Unidades e Constantes

Unidade de Massa Atômica (Dalton): 1 u $= 1.660538921 \cdot 10^{-27}$ kg
Elétron-volt: 1 eV $= 1.602177 \cdot 10^{-19}$ J
Unidade Astronômica: 1 AU $= 1.49598 \cdot 10^{11}$ m
Ano-luz: 1 ly $= 9.46073 \cdot 10^{15}$ m
Parsec: 1 pc $= 2.062648 \cdot 10^{5}$ AU $= 3.26156$ ly $= 3.0856776 \cdot 10^{16}$ m
Massa Solar: $M_\odot = 1.989 \cdot 10^{30}$ kg
Raio Solar: $R_\odot = 6.960 \cdot 10^{8}$ m
Luminosidade Solar: $L_\odot = 3.827 \cdot 10^{26}$ W
$\pi = 3.14159$
$e = 2.71828$
Constante gravitacional: $G = 6.674 \cdot 10^{-11}\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{kg \cdot s^2}}$
Permissividade do vácuo: $\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12}\ \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}}$
Permeabilidade do vácuo: $\mu_0 = 1.2566 \cdot 10^{-6}\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2}$
Velocidade da luz no vácuo: $c = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0}} = 2.9979 \cdot 10^{8}\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$
Massa do elétron: $m_e = 9.10939 \cdot 10^{-31}$ kg $= 0.0005486$ u $= 511.0\ \frac{\mathrm{keV}}{c^2}$
Massa do próton: $m_p = 1.6726 \cdot 10^{-27}$ kg $= 1.007276$ u $= 938.27\ \frac{\mathrm{MeV}}{c^2}$
Massa do néutron: $m_n = 1.6749 \cdot 10^{-27}$ kg $= 1.0087$ u $= 939.57\ \frac{\mathrm{MeV}}{c^2}$
Carga elementar: $e = 1.602177 \cdot 10^{-19}$ C
Constante de Planck: $h = 6.626076 \cdot 10^{-34}$ Js
Constante de Planck reduzida: $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.05457 \cdot 10^{-34}$ Js
Constante de Avogadro: $N_\mathrm{A} = 6.022141 \cdot 10^{23}\ \mathrm{mol}^{-1}$
Constante de Boltzmann: $k_\mathrm{B} = 1.38065 \cdot 10^{-23}\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}}$
Constante Universal dos Gases Perfeitos: $R = N_\mathrm{A} k_\mathrm{B} = 8.314462\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol \cdot K}}$
Constante de Stefan-Boltzmann: $\sigma = 5.6704 \cdot 10^{-8}\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 K^4}}$
Constante de Radiação: $a = \frac{4\sigma}{c} = 7.565767 \cdot 10^{-16}\ \mathrm{J\,m^{-3} K^{-4}}$
Energia de Bohr: $E_0 = \frac{m_e e^4}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^2} = 2.18 \cdot 10^{-18}$ J $= 13.6$ eV

Mecânica Celeste

Lei da gravitação: $F = G \cdot \frac{Mm}{r^2}$, vetorial: $\vec{F} = G \cdot \frac{Mm}{r^2}\hat{r} = G \cdot \frac{Mm}{r^3}\vec{r}$
Energia potencial gravitacional: $U = -G \cdot \frac{Mm}{r}$
Energia potencial gravitacional de uma esfera com densidade constante: $U = -\frac{3}{5} \cdot GM^2/R$
Energia cinética: $K = \Sigma_i \frac{m_i v_i^2}{2}$
Teorema do Virial: $-2\langle K \rangle = \langle U \rangle$, ou $\langle E \rangle = \langle K \rangle + \langle U \rangle = \frac{1}{2}\langle U \rangle$

Distâncias e Luz

Fluxo de uma estrela com luminosidade L na distância d: $F = \frac{L}{4\pi d^2}$
Magnitude aparente: $m = -2.5 \log_{10} \frac{F}{F_0} = -2.5 \log_{10} F + C = -2.5 \log_{10} \frac{L}{4\pi d^2} + C$
Magnitude absoluta: $M = -2.5 \log_{10} \frac{L}{4\pi (10 \text{ pc})^2} + C$
Módulo de distância: $m - M = 5 \log_{10} \frac{d}{10 \text{ pc}}$
Fluxo bolométrico: $F_{\text{bol}} = \int_0^\infty F_\lambda \, d\lambda$
Fluxo na banda X (função de sensitividade S_X): $F_X = \int_0^\infty S_X \cdot F_\lambda \, d\lambda$
Correção bolométrica: $BC_V = m_{\text{bol}} - V = m_{\text{bol}} - m_V = M_{\text{bol}} - M_V$
Cores: $B - V := m_B - m_V = -2.5 \log_{10} \frac{F_B}{F_V} + C_{B-V} = -2.5 \log_{10} \frac{\int S_B \cdot F_\lambda d\lambda}{\int S_V \cdot F_\lambda d\lambda} + C_{B-V}$,
onde $C_{B-V} = C_B - C_V$
Extinção interestelar: $m_\lambda = M_\lambda + 5 \log_{10} d[\text{pc}] - 5 + A_\lambda$, onde $A_\lambda = -2.5 \log_{10} \frac{F_\lambda}{F_{\lambda,0}}$
Relação com a profundidade ótica: $A_\lambda = -2.5 \, \tau_\lambda \log_{10} e = 1.086 \, \tau_\lambda$
Relações de de Broglie: $E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}, \qquad p = \frac{E}{c} = \frac{h \cdot \nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$

Espectros Estelares

Lei de Stefan-Boltzmann: $P = \frac{L}{A} = \sigma \cdot T^4$
Lei de deslocamento de Wien: $\lambda_{max} T = 2,898 \cdot 10^{-3}$ mK
Lei de Planck: $B_\lambda = \frac{2hc^2\lambda^{-5}}{E^{hc/\lambda k_{\text{B}} T} - 1}$
Distribuição de Maxwell-Boltzmann: $n_v dv = n \left(\frac{m}{2\pi k_{\text{B}} T} \right)^{3/2} e^{-mv^2/2k_{\text{B}}T} \cdot 4\pi v^2 dv$
Velocidade mais provável: $v_{\text{mp}} = \sqrt{\frac{2k_{\text{B}}T}{m}}$
Velocidade média quadrática: $v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3k_{\text{B}}T}{m}}$
Níveis de energia do átomo de hidrogênio: $E_n = -\frac{Z^2}{n^2} \cdot E_0$
Regras de seleção do átomo de H: $\Delta l = \pm 1; \quad \Delta m_l = 0$ ou ± 1
Equação de Boltzmann: $\frac{N_{\text{b}}}{N_{\text{a}}} = (\frac{g_{\text{b}}}{g_{\text{a}}}) e^{-(E_{\text{b}} - E_{\text{a}})/k_{\text{B}}T}$
Função de partição: $Z = \Sigma_{j=1}^\infty g_j e^{-(E_j - E_1)/k_{\text{B}}T}$
Equação de Saha: $\frac{N_{i+1}}{N_i} = \frac{2Z_{i+1}}{n_e Z_i} \left(\frac{2\pi m_e k_{\text{B}} T}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\chi_i/k_{\text{B}}T}$
em termos da pressão eletrônica: $\frac{N_{i+1}}{N_i} = \frac{2k_{\text{B}} T Z_{i+1}}{P_e Z_i} \left(\frac{2\pi m_e k_{\text{B}} T}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\chi_i/k_{\text{B}}T}$

Atmosferas Estelares: O Campo de Radiação

Intensidade específica: $I_\lambda \equiv \frac{\partial I}{\partial \lambda} \equiv \frac{E_\lambda d\lambda}{d\lambda \, dt \, dA \cos\theta \, d\Omega}$, onde $d\Omega = \operatorname{sen}\theta \, d\theta \, d\phi$
Intensidade média: $\langle I_\lambda \rangle \equiv \frac{1}{4\pi} \int I_\lambda \, d\Omega = \frac{1}{4\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} I_\lambda \operatorname{sen}\theta \, d\theta \, d\phi$
Densidade de energia específica: $u_\lambda d\lambda = \frac{1}{c} \int I_\lambda \, d\lambda \, d\Omega = \frac{4\pi}{c} \langle I_\lambda \rangle \, d\lambda$
para radiação de corpo negro: $u_\lambda d\lambda = \frac{4\pi}{c} B_\lambda \, d\lambda = \frac{8\pi hc/\lambda^5}{E^{hc/\lambda k_{\text{B}}T} - 1} \, d\lambda$
em termos de ν: $u_\nu \, d\nu = \frac{4\pi}{c} B_\nu \, d\nu = \frac{8\pi h\nu^3/c^3}{E^{h\nu/k_{\text{B}}T} - 1} \, d\nu$
Densidade de energia total: $u = \int_0^\infty u_\lambda d\lambda = \int_0^\infty u_\nu d\nu$
Corpo negro: $u = \frac{4\pi}{c} \int_0^\infty B_\lambda(T) \, d\lambda = \frac{4\sigma T^4}{c} = aT^4$
Fluxo radiativo específico: $F_\lambda d\lambda = \int I_\lambda d\lambda \cos\theta \, d\Omega = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} I_\lambda d\lambda \cos\theta \operatorname{sen}\theta \, d\theta \, d\phi$
Pressão de radiação Específica (campo isotrópico): $P_{\text{rad},\lambda} d\lambda = \frac{4\pi}{3c} I_\lambda d\lambda = \frac{1}{3} u_\lambda d\lambda$
Pressão radiativa total: $P_{\text{rad}} = \int_0^\infty P_{\text{rad},\lambda} d\lambda = \int_0^\infty \frac{1}{3} u_\lambda d\lambda = \frac{1}{3} u = \frac{4\pi}{3c} \langle I \rangle$

Atmosferas Estelares: Opacidade

Percurso livre médio: $\ell = \frac{1}{n\sigma}$
Perda de intensidade I_λ percorrendo ds: $dI_\lambda = -\kappa_\lambda \rho \, I_\lambda \, ds$, onde κ_λ é a opacidade
Intensidade após percorrer a distância s: $I_\lambda = I_{\lambda,0} \, e^{-\int_0^s \kappa_\lambda \rho \, ds}$
opacidade e densidade constantes: $I_\lambda = I_{\lambda,0} \, e^{-\kappa_\lambda \rho \, s}$
Relação percurso livre médio-opacidade: $\ell = \frac{1}{\kappa_\lambda \rho}$
Profundidade ótica: $d\tau_\lambda = -\kappa_\lambda \rho \, ds$
Profundidade ótica na profundidade geométrica s: $\tau_\lambda = \int_0^s \kappa_\lambda \rho \, ds$
ou $\tau_\lambda = \int_0^s n_\mathrm{d}(s')\sigma_\lambda ds' = \sigma_\lambda N_\mathrm{d}$, N_d = densidade de coluna
Intensidade após percorrer material com profundidade ótica τ_λ: $I_\lambda = I_{\lambda,0} \, e^{-\tau_\lambda}$
para um percurso fazendo um ângulo θ com a vertical: $I_\lambda = I_{\lambda,0} \, e^{-\tau_\lambda / \cos\theta}$
Seção transversal para foto-ionização ("bound-free") a partir do n-ésimo orbital χ_n:

$$\sigma_\mathrm{bf} = 1.31 \cdot 10^{-19} \cdot \frac{1}{n^5} \left(\frac{\lambda}{500 \text{ nm}} \right)^3 m^2$$

para espalhamento por e^- (Thomson, Compton): $\sigma_\mathrm{T} = \frac{1}{6\pi\varepsilon_0^2} \left(\frac{e^2}{m_e c^2} \right)^2 = 6.65 \cdot 10^{-29}$ m^2
para espalhamento por e^- (Rayleigh): $\sigma \propto \lambda^{-4}$
Opacidade total: $\kappa_\lambda = \kappa_{\lambda,\mathrm{bb}} + \kappa_{\lambda,\mathrm{bf}} + \kappa_{\lambda,\mathrm{ff}} + \kappa_\mathrm{es} + \kappa_{\mathrm{H}^-}$
Opacidade média de Rosseland: $\frac{1}{\bar\kappa} \equiv \frac{\int_0^\infty \frac{1}{\kappa_\nu} \frac{\partial B_\nu(T)}{\partial T} d\nu}{\int_0^\infty \frac{\partial B_\nu(T)}{\partial T} d\nu}$
Abundância de hidrogênio $X \equiv \frac{m_\mathrm{H}}{m_\mathrm{tot}}$
Abundância de hélio $Y \equiv \frac{m_\mathrm{He}}{m_\mathrm{tot}}$
Abundância dos elementos com $Z > 2$ (metalicidade) $Z \equiv \frac{m_{Z>2}}{m_\mathrm{tot}}$
vale $X + Y + Z = 1$
Aproximações para opacidades médias:
$\bar\kappa_\mathrm{bf} = 4.34 \cdot 10^{21} \frac{g_\mathrm{bf}}{t} Z(1+X) \frac{\rho}{T^{3.5}}$ m^{2}kg^{-1}, $\bar\kappa_\mathrm{ff} = 3.68 \cdot 10^{18} g_\mathrm{ff}(1-Z)(1+X) \frac{\rho}{T^{3.5}}$ m^{2}kg^{-1},
onde g_bf, $g_\mathrm{ff} \approx 1$ = fatores de Gaunt, $1 < t < 100$ fator de guillotine
$\bar\kappa_\mathrm{es} = 0.02(1+X)$ m^{2}kg^{-1}
$\bar\kappa_{\mathrm{H}^-} \approx 7.9 \cdot 10^{-34} (Z/0.02) \rho^{1/2} T^9$ m^{2}kg^{-1} (3000 K ¡ T ¡ 7000 K)
$\bar\kappa = \overline{\kappa_\mathrm{bb} + \kappa_\mathrm{bf} + \kappa_\mathrm{ff} + \kappa_\mathrm{es} + \kappa_{\mathrm{H}^-}}$

Transporte Radiativo

Passeio aleatório (N espalhamentos): $d = \sqrt{N} \cdot \ell$, $N = (d/\ell)^2 = \tau_\lambda^2$
Ganho de intensidade I_λ percorrendo ds: $dI_\lambda = j_\lambda \rho ds$, onde j_λ é o coeficiente de emissão
Quando há absorção e emissão: $dI_\lambda = -\kappa_\lambda \rho I_\lambda ds + j_\lambda \rho ds$
Função de fonte: $S_\lambda \equiv \frac{j_\lambda}{\kappa_\lambda}$
Equação de transporte (radiativo): $-\frac{1}{\kappa_\lambda \rho} \frac{dI_\lambda}{ds} = I_\lambda - \frac{j_\lambda}{\kappa_\lambda} = I_\lambda - S_\lambda$
Em termos da profundidade ótica: $\frac{dI_\lambda}{d\tau_\lambda} = I_\lambda - S_\lambda$
Opacidade, densidade e função de fonte constantes: $I_\lambda(s) = I_{\lambda,0} \, e^{-\kappa_\lambda \rho s} + S_\lambda (1 - e^{-\kappa_\lambda \rho s})$
Equilíbrio termodinâmico: $I_\lambda = B_\lambda = S_\lambda$

Atmosfera Plana e Paralela

Profundidade ótica vertical: $\tau_{\lambda,\mathrm{v}}(z) = \int_z^0 \kappa_\lambda \rho \, dz$
Profundidade ótica no ângulo θ com a vertical: $\tau_\lambda = \frac{\tau_{\lambda,\mathrm{v}}}{\cos\theta}$
$\Rightarrow$ Equação de transporte: $\cos\theta \, \frac{dI_\lambda}{d\tau_{\lambda,\mathrm{v}}} = I_\lambda - S_\lambda$
"Atmosfera cinza": $I = \int_0^\infty I_\lambda \, d\lambda$, $S = \int_0^\infty S_\lambda \, d\lambda$
$\Rightarrow$ Equação de dransporte: $\cos\theta \frac{dI}{d\tau_\mathrm{v}} = I - S$
$\Rightarrow \frac{dF_\mathrm{rad}}{d\tau_\mathrm{v}} = 4\pi(\langle I \rangle - S)$,
$\frac{dP_\mathrm{rad}}{d\tau_\mathrm{v}} = \frac{1}{c} F_\mathrm{rad}$ e $\frac{dP_\mathrm{rad}}{dz} = -\frac{\bar{\kappa}\rho}{c} F_\mathrm{rad}$
$\Rightarrow P_\mathrm{rad} = \frac{1}{c} F_\mathrm{rad} \tau_\mathrm{v} + C$
Temperatura em função da profundidade ótica: $T^4 = \frac{3}{4} T_e^4 \left(\tau_\mathrm{v} + \frac{2}{3}\right)$

Perfis de Linhas Espectrais

Largura equivalente de uma linha espectral centrada em λ_0 e nível do contínuo F_C:
$W = \int \frac{F_\mathrm{C} - F_\lambda}{F_\mathrm{C}} d\lambda$
Largura a meia altura $(\Delta\lambda)_{1/2}$: Distância entre os dois pontos, onde $\frac{F_\mathrm{C} - F_\lambda}{F_\mathrm{C} - F_{\lambda_0}} = 1/2$
Alargamento natural ($\Delta t_0 =$ "tempo de espera" média da transição): $(\Delta\lambda)_{1/2} = \frac{\lambda^2}{\pi c} \frac{1}{\Delta t_0}$
Alargamento Doppler (temperatura T e turbulências com v_turb): $(\Delta\lambda)_{1/2} = \frac{2\lambda}{c} \sqrt{\left(\frac{2k_\mathrm{B}T}{m} + v_\mathrm{turb}^2\right) \ln 2}$
Alargamento por pressão e colisões ($\Delta t_0 \approx \frac{\ell}{v} = \frac{1}{n\sigma\sqrt{2k_\mathrm{B}T/m}}$): $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{c} \frac{1}{\pi \Delta t_0} \approx \frac{\lambda^2}{c} \frac{n\sigma}{\pi} \sqrt{\frac{2k_\mathrm{B}T}{m}}$

O Interior de Estrelas: Equações Fundamentais

Massa interna: $M_r = \int_0^r dM = \int_0^r \rho \, dV = \int_0^r \rho \, 4\pi r^2 \, dr$
Equação do movimento radial: $\rho \, \frac{d^2 r}{dt^2} = -G \frac{M_r \rho}{r^2} - \frac{dP}{dr}$
Equilíbrio hidrostático: $\frac{dP}{dr} = -G \cdot \frac{M_r \rho}{r^2} = -\rho g$, onde $\rho \equiv GM_r/r^2$
Equação da conservação da massa: $\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho$
Equação dos gases ideais: $pV = Nk_\mathrm{B}T$
em termos da pressão P_g e da massa molecular média, $\mu \equiv \frac{\bar{m}}{m_\mathrm{H}}$: $P_\mathrm{g} = \frac{\rho \, k_\mathrm{B} T}{\mu m_\mathrm{H}}$
Para um gás neutro: $\mu_\mathrm{n} = \frac{\Sigma_j N_j A_j}{\Sigma_j N_j}$
approximação: $\frac{1}{\mu_\mathrm{n}} \simeq X + \frac{1}{4} Y + \langle \frac{1}{A} \rangle_\mathrm{n} Z$, onde $\langle \frac{1}{A} \rangle_\mathrm{n} \sim \frac{1}{15.5}$
para composição "solar": $\mu_\mathrm{n} = 1.30$
Para um gás ionizado: $\mu_\mathrm{i} \simeq \frac{\Sigma_j N_j A_j}{\Sigma_j N_j (2 + z_j)}$
approximação: $\frac{1}{\mu_\mathrm{i}} \simeq 2X + \frac{3}{4} Y + \langle \frac{1+z}{A} \rangle_\mathrm{i} Z$, onde $\langle \frac{1+z}{A} \rangle_\mathrm{i} \simeq \frac{1}{2}$
para composição "solar": $\mu_\mathrm{i} = 0.62$
Pressão total: $P_\mathrm{tot} = P_\mathrm{g} + P_\mathrm{rad} = \frac{\rho \, k_\mathrm{B} T}{\mu m_\mathrm{H}} + \frac{1}{3} a T^4$

O Interior de Estrelas: Transporte de Energia

Densidade de produção de energia ε: $dL = \varepsilon dm$, onde $\varepsilon = \varepsilon_{\text{nuclear}} + \varepsilon_{\text{gravidade}}$
Equação do gradiente de luminosidade: $\frac{dL}{dr} = 4\pi r^2 \rho\varepsilon$
Luminosidade gerada dentro de uma esfera de raio r: $L_r = \int_0^r dL = \int_0^r 4\pi r^2 \rho\varepsilon \, dr$
Fluxo radiativo no raio r: $F_{\text{rad}} = \frac{L_r}{4\pi r^2}$
Gradiente de temperatura para transporte radiativo: $\frac{dT}{dr} = -\frac{3}{4ac} \cdot \frac{\bar{\kappa}\rho}{T^3} \cdot \frac{L_r}{4\pi r^2}$
Altura de escala de pressão H_P: $\frac{1}{H_P} = -\frac{1}{P}\frac{dP}{dr}$
Se $H_P = \text{const.}$: $P = P_0 \, e^{-r/H_P}$, $H_P = \frac{P}{\rho g}$
Primeira lei da termodinâmica: $dU = dQ - dW$, onde $U = \frac{\bar{K}}{\bar{m}}$
Para um gás ideal: $\bar{K} = \frac{3k_{\text{B}}T}{2} \Rightarrow U = \frac{3}{2}\left(\frac{k_{\text{B}}}{\mu m_{\text{H}}}\right) T = \frac{3}{2} nRT$
Calores específicos: $C_P \equiv \left.\frac{\partial Q}{\partial T}\right|_P$, $C_V \equiv \left.\frac{\partial Q}{\partial T}\right|_V$, $\gamma \equiv \frac{C_P}{C_V}$
Para um gás monoatômico: $C_V = \frac{3}{2} nR$, $C_P = C_V + nR = \frac{5}{2} nR$, $\gamma = \frac{5}{3}$
Lei de gases adiabáticos ($dQ = 0$): $PV^\gamma = K$, $P = K' T^{\gamma/(\gamma-1)}$, $K, \; K' = \text{const.}$
Velocidade do som adiabática: $v_{\text{s}} = \sqrt{\gamma P/\rho}$
Gradiente de T para transporte convectivo: $\left.\frac{dT}{dr}\right|_{\text{ad}} = -\left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \cdot \frac{\mu m_{\text{H}}}{k_{\text{B}}} \cdot \frac{GM_r}{r^2} = -\frac{g}{C_P}$
Condição para convecção: $\left|\frac{dT}{dr}\right|_{\text{act}} > \left|\frac{dT}{dr}\right|_{\text{ad}}$ ou $\frac{T}{P}\frac{dP}{dT} < \frac{\gamma}{\gamma - 1}$ ou $\frac{d\ln P}{d\ln T} < \frac{\gamma}{\gamma - 1}$

O Interior de Estrelas: Fusão Nuclear

Equivalência massa-energia: $E = mc^2$
Massa reduzida: $\mu_{\text{m}} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$
Temperatura necessária para dois núclei poderem se aproximar até r: $T = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{6\pi\varepsilon_0 k_{\text{B}} r}$
e até um comprimento de onda de de Broglie: $T = \frac{Z_1^2 Z_2^2 e^4 \mu_{\text{m}}}{26\pi^2 \varepsilon_0^2 h^2 k_{\text{B}}}$
Seção de choque para fusão nuclear entre 2 partículas (energia relativa E):
$\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} e^{-bE^{-1/2}}$, onde $b \equiv \frac{\pi \mu_{\text{m}}^{1/2} Z_1 Z_2 e^2}{2^{1/2} \varepsilon_0 h}$
Potencial efetivo entre dois núcleos no interior da estrela:
$U_{\text{eff}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} + U_{\text{s}}(r)$, onde $U_{\text{s}}(r)$ é devido à blindagem de elétrons
Taxa de reações como potências: $r_{\text{ix}} \simeq r_0 X_{\text{i}} X_{\text{x}} \rho^{\alpha'} T^\beta$, $\alpha' = 2$
Densidade de potência como potências: $\varepsilon_{\text{ix}} = \left(\frac{\varepsilon_0}{\rho}\right) r_{\text{ix}} = \varepsilon_0' X_{\text{i}} X_{\text{x}} \rho^\alpha T^\beta$, $\alpha = \alpha' - 1$
Fusão hidrogênio $\rightarrow$ hélio: $4p^+ \rightarrow \, {}^4_2\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + 2\gamma$
Cadeia p-p: a partir de $\sim 10^7$ K, $\varepsilon_{\text{p-p}} \propto T^4$
Ciclo CNO: a partir de $\sim 1.5 \cdot 10^7$ K, $\varepsilon_{\text{CNO}} \propto T^{19.9}$
Processo triplo-α: ${}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} \rightleftharpoons {}^8_4\text{Be}$, $\quad {}^8_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + \gamma$,
a partir de $\sim 10^8$ K, $\varepsilon_{\text{triplo}-\alpha} \propto T^{41}$
Fusão de carbono: ${}^{12}_6\text{C} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{16}_8\text{O} + \gamma$, a partir de $\sim 6 \cdot 10^8$ K
e de oxigênio: ${}^{16}_8\text{O} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{20}_{10}\text{Ne} + \gamma$, a partir de $\sim 1.5 \cdot 10^9$ K
de neônio: ${}^{20}_{10}\text{Ne} + {}^{20}_{10}\text{Ne} \rightarrow {}^{24}_{12}\text{Mg} + {}^{16}_8\text{O}$, a partir de $\sim 1.5 \cdot 10^9$ K
e de silício: ${}^{28}_{14}\text{Si} + {}^{28}_{14}\text{Si} \rightarrow {}^{56}_{28}\text{Fe}$, a partir de $\sim 2.7 \cdot 10^9$ K
Energia de ligação por núcleon: $E_{\text{b}} = \Delta mc^2 = [Zm_{\text{p}} + (A - Z)m_{\text{n}} - m_{\text{nucleo}}]c^2$

O Sol

Perda de massa (vento solar): $\frac{dM}{dt} = 4\pi^2 \rho\, v$
Densidade de energia de um campo magnético: $u_{\rm m} = \frac{B^2}{2\mu_0}$
Pressão magnética de um campo: $P_{\rm m} = u_{\rm m} = \frac{B^2}{2\mu_0}$

Formação e Evolução Estelar

Energia cinética interna de uma nuvem: $K = \frac{3}{2} N k_{\rm B} T$, onde $N = \frac{M}{\mu_e m_H}$
Condição para colapso (massa M, raio R): $\frac{3Mk_{\rm B}T}{\mu_e m_H} < \frac{3}{5}\frac{GM^2}{R}$
Massa de Jeans: $M_{\rm J} \simeq \left(\frac{5k_{\rm B}T}{G\mu m_{\rm H}}\right)^{3/2}\left(\frac{3}{4\pi\rho_0}\right)^{1/2}$
Raio de Jeans: $R_{\rm J} \simeq \sqrt{\frac{15k_{\rm B}T}{4\pi G\mu m_{\rm H}\rho_0}}$
Massa de Bonnor-Ebert: $M_{\rm BE} = \frac{c_{\rm BE} v_T^4}{P_0^{1/2} G^{3/2}}$, $v_T \equiv \sqrt{k_{\rm B}T/\mu m_{\rm H}}$, $c_{\rm BE} = 1.18$ ($c_{\rm J} \approx 5.46$)
Massa limite na presença de um campo magnético: $M_B = c_B \pi R^2 B/G^{1/2} \simeq 70 M_\odot \left(\frac{B}{1\ \rm nT}\right)\left(\frac{R}{1\ \rm pc}\right)^2$
Tempo de queda livre: $t_{\rm ff} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho_0}}$
Colapso adiabático: $M_{\rm J} \propto \rho^{(3\gamma-4)/2}$ (para $\rm H_2$, $\gamma = \frac{5}{3}$)
Luminosidade, raio, temperatura e tempo de vida na sequência principal:
$L \propto M^{3.3}$, $R \propto M^{0.78}$, $T \propto M^{0.435}$, $\tau \propto M^{-2.3}$
Massa de Schönberg-Chandrasekhar: $\left(\frac{M_{\rm ic}}{M}\right)_{\rm SC} = 0.37\left(\frac{\mu_{\rm env}}{\mu_{\rm ic}}\right)^2$
Raio de Strömgren $r_{\rm S} \approx \frac{3N}{4\pi\alpha} n_{\rm H}^{-2/3}$
Fotodesintegração: $\rm Fe + \gamma \to 13He + 4\mathit{n}$, $\quad \rm He + \gamma \to 2\mathit{p}^+ + 2\mathit{n}$
Captura eletrônica: $p^+ + e^- \to n + \nu_e$