Cap. 10. Interiores Estelares.
Fontes de energia.
Transporte de energia: radiação

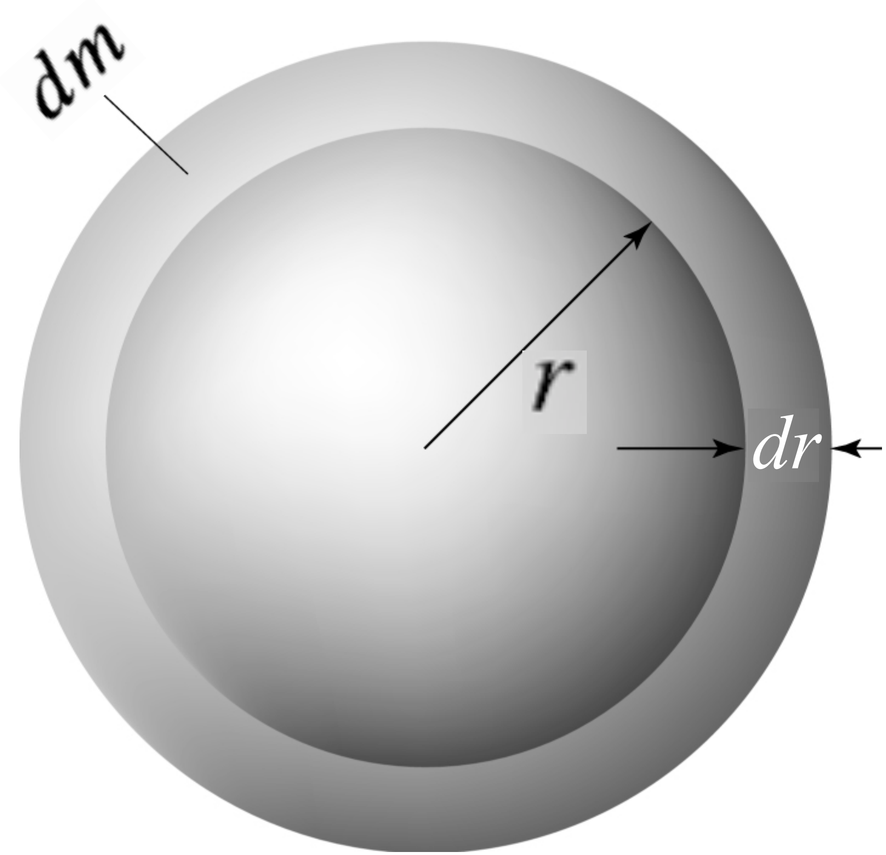
AGA 0293, Astrofísica Estelar

Jorge Meléndez

10.3 Fontes de energia estelar

Energia potencial gravitacional: $\boxed{U = -G\frac{Mm}{r}}$

$$dm = 4\pi r^2 \rho \, dr$$



$$dU_{g,i} = -G\frac{M_r \, dm_i}{r}$$

$$dU_g = -G\frac{M_r 4\pi r^2 \rho}{r} dr$$

$$U_g = -4\pi G \int_0^R M_r \rho r \, dr$$

R: raio da estrela

$$U_g = -4\pi G \int_0^R M_r \rho r \, dr$$

Para integrar precisamos conhecer M_r ou ρ_r

Em 1a aproximação, considerar uma densidade média:

$$\rho \sim \overline{\rho} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} \rightarrow M_r \sim \frac{4}{3}\pi r^3 \overline{\rho}$$

$$U_g = -4\pi G \int_0^R \frac{4}{3}\pi r^3 \overline{\rho} \, \overline{\rho} \, r \, dr = -\frac{16\pi^2}{3} G \overline{\rho}^2 \int_0^R r^4 dr$$

$$\Rightarrow U_g \sim -\frac{16\pi^2}{15} G \overline{\rho}^2 R^5 \sim -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}$$

$$U_g = -4\pi G \int_0^R M_r \rho r \, dr$$

Considerando uma densidade média:

$$\rho \sim \overline{\rho} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$

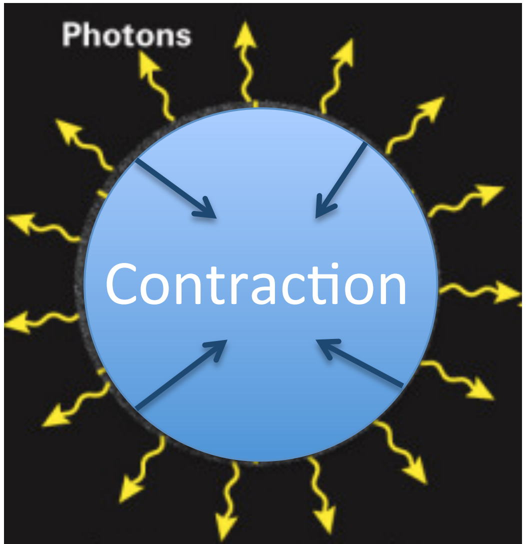
$$\Rightarrow \quad U_g \sim -\frac{16\pi^2}{15} G \overline{\rho}^2 R^5 \sim -\frac{3}{5}\frac{GM^2}{R}$$

$$-2\langle K \rangle = \langle U \rangle$$

$$\langle E \rangle = \langle K \rangle + \langle U \rangle$$

Cap. 2, teorema do virial (E = ½ U)

$$\boxed{\langle E \rangle = \frac{1}{2}\langle U \rangle}$$



→ energia disponível para irradiar pela contração da estrela:

$$\boxed{E \sim -\frac{3}{10}\frac{GM^2}{R}}$$

Exemplo 10.3.1. Se o Sol foi inicialmente muito maior do que ele é hoje, quanta energia teria liberado seu colapso?

$$E \sim -\frac{3}{10}\frac{GM^2}{R}$$

Assumindo $R_i >> R_{sol}$:

$$\Delta E_g = -\left(E_f - E_i\right) \simeq -E_f \simeq \frac{3}{10}\frac{GM_\odot^2}{R_\odot} \simeq 1.1 \times 10^{41}\ \mathrm{J}.$$

Supondo luminosidade aprox. constante para o Sol:

$$t_{\mathrm{KH}} = \frac{\Delta E_g}{L_\odot} \sim 10^7 \text{ anos}$$

t_{KH} é a escala de tempo Kelvin-Helmholtz

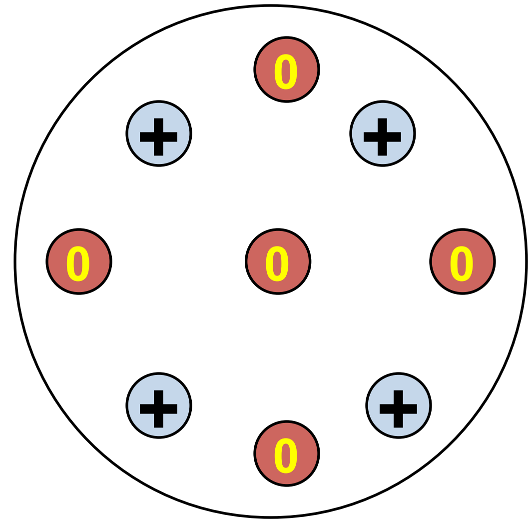
t_{KH} << idade do Sistema Solar (4,6 x 10^9 anos)

Representação do elemento químico X

A = Número de núcleons = Z + Nêutrons

Isótopo de um elemento químico:
mesmo número de prótons (**Z**) mas diferente número de nêutrons
→ diferente **A**.
Exemplo: urânio (Z = 92) tem como isótopos
mais abundantes o urânio-238 ${}^{238}_{92}U$ e urânio-235 ${}^{235}_{92}U$

$${}^{A}_{Z}\mathbf{X}$$

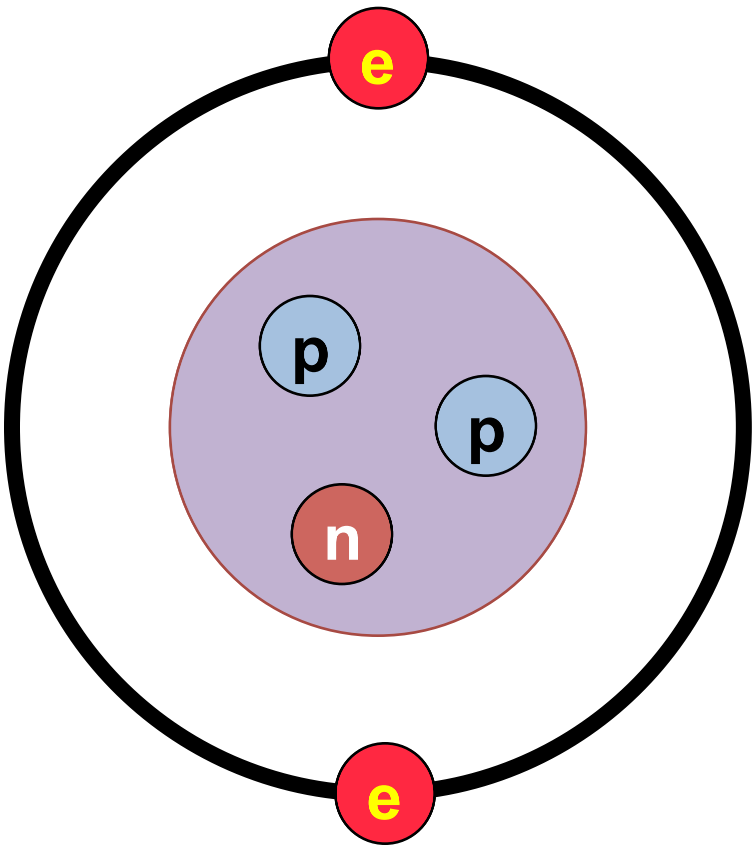


Z : Número de Prótons
A: Número de massa

Isótopos estáveis do hélio

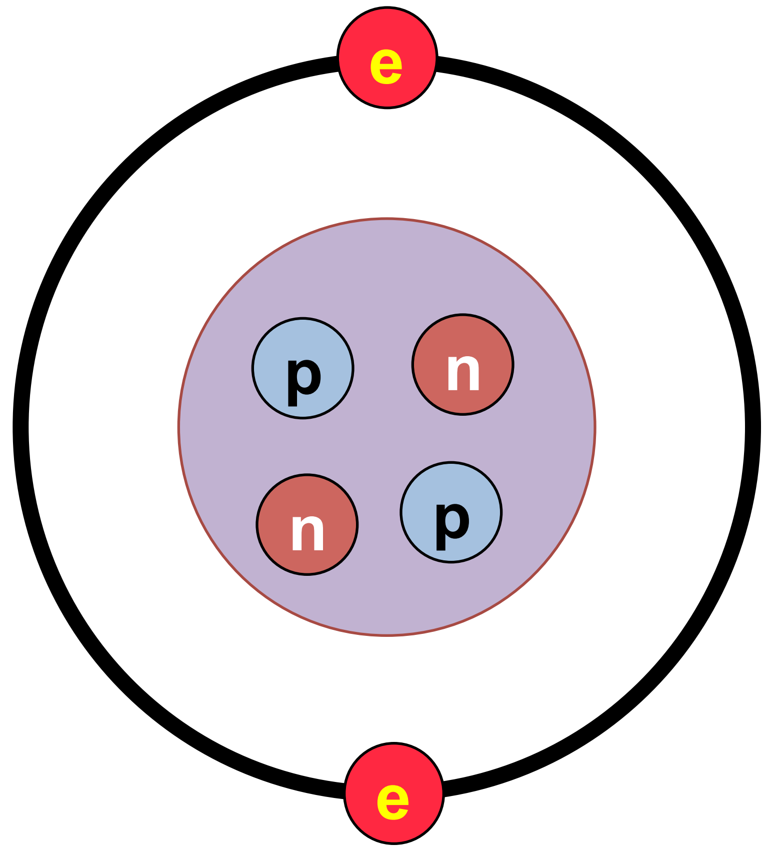
$^{3}_{2}\mathrm{He}$ 0.0002%

Hélio 3 (tralphium)



$^{4}_{2}\mathrm{He}$ 99.9998%

Hélio 4 (núcleo=partícula α)



Massa atômica

$$m_p = 1.67262158 \times 10^{-27}\ \text{kg} = 1.00727646688\ \text{u}$$

$$m_n = 1.67492716 \times 10^{-27}\ \text{kg} = 1.00866491578\ \text{u}$$

$$m_e = 9.10938188 \times 10^{-31}\ \text{kg} = 0.0005485799110\ \text{u}$$

u: unidade de massa atômica (1/12 massa do carbono-12)

$$1\ \text{u} = 1.66053873 \times 10^{-27}\ \text{kg}$$

$E = mc^2$ → 1 u = 931,494013 MeV / c^2

São usadas massas em repouso. Às vezes o c^2 é implícito

Massa do átomo de hidrogênio m_H

$$m_p = 1.67262158 \times 10^{-27}\ \text{kg} = 1.00727646688\ \text{u}$$
$$m_e = 9.10938188 \times 10^{-31}\ \text{kg} = 0.0005485799110\ \text{u}.$$

$$m_H = 1.00782503214\ \text{u}$$

A massa do átomo de hidrogênio é ligeiramente menor à soma das massas m_p e m_e!

A diferença é 13,6 eV, a energia de ionização!

Fusão nuclear

4H → He

Massa de 4H: 4,03130013 u

Massa de He: 4,02603 u

Δm: 0,028697 u (0,7%)

$$E_b = \Delta mc^2 = 26.731\ \mathrm{MeV}.$$

b: binding

Exemplo 10.3.1. É a energia nuclear suficiente para manter o Sol brilhando durante seu tempo de vida?

Por simplicidade, supor que o Sol é 100% hidrogênio e que somente o 10% da massa mais interna do Sol é quente o suficiente para a fusão nuclear

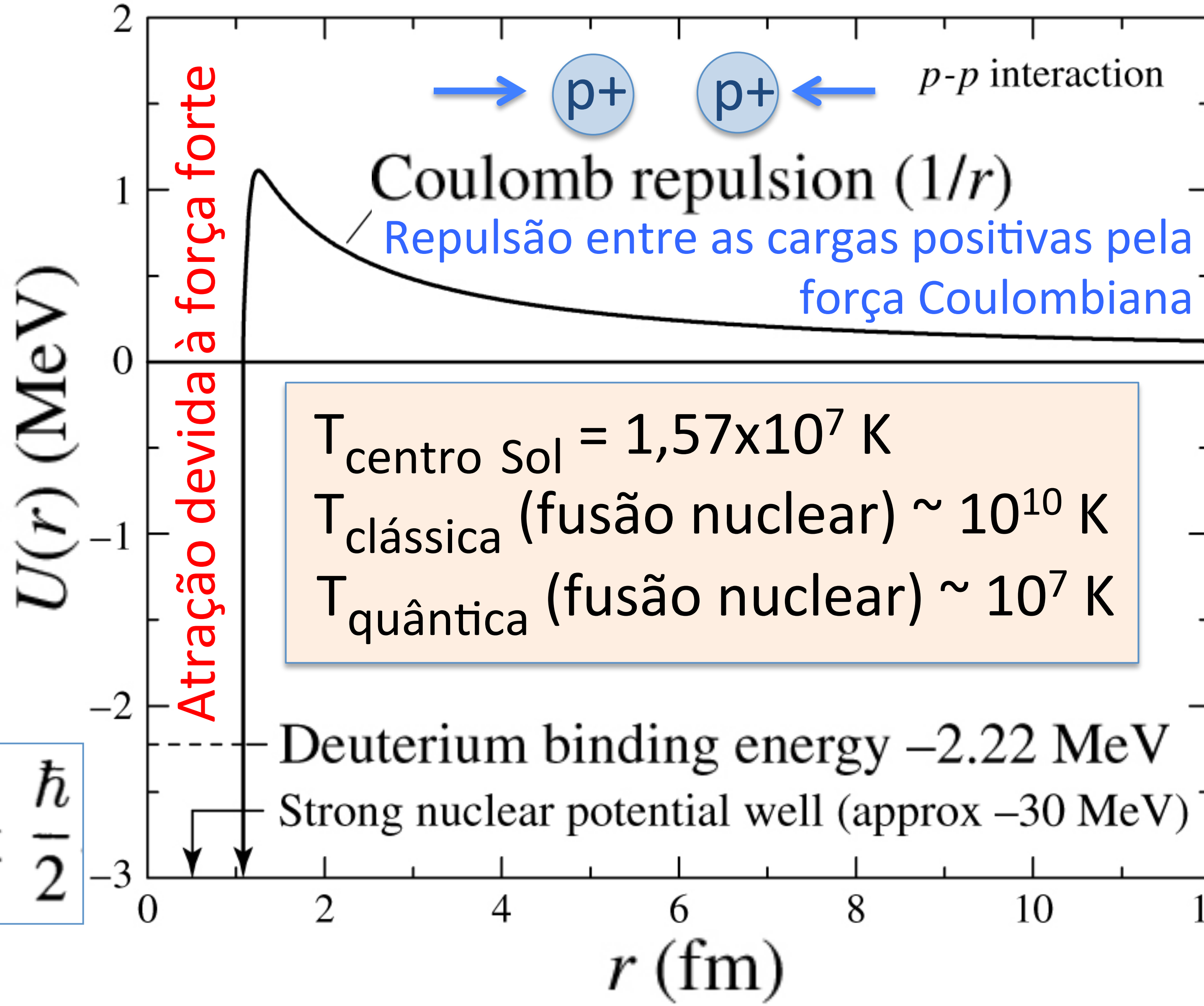
$$E_{\text{nuclear}} = 0.1 \times 0.007 \times M_{\odot}c^2 = 1.3 \times 10^{44} \text{ J}$$

Δm = 0,7%

Escala de Tempo Nuclear: $t_{\text{nuclear}} = \dfrac{E_{\text{nuclear}}}{L_{\odot}}$

~ 10^{10} anos

Tunelamento quântico (efeito túnel)



$T_{\text{centro Sol}} = 1{,}57\text{x}10^7$ K

$T_{\text{clássica}}$ (fusão nuclear) ~ 10^{10} K

$T_{\text{quântica}}$ (fusão nuclear) ~ 10^7 K

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

1fm = 10^{-15}m

Estimando a temperatura T necessária para vencer a barreira de potencial:

μ_m: massa reduzida

$$\boxed{\frac{1}{2}\mu_m \overline{v^2} = \frac{3}{2}kT_{\text{classical}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Z_1 Z_2 e^2}{r}}$$

$$\boxed{T_{\text{classical}} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{6\pi\epsilon_0 k r}}$$

Z_1=Z_2= 1;
raio núcleo ~ 1fm = 10^{-15}m

$T_{\text{clássica}} \sim 10^{10}$ K

$T_{\text{clássica}}$ é muito maior que a temperatura central do Sol !

Uma estimativa grosseira de T para o efeito túnel

Rescrevendo a energia cinética em função do momento:

$$\frac{1}{2}\mu_m v^2 = \frac{p^2}{2\mu_m}$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Z_1 Z_2 e^2}{\lambda} = \frac{p^2}{2\mu_m} = \frac{(h/\lambda)^2}{2\mu_m}$$

$$\Delta x \, \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

Supor que p+ deve estar dentro de λ_{Broglie}

E = pc = hc/λ
→ λ = h/p

Resolver λ e usar em:

$$T_{\text{classical}} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{6\pi\epsilon_0 k r}$$

$$T_{\text{quantum}} = \frac{Z_1^2 Z_2^2 e^4 \mu_m}{12\pi^2\epsilon_0^2 h^2 k}$$

~ 10^7 K

$\mu_m = m_p/2$ and $Z_1 = Z_2 = 1$

Número de reações nucleares (por unidade de volume e tempo):

$$r_{ix} = \left(\frac{2}{kT}\right)^{3/2} \frac{n_i n_x}{(\mu_m \pi)^{1/2}} \int_0^\infty S(E)\, \underbrace{e^{-bE^{-1/2}}}_{\text{Probabilidade de penetração de barreira}}\, \underbrace{e^{-E/kT}}_{\text{Cauda de Maxwell-Boltzmann}}\, dE$$

$$b \equiv \frac{\pi \mu_m^{1/2} Z_1 Z_2 e^2}{2^{1/2} \epsilon_0 h}$$

Probabilidade de penetração de barreira

Cauda de Maxwell-Boltzmann

i: partícula incidente

x: partícula alvo

S(E): função de E

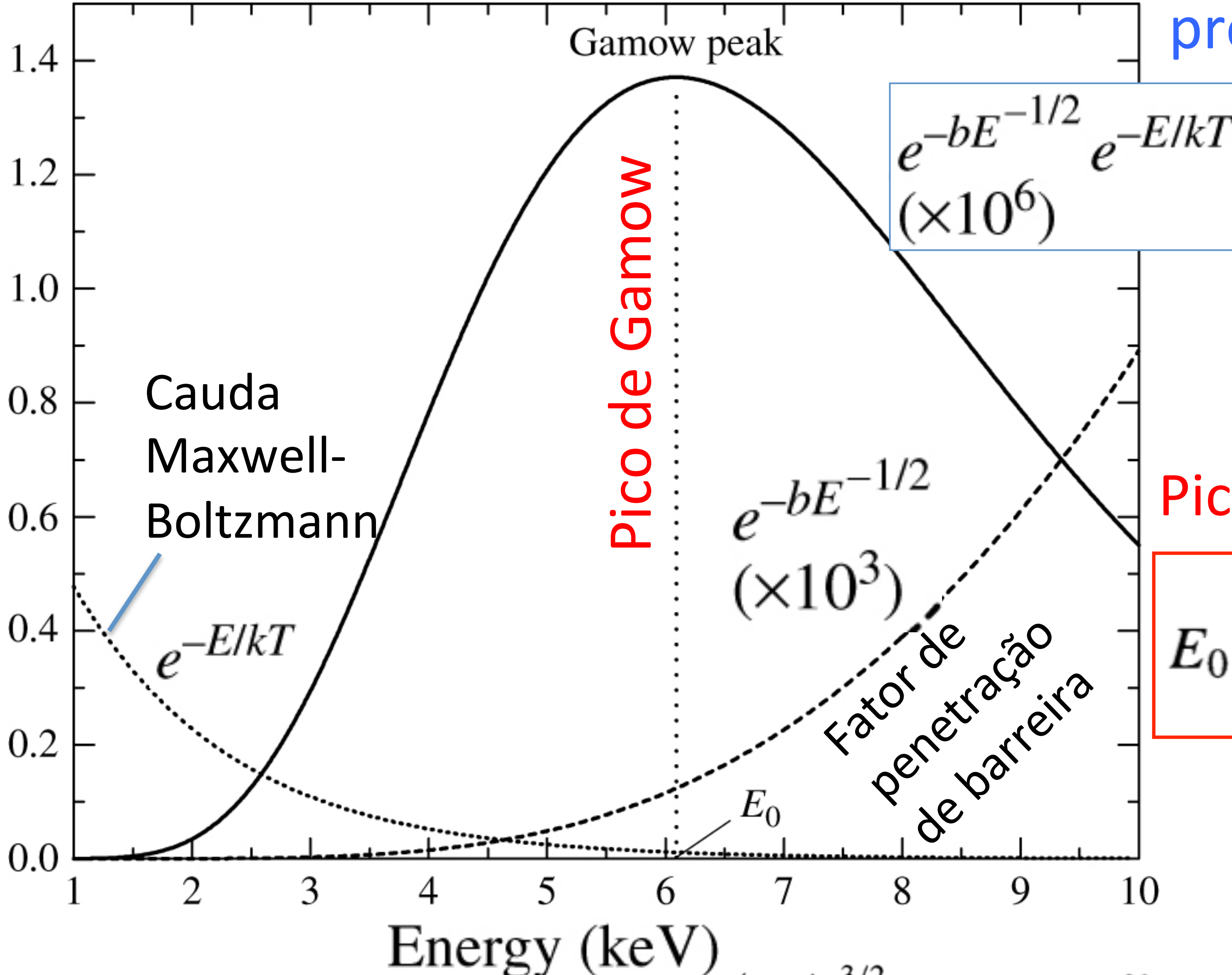
$$S(E) \simeq S(E_0) = \text{constant}$$

Essa função produz o chamado Pico de Gamow:

$$\boxed{E_0 = \left(\frac{bkT}{2}\right)^{2/3}}$$

$$\boxed{K = E = \mu_m v^2/2}$$

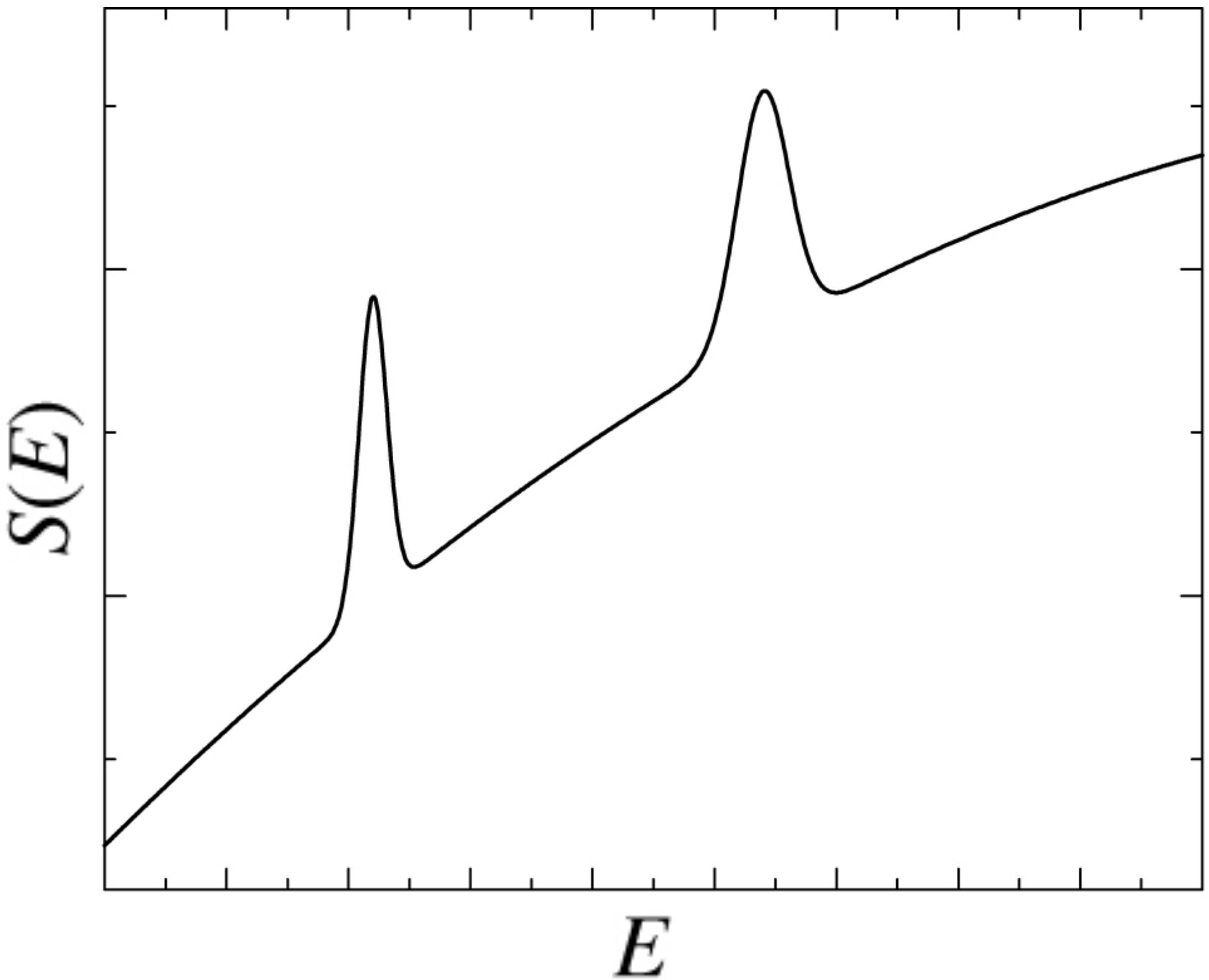
Probabilidade de reação nuclear pela colisão de 2 prótons no Sol



Pico de Gamow:

$$E_0 = \left(\frac{bkT}{2}\right)^{2/3}$$

$$r_{ix} = \left(\frac{2}{kT}\right)^{3/2} \frac{n_i n_x}{(\mu_m \pi)^{1/2}} \int_0^\infty S(E)\, e^{-bE^{-1/2}} e^{-E/kT}\, dE$$



Ressonância

Níveis de energia dentro do núcleo
→ ressonâncias
→ maior chance de reação nuclear

FIGURE 10.7 A hypothetical example of the effect of resonance on $S(E)$.

$$r_{ix} = \left(\frac{2}{kT}\right)^{3/2} \frac{n_i n_x}{(\mu_m \pi)^{1/2}} \int_0^\infty S(E)\, e^{-bE^{-1/2}} e^{-E/kT}\, dE$$

Blindagem eletrônica

(electron screening)

$$U_{\text{eff}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} + U_s(r)$$

$$U_s(r) < 0$$

Nuvem de e- devido à ionização
→ reduz a barreira Coulombiana

Pode aumentar as reações que produzem He por 10% - 50%

Representando as taxas de reações nucleares usando leis de potência

Sem blindagem eletrônica:

$$\boxed{r_{ix} \simeq r_0 X_i X_x \rho^{\alpha'} T^{\beta}}$$

r_0: constante;
X_i, X_x: frações de massa das partículas;
$\alpha' \sim 2$; $\beta \sim 1 - 40$

Se conhecemos a **energia liberada por reação** $\mathcal{E}_0$
→ a energia liberada por segundo em cada quilograma:

$$\boxed{\epsilon_{ix} = \left(\frac{\mathcal{E}_0}{\rho}\right) r_{ix}} \rightarrow \boxed{\epsilon_{ix} = \epsilon_0' X_i X_x \rho^{\alpha} T^{\beta}}$$

Onde: $\alpha = \alpha' - 1$

ϵ_{ix} : unidades de W kg^{-1}

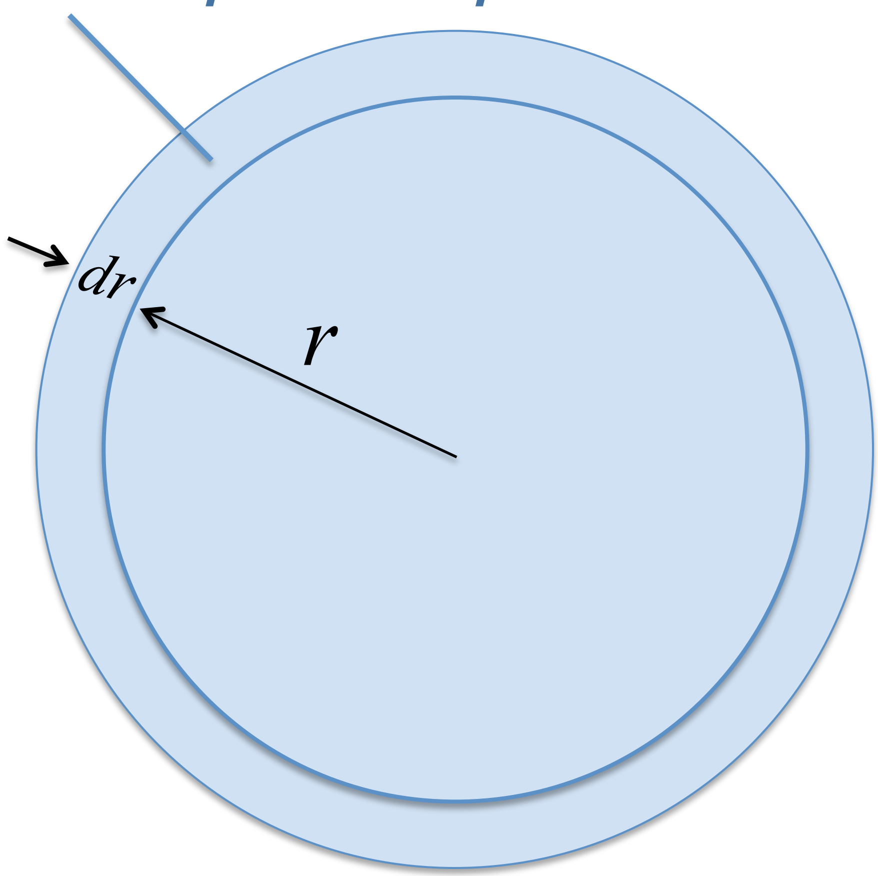
r_{ix}: número total de reações por unidade de volume e tempo

A equação do gradiente de luminosidade

ϵ : energia total liberada por todas as reações nucleares por quilograma (W kg^{-1})

→ uma massa dm contribui para a luminosidade em:

$$dm = \rho\, dV = \rho\, 4\pi\, r^2 dr$$



$$dL = \epsilon\, dm$$

$$\frac{dL_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \epsilon$$

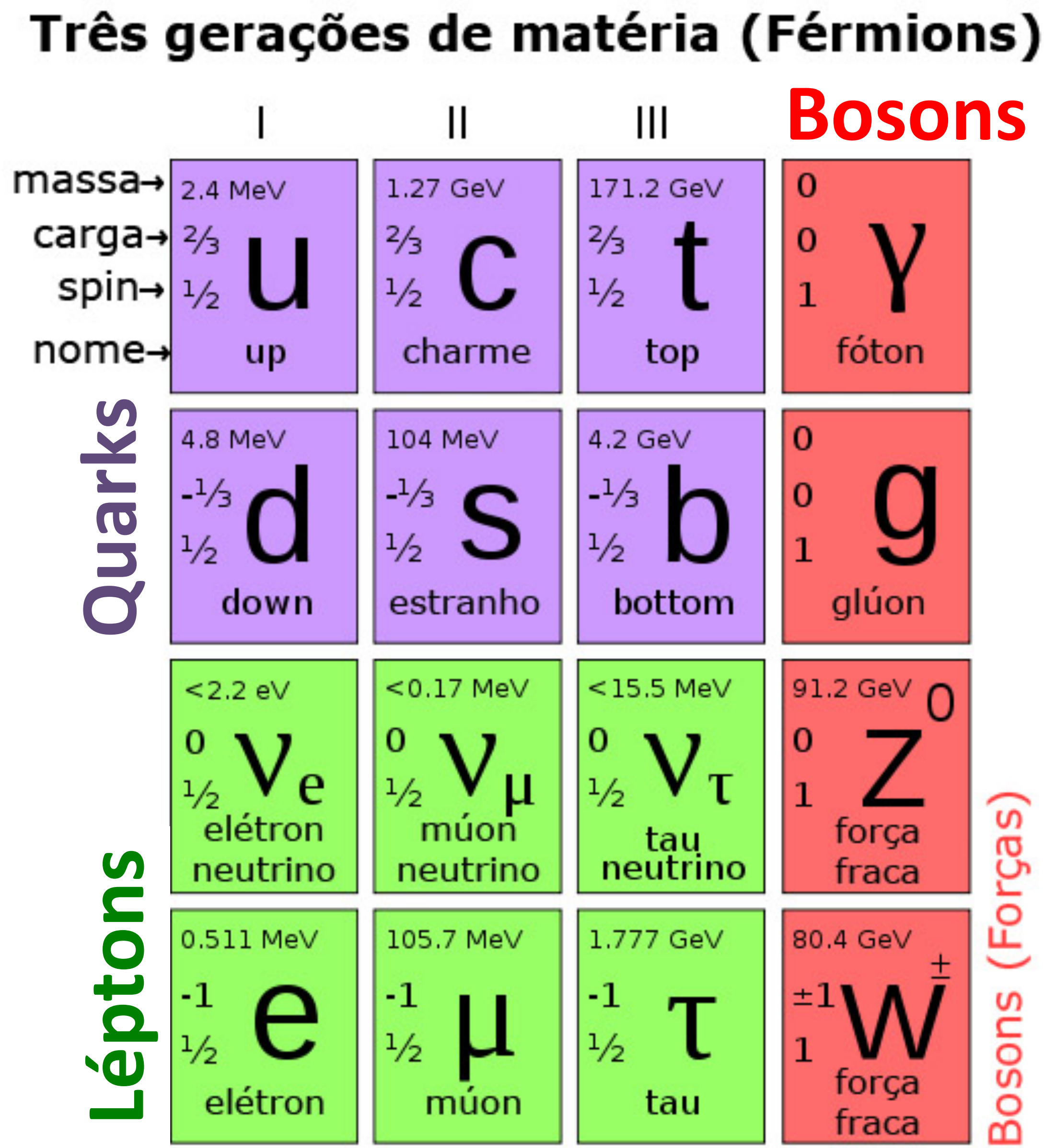
L_r : luminosidade interior a r

Nucleossíntese estelar e Leis de conservação

Reações nucleares não acontecem arbitrariamente.

Conservação:

- Carga
- Número de núcleons (p + n)
- Número de léptons (e, ν_e , e antipartículas)



Antimatéria

- Mistura da matéria e antimatéria → aniquilamento.
- Colisão de uma partícula e antipartícula → energia

Por exemplo, colisão de elétron e antielétron (pósitron) resulta em fótons de alta energia (radiação gama γ):

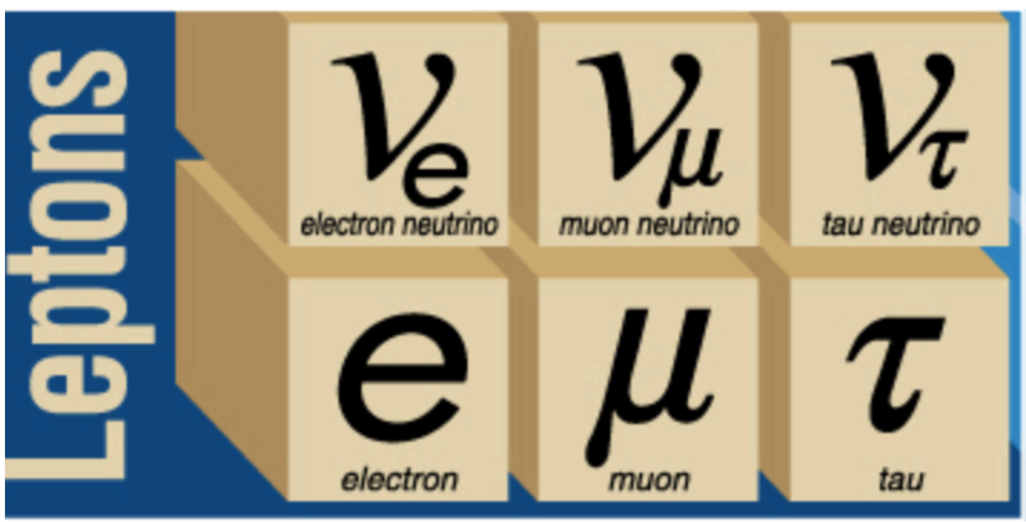
$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$$

São necessários 2 fótons para a conservação da quantidade de movimento (*momento*)

Neutrinos ν

ν quase não interatua com a matéria $\sigma_\nu \sim 10^{-48}\ \mathrm{m}^2$

a *neutrino's mean* free path is on the order of 10^{18} m $\sim$ 10 pc, or nearly $10^9\ R_\odot$!



$^{A}_{Z}X$ A: Número de massa (p + n)

Z : Número de p (carga positiva)

Cadeia próton-próton, PP-I

Força fraca

$$p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

$$^1_1H + ^1_1H \rightarrow ^2_1H + e^+ + \nu_e$$

$$^2_1H + ^1_1H \rightarrow ^3_2He + \gamma$$

$$^3_2He + ^3_2He \rightarrow ^4_2He + 2\,^1_1H.$$ 69%

Em resumo: $4\,^1_1H \rightarrow ^4_2He + 2e^+ + 2\nu_e + 2\gamma$

Cadeia próton-próton, PP-II

$$ {}^1_1\mathrm{H} + {}^1_1\mathrm{H} \rightarrow {}^2_1\mathrm{H} + e^+ + \nu_e $$

$$ {}^2_1\mathrm{H} + {}^1_1\mathrm{H} \rightarrow {}^3_2\mathrm{He} + \gamma $$

$$ \boxed{\begin{aligned} {}^3_2\mathrm{He} + {}^4_2\mathrm{He} &\rightarrow {}^7_4\mathrm{Be} + \gamma \\ {}^7_4\mathrm{Be} + e^- &\rightarrow {}^7_3\mathrm{Li} + \nu_e \\ {}^7_3\mathrm{Li} + {}^1_1\mathrm{H} &\rightarrow 2\,{}^4_2\mathrm{He}. \end{aligned}} $$

31%

PP-III

$$ \boxed{\begin{aligned} {}^7_4\mathrm{Be} + {}^1_1\mathrm{H} &\rightarrow {}^8_5\mathrm{B} + \gamma \\ {}^8_5\mathrm{B} &\rightarrow {}^8_4\mathrm{Be} + e^+ + \nu_e \\ {}^8_4\mathrm{Be} &\rightarrow 2\,{}^4_2\mathrm{He}. \end{aligned}} $$

0,3%

$$^{1}_{1}H + ^{1}_{1}H \longrightarrow ^{2}_{1}H + e^{+} + \nu_e$$

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

69% **31%**

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

PP-I

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

99,7% **0,3%**

$$^{7}_{4}Be + e^{-} \longrightarrow ^{7}_{3}Li + \nu_e$$

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

PP-II

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

$$^{8}_{5}B \longrightarrow ^{8}_{4}Be + e^{+} + \nu_e$$

$$^{8}_{4}Be \longrightarrow 2\,^{4}_{2}He$$

PP-III

Produção de energia por toda a cadeia PP

$$\epsilon_{pp} = 0.241 \rho X^2 f_{pp} \psi_{pp} C_{pp} T_6^{-2/3} e^{-33.80 T_6^{-1/3}} \text{ W kg}^{-1}$$

Termos de correção ~ 1 $T_6 = T/10^6 K$

Escrevendo como lei de potência para T = 1,5x10^7 K:

$$\boxed{\epsilon_{pp} \simeq \epsilon'_{0,pp} \rho X^2 f_{pp} \psi_{pp} C_{pp} T_6^4}$$

Onde: $\epsilon'_{0,pp} = 1.08 \times 10^{-12} \text{ W m}^3 \text{ kg}^{-2}$

O Ciclo CNO

$$^{12}_{6}C + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{13}_{7}N + \gamma$$
$$^{13}_{7}N \rightarrow ^{13}_{6}C + e^+ + \nu_e$$
$$^{13}_{6}C + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{14}_{7}N + \gamma$$
$$^{14}_{7}N + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{15}_{8}O + \gamma$$
$$^{15}_{8}O \rightarrow ^{15}_{7}N + e^+ + \nu_e$$
$$^{15}_{7}N + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{4}_{2}He.$$

99,96%

0,04%

$$^{15}_{7}N + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{16}_{8}O + \gamma$$
$$^{16}_{8}O + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{17}_{9}F + \gamma$$
$$^{17}_{9}F \rightarrow ^{17}_{8}O + e^+ + \nu_e$$
$$^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He.$$

Produção de energia pelo ciclo CNO

$$\epsilon_{\rm CNO} = 8.67 \times 10^{20} \rho X X_{\rm CNO} C_{\rm CNO} T_6^{-2/3} e^{-152.28 T_6^{-1/3}} \ {\rm W\ kg^{-1}}$$

Fração de massa total CNO

Termo de correção

$T_6 = T/10^6 K$

Escrevendo como lei de potência para $T = 1{,}5 \times 10^7$ K:

$$\epsilon_{\rm CNO} \simeq \epsilon'_{0,\rm CNO} \rho X X_{\rm CNO} T_6^{19.9}$$

Onde: $\epsilon'_{0,\rm CNO} = 8.24 \times 10^{-31}\ {\rm W\ m^3\ kg^{-2}}$

Dependência muito maior com a temperatura

Conversão de H em He, então o peso molecular médio μ aumenta

$$P_g = \frac{\rho k T}{\mu m_H}$$

$$\mu \equiv \frac{\overline{m}}{m_H}$$

μ: peso molecular médio
m_H: massa H

$$m_H = 1.673532499 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Pressão diminui → contração da estrela

→ aumento da T;
poderia atingir T para queima do hélio

Processo triplo alfa

$$^4_2\mathrm{He} + ^4_2\mathrm{He} \rightleftharpoons ^8_4\mathrm{Be}$$

$$^8_4\mathrm{Be} + ^4_2\mathrm{He} \rightarrow ^{12}_6\mathrm{C} + \gamma$$

$$\epsilon_{3\alpha} = 50.9\rho^2 Y^3 T_8^{-3} f_{3\alpha} e^{-44.027 T_8^{-1}} \ \mathrm{W\,kg^{-1}}$$

$T_8 = T/10^8 K$

Termo de blindagem

Escrevendo como lei de potência para T ~ 10^8 K:

$$\epsilon_{3\alpha} \simeq \epsilon'_{0,3\alpha} \rho^2 Y^3 f_{3\alpha} T_8^{41}$$

Ultra sensível à temperatura: 10% aumento em T → 50 vezes na produção de energia

Queima de C e O

$T \sim 10^8$ K

$$^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{16}_{8}\mathrm{O} + \gamma$$

$$^{16}_{8}\mathrm{O} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{20}_{10}\mathrm{Ne} + \gamma$$

$T \sim 6 \mathrm{x} 10^8$K

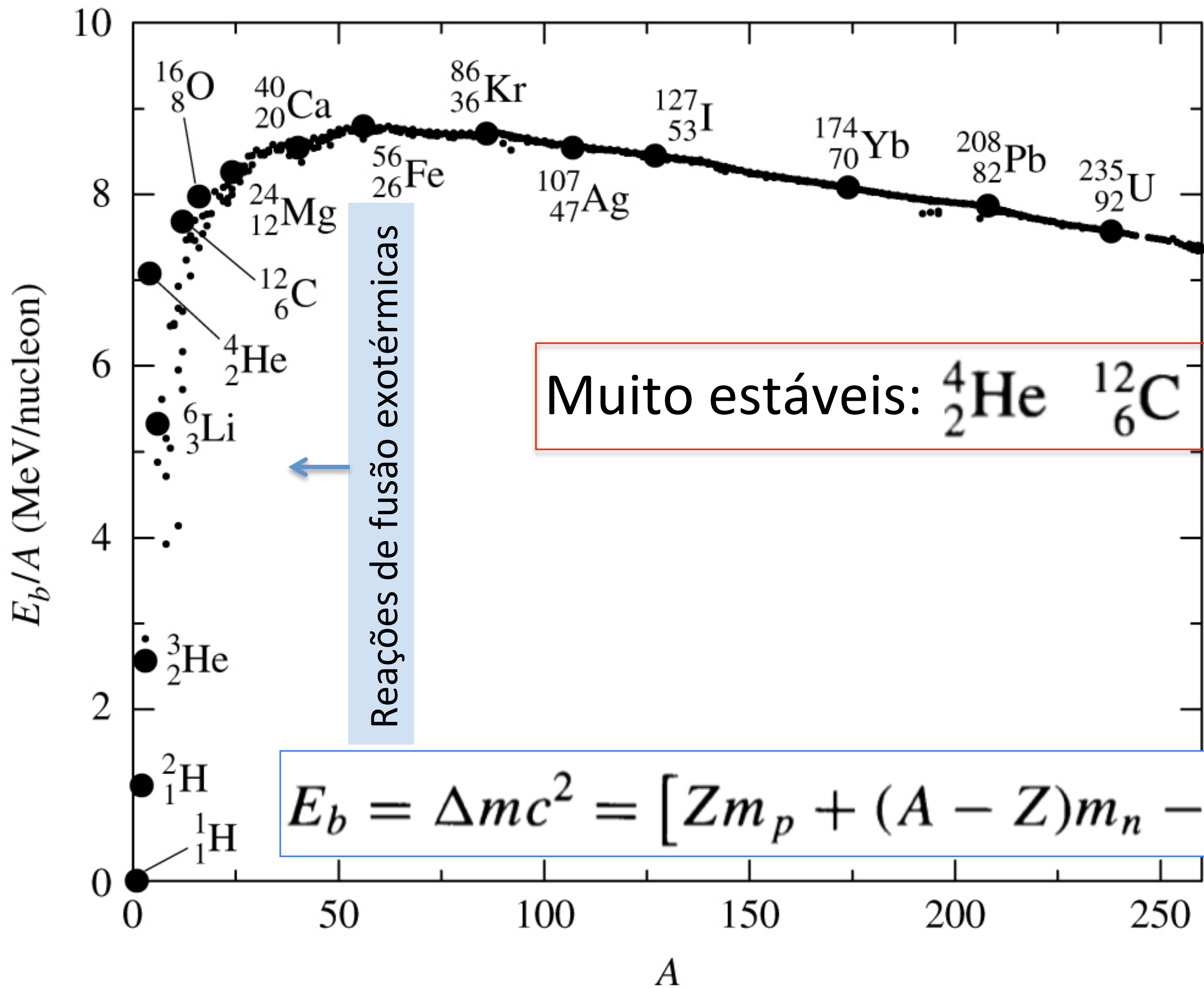
$$^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{12}_{6}\mathrm{C} \rightarrow \begin{cases} {}^{16}_{8}\mathrm{O} + 2\,{}^{4}_{2}\mathrm{He} & *** \\ {}^{20}_{10}\mathrm{Ne} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} & \\ {}^{23}_{11}\mathrm{Na} + p^{+} & \\ {}^{23}_{12}\mathrm{Mg} + n & *** \\ {}^{24}_{12}\mathrm{Mg} + \gamma & \end{cases}$$

$T \sim 10^9$K

$$^{16}_{8}\mathrm{O} + {}^{16}_{8}\mathrm{O} \rightarrow \begin{cases} {}^{24}_{12}\mathrm{Mg} + 2\,{}^{4}_{2}\mathrm{He} & *** \\ {}^{28}_{14}\mathrm{Si} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} & \\ {}^{31}_{15}\mathrm{P} + p^{+} & \\ {}^{31}_{16}\mathrm{S} + n & \\ {}^{32}_{16}\mathrm{S} + \gamma & \end{cases}$$

***: endotérmica

Energia de Ligação por Núcleon: E_b/A



Muito estáveis: $^{4}_{2}\mathrm{He}$ $^{12}_{6}\mathrm{C}$ $^{16}_{8}\mathrm{O}$

$$E_b = \Delta m c^2 = \left[Z m_p + (A - Z) m_n - m_{\text{nucleus}} \right] c^2$$

Somos poeira de estrelas

$$4\,{}^1_1\mathrm{H} \rightarrow {}^4_2\mathrm{He} + 2e^+ + 2\nu_e + 2\gamma$$

$$\begin{aligned}
{}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^1_1\mathrm{H} &\rightarrow {}^{13}_{7}\mathrm{N} + \gamma \\
{}^{13}_{7}\mathrm{N} &\rightarrow {}^{13}_{6}\mathrm{C} + e^+ + \nu_e \\
{}^{13}_{6}\mathrm{C} + {}^1_1\mathrm{H} &\rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + \gamma \\
{}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^1_1\mathrm{H} &\rightarrow {}^{15}_{8}\mathrm{O} + \gamma \\
{}^{15}_{8}\mathrm{O} &\rightarrow {}^{15}_{7}\mathrm{N} + e^+ + \nu_e \\
{}^{15}_{7}\mathrm{N} + {}^1_1\mathrm{H} &\rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^4_2\mathrm{He}.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^{15}_{7}\mathrm{N} + {}^1_1\mathrm{H} &\rightarrow {}^{16}_{8}\mathrm{O} + \gamma \\
{}^{16}_{8}\mathrm{O} + {}^1_1\mathrm{H} &\rightarrow {}^{17}_{9}\mathrm{F} + \gamma \\
{}^{17}_{9}\mathrm{F} &\rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + e^+ + \nu_e \\
{}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^1_1\mathrm{H} &\rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^4_2\mathrm{He}.
\end{aligned}$$

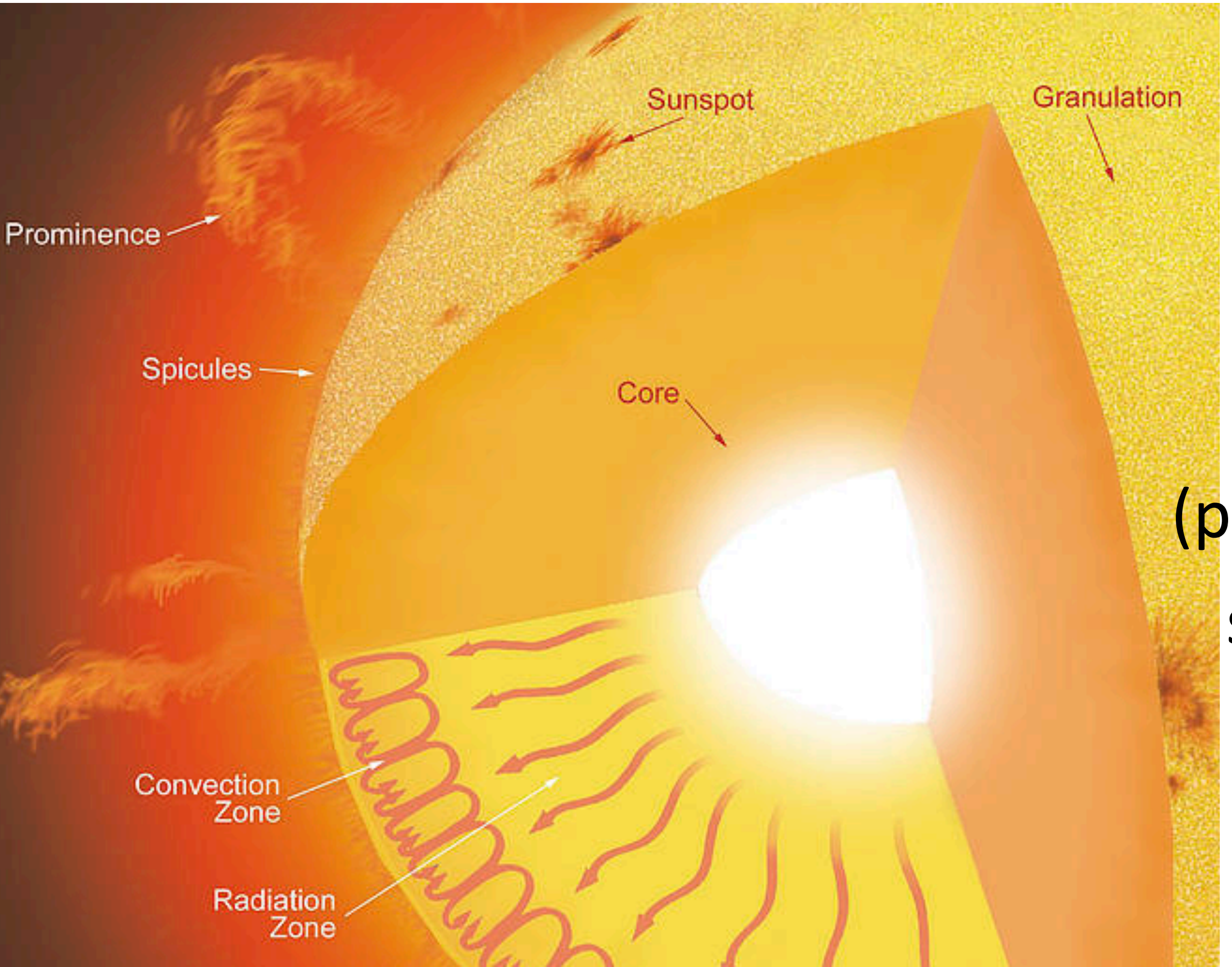
$$\begin{aligned}
{}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^4_2\mathrm{He} &\rightarrow {}^{16}_{8}\mathrm{O} + \gamma \\
{}^{16}_{8}\mathrm{O} + {}^4_2\mathrm{He} &\rightarrow {}^{20}_{10}\mathrm{Ne} + \gamma
\end{aligned}$$

$${}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{12}_{6}\mathrm{C} \rightarrow \begin{cases} {}^{16}_{8}\mathrm{O} + 2\,{}^4_2\mathrm{He} & *** \\ {}^{20}_{10}\mathrm{Ne} + {}^4_2\mathrm{He} \\ {}^{23}_{11}\mathrm{Na} + p^+ \\ {}^{23}_{12}\mathrm{Mg} + n & *** \\ {}^{24}_{12}\mathrm{Mg} + \gamma \end{cases}$$

$${}^{16}_{8}\mathrm{O} + {}^{16}_{8}\mathrm{O} \rightarrow \begin{cases} {}^{24}_{12}\mathrm{Mg} + 2\,{}^4_2\mathrm{He} & *** \\ {}^{28}_{14}\mathrm{Si} + {}^4_2\mathrm{He} \\ {}^{31}_{15}\mathrm{P} + p^+ \\ {}^{31}_{16}\mathrm{S} + n \\ {}^{32}_{16}\mathrm{S} + \gamma \end{cases}$$

Transporte de energia

- Já temos 3 equações básicas (P_r, M_r, L_r).
- Falta equação do transporte de energia.



- 3 mecanismos:
  - Radiação
  - Convecção
  - Condução (pouco importante na sequência principal)

O Gradiente radiativo de temperatura

$$P_{\rm rad} = \frac{1}{3} a T^4 \rightarrow \frac{dP_{\rm rad}}{dr} = \frac{4}{3} a T^3 \frac{dT}{dr}$$

Cap. 9: $$\frac{dP_{\rm rad}}{dr} = -\frac{\overline{\kappa}\rho}{c} F_{\rm rad}$$

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3}{4ac}\frac{\overline{\kappa}\rho}{T^3} F_{\rm rad}$$

Lembrando:

$$F_{\rm rad} = \frac{L_r}{4\pi r^2} \rightarrow \boxed{\frac{dT}{dr} = -\frac{3}{4ac}\frac{\overline{\kappa}\rho}{T^3}\frac{L_r}{4\pi r^2}}$$

Se a opacidade aumenta ou a temperatura diminui

→ maior gradiente de T para transportar a luminosidade

Provinha: qual das reações está errada? Why?

1) $^{15}_{7}N + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{16}_{8}O + \gamma$

2) $^{16}_{8}O + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{17}_{9}F + \gamma$

3) $^{17}_{9}F \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H + e^{+} + \nu_{e}$