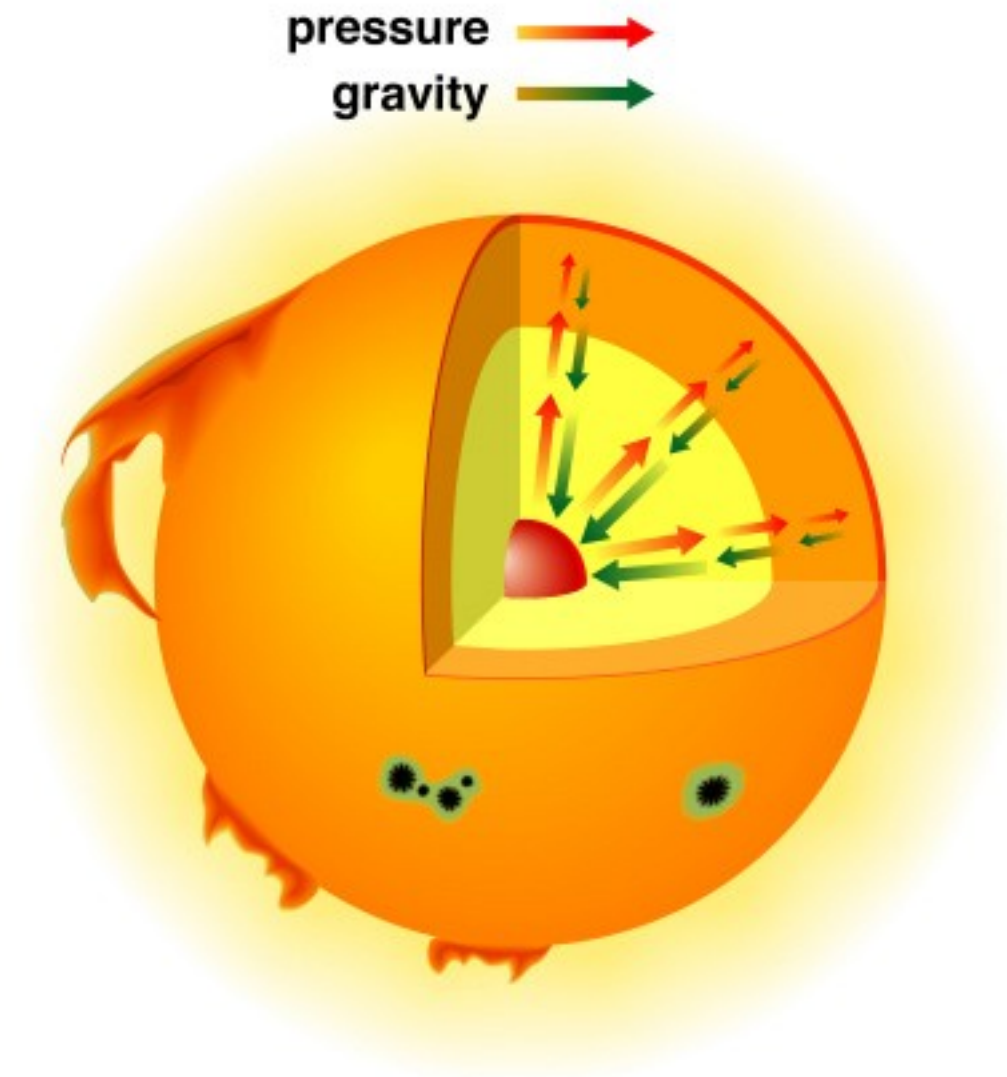


2) De onde vem a energia solar?
(porquê o sol e as estrelas brilham?)



- Devido a massa do sol, a temperatura no seu núcleo é de 15 milhões de Kelvins.
- Essa temperatura é suficiente para produzir reações nucleares (fusão) e produzir energia.
- Mas e a repulsão de Coulomb?

Só núcleos de hidrogênio foram

$$\frac{1}{2} m_H v_{rms}^2 = \frac{3}{2} k T_{clasica} = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

$$T_{clasica} = \frac{e^2}{6 \pi \epsilon_0 k r} \simeq 10^{10} K$$

Muito maior que a estimada

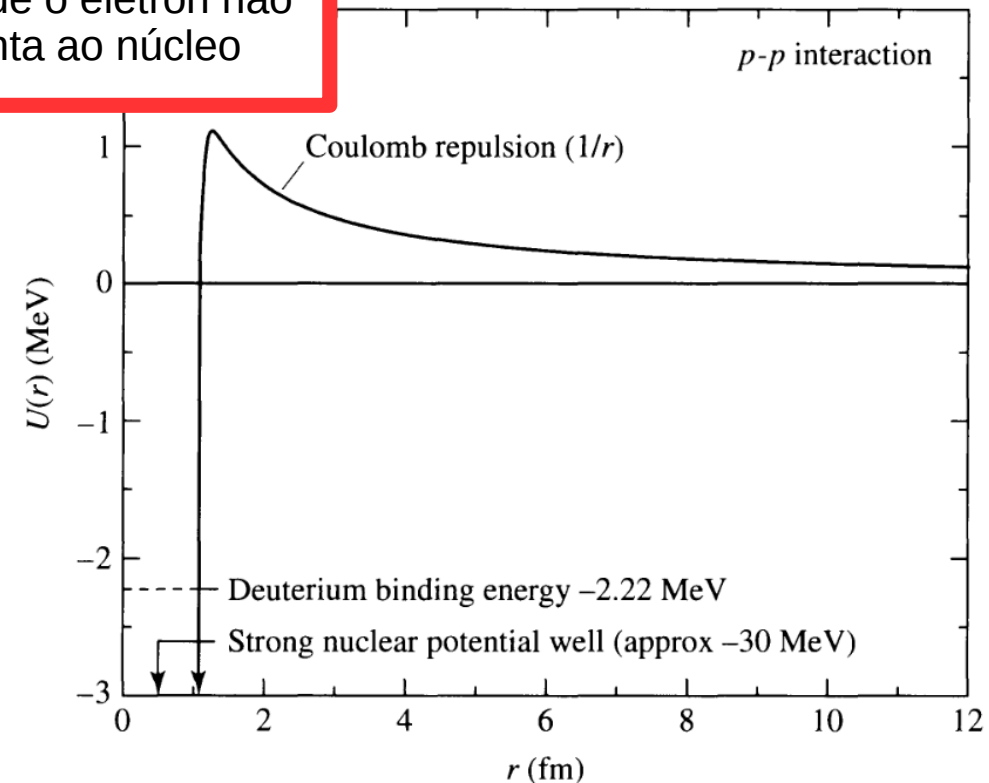
Da mecânica quântica sabemos:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4 \pi}$$

$$\frac{1}{2} m_H v^2 = \frac{p^2}{2m} = \frac{h^2}{\lambda^2 2 m_H} = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \frac{e^2}{\lambda}$$

$$T_{quantica} = \frac{e^4 m_H}{12 \pi^2 \epsilon_0^2 h^2 k} \simeq 10^7 K$$

Resposta a pergunta:
Porque o elétron não
se junta ao núcleo



- Sabendo que conseguimos juntar dois (ou melhor, 4) prótons
- Temos a cadeia próton-próton

$$4 H \rightarrow He + 0.0286 m_H + 2 \nu$$

$$E = mc^2$$

$$E = 0.0286 m_H c^2 = 4.3 \times 10^{12} J$$

$$E_{total} = E \times (0.1 M_{\%sol} / 4 m_H) = 1.28 \times 10^{44} J$$

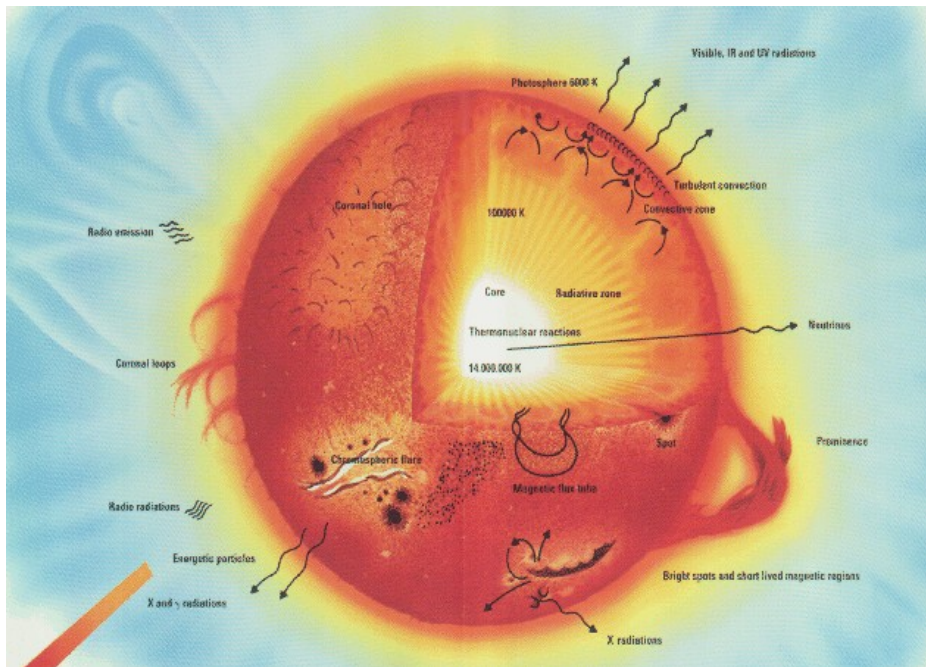
$$L_{sol} = 4 \times 10^{26} J/s$$

$$t_{fusão} = \frac{E_{total}}{L_{sol}} \simeq 10^{10} anos$$

Como essa energia chega à superfície?

- As estrelas querem levar a energia gerada no núcleo para fora. Três mecanismos diferentes para transportar energia operam no interior das estrelas
 - **Radiação:** quando T é muito alta, todo o material se encontra ionizado, logo não há absorção e emissão. Mas há espalhamento e os fótons seguem um caminho randômico (devido ao grande número de fótons pode estimar-se um fluxo radiativo neto)
 - **Convecção:** Quando o material mais frio se sustenta sobre o material mais quente. O material mais quente se desloca para cima, e o mais frio para baixo. É a forma mais eficiente de transportar energia já que carrega grandes parcelas de material
 - **Condução:** transporta calor através da colisão de partículas Em geral é insignificante no interior das estrelas

Estrutura interna

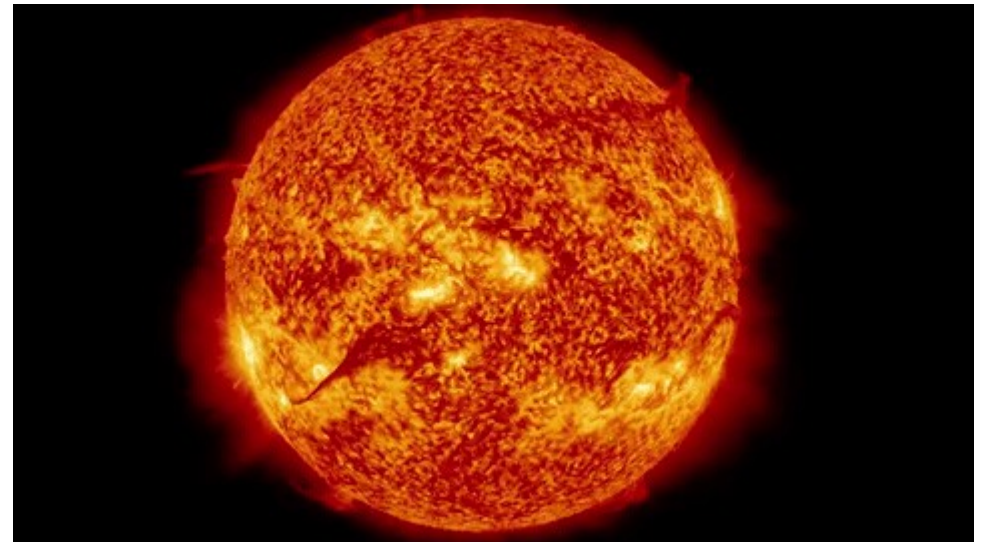
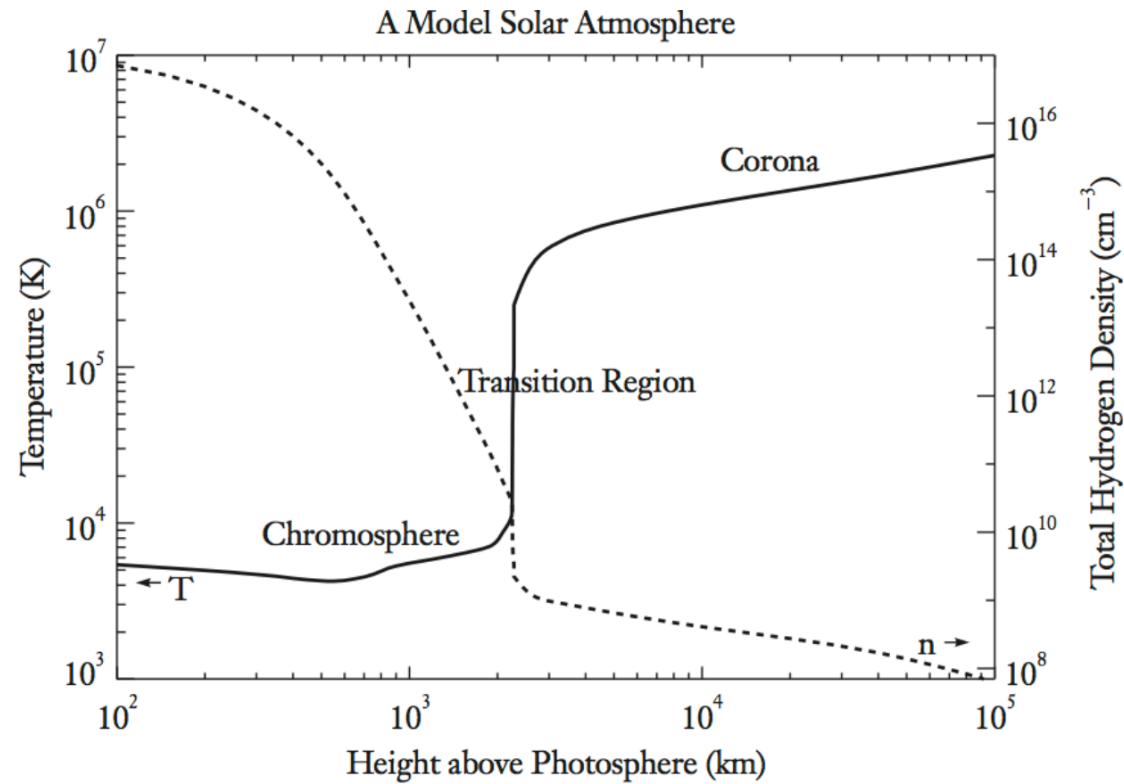


- Núcleo ($0 - 0.25R_{\text{sol}}$), reações nucleares
- Zona radiativa ($0.25R_{\text{sol}} - 0.71R_{\text{sol}}$), espalhamento de ftons
- Zona convectiva ($0.71R_{\text{sol}} - 1R_{\text{sol}}$), convecção + radiação (absorção, emissão, espalhamento)

A atmosfera solar

A cromosfera

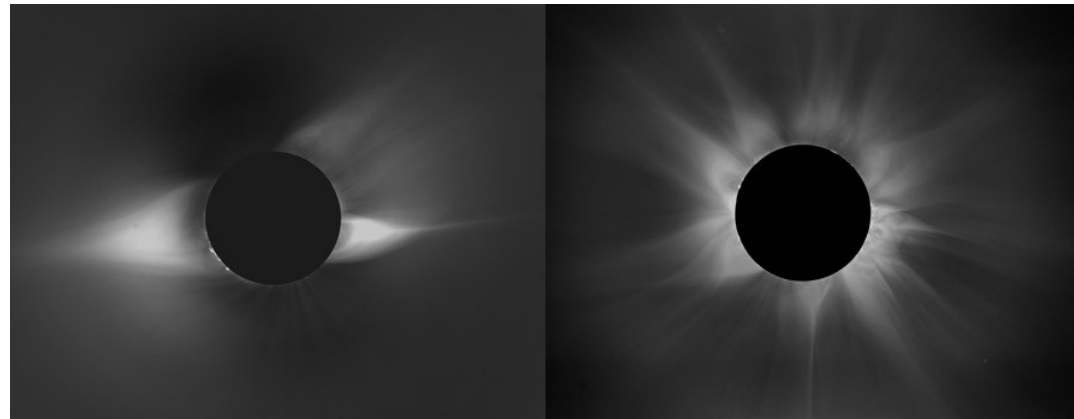
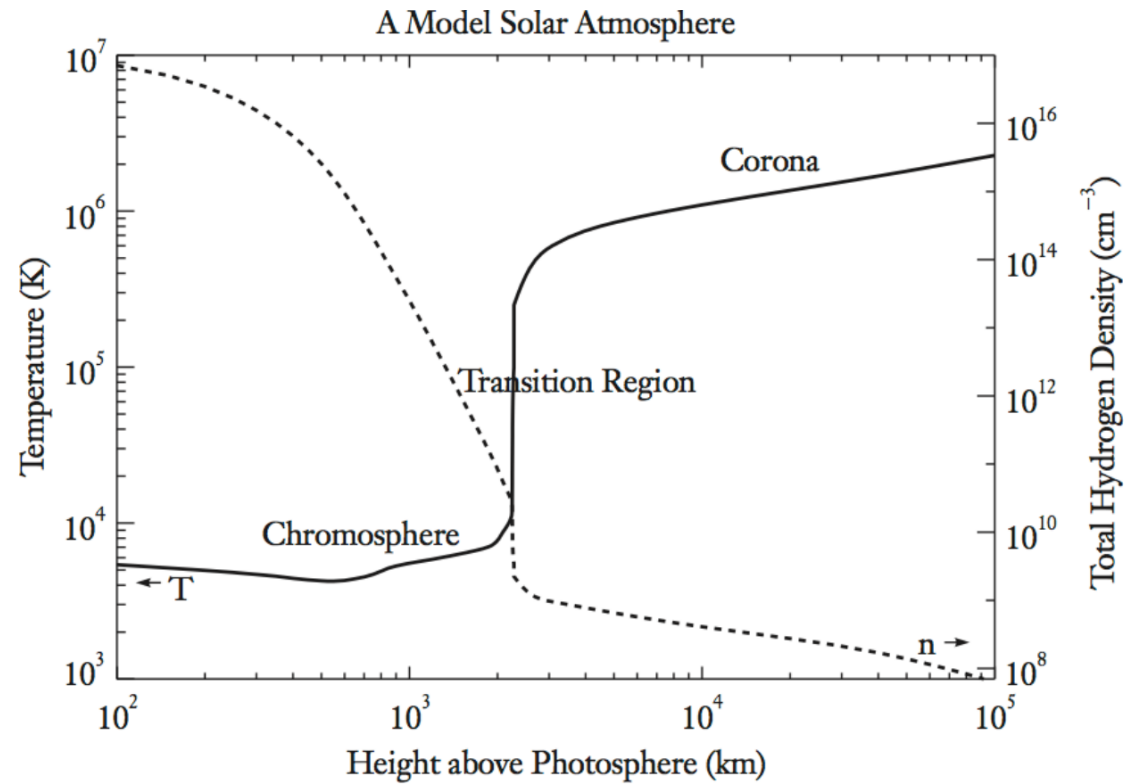
- Cromosfera: segunda camada da atmosfera solar depois da fotosfera. Sua espessura é de ~ 2000 km
- As linhas de absorção do espectro solar se formam na fotosfera, na cromosfera formam-se linhas de emissão (maior T)
- Uma das linhas de emissão mais importantes na cromosfera é a linha de $H\alpha$ (transição de $n=3$ a $n=2$), com $\lambda=656.3$ nm (vermelho)
- Já que sua radiação é muito mais fraca que a da fotosfera, é difícil observar a cromosfera (só durante os eclipses)

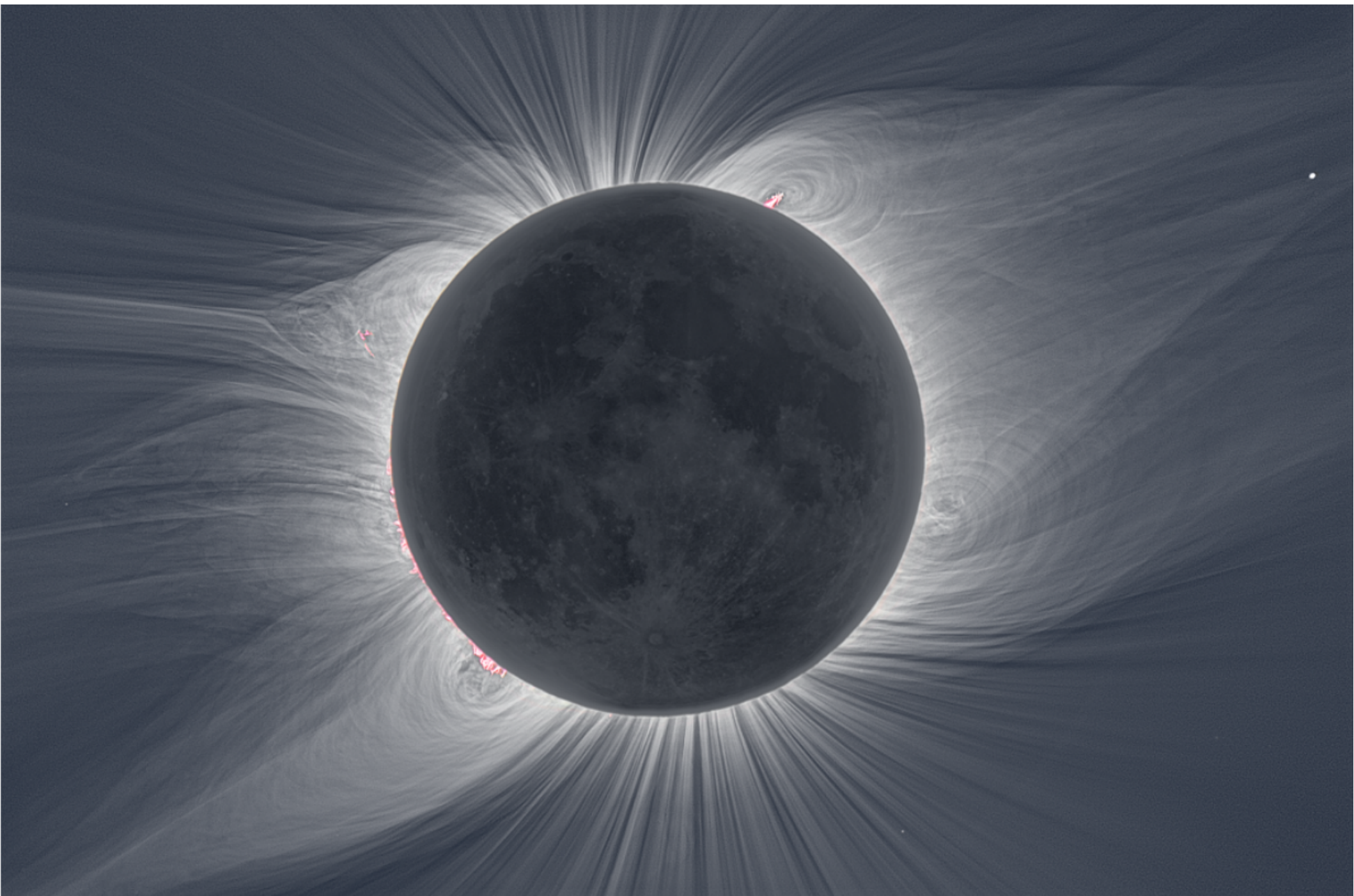


A atmosfera solar

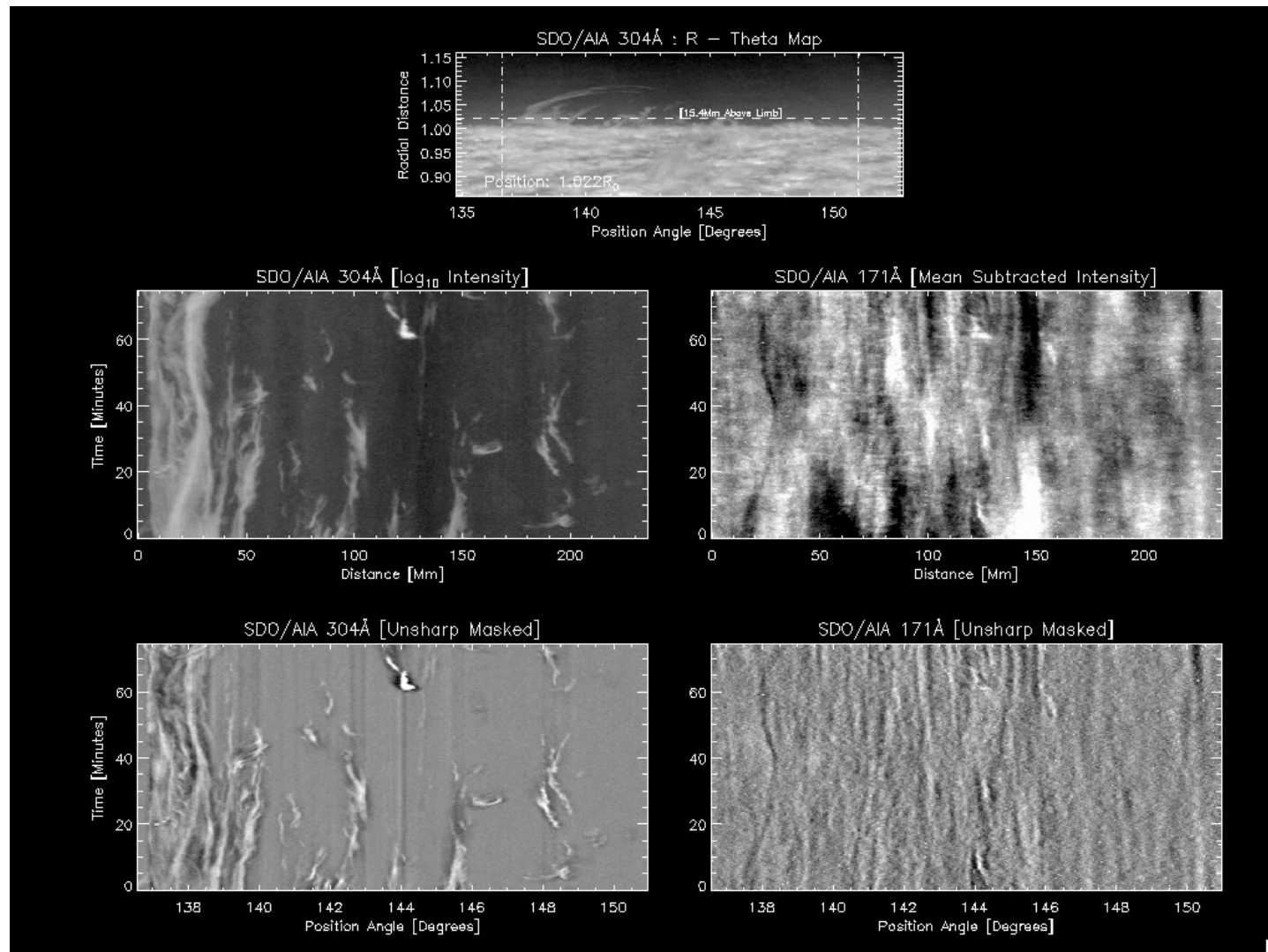
A coroa

- Camada mais rarefeita do sol. É brilhante devido a sua alta temperatura, mas devido a baixa densidade é menos brilhante que a fotosfera (só se observa em eclipses)
- Seu espectro mostra linhas de emissão de: ferro, níquel, neônio e cálcio altamente ionizados.
- A existência desses elementos ionizados exige temperaturas altíssimas ($T > 10^6$ K)





- Acredita-se que a fonte de energia que eleva a temperatura da atmosfera solar se deve a campos magnéticos variáveis formados na fotosfera. Esses campos magnéticos geram ondas (chamadas ondas Alfvén) que transportam energia à Coroa. **Essas ondas são capazes também de acelerar o vento solar.**



ULYSSES/SWOOPS
Los Alamos
Space and Atmospheric Sciences

