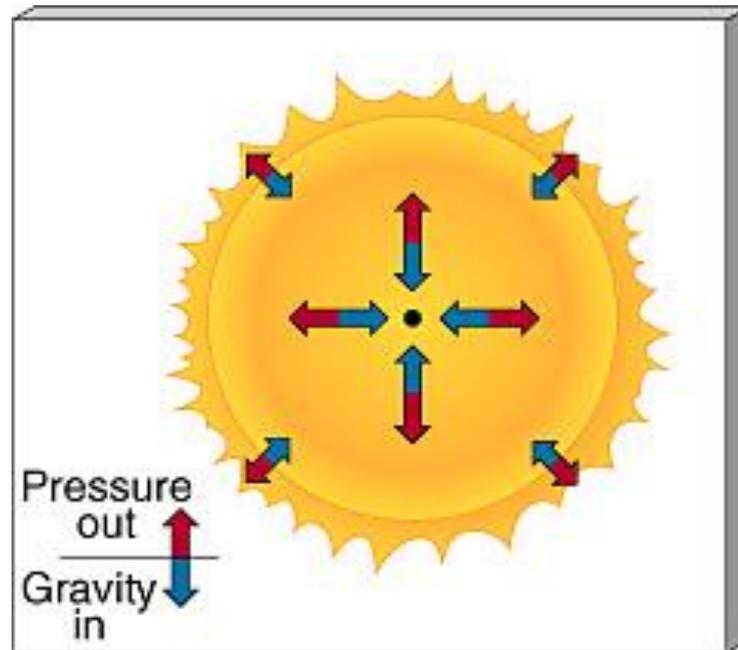


(Adaptado do curso AGA0215 da **Profa. Thais Idiart**)



PROPRIEDADES FÍSICAS

Definição: uma esfera brilhante de gás mantida por sua própria gravidade e cuja energia é produzida por fusão nuclear no seu centro.



O Sol é uma estrela típica, cai dentro do intervalo de estrelas consideradas as mais comuns no universo.



Massa = $1,99 \times 10^{30}$ kg (332.000 M_{\oplus})

Raio Equatorial = 696.000 km (109 R_{\oplus})

Densidade média = 1410 kg/m^3 (25% da $\bar{\rho}_{\oplus}$)

Gravidade superficial = 274 m/s^2 (28 g_{\oplus})

Período de rotação = 25,1 dias solares (equador)

30,8 dias solares (latitude 60°)

36 dias solares (pólos)

Inclinação do eixo de rotação = $7,25^\circ$ (em relação a eclíptica)

Temperatura na superfície = 5800 K

Luminosidade = $3,85 \times 10^{26}$ W

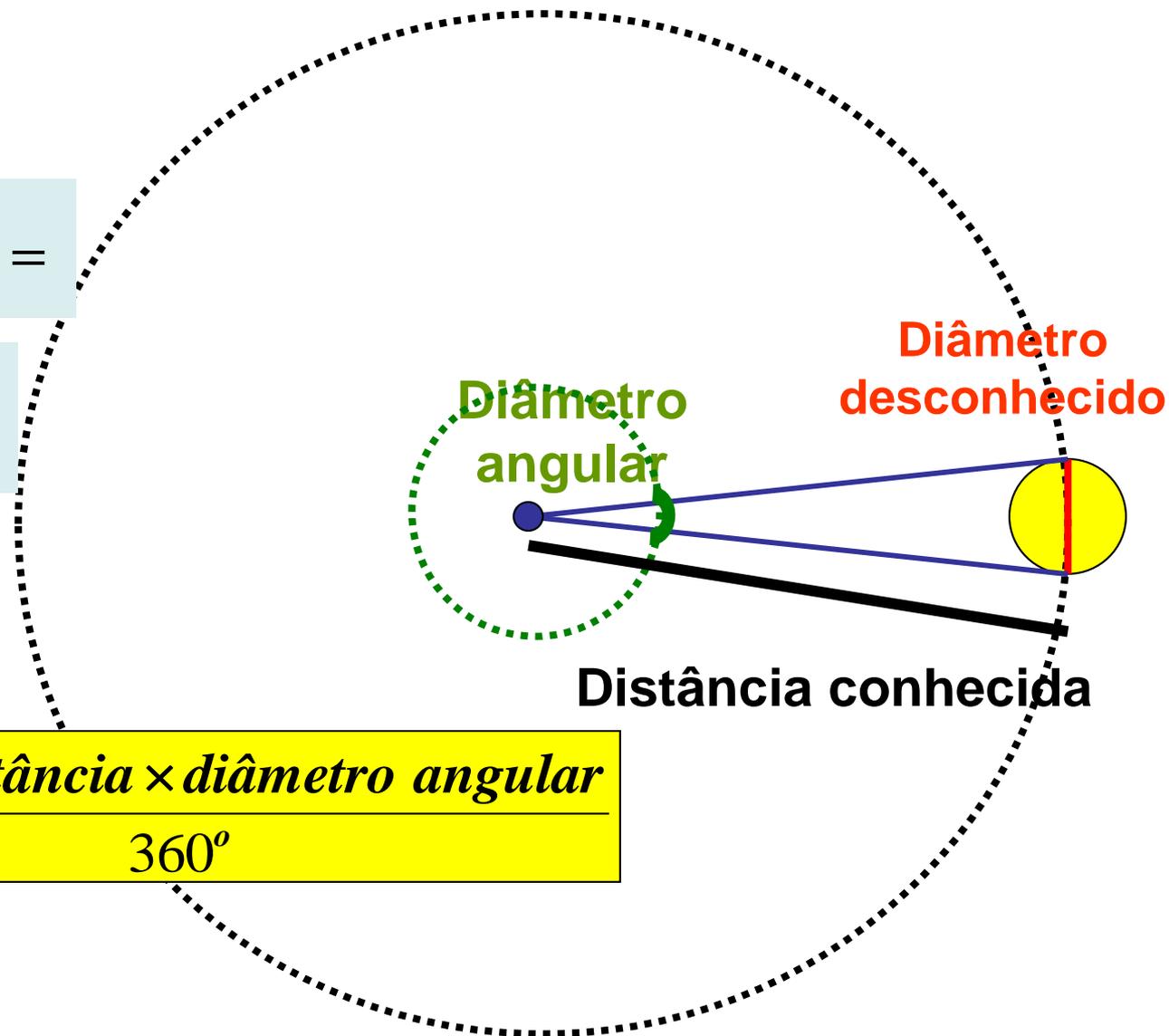
Estimativa das quantidades exibidas no slide anterior

RAIO DO SOL

$$\frac{\textit{diâmetro angular}}{360^{\circ}} =$$

$$\frac{\textit{diâmetro (km)}}{2\pi \textit{distância(km)}}$$

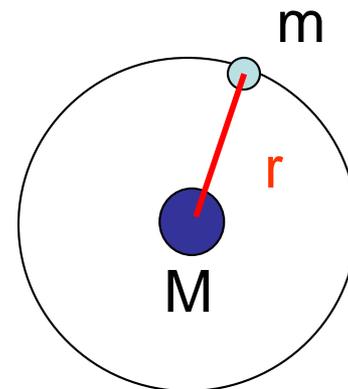
$$\textit{diâmetro} = \frac{2 \times \pi \times \textit{distância} \times \textit{diâmetro angular}}{360^{\circ}}$$



MASSA DO SOL

Dados: r = distância Sol+Terra

v = velocidade orbital da Terra



Lei de Newton para uma órbita esférica:

$$F_G = \frac{GmM}{r^2}$$

G = constante da gravitação = $6.7 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$

Força centrífuga: $F_c = m \times a$

a = aceleração da Terra (massa m)

$$F_c = m \times \frac{v^2}{r}$$

Sabemos que:

Aceleração = velocidade/tempo

velocidade = distância/tempo

$$\Rightarrow a = v^2/r$$

Igualando a força gravitacional com a centrífuga:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{GmM}{r^2}$$

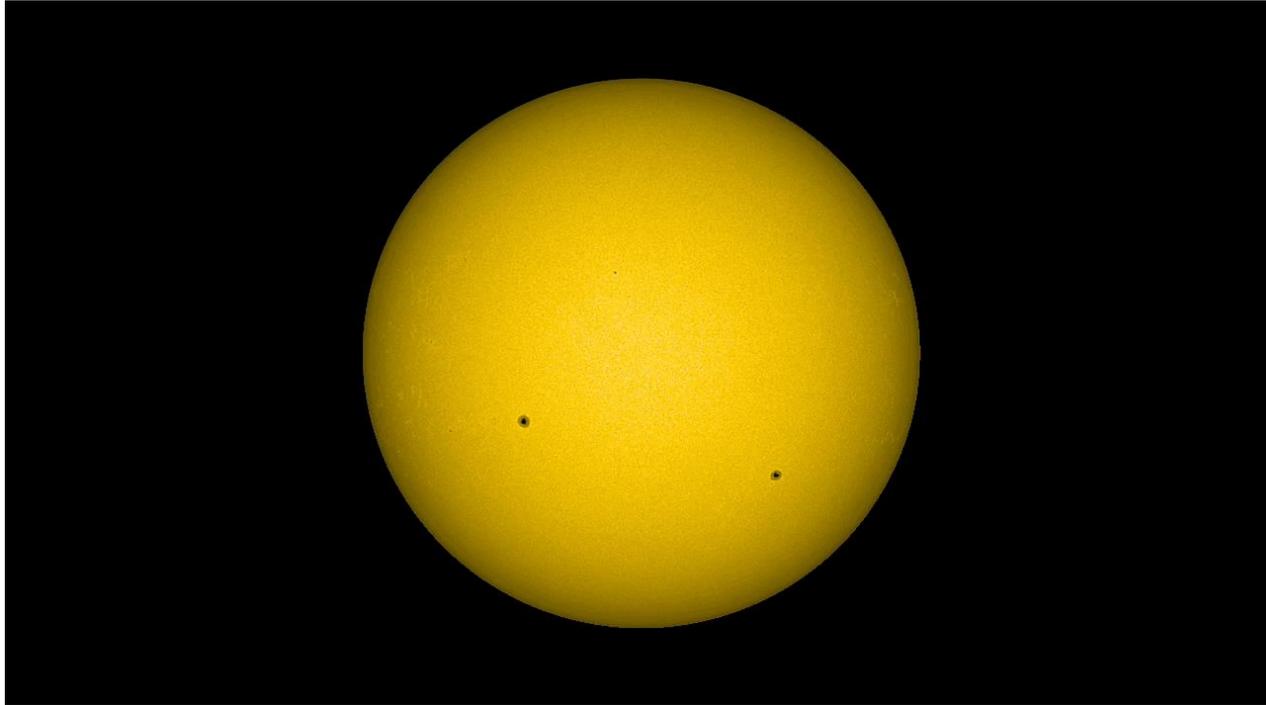


$$M = \frac{r \times v^2}{G}$$

Ou 3ª lei de Kepler:
 $M \sim a^3/P^2$

ROTAÇÃO DO SOL

Através do movimento das manchas solares



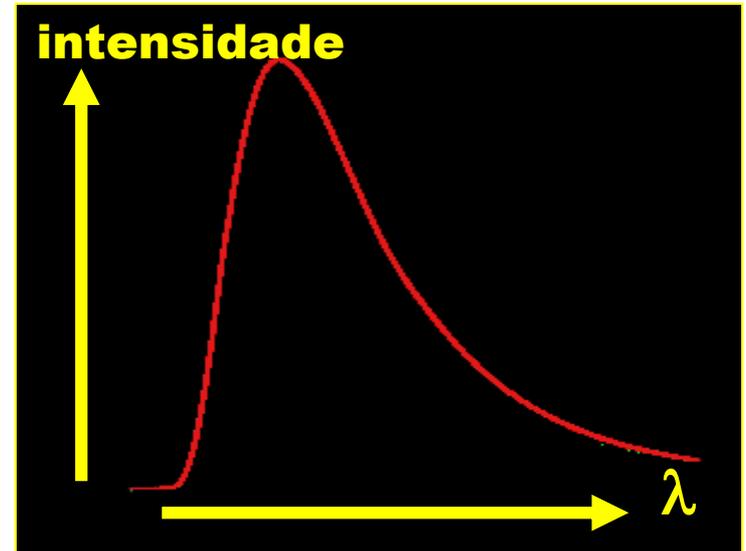
Diferentes velocidade de rotação em posições diferentes indicam que o Sol não é um corpo sólido.

O mesmo acontece com os planetas gasosos.

Chama-se **ROTAÇÃO DIFERENCIAL**.

TEMPERATURA SUPERFICIAL DO SOL

CURVA DE PLANCK OU
DE CORPO NEGRO



LEI DA RADIAÇÃO:

LEI DE VIEW

$$Tw(10^3 K) = \frac{2900 (nm \cdot K)}{\lambda_{max}(nm)}$$

LUMINOSIDADE DO SOL

LUMINOSIDADE É A TAXA DE ENERGIA EMITIDA PELO SOL (ENERGIA POR SEGUNDO) EM TODAS AS DIREÇÕES

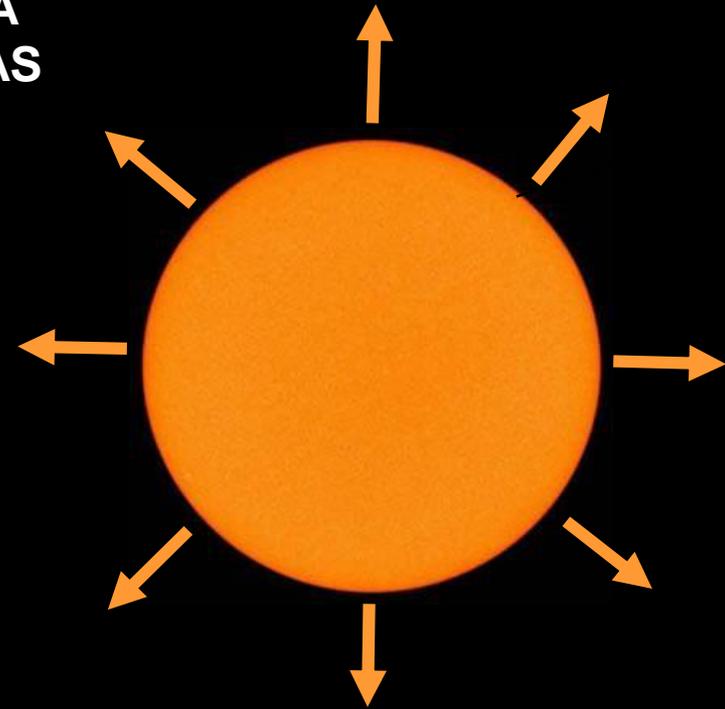
$$L = 4\pi R^2 \times F(R)$$

- Onde $F(R)$ é o fluxo que é a energia emitida por área e por tempo em R , onde R é o raio do sol
- $4\pi R^2$ é a área da superfície esférica

Lei de Stefan-Boltzmann

$$F(R) = \sigma T_{eff}^4$$

**ENERGIA TOTAL POR SEGUNDO
= LUMINOSIDADE DO SOL = $3,9 \times 10^{26}$ W**



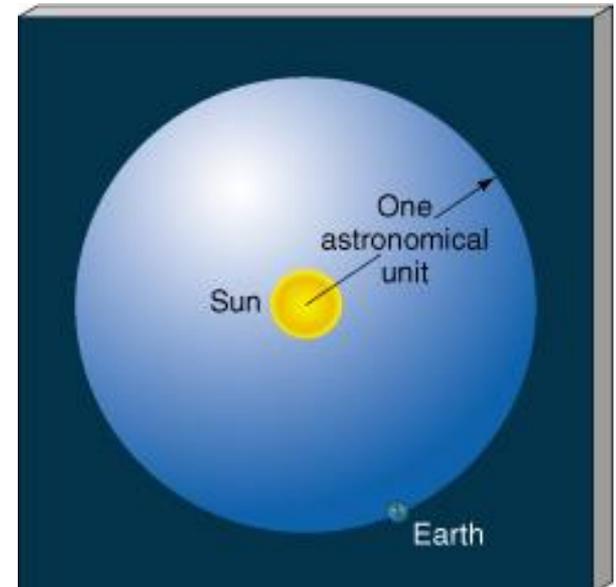
CONSTANTE SOLAR

FLUXO DA RADIAÇÃO LUMINOSA
RECEBIDA NA TERRA (Energia/(área×tempo))
EM TODOS OS COMPRIMENTOS DE ONDA.

Conhecendo L e a distância terra-sol
 $d=1,5 \times 10^{11}$ m

$$E_T = F(d) = \frac{L}{4\pi d^2}$$

$$E_T = \text{constante solar} = 1379 \text{ W/m}^2$$



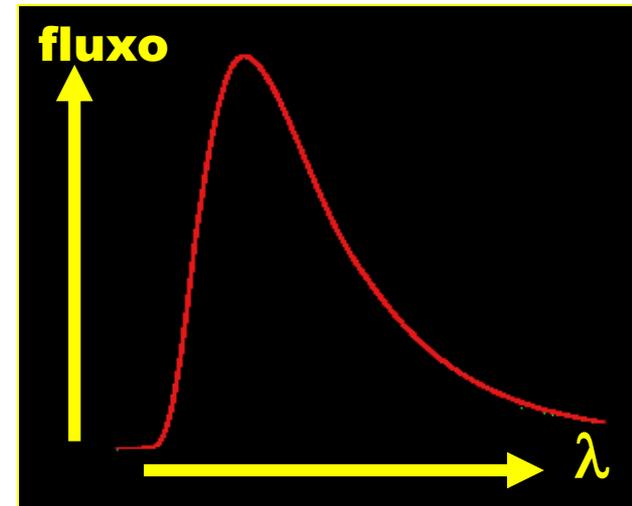
CONSTANTE SOLAR

Outra forma de cálculo

FLUXO DA RADIAÇÃO LUMINOSA RECEBIDA NA
TERRA (Energia/(área×tempo) EM TODOS OS λ

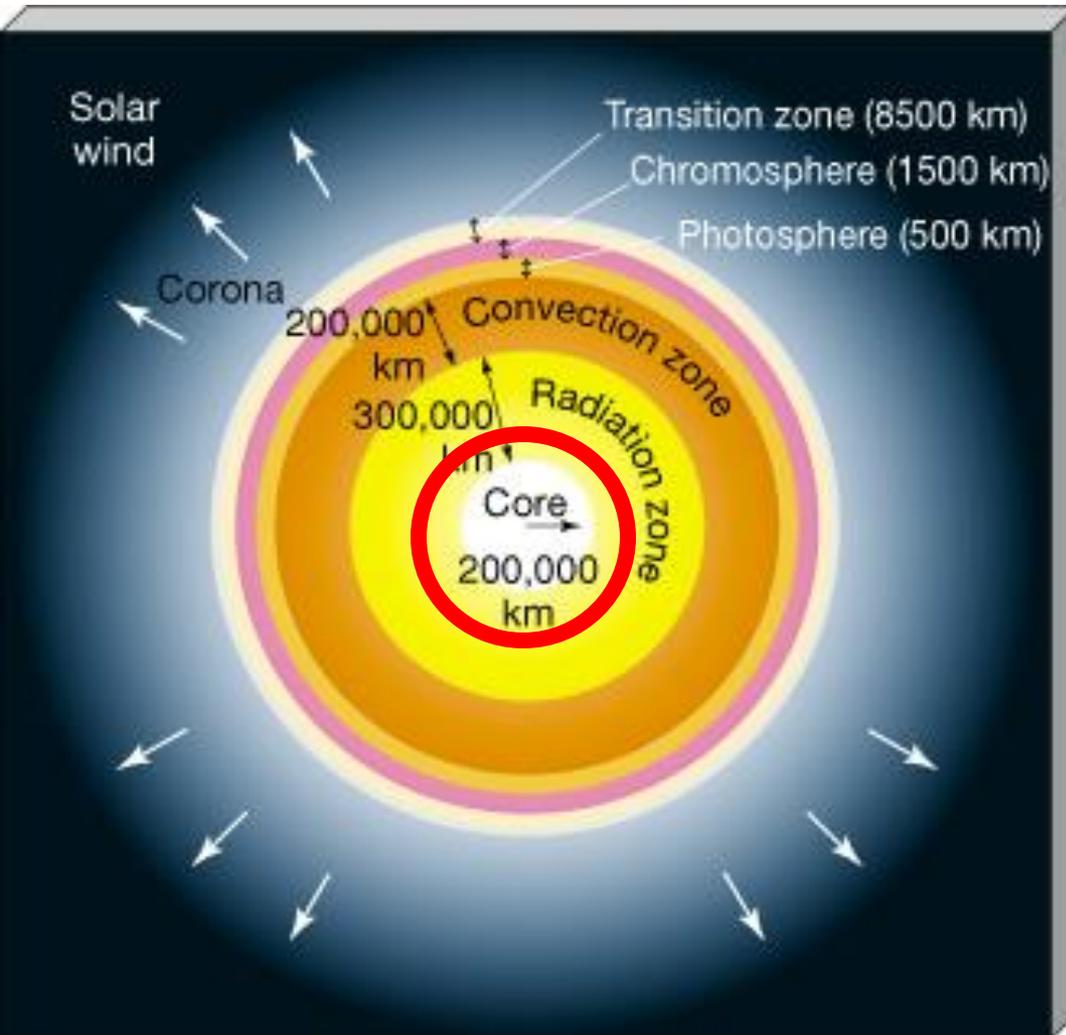
Determinando a área:

$$\int f(\lambda) d\lambda$$



$$E_T = \text{constante solar} = 1379 \text{ W/m}^2$$

ESTRUTURA DO SOL



NÚCLEO:

Tem uma temperatura de cerca de 15×10^6 K e densidade de 150.000 kg/m^3 (dens. da Terra = 5500 kg/m^3) ($30 \times \rho_{\oplus}$)

é onde a energia é gerada

Mecanismo de geração de energia é por FUSÃO NUCLEAR

FUSÃO NUCLEAR

Fusão nuclear é quando dois núcleos de um dado elemento se unem para formar um núcleo de um outro elemento



No centro do Sol ocorre o que chamamos de CADEIA P-P, a transformação de H em Hélio

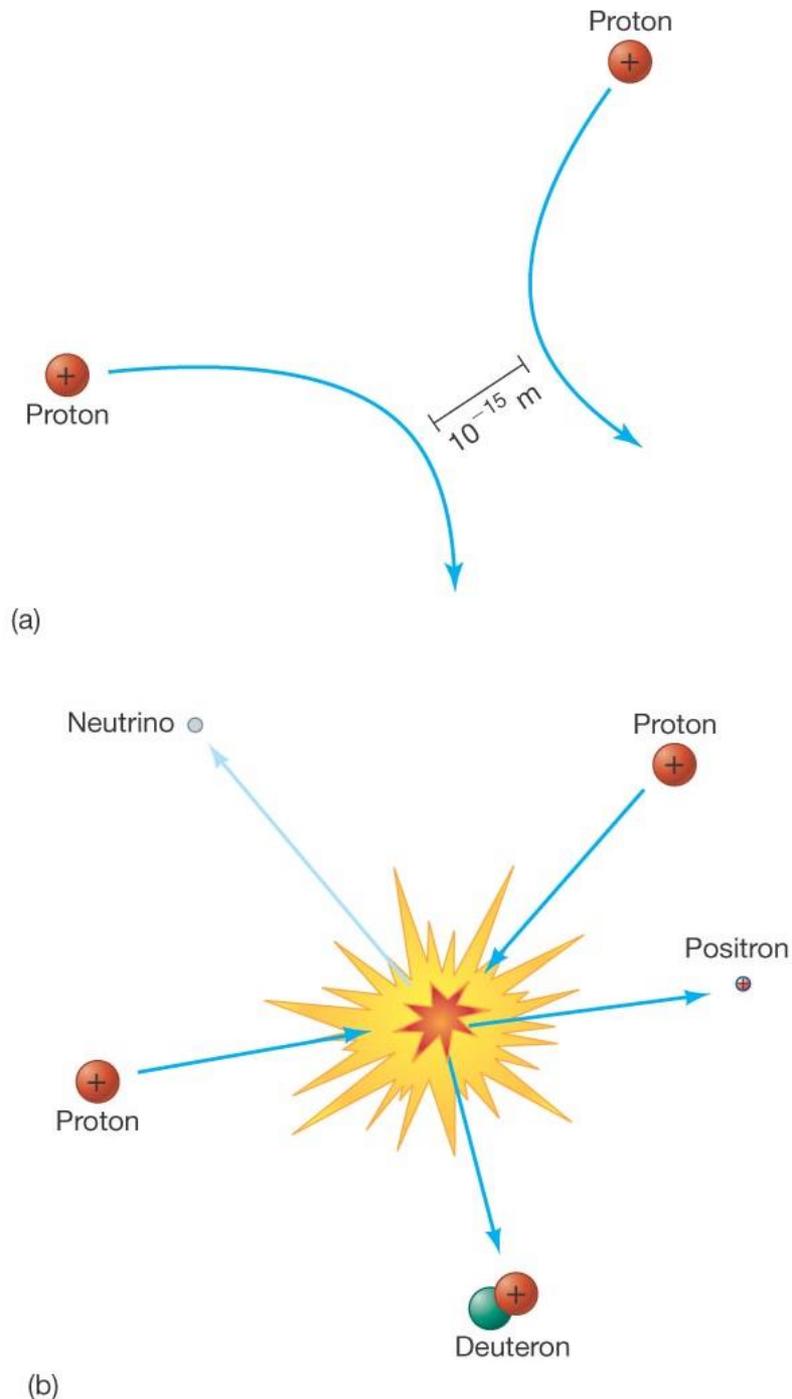
Fusão nuclear requer que núcleos de igual carga elétrica cheguem próximos o suficiente para fundir
⇒ condição de T e P altas:

T ~ dezenas de milhões de K.

P ~ 340 bilhões de P_{\oplus} (superfície)

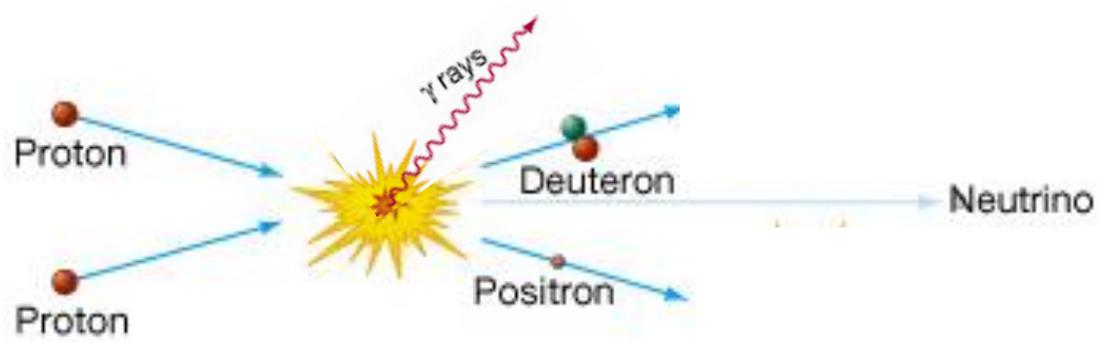
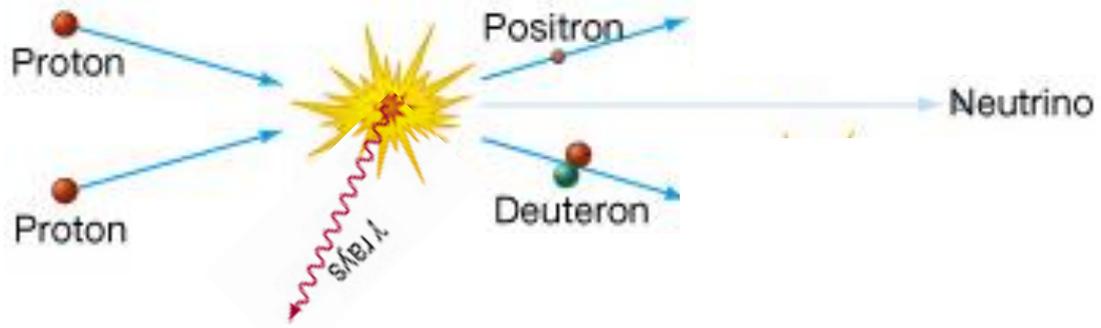
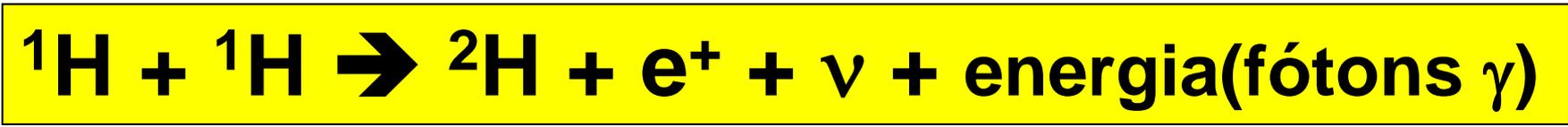
A distâncias da ordem de 10^{-15} m, a barreira de coulomb é ultrapassada de modo que a FORÇA NUCLEAR FORTE começa agora a atuar

(a essas distâncias $F_{NF} > F_{emag}$)

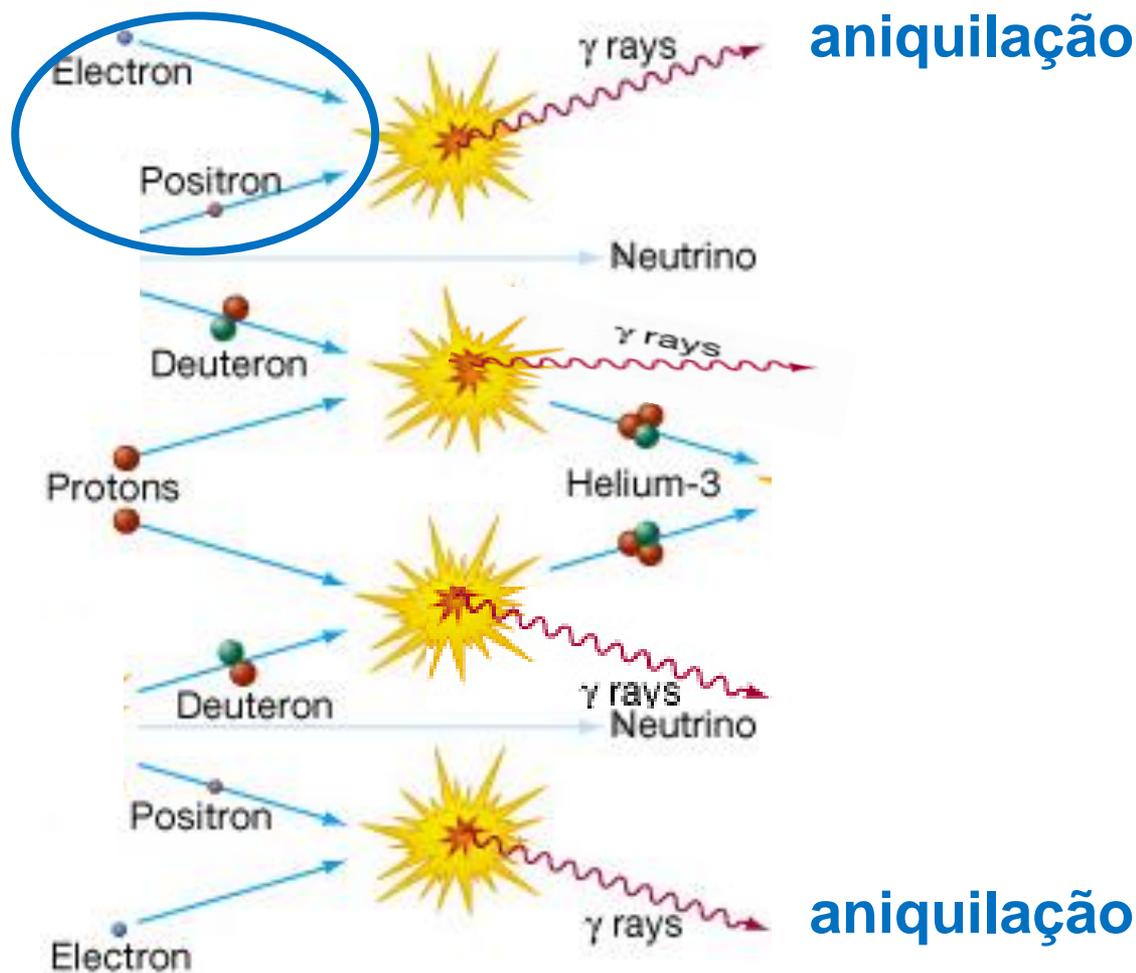


1ª fase: 2 prótons ^1H colidem gerando um núcleo de deutério ^2H ($1\text{p} + 1\text{n}$) + partículas leves + energia

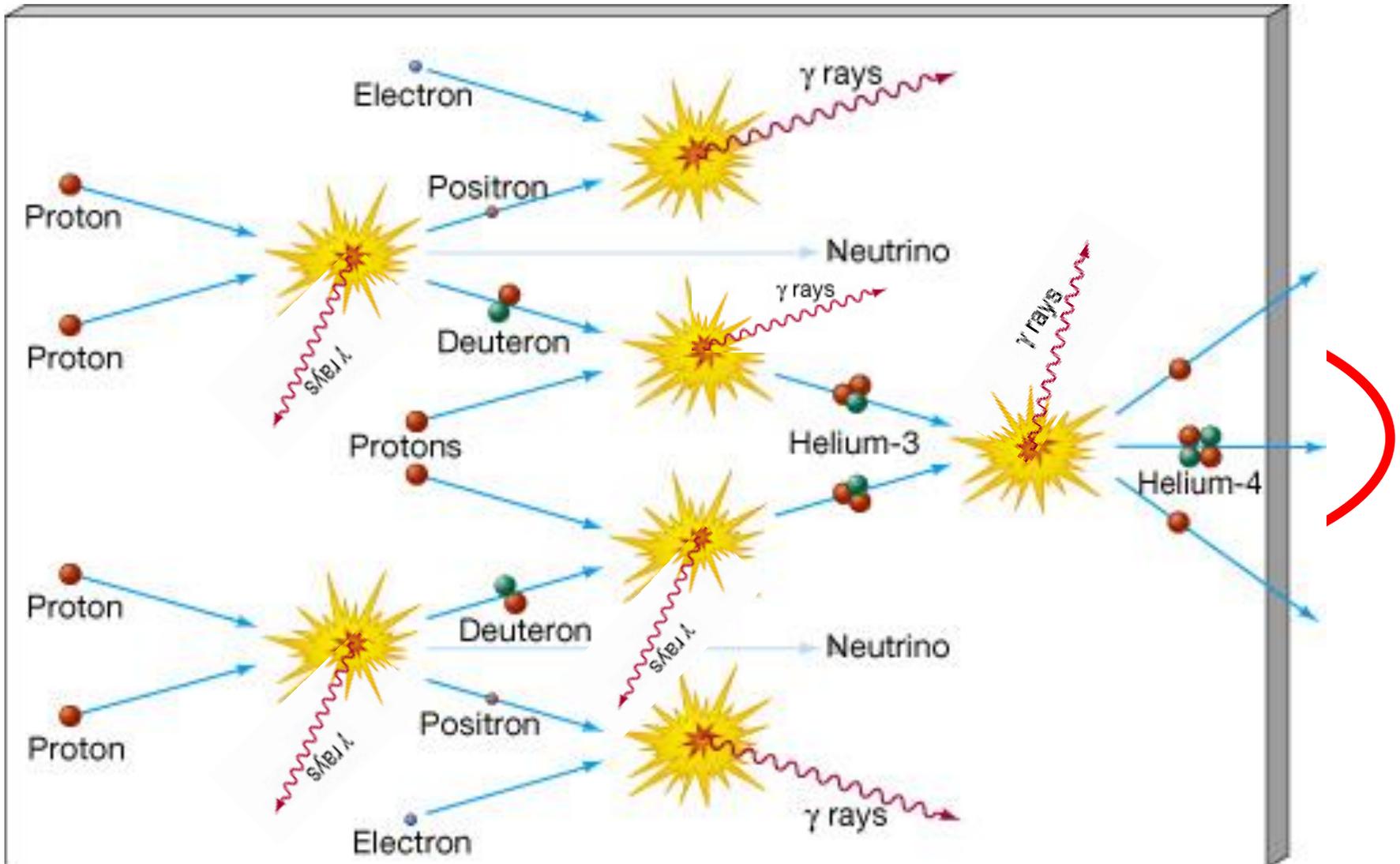
Pósitron e neutrino são liberados quando um próton é transformado em um nêutron.



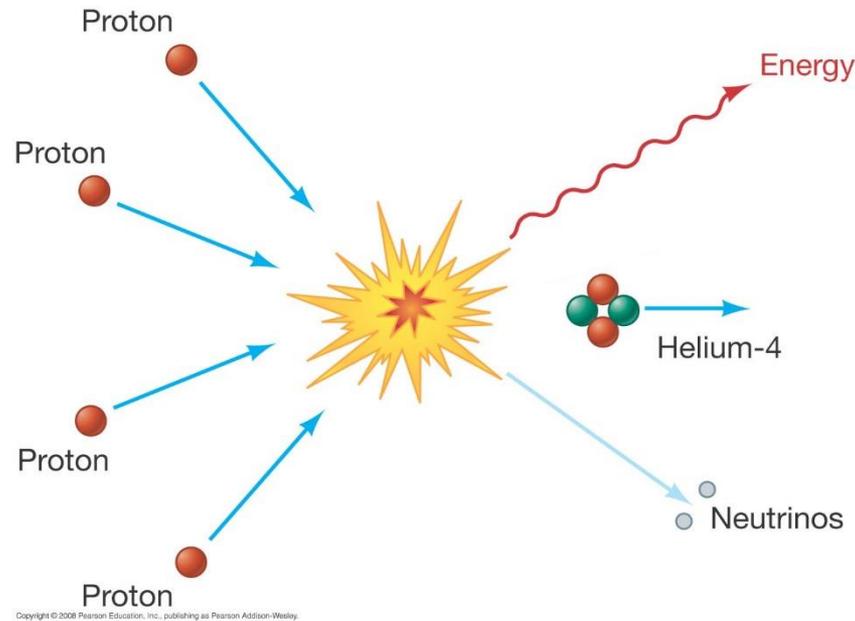
2ª fase: 1 deutério ^2H colide com 1 próton gerando um núcleo de um isótopo do Hélio ^3He (2 p + 1 n) e energia sob forma de fótons γ



3ª fase: 2 isótopos do hélio ^3He colidem gerando um núcleo de Hélio ^4He (formado por 2 p e 2 n) e 2 prótons



Resumindo o processo, a transformação de Hidrogênio em Hélio resulta em:



${}^4\text{He}$ fica no núcleo

Energia e neutrinos são liberados para fora da estrela

núcleo1 + núcleo2 → núcleo3 + energia

Porque energia é liberada nas reações de fusão?

Massa (núcleo1 + núcleo2) > Massa (núcleo3)

então a diferença de massa que falta deve aparecer sob forma de energia segundo a equação de Einstein :

$$***E = \Delta m c^2***$$

Equivalência massa-energia: desde que c é um número grande, uma pequena quantidade de massa é equivalente a uma grande quantidade de energia.

LEI DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA E MASSA: $\frac{E}{m} = constante$

Massa (núcleo1+núcleo2) > Massa (núcleo3) ⇒ a massa desaparecida deverá reaparecer sob forma de energia.

Ex. cálculo de energia liberada

Primeira fase



$$E = \Delta m c^2$$

Dados: ${}^1\text{H}$ massa=1,007276467 u.m.a.

${}^2\text{H}$ massa=2,01410178 u.m.a.

e^+ massa = $5,485799 \times 10^{-7}$ u.m.a.

onde u.m.a= $1,660539040 \times 10^{-27}$ kg = $931,4940954$ MeV/ c^2

Então:

- $2 \times {}^1\text{H} = 2,014552934 \text{ u.m.a.} = 1876,54416289 \text{ MeV}/c^2$
- ${}^2\text{H} = 2,01410178 \text{ u.m.a.} = 1876,1239156 \text{ MeV}/c^2$
- $e^+ = 5,10999 \times 10^{-4} \text{ MeV}/c^2$

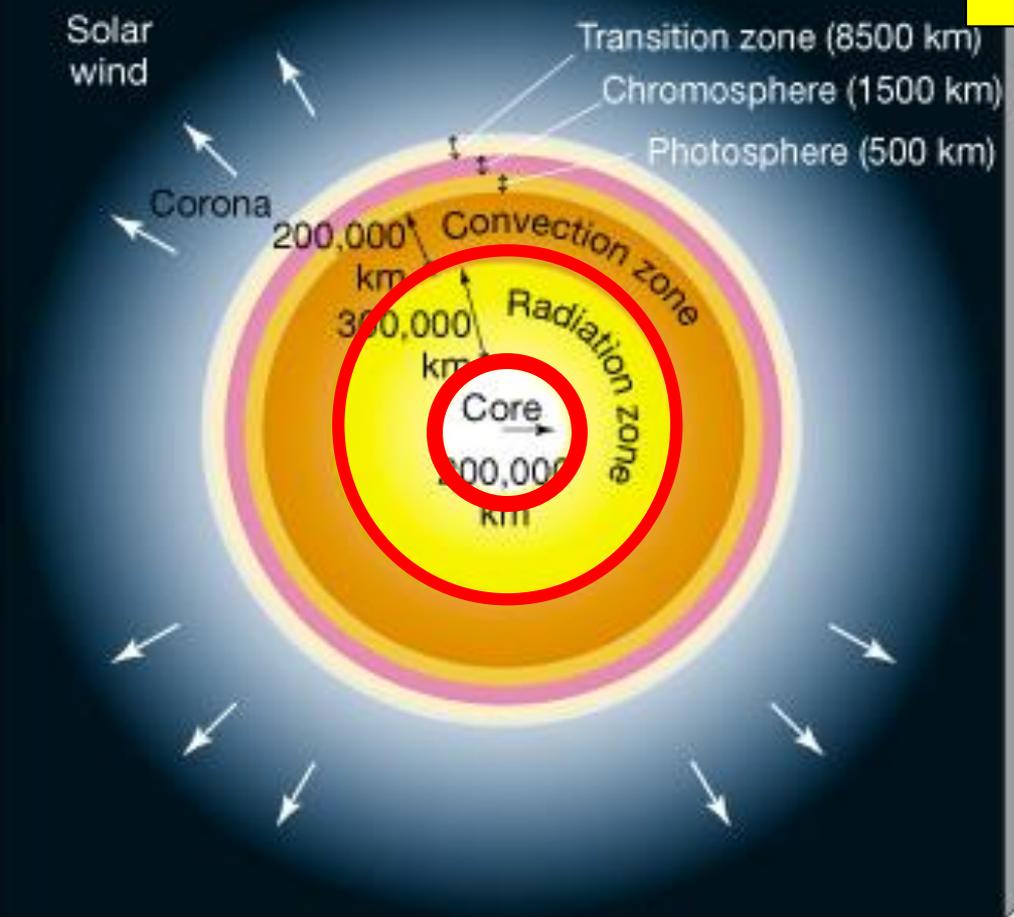
$$\begin{aligned} \Delta m &= 1876,54416289 - (1876,1239156 + 5,10999 \times 10^{-4}) \\ &= 0,419736 \text{ MeV}/c^2 \end{aligned}$$

$$E \sim 0,42 \text{ MeV}$$

A medida que os raios γ gerados no núcleo passam pelas outras camadas do Sol, eles vão interagindo com os outros átomos, sendo absorvidos e re-emitidos em comprimentos de onda cada vez maiores (energia cada vez menor).

Essa energia reflete a diferente temperatura do gás em cada camada da estrela.

ESTRUTURA DO SOL



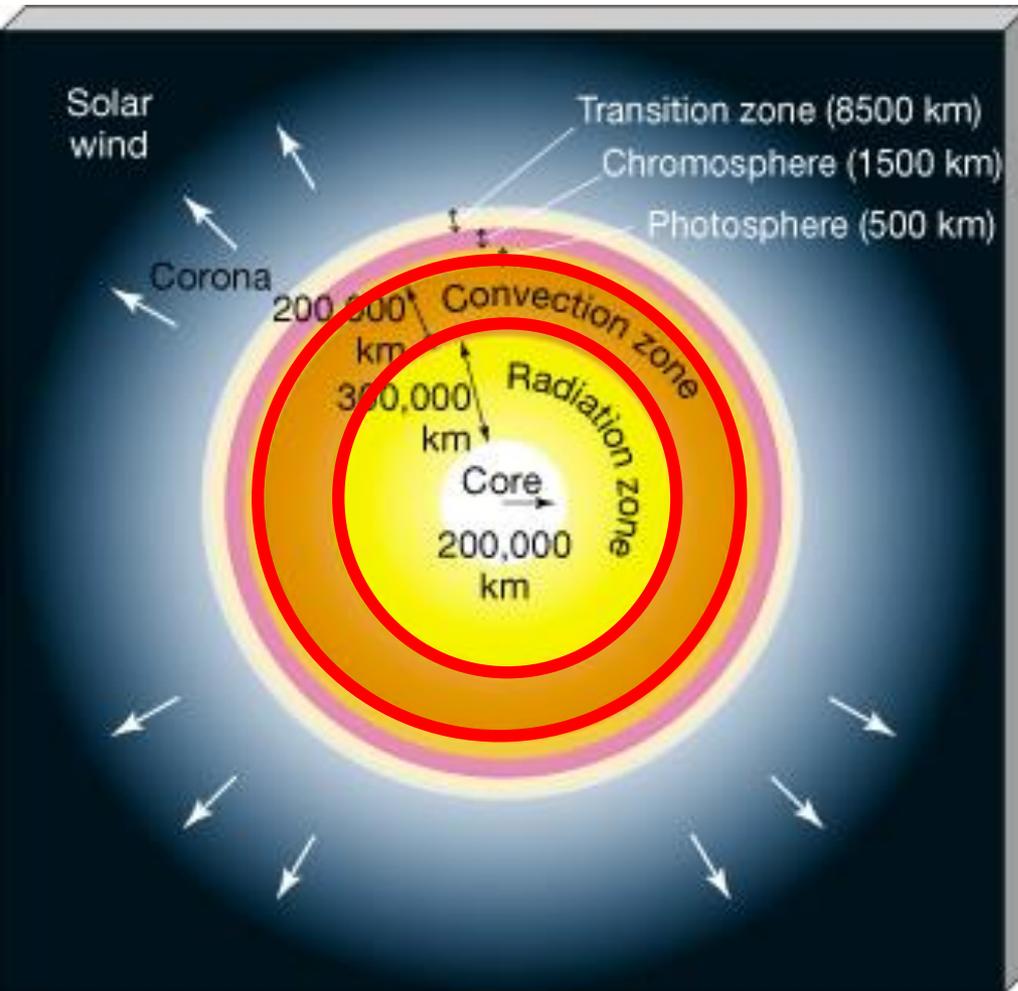
ZONA DE RADIAÇÃO :

Tem uma temperatura de cerca de 7×10^6 K e densidade de 15.000 kg/m^3 . ($3 \times \rho_{\oplus}$)

Energia é transportada por radiação eletromagnética.

- 1) A maior parte dos fótons γ gerados no núcleo são absorvidos nesta camada.
- 2) A T mais baixa possibilita que elétrons voltem a se ligar com os núcleos atômicos, possibilitando a re-emissão dos fótons absorvidos pelos átomos.

ESTRUTURA DO SOL



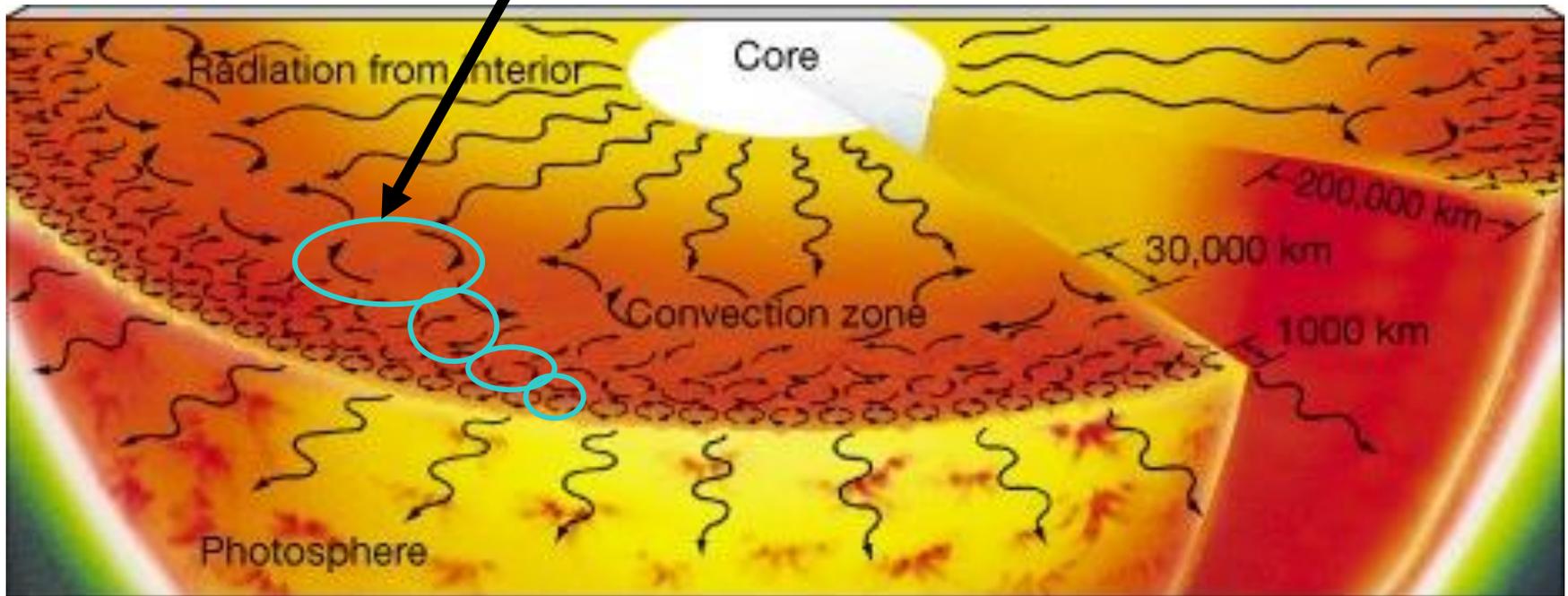
Zona de convecção :

Tem uma temperatura de cerca de 2×10^6 K e densidade de 150 kg/m^3 . (3% da ρ_{\oplus})

Energia é transportada por convecção.

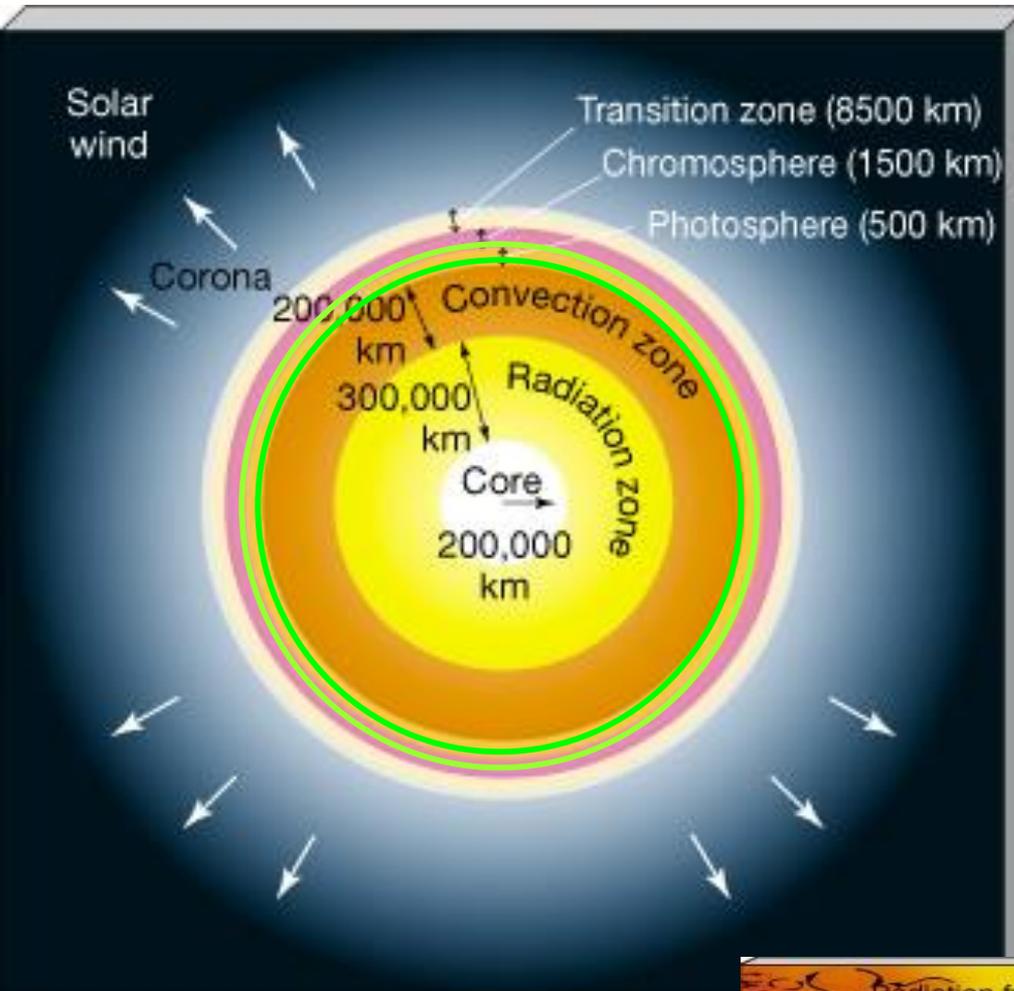
Gás solar mais quente se move fisicamente para cima na direção da superfície e o gás mais frio para baixo, criando um padrão chamado de células convectivas.

Células convectivas



Células de convecção vão desde 30.000 a 1000 km de extensão.

ESTRUTURA DO SOL

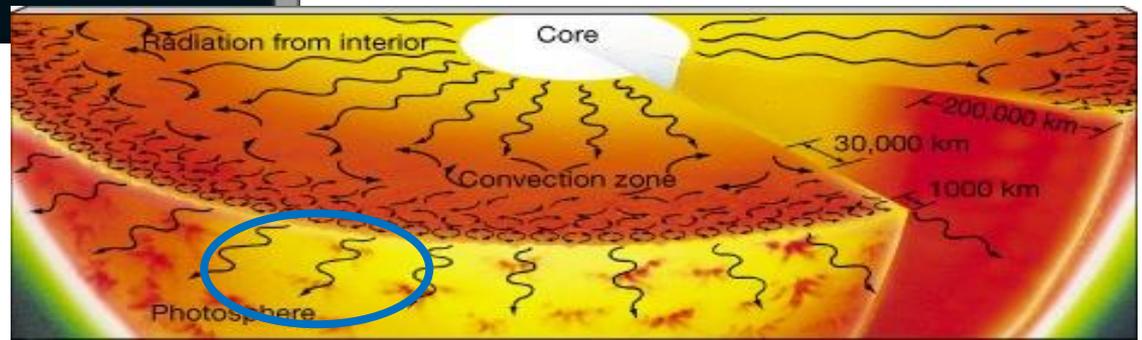


Fotosfera :

Camada fina de somente 500 km de espessura.

Tem uma temperatura de cerca de 5800 K e densidade de $2 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$.

A baixa densidade do gás faz com que a convecção deixe de ser o principal transporte de energia, retornando novamente ao transporte por radiação.

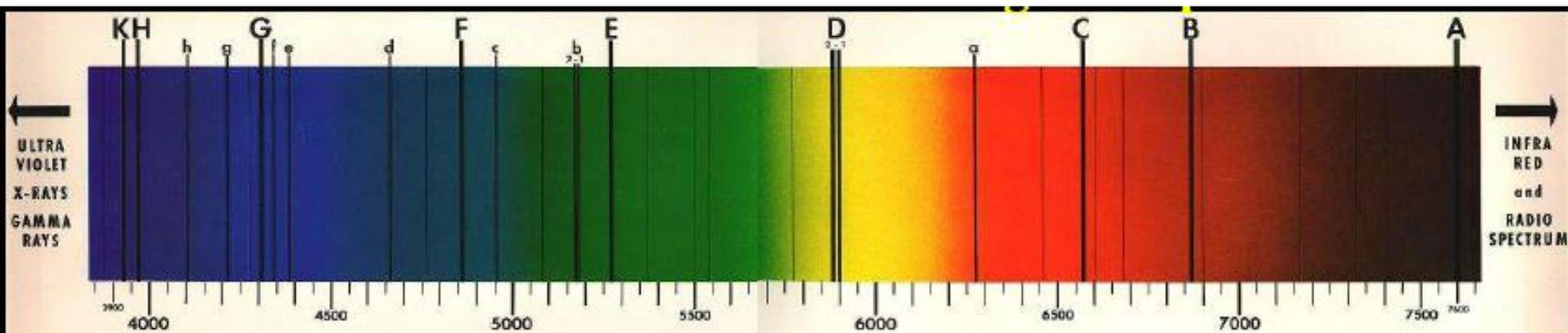


FOTOSFERA

A radiação vinda das camadas interiores escapa livremente para fora do Sol, a não ser quando os fótons tem a energia “certa” para excitar os átomos da fotosfera, sendo assim absorvidos e re-emitidos.

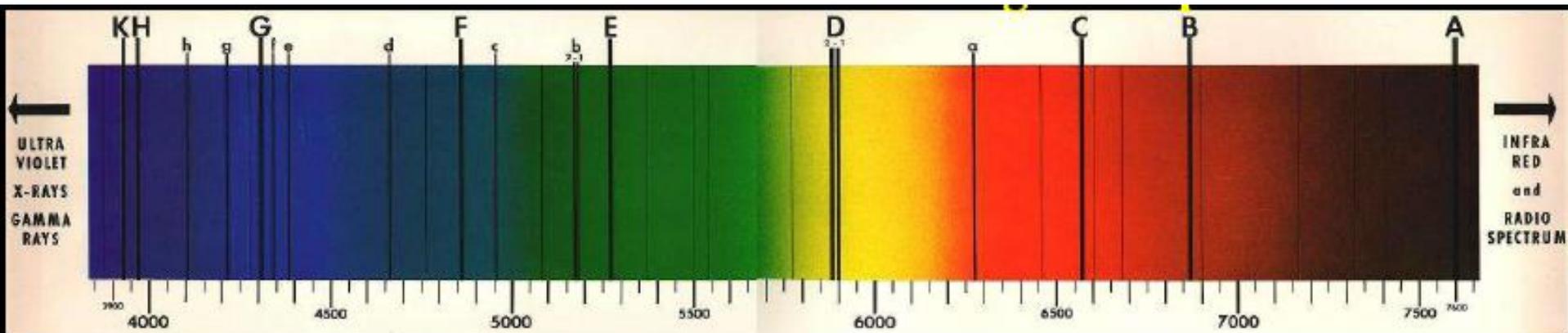
O espectro de absorção que observamos vem da FOTOSFERA

Linhas de absorção vindas da fotosfera nos informa sobre a composição química do Sol



FOTOSFERA

Linhas de Fraunhofer

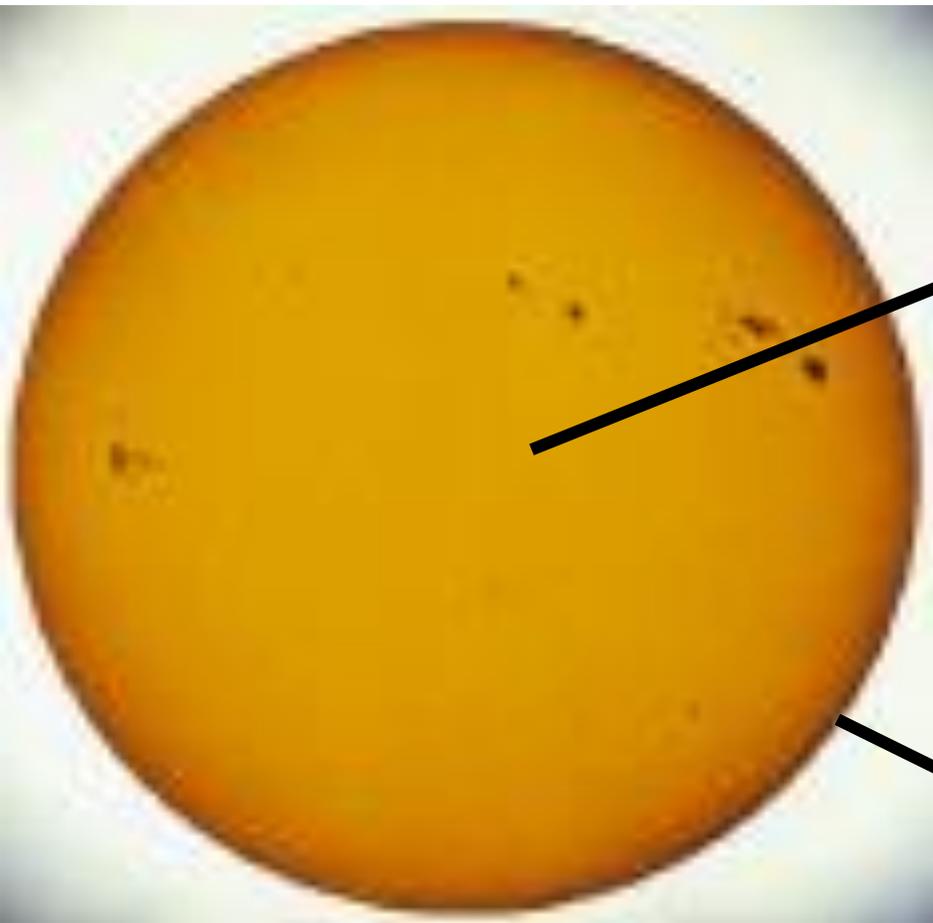


linha elemento $\lambda(\text{Å})$

A-banda	O ₂	7564-7621
B-banda	O ₂	6867-6884
C	H	6563
D-1,2	Na	5896-5890
E	Fe	5270
b-1,2	Mg	5184-5173
c	Fe	4958

F	H	4861
d	Fe	4668
e	Fe	4384
f	H	4340
G	Fe-Ca	4308
g	Ca	4227
h	H	4102
H	Ca	3968
K	Ca	3934

FOTOSFERA

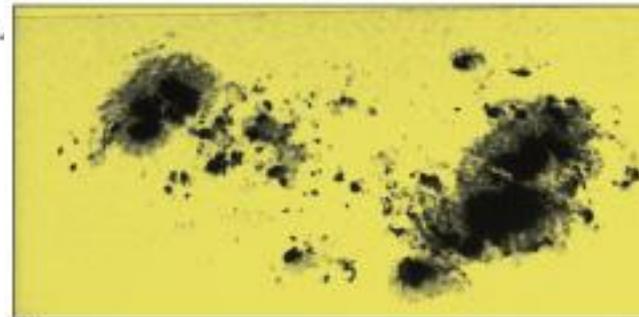
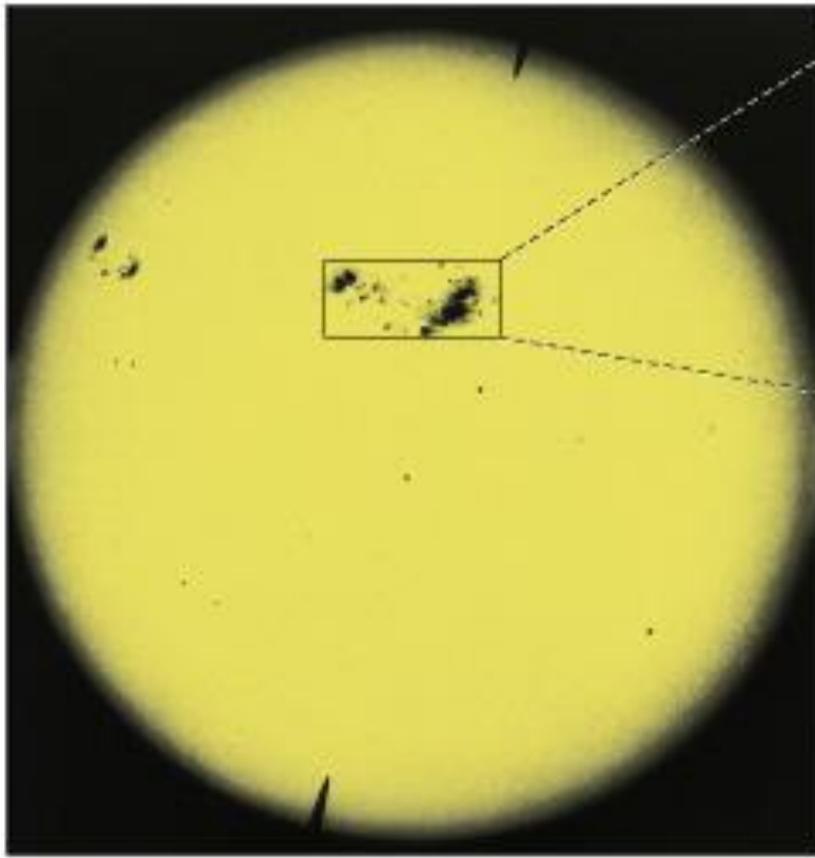


Na direção do centro vê-se as camadas mais profundas da fotosfera (mais brilhantes)

Contorno mais escuro: vê-se somente as camadas mais frias da fotosfera

FOTOSFERA

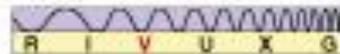
A fotosfera contém manchas solares que são regiões mais escuras quando observadas no visível, podendo medir ~ 10.000 km (tamanho da Terra)



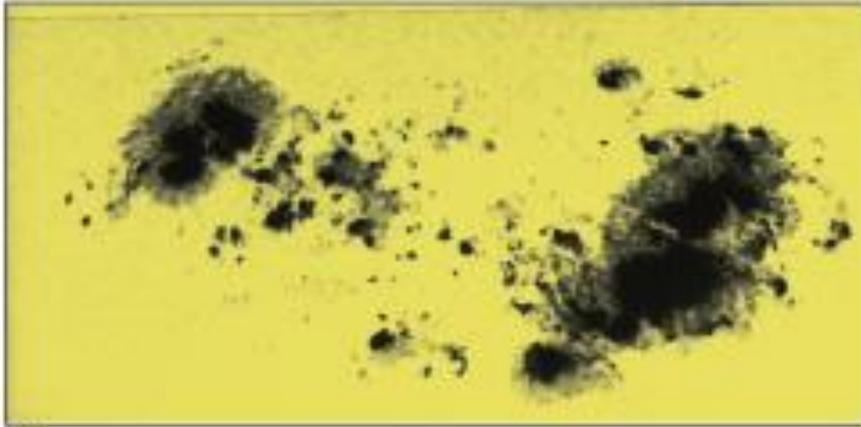
(a)



(b) 10,000 km

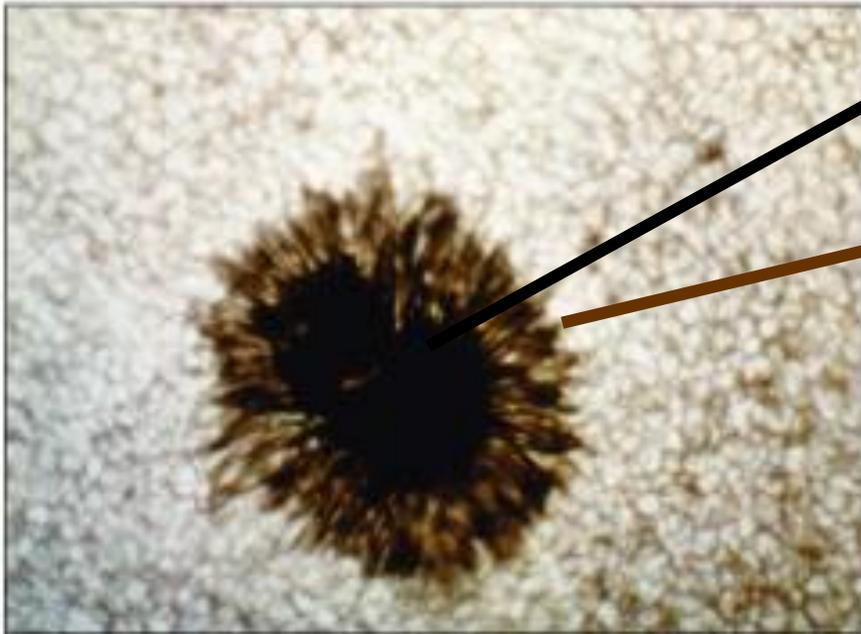


FOTOSFERA



As manchas são ligeiramente mais frias do que a fotosfera, por isso aparecem mais escuras no visível.

(a)



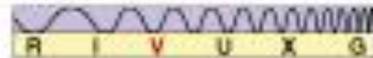
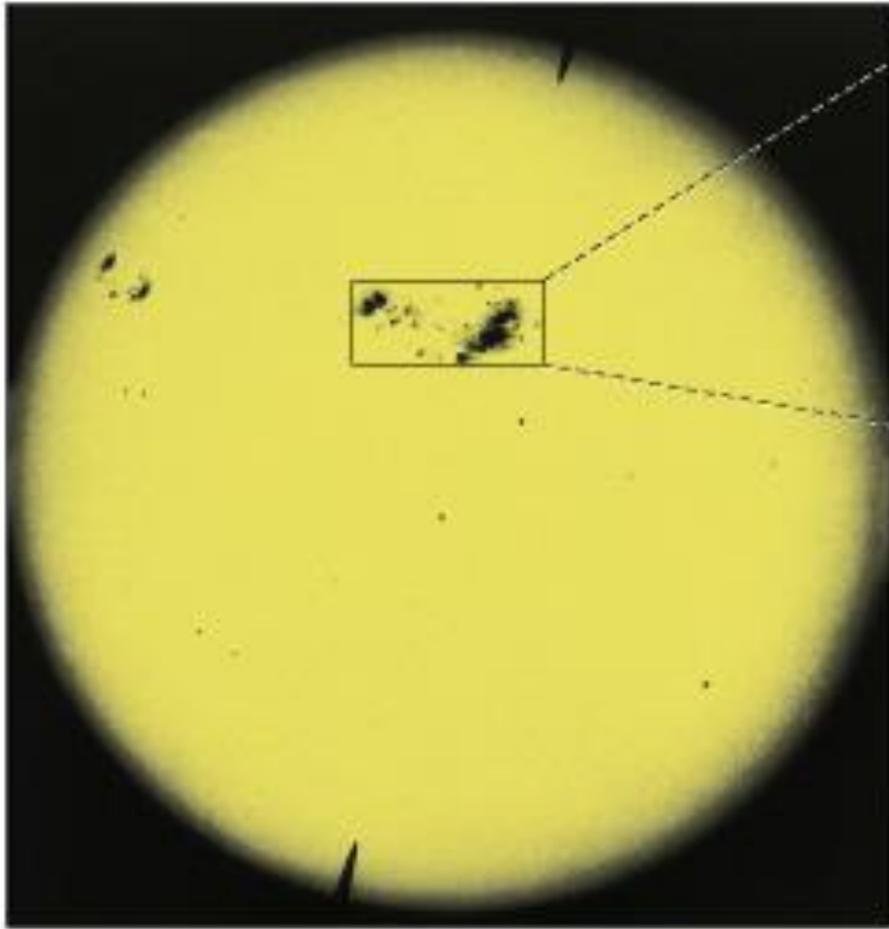
Umbra: 4500 K

Penumbra: 5500 K

(b) ← 10,000 km →



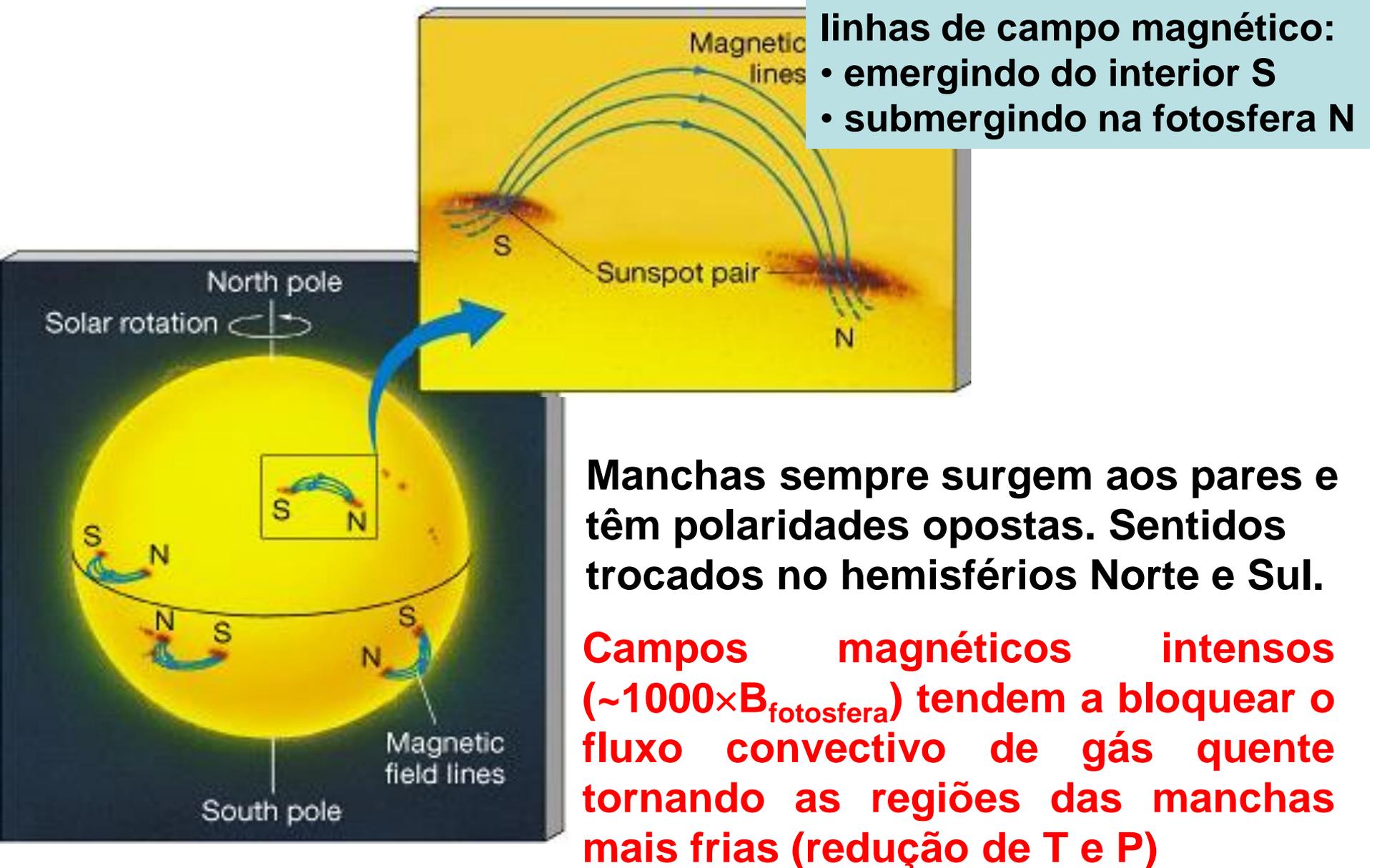
FOTOSFERA



As manchas tem um tempo de vida limitado, podendo durar de 1 a 100 dias.

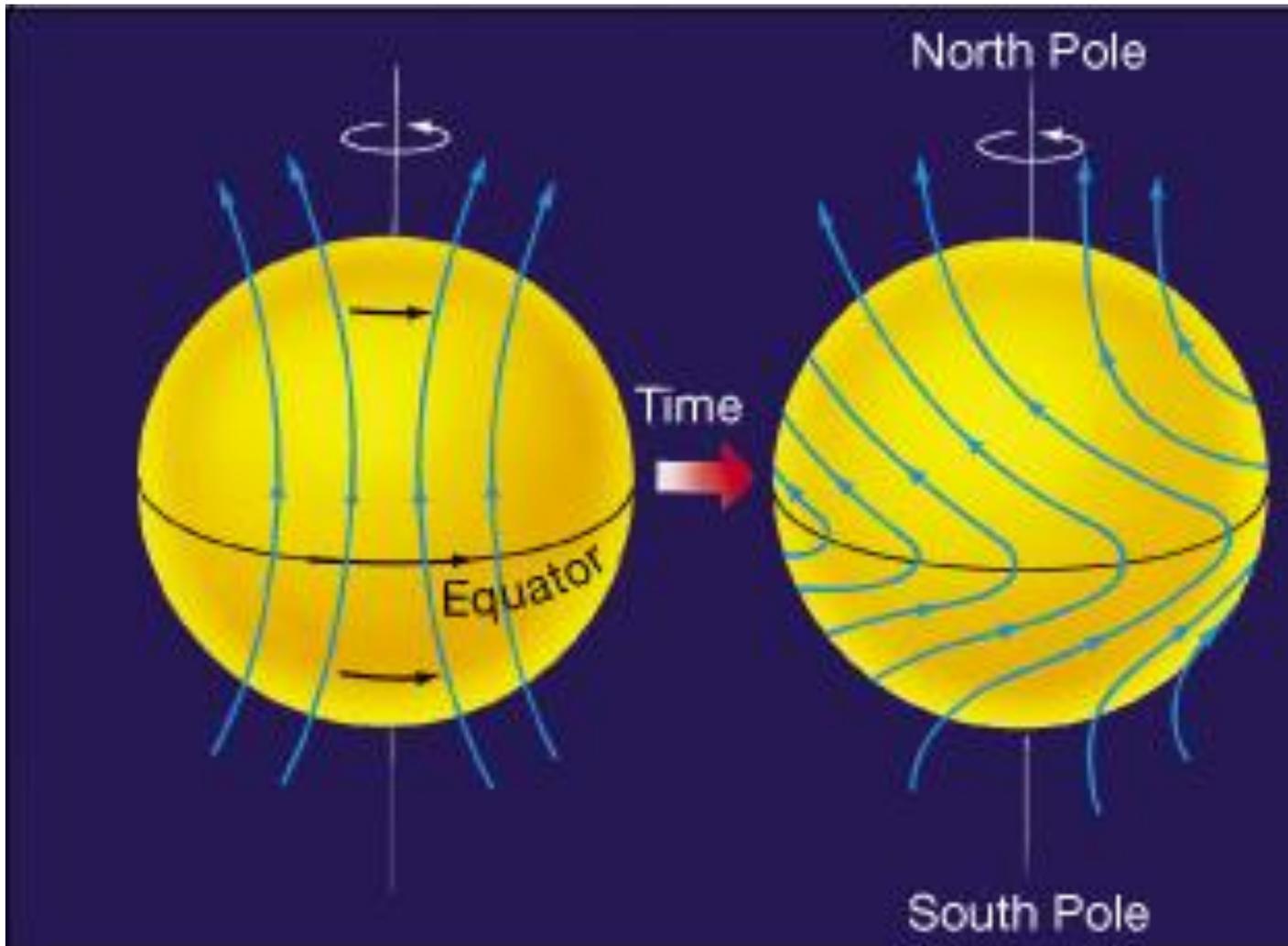
As manchas se movem junto com a rotação do Sol, então medindo o deslocamento delas em cada latitude têm-se as velocidades de rotação do Sol.

CAUSA DAS MANCHAS SOLARES = CAMPO MAGNÉTICO

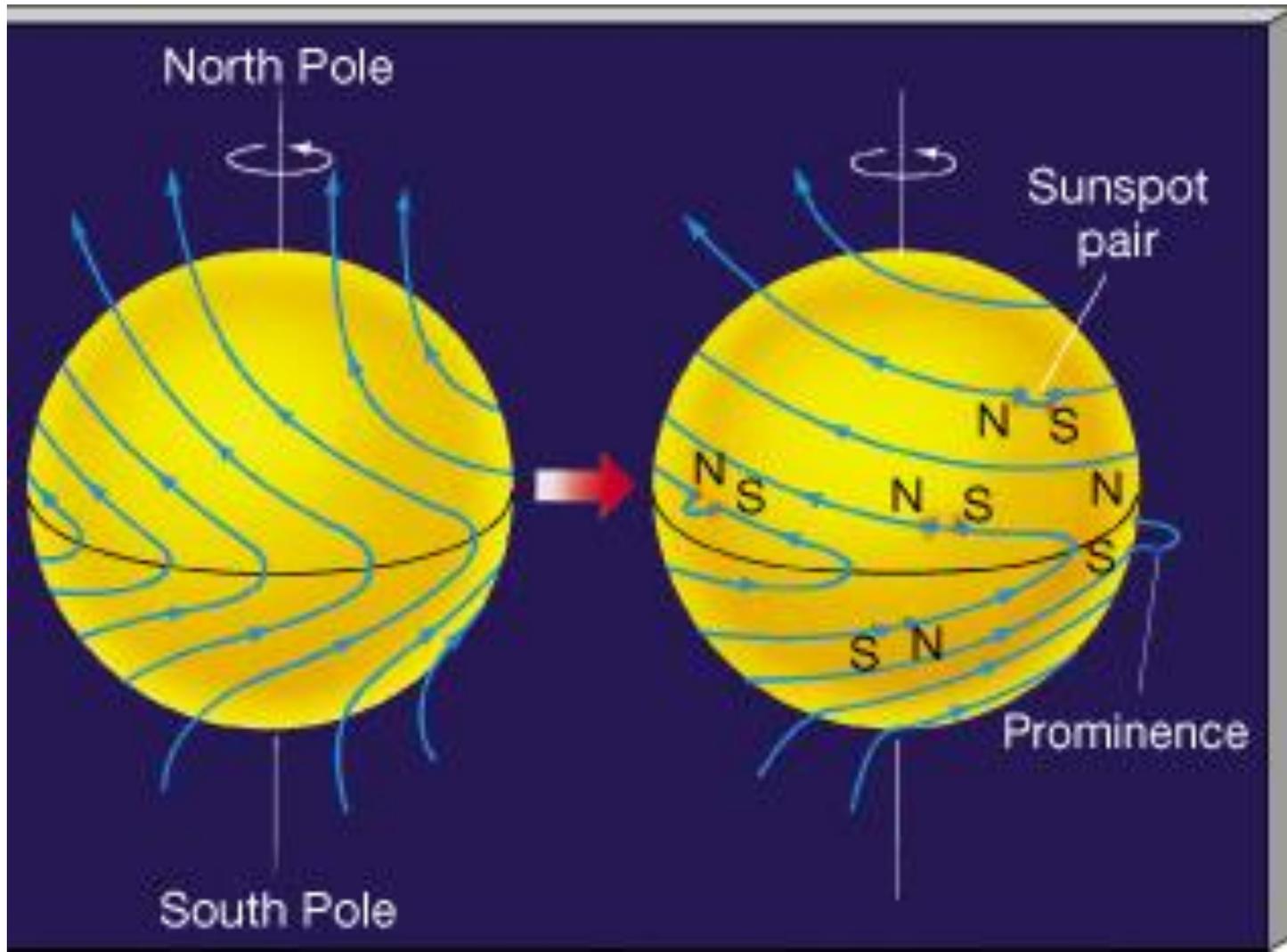


Explicação:

- as linhas de campo magnético do Sol são distorcidas pela rotação diferencial (rotação mais rápida perto do equador).

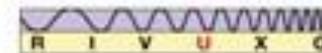
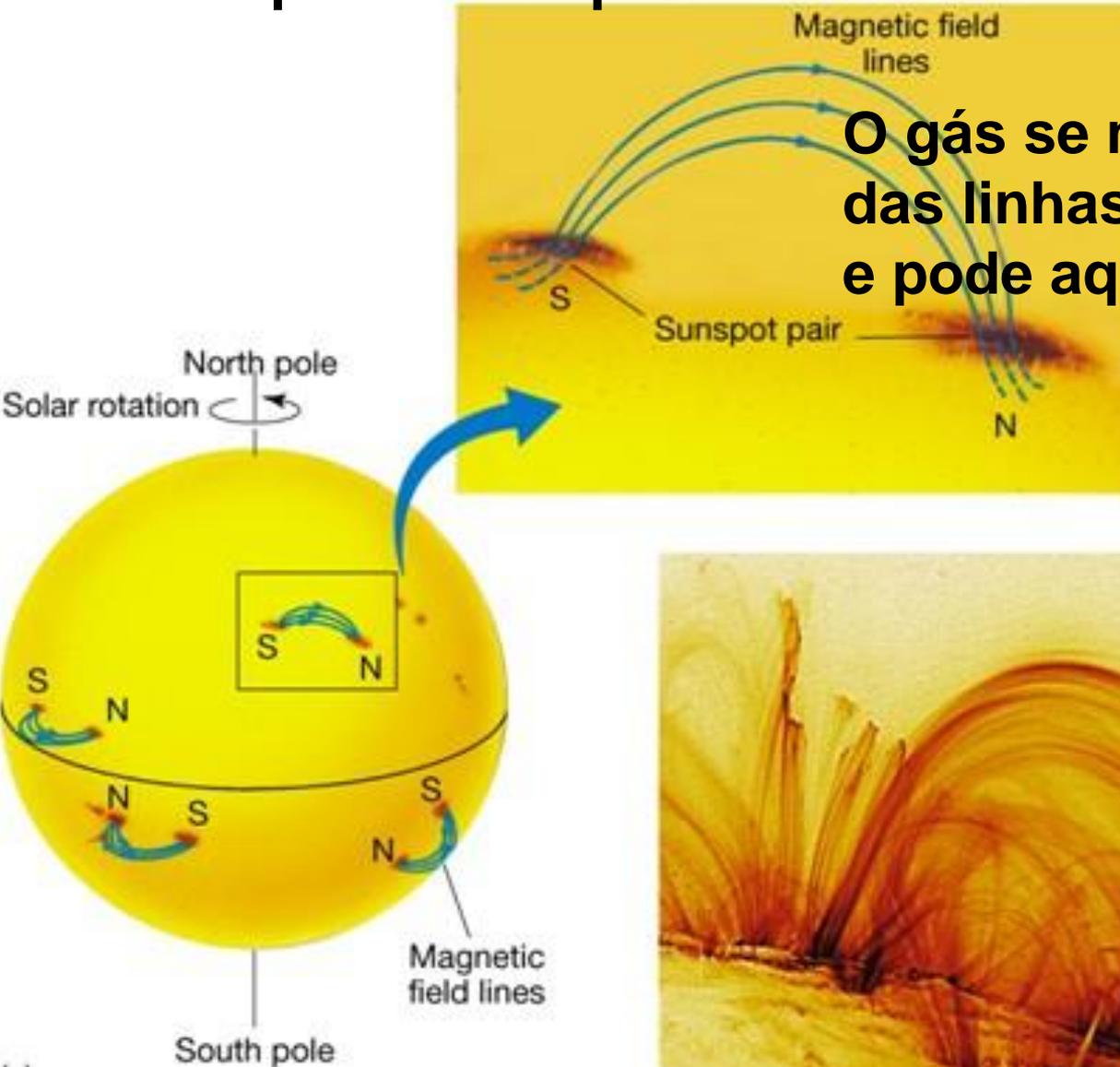


- **Ocasionalmente as linhas de campo saltam da superfície e voltam novamente a fotosfera, criando um par de manchas.**



Gás é aprisionado pelas linhas de campo magnético

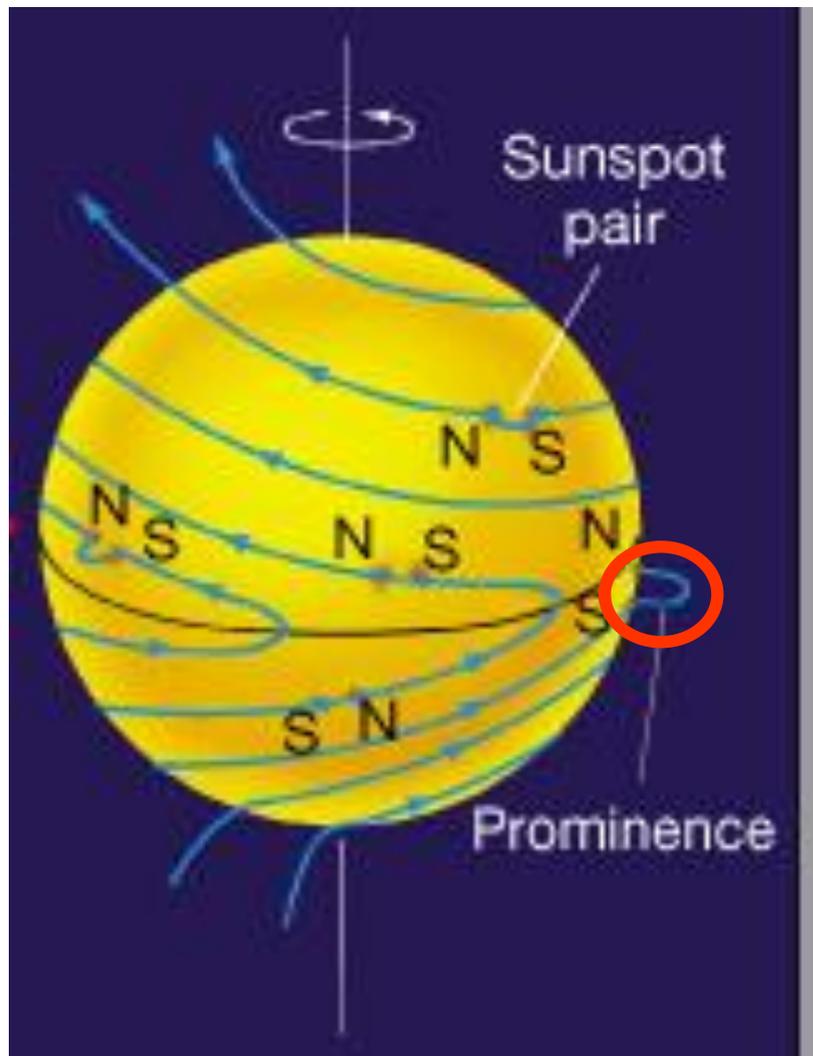
O gás se movimenta através das linhas de campo magnético e pode aquecer a altas T.



- Se este laço ou looping de gás é visto na borda do Sol contra o espaço, é chamado de PROEMINÊNCIA.
Contra o disco do Sol: FILAMENTO.



ATIVIDADE SOLAR

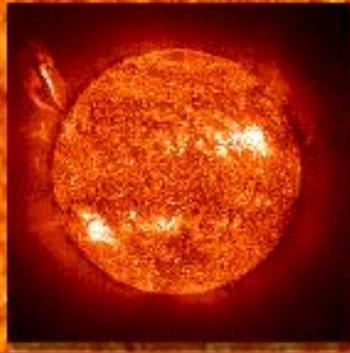


PROEMINÊNCIA

Earth shown
for size comparison

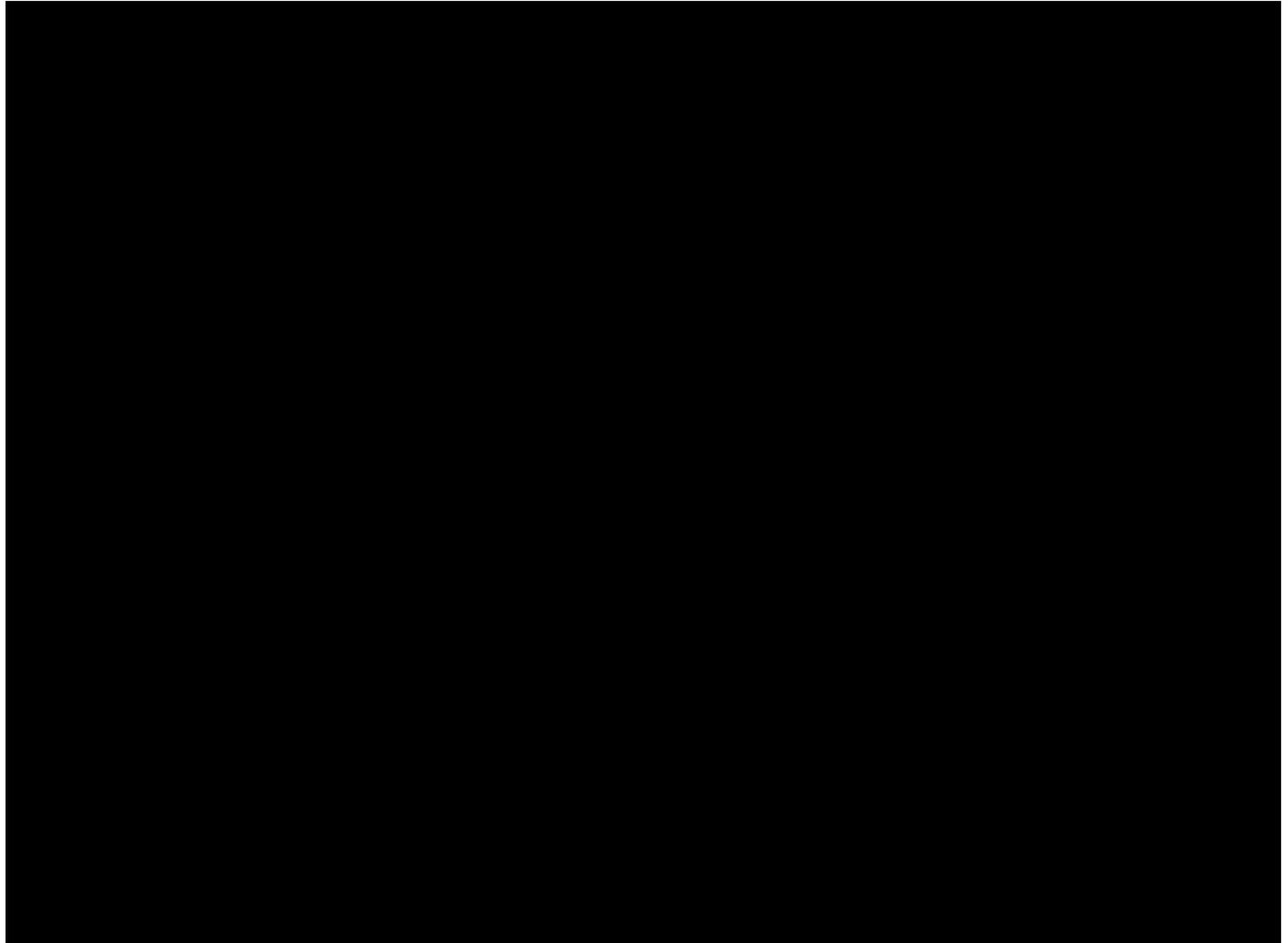


Uma proeminência típica mede 100.000 km ($10R_{\oplus}$). As menores podem durar dias ou semanas, e as maiores algumas horas.



As zonas mais escuras atingem $T \sim 10.000\text{K}$ e as mais brilhantes podem alcançar ~ 1 milhão de K.
A maior parte do gás resfria e entra de volta da fotosfera

PROEMINÊNCIA



Outra atividade solar é chamada de FLARE (ou erupção)



O campo magnético não consegue aprisionar as partículas ejetadas como acontece nas proeminências.

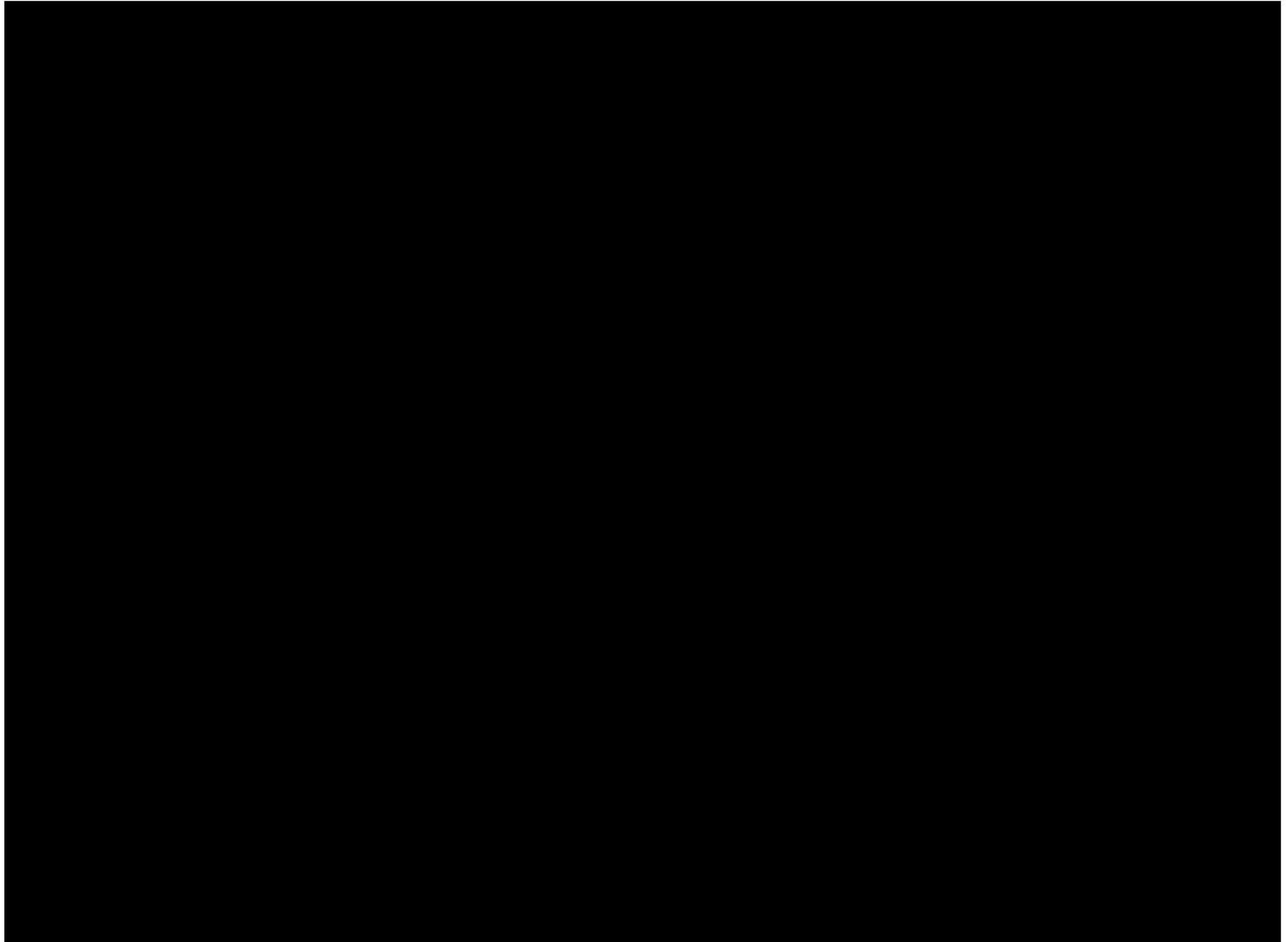
Duração de alguns segundos.

Flares podem atingir temperaturas de 100 milhões de K.

(a)



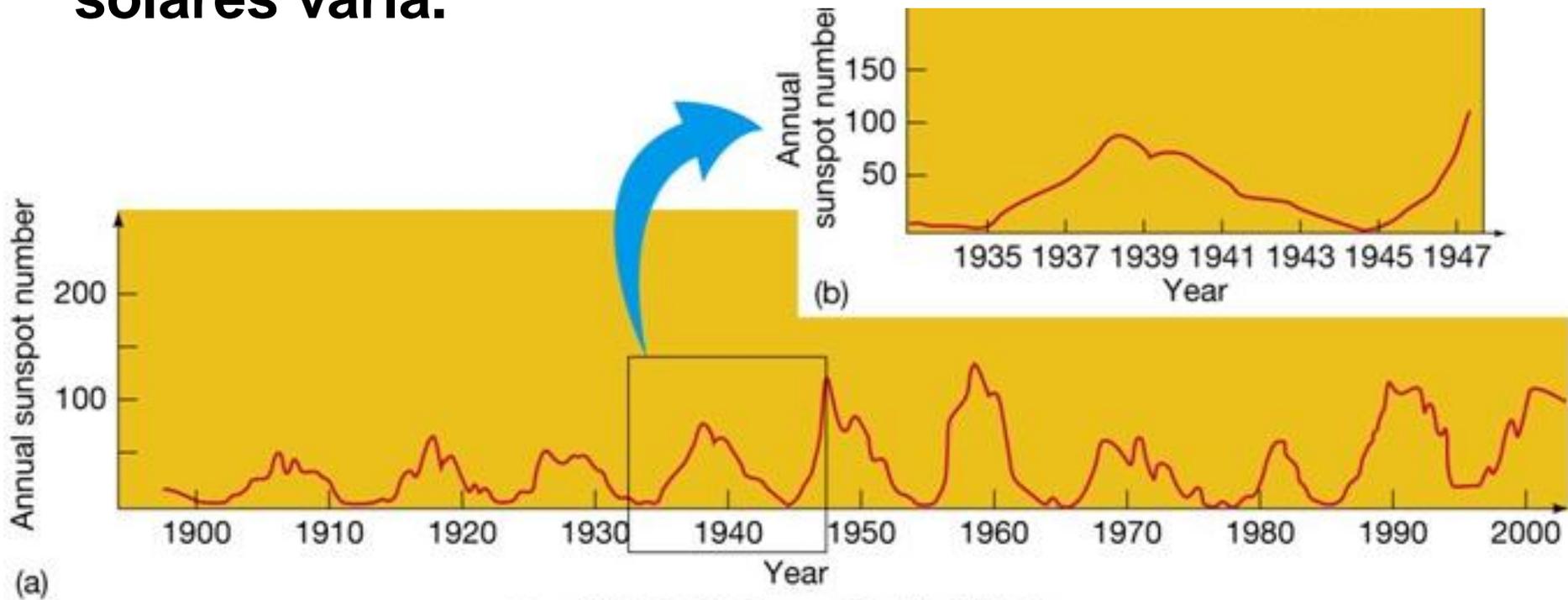
FLARE (ou erupção)



O CICLO SOLAR

Número de manchas solares durante século XX:

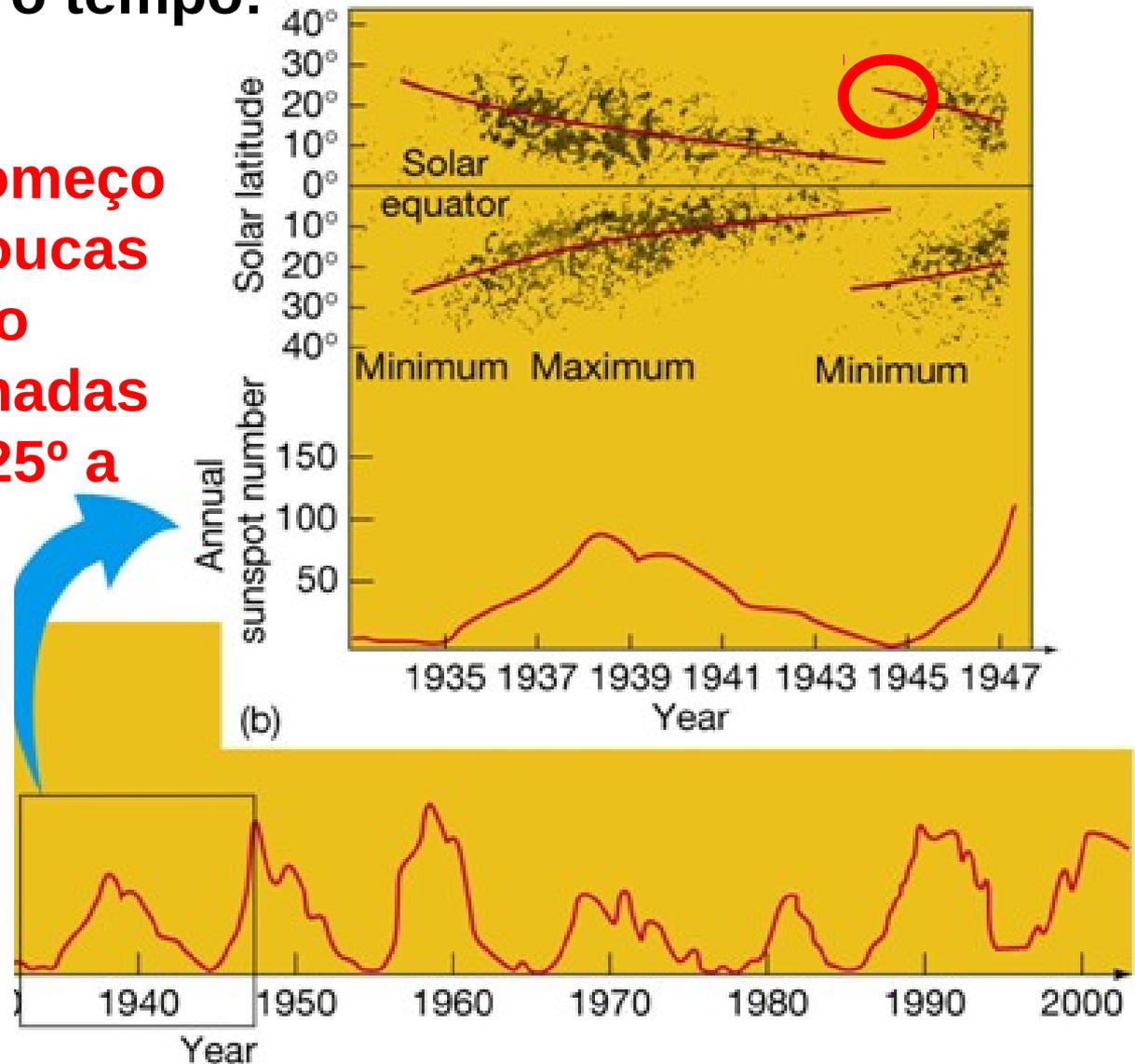
O Sol tem um ciclo de atividades médio de 11 anos: durante este período o número de manchas solares varia.



O CICLO SOLAR

O plot que mostra o número de manchas solares em cada latitude com o tempo:

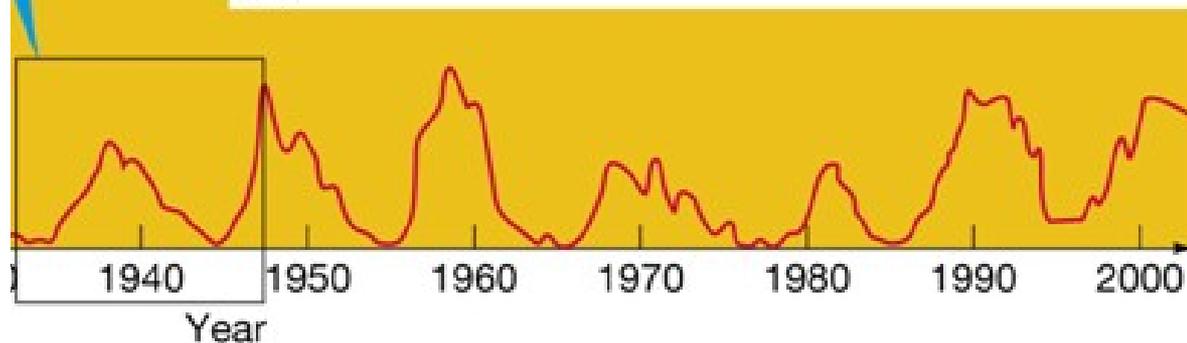
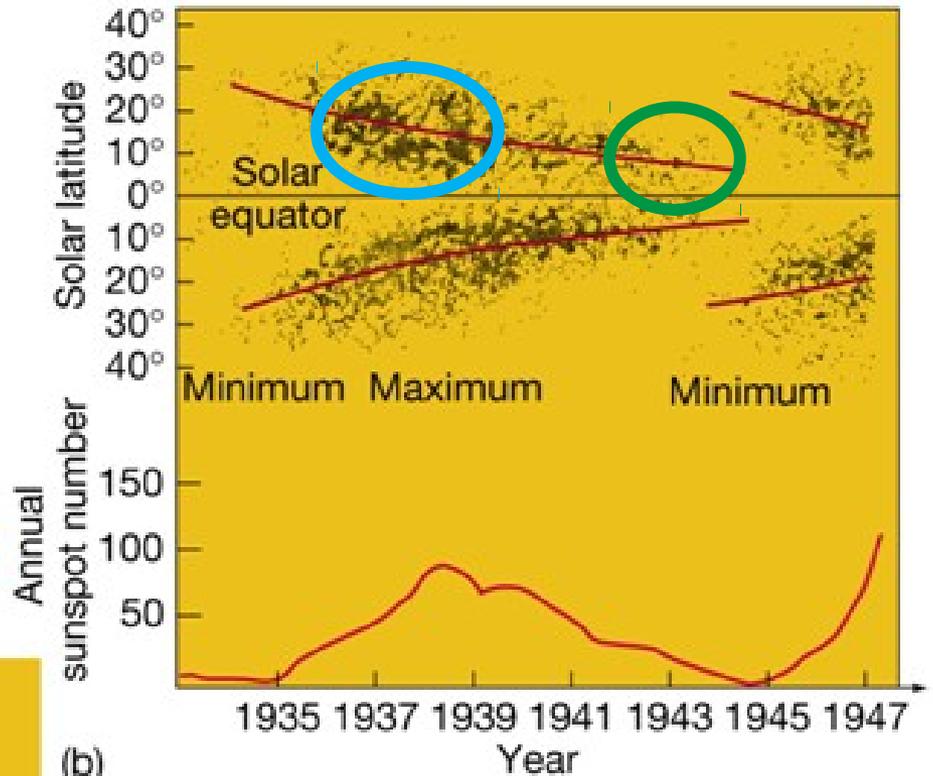
- a) Nos mínimos (começo dos ciclos) as poucas manchas que são vistas são confinadas em latitudes de 25° a 30° norte e sul.



O CICLO SOLAR

b) No máximo, a maioria das manchas são vistas ao redor do equador dentro das latitudes 5° e 20° .

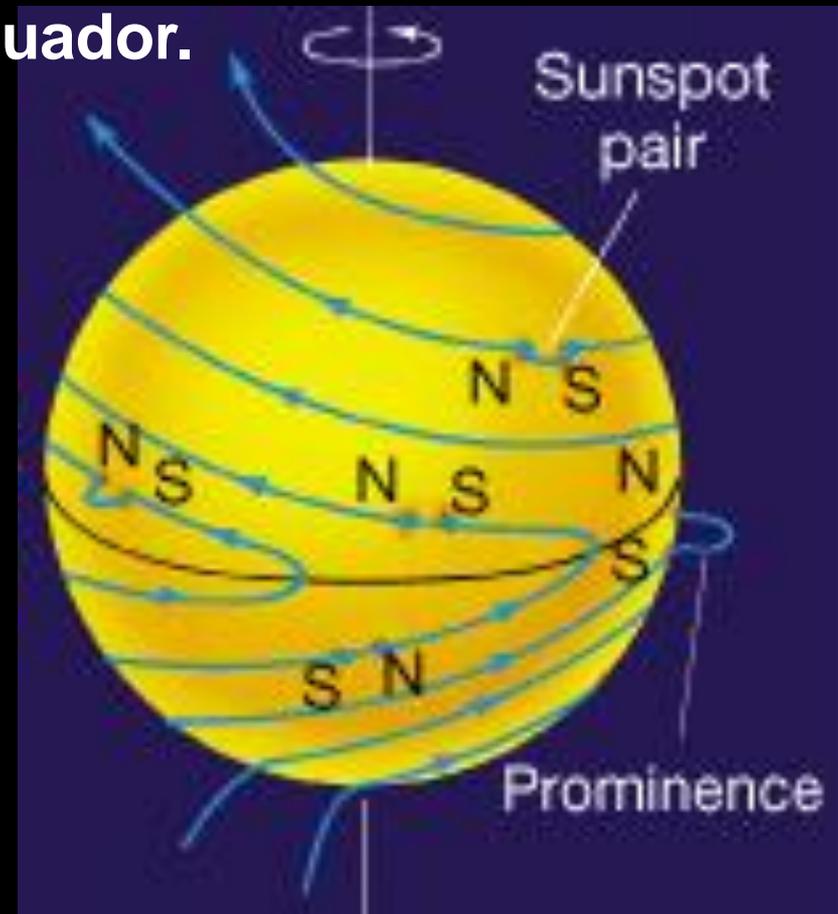
c) Perto do mínimo (final de ciclo), as manchas se encontram dentro de 10° ao redor do equador.



O CICLO SOLAR

O ciclo de manchas segue a variação do campo magnético do Sol. A variação do número de manchas e a mudança de latitude das manchas observadas são consequências do estreitamento e estrangulamento das linhas de campo próximo ao equador.

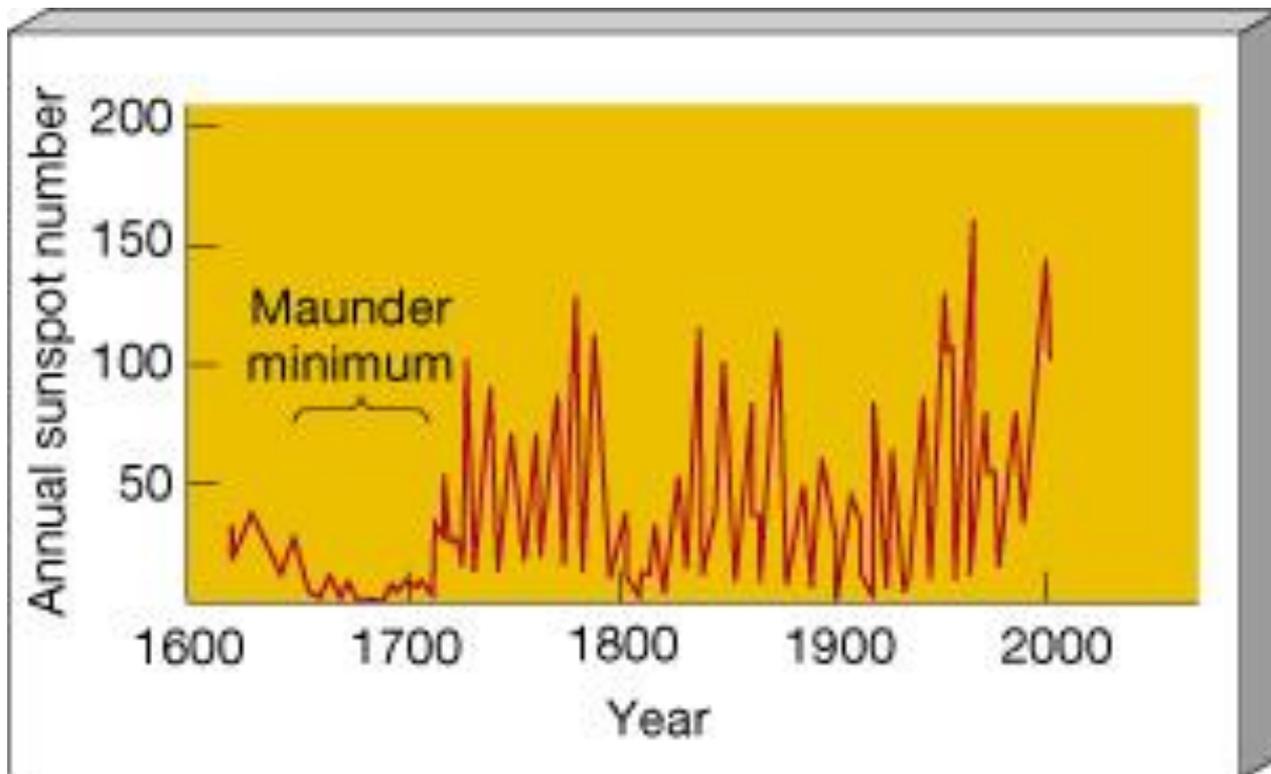
Em média a cada 11 anos um ciclo começa com a orientação do campo magnético invertido.



O CICLO SOLAR

Número de manchas solares que ocorreram nos 4 últimos séculos: período varia de 7 a 15 anos.

Houve um período em que as manchas praticamente desapareceram: MÍNIMO DE MAUNDER.



Mínimo de Maunder
= ausência de
manchas solares no
século XVII (1645 até
1715).

O CICLO SOLAR

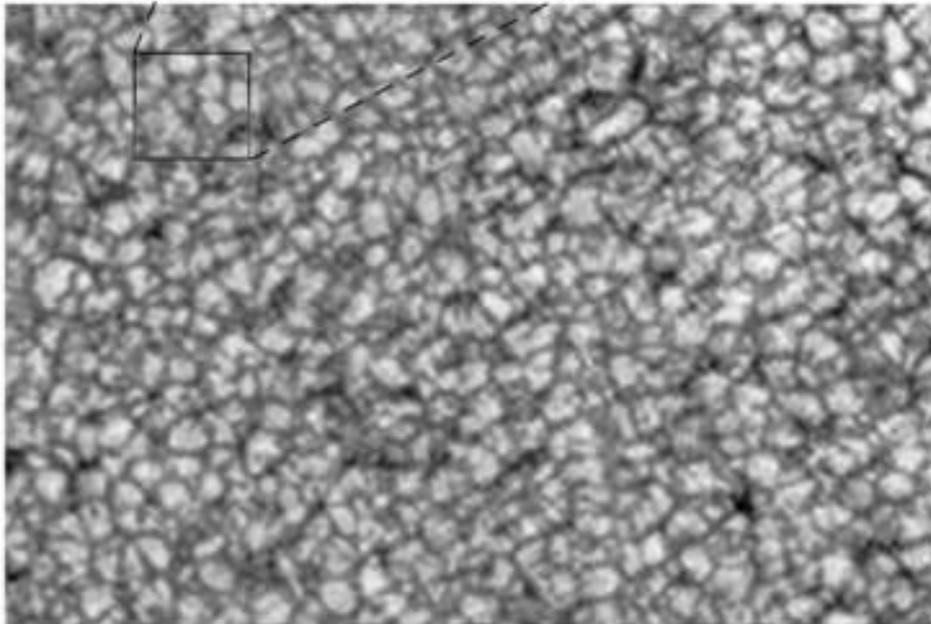
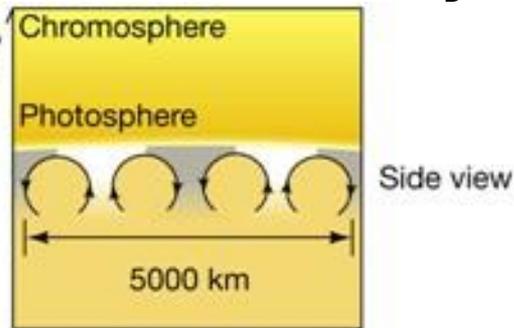
- A luminosidade do Sol aumenta com o aumento de manchas solares
- Parece ter havido uma correlação entre o mínimo de Maunder e o período de pequena glaciação (Europa e América do Norte) no final do ano de 1600.

Pequena glaciação

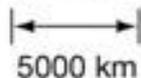


FOTOSFERA

O aspecto granulado constitui o começo da fotosfera, logo acima da zona de convecção = células de convecção

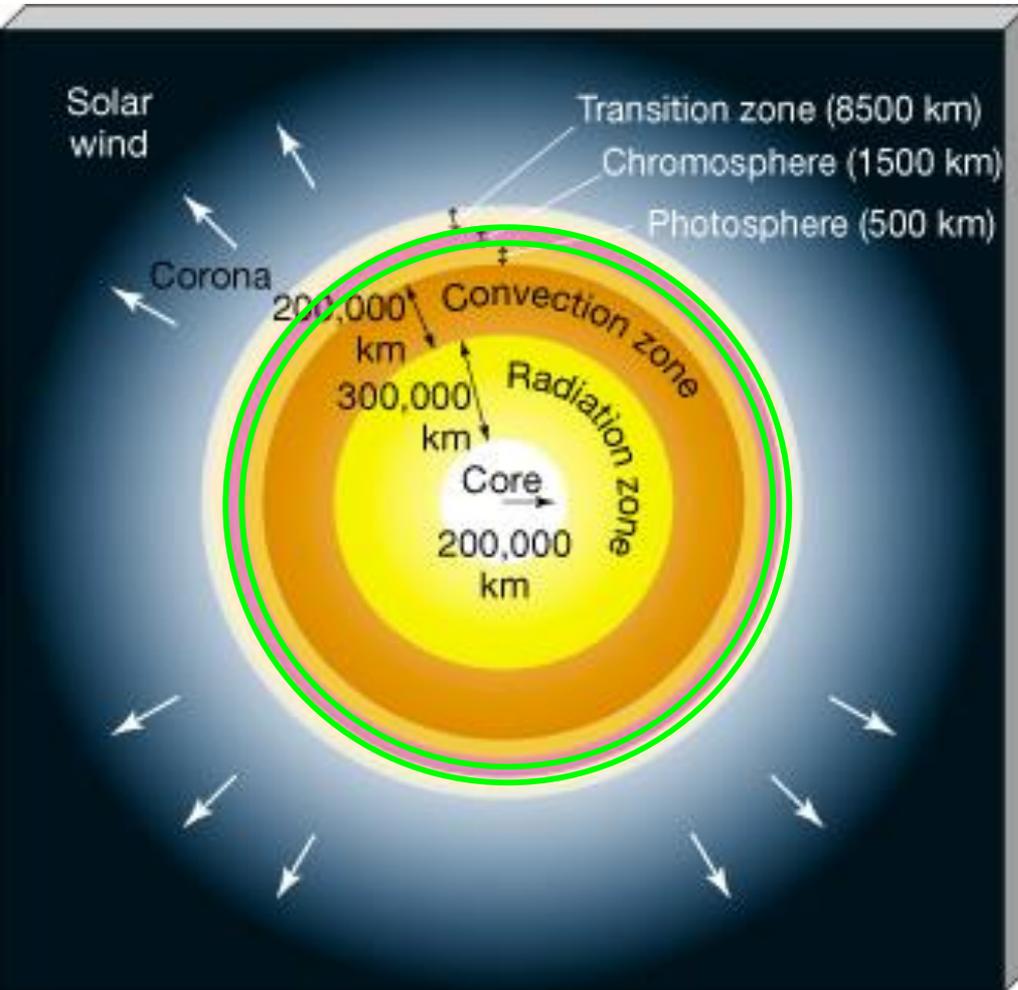


Top view



**Células convectivas
podem trazer ao começo
da fotosfera gás de
 $T = 2$ milhões de K**

ESTRUTURA DO SOL



Cromosfera :

**Camada de 1500 km de extensão acima da fotosfera
 $T \sim 4500 \text{ K}$ e $\rho \sim 2 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$**

Emite pouca radiação por causa da baixíssima densidade

CROMOSFERA



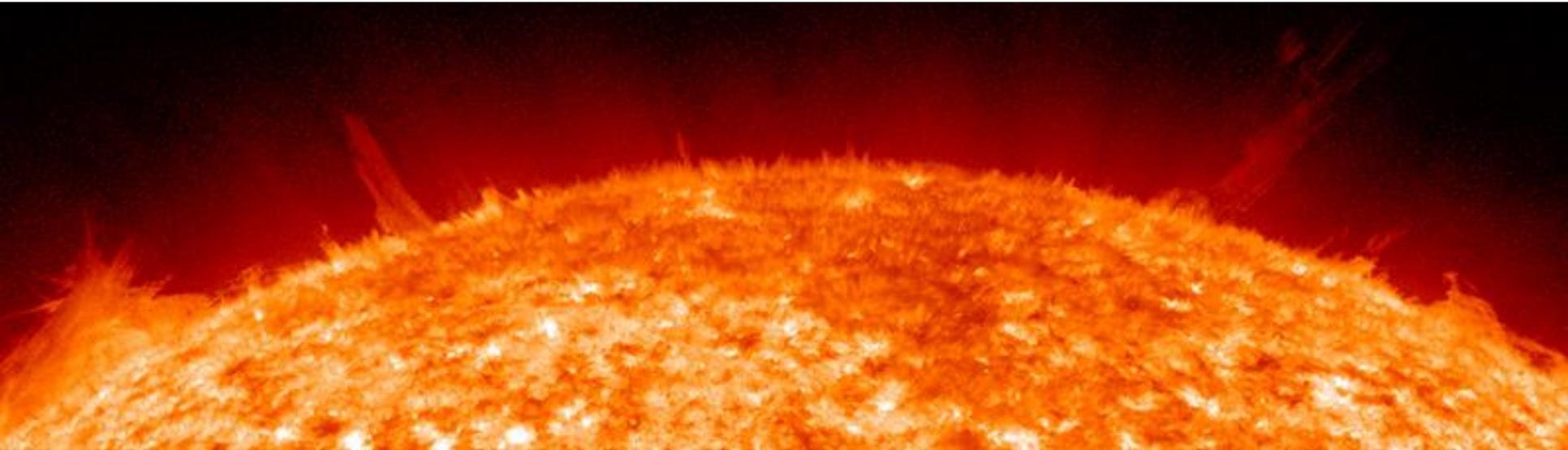
Pode ser vista somente durante um eclipse solar total, em que a Lua oculta a fotosfera.

Apresenta cor avermelhada devido a linha $H\alpha$ (6563 Å) dominar o espectro (H não está ionizado devido a baixa T). **MAS O ESPECTRO É DE EMISSÃO!**

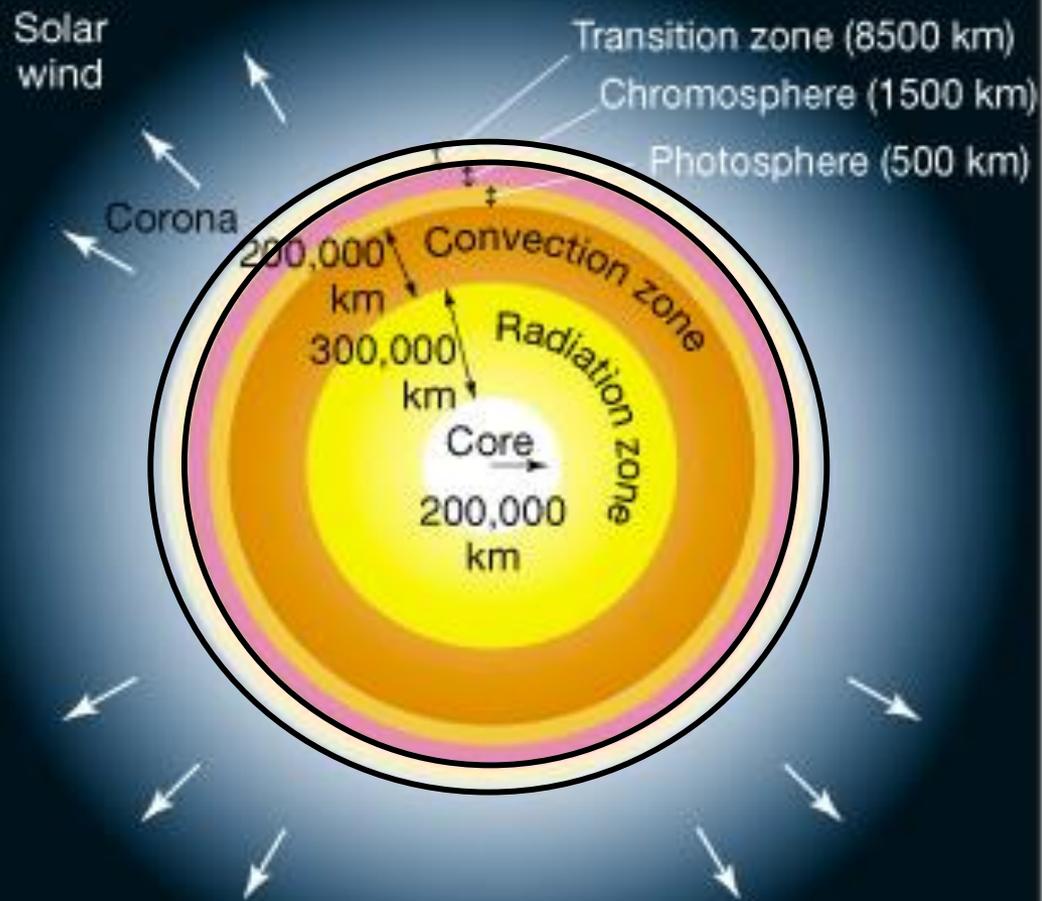
CROMOSFERA

Contém regiões chamadas de ESPÍCULOS, que são jatos de gás quente com tempo de vida de alguns minutos somente. Chegam a altura de 7000 km de altura e velocidade de 100 km/s.

Tempo de vida de 1 a 10 minutos e T varia de 5000 a 15000 K



ESTRUTURA DO SOL



Zona de Transição:

A partir da zona de transição (ZT) há um rápido aumento de temperatura:

$$T \sim 8000 - 10^6 \text{ K}$$

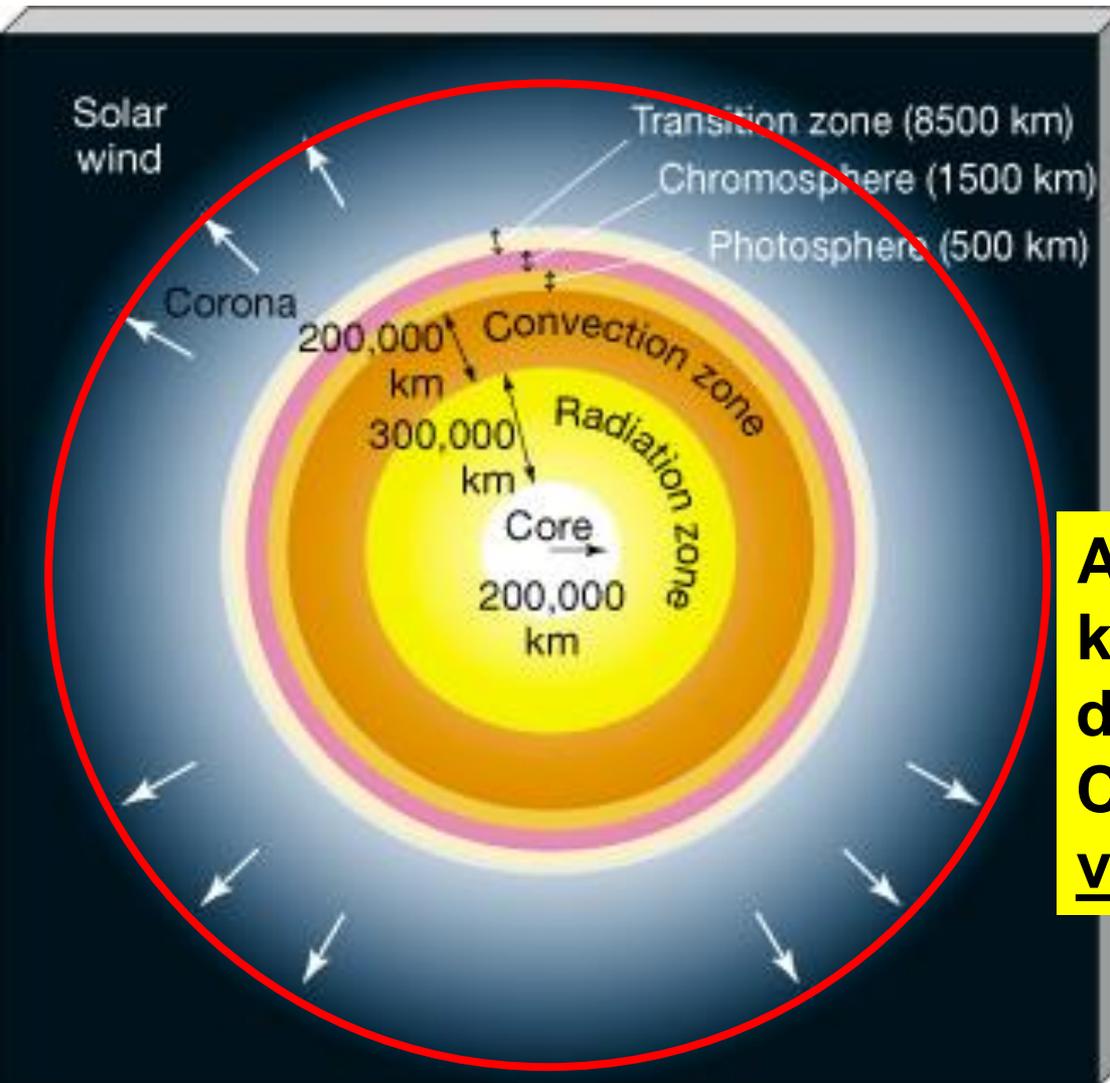
$$\rho \sim 2 \times 10^{-10} \text{ kg/m}^3$$

GÁS AQUECIDO PELA ATIVIDADE SOLAR VINDA DA FOTOSFERA E CROMOSFERA ⇒ PROEMINÊNCIA, FLARES E JATOS ENVIAM GÁS QUENTE PARA ALTURAS MAIORES

ESTRUTURA DO SOL

COROA :

**Coroa: $T \sim 3 \times 10^6 \text{ K}$
densidade = 10^{-12} kg/m^3**



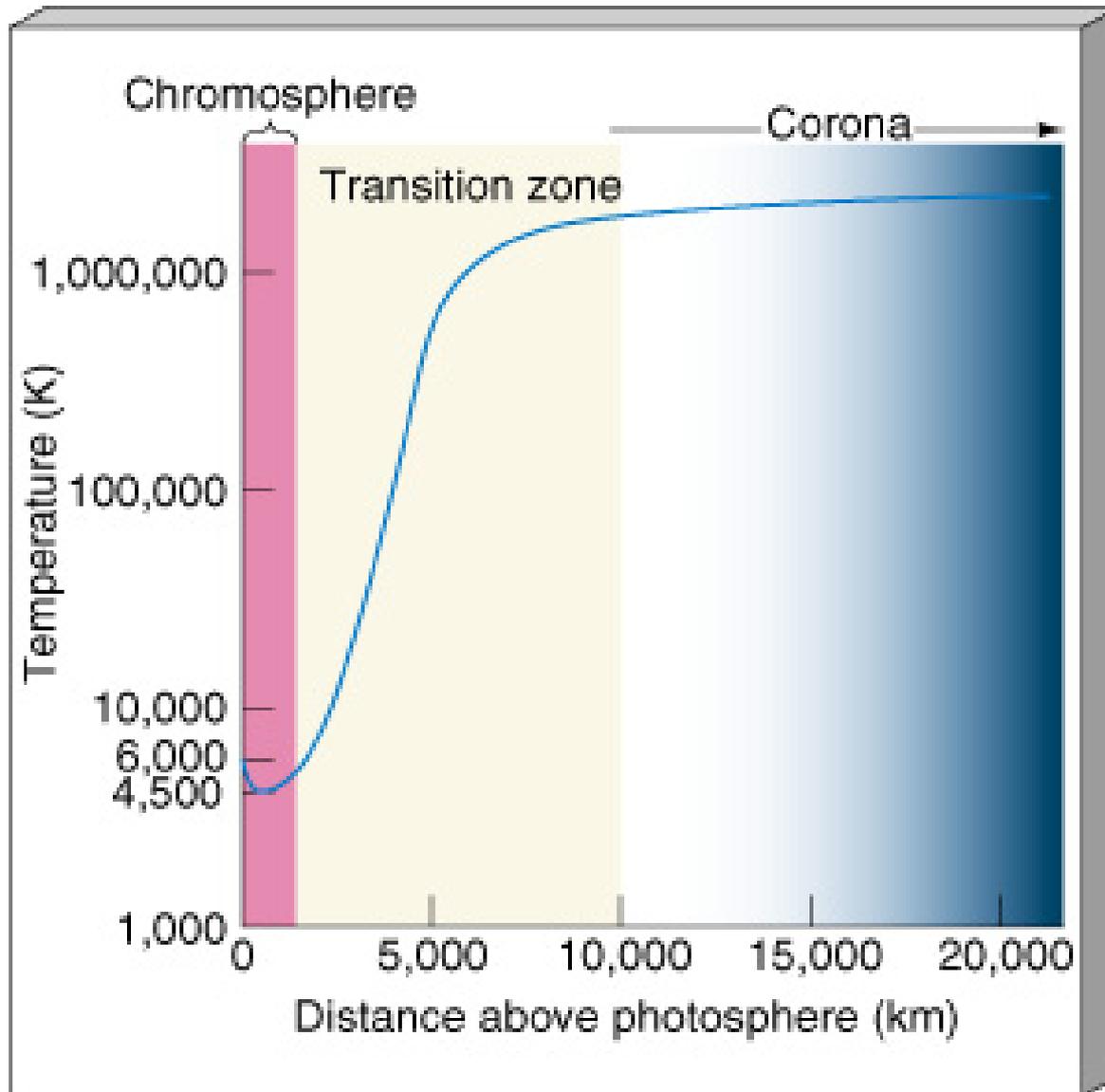
A Coroa vai até uns 10.000 km acima da ZT, e a distâncias maiores a Coroa se transforma no vento solar.

Vento solar: são partículas de gás ejetadas pelo Sol e que se espalham por todo o sistema solar.

Durante breves momentos de um eclipse total, a lua consegue ocultar a cromosfera também, sendo mais clara a visualização da Coroa solar (espectro de absorção no visível e emissão no UV e raios-X).



Temperatura aumenta muito na ZT até alcançar 3 milhões de K na Coroa.

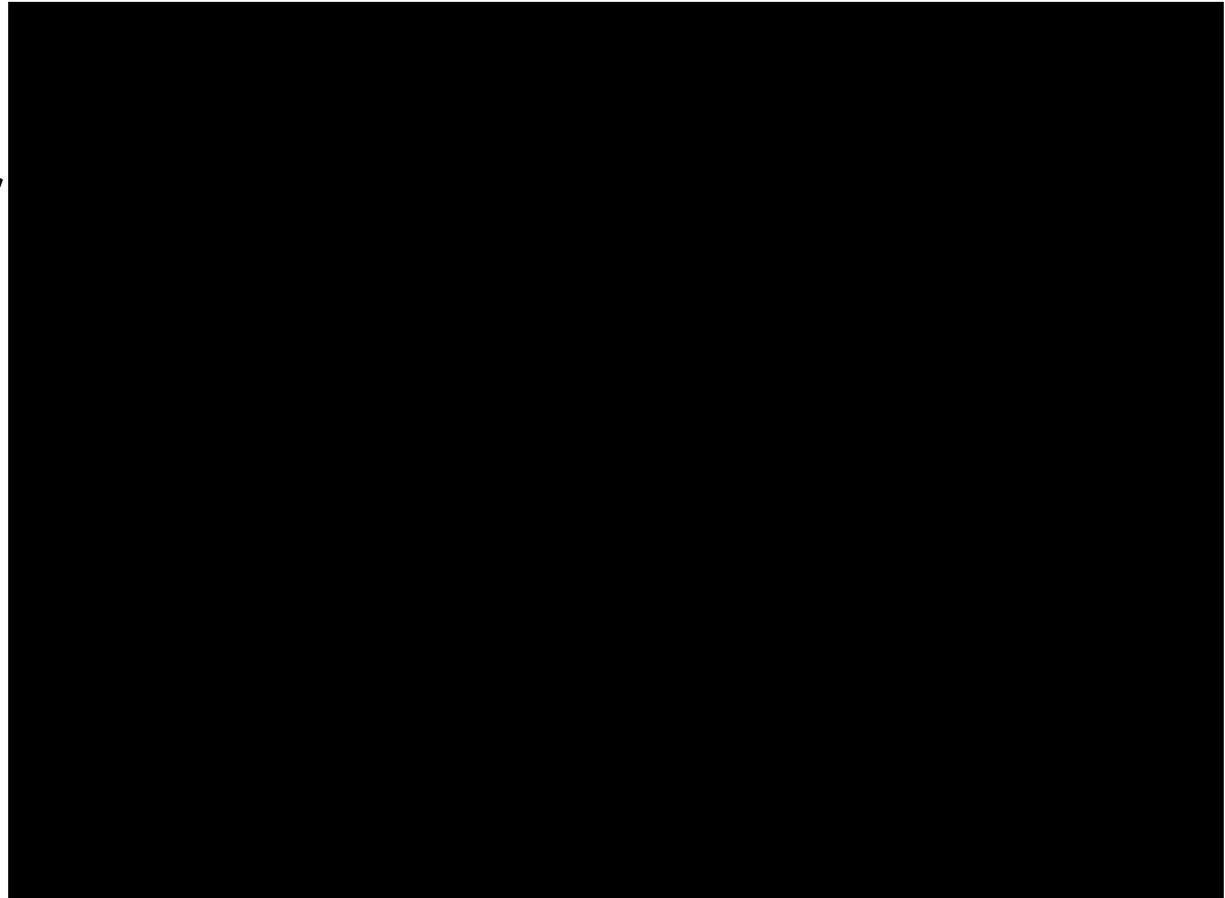


ATIVIDADE SOLAR

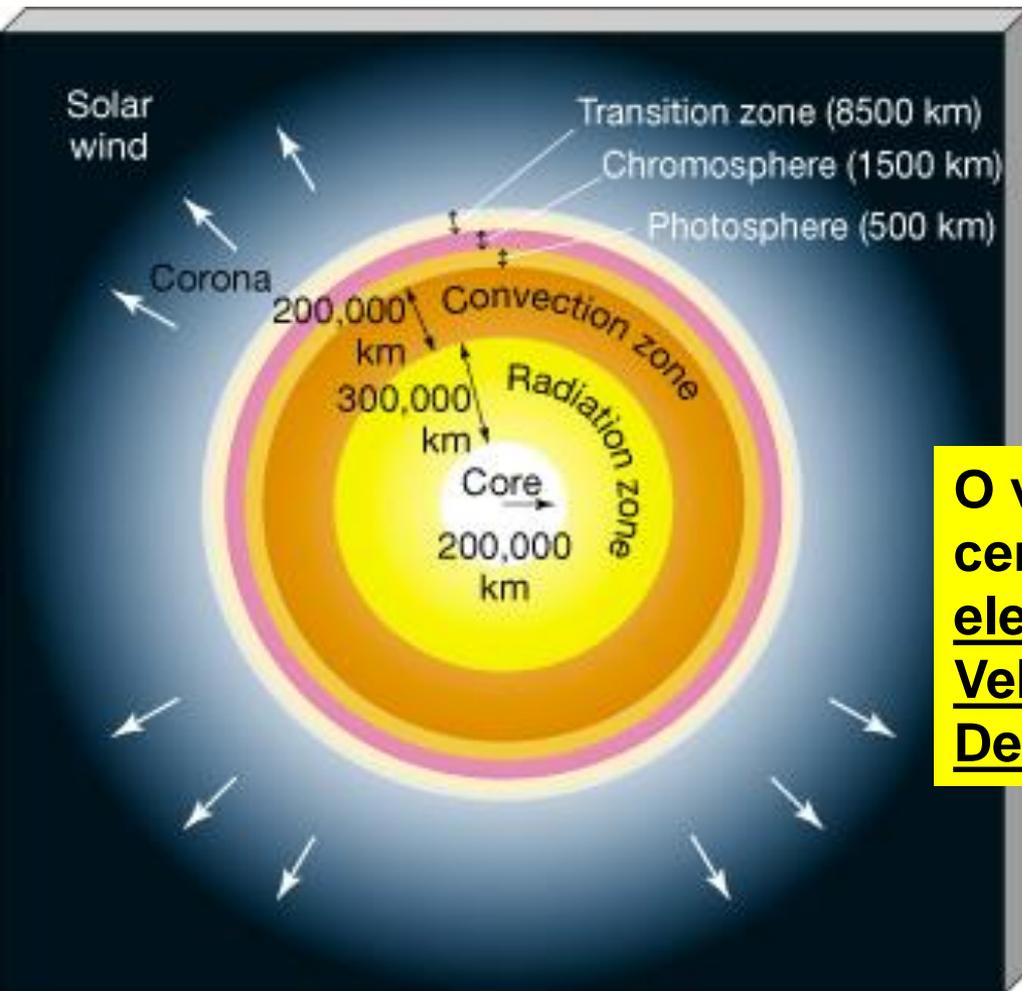
EJEÇÃO DE MASSA DA COROA (A BOLHA)

Algumas vezes na semana, uma bolha gigante magnetizada de gás ionizado se separa do Sol e escapa para o espaço interplanetário.

Se a bolha encontrar a Terra, causa um rompimento da magnetosfera terrestre, fazendo com que haja interrupções nas comunicações e energia.



ESTRUTURA DO SOL



Vento solar :

A distâncias maiores, a Coroa se transforma no vento solar, que são partículas de gás ejetadas do Sol e que se espalham por todo o sistema solar.

O vento carrega, a cada segundo, cerca de 1 milhão de ton de gás eletricamente carregado.

Velocidade do vento = 300-1000 km/s

Densidade = 1-10 partículas/cm³

**Composição: Prótons (^1H), núcleo de Hélio(^2He) e elétrons.
0.1% do vento é composto por íons de C,N,O,Ne,Mg,Si,Fe,etc**

Vento solar

Ventos vão até grandes distâncias \Rightarrow 85 UA



Partículas carregadas chocam-se com a magnetosfera da Terra, provocando um movimento de tais partículas na direção dos pólos.

O choque com a atmosfera excita o gás atmosférico, que ao voltar ao estado fundamental emite luz produzindo as AURORAS POLARES.

A maior parte da luz é produzida pelo OI (6300Å) apresentando uma cor bem avermelhada.