

Přeměna a přenos E ve *

Formy energie

- | | | | |
|-----------------|------------------------------------|----------------|-------------|
| • klidová | $E_0 = m_0c^2$ | • zářivá | $E_r = Nhf$ |
| • kinetická | $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ | • neutrinová | E_ν |
| • p. gravitační | $E_g = -GMm/r$ | • temná | E_d |
| • p. elektrická | $E_e = kQq/r$ | | |
| • p. magnetická | $E_{\text{mag}} = \frac{1}{2}LI^2$ | • “celková” | |
| • v. tepelná | $U = \frac{3}{2}Nk_B T$ | • “mechanická” | |
| • v. chemická | E_{ch} | • “zvuková” | |
| • v. ionizační | E_i | • “vlnová” | |
| • v. jaderná | E_n | • “vibrační” | |
| • v. elastická | E_{ela} | • “rotační” | |
| • ... | | • “vazebná” | |
| | | • atd. | |

Způsoby přenosu

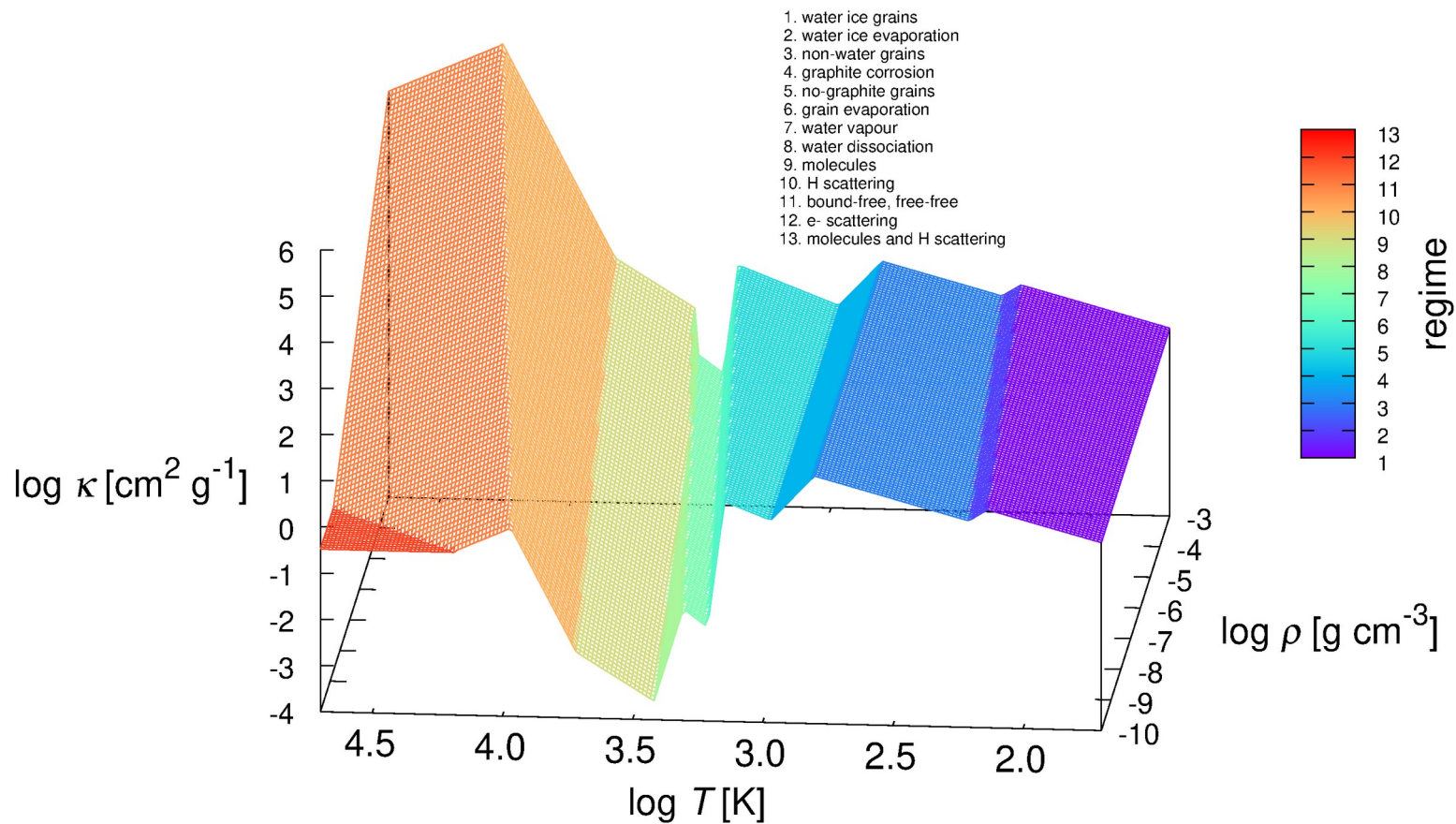
1. vedení, difuze U
2. proudění = konvekce = turbulence = RTI = vztlaková nestabilita, tzn. *opak* vln
3. záření, difuze E_r
4. neutrina, chlazení, výjimečně **ohřev**
5. vlny (zvukové, vztlakové, rázové, seismické, MHD, ...), resp. jejich *disipace*
6. gravitační vlny (cf. $3 M_{sc}^2$)

Opacita

- def. $\kappa = dl_\nu / (l_\nu \cdot dx \cdot \rho)$... relativní úbytek intenzity na jednotku délky a j. hustoty
- jed. $[\kappa] = \text{m}^2/\text{kg}$... plocha zastíněná 1 kg látky rozptýlené v 1 m^3

- např. atmosféra Země:
- $dl_\nu / l_\nu = 0,3$
- $dx = 10^4 \text{ m}$
- $\rho = 1 \text{ kg}/\text{m}^3$
- $\kappa = 0,00003 \text{ m}^2/\text{kg}$

Pozn.: opacita vs. fázové přechody



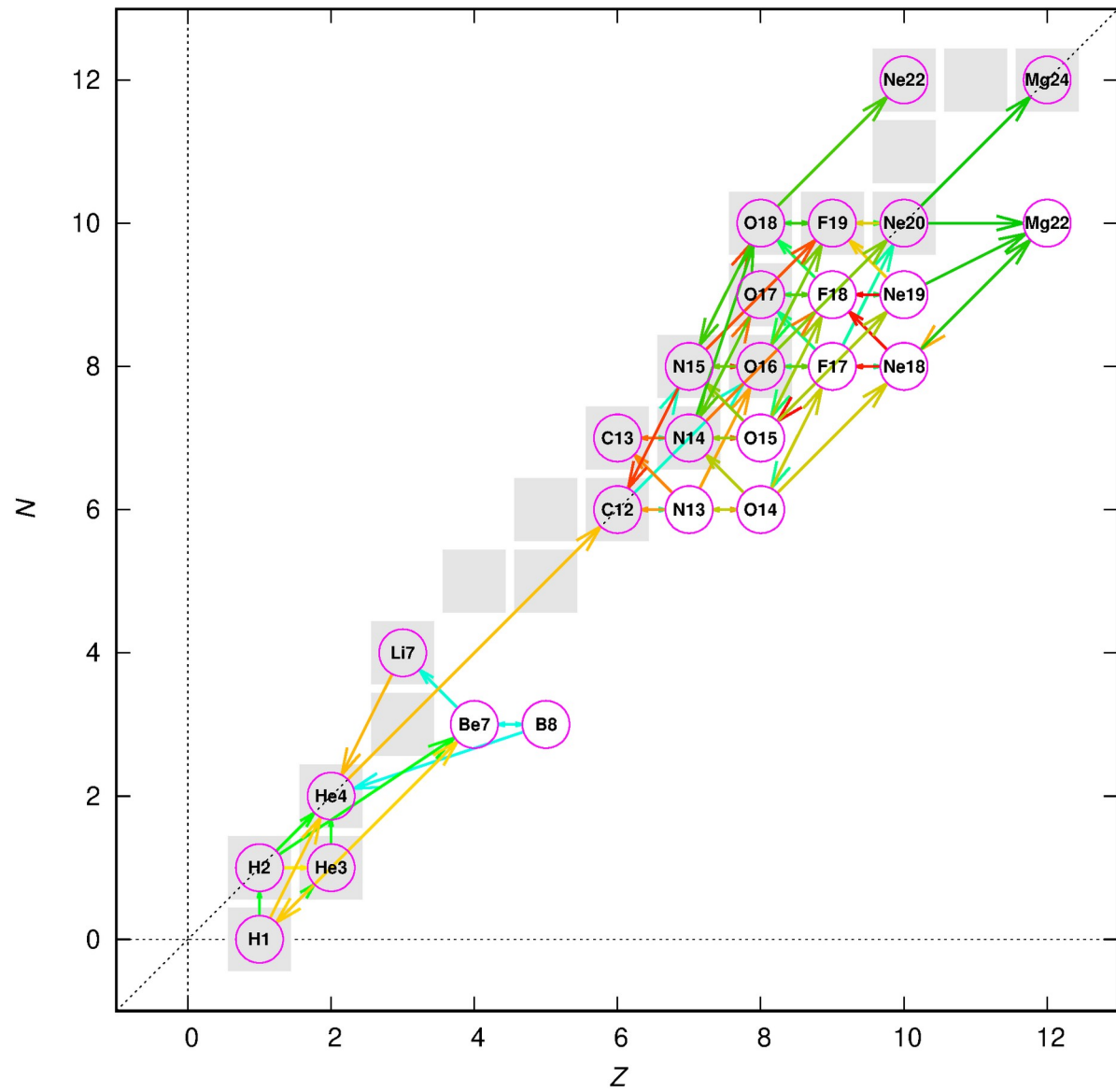
Comptonův rozptyl na elektronech	$e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$	$\sigma_C N_e$
Thomsonův rozptyl na elektronech	$e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$	$\sigma_T N_e$
synchrotronová emise	$e^- \rightarrow e^- + \gamma$	
cyklotronová emise	$e^- \rightarrow e^- + \gamma$	$\sigma_T B^2 v^2 / (\mu_0 c)$
volně-volná emise (brzdné záření)	$Z^+ + e^- \rightarrow Z^+ + e^- + \gamma$	$N_e N_i B_{\kappa\kappa'}$
volně-volná absorpce	$Z^+ + e^- + \gamma \rightarrow Z^+ + e^-$	$N_e N_i U_\nu B_{\kappa'\kappa}$
fotoionizace	$Z + \gamma \rightarrow Z^+ + e^-$	$N_m U_\nu B_{m\kappa}$
srážková ionizace	$Z + e^- \rightarrow Z^+ + 2e^-$	$N_m N_e C_{m\kappa}$
autoionizace (Augerův jev)	$Z^{**} \rightarrow Z^+ + e^-$	$N_\nu U_\nu \kappa_{\text{diel}}$
rekombinace (2-částicová zářivá)	$Z^+ + e^- \rightarrow Z + \gamma$	$N_i N_e A_{\kappa m}$
3-částicová rekombinace	$Z^+ + 2e^- \rightarrow Z + e^-$	$N_i N_e^2 C_{\kappa m}$
dielektronická rekombinace	$Z^{*+} + e^- \rightarrow Z^{**} \rightarrow Z + \gamma$	$N_i N_e \alpha_{\text{diel}}$
absorpce, elektronový přechod	$Z + \gamma \rightarrow Z^*$	$N_m U_\nu B_{mn}$
spontánní emise	$Z^* \rightarrow Z + \gamma$	$N_n A_{nm}$
stimulovaná emise	$Z^* + \gamma \rightarrow Z + 2\gamma$	$N_n U_\nu B_{nm}$
srážková excitace	$Z + e^- \rightarrow Z^* + e^-$	$N_m N_e C_{mn}$
srážková deexcitace	$Z^* + e^- \rightarrow Z + e^-$	$N_n N_e C_{nm}$
fotoionizace iontu H^-	$H^- + \gamma \rightarrow H + e^-$	$N_m U_\nu B_{m\kappa}$
absorpce, vibrační přechod	$M + \gamma \rightarrow M^*$	
absorpce, rotační přechod	$M + \gamma \rightarrow M^*$	
Rayleighův rozptyl na molekulách	$M + \gamma \rightarrow M + \gamma$	
Ramanův rozptyl (anelastický)	$M + \gamma \rightarrow M + \gamma$	
Mieho rozptyl na prachu	$pz + \gamma \rightarrow pz + \gamma$	
absorpce prachem	$pz + \gamma \rightarrow pz^*$	
emise prachem (tepelná)	$pz^* \rightarrow pz + \gamma$	

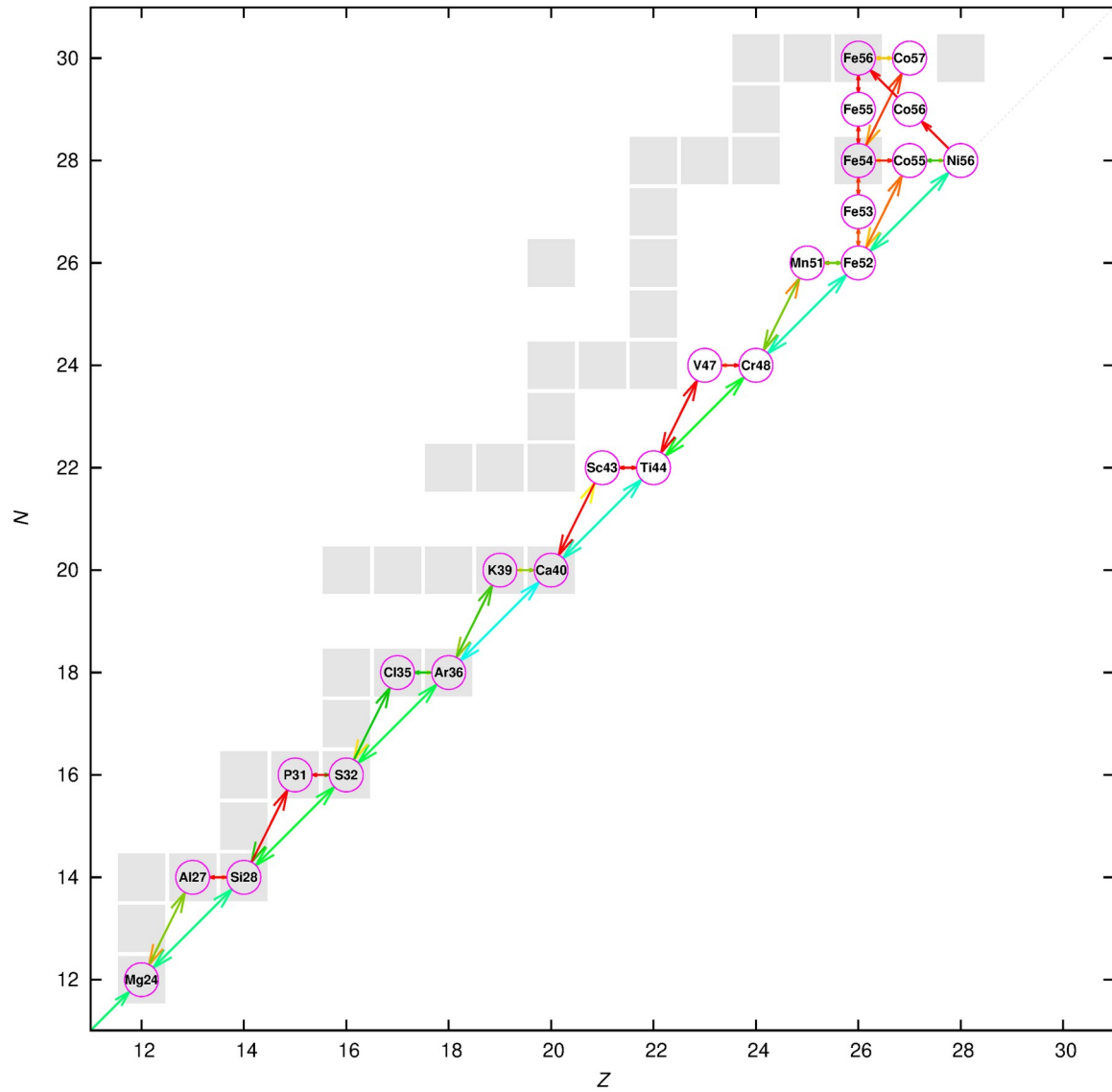
Tab. 4 — Elementární procesy ovlivňují přenos záření buď přímo, při interakci látky a záření, nebo nepřímo (srážkami). Jsou řazené sestupně podle energie (případně teploty T , je-li definována), při které se převážně uplatňují. Z zde označuje atom, M molekulu a pz prachové zrno. Podle Aschwanden (2005).

Měrný výkon

- def. $\varepsilon = E/(t \cdot m) = P/m$... energie přeměněná za 1 s v 1 kg látky
- jed. $[\varepsilon] = \text{J}/(\text{s} \cdot \text{kg}) = \text{W}/\text{kg}$

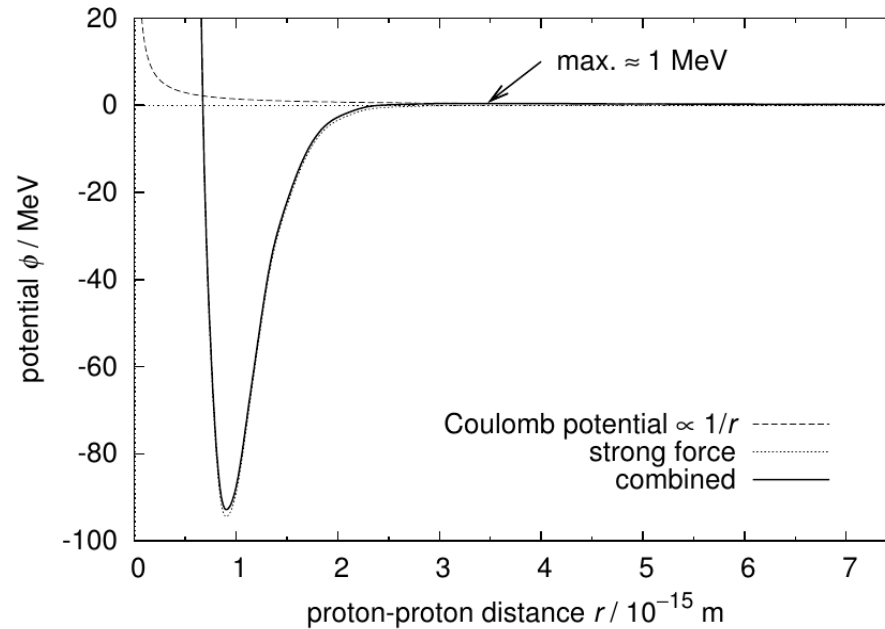
- $M_S = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
- $P_S = 3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}$
- $\varepsilon = P_S/M_S = 0,00019 \text{ W}/\text{kg}$
- exp. konvice





Potenciál p^+p^+

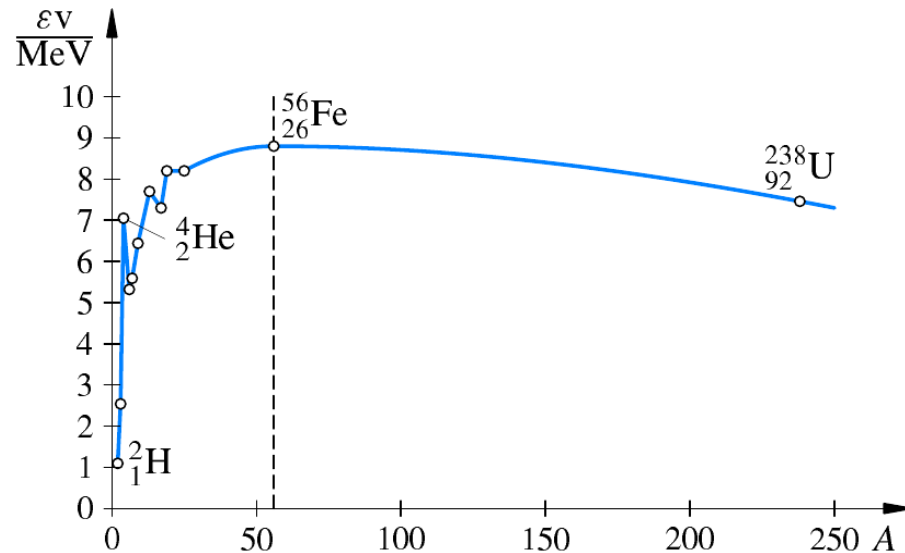
- exp. rovina



Obrázek 4.4: Potenciál coulombický, silné síly a jejich součet pro dva protony. V klasické mechanice je pohyb částice dovolen pouze v oblastech, kde je energie částice větší než potenciál, čili proton s energií 1 keV nalétávající zprava se od křivky potenciálu „odrazí“ a odletí zpět do nekonečna. V kvantové mechanice se však uplatňuje tunelový jev.

Slučování vs. rozpad

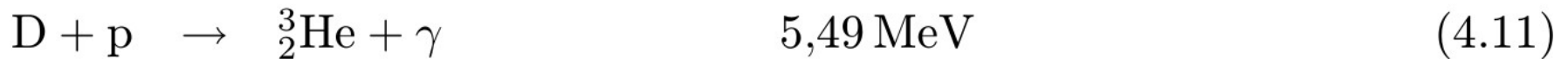
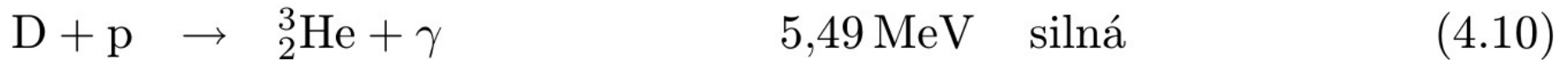
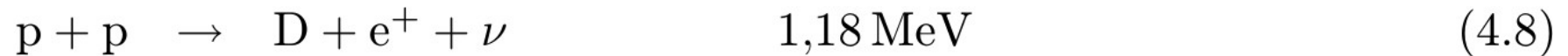
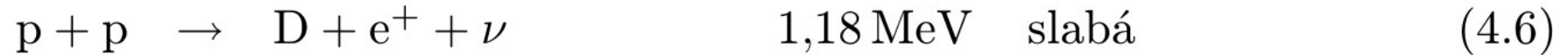
- $^{52}\text{Fe} + ^4\text{He} \rightarrow ^{56}\text{Co}$, $E_n = -448 - 28 = -476 > -484$, vše v MeV, $eV = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
- $^{235}\text{U} + ^4\text{He} \leftarrow ^{239}\text{Pu}$, $E_n = -1784 - 28 = -1812 < -1806$
- pozn. o ^{60}Zn



Obrázek 4.3: Vazebná energie E_v na jeden nukleon, pro jádra s různými atomovými čísly A .

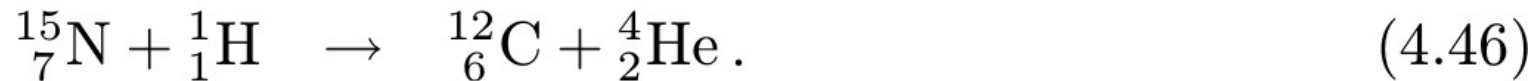
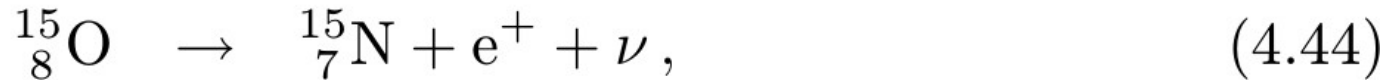
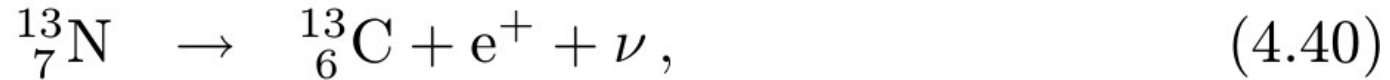
Proton-protonový řetězec

uvolněná energie E typ interakce



$$\sum E = 26,20 \text{ MeV}$$

Cyklus CNO



Přenos záření

$$\left. \frac{dT}{dR} \right|_{\text{rad}} = - \frac{3\kappa\rho L_R}{16\pi acR^2 T^3}$$

- pův. $dl = j\rho - \kappa\rho l$, předp. **LTE**
- $R = 3,5 \cdot 10^8 \text{ m}$, $\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3$, $T = 4\,000\,000 \text{ K}$, $\kappa = 0,8 \text{ m}^2/\text{kg}$, $L_R = 3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}$
- $dT/dR = -10 \text{ K/km}$, tj. asi jako zde
- exp. (ne)průhlednost

Přenos prouděním

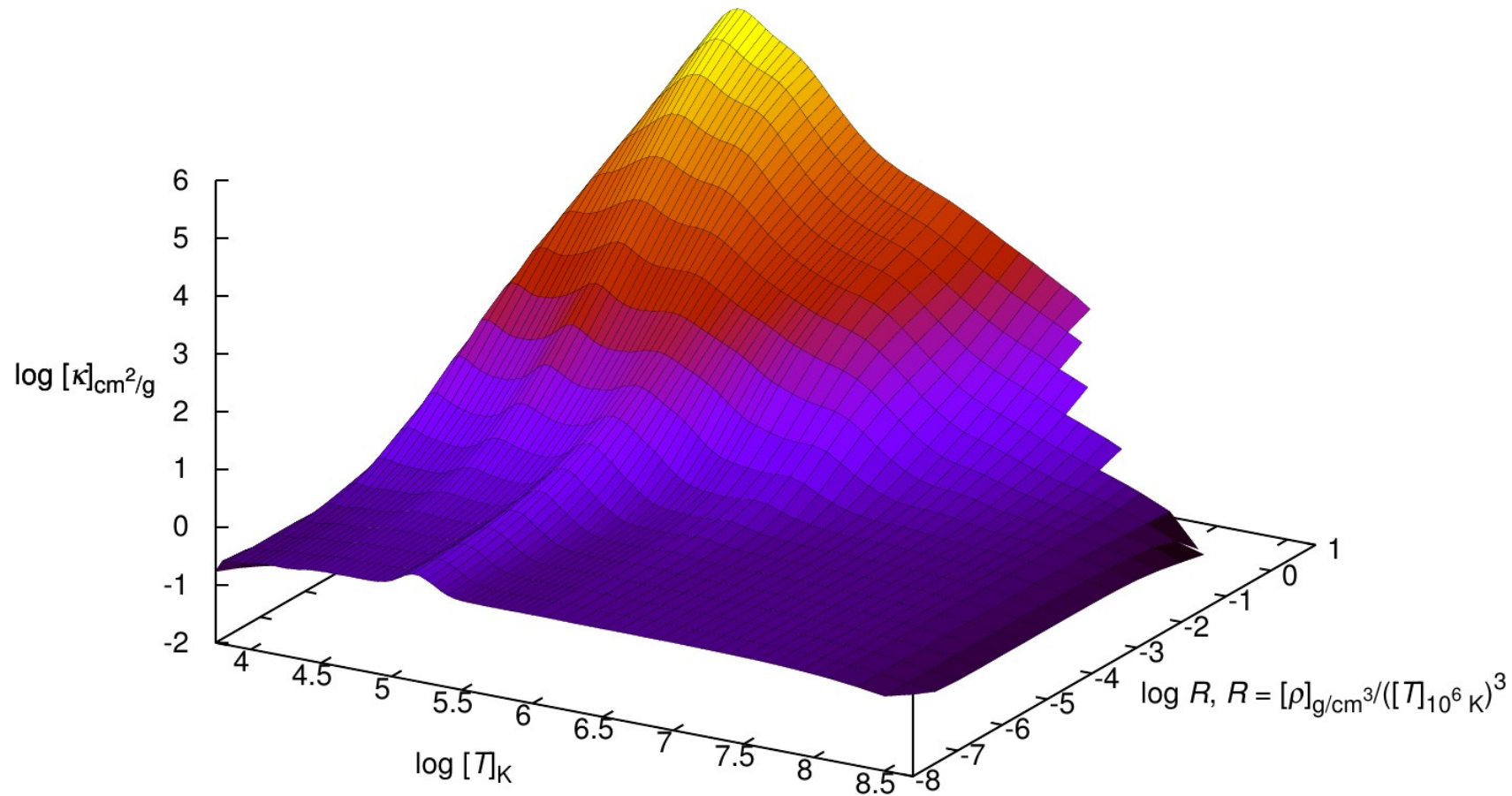
$$\left. \frac{dT}{dR} \right|_{\text{ad}} = \frac{T}{P} \left(1 - \frac{1}{\Gamma} \right) \frac{dP}{dR}$$

- popis bez \mathbf{v} , předp. adiabatický děj $dQ = 0$, $P = K\rho^\Gamma$, $\Gamma = 5/3$, $P = \rho/(\mu m_u) k_B T$
- pův. $dQ = dU + PdV$
- $dP/dR = -GM_R\rho/R^2$
- $R = 3,5 \cdot 10^8$ m, $\rho = 1\,000$ kg/m³, $T = 4\,000\,000$ K, $P = 7,5 \cdot 10^{13}$ Pa, $M_R = 1,8 \cdot 10^{30}$ kg
- $dT/dR = -20$ K/km, tj. skoro totéž
- exp. konvekce

Schwarzschildovo kritérium

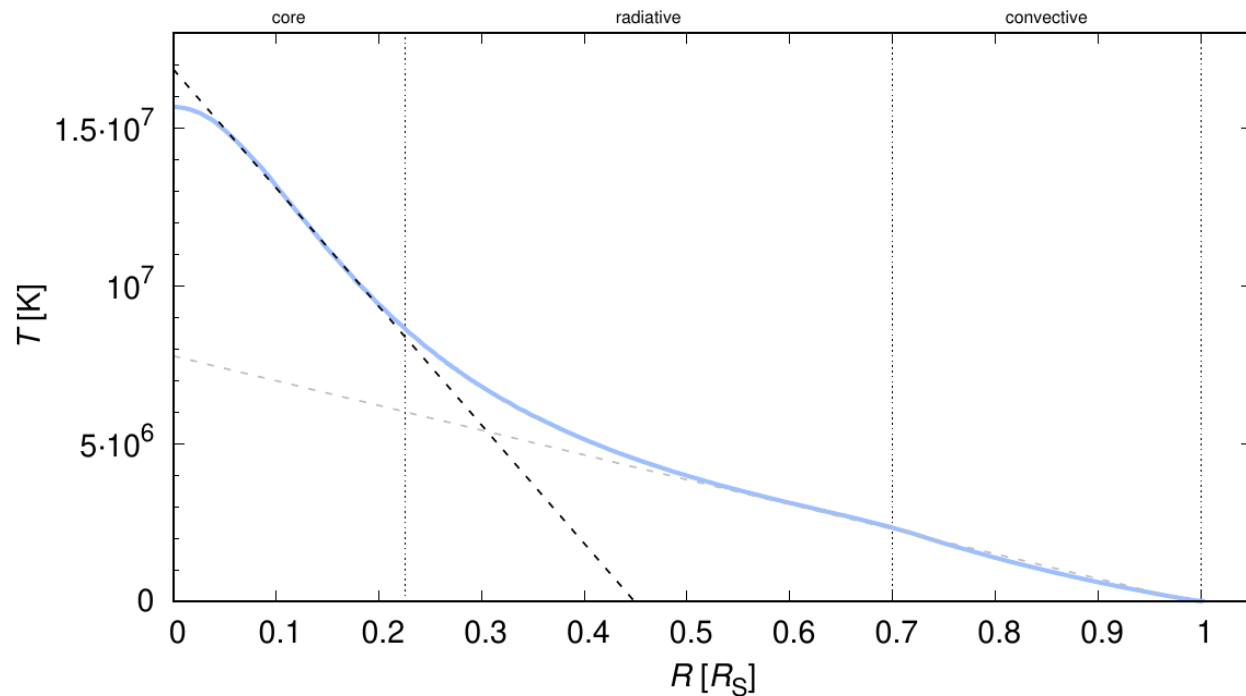
$$\left(\frac{dT}{dR}\right)_{\text{ad}} > \left(\frac{dT}{dR}\right)_{\text{rad}}$$

- pozn. *záporné* gradienty! ten pozvolnější...
- exp. bublina



Obrázek 4.8: Hodnoty logaritmu opacitního koeficientu κ v závislosti na teplotě T a parametru $R \equiv [\rho]_{\text{g cm}^{-3}} ([T]_{10^6 \text{ K}})^{-3}$, pro látku s chemickým složením $X = 0,70$, $Y = 0,28$, $Z = 0,02$. Podle Rogerse a Iglesiasa (1996).

Teplotní profil



Obr. 5 — Profil teploty $T(R)$ v nitru Slunce. V jádře klesá přibližně lineárně, v konvektivní zóně též, v radiální zóně je navázání. Pouze ve fotosféře (nezobrazena, resp. za osou x) je pokles strmější kvůli úniku záření do meziplanetárního prostoru.

Planckova funkce

- monochromatická intenzita:

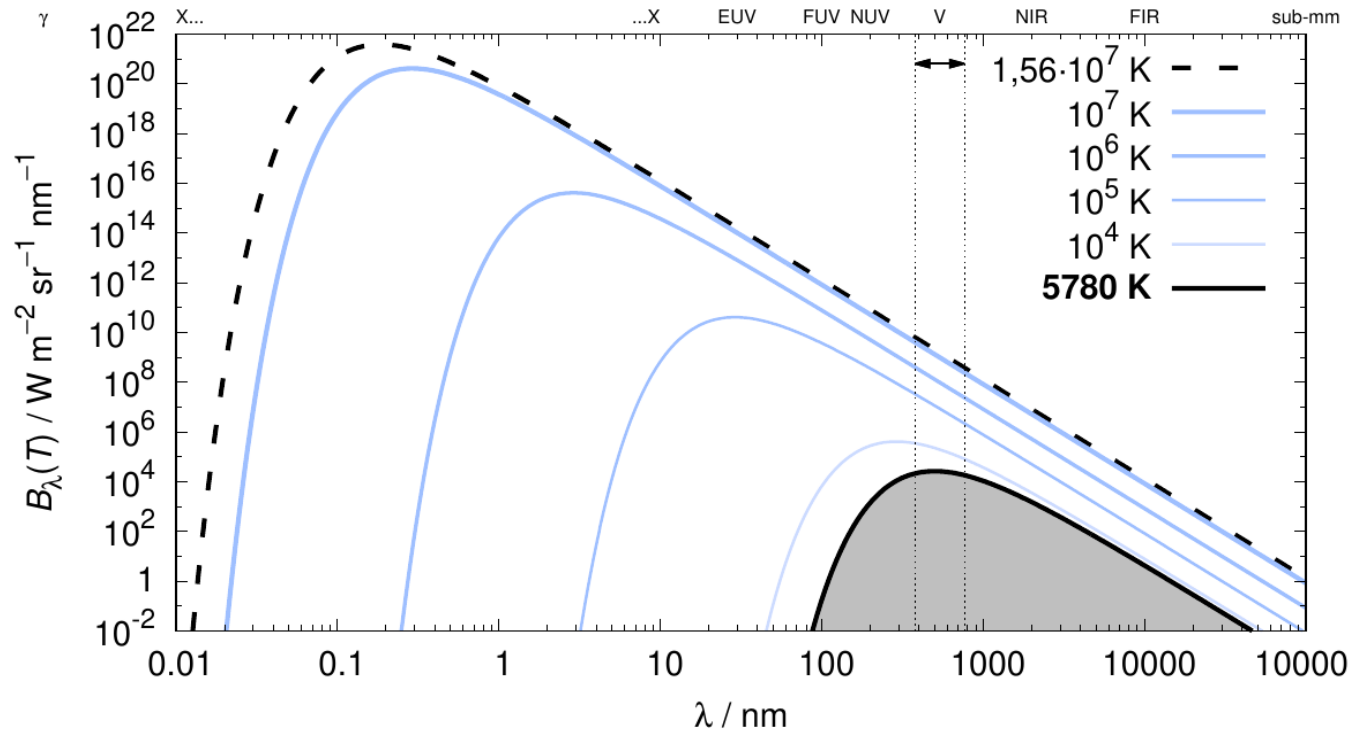
$$I_\lambda \doteq B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}$$

- tok do poloprostoru:

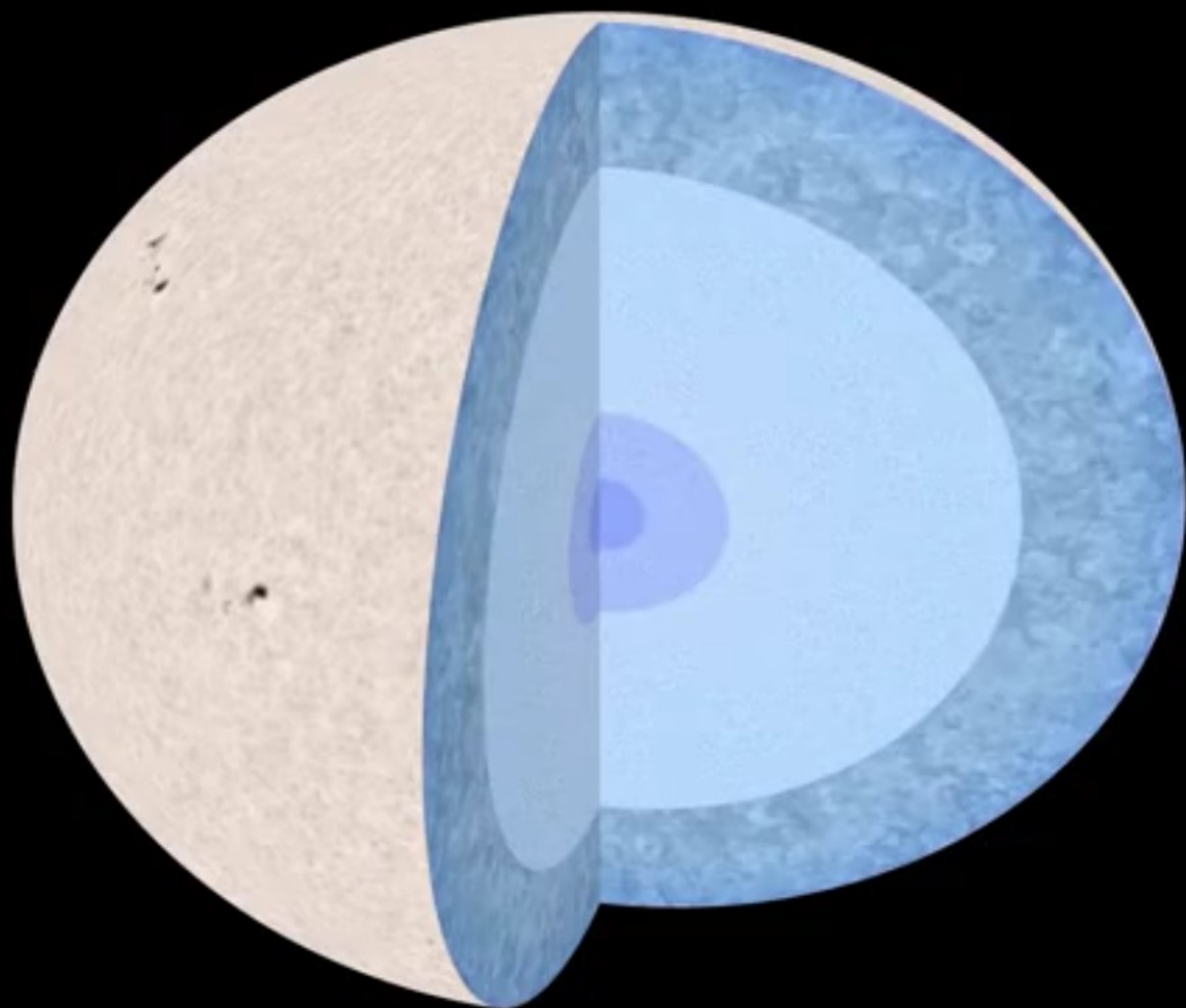
$$L_\uparrow \doteq L_\downarrow = \iiint I_\lambda d\lambda \cos \vartheta d\omega dS = 4\pi R^2 \pi B(T) = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

- na povrchu $L_\uparrow = 3,8 \cdot 10^{26} \text{ W} = L_s$
- v nitru $L_\uparrow \doteq L_\downarrow = 2,2 \cdot 10^{37} \text{ W} \gg L_s!$

Obraz Slunce

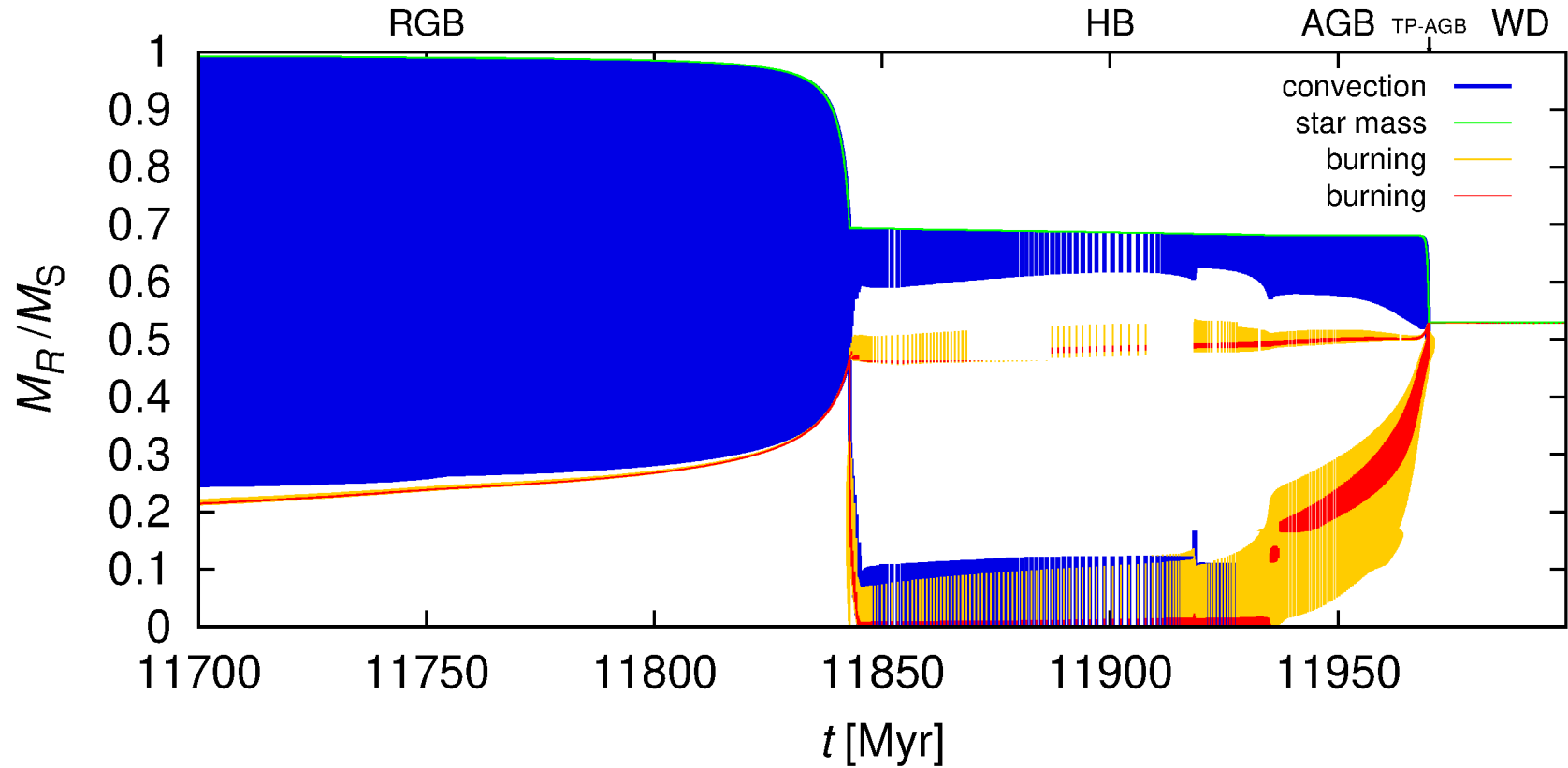


Obr. 3 — Planckovské spektrum pro velký rozsah teplot, $T = 5 \cdot 10^3$ až 10^7 K, od povrchu do středu Slunce.

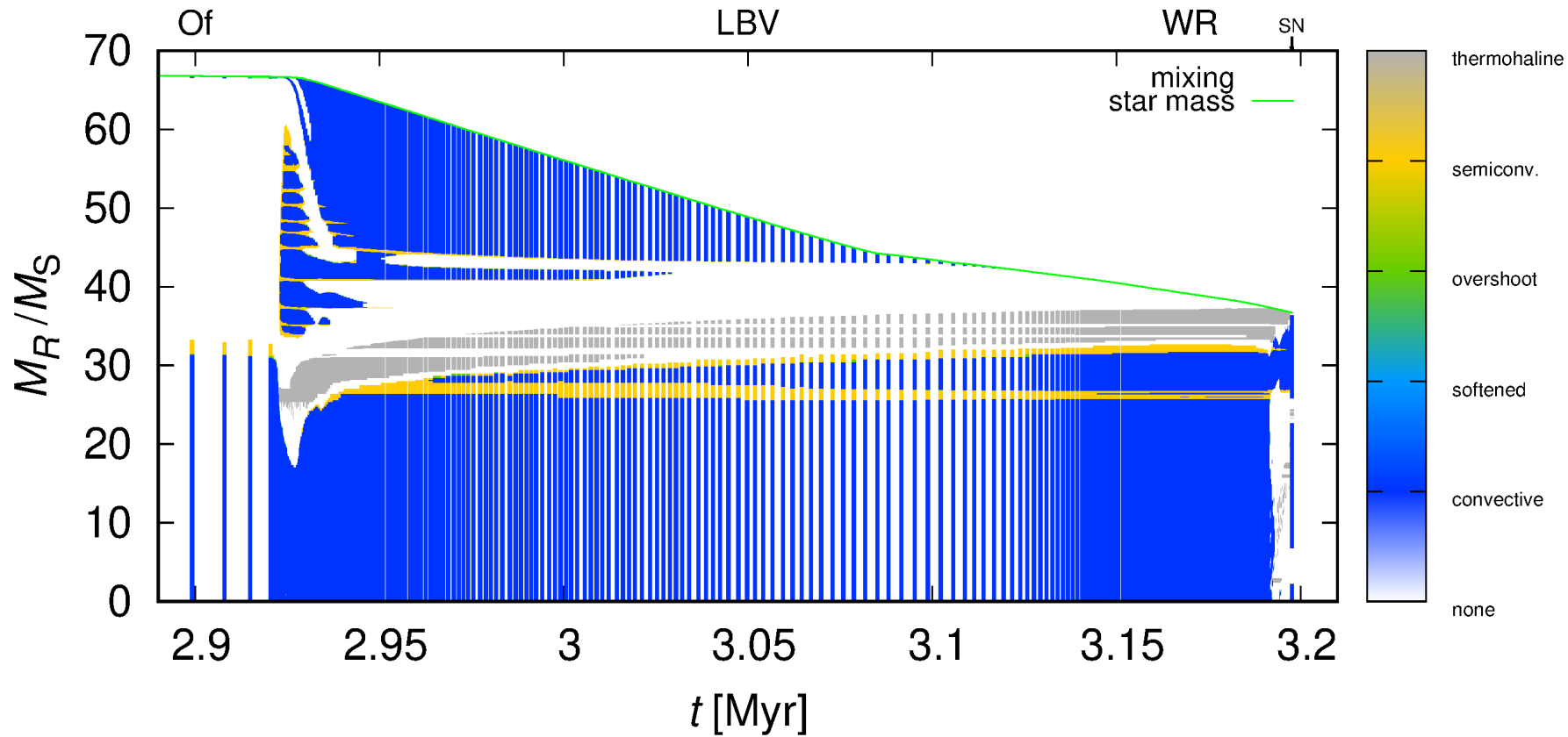


$t = 1.57 \text{ Gy}$
 $R = 642789 \text{ km}$
 $T = 5698 \text{ K}$
MS

Kippenhahnův diagram



* $85 M_{\odot}$



Závěry

- v nitru *: jaderná $E_n \rightarrow$ **vnitřní tepelná U**
- přenáší se **zářením** (E_r), nebo...
- ... **prouděním**, je-li * neprůhledná
- * je neprůhledná, je-li ionizace **částičná**
- * svítí proto, že **žhne**
- v nitru je * **modrá**
- pro vývoj je **chlazení** důležitější než ohřev!

Literatura

- Harmanec, Brož: **Stavba a vývoj hvězd**. Praha: Matfyzpress, 2011.
- Brož, Wolf: Astronomická měření. Praha: Matfyzpress, 2017.
- Brož: Hydrodynamika v astronomii. 2021; <http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/~mira/>
- ...