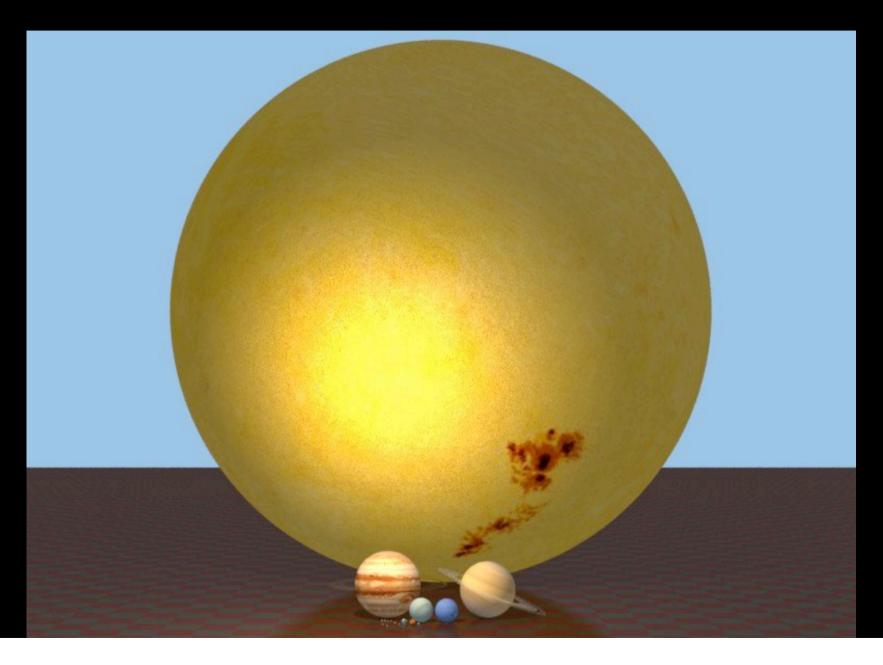
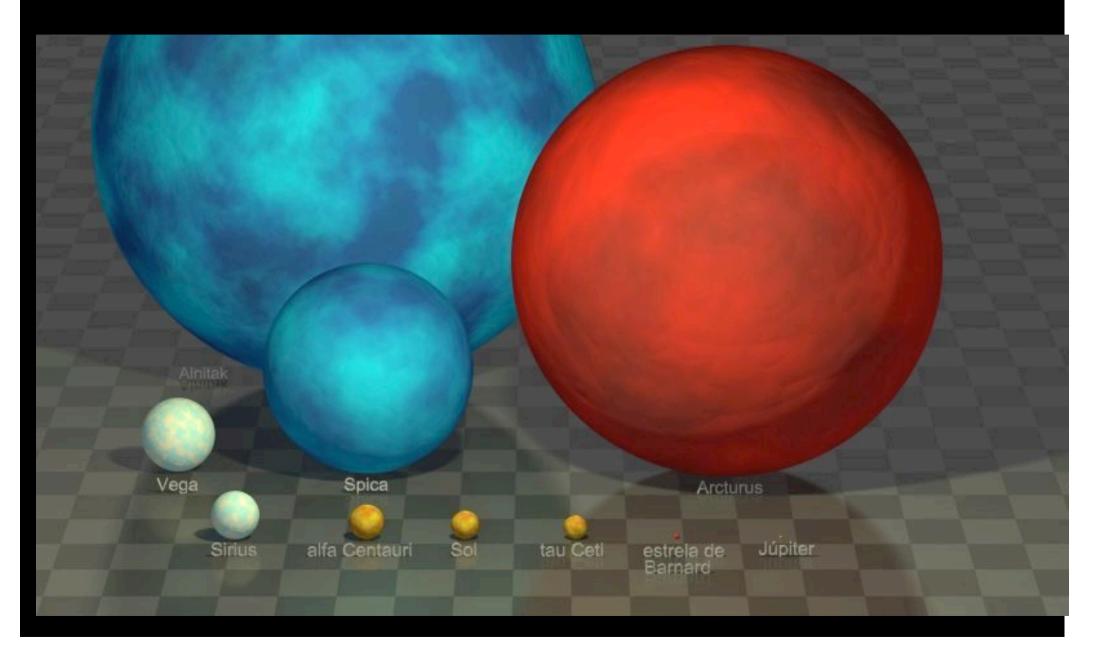
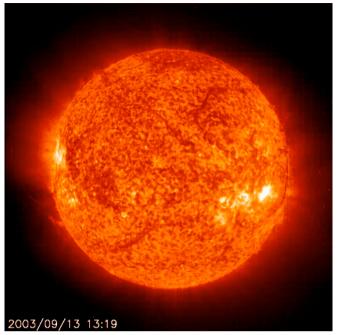
Aula 6
O Sol:
Estrutura e
Geração de Energia

O Sol e sua família



O Sol e outras estrelas



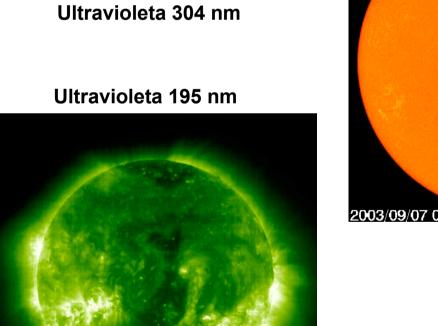


Sol visto em diversas faixas do espectro EM



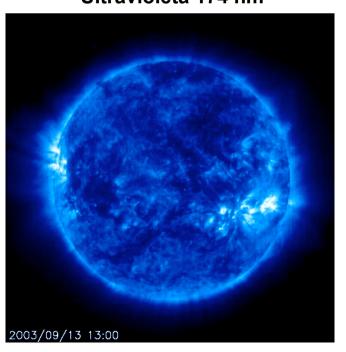
Ultravioleta 284 nm

2003/10/05 01:06





Ultravioleta 174 nm



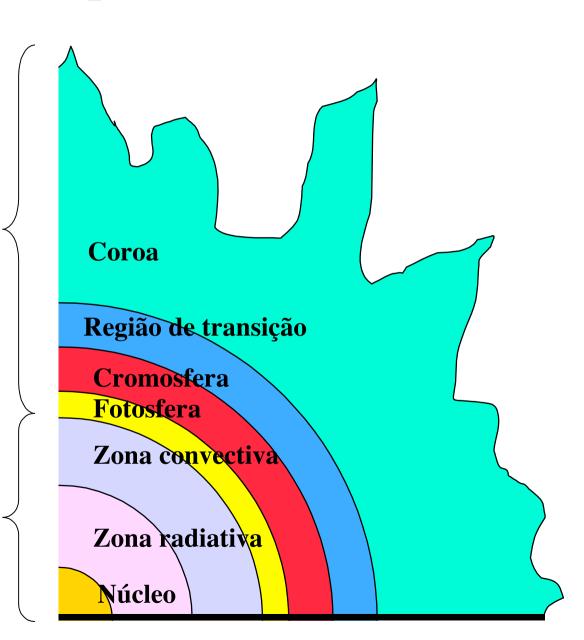
O Sol de fora para dentro

Atmosfera:

- fotosfera
- cromosfera
- região de transição
- coroa

Interior:

- zona convectiva
- zona radiativa
- núcleo



Alguns dados...

| Dado | Valor | Como foi obtido |
|--|---|-------------------------------------|
| Distância média | 1 UA | reflexão de sinais de radar |
| Massa | $1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$ (333.400 M _{Terra}) | Órbita da Terra |
| Raio | $6.96 \times 10^5 \text{ km}$ (109,3 R _{Terra}) | Tamanho angular e distância |
| Densidade média | $1,41 \text{ g/cm}^3$ | Massa/volume |
| Luminosidade | $3.8 \times 10^{26} \text{ W}$ | Constante solar e distância |
| Temperatura efetiva | 5800 K | Espectro |
| Período de rotação no equador | 24d 16h | Manchas solares e efeito Doppler |
| Inclinação do equador em relação à eclíptica | 7° 10',5 | Movimento das manchas solares |

A Composição Química do Sol

Como a determinamos? Análise espectral. Trabalho pioneiro de Cecilia Payne-Gaposchkin em 1925

Antes acreditava-se que o Sol era quimicamente semelhante à Terra. Payne-Gaposchkin mostrou que o Sol é predominantemente composto de H (73,4% da massa) e He (25,0% da massa).

Os outros elementos correspondem somente a 1,6% da massa!



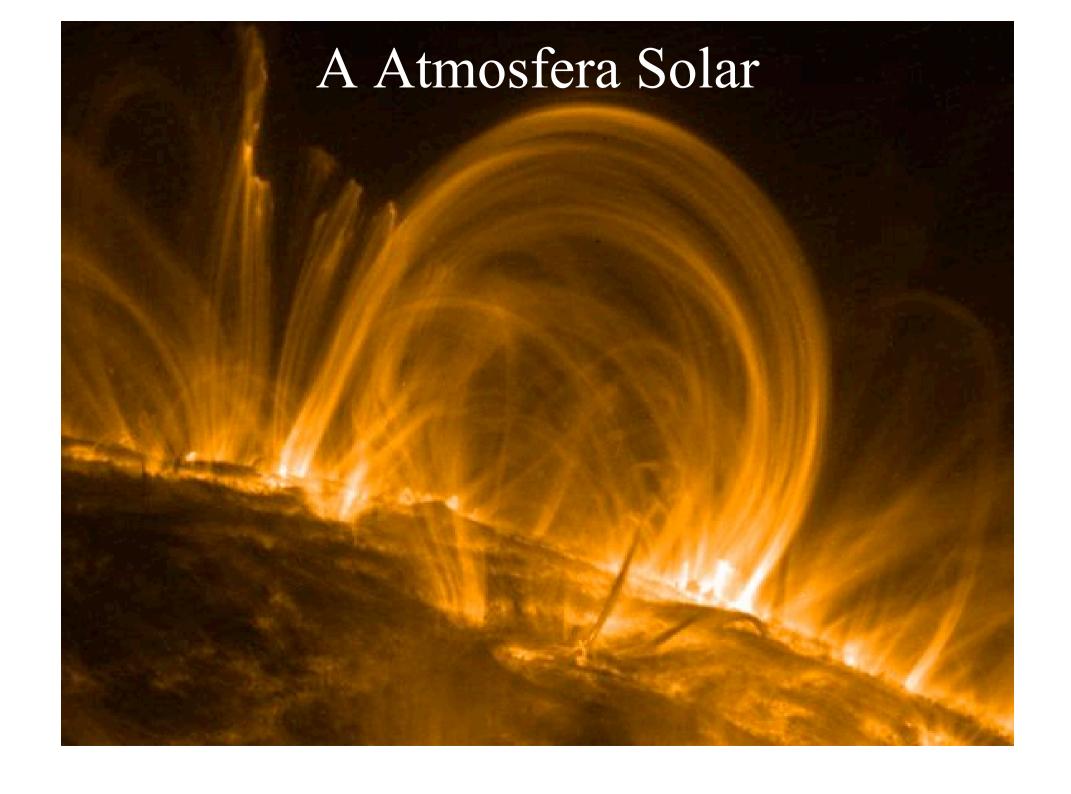
Cecilia Payne-Gaposchkin

Hoje sabemos que quem é quimicamente peculiar é a Terra, pois o Sol tem uma composição química semelhante à do resto do Universo.

Importante: o Sol é tão quente que praticamente todos os elementos estão na forma de átomos ou íons.



Número atômico = Número de prótons no núcleo do elemento químico



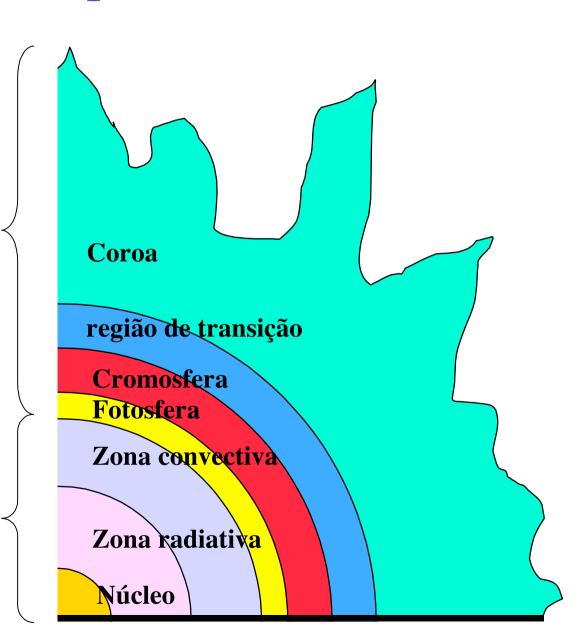
O Sol de fora para dentro

Atmosfera:

- fotosfera
- cromosfera
- região de transição
- coroa

Interior:

- zona convectiva
- zona radiativa
- núcleo



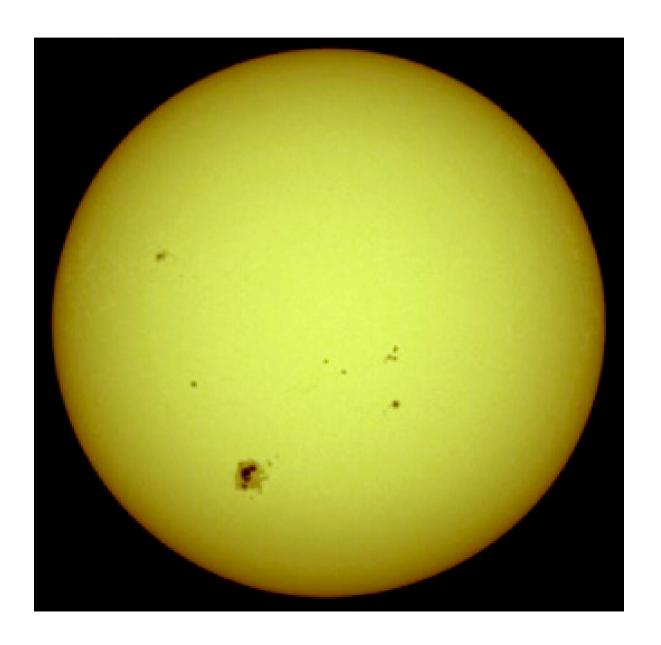
A Fotosfera

Do grego *Esfera de Luz*

Praticamente toda a luz que recebemos do Sol vem da fotosfera, uma "casca" de aprox. 400 km de espessura

Por que a borda do Sol aparece tão nítida?

Porque a espessura da fotosfera é minúscula comparada a seu diâmetro!



Alguns dados sobre a fotosfera

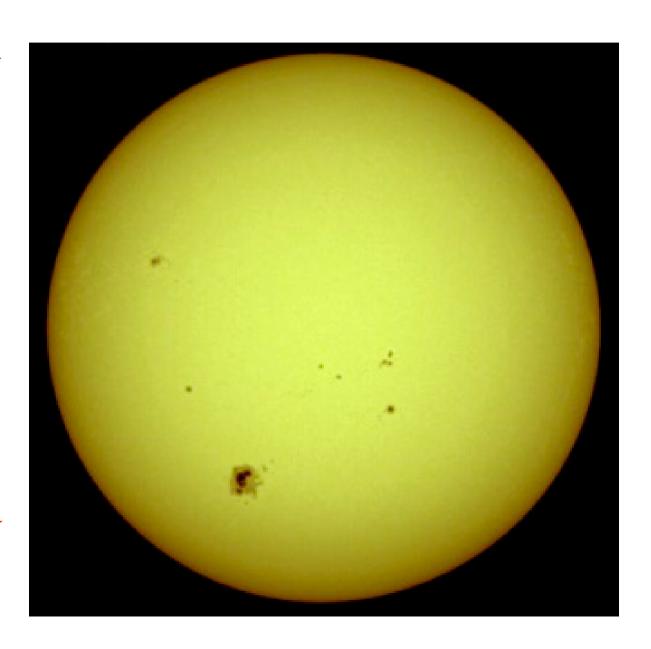
A temperatura cai de 10000 K na base para 4500 K no topo da fotosfera

A temperatura efetiva do Sol (5800 K) é, grosso modo, uma média da temperatura da fotosfera

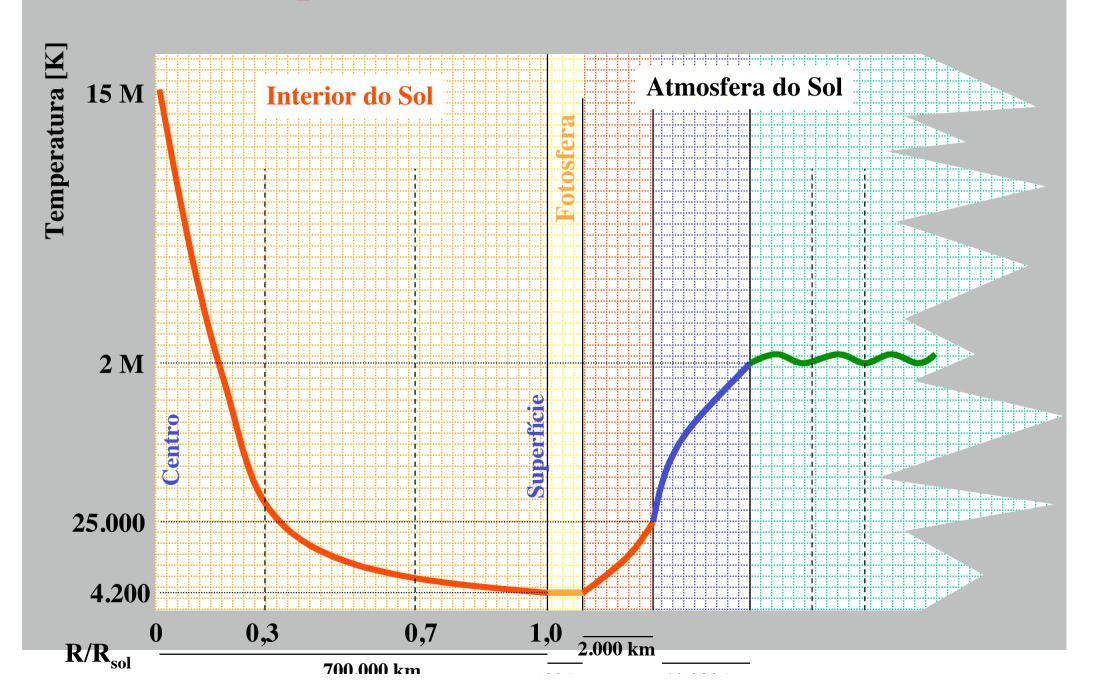
Tipicamente:

Pressão_{fotosfera} $\sim 0,1$ atm

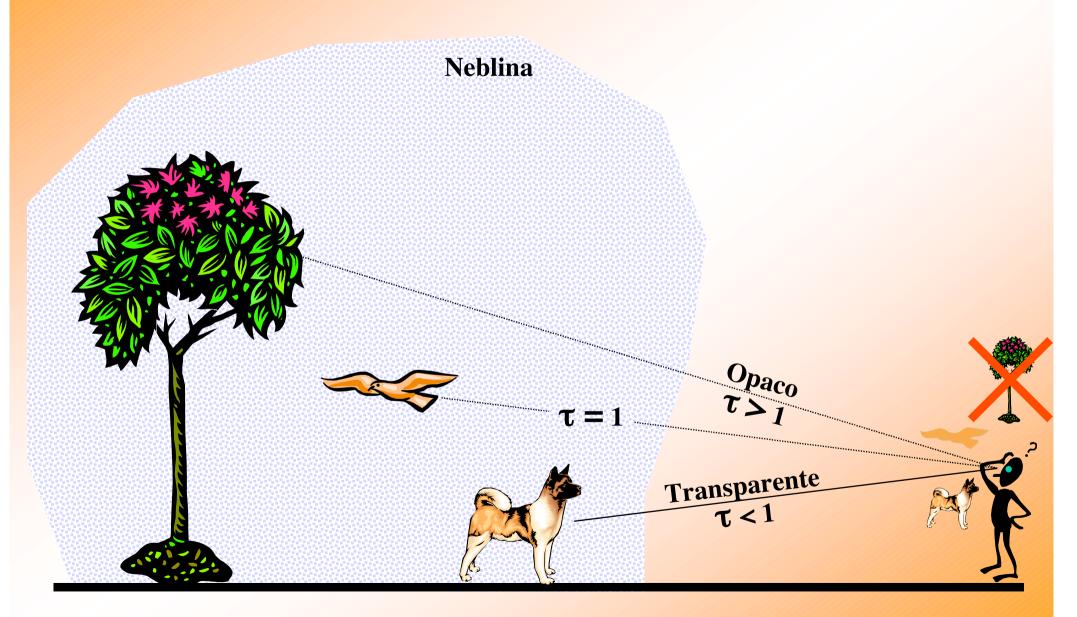
Densidade_{fotosfera} ~ 1/10000 da densidade da atmosfera terrestre ao nível do mar.

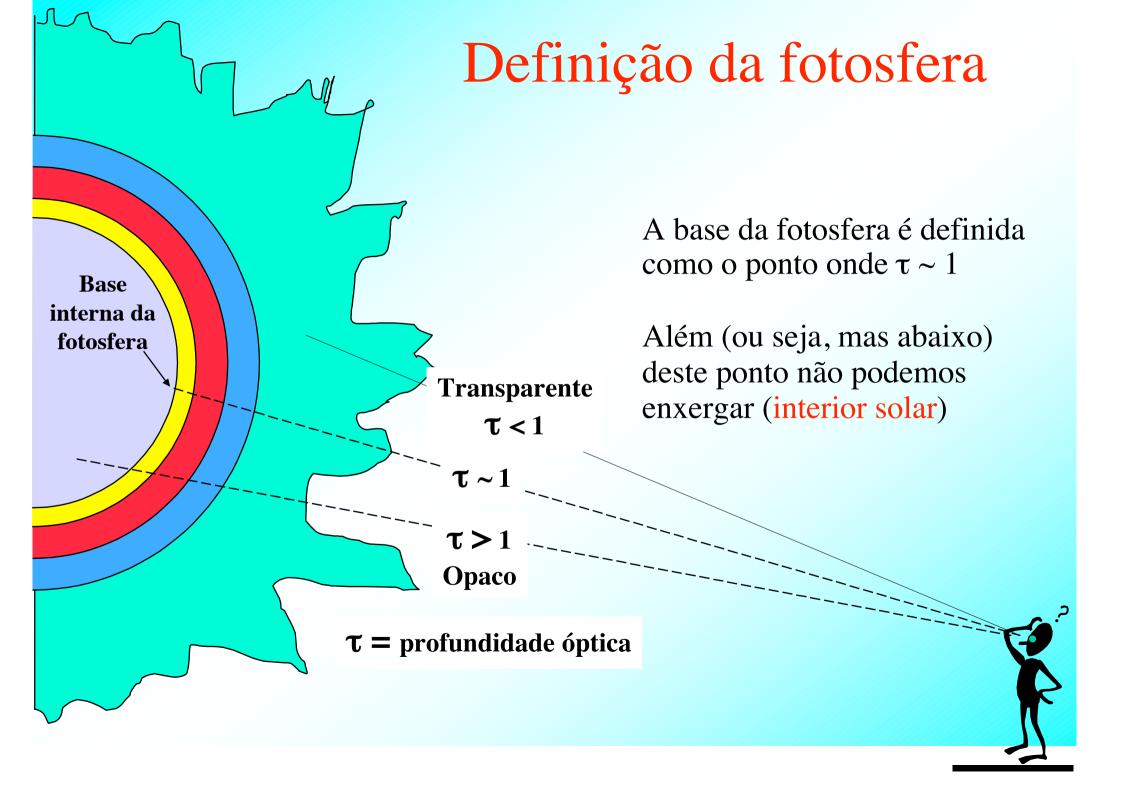


Temperatura nas camadas do Sol



Profundidade óptica (T)

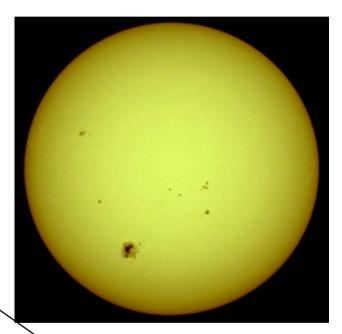


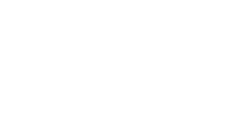


Porque o Sol tem a Borda Escura?

Maior profundidade óptica Maior perda de luz Região menos brilhante

Menor profundidade óptica Menor perda de luz Região mais brilhante Visão do Sol





Fotosfera

Interior

do Sol



Granulação Fotosférica

A fotosfera é muito variável: **granulação** e manchas solares.

Regiões Claras

Subida de gás quente (+2 - 3 km/s)

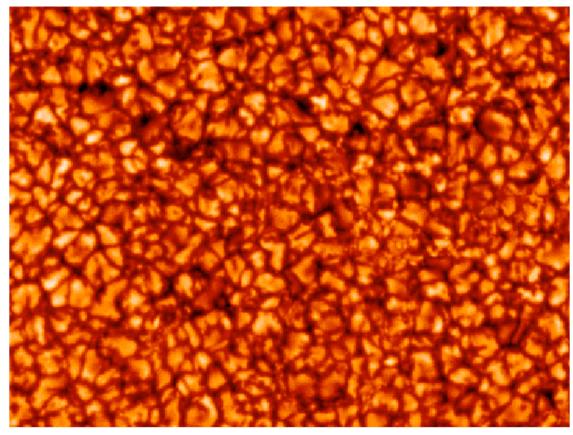
Regiões Escuras

Descida de gás frio (50-100 K mais frio)

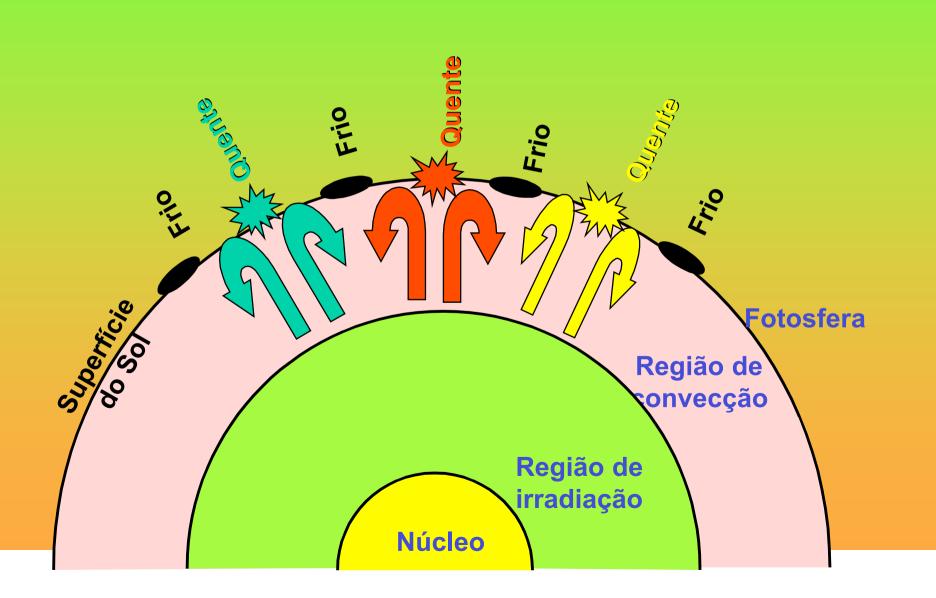
Origem: convecção, semelhante a uma panela em ebulição. Calor está fluindo de dentro para fora!

Vida de um grânulo: 5 a 10 minutos

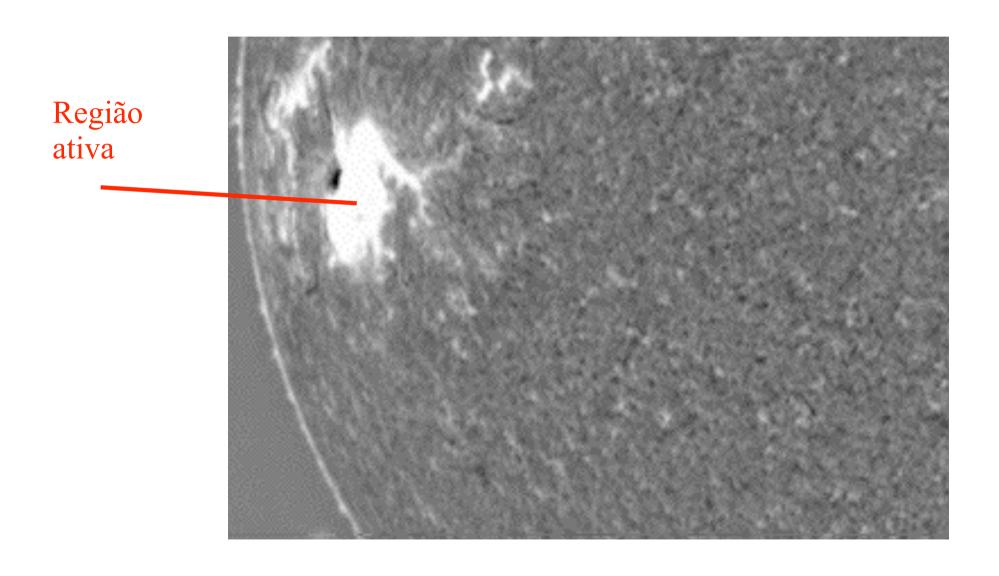
Diâmetro típico de um grânulo: 1000 km



Convecção abaixo da fotosfera



Um Tsunami no Sol



Manchas Solares

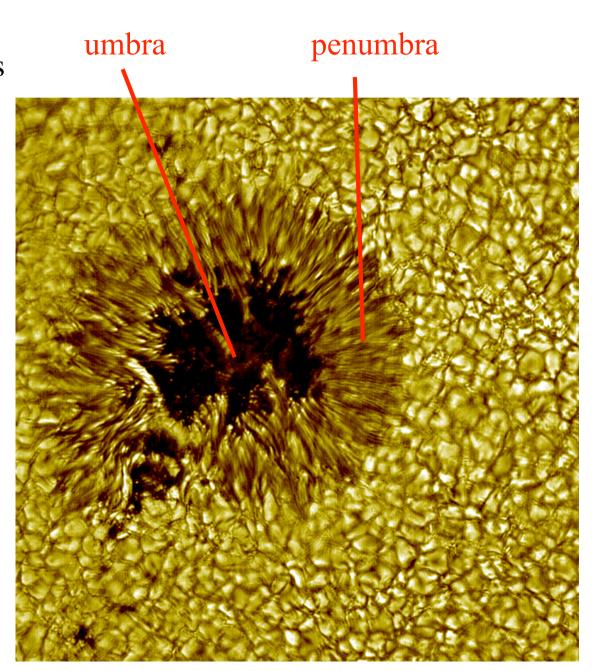
Manchas solares são muito maiores que os grânulos (chegam a dezenas de milhares de quilômetros)

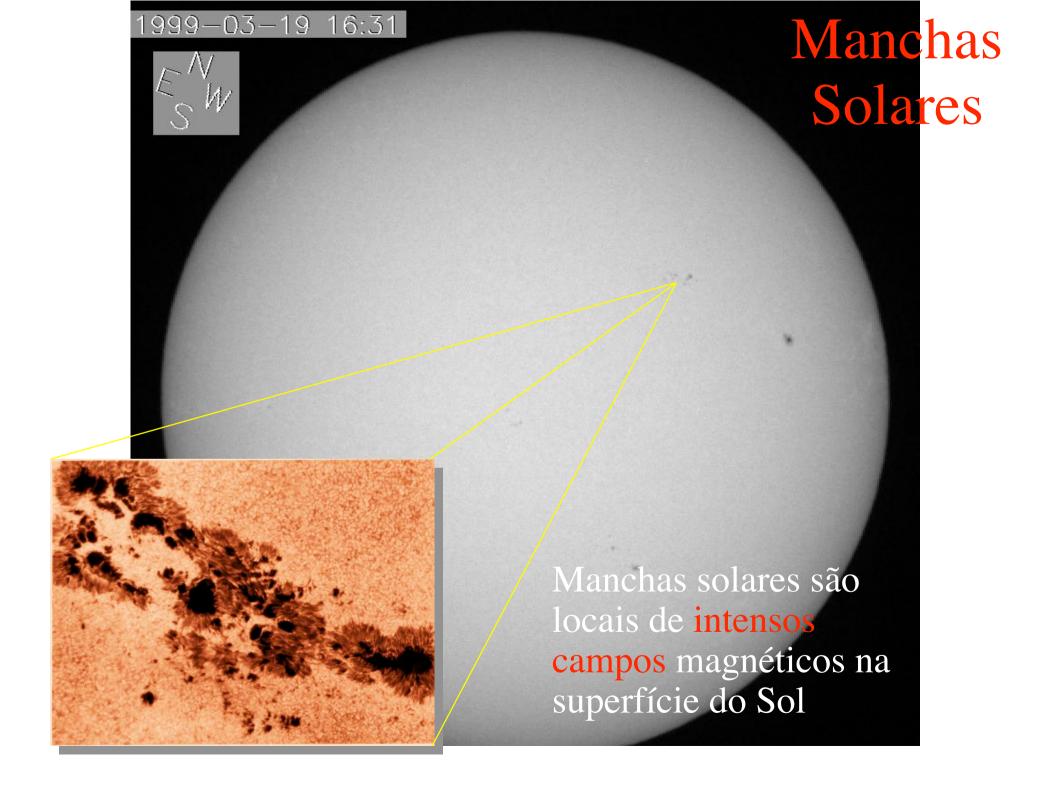
Têm duração de horas a mêses

O centro da mancha (*umbra*) pode ser até 1500 K mais frio que o entorno

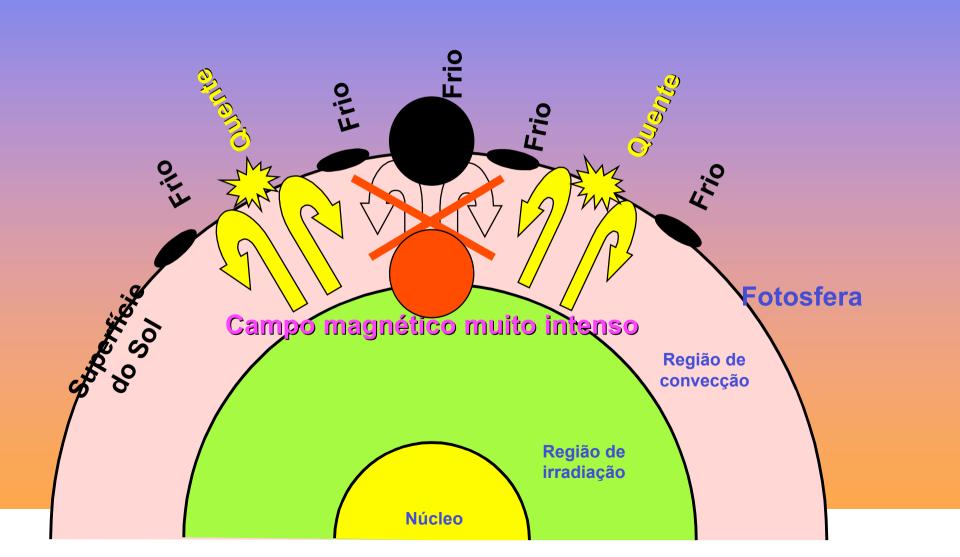
Manchas são escuras? Claro que não. Elas <u>parecem</u> escuras em comparação ao entorno mais brilhante

Origem: campos magnéticos



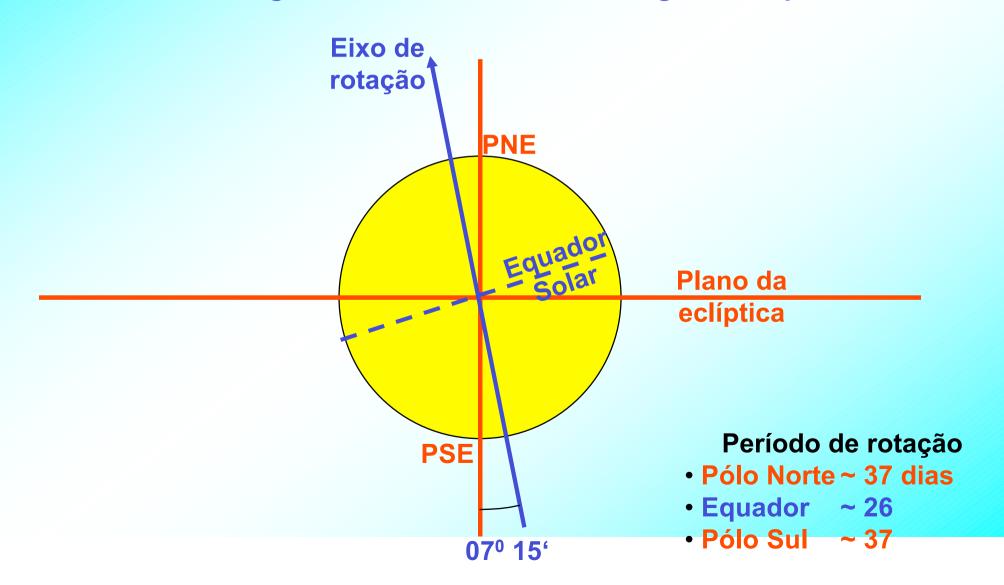


Formação de uma mancha solar



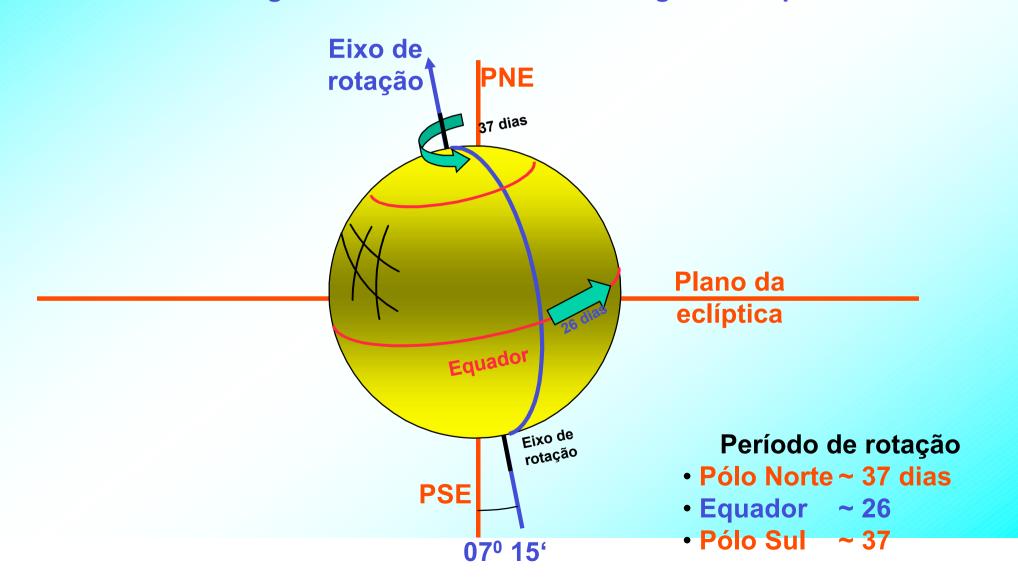
Rotação do Sol

Massa do Sol = 99,866% Massa Sistema Solar Momento angular do Sol = 1% Momento angular dos planetas



Rotação do Sol

Massa do Sol = 99,866% Massa Sistema Solar Momento angular do Sol = 1% Momento angular dos planetas

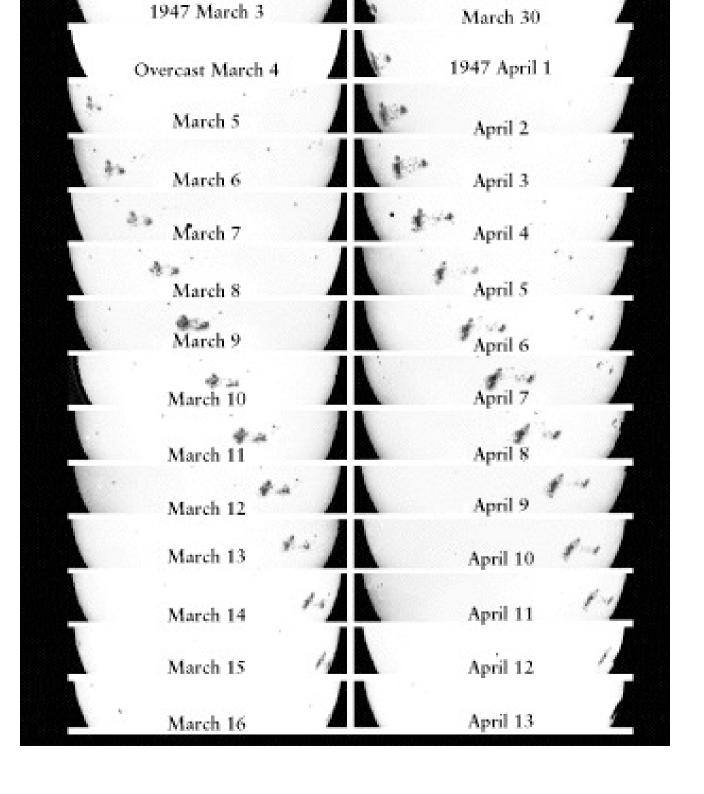


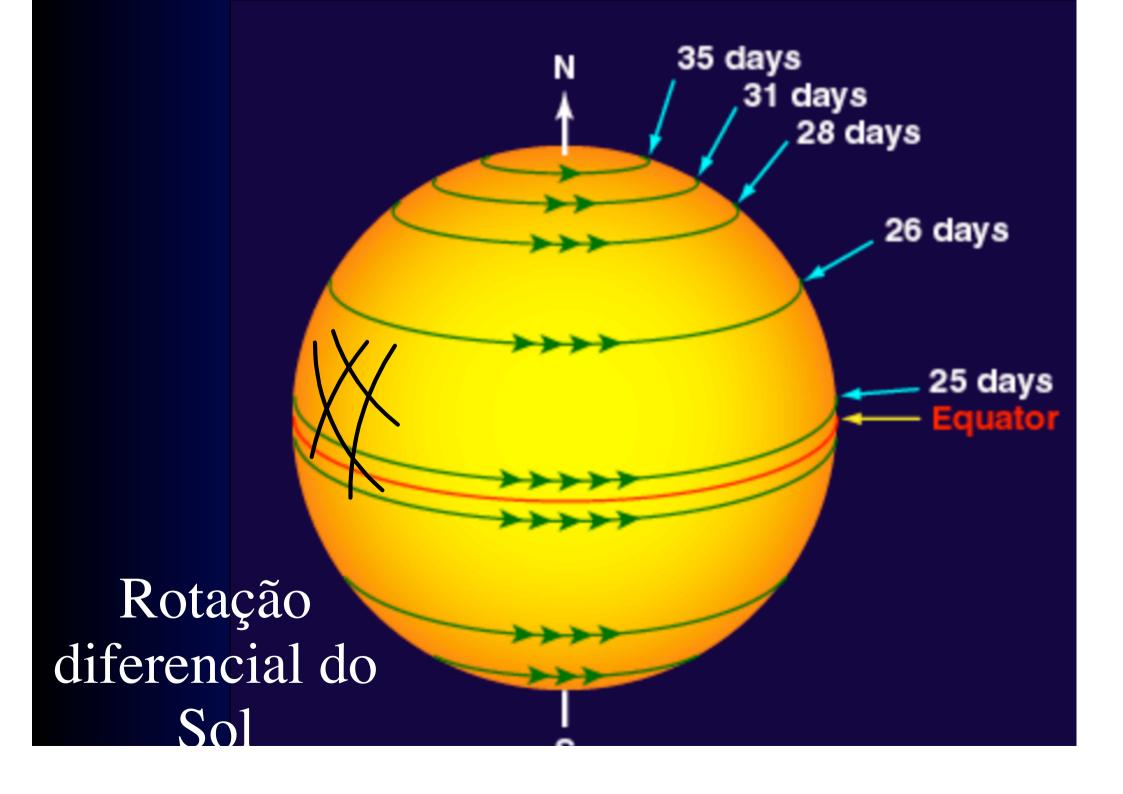
Mostrando a rotação do Sol

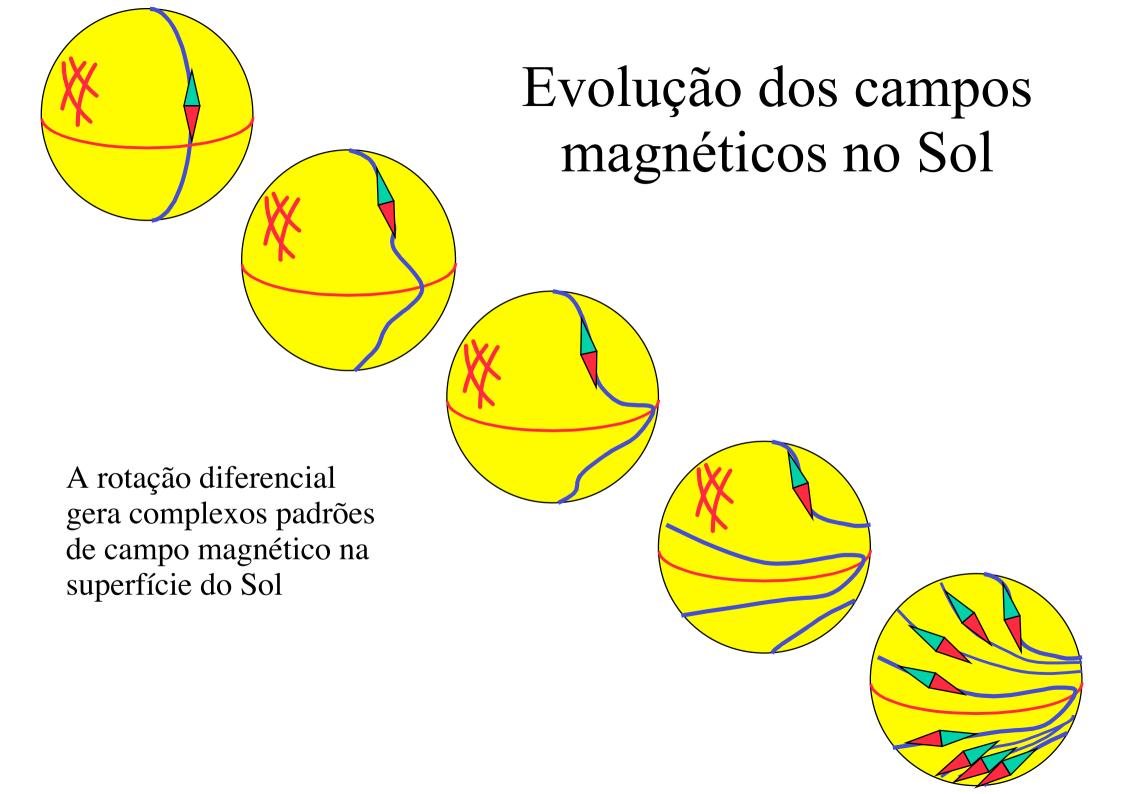
Já em 1612, Galileu demonstrou que o Sol girava observando as manchas solares

Período de rotação

- Pólo Norte ~ 37 dias
- Equador ~ 26
- Pólo Sul ~ 37





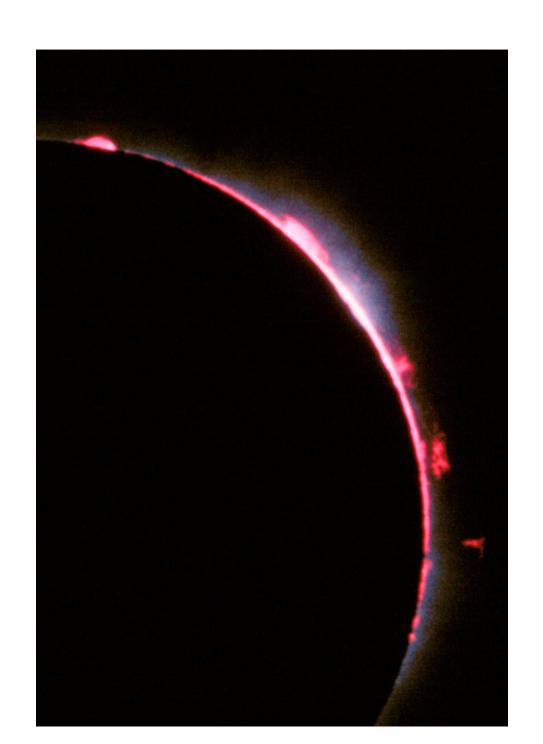


A Cromosfera

Acima da fotosfera existem outras componentes da atmosfera. Por serem *tênues* elas emitem pouca radiação e são difíceis de se observar

Durante um eclipse total é possível observar-se uma "franja" avermelhada que aparece quando a fotosfera é encoberta pela lua

Cromosfera: esfera de cor



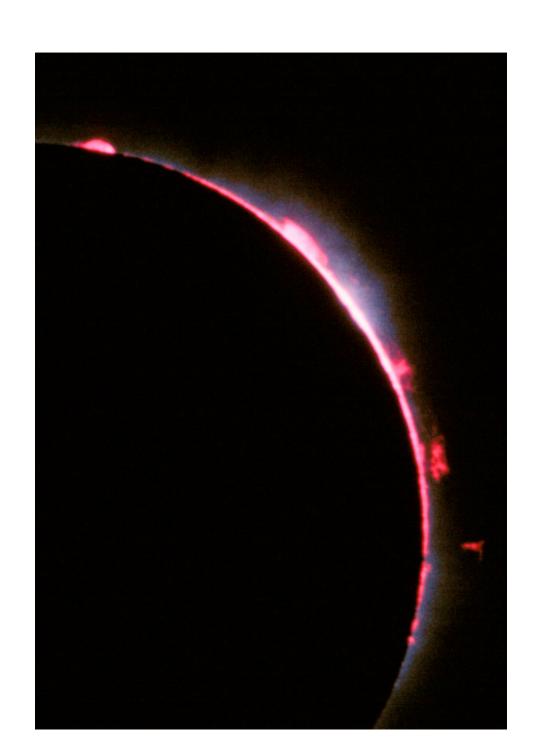
A Cromosfera

Observações feitas durante eclipses mostram que o espectro da cromosfera é composto por fortes linhas de emissão (2ª Lei de Kirchhoff)

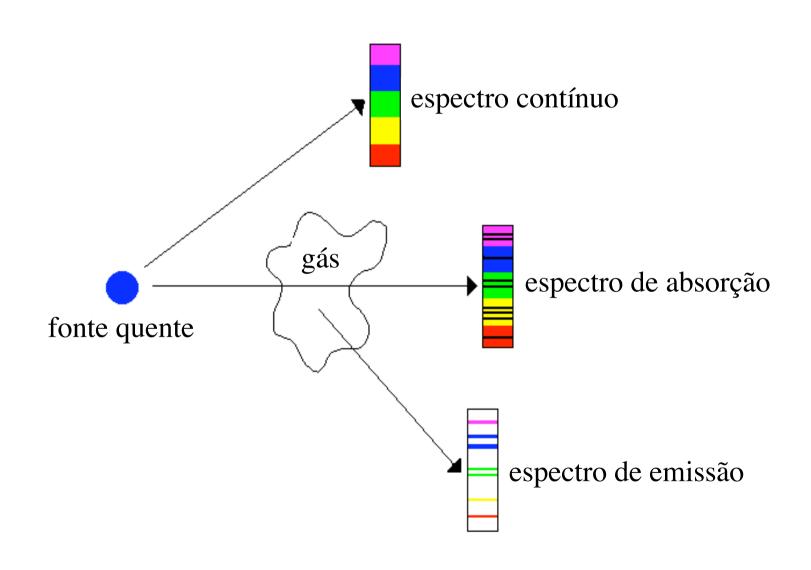
→ gás tênue e quente

A cor avermelhada vem de uma forte linha de emissão do H em 656,3 nm

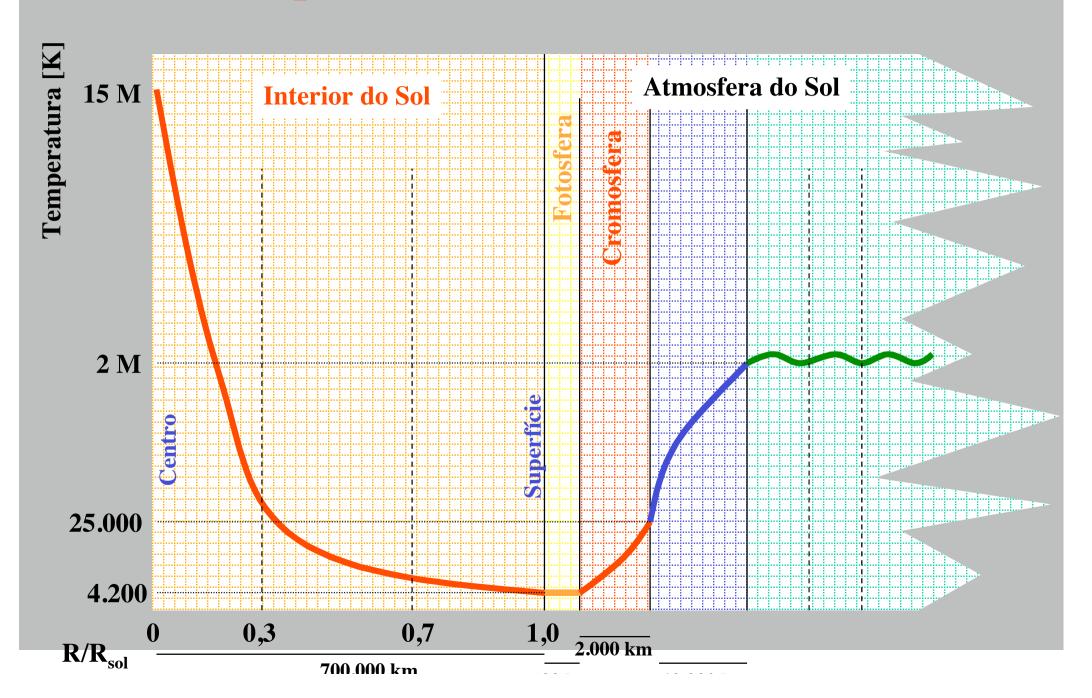
Espessura: 2000 km Temperatura **aumenta** de 4500 K na base até 10.000 K



Leis de Kirchhoff



Temperatura nas camadas do Sol



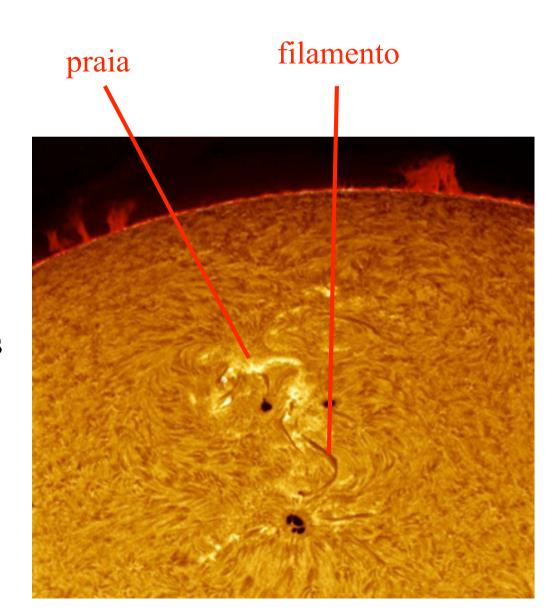
Praias e Filamentos

Da mesma forma que a fotosfera, a cromosfera não é nem estática nem uniforme

Imagens em filtros especiais mostram estruturas como *praias* e *filamentos*

Praias: regiões mais quentes, em geral associadas com manchas solares (magnetismo)

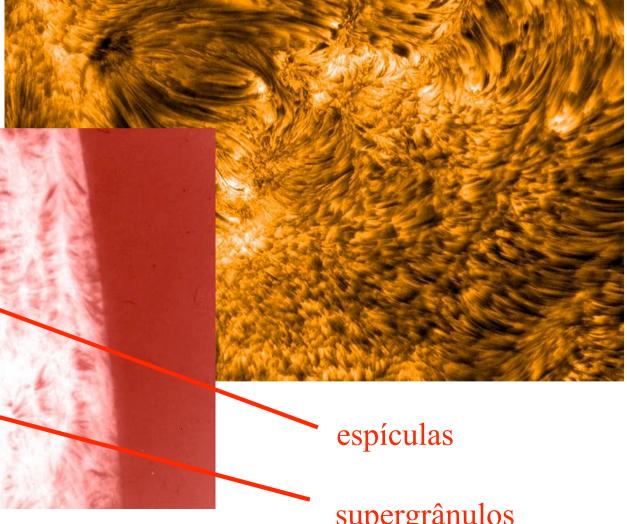
Filamentos: regiões mais densas e frias, também associadas a manchas



Espículas e Supergrânulos

Pequenas erupções em forma de jato.

Duração: alguns minutos



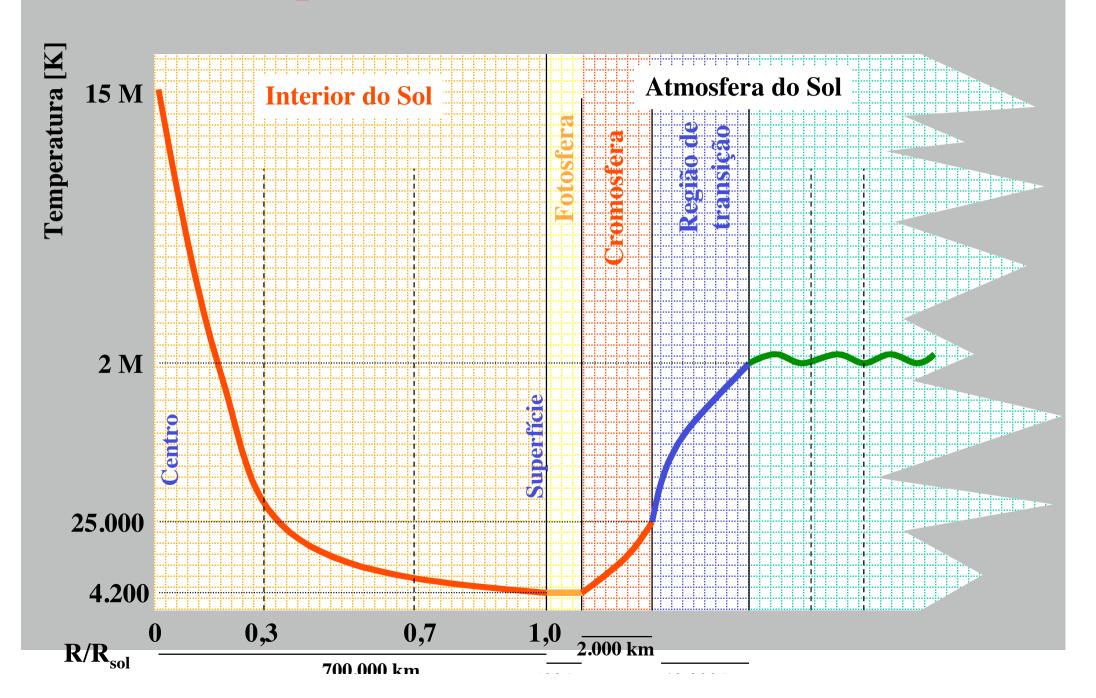
supergrânulos

A Região de Transição

A temperatura não cessa de crescer após a cromosfera.

Em uma camada de aproximadamente 8.000 km de espessura (região de transição), a temperatura sobe de 10.000 K (cromosfera) a alguns milhões de K (coroa)

Temperatura nas camadas do Sol

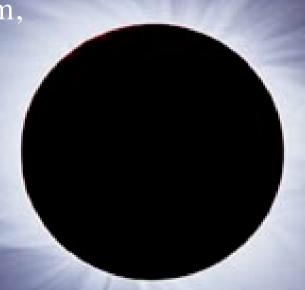


A Coroa Solar

Região mais externa da atmosfera solar

Extende-se a milhões de km, e sua temperatura chega a vários milhões de K

"Brilha" principalmente em linhas de emissão e em raios-X

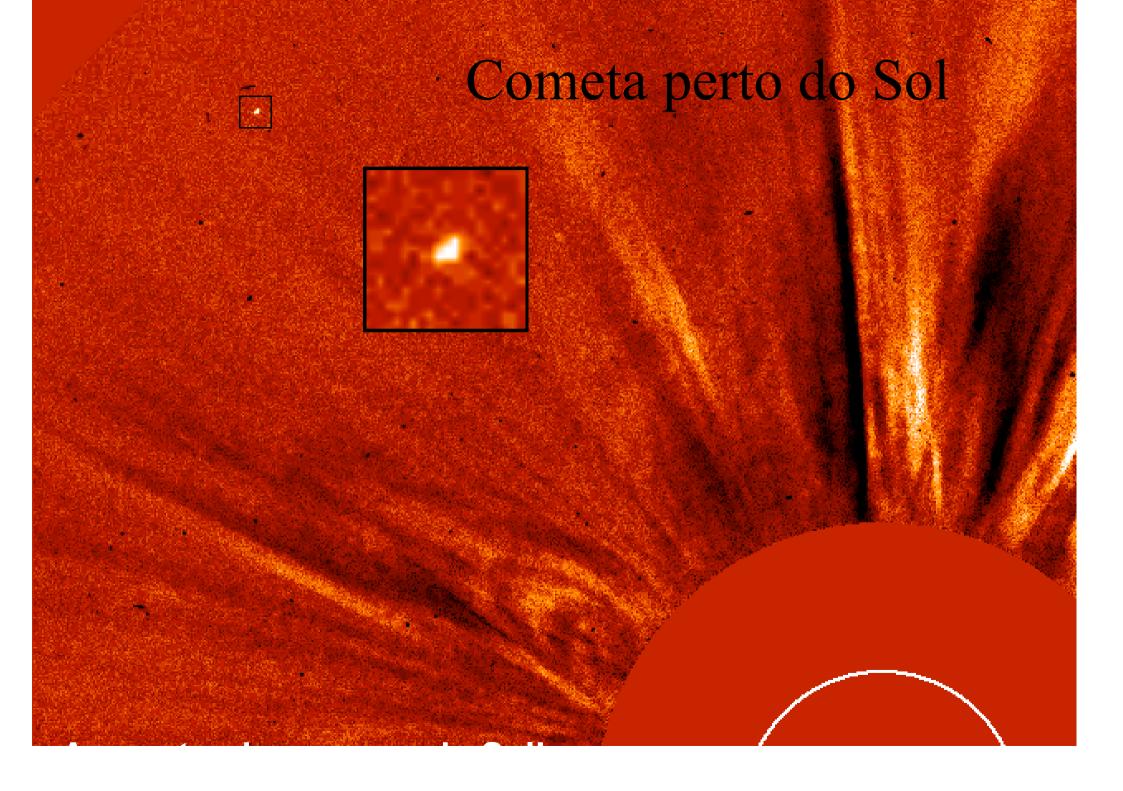


A Coroa Solar em Raios-X

A fotosfera e cromosfera não emitem em raios-X

O material coronal, visto em Raios-X, aparece como estruturas brilhantes superpostas a um fundo escuro

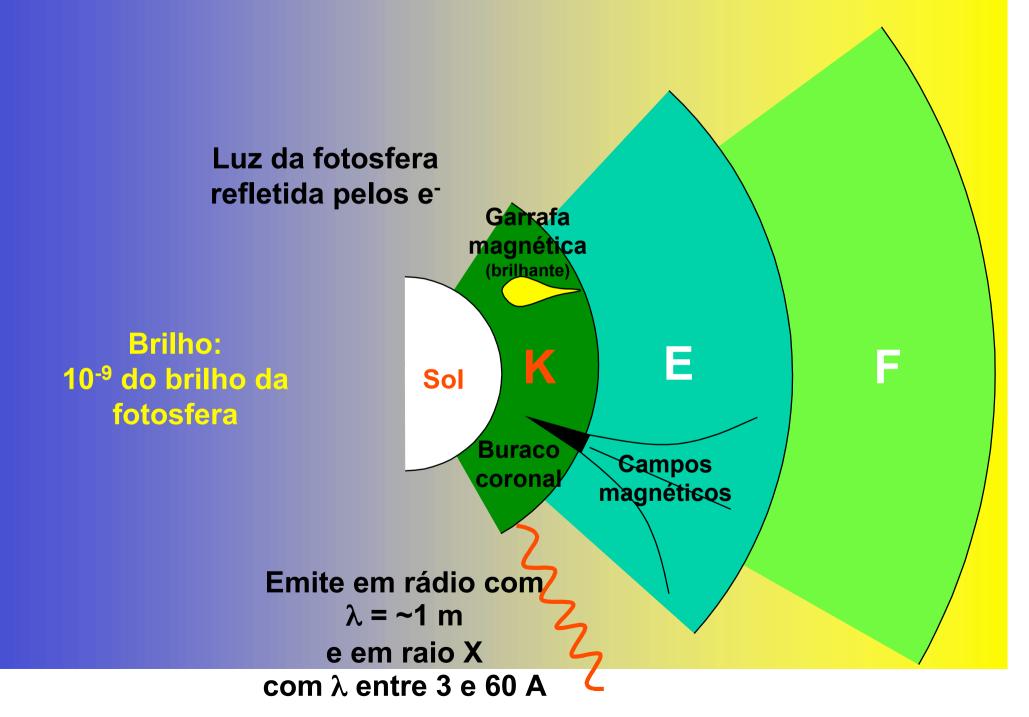


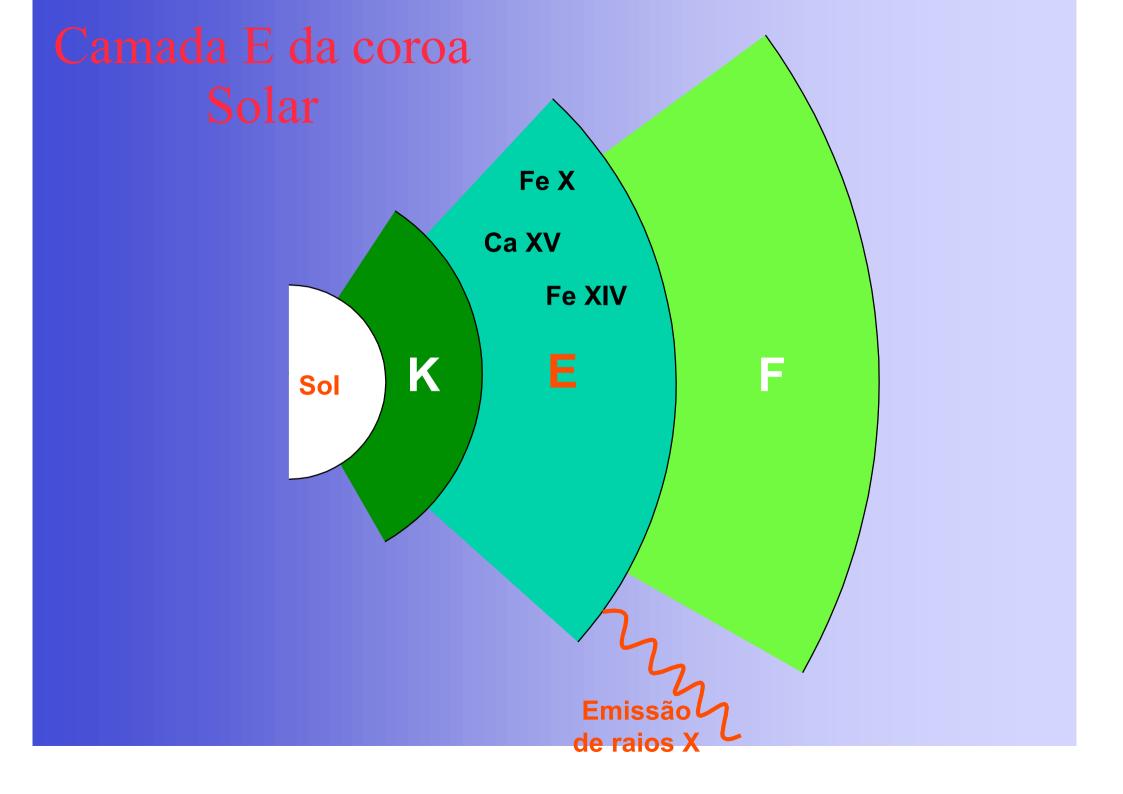


Para que observar o Sol durante o eclipse total?

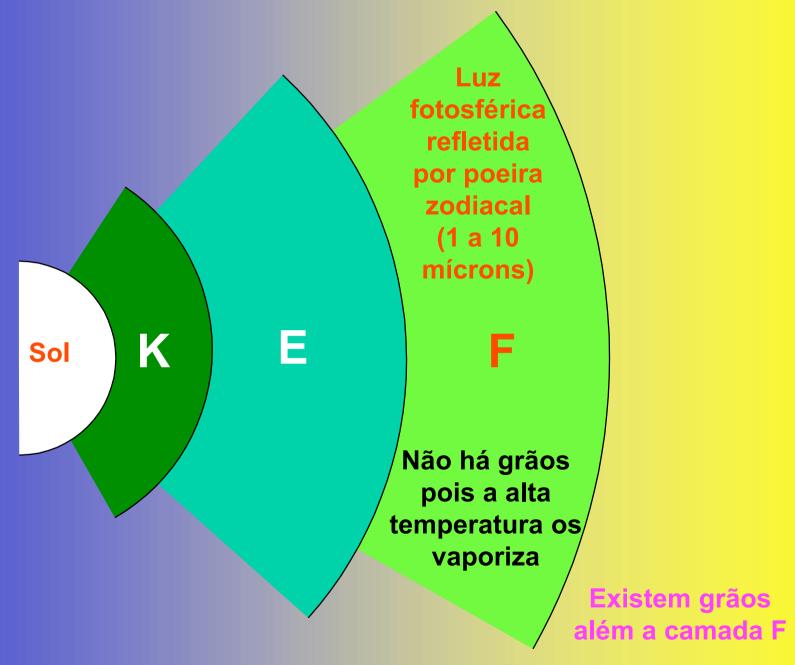


Camada K da coroa Solar

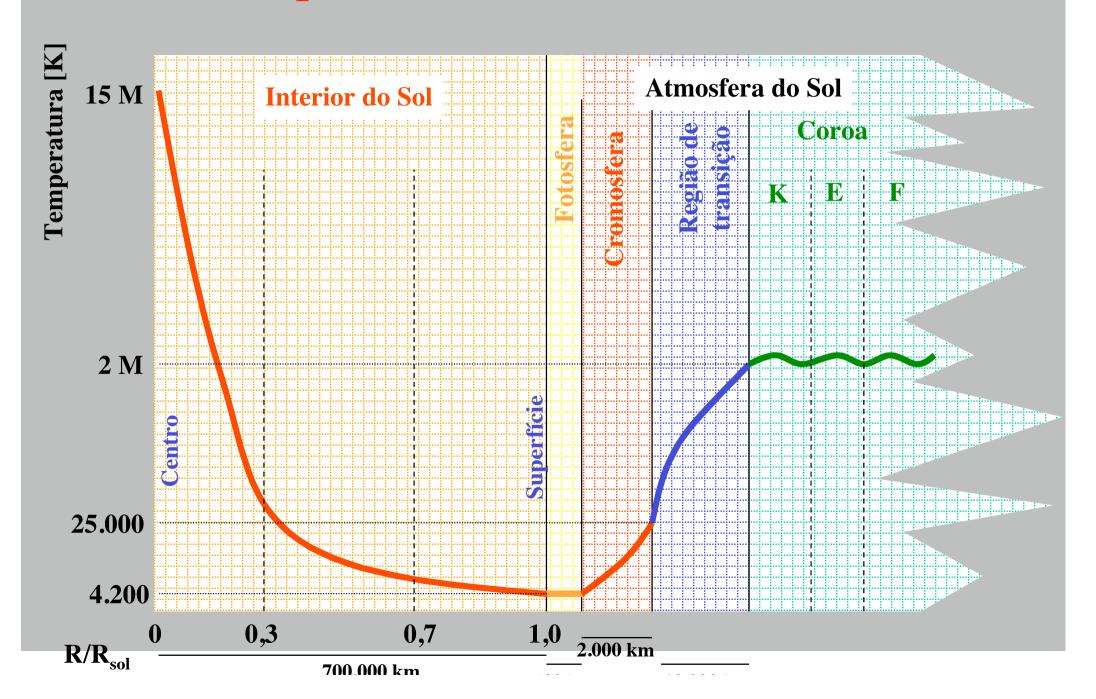




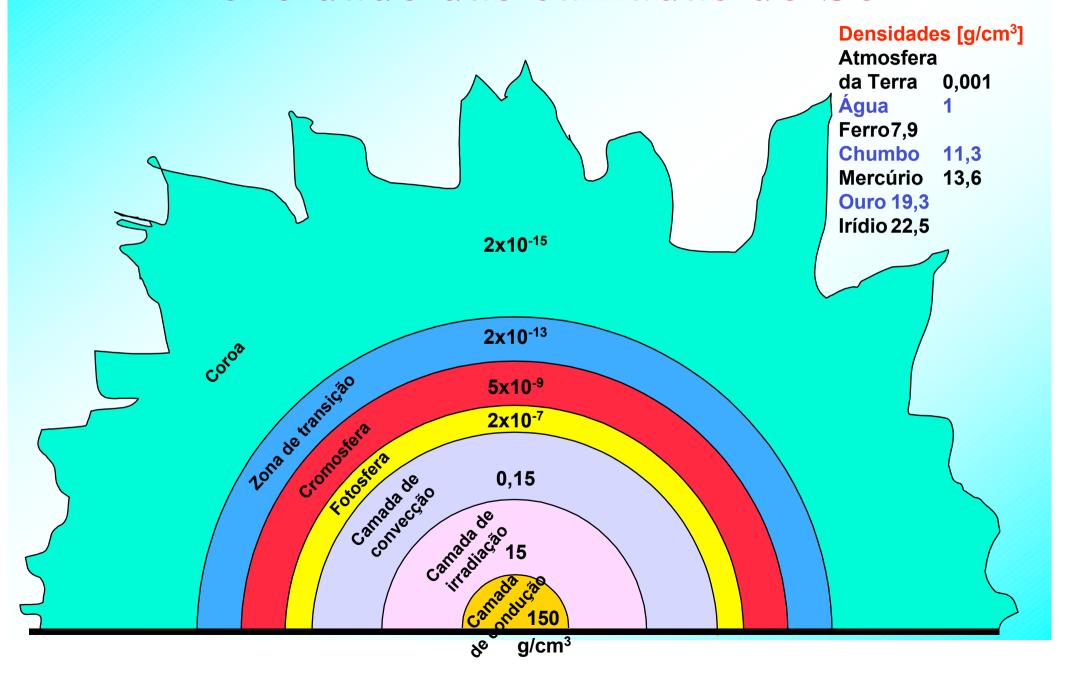
Camada F da coroa Solar



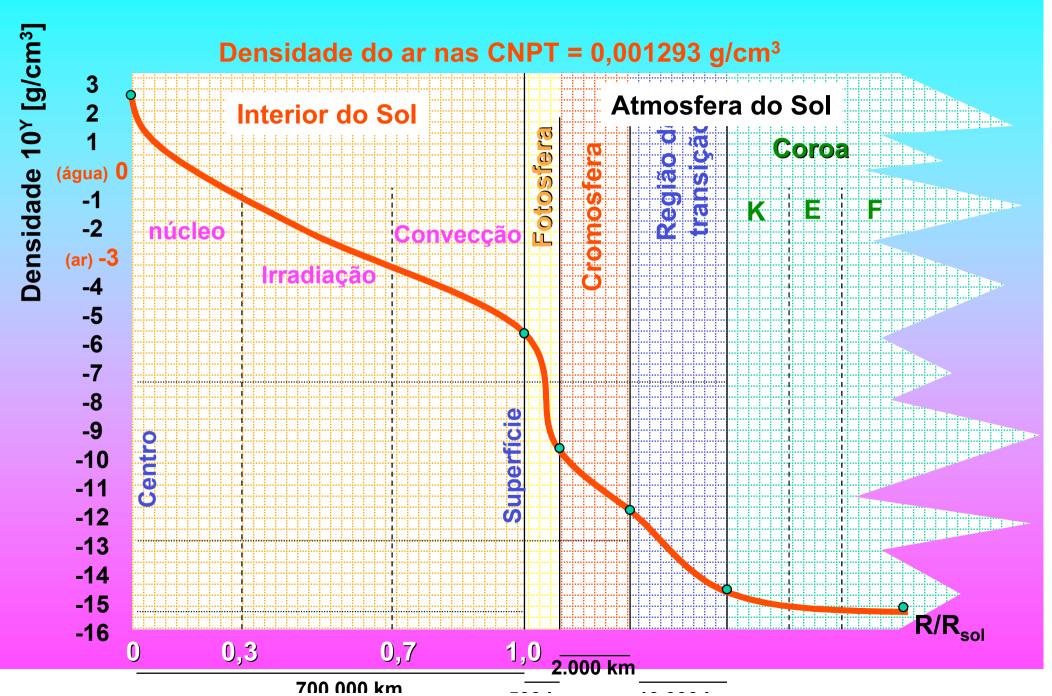
Temperatura nas camadas do Sol



Densidade das camadas do Sol



Densidade nas camadas do Sol



O Vento Solar



Cometa West

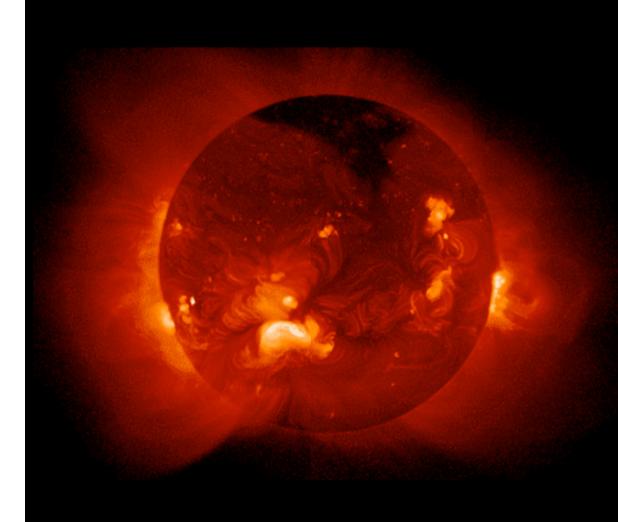
A atmosfera solar é capaz de produzir um fluxo de partículas carregadas (prótons, elétrons e íons) que escapa do Sol a velocidades de 400 - 1500 km/s

Uma das primeiras evidências da existência do vento solar foi a cauda dos cometas, que sempre aponta para a direção contrária à do Sol

Ou seja, a cauda do cometa é "soprada" pelo vento!



O Vento Solar



Estima-se que o Sol perca dezenas de milhões de toneladas de matéria por segundo através do vento solar

O vento resulta da alta *T* da coroa. O gás é quente o suficiente para escapar da gravidade e fluir para o meio interplanetário

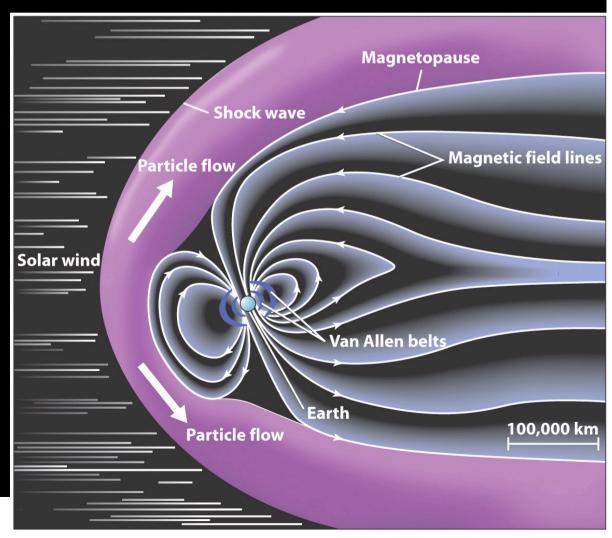
O vento origina-se principalmente nos buracos coronais, pois o vento pode atravessar mais facilmente estas regiões menos densas

Efeitos do Vento Solar na Terra

A Terra é razoavelmente bem protegida do vento solar pela sua atmosfera e magnetosfera

Entretanto, as partículas do vento são capazes de penetrar os pólos norte e sul da magnetosfera.

Quanto essas partículas atingem a atmosfera, dão origem ao fenômento da aurora boreal ou astral







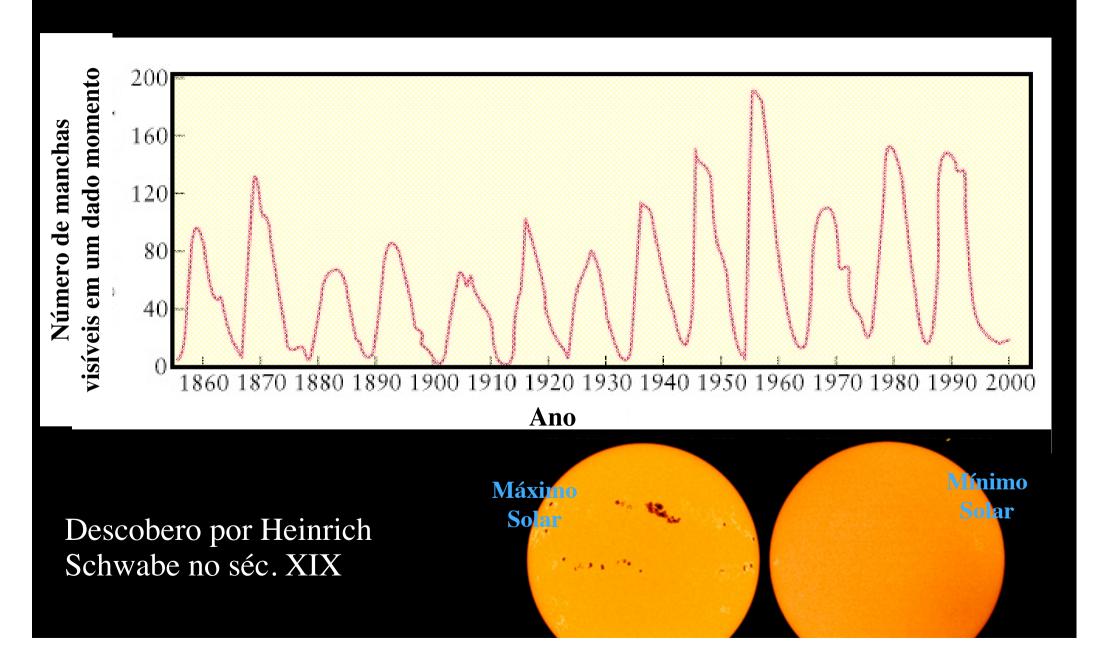
Um Sol Ativo

Apesar de parecer estável, o Sol está um um perpétuo estado de mudança, e apresenta desde pequenas variações em curtos intervalos (ex: granulações e manchas) até a grandes variações em escalas de décadas (ciclo solar) ou maiores.

A maior parte da luminosidade do Sol é emissão contínua da fotosfera, nada ou pouco variável

Esta radiação contrasta com emissões esporádicas e explosivas do Sol ativo, associadas ao ciclo solar.

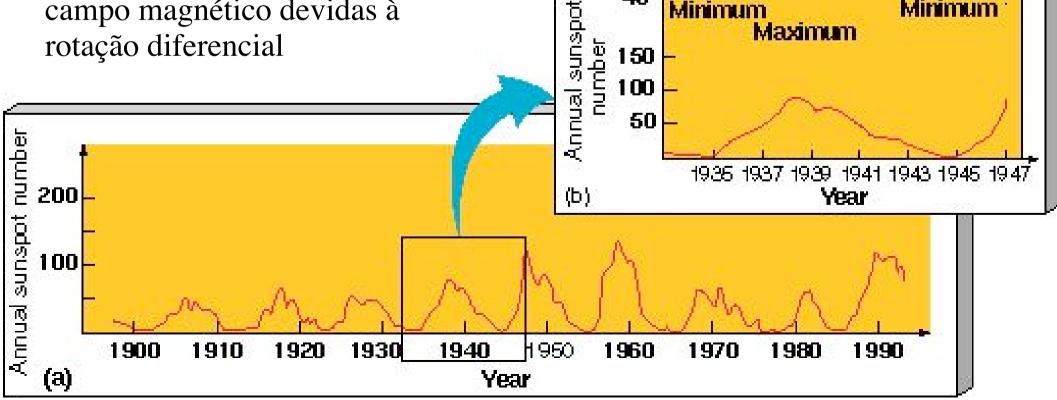
Ciclo Solar de 11 anos



Ciclo Solar de 11 anos

O local onde surgem as manchas solares varia ao longo do ciclo solar

Conexão com as alterações no campo magnético devidas à rotação diferencial



409

Maximum

Local de surgimento das manchas

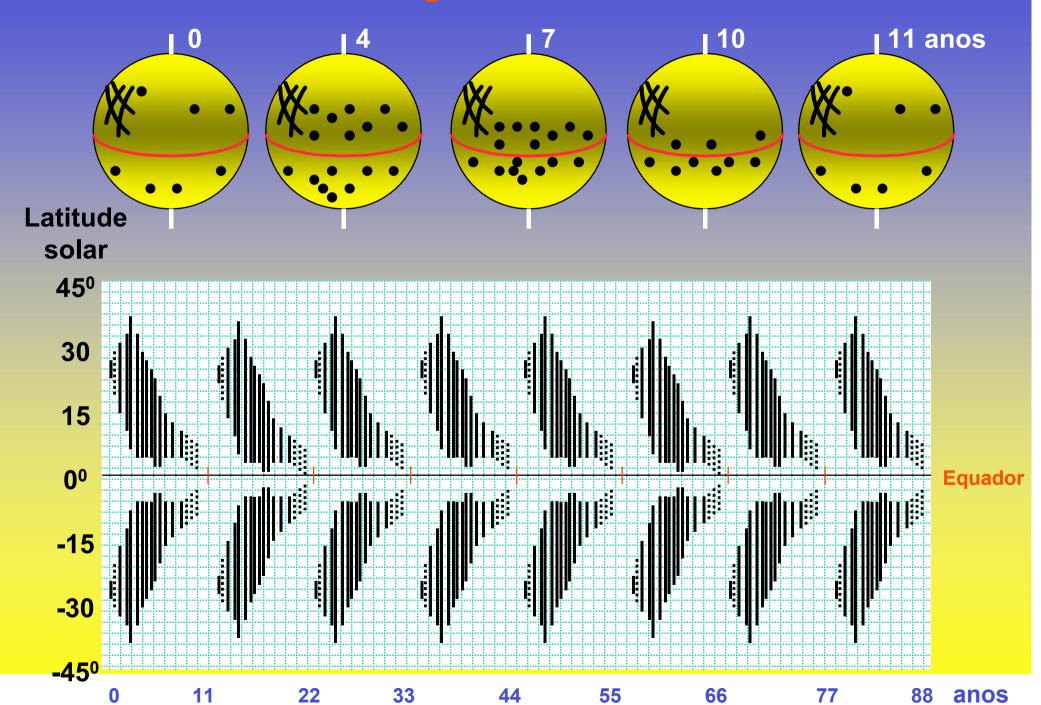
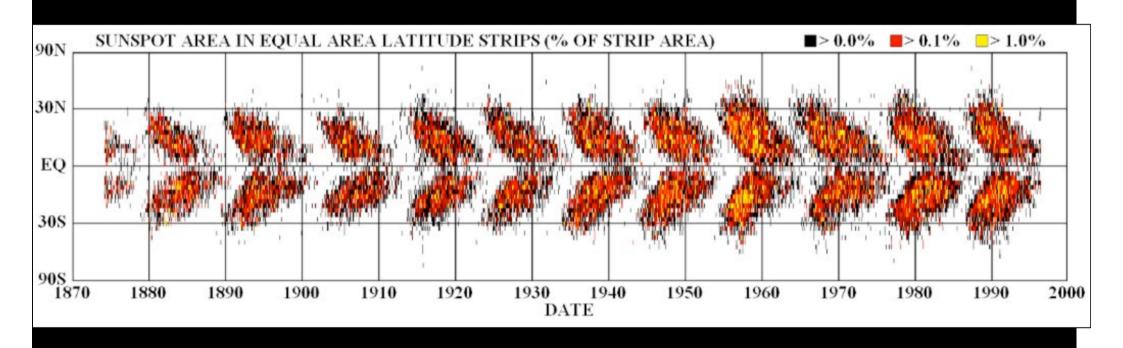
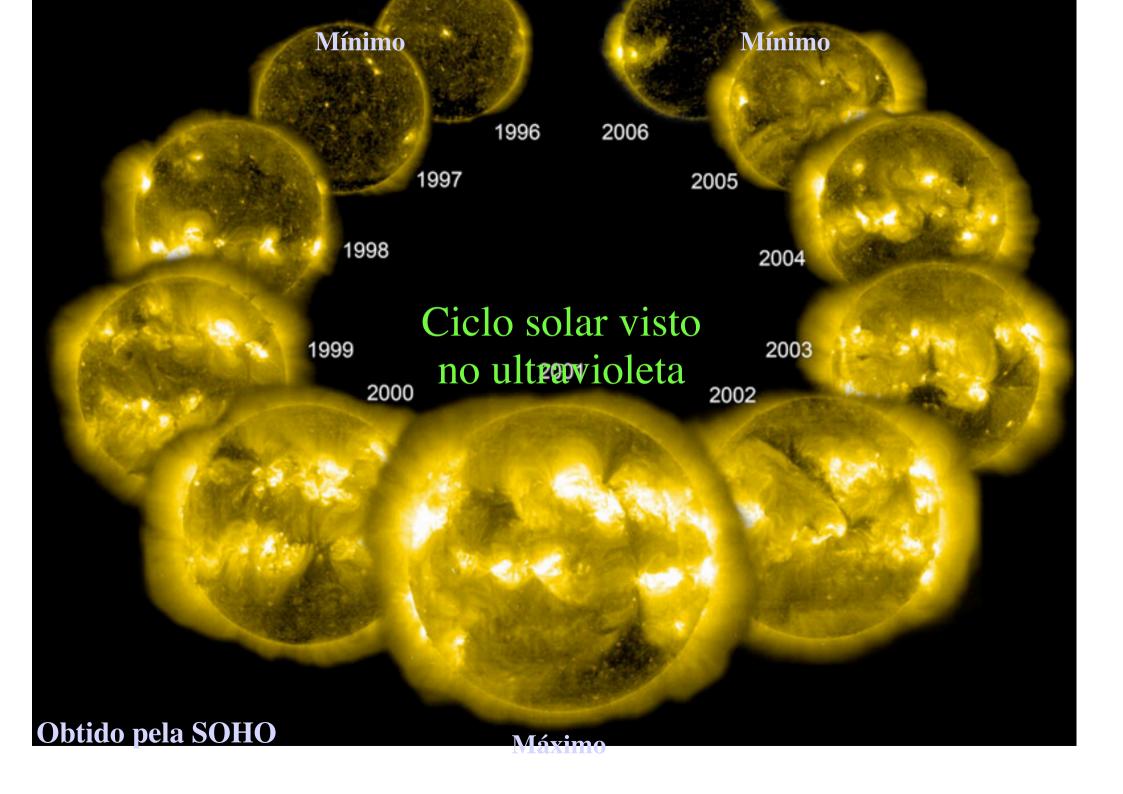
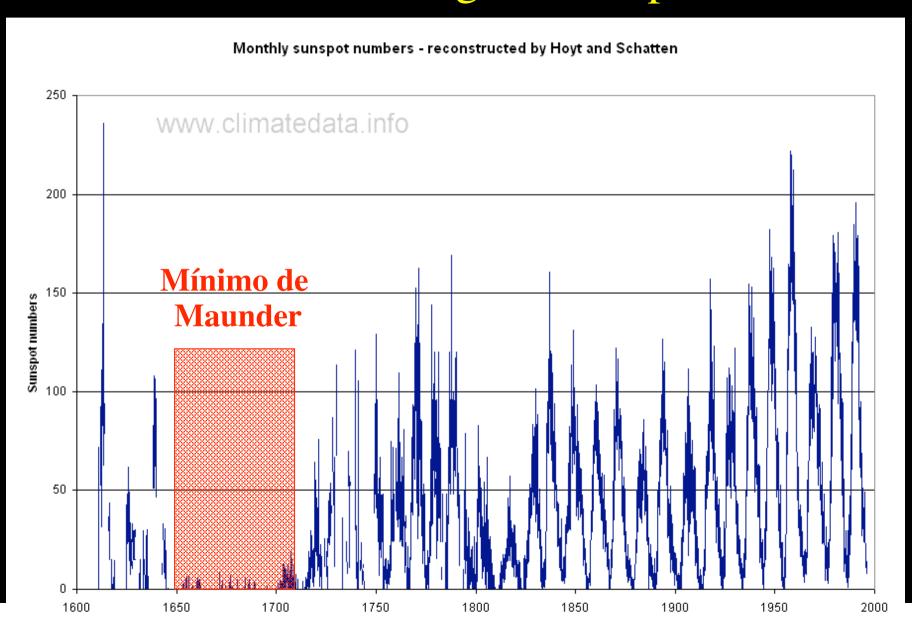


Gráfico "borboleta" dos locais de surgimento das manchas solares ao longo do ciclo de 11 anos





Número de manchas solares no máximo solar varia ao longo do tempo



O mínimo de Maunder e a Pequena Era do Gelo

O mínimo de Maunder correspondeu a uma época em que as temperaturas foram excepcionalmente baixas na Europa

Esse período é conhecido como pequena era do Gelo

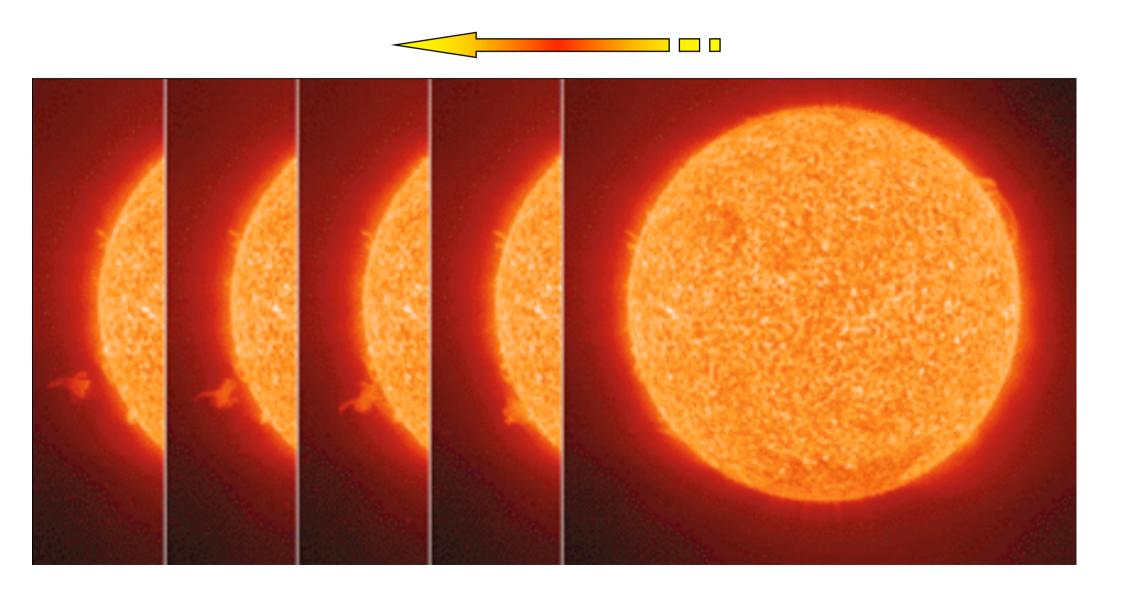
Estima-se que para que as temperaturas fossem assim baixas, a luminosidade solar deve ter sido pelo menos 1% menor que o valor de hoje.

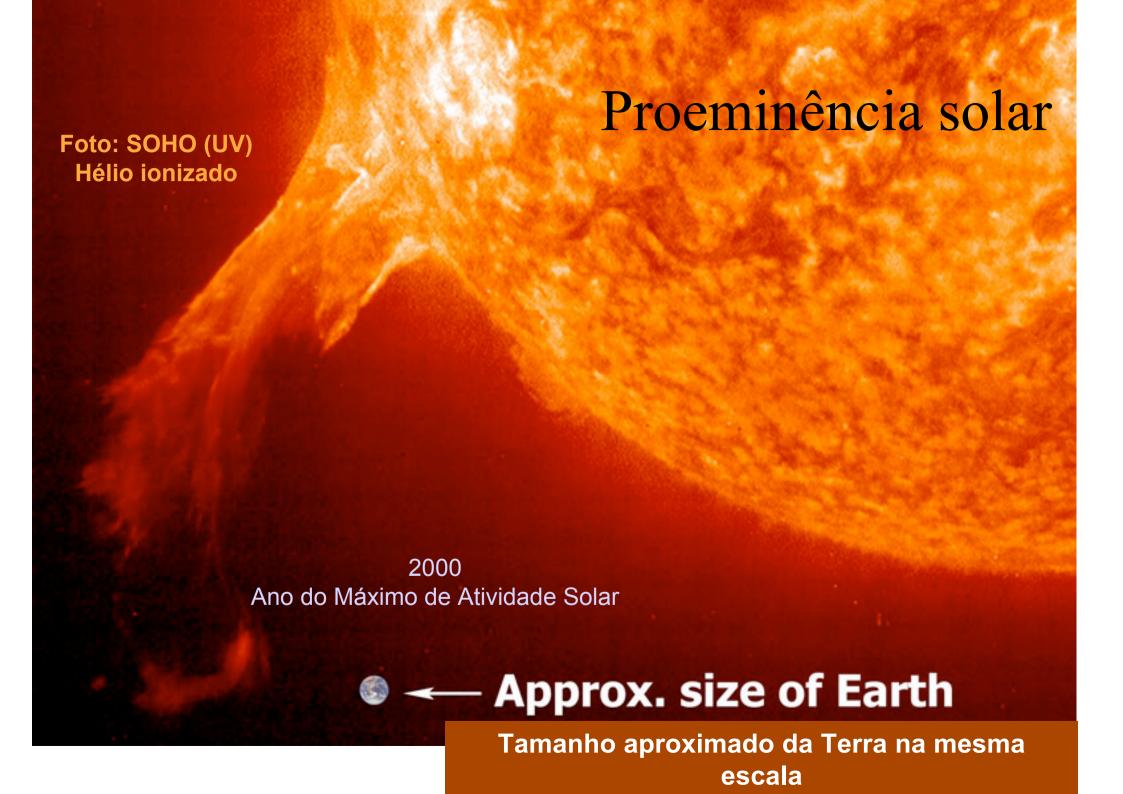
Entretanto, ainda não se sabe porquê a luminosidade do Sol foi tão baixa durante o mínimo de Maunder.

Problema em aberto na astrofísica...

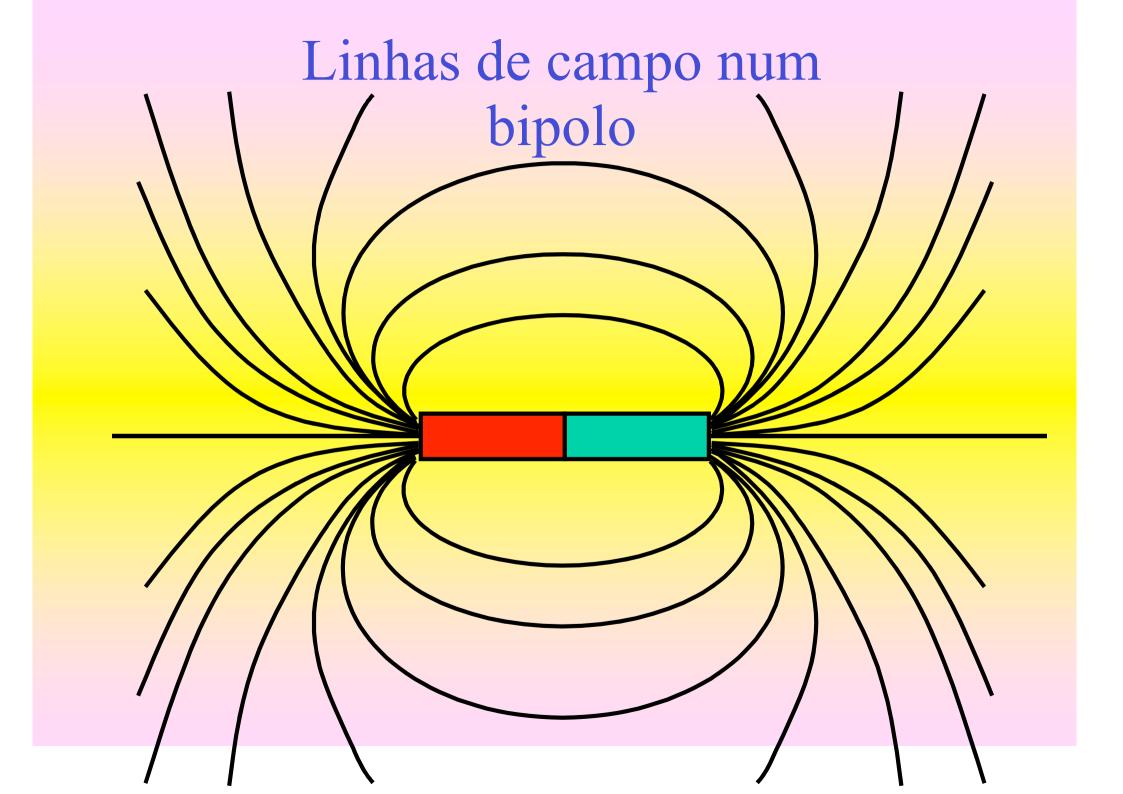
O Ciclo Solar é essencialmente um ciclo magnético

Proeminências Solares

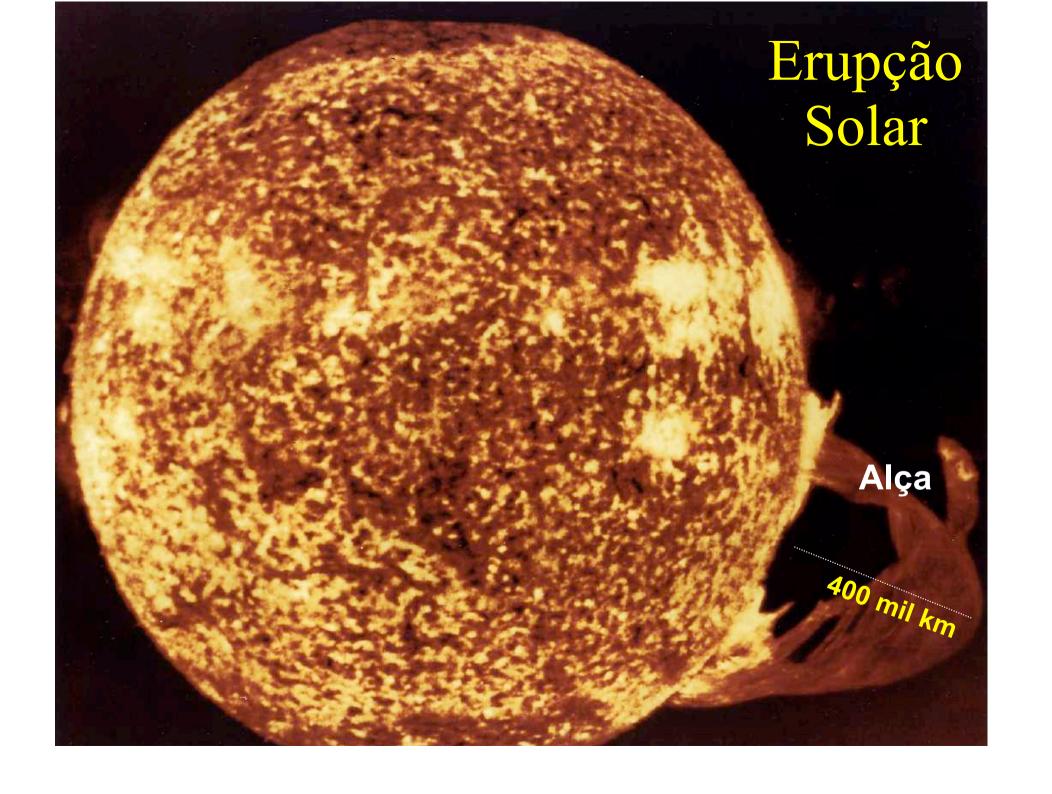




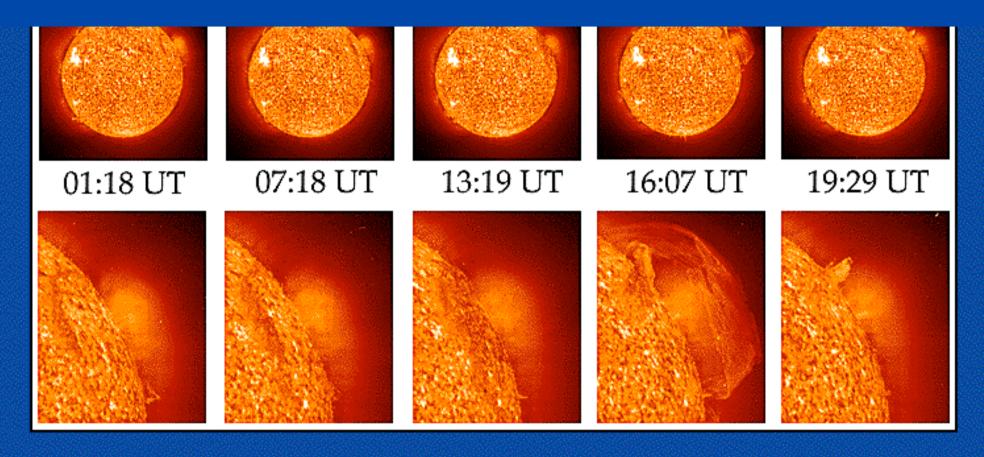








Sequência de uma Erupção Solar



A huge eruption on the Sun's surface is seen extending out to

Grande erupção solar atingindo uma altura de 28 raios terrestres

Regiões Ativas

Manchas, erupções, praias, etc., em geral ocorrem em geral na mesma latitude e longitude, apesar de estarem a diferentes alturas na atmosfera.

Todas estão ligadas à atividade magnética no interior solar!

Porque ocorrem juntas, elas variam ao longo do ciclo solar.

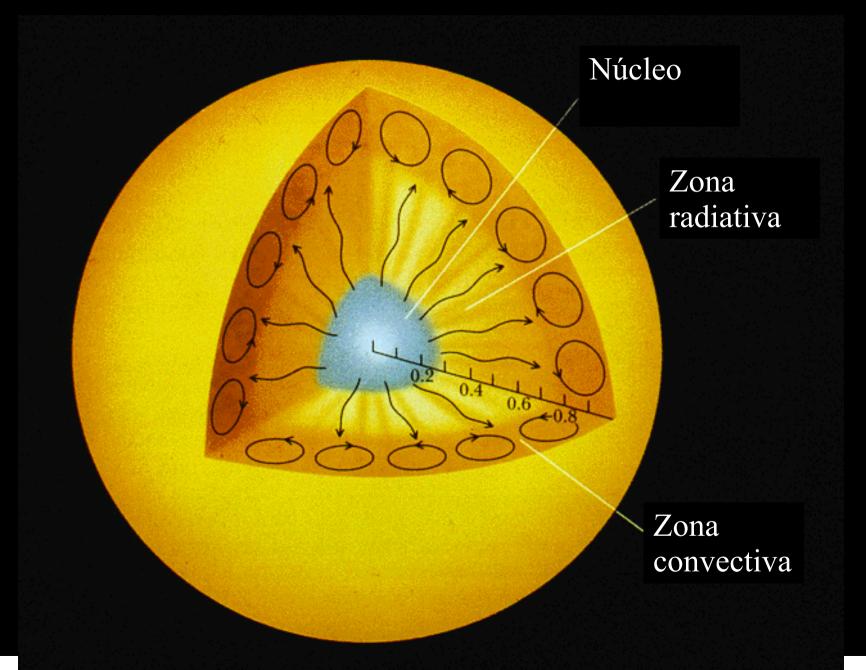
Assim, no sol calmo, há poucas erupções e no sol ativo, muitas.

Além disso, a coroa é muito maior durante o máximo.

Regiões Ativas

imagem comparando a coroa na fase calma e ativa

O Interior Solar



Geração de Energia no Sol

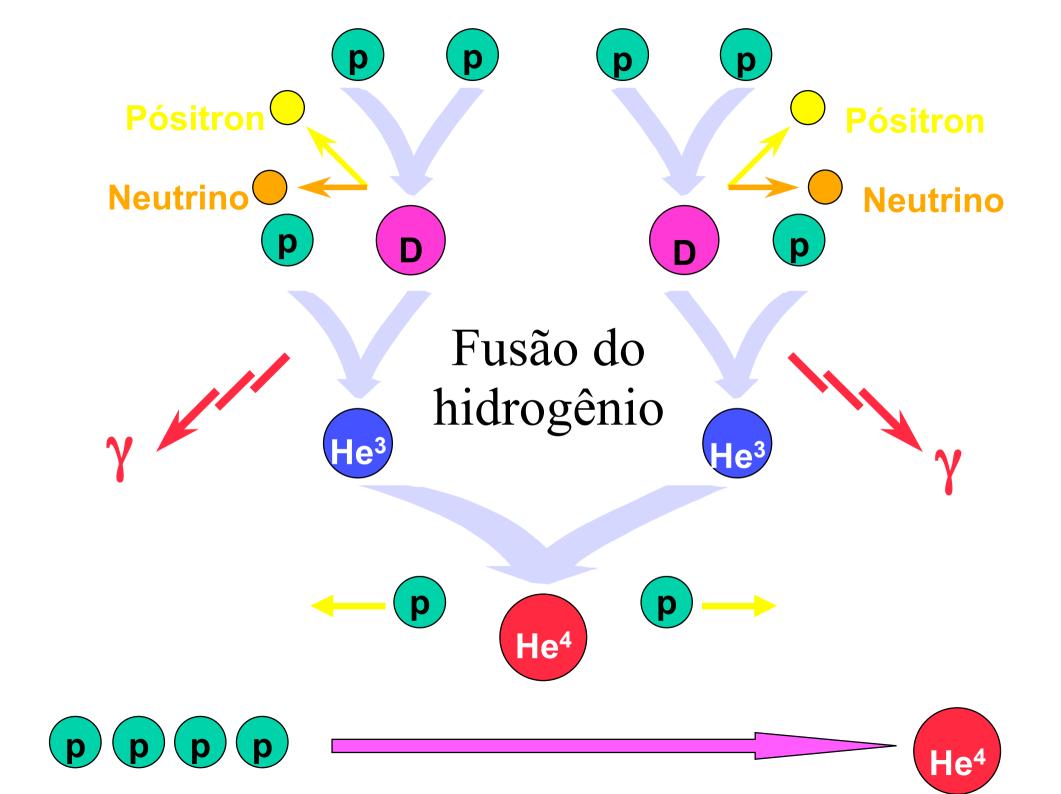
Grande problema da astrofísica até o começo do século XX:

Se o Sol tem uma luminosidade de 3,8 x 10²⁶ W e tem brilhado já há 4,5 bilhões de anos, de onde ele tira tanta energia?

Várias sugestões:

- Energia química (alguns milhares de anos, no máximo)
- Energia gravitacional (100 milhões de anos, no máximo)

Hoje sabemos que a energia do Sol é produzida por reações nucleares em seu interior.



Cadeias próton-próton gerando He

$$^{1}_{1}H + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{2}_{1}H + e^{+} + v$$

$$^{2}_{1}H + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{3}_{2}He + \gamma$$

$$^{69}\%$$

$$^{3}_{2}He + ^{3}_{2}He \rightarrow ^{4}_{2}He + 2 ^{1}_{1}H$$

$$^{3}_{2}He + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{7}_{4}Be + \gamma$$

$99,7$

$$^{7}_{4}Be + e^{-} \rightarrow ^{7}_{3}Li + v$$

$$^{7}_{3}Li + ^{1}_{1}H \rightarrow 2 ^{4}_{2}He$$

$$^{7}_{4}Be + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{8}_{5}B + \gamma$$

$$^{8}_{5}B \rightarrow ^{8}_{4}Be + e^{+} + v$$

$$^{8}_{4}Be \rightarrow 2 ^{4}_{2}He$$

De onde vem a energia do Sol?

Resultado final das cadeias p-p: 4 prótons convertidos em 1 He

Massa do próton:
$$m_p = 1,6723 \text{ x } 10^{-24} \text{ g}$$

Massa do nêutron:
$$m_{\rm n} = 1,6749 \text{ x } 10^{-24} \text{ g}$$

Portanto, massa do núcleo de He é

$$m_{\text{He}} = 2 m_{\text{p}} + 2 m_{\text{n}} = 6.6940 \text{ x } 10^{-24} \text{ g}$$

Correto?

Errado! O valor correto é $m_{\text{He}} = 2 m_{\text{p}} + 2 m_{\text{n}} = 6.6447 \times 10^{-24} \text{ g}$!

De onde vem a energia do Sol?

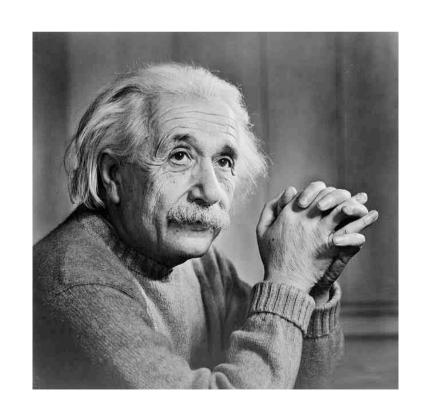
Por que a massa de dois prótons e dois nêutrons é menor que a massa do núcleo de He?

Porque parte da massa foi convertida em energia!

$$E = m c^2$$

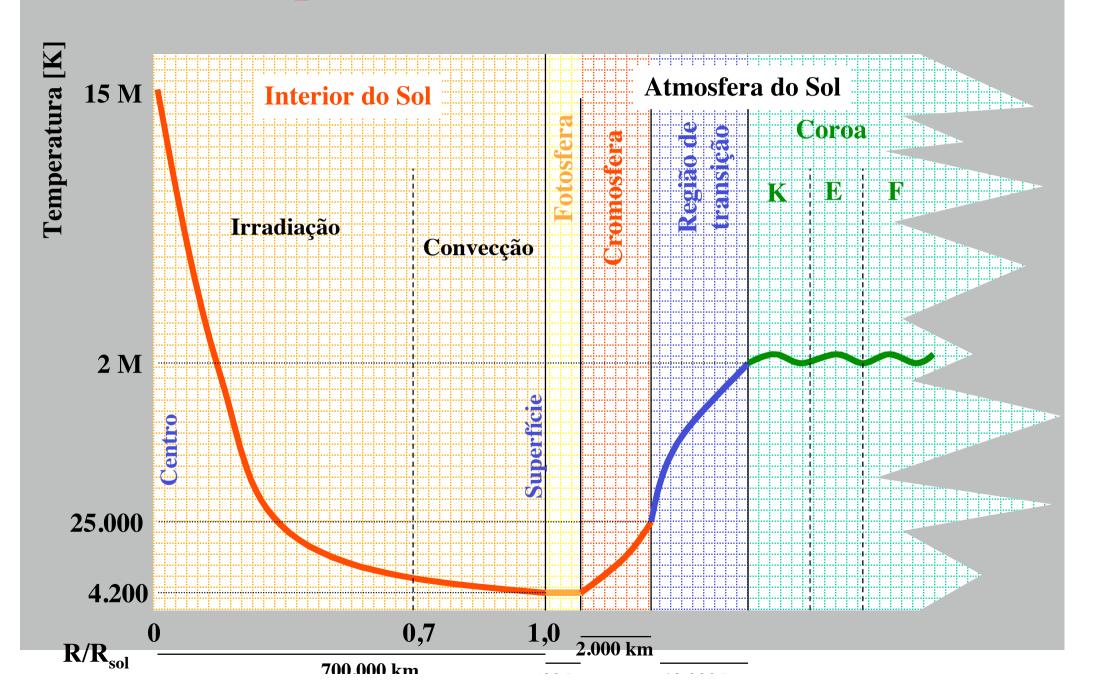
A energia liberada nas reações de fusão do Sol é, aproximadamente

$$E = (2m_{\rm p} + 2m_{\rm n} - 2m_{\rm He}) c^2$$



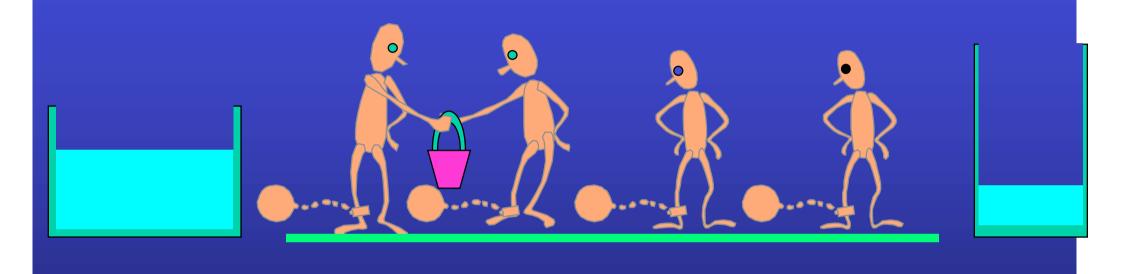
c = velocidade da luz no vácuo

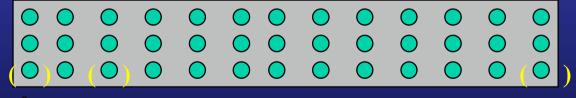
Temperatura nas camadas do Sol



O Problema do Transporte da Energia

Propagação do calor por condução

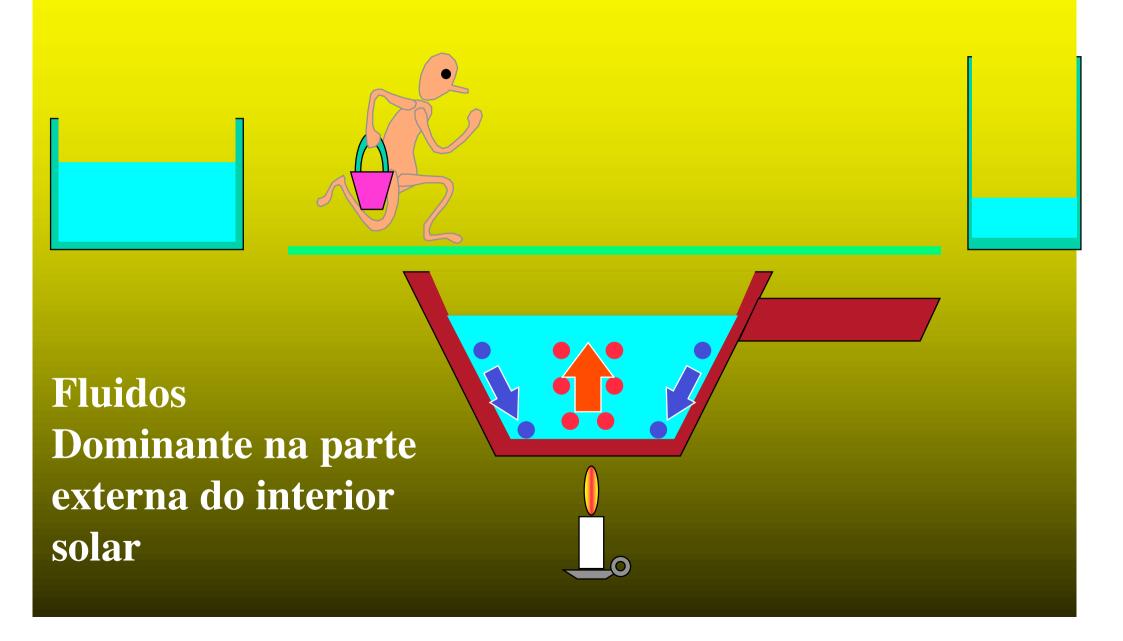




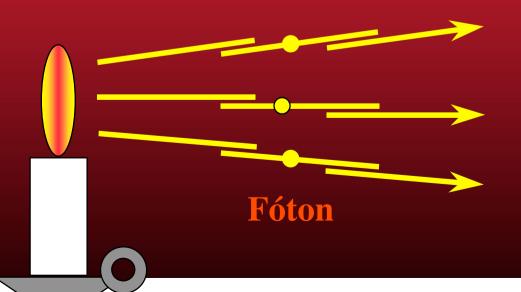


Sólidos ou fluidos de alta densidade Não é importante no Sol

Propagação de calor por convecção

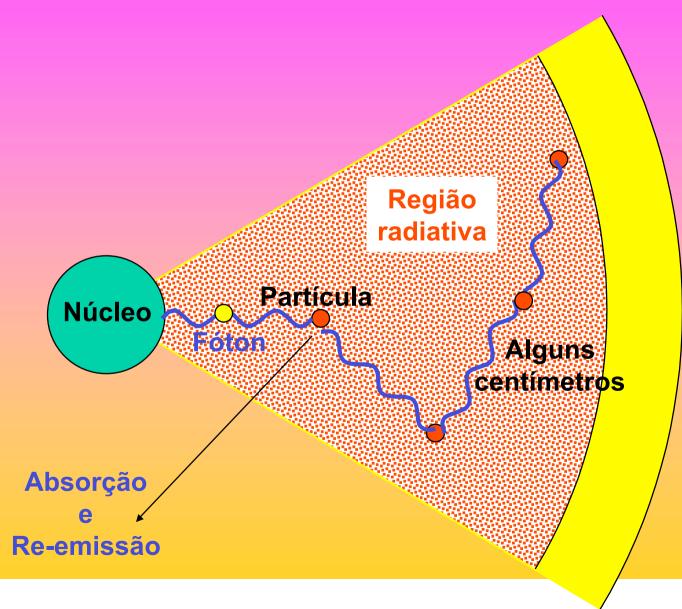






Qualquer meio
Dominante na parte
interna do interior
solar

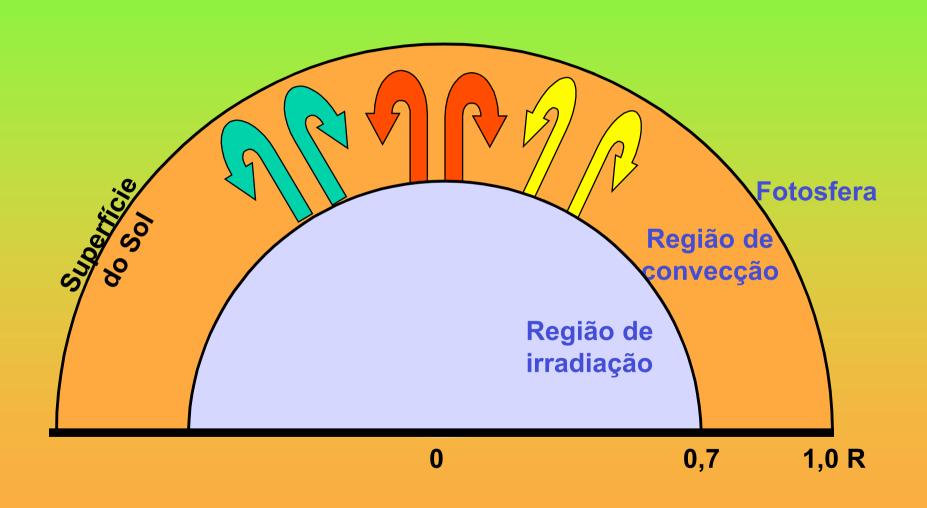
Livre caminho médio dos fótons na camada radiativa



Tempo entre a geração do fóton no núcleo e sua saída pela fotosfera:

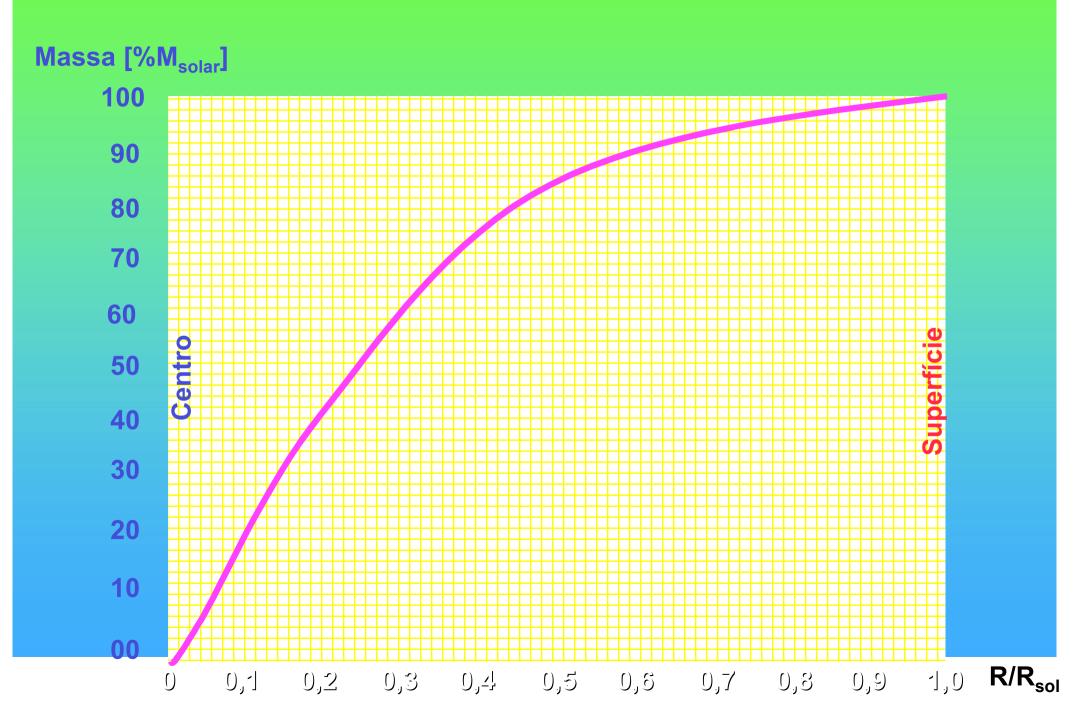
milhões de anos

Camadas do interior do sol

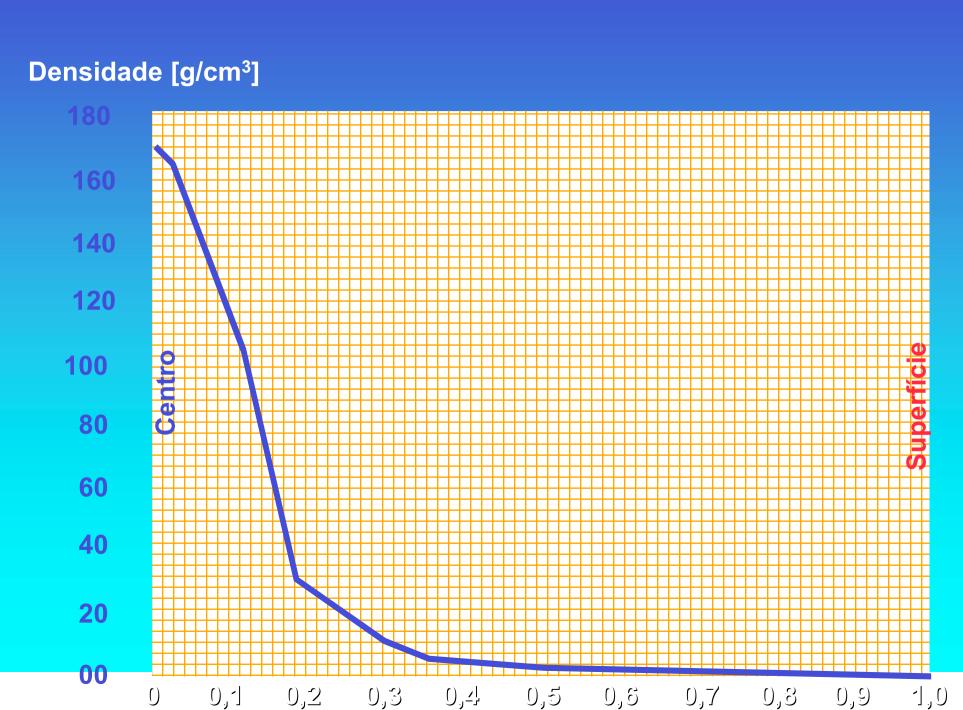


detalhes do interior do Sol

Distribuição da massa



Densidade solar



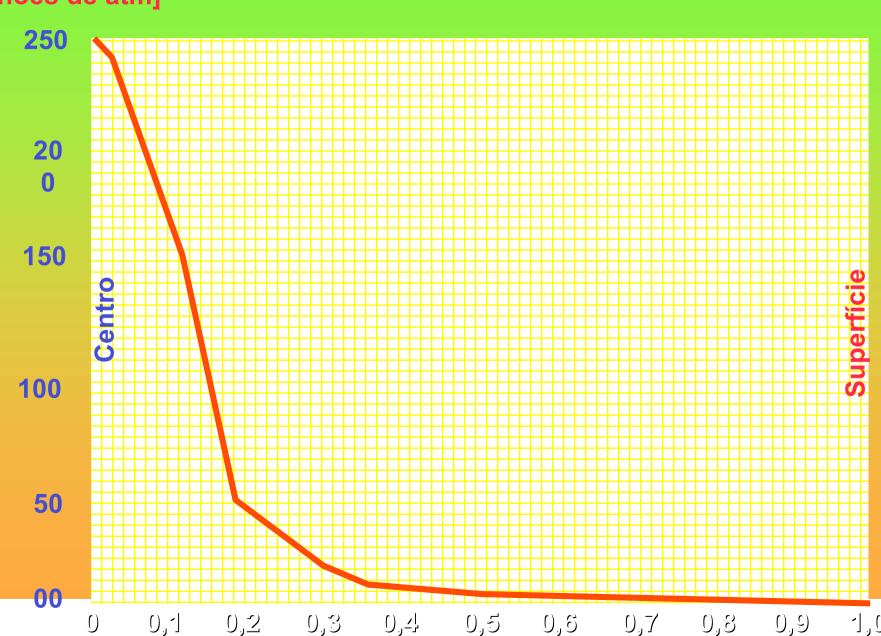
 $\Sigma_{\epsilon}(0)$

0,3



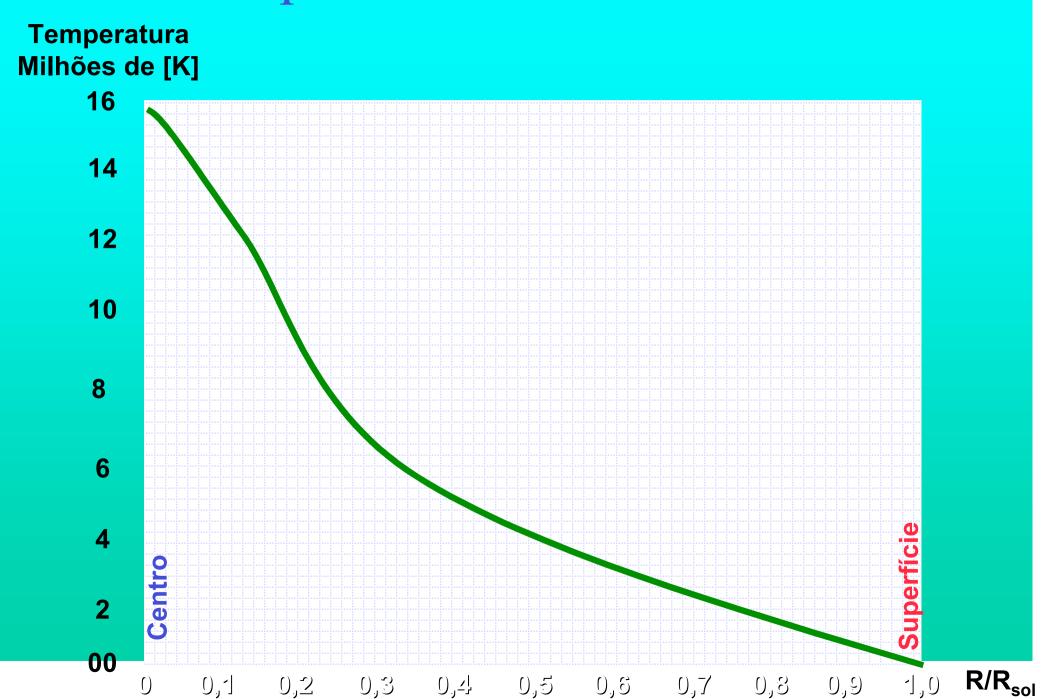
Pressão no interior solar

Pressão [Bilhões de atm]

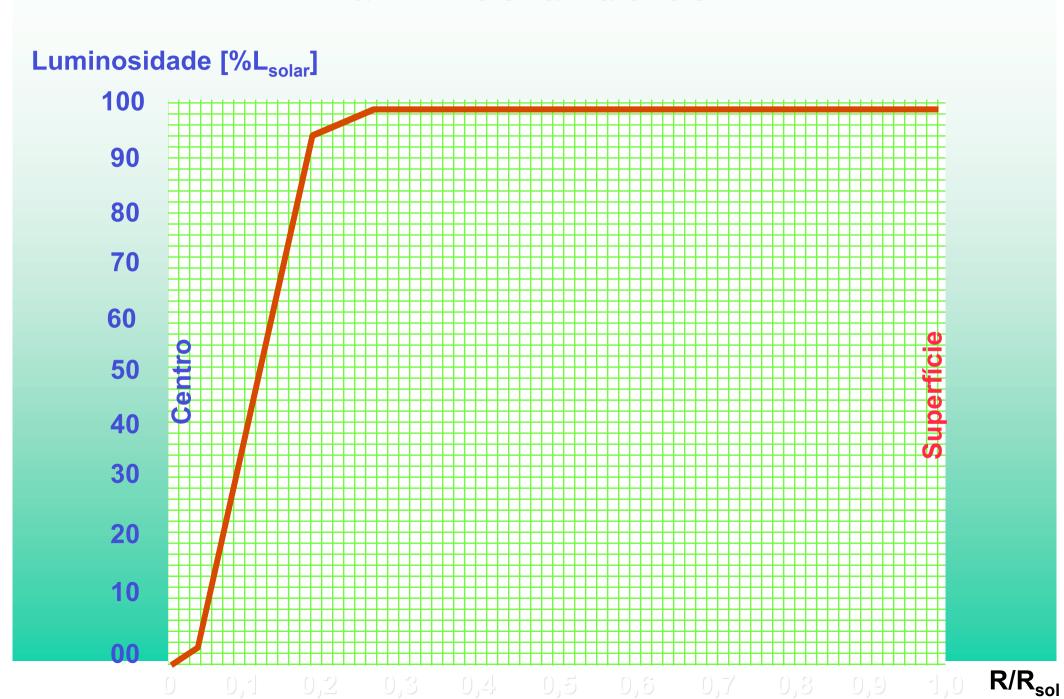


R/R_{sol}

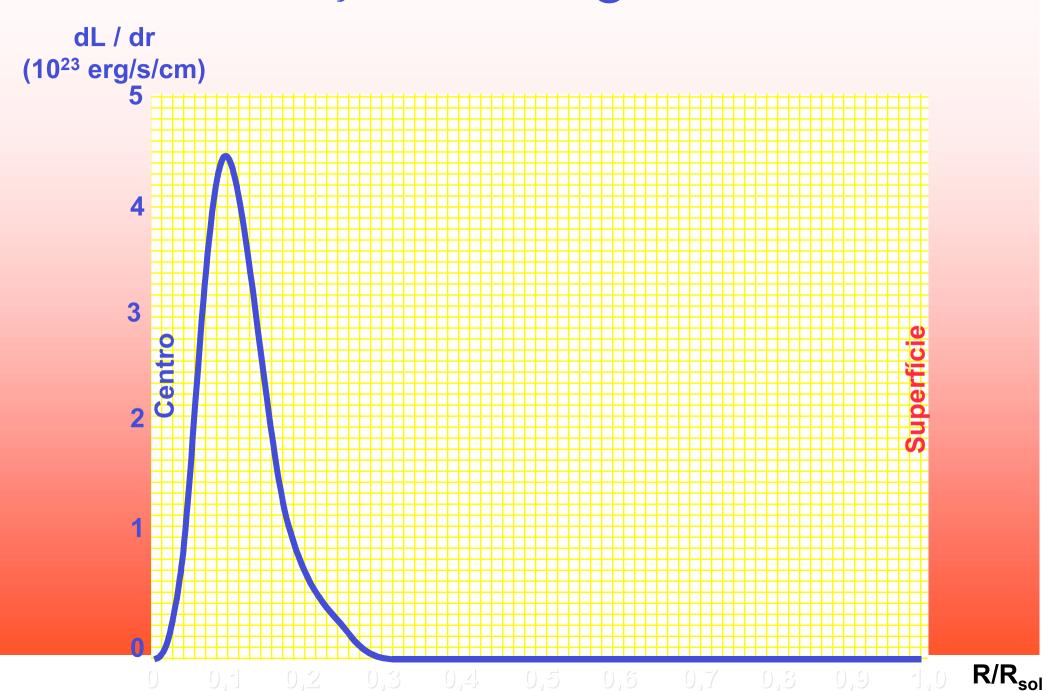
Temperatura no interior solar



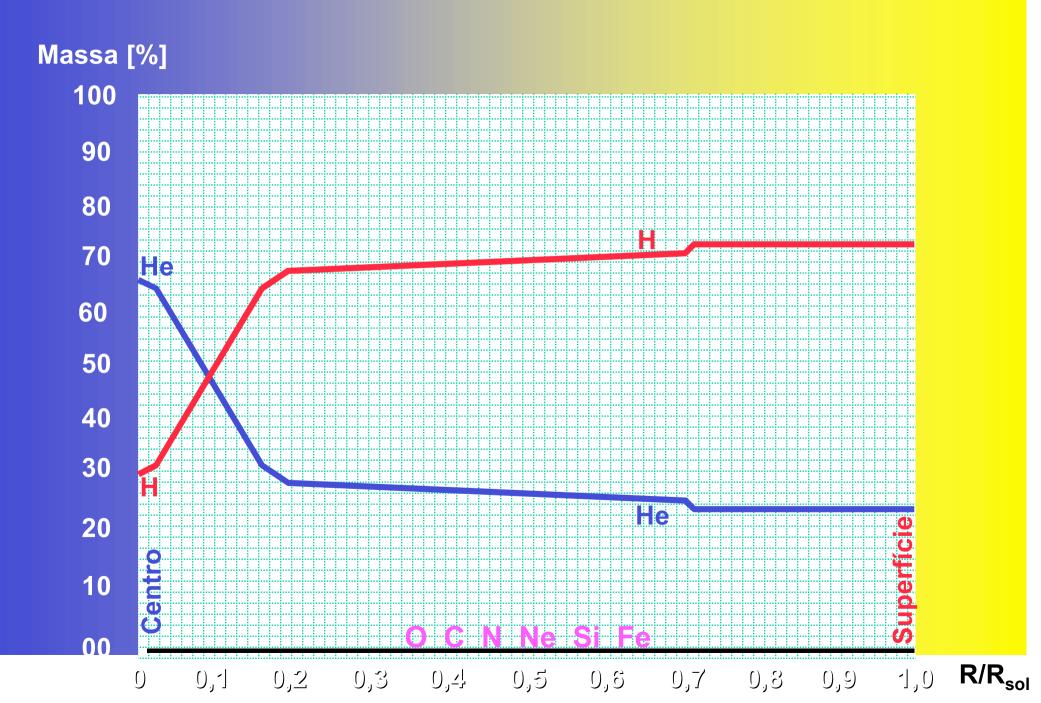
Luminosidade solar



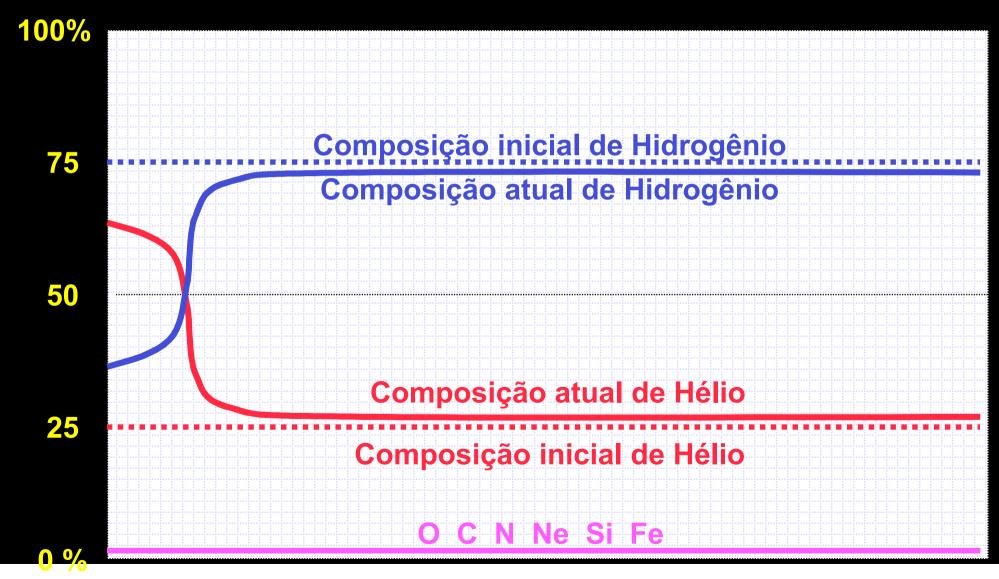
Geração de energia no Sol



Composição química do Sol



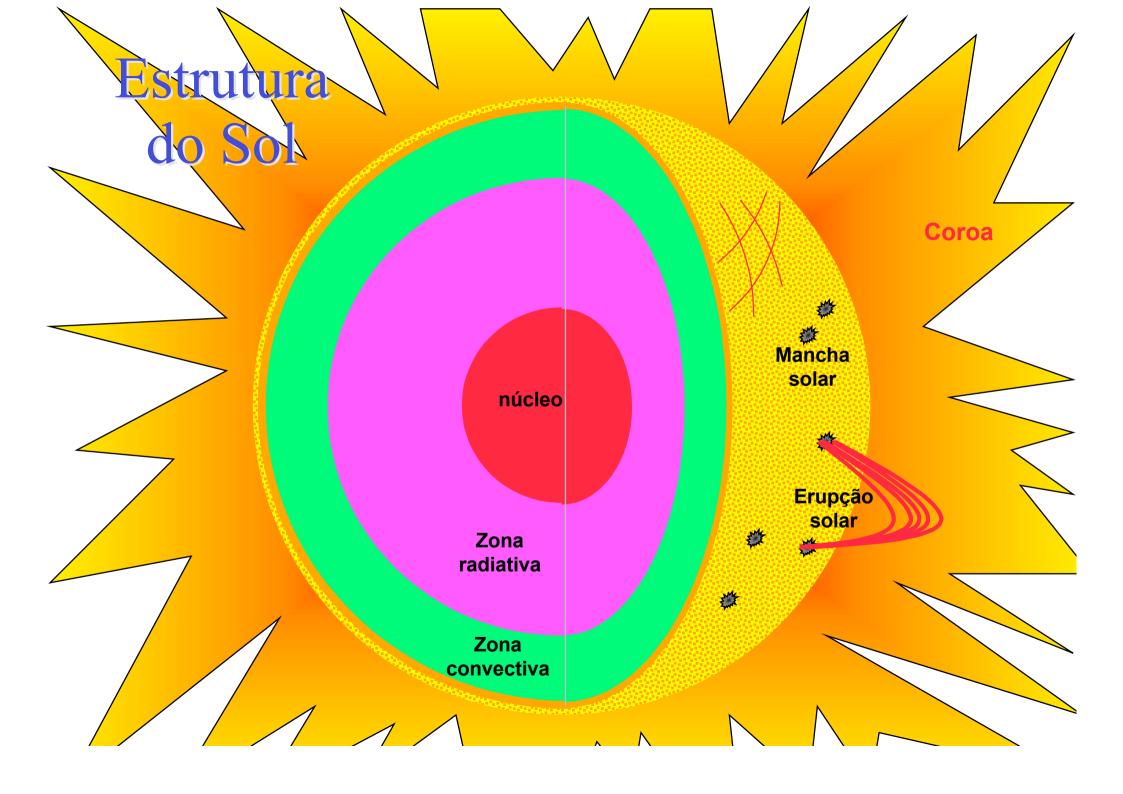
Mudanças na composição química do Sol



Centro

Superfície

Esquema geral da estrutura do Sol



Agradecimento:

Parte dos slides desta apresentação foram gentilmente fornecidos pela profa. Elisabete Gouveia dal Pino (IAG/USP) e pelo prof. Roberto Ortiz (EACH/USP)