é ejetada em altas velocidades.

Essas EMCs podem ter efeitos significativos no clima espacial da Terra, causando tempestades geomagnéticas.



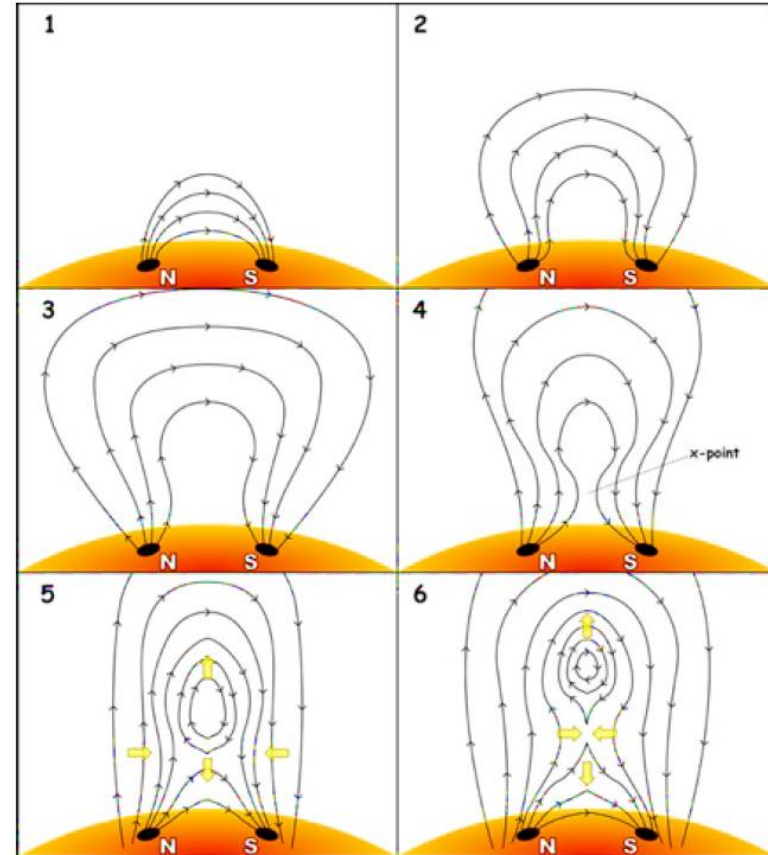
Ejeção de Massa Coronal (EMCs)



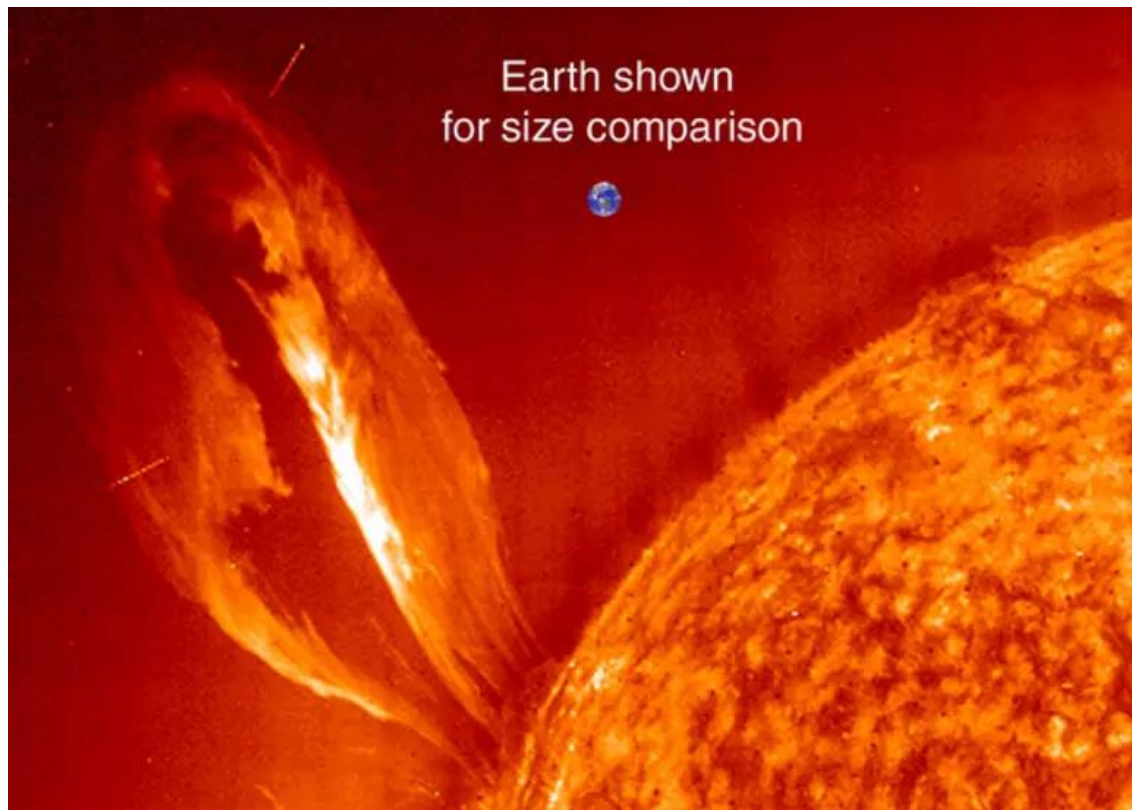
Explosão Solar

Normalmente, as linhas do campo magnético do Sol se conectam de maneira estável entre os polos norte e sul, formando arcos que armazenam energia. No entanto, quando essas linhas se tornam excessivamente tensionadas e torcidas, elas podem se romper subitamente.

- Esse rompimento libera grandes quantidades de radiação e partículas carregadas no espaço.

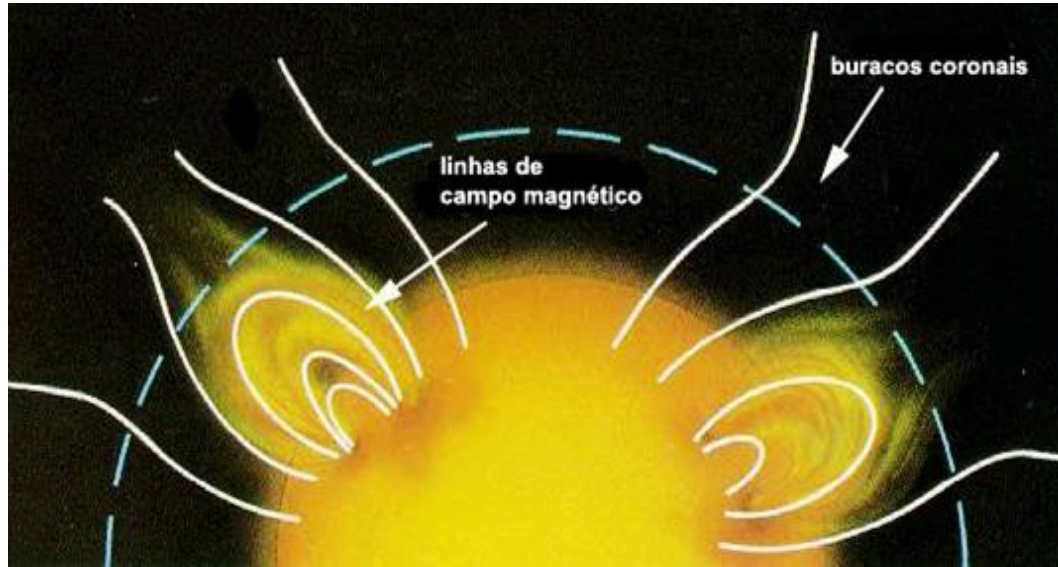


Ejeção de Massa Coronal (EMCs)



Buracos Coronais

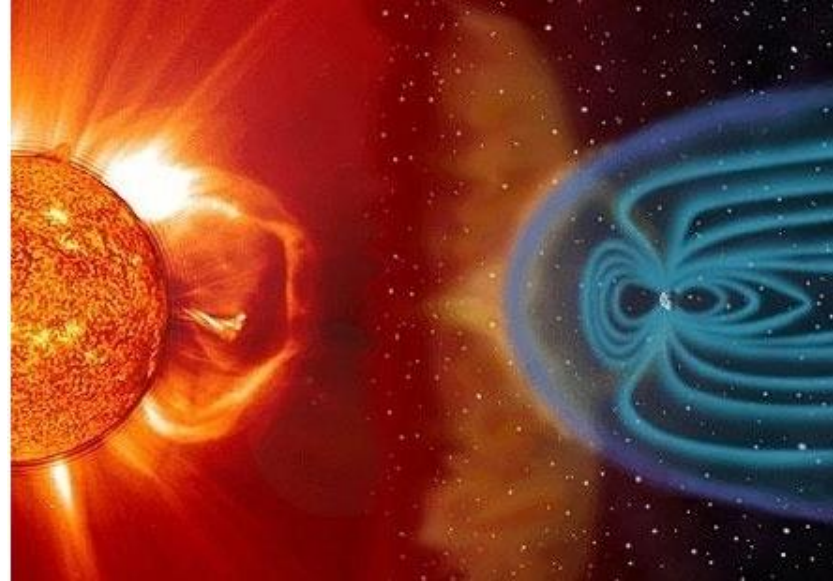
Buracos coronais são regiões na coroa solar, em que o campo magnético se estende para o espaço em vez de se curvar de volta à superfície do Sol, surge como resultado das explosões solares.



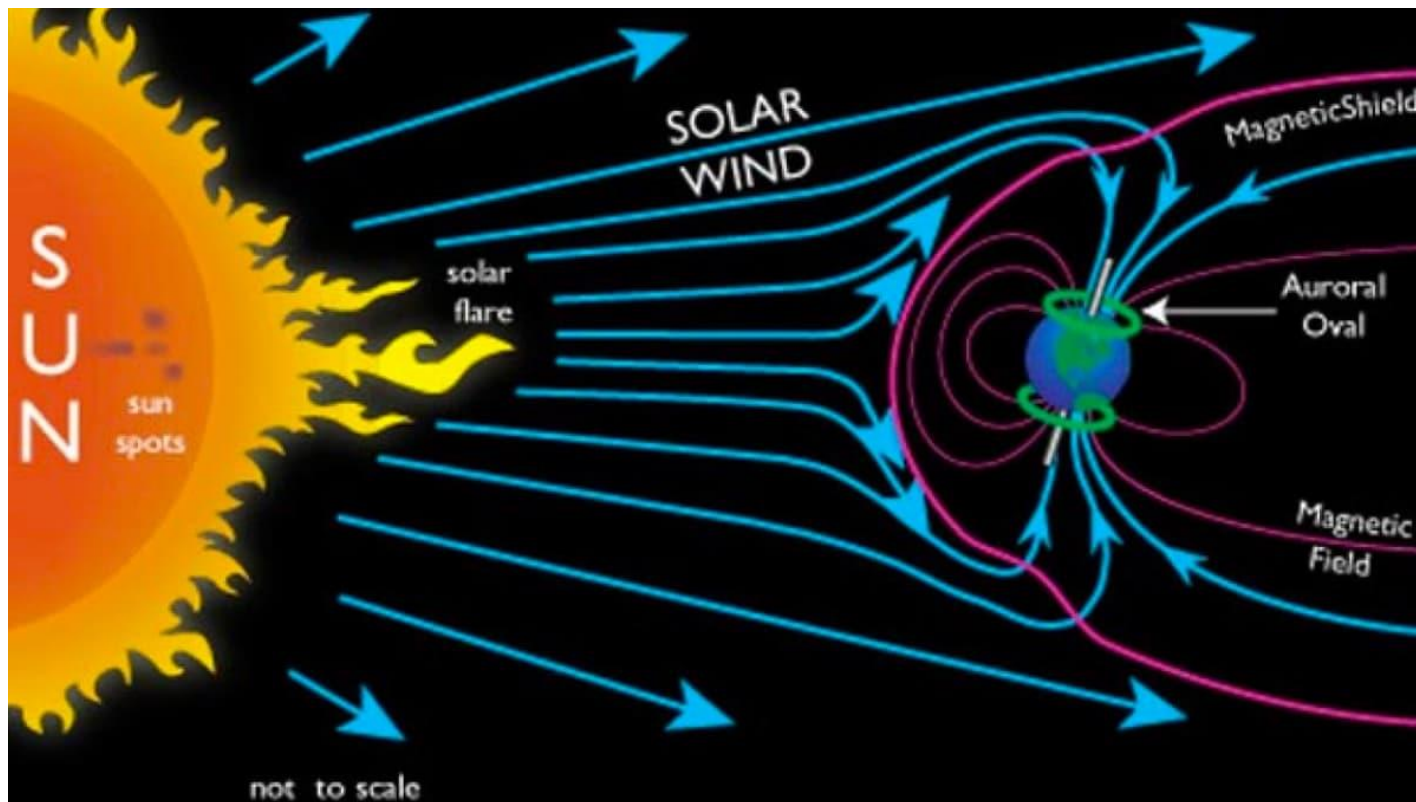
Vento Solar

É um fluxo contínuo de partículas carregadas (principalmente elétrons e prótons) que são emitidas pela coroa solar em todas as direções.

- O vento solar é uma fonte importante de plasma que permeia todo o sistema solar.



Vento Solar

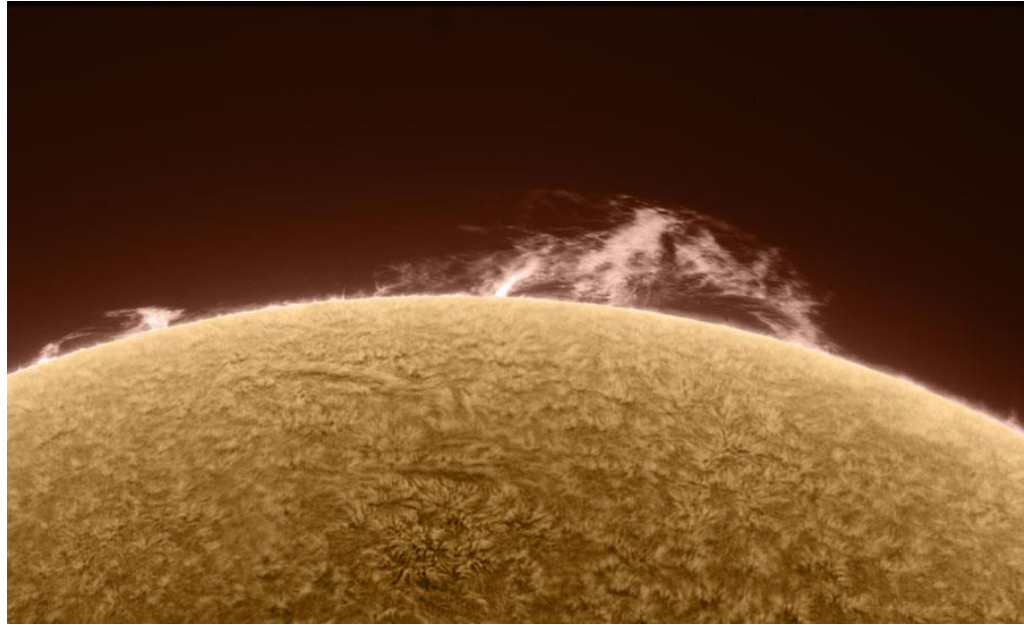


Vento Solar – Aurora Boreal e Aurora Austral



Protuberâncias Solares

São estruturas gigantescas de gás que se estendem acima da superfície do Sol na coroa ou na cromosfera. Podem durar horas ou mesmo semanas antes de se dissiparem.



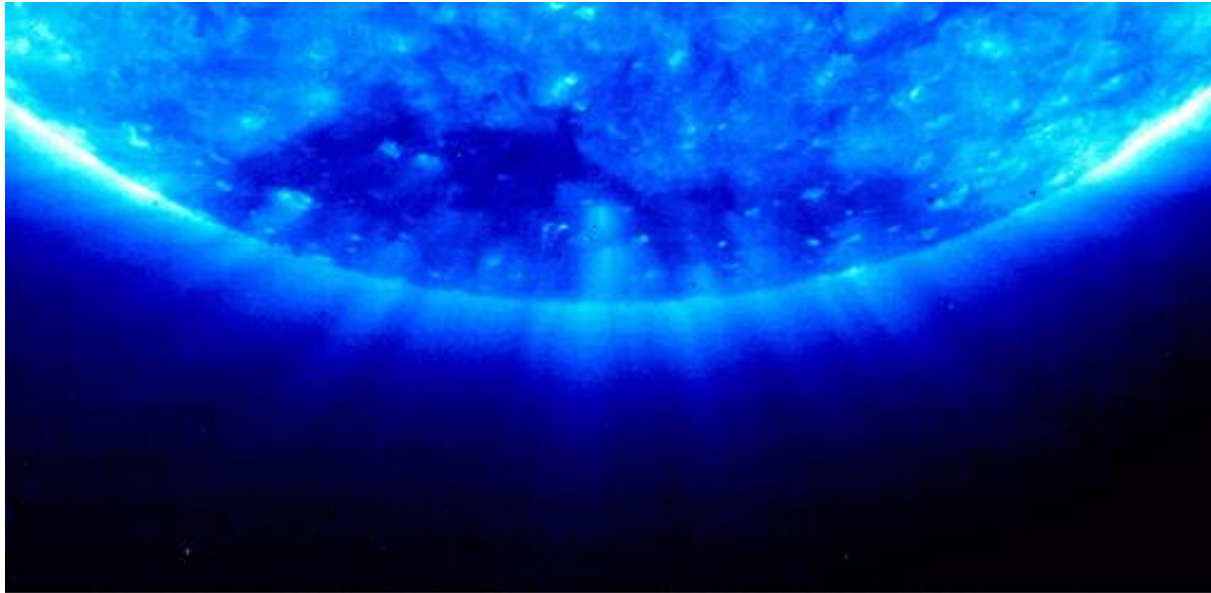
Plumes

São estruturas brilhantes que se estendem para fora da coroa solar, normalmente emergindo de buracos coronais, especialmente nos polos solares.

- Elas são fluxos de plasma canalizados ao longo de linhas de campo magnético abertas que escapam do Sol, contribuindo para o vento solar.

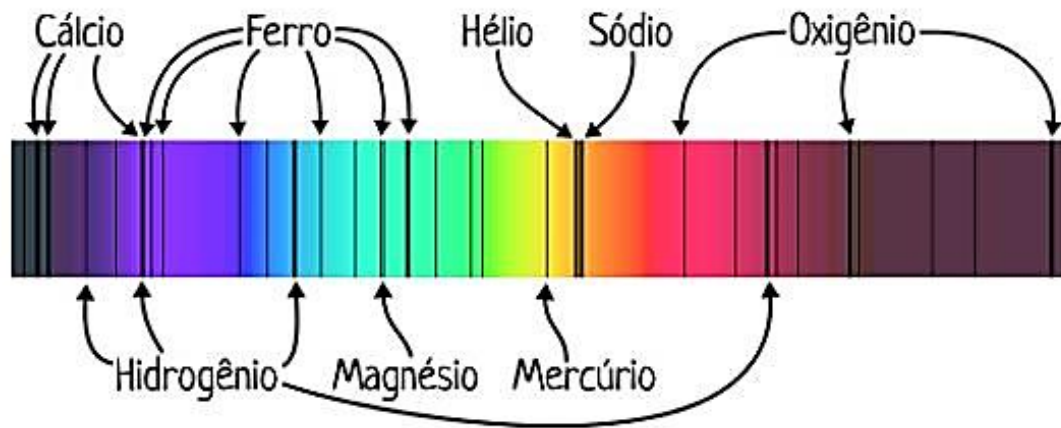
Plumes

As plumas aparecem como jatos ou feixes estreitos e luminosos, visíveis em imagens ultravioleta e de raios-X.



Espectro Solar

O espectro solar, quando analisado, revela linhas escuras de absorção conhecidas como linhas espectrais, que são características de elementos químicos presentes na atmosfera solar. Essas linhas espectrais são usadas pelos astrônomos para determinar a composição química do Sol e de outras estrelas.



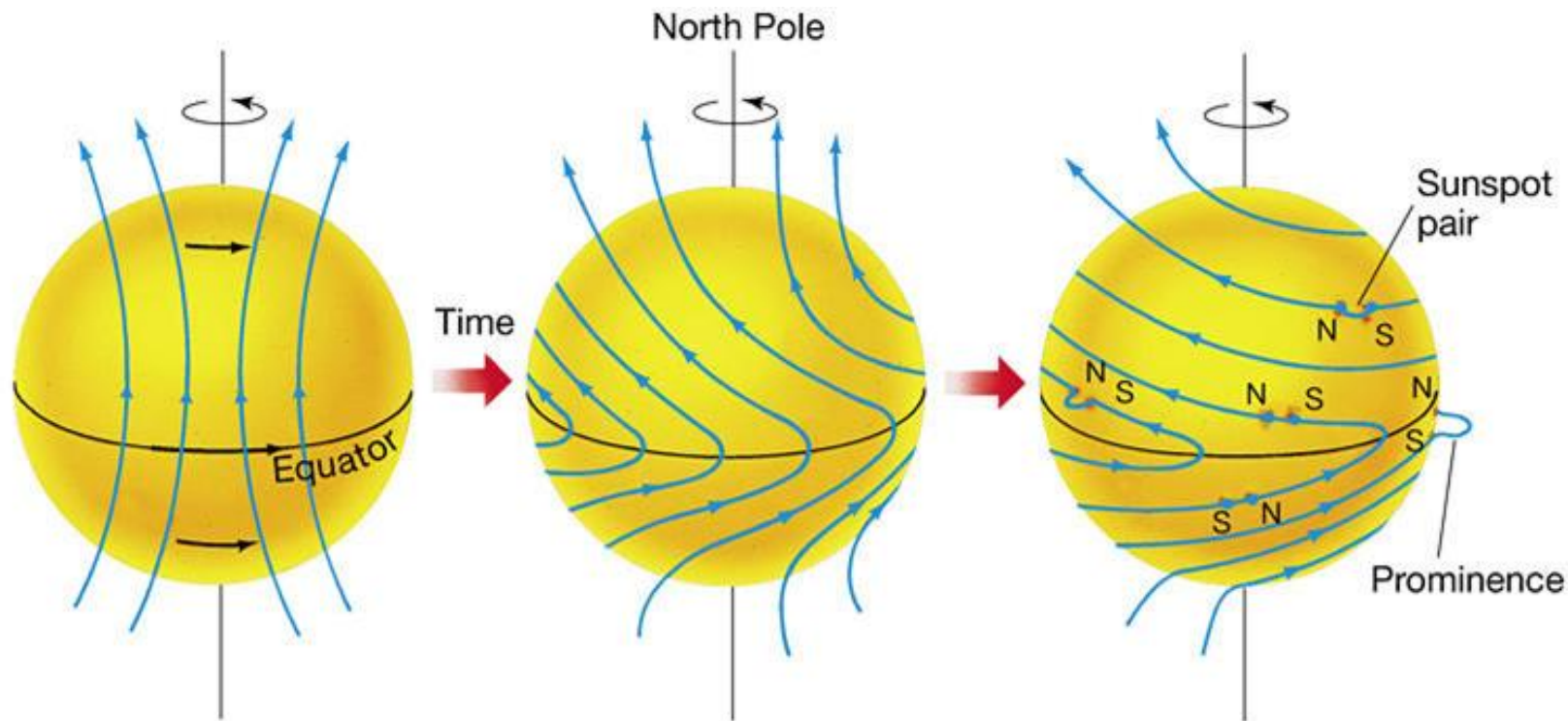
Rotação Diferencial

Rotação Diferencial do Sol

O Sol possui uma rotação diferencial, o que significa que diferentes partes do Sol rotam em velocidades diferentes. Isso é devido ao fato de que o Sol não é um corpo sólido; ele é composto de gás e plasma.

- Em sua linha do equador, o Sol completa uma rotação aproximadamente a cada 25 dias, enquanto em seus polos, a rotação pode levar cerca de 35 dias.

Rotação Diferencial do Sol

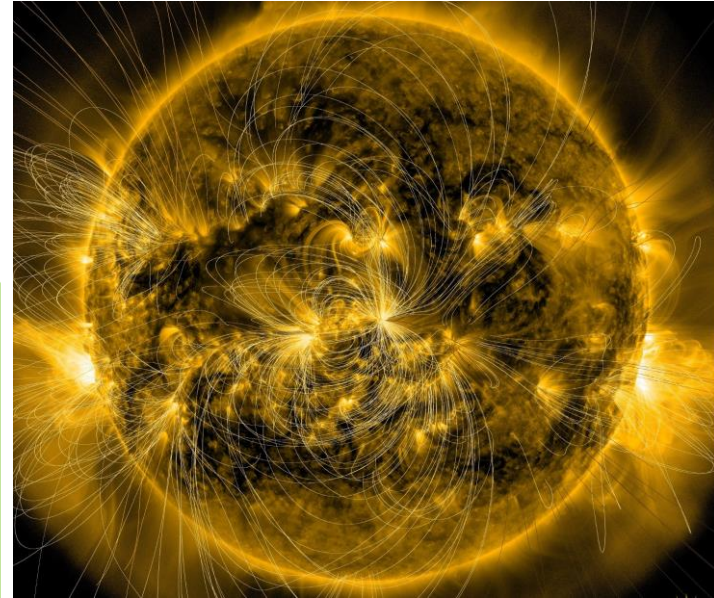


Campo Magnético Solar

Campo Magnético Solar

O campo magnético solar é gerado por um processo conhecido como dínamo solar, que ocorre no interior do Sol.

Nesse processo, na zona de convecção, onde o plasma quente sobe e troca calor com meio externo, ele acaba esfriando e descendo para camadas mais quentes novamente, criando os movimentos convectivos - que geram as correntes elétricas.



Plasma

- O plasma, considerado o quarto estado da matéria, é uma forma de matéria composta por um gás altamente ionizado.
- Essa ionização ocorre porque as temperaturas ou energias envolvidas são suficientemente altas para separar os elétrons dos átomos, criando um ambiente onde partículas carregadas coexistem com partículas neutras.

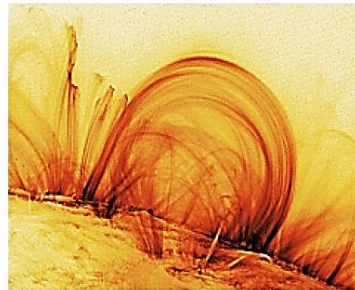
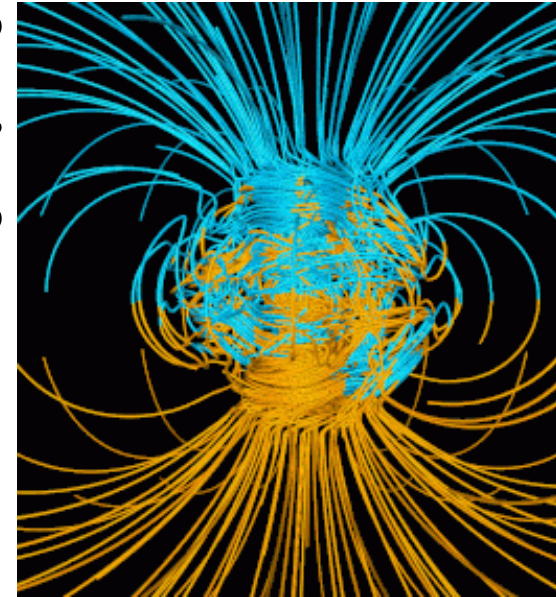
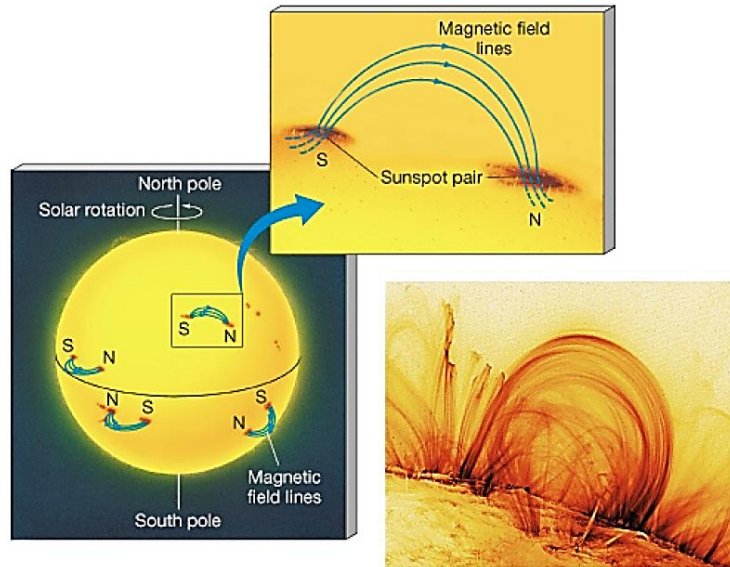
Plasma

- Essa mistura de elétrons livres e íons faz com que o plasma tenha propriedades únicas, como alta condutividade elétrica e sensibilidade a campos magnéticos e elétricos.



Estrutura do campo magnético solar

Estas correntes, combinadas com a rotação diferencial do Sol distorcem e amplificam os campos magnéticos locais, formando um campo magnético global complexo.



Ciclo Magnético Solar e Reversão do Campo Magnético

- O campo magnético solar passa por um ciclo de atividade magnética de aproximadamente 11 anos, conhecido como ciclo solar.
- Durante esse período, a atividade magnética do Sol aumenta e diminui, alcançando um máximo e um mínimo a cada ciclo.
- Uma característica importante desse ciclo é a reversão do campo magnético solar. Ou seja, as polaridades magnéticas norte e sul do Sol trocam de lugar.

Ciclo de Atividade Solar

Durante o ciclo solar, o número de manchas solares e outros fenômenos solares, como erupções solares e ejeções de massa coronal, aumenta e diminui.

Tempestade Solar

Tempestade Solar

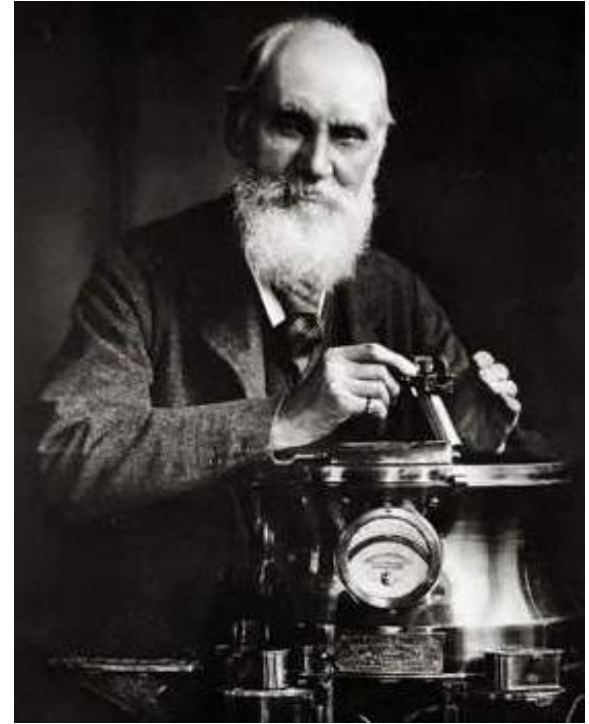
Uma tempestade solar, também chamada de tempestade geomagnética, é um evento que ocorre quando “o Sol emite uma grande quantidade de partículas carregadas e radiação eletromagnética”, as quais interagem com o campo magnético da Terra e com a atmosfera superior da Terra (a chamada magnetosfera).

National Geographic

Evento de Carrington

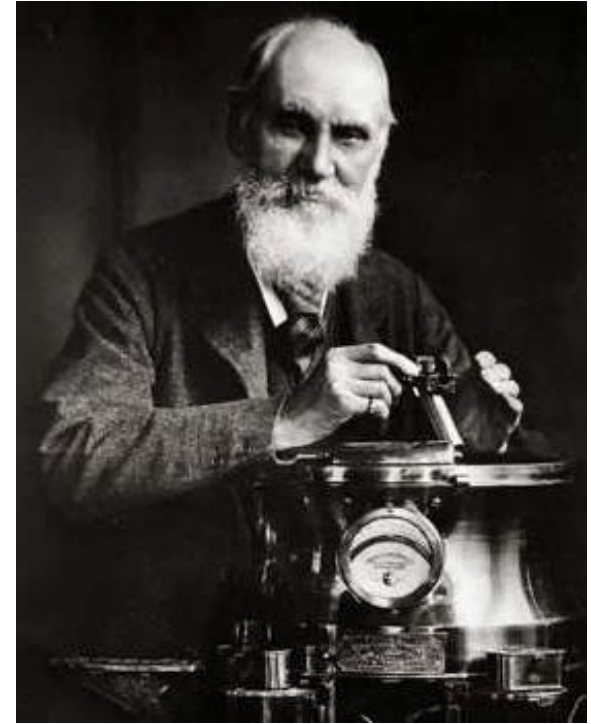
No primeiro dia de setembro de 1859, o astrônomo Richard Carrington observava o Sol com seu telescópio, projetando a luz sobre uma tela.

A imagem projetada mostrava várias manchas solares e enquanto a observação acontecia, Carrington desenhava essas manchas sobre a tela.



Evento de Carrington

De repente, ele notou que uma das manchas subitamente se tornou muito brilhante, como um lampejo muito intenso. Sem saber, Carrington havia registrado o evento mais impressionante da história da Física Solar.



Evento de Carrington

Houve relatos:

- Correntes induzidas nos fios que queimaram muitos aparelhos.
- Há inúmeros relatos de telégrafos funcionando sozinhos, linhas se incendiando e baterias curto-circuitando nos escritórios.
- Auroras foram registradas em lugares como Cuba ou América Central, muito longe dos locais usuais, como Noruega e Nova Zelândia.

Se um evento como esse ocorresse nos tempos atuais, o estrago seria enorme. O mundo sofreria um apagão tecnológico catastrófico!

Outros Eventos

- Um evento igual ao de 1859 ocorreu em 1921, quando auroras intensas foram registradas em Santiago do Chile, por exemplo.
- Em março de 1989, uma EMC um pouco menos intensa atingiu a Terra e inutilizou uma usina hidrelétrica no Canadá, causando um apagão em Québec.

Tempestade do dia da Bastilha

- Ocorrida dia 14 de julho de 2012.
- A intensidade medida dessa CME foi até superior a intensidade calculada para o evento de Carrington.
- A diferença, que acabou nos salvando do colapso tecnológico, foi que a nuvem de plasma ejetada passou de raspão pela Terra e apenas uma parte muito pequena nos atingiu.

Maio de 2024

Maio de 2024 trouxe uma série de grandes erupções solares e ejeções de massa coronal (CMEs) que causaram a tempestade solar mais forte em duas décadas e uma das exibições de auroras mais impressionantes dos últimos 500 anos.

Maio de 2024



Maio de 2024



Cracovia – Polonia

Maio de 2024



Whitley Bay, no
litoral do Reino
Unido

Maio de 2024



Sibéria – Rússia