



Astrofísica Geral

Tema 09: O Sol

Alexandre Zabet

Índice

Características

Estrutura

Campo Magnético

Bibliografia



Índice

Características

Estrutura

Campo Magnético

Bibliografia



O Sol

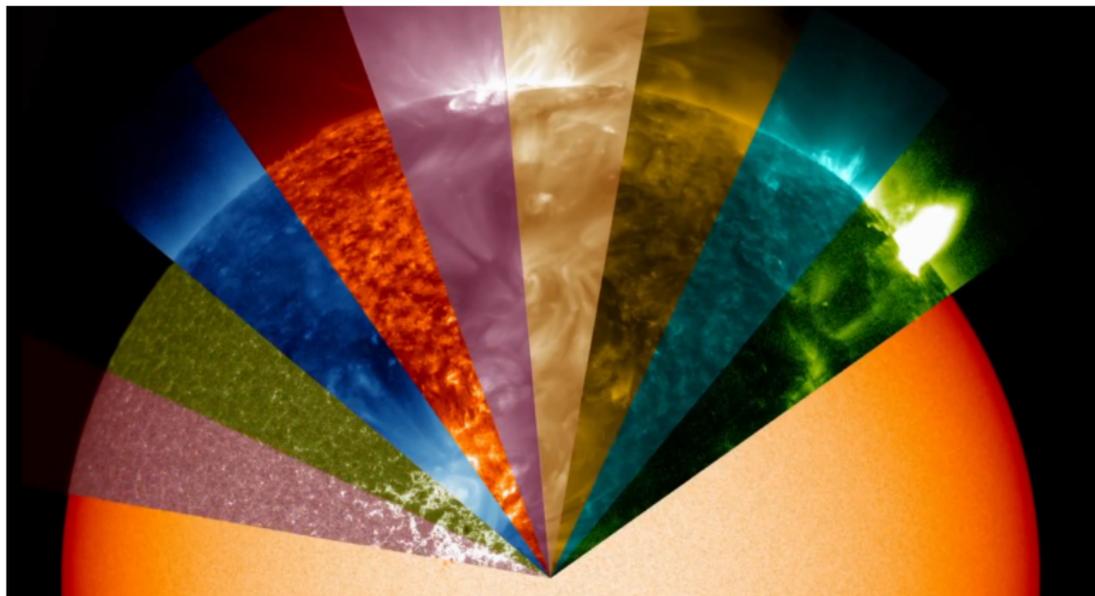


Video: Coletânea de imagens do SDO (Solar Dynamics Observatory).

<https://www.youtube.com/watch?v=GSVv40M2aks>



O Sol



Video: Sol em diversos comprimentos de onda.

<https://www.youtube.com/watch?v=kS57VH3QN1g>



Características solares

Raio	$6.96 \times 10^8 \text{ m}$	$\sim 109R_{\oplus}$
Massa	$1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$	$\sim 330000M_{\oplus}$
Densidade	1410 kg/m^3	Plásticos 1100 kg/m^3
Luminosidade	$3.846 \times 10^{26} \text{ W}$	
Insolação	1366 W/m^2	Média anual
Temperatura superficial	5780 K	
Período de rotação	25 dias (no eq)	34 dias (nos polos)
Idade	4.57 bilhões de anos	



Índice

Características

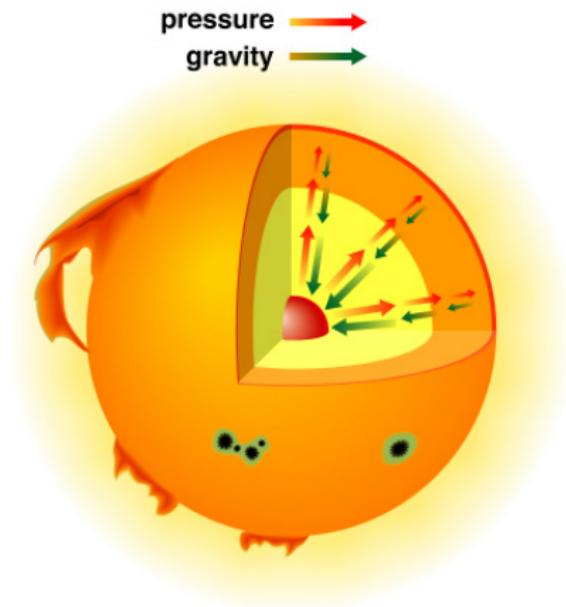
Estrutura

Campo Magnético

Bibliografia



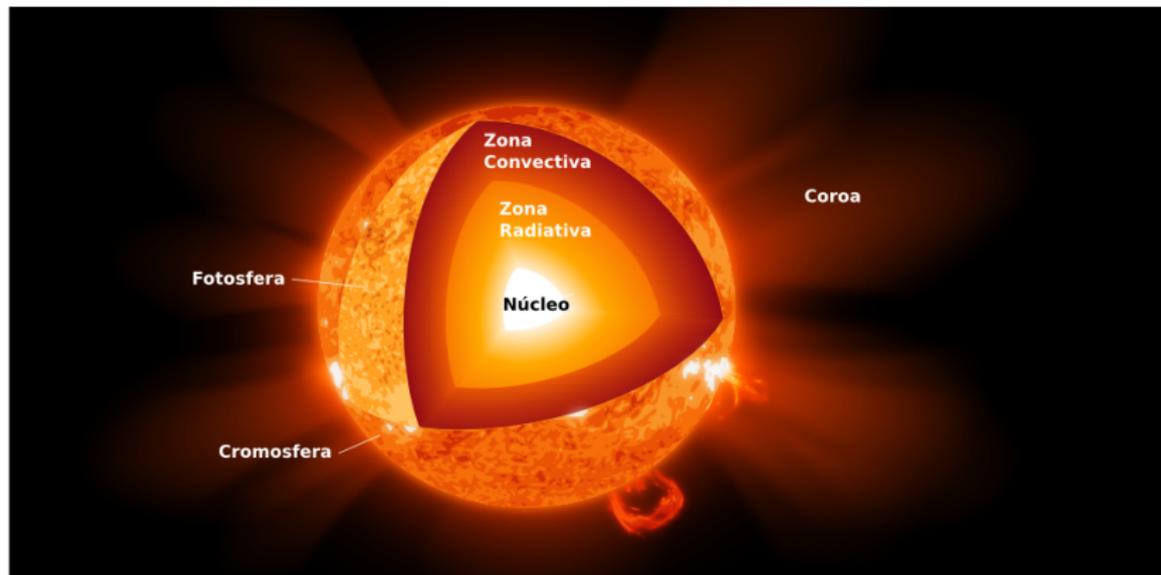
Equilíbrio Hidrostático



O Sol está em equilíbrio hidrostático: não expande nem encolhe, pois a pressão interna é contrabalanceada pela gravidade. Isso acontece em todos os pontos.



Estrutura do Sol



Principais camadas do Sol.



Estrutura do Sol

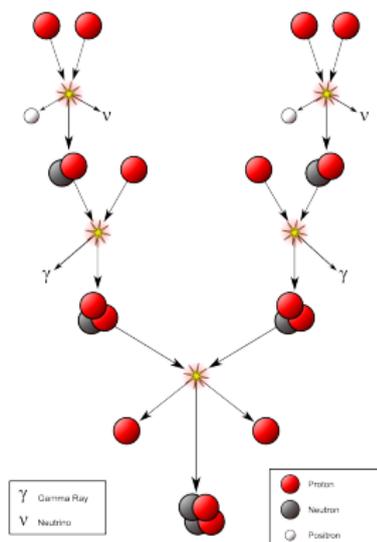
REGIÃO	ESPESSURA (km)	DENSIDADE (g/cm ⁻³)	TEMPERATURA (K)
Interior			
Núcleo	~ 2× 10 ⁵	~ 150	150.000.000
Zona Radiativa	~ 3× 10 ⁵	cai de 20 a 0,2	7.000.000 - 2.000.000
Zona Convectiva	~ 2× 10 ⁵	< 0,2	2.000.000 – 6.400
Superfície			
Fotosfera	~ 500	~ 4.0 × 10 ⁻⁷	6.400 – 4.400
Atmosfera			
Cromosfera	~ 2,5× 10 ³	~ 2.0 × 10 ⁻⁷	4.400 – 20.000
Região de transição	~ 8,5× 10 ³	1.0 × 10 ⁻¹⁶	20.000 - 1.000.000
Coroa	tamanho indefinido, atinge vários raios solares	< 2.0 × 10 ⁻¹⁷	> 1.000.000

Características das camadas do Sol.



Núcleo

- ▶ Denso e quente
- ▶ Produção de energia
- ▶ Fusão nuclear:
 - ▶ $4H \rightarrow He^4 + 2\nu + 2e^+ + 2\gamma$



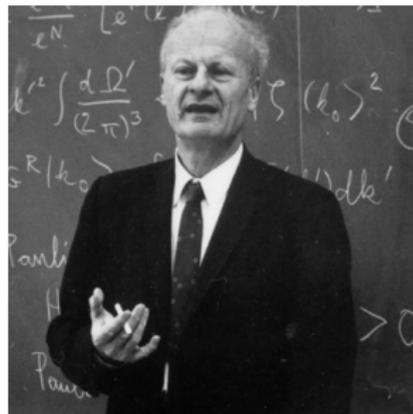
Cadeia próton-próton gera a energia do Sol.



Exercício sobre Fusão Nuclear

Exercício 9.1

Quanto H o Sol funde por segundo?



Hans Bethe propôs o mecanismo de fusão do H em 1939.



Exercício sobre Fusão Nuclear

Quanto H o Sol funde por segundo?

- ▶ $m_H = 1.00794u = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$



Exercício sobre Fusão Nuclear

Quanto H o Sol funde por segundo?

- ▶ $m_H = 1.00794u = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- ▶ $m_{He} = 4.002602u = 6.644 \times 10^{-27} \text{ kg}$



Exercício sobre Fusão Nuclear

Quanto H o Sol funde por segundo?

- ▶ $m_H = 1.00794u = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- ▶ $m_{He} = 4.002602u = 6.644 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- ▶ $\Delta m = 4m_H - m_{He} = 4.840 \times 10^{-29} \text{ kg}$



Exercício sobre Fusão Nuclear

Quanto H o Sol funde por segundo?

- ▶ $m_H = 1.00794u = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- ▶ $m_{He} = 4.002602u = 6.644 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- ▶ $\Delta m = 4m_H - m_{He} = 4.840 \times 10^{-29} \text{ kg}$
- ▶ $E = mc^2 \rightarrow \Delta E = 4.840 \times 10^{-29} * (2.998 \times 10^8)^2$



Exercício sobre Fusão Nuclear

Quanto H o Sol funde por segundo?

- ▶ $m_H = 1.00794u = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- ▶ $m_{He} = 4.002602u = 6.644 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- ▶ $\Delta m = 4m_H - m_{He} = 4.840 \times 10^{-29} \text{ kg}$
- ▶ $E = mc^2 \rightarrow \Delta E = 4.840 \times 10^{-29} * (2.998 \times 10^8)^2$
- ▶ $\therefore \Delta E = 4.350 \times 10^{-12} \text{ J por reação}$



Exercício sobre Fusão Nuclear

Quanto H o Sol funde por segundo?

- ▶ $m_H = 1.00794u = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- ▶ $m_{He} = 4.002602u = 6.644 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- ▶ $\Delta m = 4m_H - m_{He} = 4.840 \times 10^{-29} \text{ kg}$
- ▶ $E = mc^2 \rightarrow \Delta E = 4.840 \times 10^{-29} * (2.998 \times 10^8)^2$
- ▶ $\therefore \Delta E = 4.350 \times 10^{-12} \text{ J por reação}$

- ▶ $L_{\odot} = 3.846 \times 10^{26} \text{ W}$



Exercício sobre Fusão Nuclear

Quanto H o Sol funde por segundo?

- ▶ $m_H = 1.00794u = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- ▶ $m_{He} = 4.002602u = 6.644 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- ▶ $\Delta m = 4m_H - m_{He} = 4.840 \times 10^{-29} \text{ kg}$
- ▶ $E = mc^2 \rightarrow \Delta E = 4.840 \times 10^{-29} * (2.998 \times 10^8)^2$
- ▶ $\therefore \Delta E = 4.350 \times 10^{-12} \text{ J por reação}$

- ▶ $L_{\odot} = 3.846 \times 10^{26} \text{ W}$
- ▶ $4 * L_{\odot} / \Delta E = 3.537 \times 10^{38} \text{ átomos de H consumidos por segundo}$



Exercício sobre Fusão Nuclear

Quanto H o Sol funde por segundo?

- ▶ $m_H = 1.00794u = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- ▶ $m_{He} = 4.002602u = 6.644 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- ▶ $\Delta m = 4m_H - m_{He} = 4.840 \times 10^{-29} \text{ kg}$
- ▶ $E = mc^2 \rightarrow \Delta E = 4.840 \times 10^{-29} * (2.998 \times 10^8)^2$
- ▶ $\therefore \Delta E = 4.350 \times 10^{-12} \text{ J por reação}$

- ▶ $L_{\odot} = 3.846 \times 10^{26} \text{ W}$
- ▶ $4 * L_{\odot} / \Delta E = 3.537 \times 10^{38} \text{ átomos de H consumidos por segundo}$
- ▶ $m_H = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg} \rightarrow 5.917 \times 10^{11} \text{ kg de H consumidos por segundo}$



Exercício sobre Fusão Nuclear

Daria para alimentar o Sol com o H da Terra?

- ▶ Volume de água na Terra = $1.386 \times 10^{18} m^3$



Exercício sobre Fusão Nuclear

Daria para alimentar o Sol com o H da Terra?

- ▶ Volume de água na Terra = $1.386 \times 10^{18} m^3$
- ▶ Quase toda líquida, $\rho_a = 1000 kg/m^3$



Exercício sobre Fusão Nuclear

Daria para alimentar o Sol com o H da Terra?

- ▶ Volume de água na Terra = $1.386 \times 10^{18} m^3$
- ▶ Quase toda líquida, $\rho_a = 1000 kg/m^3$
- ▶ Massa de água na Terra = $1.386 \times 10^{21} kg$



Exercício sobre Fusão Nuclear

Daria para alimentar o Sol com o H da Terra?

- ▶ Volume de água na Terra = $1.386 \times 10^{18} m^3$
- ▶ Quase toda líquida, $\rho_a = 1000 kg/m^3$
- ▶ Massa de água na Terra = $1.386 \times 10^{21} kg$
- ▶ Fração de massa de H na água $\approx 2u/18u$



Exercício sobre Fusão Nuclear

Daria para alimentar o Sol com o H da Terra?

- ▶ Volume de água na Terra = $1.386 \times 10^{18} m^3$
- ▶ Quase toda líquida, $\rho_a = 1000 kg/m^3$
- ▶ Massa de água na Terra = $1.386 \times 10^{21} kg$
- ▶ Fração de massa de H na água $\approx 2u/18u$
- ▶ Então, $m_H = 2 * m_{gua}/18 = 1.540 \times 10^{20} kg$ de H na água da Terra



Exercício sobre Fusão Nuclear

Daria para alimentar o Sol com o H da Terra?

- ▶ Volume de água na Terra = $1.386 \times 10^{18} m^3$
- ▶ Quase toda líquida, $\rho_a = 1000 kg/m^3$
- ▶ Massa de água na Terra = $1.386 \times 10^{21} kg$
- ▶ Fração de massa de H na água $\approx 2u/18u$
- ▶ Então, $m_H = 2 * m_{gua}/18 = 1.540 \times 10^{20} kg$ de H na água da Terra

- ▶ O Sol levará $1.540 \times 10^{20} / 5.917 \times 10^{11} = 2.603 \times 10^8 s$ para queimar todo o H da Terra



Exercício sobre Fusão Nuclear

Daria para alimentar o Sol com o H da Terra?

- ▶ Volume de água na Terra = $1.386 \times 10^{18} m^3$
- ▶ Quase toda líquida, $\rho_a = 1000 kg/m^3$
- ▶ Massa de água na Terra = $1.386 \times 10^{21} kg$
- ▶ Fração de massa de H na água $\approx 2u/18u$
- ▶ Então, $m_H = 2 * m_{gua}/18 = 1.540 \times 10^{20} kg$ de H na água da Terra

- ▶ O Sol levará $1.540 \times 10^{20} / 5.917 \times 10^{11} = 2.603 \times 10^8 s$ para queimar todo o H da Terra
- ▶ 1 ano = $3.156 \times 10^7 s$



Exercício sobre Fusão Nuclear

Daria para alimentar o Sol com o H da Terra?

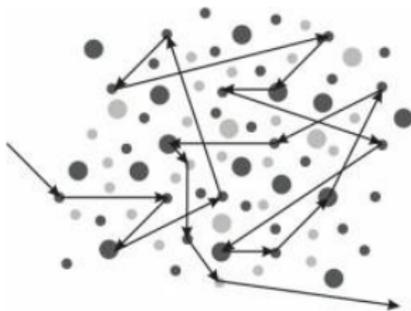
- ▶ Volume de água na Terra = $1.386 \times 10^{18} m^3$
- ▶ Quase toda líquida, $\rho_a = 1000 kg/m^3$
- ▶ Massa de água na Terra = $1.386 \times 10^{21} kg$
- ▶ Fração de massa de H na água $\approx 2u/18u$
- ▶ Então, $m_H = 2 * m_{gua}/18 = 1.540 \times 10^{20} kg$ de H na água da Terra

- ▶ O Sol levará $1.540 \times 10^{20} / 5.917 \times 10^{11} = 2.603 \times 10^8 s$ para queimar todo o H da Terra
- ▶ 1 ano = $3.156 \times 10^7 s$
- ▶ Se quiséssemos alimentar o Sol com o H da Terra, não duraria nem 10 anos!



Zona Radiativa

- ▶ Energia transmitida pela radiação (luz)
- ▶ Temperatura cai de 7 para 2 milhões de Kelvin
- ▶ Ciclo: luz aquece o gás → o gás emite luz e esfria
- ▶ A luz leva de 10 a 170 mil anos para sair do Sol

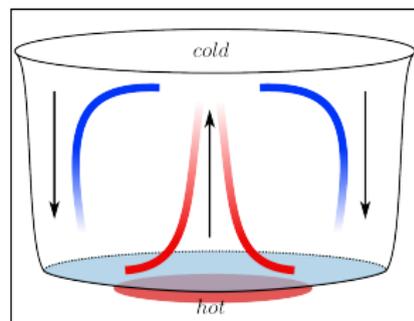


Fótons de luz transferem energia para o gás que emite novos fótons.



Zona Convectiva

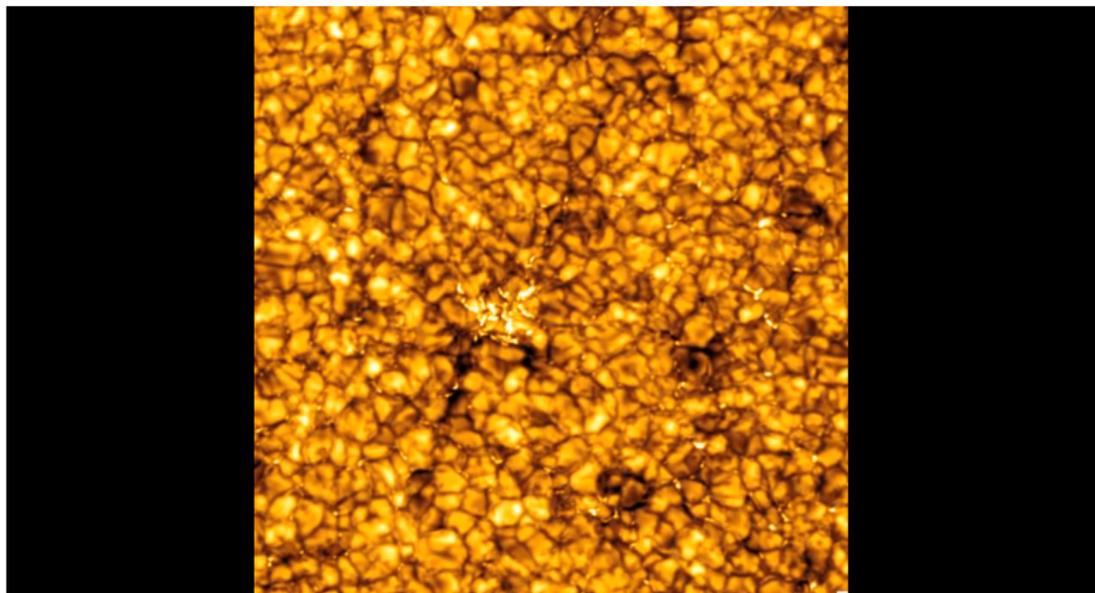
- ▶ Grande gradiente de temperatura
- ▶ Energia é transportada por bolhas de gás
- ▶ Gera grânulos na superfície



Convecção de um fluido.



Grânulos do Sol



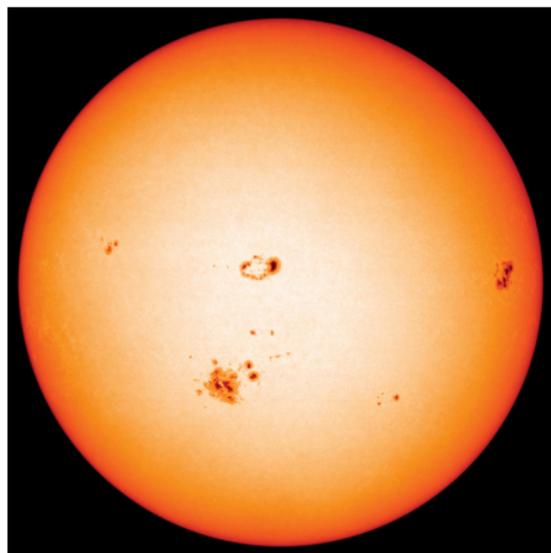
Video: Grânulos do Sol, gerados pela convecção. Um grânulo típico tem um diâmetro da ordem de 1000 km e dura de 8 a 20 minutos.

https://www.youtube.com/watch?v=W_Scoj4HqCQ



Fotosfera

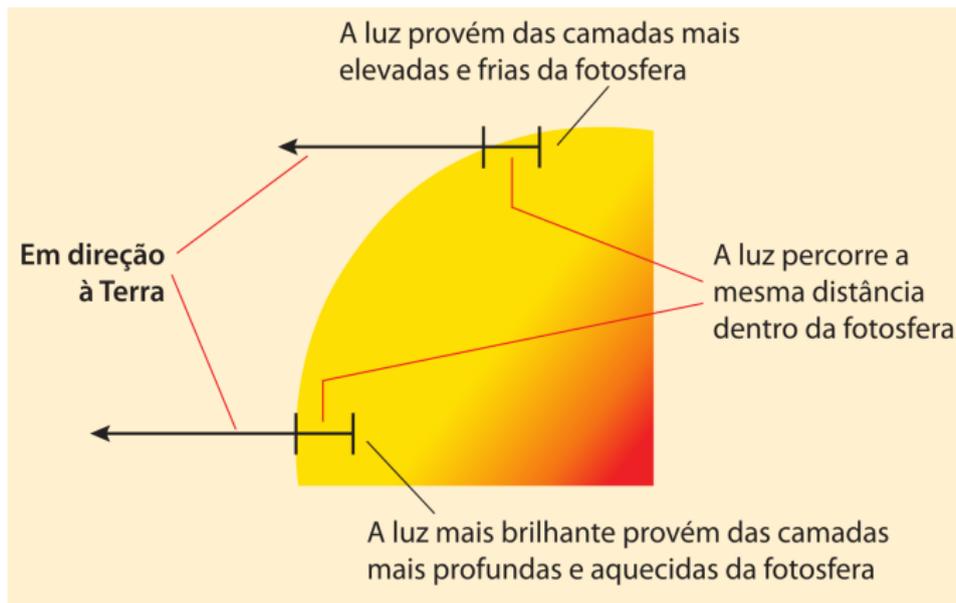
- ▶ A menor das regiões, mas a mais visível!
- ▶ Onde é gerada a luz que chega à Terra
- ▶ Efeito de obscurecimento de borda
- ▶ $T \approx 5800 \text{ K}$



Disco solar com o efeito de obscurecimento de borda.



Fotosfera – limbo

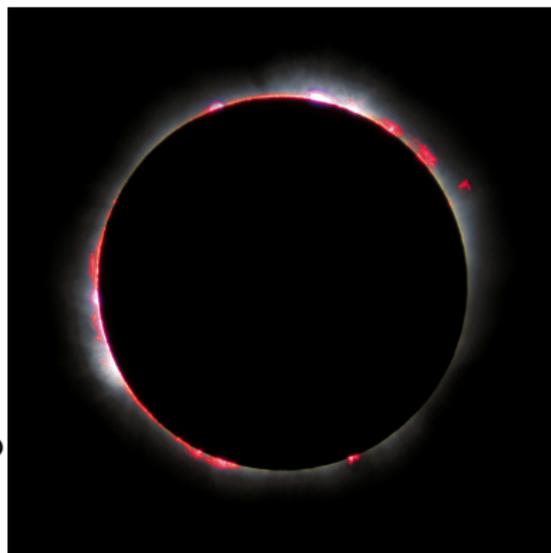


O obscurecimento de limbo é muito importante para estudar a fotosfera pois nos permite comparar raios de luz que foram gerados em locais diferentes da fotosfera.



Cromosfera

- ▶ “Esfera de cor”
- ▶ Visível em eclipses
- ▶ Densidade muito baixa
- ▶ Linhas de emissão de H_{α} (vermelho)
- ▶ Temperatura aumenta da base para o topo

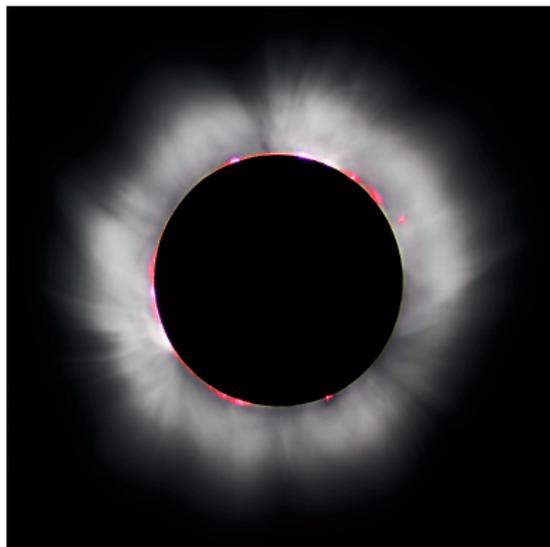


Cromosfera solar visível no eclipse total de 1999.



Coroa

- ▶ Muito rarefeito
- ▶ Quase o mesmo raio do Sol
- ▶ Muito quente
- ▶ Emissões energéticas
- ▶ Aquecida por efeitos magnéticos



Coroa solar visível no eclipse total de 1999.



Índice

Características

Estrutura

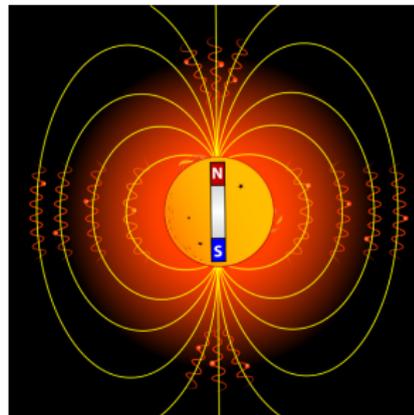
Campo Magnético

Bibliografia



O campo magnético solar

- ▶ O Sol tem um enorme campo magnético
- ▶ Este campo é responsável por muitos efeitos
- ▶ Para entendê-lo, é preciso compreender um Plasma



O Sol é semelhante a um ímã gigantesco.

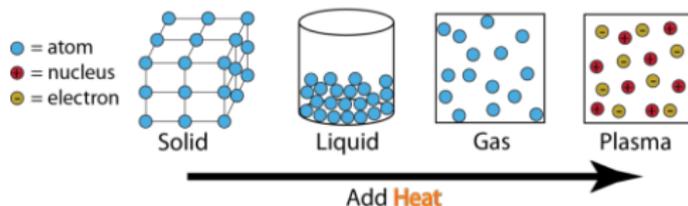


Plasma

- ▶ Átomos divididos
- ▶ Forte interação com campos elétricos e magnéticos



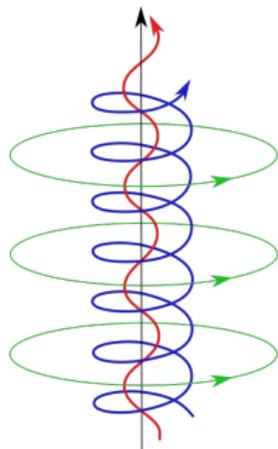
Raios e TV de Plasma são dois exemplos comuns de plasma.



O Plasma é um estado da matéria.



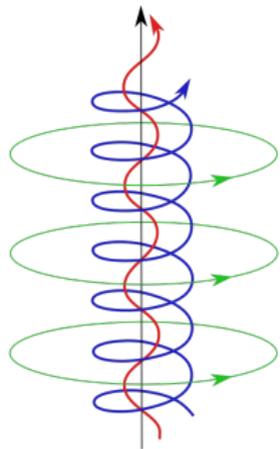
Plasma



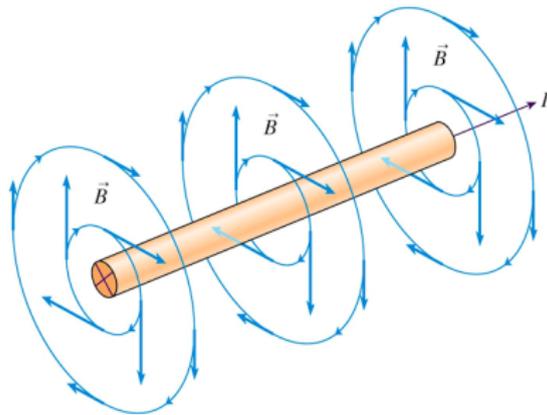
Uma partícula carregada em movimento sofre deflexão ao entrar em uma região com campo magnético.



Plasma



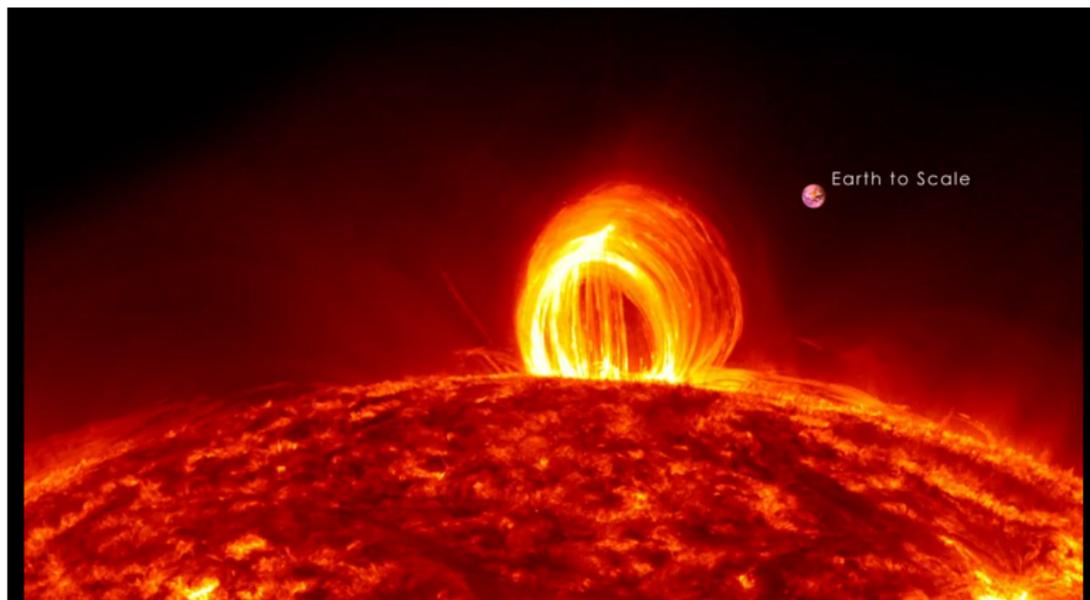
Uma partícula carregada em movimento sofre deflecção ao entrar em uma região com campo magnético.



Mas partículas carregadas em movimento também geram campos magnéticos!



Loops magnéticos do Sol

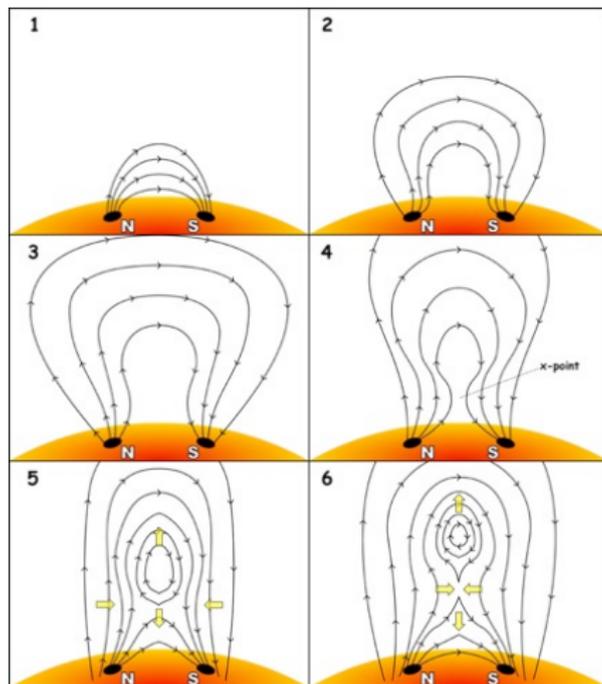


Video: Loops magnéticos do Sol

<https://www.youtube.com/watch?v=HFT7ATLQQx8>



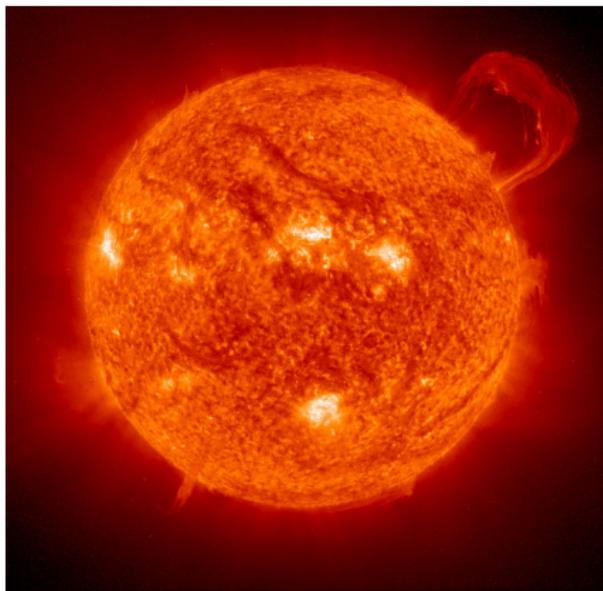
Explosões solares



Reconexão magnética em uma explosão solar.



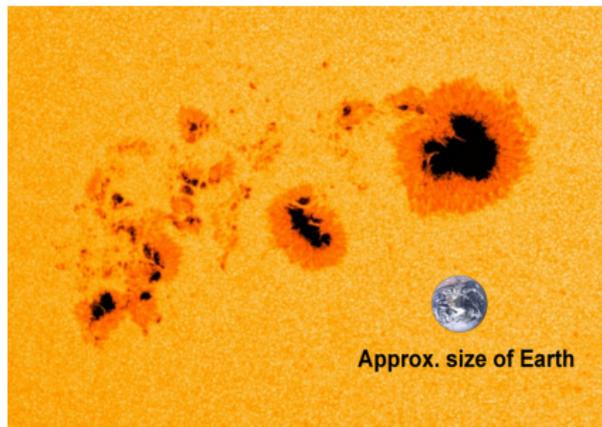
Explosões solares



Grande explosão solar.



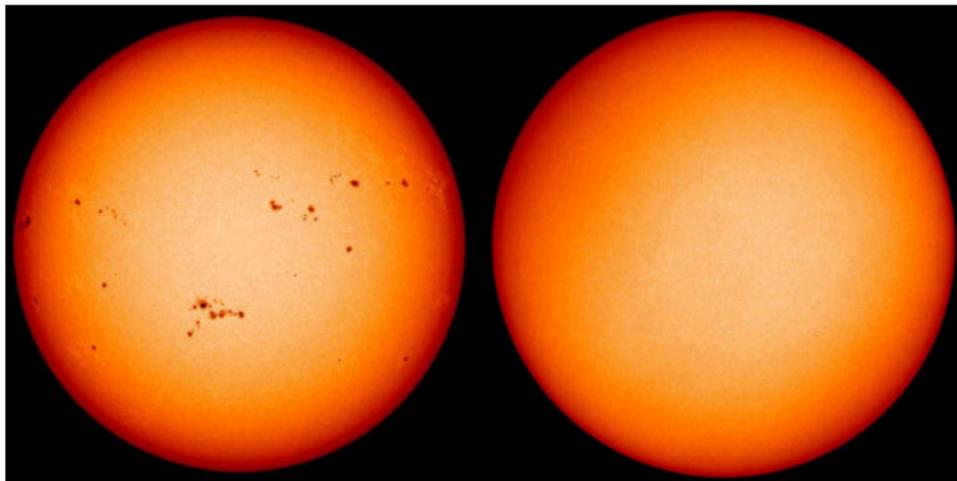
Manchas solares



O Sol apresenta manchas solares, que são regiões mais escuras (frias) onde as linhas do campo magnético entram (ou saem), não permitindo que a convecção aconteça.



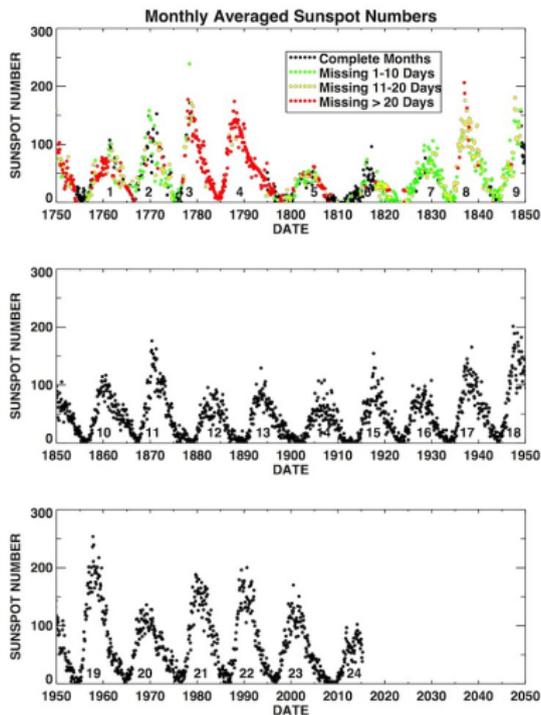
Manchas solares



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).



Manchas solares

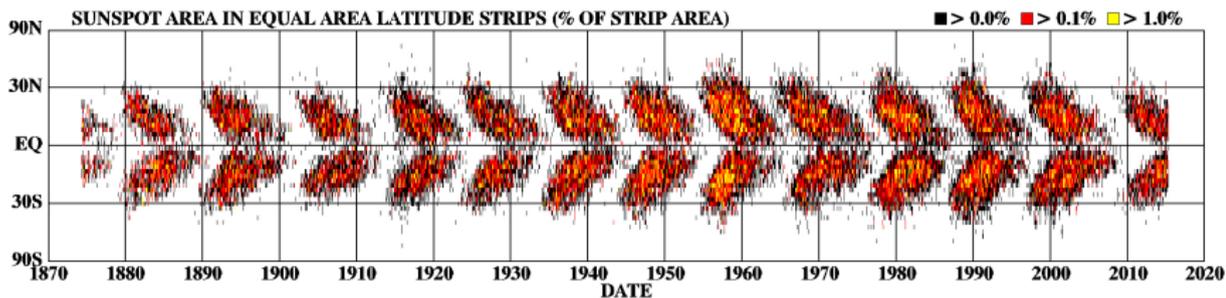


O período do ciclo é de aproximadamente 11 anos.



Manchas solares

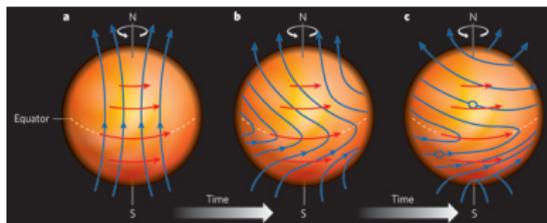
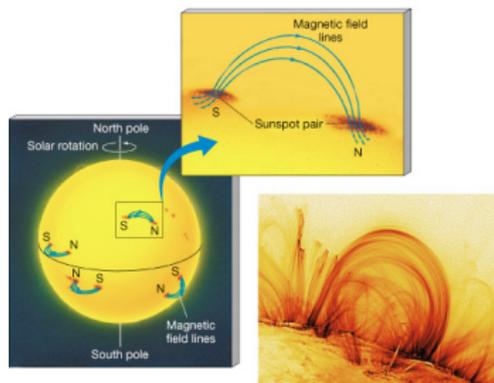
DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



A posição das manchas muda ao longo do ciclo, formando o chamado “diagrama de borboleta”.



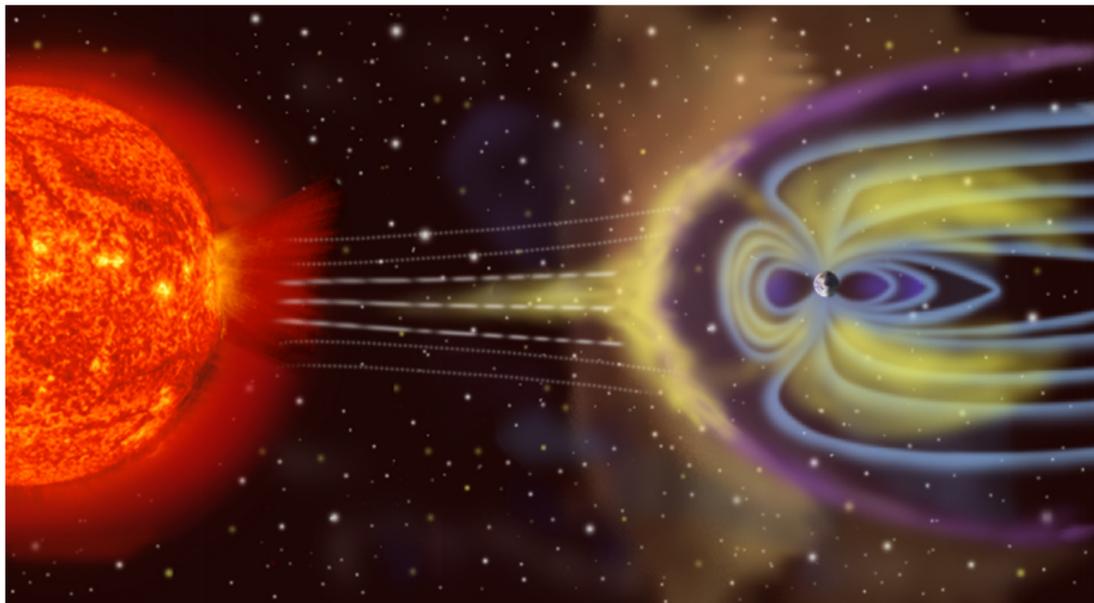
Manchas solares



Acredita-se que o ciclo de manchas solares possa ser explicado em parte pela torção nas linhas de campo magnético gerada por causa da rotação diferencial do Sol. Mas certamente há outros fatores em jogo.



Vento solar



O Sol emite cerca de $3 \times 10^{-14} M_{\odot}$ /ano na forma de ventos solares. Ou seja, uma Terra a cada 150 milhões de anos. Portanto, desde sua origem, já perdeu cerca de 30 planetas Terra em forma de vento, o que representa somente 0.009% da sua massa.



Índice

Características

Estrutura

Campo Magnético

Bibliografia



Fontes para estudo

- ▶ O céu que nos envolve, capítulo 6
- ▶ Curso de Astronomia do Prof. Steiner, aulas 8 e 9.
- ▶ Várias seções em <http://astro.if.ufrgs.br/>
- ▶ Curso de Astronomia, Auta & Joel, Aula 12



REALIZAÇÃO

