

O Sol: Nossa Estrela

AGA215

- **Astronomy: A Beginner's Guide to the Universe, E. Chaisson & S. McMillan (Cap. 10)**
- **Introductory Astronomy & Astrophysics, M. Zeilek, S. A. Gregory & E. v. P. Smith (Cap. 9)**
- **Apostila, J. Gregorio-Hetem, V. Jatenco-Pereira, C. Mendes de Oliveira
(www.iag.usp.br/~dalpino/aga215)**
- **Agradecimentos: Enos Picazzio**



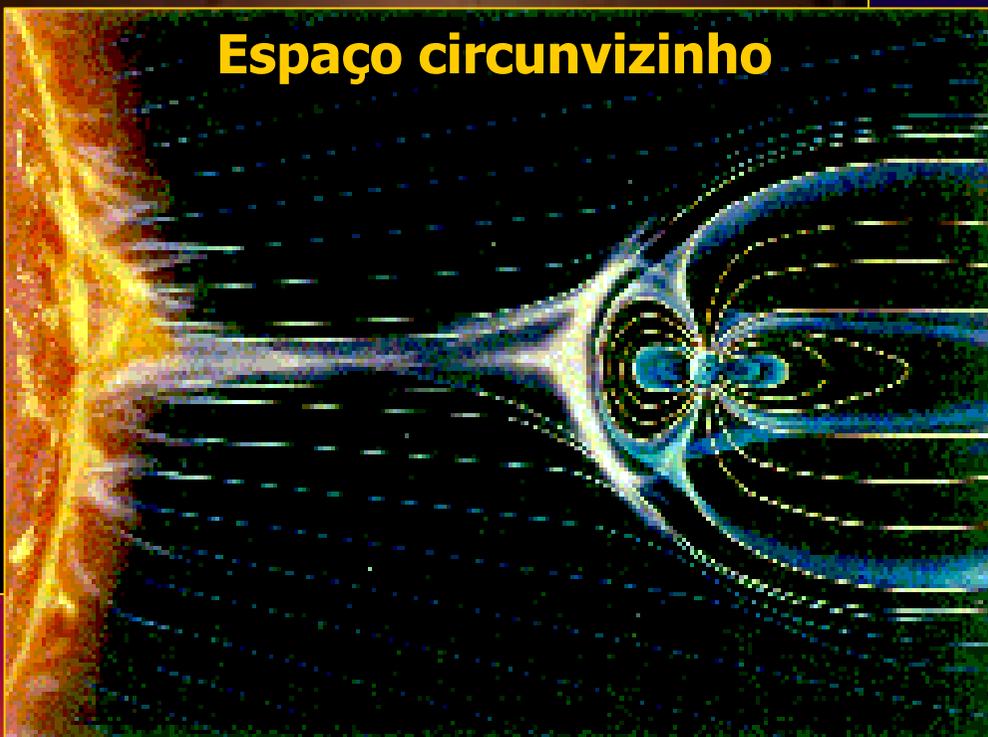
Há, pelo menos, 100 bilhões de estrelas de diferentes cores, tamanhos e idades

100.000 anos-luz
Cerca de 950.000.000.000.000.000 km (950 quadrilhões km), ou 6,3 bilhões de vezes a distância Terra-Sol

Por que estudar o Sol?

Implicações no clima

Espaço circunvizinho



Por que estudar o Sol?

Implicações no clima

Espaço circunvizinho

Física estelar



Por que estudar o Sol?

Implicações no clima

Espaço circunvizinho

Física estelar

Física de plasma em laboratório



Propriedades físicas

Sol:

esfera gasosa brilhante
sustentada por gravidade própria
e forças geradas por reações
nucleares em seu centro

Propriedades físicas

Diâmetro : 1.390.000 km (109,3 D_{terra})

3,7 × distância da Lua!

Propriedades físicas

Diâmetro : 1.390.000 km (109,3 D_{terra})

Massa: $1,99 \times 10^{30}$ kg (333.000 M_{terra})

H \approx 73,46% **He \approx 24,86%**

O \approx 0,77% **C \approx 0,29%**

Fe + Ne + N + Si + Mg + S \approx 0,59%

Demais \approx 0,11%

Propriedades físicas

Diâmetro : 1.390.000 km (109,3 D_{terra})

Massa: $1,99 \times 10^{27}$ t (333.000 M_{terra})

H \approx 73,46% He \approx 24,86%

O \approx 0,77% C \approx 0,29%

Fe + Ne + N + Si + Mg + S \approx 0,59%

Demais \approx 0,11%

Densidade:

núcleo	=	160 g/cm ³
média	=	1,41 g/cm ³
superfície	=	1 bilionésimo g/cm ³

Propriedades físicas

Diâmetro : 1.390.000 km (109,3 D_{terra})

Massa: $1,99 \times 10^{27}$ t (333.000 M_{terra})

H \approx 73,46% He \approx 24,86%

O \approx 0,77% C \approx 0,29%

Fe + Ne + N + Si + Mg + S \approx 0,59%

Demais \approx 0,11%

Densidade: núcleo = 160 g/cm³
 média = 1,41 g/cm³
 superfície = 1 bilionésimo g/cm³

Período de rotação (medido pelo movimento das MS):
 equador = 24,98 d
 pólos = 29,8 d

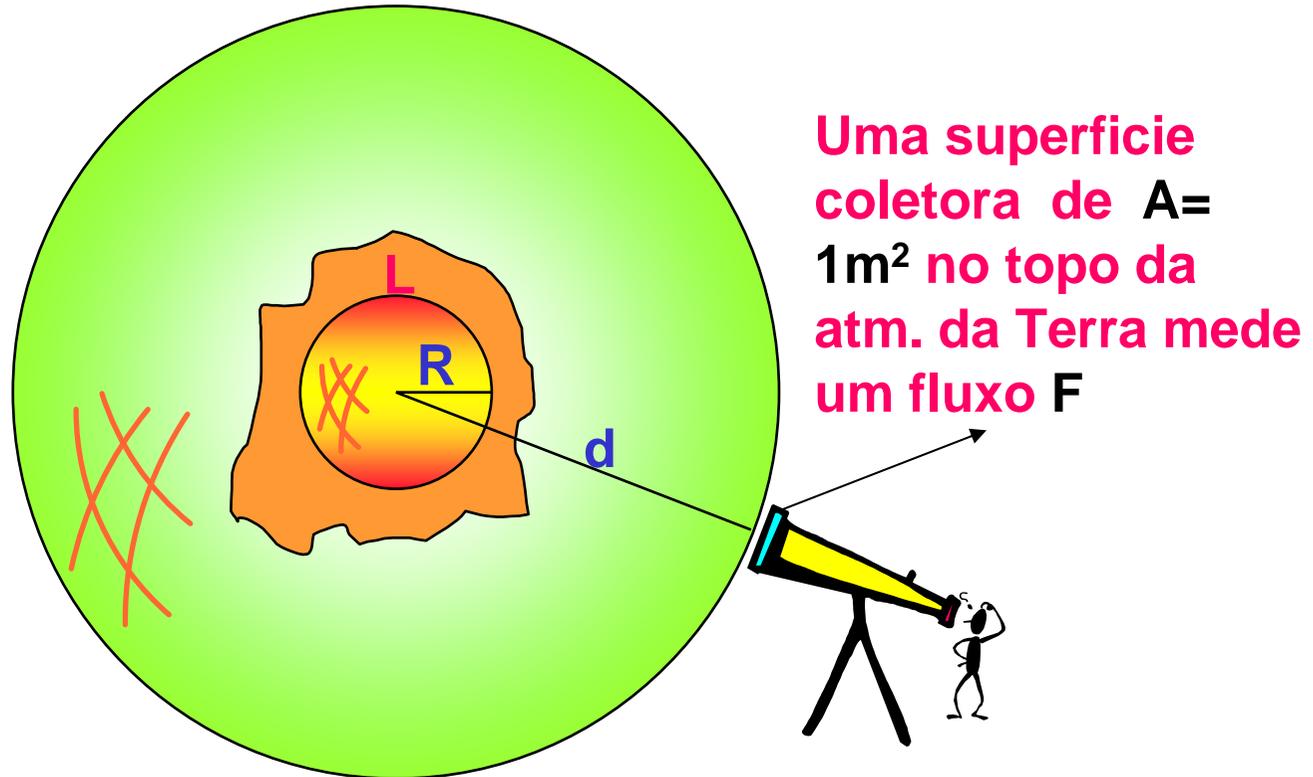
Algumas Propriedades do Sol

Radius	$6.96 \times 10^8 \text{ m}$
Mass	$1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$
Average density	1410 kg/m^3
Rotation period	24.9 days (equator); 29.8 days (poles)
Surface temperature	5780 K
Luminosity	$3.86 \times 10^{26} \text{ W}$

Luminosidade Solar

O fluxo F medido (ou potência por unidade de área) à uma distância $d = 1 \text{ UA}$ do centro do Sol é constante:

$$F = 1400 \text{ W/m}^2$$



Uma superfície coletora de $A = 1 \text{ m}^2$ no topo da atm. da Terra mede um fluxo F

Mas:

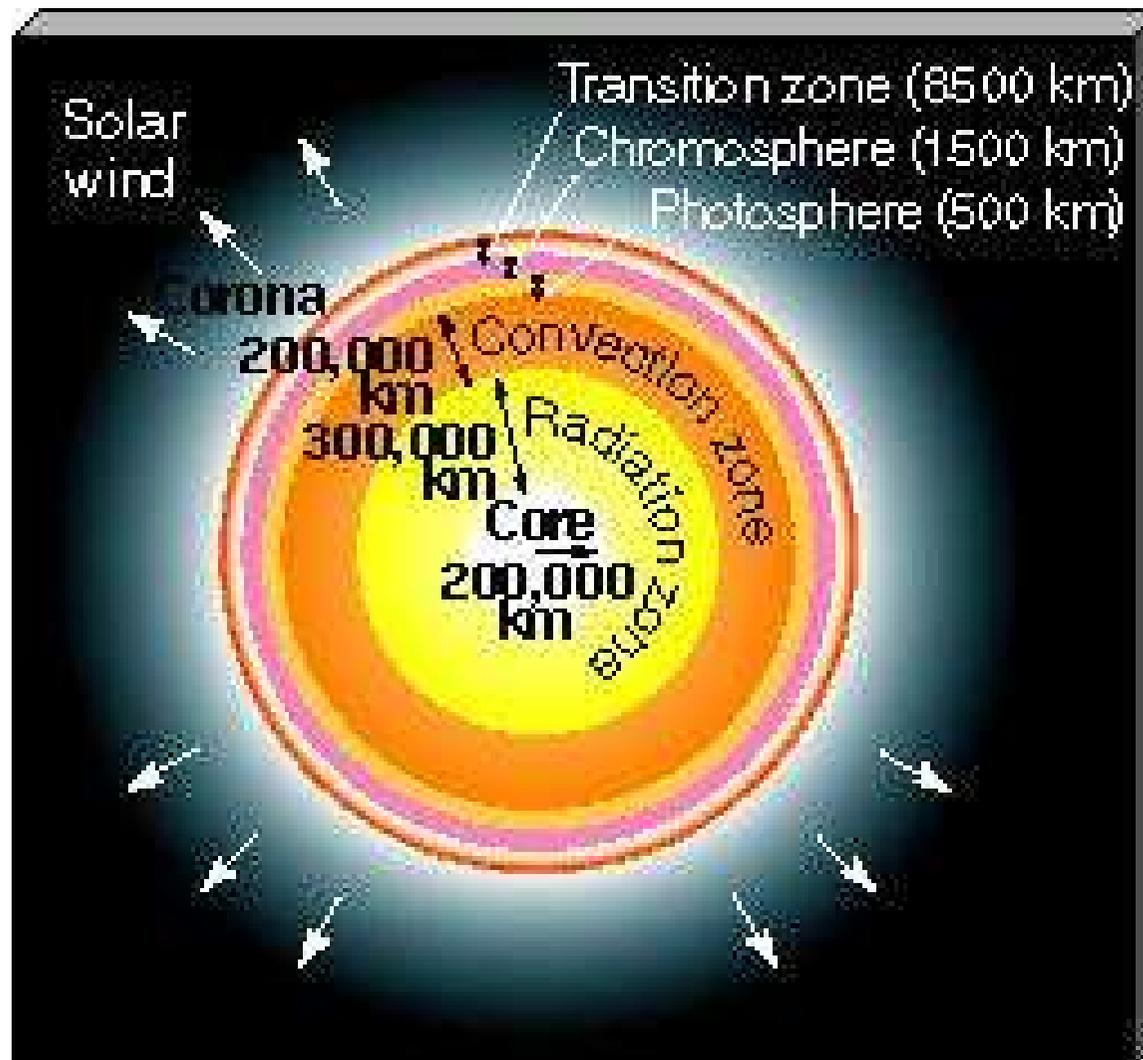
$$F = F[d] = L / (4\pi d^2)$$

$$\text{e } 4\pi (1\text{UA})^2 = 2,8 \times 10^{23} \text{ m}^2$$

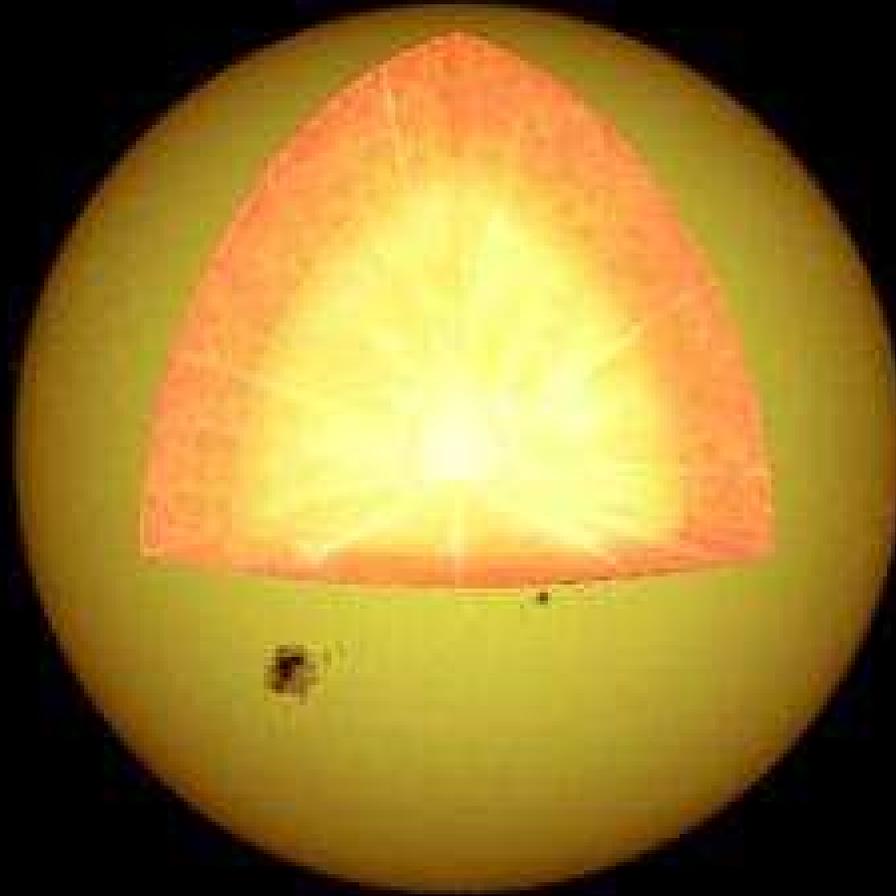
$$\rightarrow L_{\text{Sol}} = 4 \times 10^{26} \text{ W}$$

4 tri x trilhoes de lampadas de 100W brilhando simultaneamente

Estrutura Solar



Interior

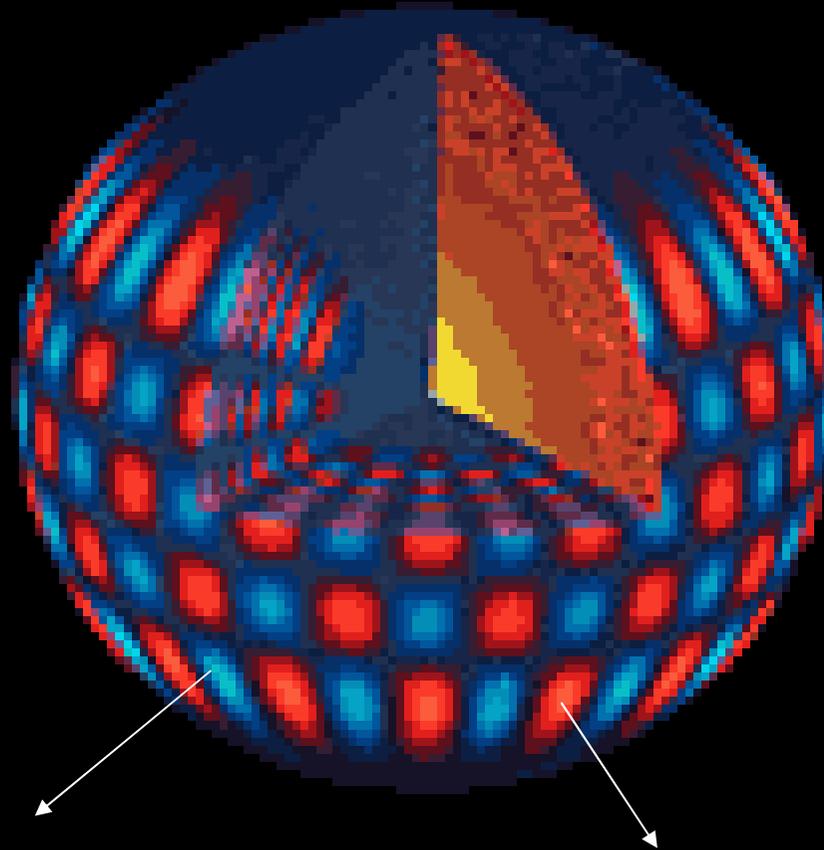


Interior solar modelado graças às informações obtidas da helio-sismologia

Hélio-sismologia

Sol vibra de modo complexo: ondas sonoras de varias frequencias atraves de seu interior.

Observando movimento na superficie solar: medem-se frequencias de ondas e obterm-se **informacao sobre interior solar**

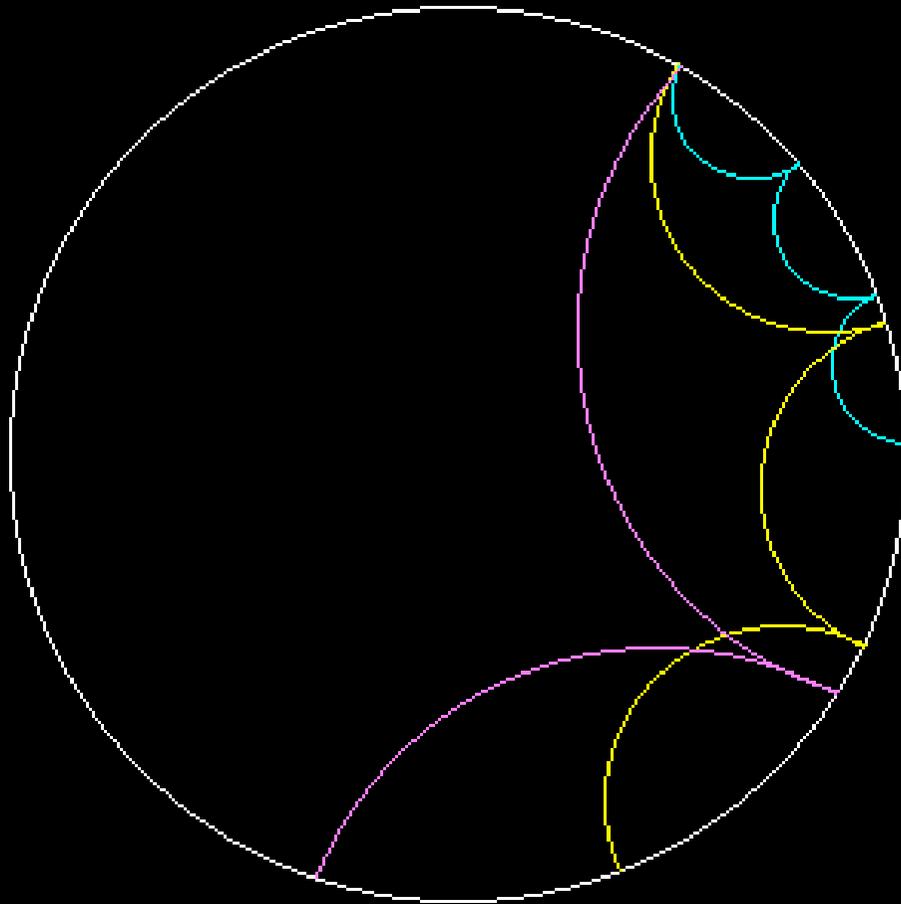


Oscilação
de 5 minutos
de período

**Movimento Ascendente
(azul)**

**Movimento Descendente
(vermelho)**

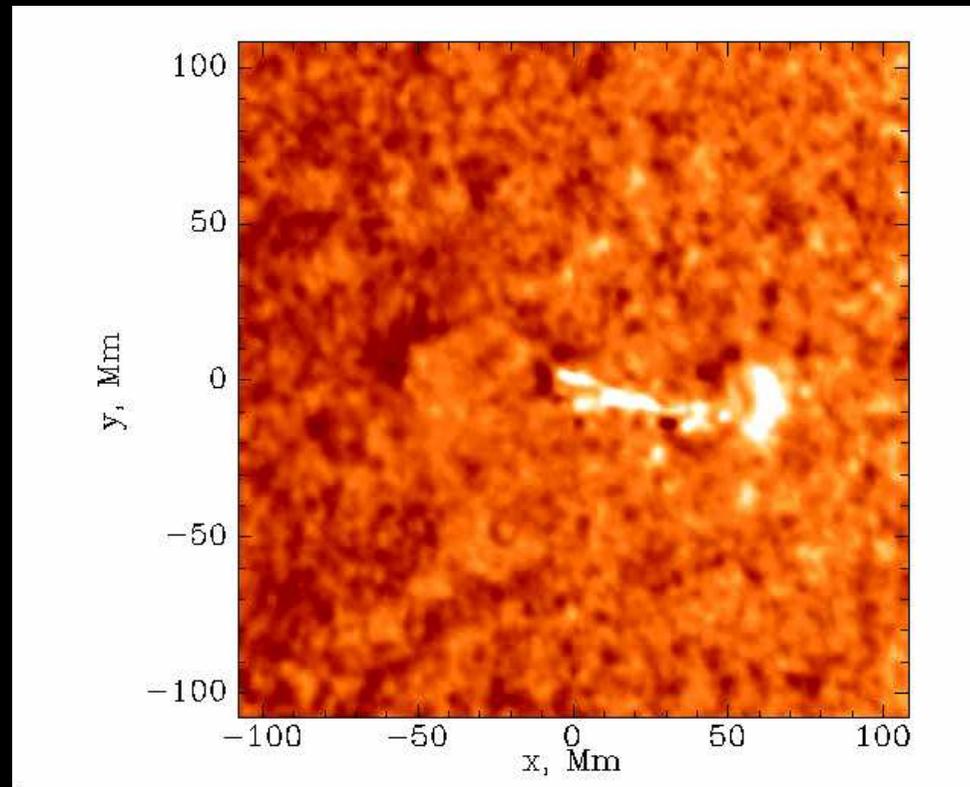
Hélio-sismologia



Perturbações de maior frequência (menor comprimento de onda) propagam-se mais próximas da superfície.

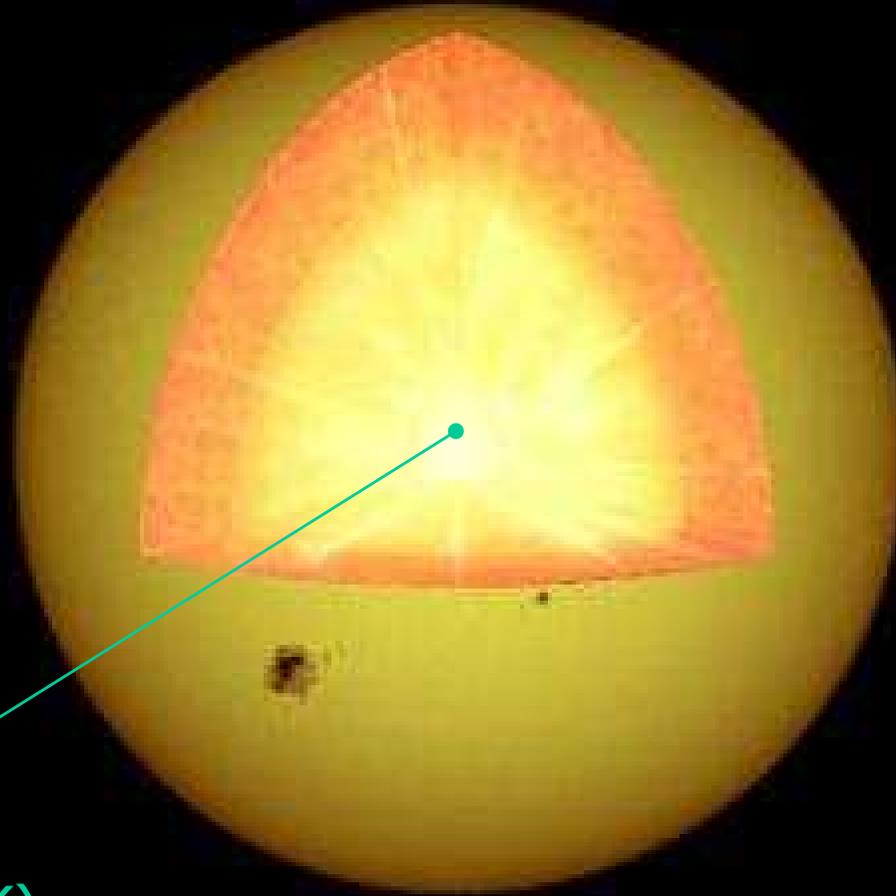
A escolha da frequência permite estudar diferentes profundidades.

Hélio-sismologia



Sismo solar observado com instrumentação espacial.

Interior



Núcleo

(15.000.000 °K)

Fusão nuclear

$4\text{H} \rightarrow \text{He} + 2\nu + \text{energia}$

Fusao Nuclear é o que faz do Sol uma: **ESTRELA**



$T_c=15$ milhões no caroço: fusão de



$$E = m c^2$$

$$E = 0,0286 m_H c^2 = 4,3 \times 10^{-12} \text{ J}$$

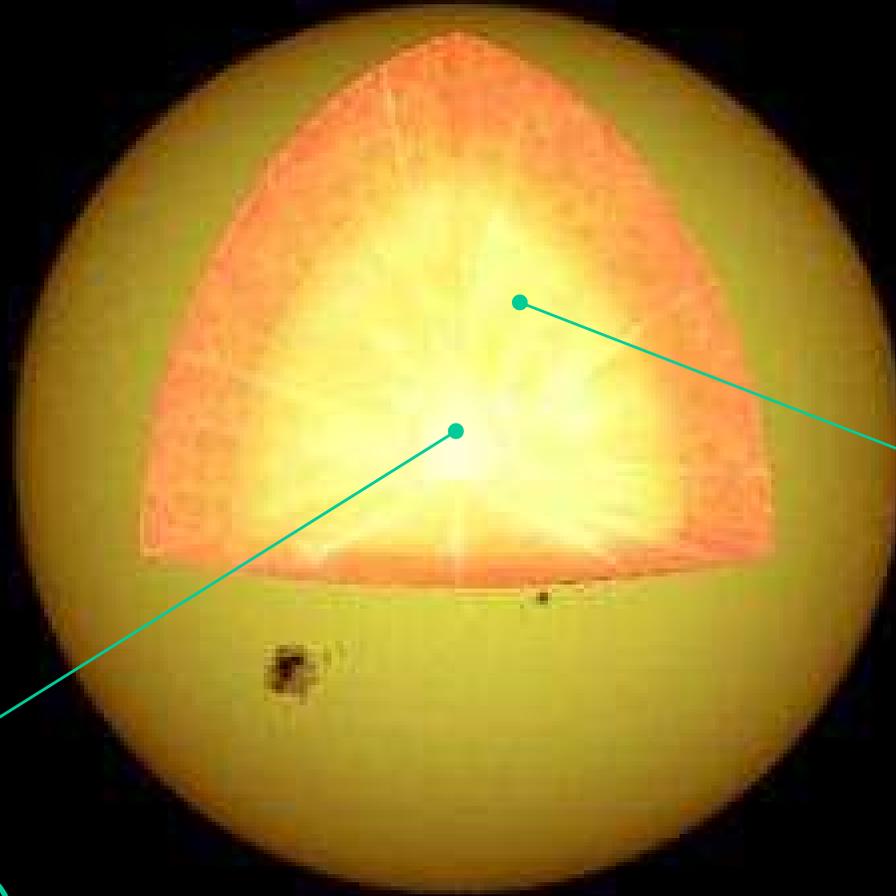
$$\rightarrow E_{\text{total}} = E \times (0,1 M_{\text{sol}} / 4 m_H) = 1,28 \times 10^{44} \text{ J}$$

$$\text{Mas: } L_{\text{sol}} = 4 \times 10^{26} \text{ J/s}$$

$$\rightarrow t_{\text{fusão}} = E_{\text{total}} / L_{\text{sol}} = 10 \text{ bilhões de anos}$$

Onde e como os elementos
sao produzidos no Universo

Interior



Núcleo

(15.000.000 K)

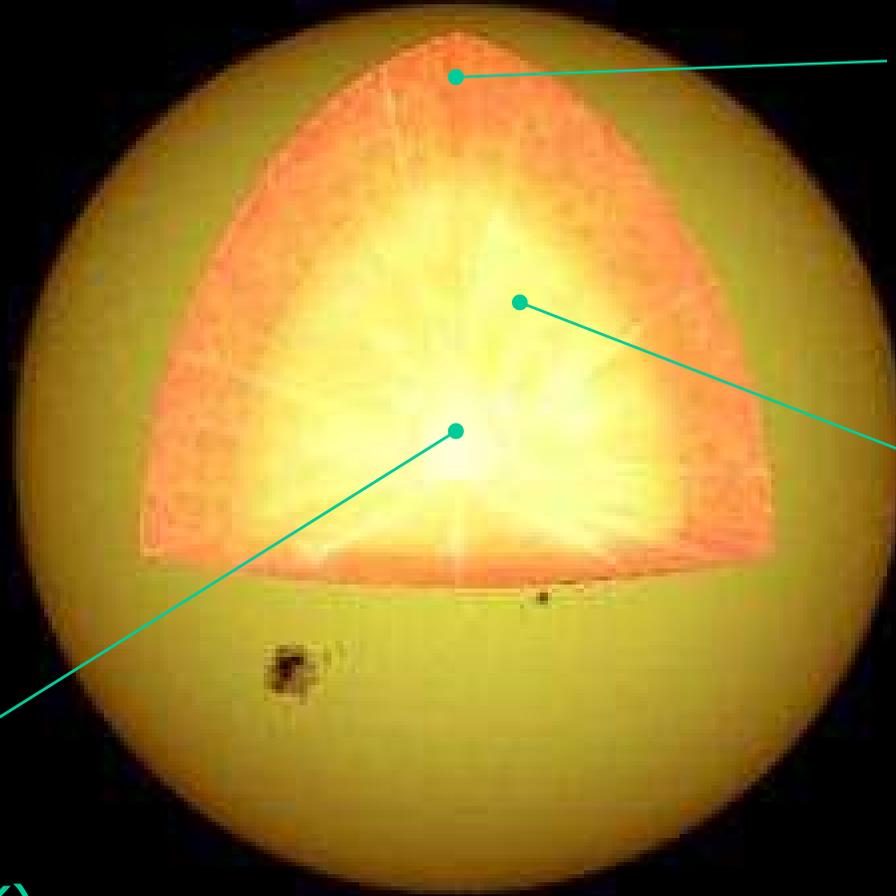
Fusão nuclear



Zona radiativa

energia transportada por ftons (radiação)

Interior



Zona convectiva

energia transportada por convecção

Zona radiativa

energia transportada por ftons (radiação)

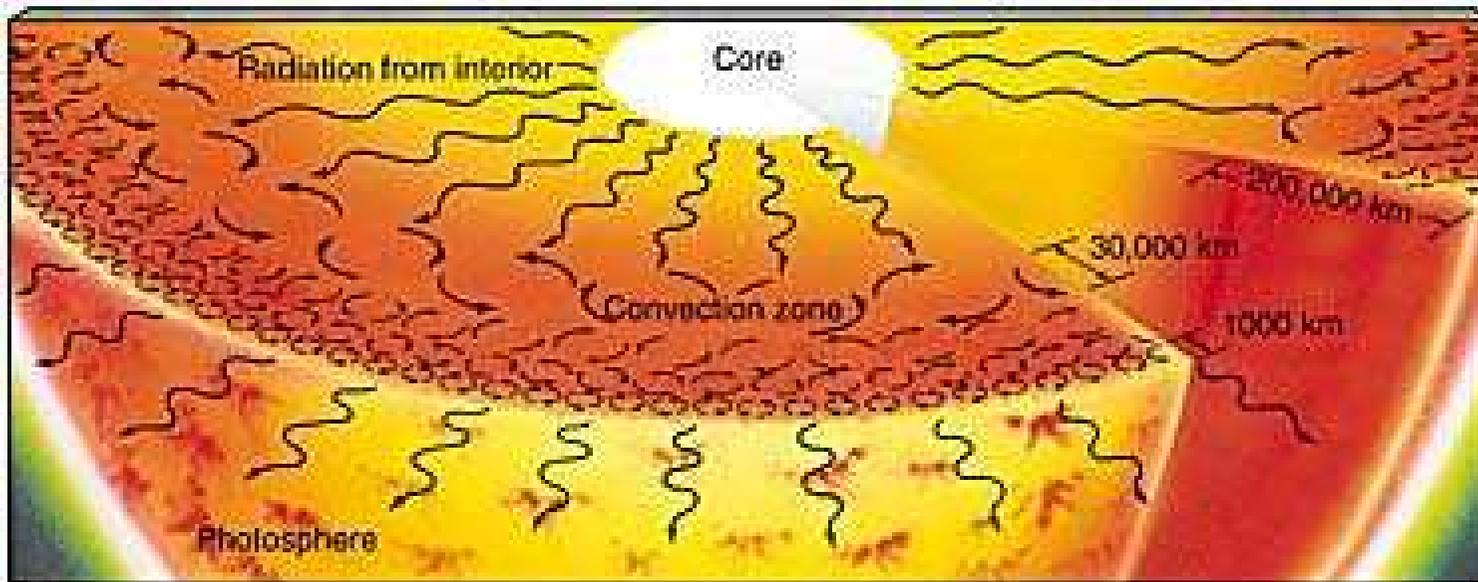
Núcleo

(15.000.000 K)

Fusão nuclear

$4\text{H} \rightarrow \text{He} + 2\nu + \text{energia}$

Transporte de Energia no interior Solar



Celulas convectivas: crescem de tamanho em direção ao interior da zona convectiva – no topo tem 1000 km de tamanho cada uma.

Na camada radiativa: T muito quente – colisões violentas entre partículas - gás completamente ionizado – daí os **fótons** produzidos nas reações nucleares **nao são absorvidos** (por elétrons dentro de átomos neutros pois estes não existem): **escapam livremente da zona radiativa** para a convectiva.

Na camada convectiva: T cai – menor número de colisões e mais elétrons permanecem ligados nos átomos – **absorvem radiação que vem do interior** – **gás era transparente à radiação torna-se opaco** na camada convectiva.

Radiação é transportada por convecção: ocorre sempre que material mais frio sustenta-se sobre mais quente – material mais quente desloca-se para cima e material mais frio afunda para baixo – através da zona convectiva energia é transportada para a superfície pelo movimento físico do gás (convecção).

Interior

Camada de interface

Zona convectiva

energia transportada por convecção

Zona radiativa

energia transportada por ftons (radiação)

Núcleo

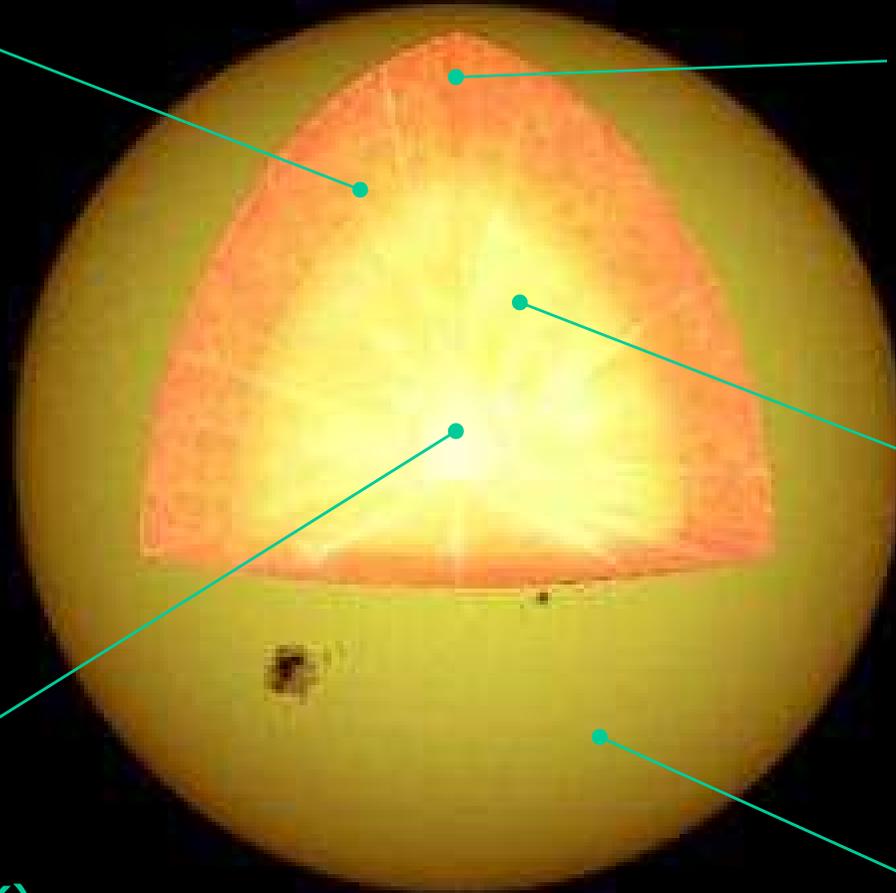
(15.000.000 K)

Fusão nuclear

$4\text{H} \rightarrow \text{He} + 2\nu + \text{energia}$

Superfície

(5780 K)



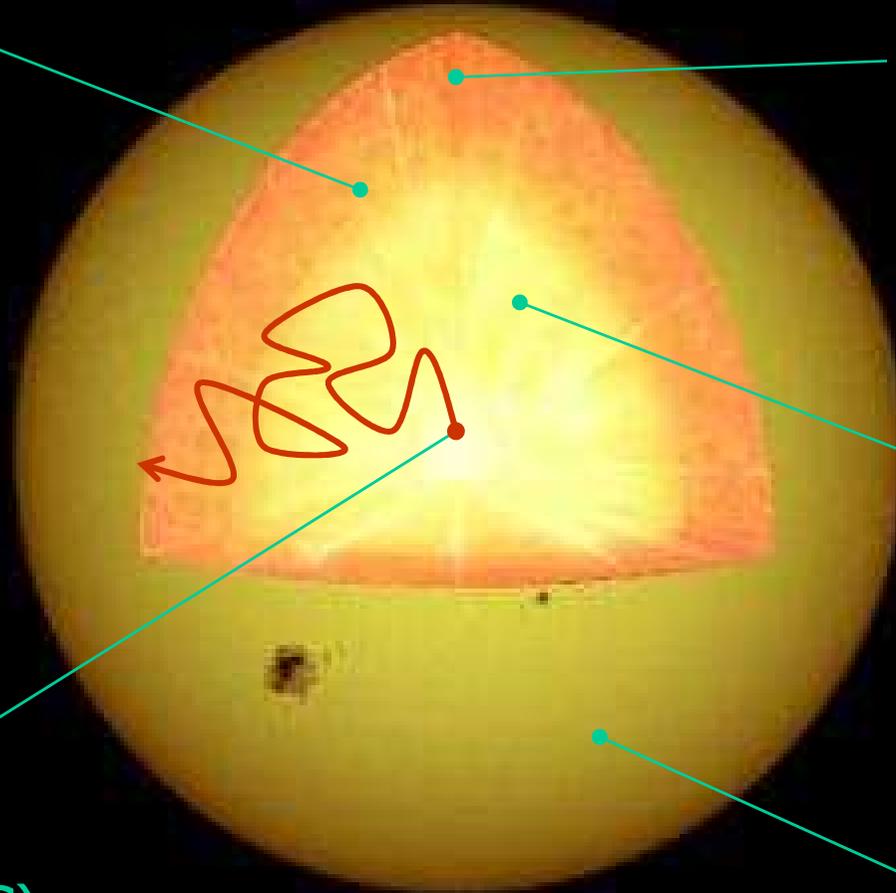
Interior

Camada de interface

a luz pode demorar até 1,5 milhão de anos para chegar à superfície !

Núcleo
(15.000.000 °C)
Fusão nuclear

$4\text{H} \rightarrow \text{He} + 2\nu + \text{energia}$



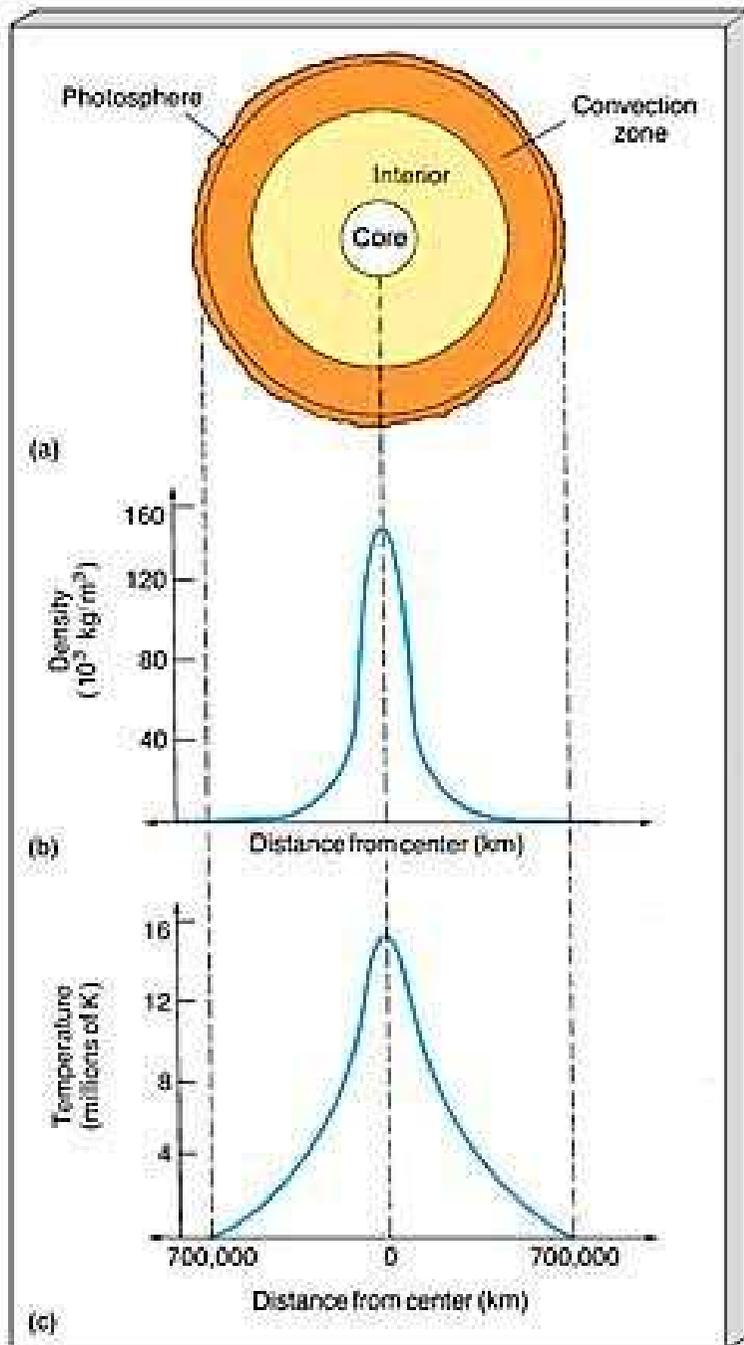
Zona convectiva

energia transportada por convecção

Zona radiativa

energia transportada por ftons (radiação)

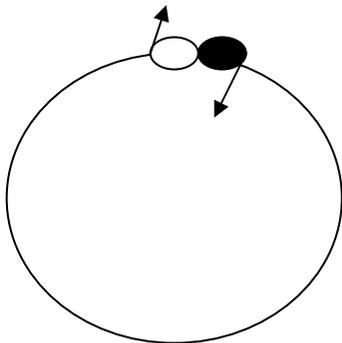
Superfície
(5780K)



Modelos teóricos

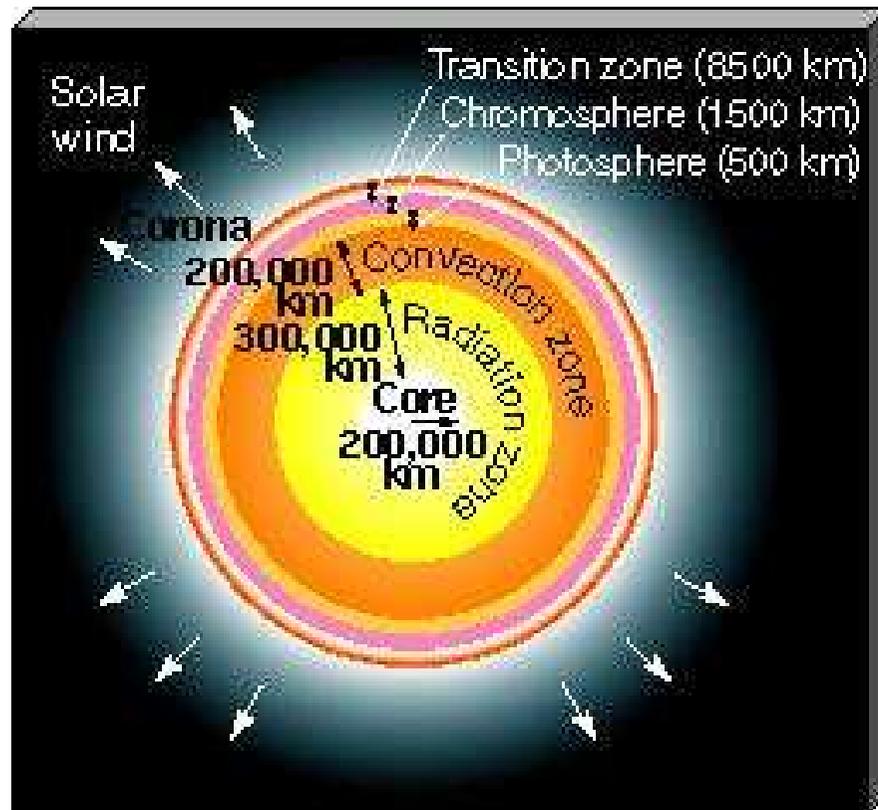
Perfis de densidade e temperatura para o interior do Sol

Topo da Camada Convectiva



- **Formada por granulações:** gas brilhante e escuro
- Cada granulo: 1000 km de extensao
- **Parte brilhante:** espectroscopia das linhas indicam gas movendo-se para cima (em nossa direcao – espectro desloca-se para o azul) e material + quente (dai emite + radiacao e é + brilhante)
- **Parte escura:** move-se para baixo (afasta-se de nos: espectro desloca-se para o vermelho); material + frio: emite menos radiacao
- **Granulações: prova dos movimentos convectivos**

Atmosfera Solar



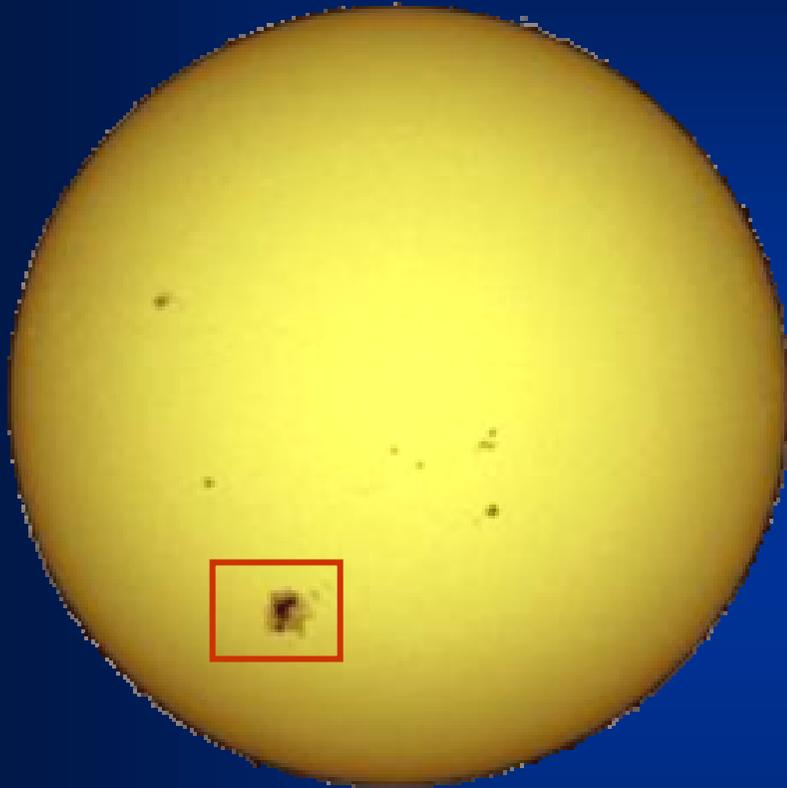
Enorme quantidade de informacao a partir do **espectro de absorcao:** forma-se na **atmosfera solar:**

fotosfera e cromosfera

**Composição Química do Sol: obtida com linhas da fotosfera e cromosfera –
mas representa todo Sol**

					<i>Abundance</i>	<i>Abundance</i>
					<i>(% do numero total de atomos)</i>	<i>(% da massa total)</i>
<i>Elements</i>						
Hydrogen					91.2	71.0
Helium					8.7	27.1
Oxygen					0.078	0.97
Carbon					0.043	0.40
Nitrogen					0.0088	0.096
Silicon					0.0045	0.099
Magnesium					0.0038	0.076
Neon					0.0035	0.058
Iron					0.0030	0.14
Sulfur					0.0015	0.040

Fotosfera



Manchas Solares: com fortes campos magneticos: inibem transporte convectivo de energia – são por isso regioes + frias (T=2000 K) e escuras !

Camada bem estreita (500 Km) de onde provem luz visivel observada (camadas + internas opacas)

Densidade = 5×10^{15} parts. cm^{-3}

$$\rho = n m_H = (5 \times 10^{15}) \times (1,67 \times 10^{-24} \text{ g}) = 10^{-8} \text{ g/cm}^3$$

T_{ef} = 5800 K (do espectro continuo de corpo negro)

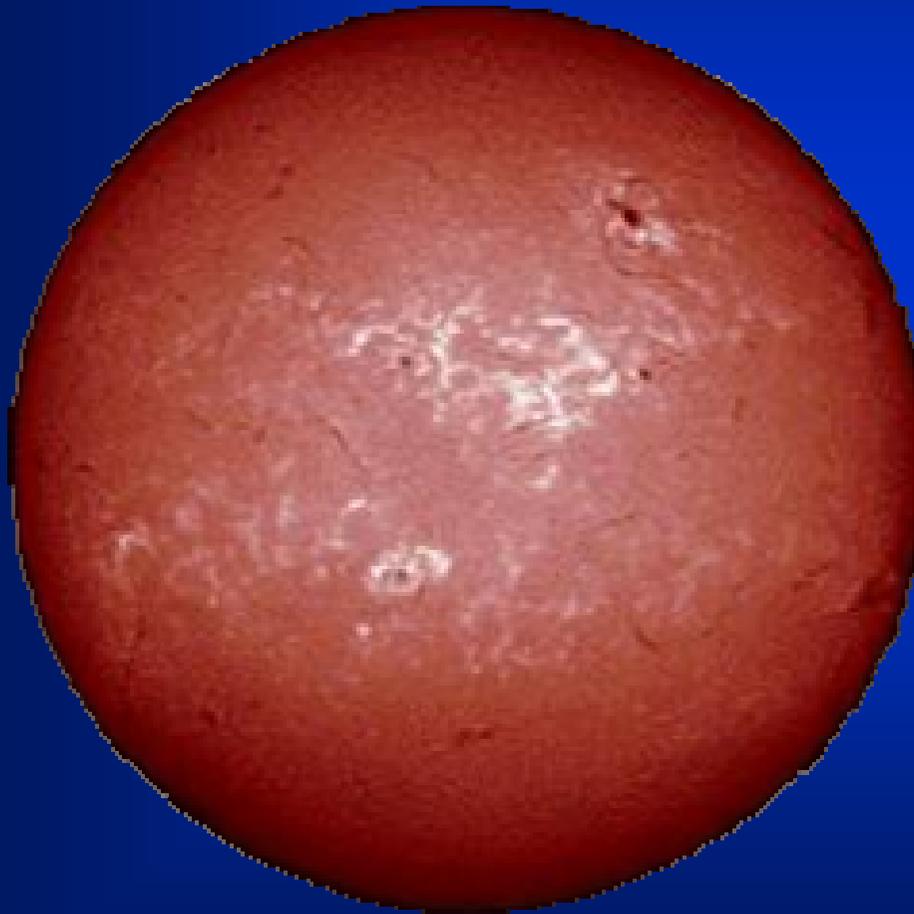
Obscurecimento do limbo: menor brilho na borda (e < temperatura)

No centro do disco solar: > brilho pois soma de todas as contribuicoes de T de todas as profundidades

Nas bordas: < brilho porque somente contribuicoes das Temperaturas mais externas e portanto + frias.

Cromosfera

baixa atmosfera



Densidade \ll que da fotosfera:
 $10^{12} - 10^9 \text{ cm}^{-3}$

Espessura: 1500 km

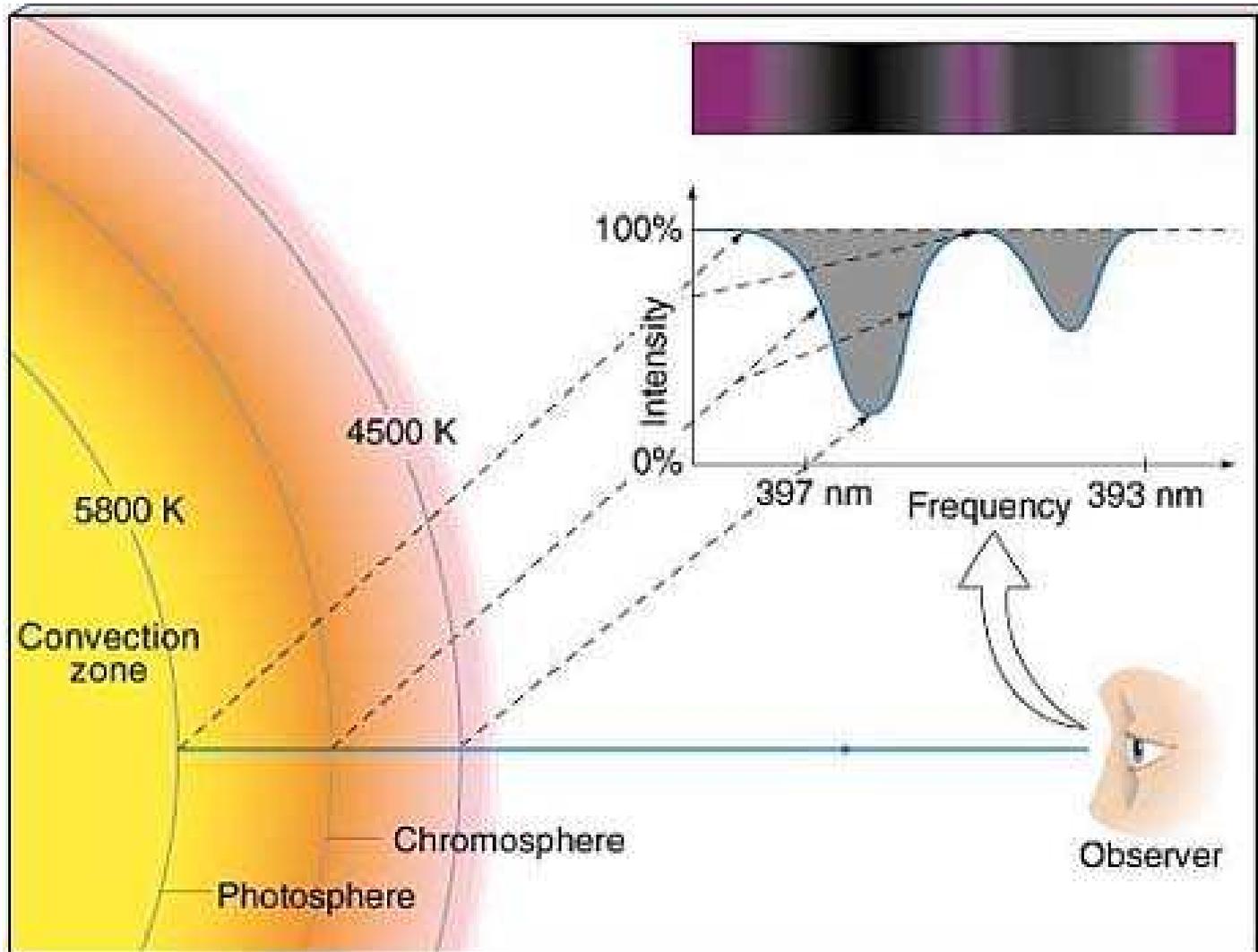
Emite pouca luz por causa da baixa densidade: fotosfera é brilhante demais e domina radiação da cromosfera ($I \propto \text{densidade}^2$)

Cromosfera: luz observável nos eclipses solares: avermelhada devido a emissão de:

$H\alpha = H I 6562$

(da série de Balmer $n=2 \leftarrow n=3$)

Principal linha de emissão no espectro cromosférico: linha do He que requer T's altas para ser excitado (detectado pela 1ª vez no Sol)

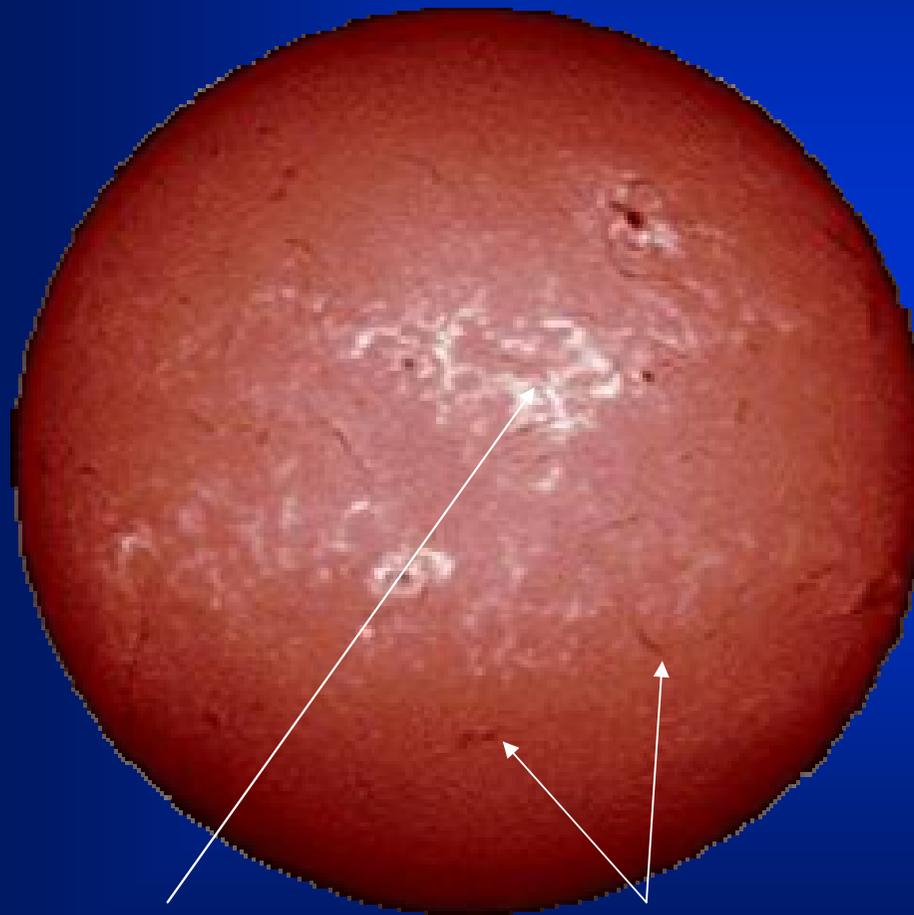


Linhas de absorção: + fracas nas regiões + internas (fotosfera) e + fortes nas regiões + externas

linhas + fortes geradas na base da cromosfera: linhas de Balmer do H e linhas do Call (H e K)

Cromosfera

baixa atmosfera



Praias

Filamentos

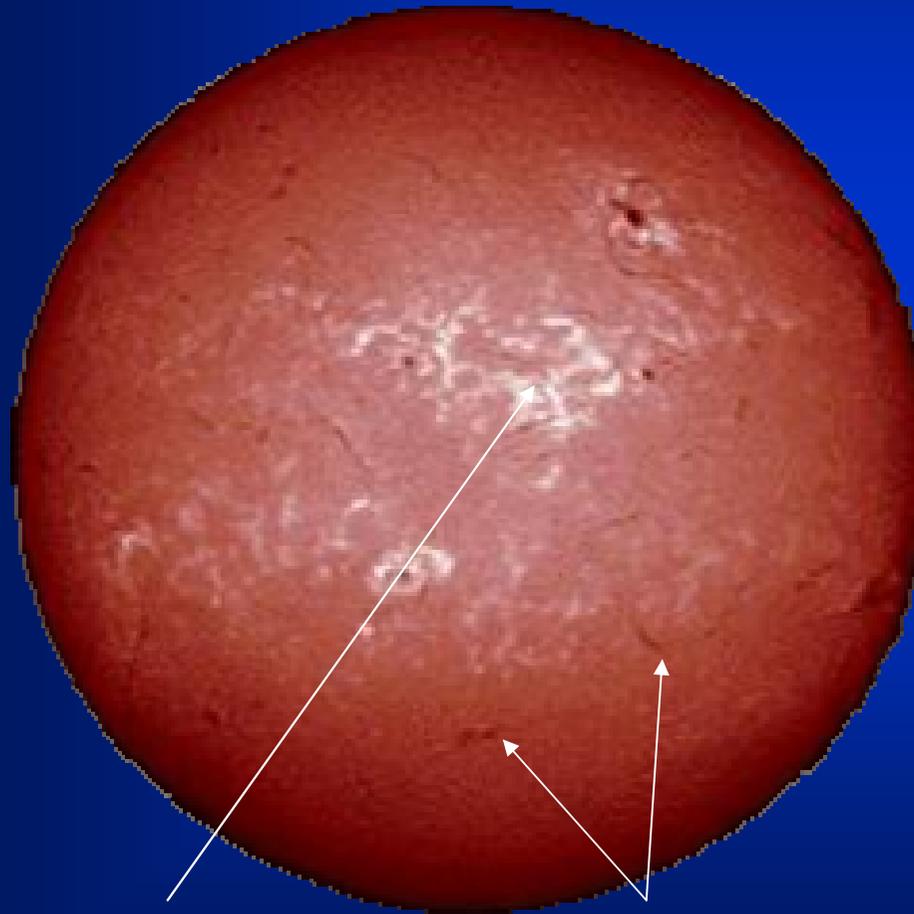
Cromosfera: nao tranquila

Supergranulações:
similares às granulações
mas com dimensoes de
30.000 km

Tempestades solares a
cada poucos minutos –
expelem jatos de material
quente: **ESPICULOS**

Cromosfera

baixa atmosfera



Praias

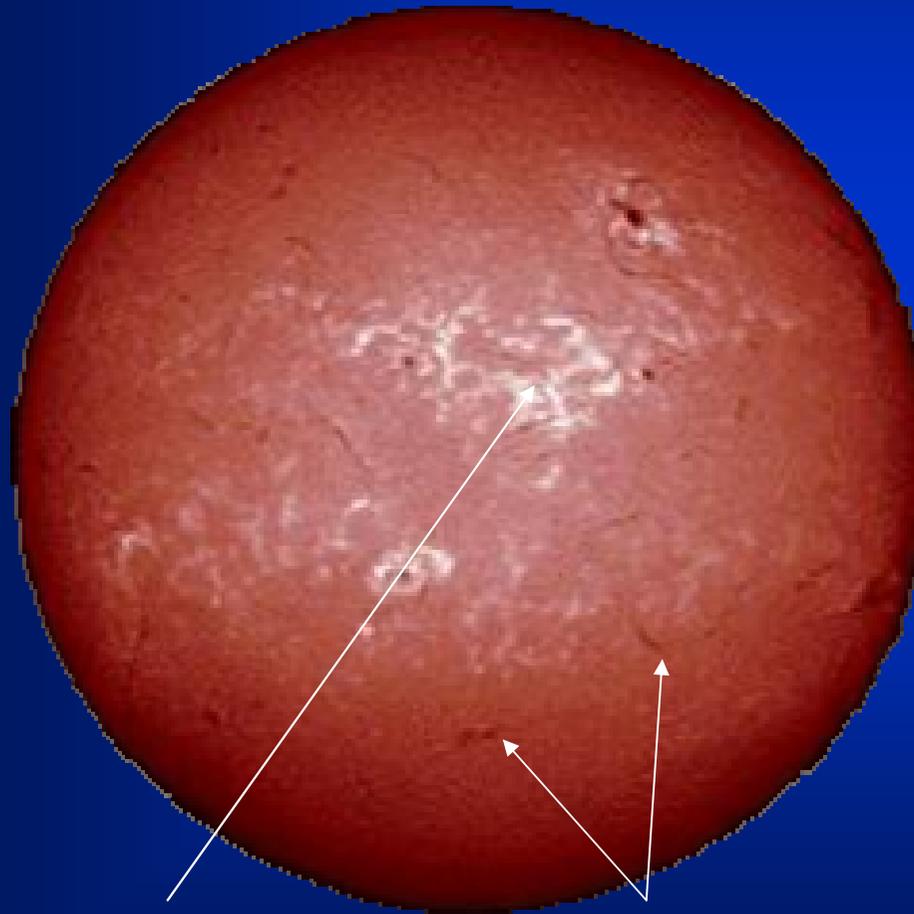
Filamentos



supergranulação

Cromosfera

baixa atmosfera

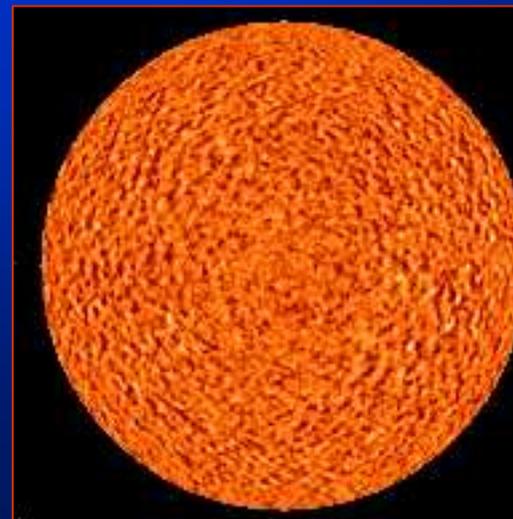


Praias

Filamentos

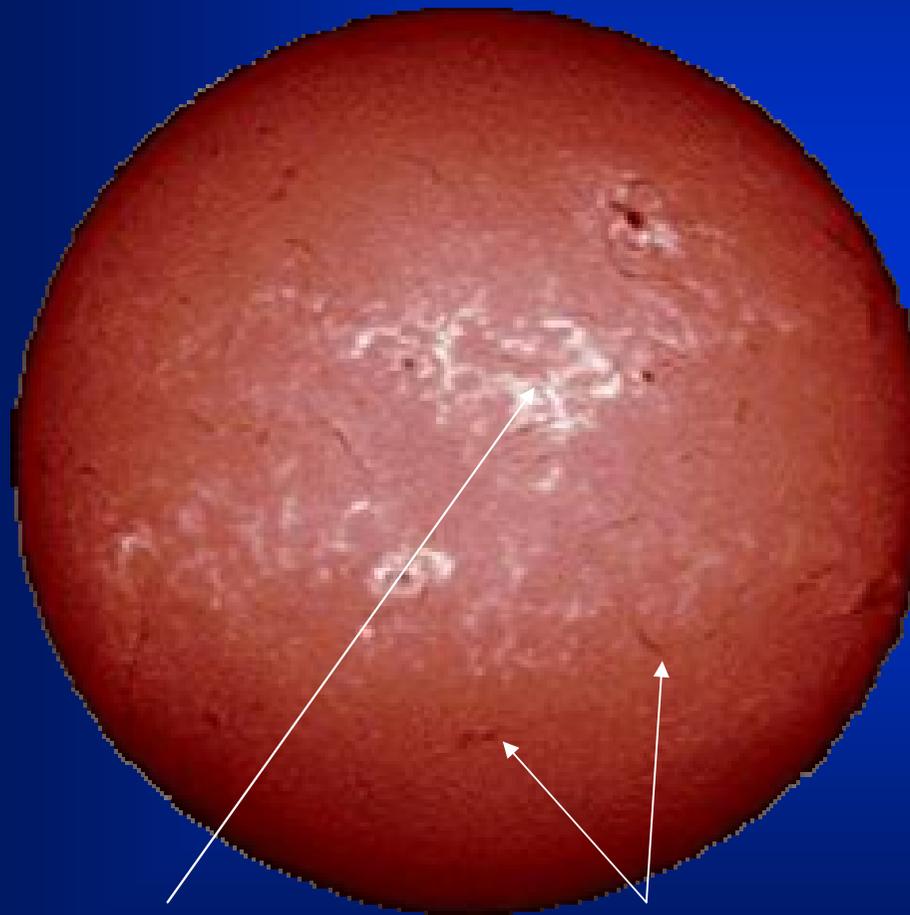


supergranulação



Cromosfera

baixa atmosfera



Praias

Filamentos



supergranulação

espículas

Espículos:

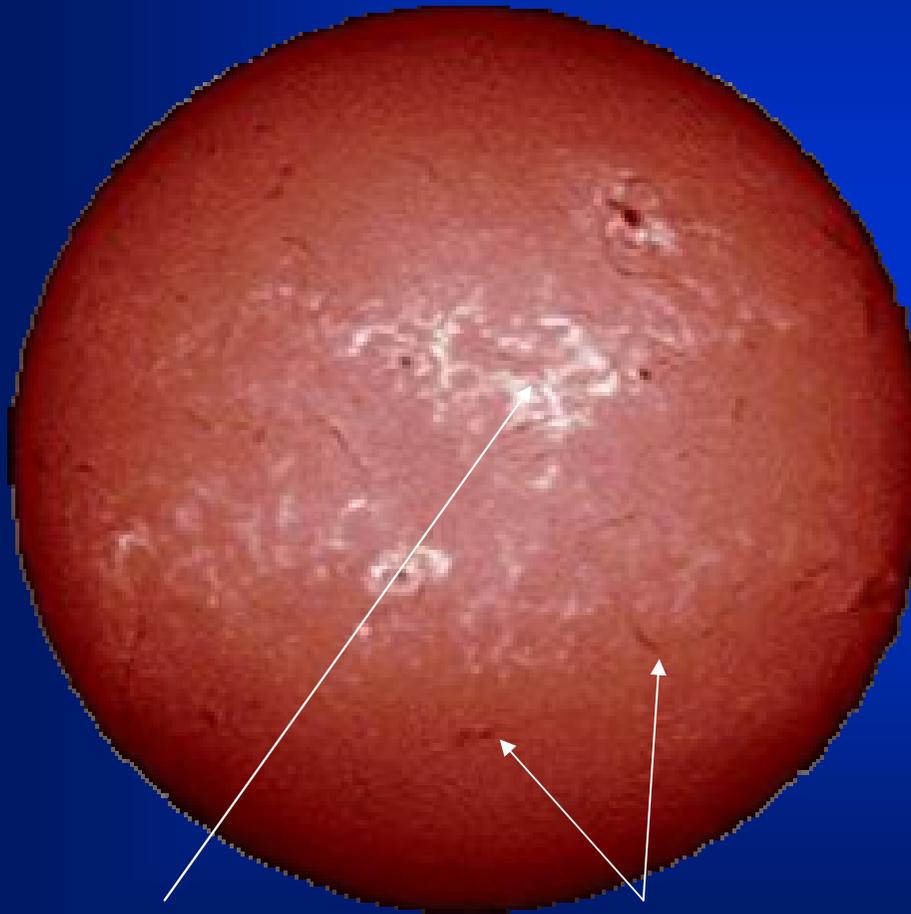
$v = 100 \text{ km/s}$ e alcançam 1000 km acima da fotosfera, campos magnéticos fortes

Emitem principalmente $H\alpha$, duram alguns minutos, são + escuros pois são + frios

Acumulam-se: redor das supergranulações

Cromosfera

baixa atmosfera



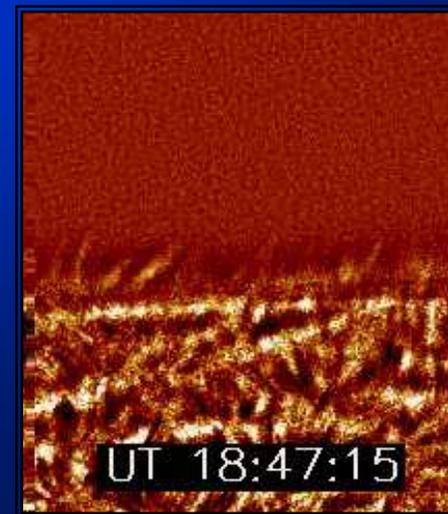
Praias

Filamentos



supergranulação

espículas



UT 18:47:15

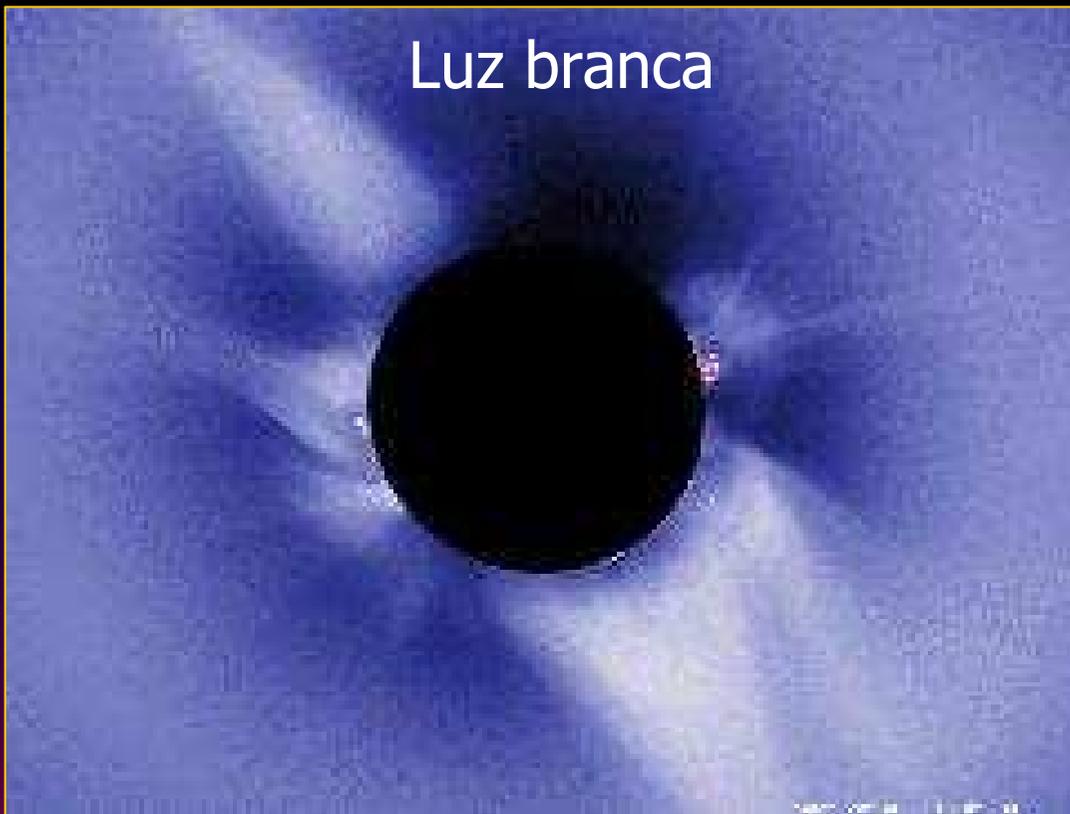


**Alta atmosfera.
Visível a olho nu apenas durante
os eclipses totais**

Coroa

Coroa

Luz branca



Coroa

Luz branca

Luz do Fe X



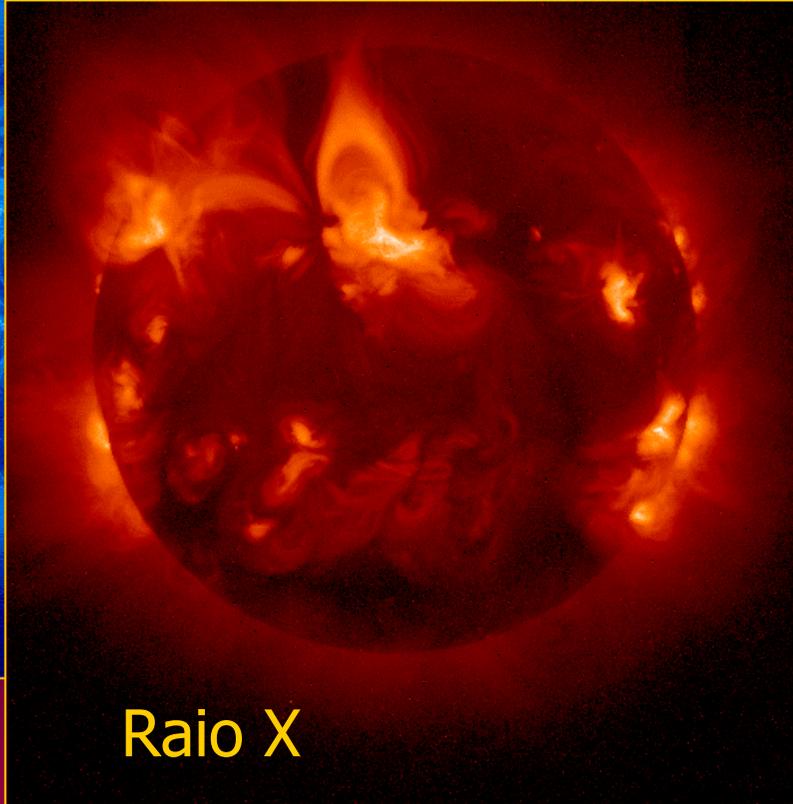
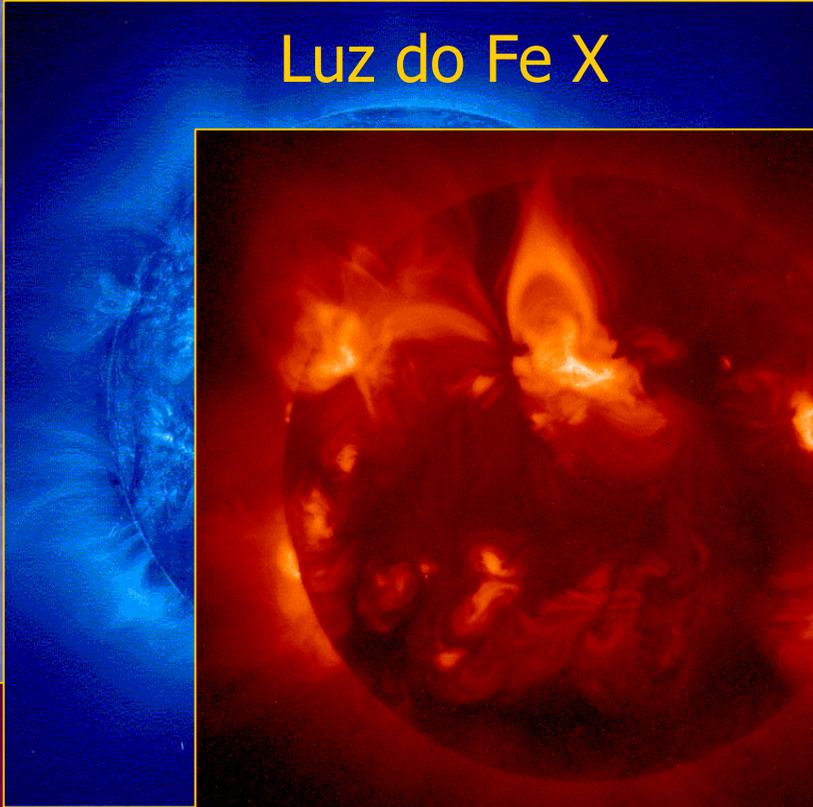
Coroa

Luz branca

Luz do Fe X

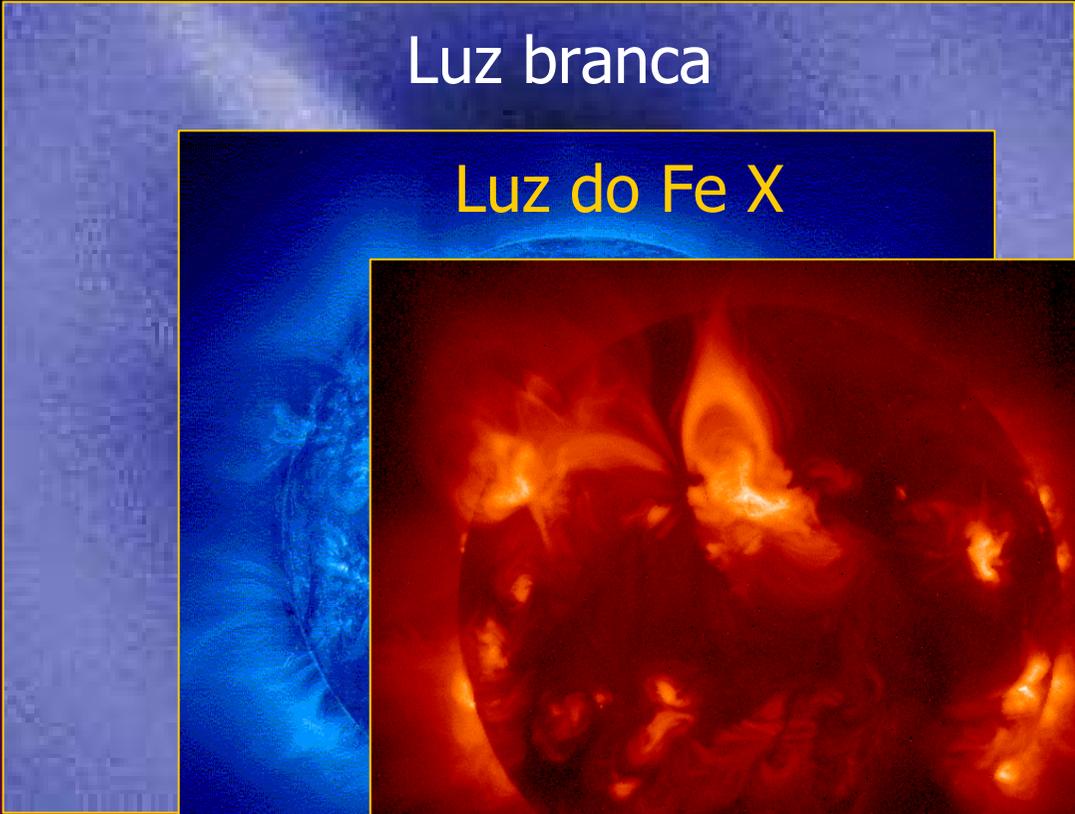
Raio X

Coroa

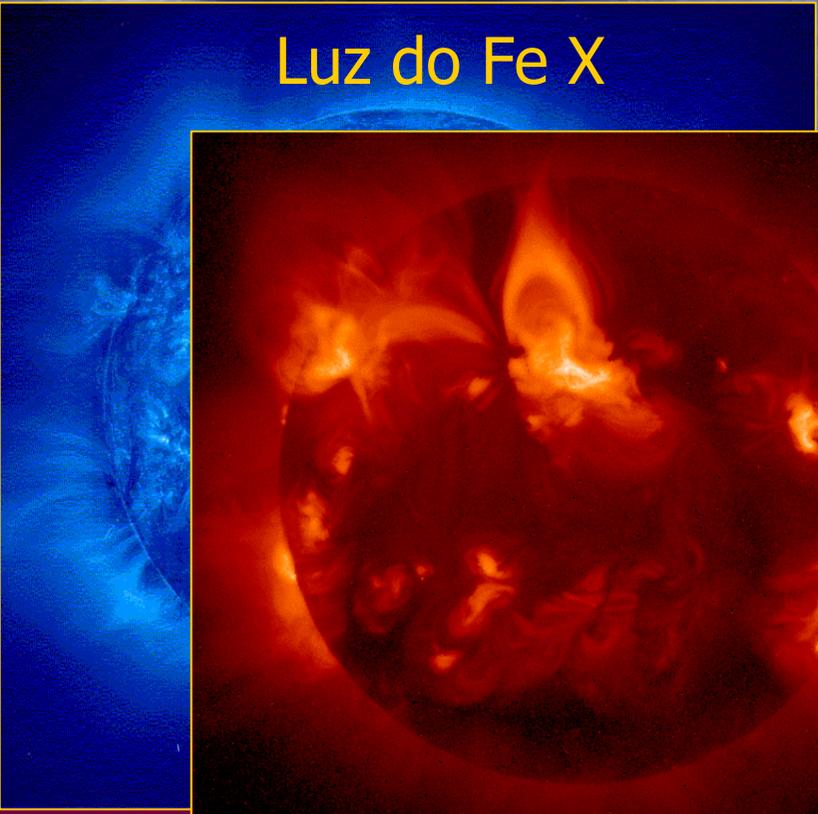


Coroa

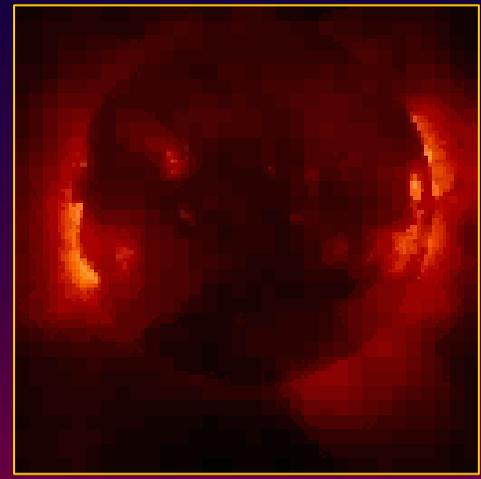
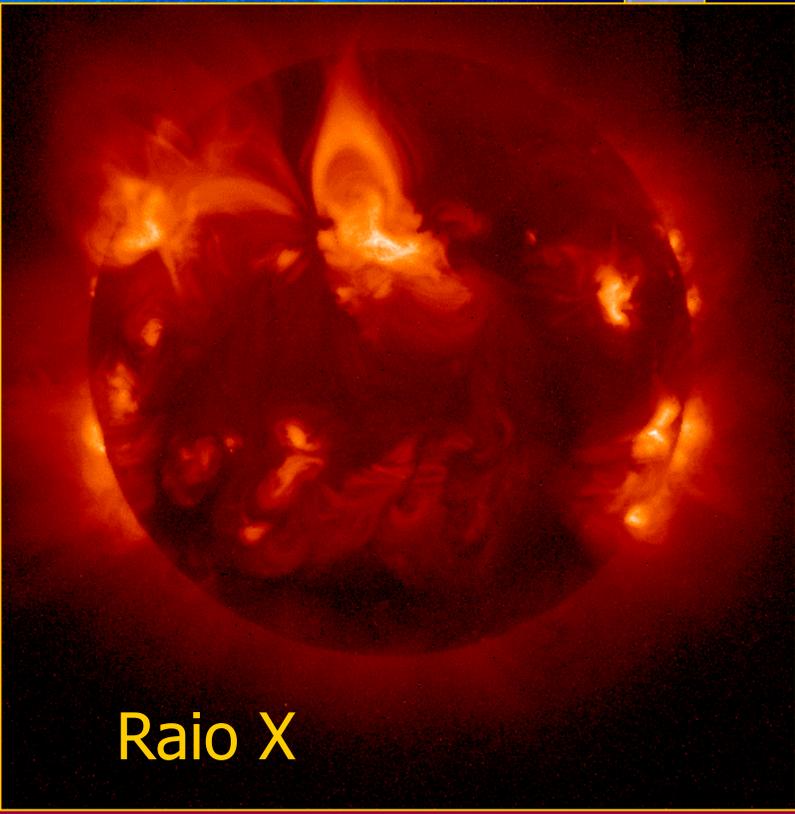
Luz branca



Luz do Fe X

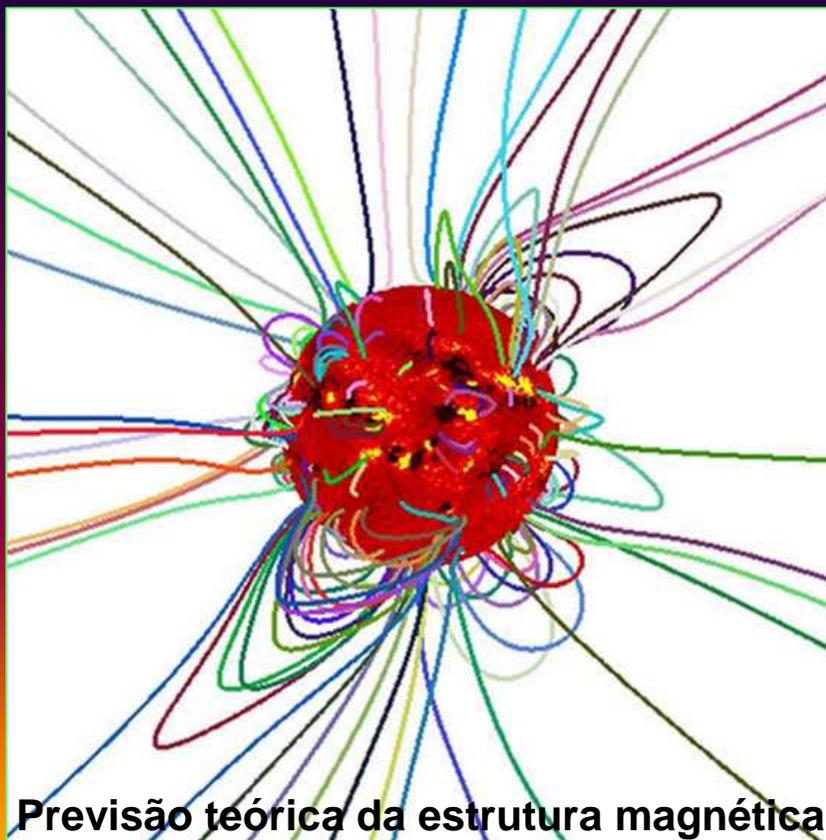


Raio X



Eclipse de 21/06/2001

(S. Koutchmy, Angola)



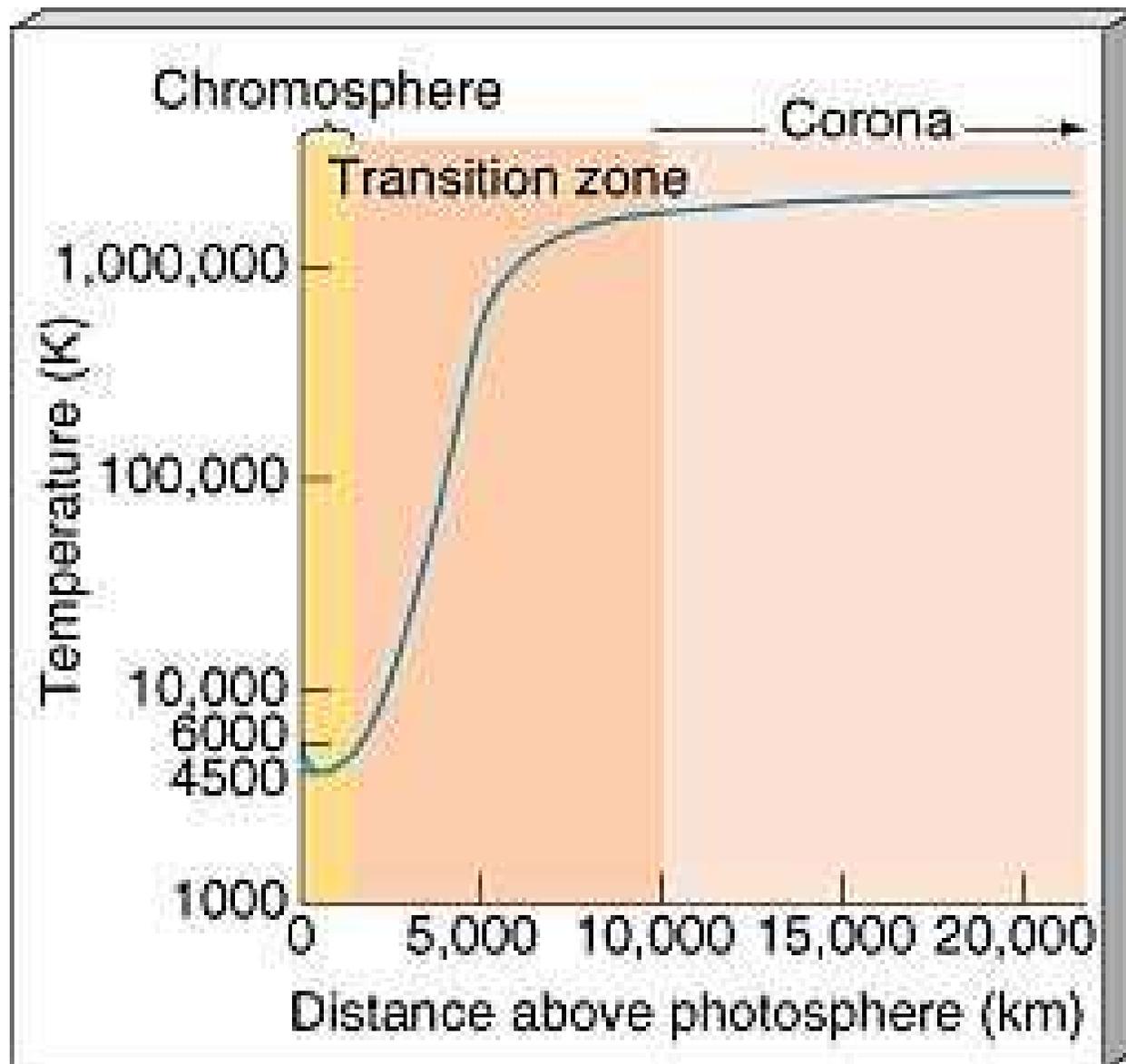
Região de Transição e Coroa

- **No eclipse solar** se fotosfera e cromosfera cobertas:
 - aparece **espectro de emissão com linhas diversas das zonas mais internas**
 - **Átomos nas regiões de transição e coroa:** + altamente ionizados (perderam + els.): criando espectros diferentes da foto e cromosfera

Ex. na coroa: linhas de Fe XIV (13 dos 26 els. arrancados!)

→ Razão: **T cresce rapidamente** da cromosfera para a coroa produzindo **REGIÃO DE TRANSIÇÃO:**

T passa de <10.000 K (topo cromosfera) → 50.000 K (estreita faixa RT: 8500 Km) → 10⁶ K (coroa)

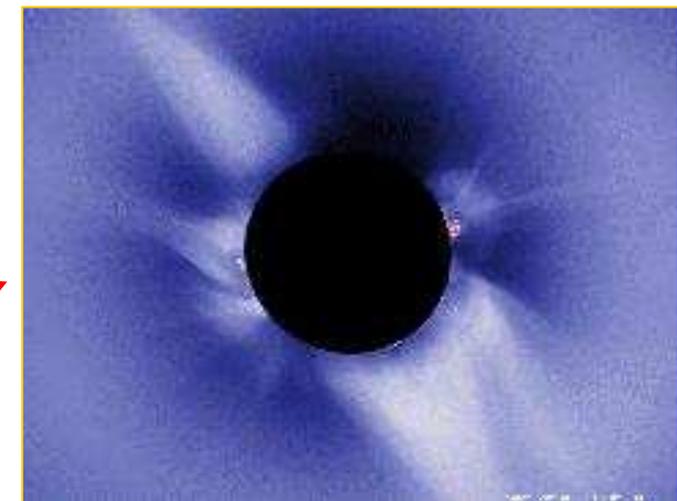
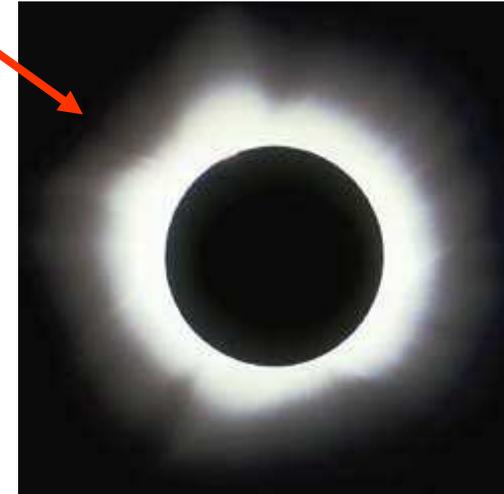


Zona de Transição

- Átomos e íons excitados e ionizados por colisão e voltam ao estado fundamental – **linhas de emissão**
- **+ fortes no UV:**
 - $L\alpha$ do H ($n=1 \leftarrow n=2$)
 - CIII (pico a 70.000 K)
 - NII (10^5 K)
 - O VI (3×10^5 K)

Coroa

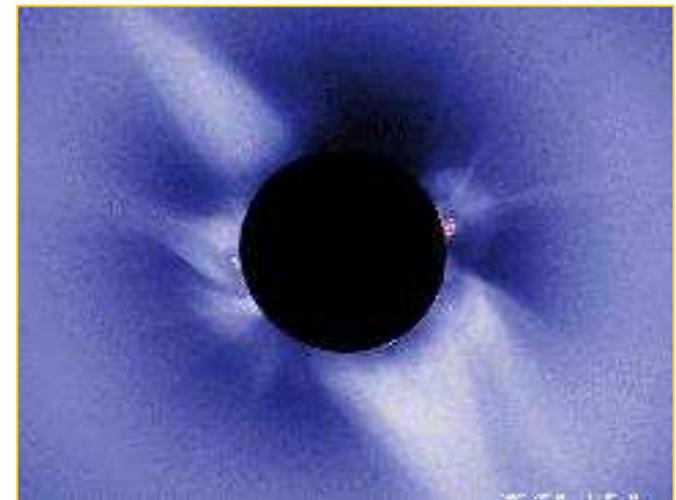
- Halo branco que aparece no eclipse: coroa solar
- **Espectro no visível: contínuo** produzido por colisões de els. livres ($T = 1 \text{ a } 2 \times 10^6 \text{ K}$)
- **Partes + externas: espectro de absorção** superpõe-se ao contínuo (devido ao espalhamento da luz por poeira)
- Brilho coronal: varia em função da atividade solar:
 - Quando **manchas solares (MS) mínimas** → coroa brilhante e uniforme
 - Quando **MS máximas** → coroa + brilhante e extensa no Equador e menos regular



Coroa

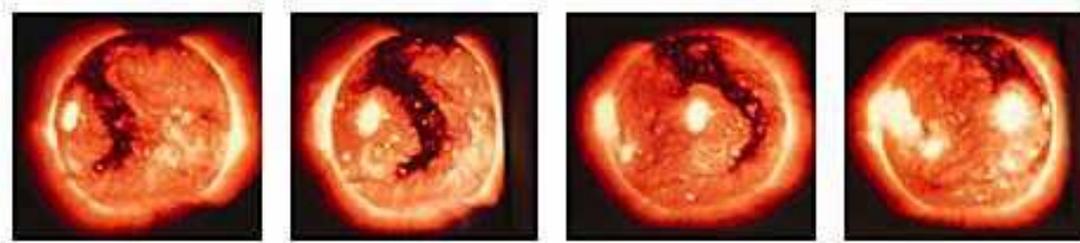
- **Linhas de emissao:** densidade é tao baixa que favorece linhas proibidas (transicoes a partir de niveis meta-estaveis)
- **Linhas de emissao: superpoem-se ao espectro continuo**
 - [Fe XIV] 5303 - linha verde
 - [Fe X] 6374 – linha vermelha

Para ionizar Fe de 9 a 13 vezes:
gas **T = 1,3 a 2,3 x 10⁶ K** (quando atividade solar minima)



Coroa

- **Emissao Raio-X:** coroa emite predominantemente em raio X por causa da alta T



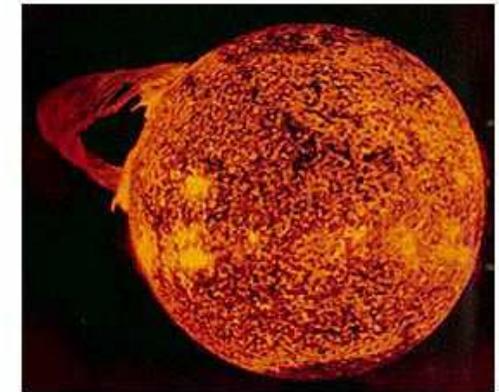
- **Figura mostra emissao raio X ao longo de 1 dia** → regio negra: **BURACOS CORONAIS:**
regioes de baixa densidade (10 x menor que o resto coroa)

Nos BC's: linhas de **B** se estendem ate o meio interplanetario: particulas carregadas escapam por essas linhas e escapam formando o **VENTO SOLAR**

Nas outras partes da coroa: linhas **B** fechadas em loops mantendo particulas carregadas proximas à superficie, mantendo a densidade mais alta.



(a)



(b)

Vento solar

Radiação e partículas carregadas escapam do Sol

Radiação: leva 8 minutos para chegar na Terra

Partículas: $v = 500$ km/s – levam alguns dias para chegar na Terra

Esse feixe de partículas constante escapando = VENTO SOLAR

VENTO SOLAR: resulta da alta T da coroa: a $R = 10^7$ Km acima da fotosfera o gas é quente o bastante para escapar à gravidade e fluir para o meio interplanetario:

$$v_{th} = (2kT/m)^{1/2} > v_{esc} = (2 GM/R)^{1/2}$$

VS carrega 10^6 ton. gas/s: desde que se formou o Sol (a 4,6 bi de anos): $< 0,1$ % de materia foi perdida no vento

Maior parte da luminosidade do Sol: emissão contínua da fotosfera: provém do Sol calmo – radiação estacionária

Essa radiação contrasta com radiação esporádica e explosiva do SOL ATIVO

ATIVIDADE SOLAR = fenômenos cíclicos explosivos associados à rotação do Sol e variação do campo magnético B

Atividade Solar

REGIOES ATIVAS: areas do Sol onde ocorrem:

Manchas Solares

Proeminencias

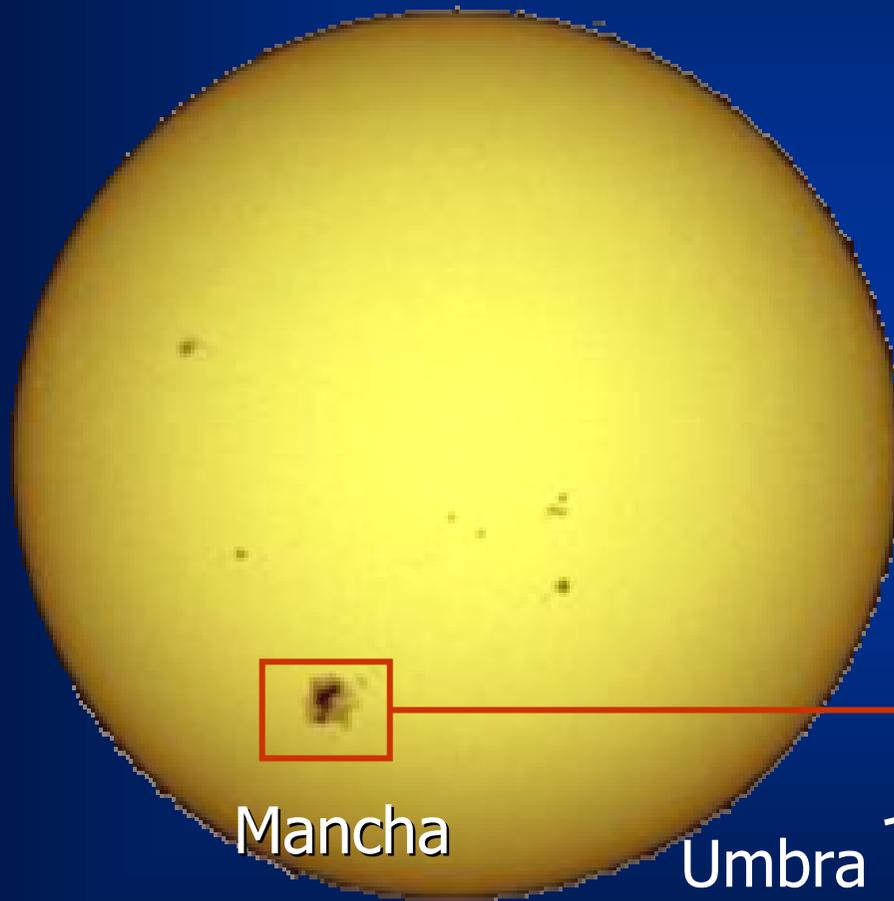
Praias

Flares (explosoes solares)

Atividade Solar: contribui pouco para Luminosidade total do Sol e para sua evolucao, mas tem efeitos importantes sobre Terra e a manutencao do campo magnetico solar

Atividade Solar

Manchas Solares: fotosfera

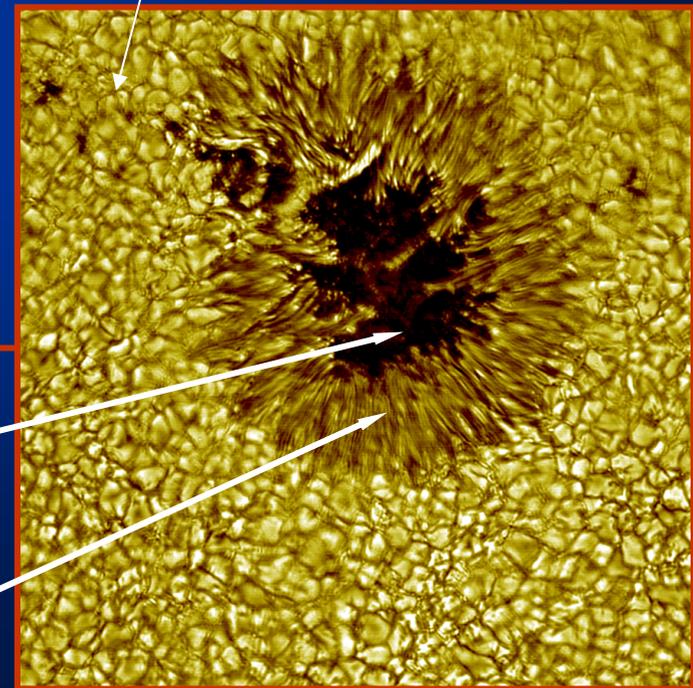


Mancha

Umbra

Penumbra

Grânulos



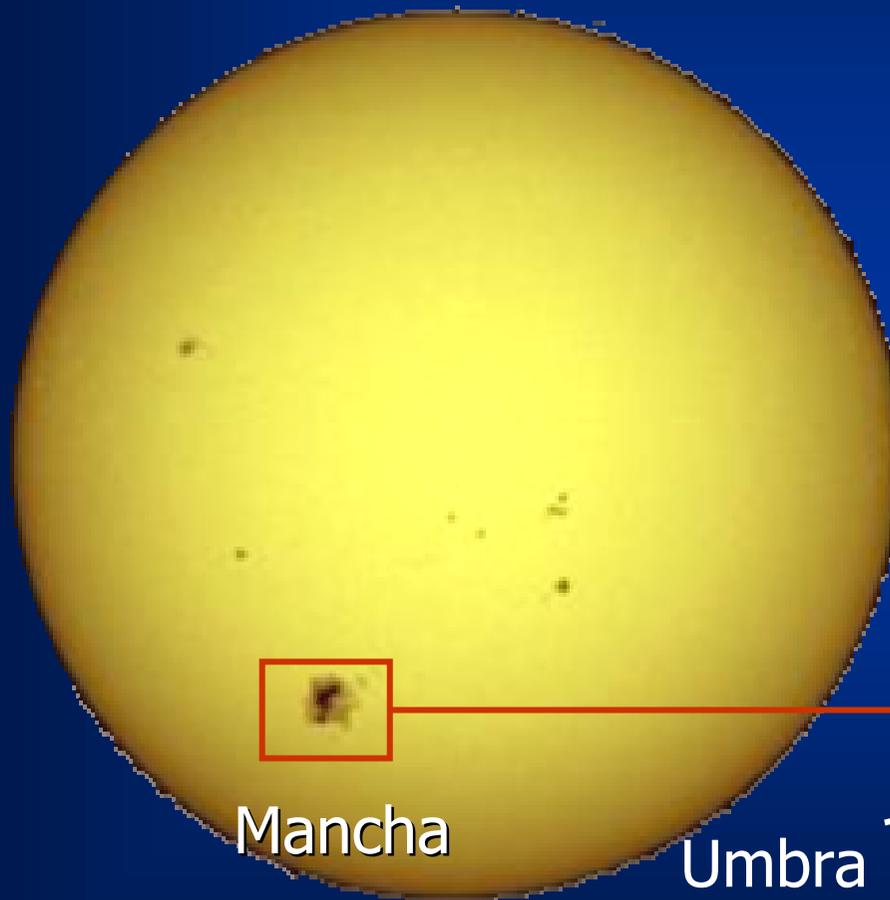
Manchas Solares: fotosfera

MS: D= 10.000 Km (similar tamanho da Terra)

São + frias que gas fotosferico : daí + escuras

Penumbra: T= 5500 K

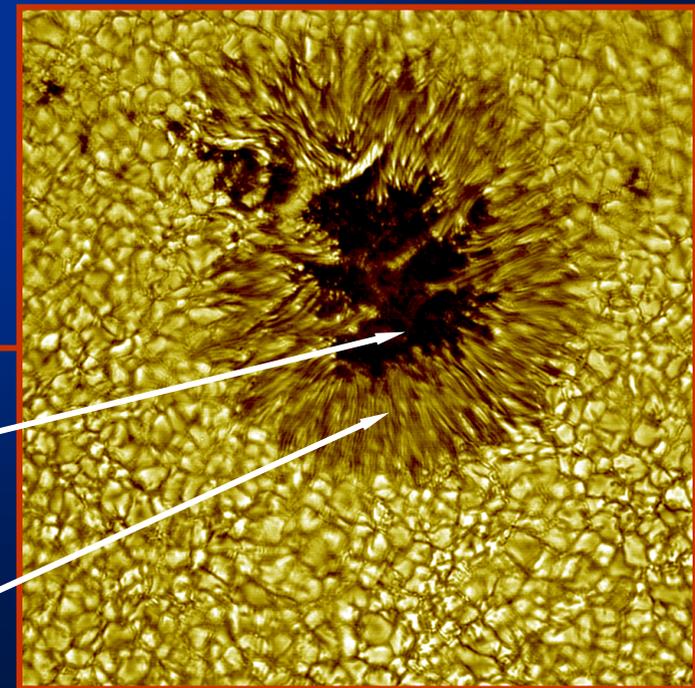
Umbra: T = 4500 K



Mancha

Umbra

Penumbra



Manchas Solares: fotosfera

MS: podem durar até 100 dias

Origem: associadas a B

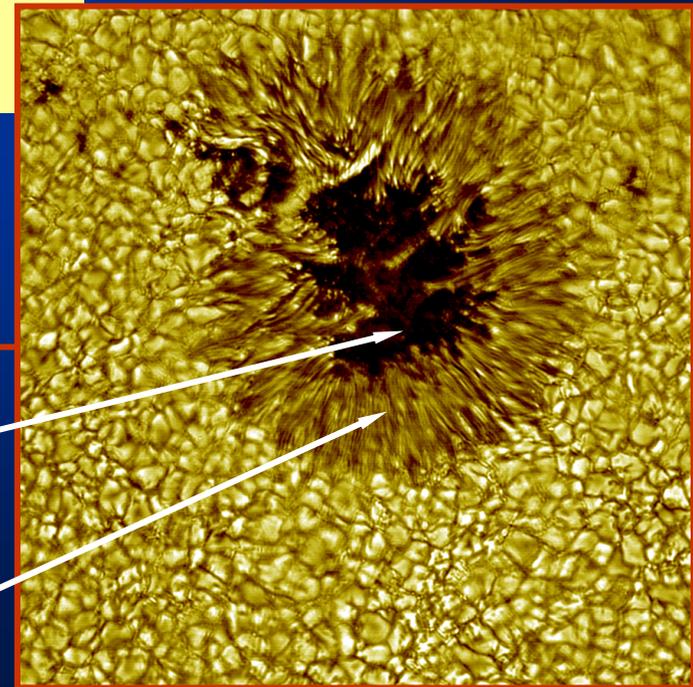
$$B_{MS} = 0,1 - 0,4 \text{ Tesla} = 1000 B_{\text{fotosfera}}$$

Esse campo inibe movimentos convectivos e transporte de energia para as MS → ficam + frias que resto da fotosfera

Mancha

Umbra

Penumbra



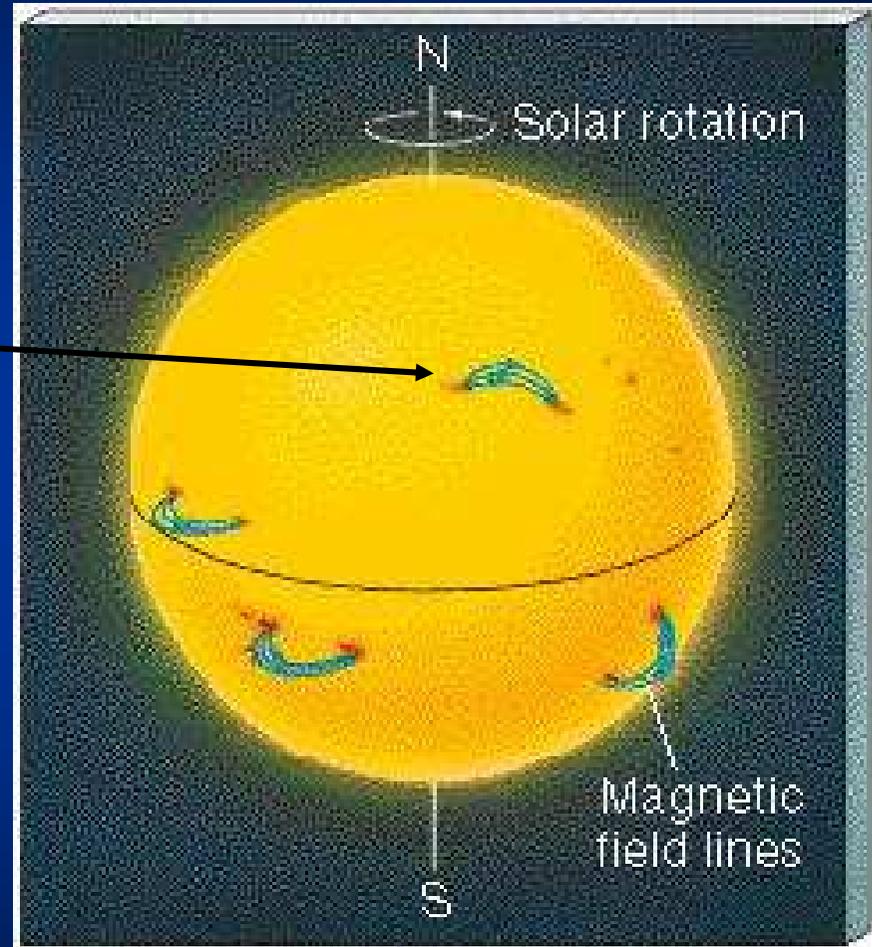
Manchas Solares: fotosfera

MS: sempre em pares e o B associado a cada mancha tem polaridade oposta

B forma loops ligando 2 MS

Num mesmo hemisferio: todos os loops tem mesma polaridade

No outro hemisferio: essa polaridade é invertida



Ciclo das manchas solares

(b) Durante ciclo variação na distribuição de MS em relação à latitude solar:

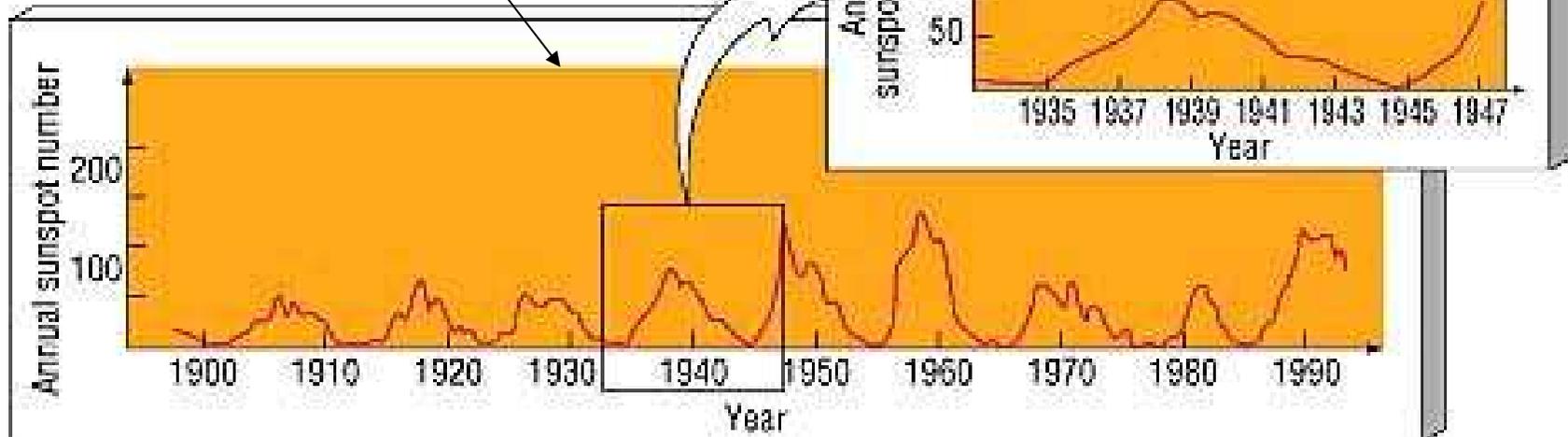
No mínimo do ciclo: + MS em altas latitudes ($+35^\circ$ a -35°)

No máximo do ciclo: + MS entre $+15^\circ$ e -15°

Pouco antes do mínimo: MS entre $+8^\circ$ e -8°

(a) Numero de MS varia com o tempo

N. máximo a cada 11 anos e depois $\rightarrow 0$, depois começa a crescer novamente ($P=11$ anos)

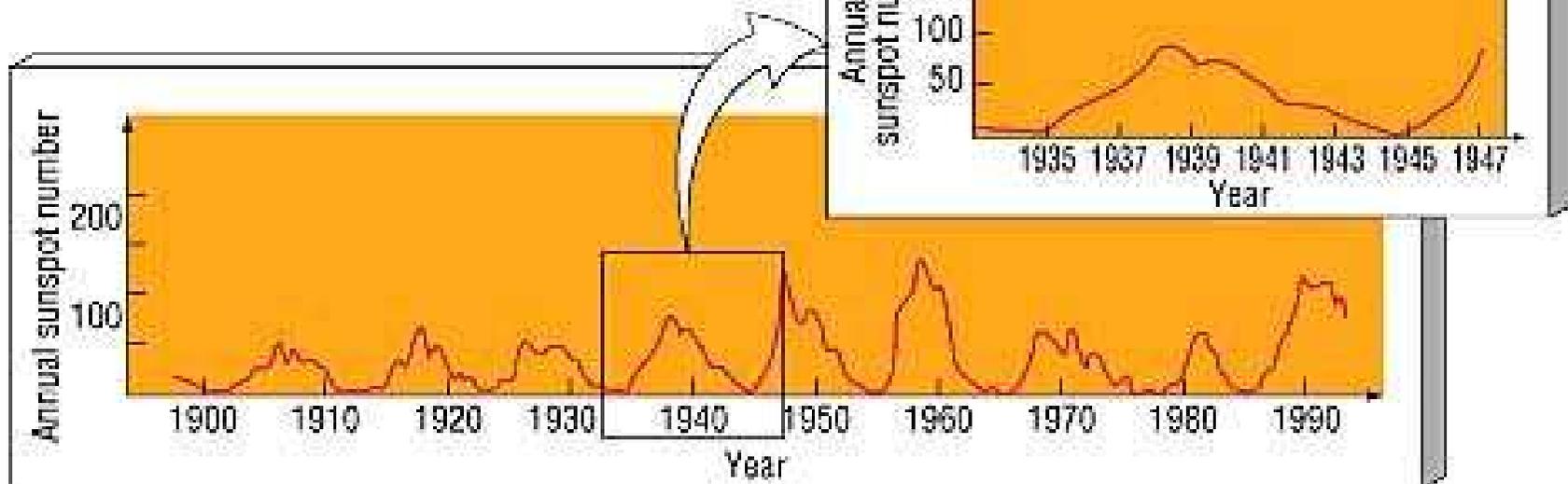


Ciclo das manchas solares

Ciclo de MS dura 11 anos: $\frac{1}{2}$ do ciclo solar de 22 anos

Nos primeiros 11 anos: MS de um hemisferio tem dada polaridade e o outro hemisferio: polaridade oposta

Nos segundos 11 anos: a polaridade se inverte em cada hemisferio



Dinamo Solar

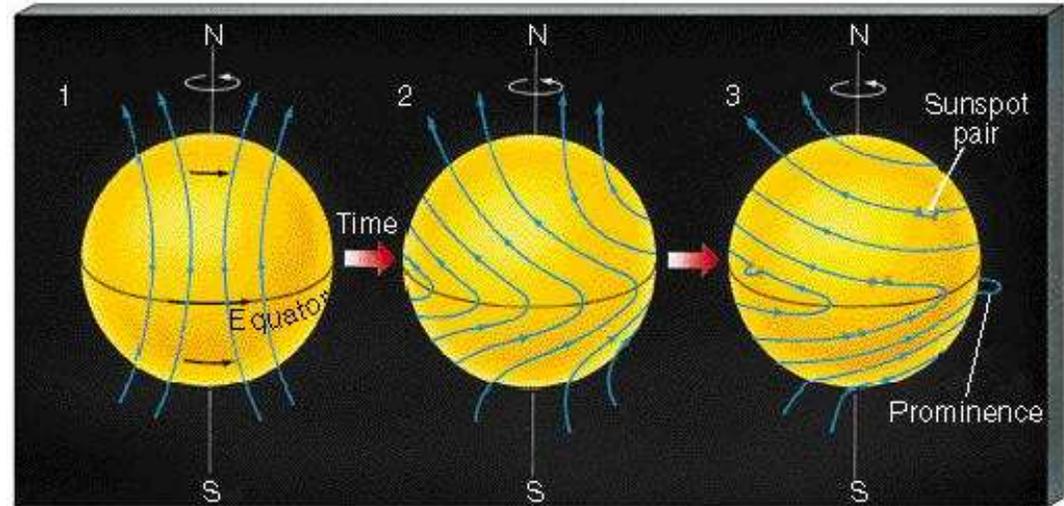
- Combinação: **rotação diferencial + convecção: afeta o magnetismo do Sol e explica atividade solar**

Rotação diferencial deforma B: estica e enrola linhas mais rápido no equador (que gira + rápido)

Progressivamente: campo magnético N-S se re-orienta em configuração L-O

Convecção: faz com que gases magnetizados ergam-se em loops – formando pares de MS

A organização L-O: explica a polaridade dos pares de MS em cada hemisfério



À medida que ciclo progride:

MS com polaridade inversa deslocam-se para os polos e ao final de 22 anos: polaridade toda invertida

Atividade Solar: simplesmente segue as variações periódicas do B solar

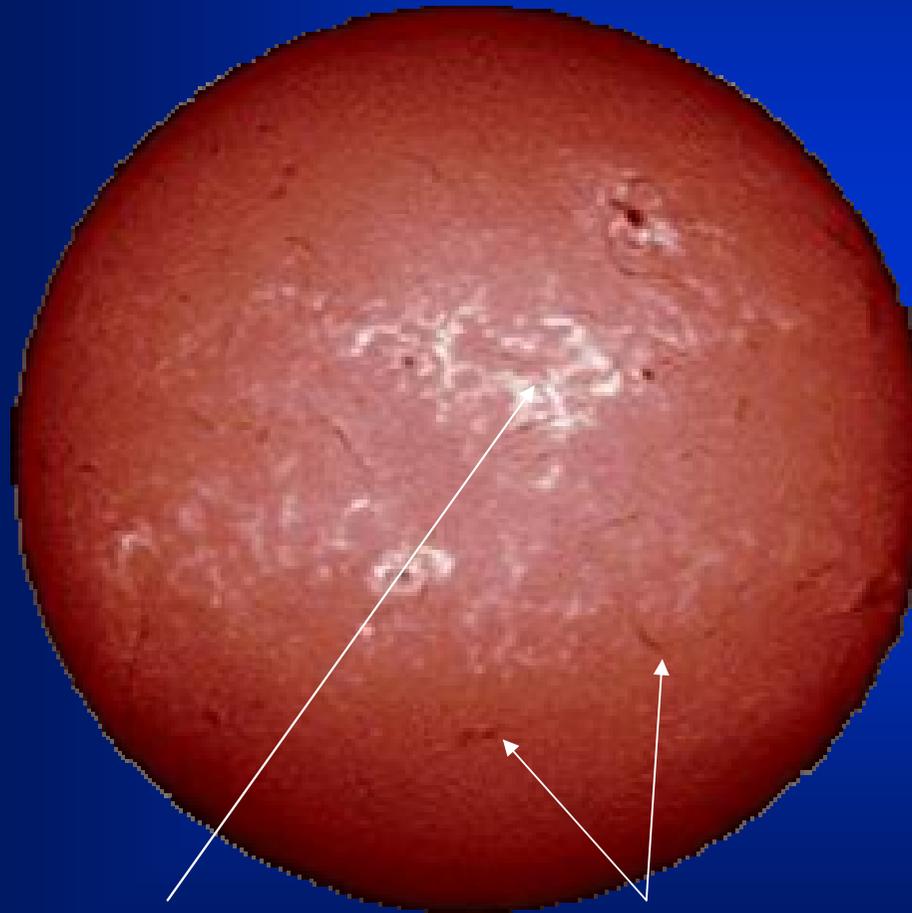
Manchas Solares: são aspectos relativamente suaves dessa atividade

Material fotosférico circundante: sofre variações ocasionais cuspidando para a coroa partículas energéticas = **REGIÕES ATIVAS**

Regiões ativas: são + frequentes no máximo do ciclo solar

Atividade Solar

Atividade Solar: Cromosfera



Praias

Filamentos



proeminencia



1999/03/06 08:08:10

Atividade Solar: Cromosfera

Proeminencias:

são os loops de gas ejetado da superfície (cromosfera) das regiões ativas: revelando o campo B (em loop) conectando um par de MS

Extensão típica: 100.000 Km (10 x D da Terra !)

Proeminencias + largas: $0,5 \times 10^6$ km: aparecem somente no máximo da atividade solar



Erupção (Flare)

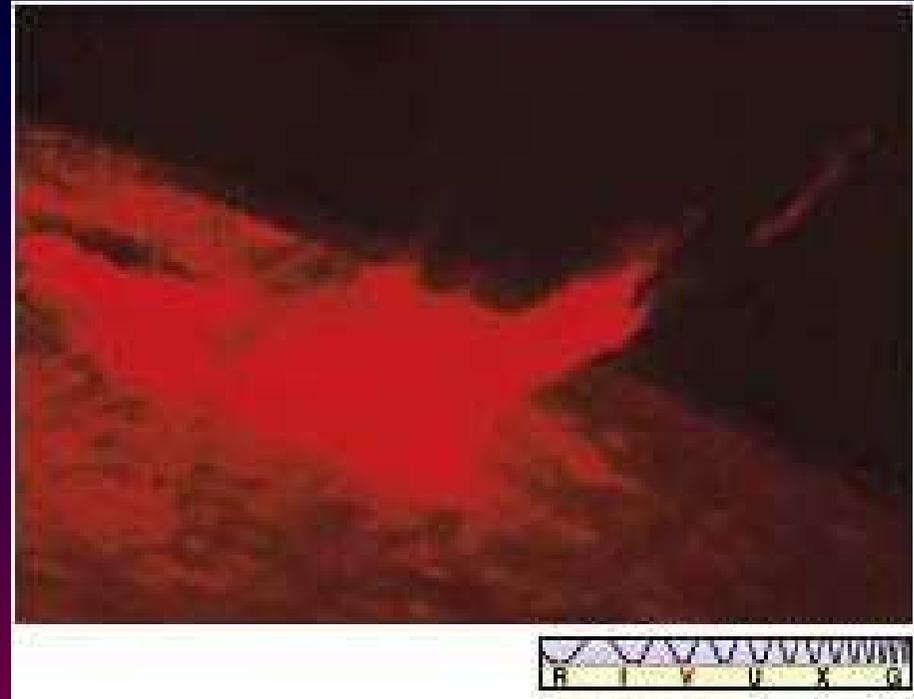
Flares (explosões) solares:

Resultantes de instabilidades magnéticas (quando linhas de polaridade oposta se aniquilam e re-conectam) causando liberação violenta de energia magnética:

Ocorrem em minutos liberando enormes quantidades de energia

UV e raio-X: bem intensos no coração do flare: $T_{\text{maximo}} = 10^8 \text{ K} !$

Flare libera tanta energia quanto prominências + largas: mas em minutos ou horas e não em dias ou semanas (como as proeminências)



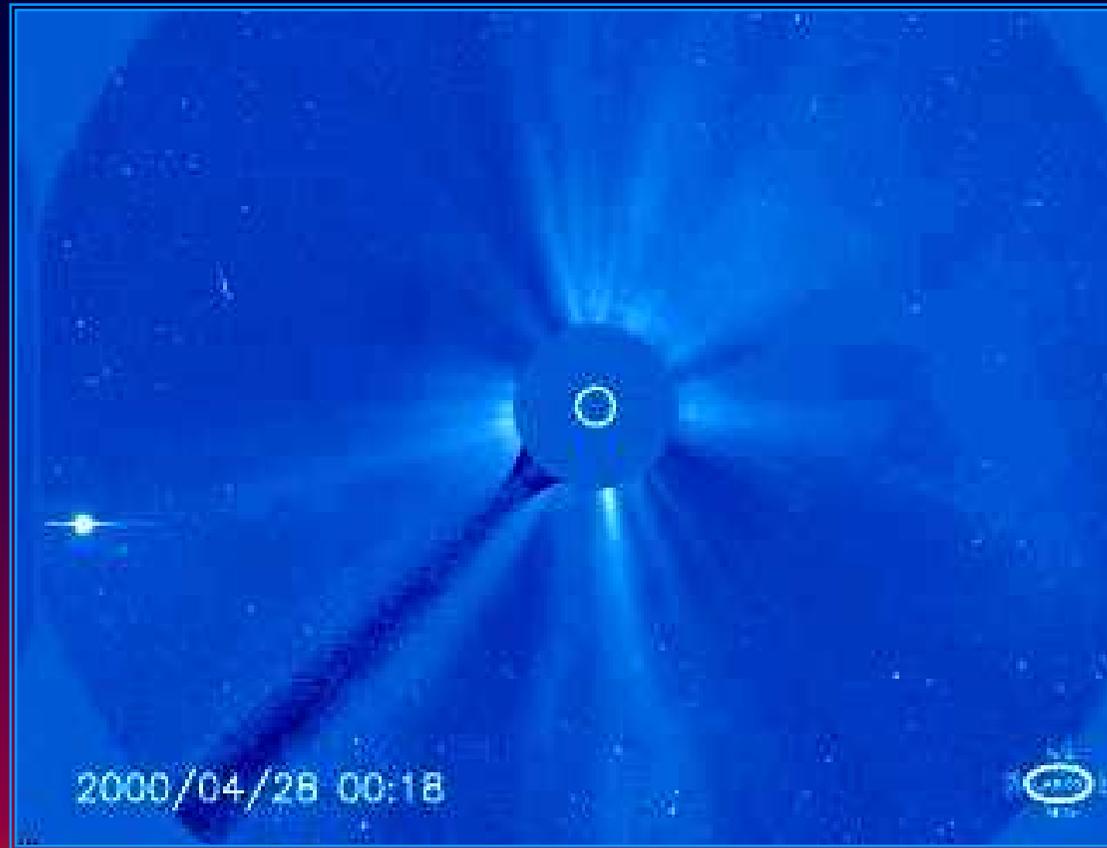
Flare: é tão energético que o campo **B** é incapaz de confinar as partículas num loop e estas rompem violentamente o campo em linhas abertas → para o **VENTO SOLAR**



Ejeção de Massa Coronal

Atividade Solar

Ejeção de Massa Coronal

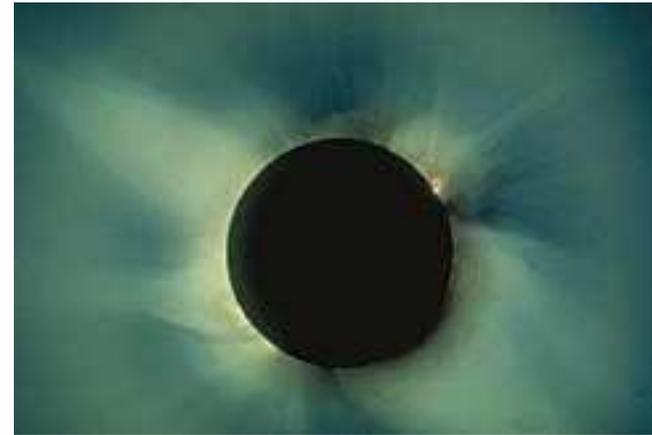


Atividade Solar

Variacoes na coroa durante o ciclo solar



**Coroa no Sol calmo: MS
no minimo do ciclo
solar**



**Coroa no maximo da
atividade solar**

- **O que aquece a coroa a $T=2 \times 10^6$ K ?**

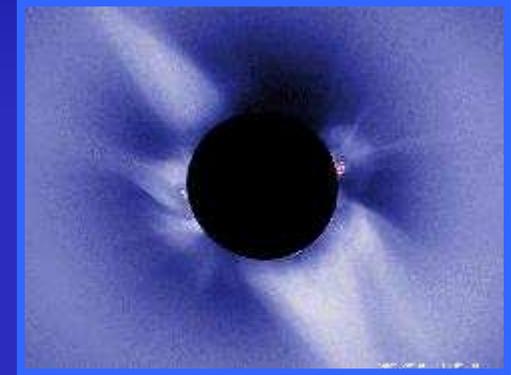
acredita-se ser aquecida por **atividade solar – por energia armazenada no campo magnetico e liberada:**

principalmente por proeminencias e flares: que ejetam grandes quantidades de energia magnetica na coroa

As questões fundamentais

As questões fundamentais

O aquecimento coronal



As questões fundamentais

O aquecimento coronal

A natureza das erupções

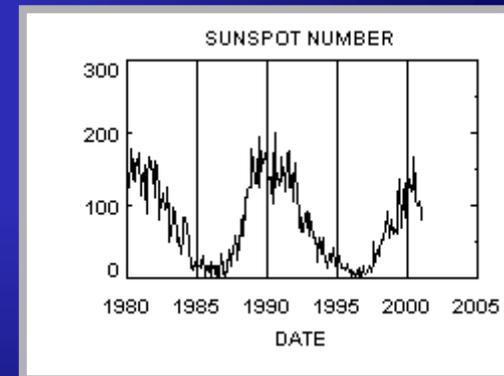


As questões fundamentais

O aquecimento coronal

A natureza das erupções

A origem do ciclo de manchas



As questões fundamentais

O aquecimento coronal

A natureza das erupções

A origem do ciclo de manchas

O problema dos neutrinos

Apenas 1/3
deles é
detectado !