

Něco málo o hvězdách I

Jakub Rozehnal, Petr Kulháněk

Hvězdná velikost

magnituda, značíme „mag“ nebo indexem ^m

- ❑ veličina, udávající jasnost nebeského objektu
- ❑ zavedení v antice, 5 tříd (1.-6.)
- ❑ Norman Robert Pogson (1856) – exaktní definice hvězdné velikosti pomocí jasnosti hvězdy
- ❑ hvězdy s rozdílem 5 tříd mají poměr jasnosti 1:100
- ❑ rovnice odráží „zákon“, podle kterého vnímáme veličiny rostoucí geometrickou řadou lineárně

$$x = 10^y$$

$$y = \log x$$

$$\log 100 = 2$$

$$\log 1000 = 3$$

$$\log 1 = 0$$

(„logaritmus je exponent, kterým musíme umocnit základ, abychom dostali logaritmované číslo“)

Hvězdná velikost

- hvězdná velikost dané hvězdy je rovna

$$m = -2,5 \log(J / J_0)$$

- kde J_0 je jasnost hvězdy s definitoricky stanovenou magnitudou 0

$$m_2 - m_1 = -2,5 \log(J_2 / J_1)$$

radiační (bolometrické) veličiny

Zářivý výkon (zářivý tok) (W)

Intenzita (hustota zářivého toku) (W/m²)

Zářivost (W/sr)

P (často se značí L)

$$P_S = 3,83 \times 10^{26} \text{ W}$$

$$L = \frac{P}{S} \propto 1/r^2 \text{ (často se značí } I)$$

$$L_R = \frac{P}{4\pi}$$

fotometrické (vizuální) veličiny

Světelný tok (lm)

Jasnost (lm/m²)

Svítivost (lm/sr = cd)

ϕ

$$J = \frac{\phi}{S} \propto 1/r^2$$

$$I = \frac{\phi}{\Omega}$$

Hvězdná velikost

□ hvězdná velikost vizuální a bolometrická

$$m_{\text{viz}} = -2,5 \log(J / J_0)$$

$$m_{\text{bol}} = -2,5 \log(L / L_0)$$

$$m_{\text{viz}} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad J_0 = 2,54 \times 10^{-6} \text{ lm/m}^2$$

$$m_{\text{bol}} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad L_0 = 2,553 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$$

Hvězdné velikosti

Slunce	-26,7 mag
Měsíc v úplňku	-12,6 mag
Venuše	-4,4 mag
Jupiter	-2,8 mag
Sírius	-1,5 mag
Vega	0,0 mag
nejslabší okem viditelné hvězdy	cca 6 mag
dalekohled o průměru 10 cm	11 mag
dalekohled o průměru 100 cm	17 mag
HST	30 mag

Hvězdné velikosti

- ❑ výše definovaná magnituda je relativní:
nevypovídá nic o skutečném zářivém výkonu hvězdy
- ❑ nutno zavést absolutní magnitudu:
magnitudu hvězd, které jsou všechny ve stejné vzdálenosti
(10 pc)

$$M = m + 5 - 5 \log r$$

$$M_{\text{bol},S} = 4.75$$

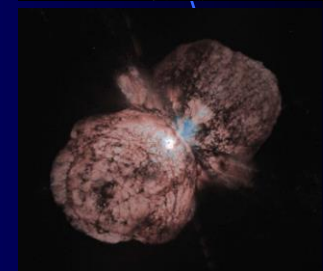
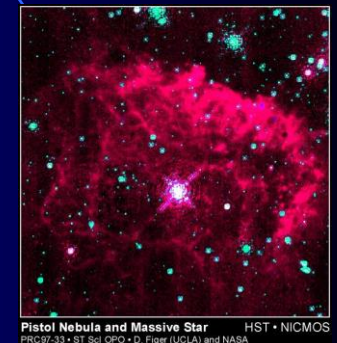
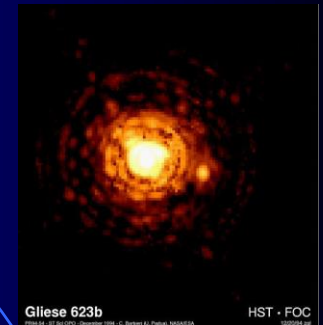
$$M_{\text{viz},S} = 4.9$$

Souhvězdí

- ❑ lidově obrazec tvořený jasnými hvězdami nebo výraznými tvary
- ❑ dle definice IAU z roku 1925 obloha rozdělena hranicemi na 88 souhvězdí (48 popsáno v Almagestu)
- ❑ Je třeba znát:
 - český a latinský název souhvězdí, zkratku
 - typicky: Orel – Aquila – Aql
- ❑ Nejjasnější hvězdy v souhvězdích:
 - dle klesající velikosti od α (Sirius = α CMa)

Základní charakteristiky hvězd

- ❑ **Rozpětí hmotností:**
min $0,075 M_{\odot}$ (červení trpaslíci – Gliese 623 B)
max $60 M_{\odot}$ (hmotní veleobři – Plaskettova hvězda)
- ❑ **Rozpětí efektivních teplot:**
min 2500 K u červených trpaslíků a obrů
max 10^5 K v případě jader planetárních mlhovin
- ❑ **Rozpětí poloměrů:**
min 12 km = $1,7 \cdot 10^{-5} R_{\odot}$ (neutronové hvězdy)
max $2000 R_{\odot}$ (červení veleobři – VV Cephei, μ Cephei)
- ❑ **Rozpětí zářivých výkonů:**
min $1,5 \cdot 10^{-5} P_{\odot}$ (červení trpaslíci – Gliese 623 B)
max $10^7 P_{\odot}$ (velmi hmotné nestacionární hvězdy typu Pistole, η Carinae)



Základní charakteristiky hvězd

❑ Chemické složení:

- zpravidla odpovídá složení zárodečné mlhoviny
- rozdíly v obsahu těžších prvků: od 0 % po 5 %
- Slunce obsahuje zhruba 2 % těžších prvků

❑ Základní veličiny:

- hmotnost
- zářivý výkon
- efektivní teplota
- poloměr

Ne všechny kombinace veličin jsou možné



Spektrální třída

W	O	B	A	F	G	K	M	L	T
80 000 K	60 000 K	38 000 K	15 400 K	9 000 K	6 700 K	5 400 K	3 800 K	2 200 K	1 499 K

W: Wolfovy-Rayetovy hvězdy jevící široké emisní čáry vodíku a helia.

O: Silné spojité spektrum, absorpční čáry ionizovaného helia.

B: Absorpční čáry neutrálního helia, Balmerovy série vodíku a ionizovaného kyslíku.

A: Silné čáry Balmerovy série vodíku. Objevují se čáry ionizovaného vápníku a čáry kovů.

F: Čáry Balmerovy série slábnou, zesilují se čáry ionizovaného vápníku a kovů.

G: Silné čáry ionizovaného vápníku, slabé čáry Balmerovy série, početné čáry kovů, zejména železa.

K: Silné čáry kovů, slabé absorpční pásy molekul. Hvězdy mají oranžovou barvu.

M: Silné pásy molekul, zejména oxidu titanatého. Hvězdy mají červenou barvu.

L: Chladní trpaslíci na hranici TN syntézy, září v IR, pásy molekul FeH, CrH, H₂O, CO₂.

T: Při teplotě pod 1499 K vzniká metan a ve spektru se objevují typické IR čáry metanu.

Waldemar osmý bude asi fňukat. Gustave, kup mu legračního tygříka!

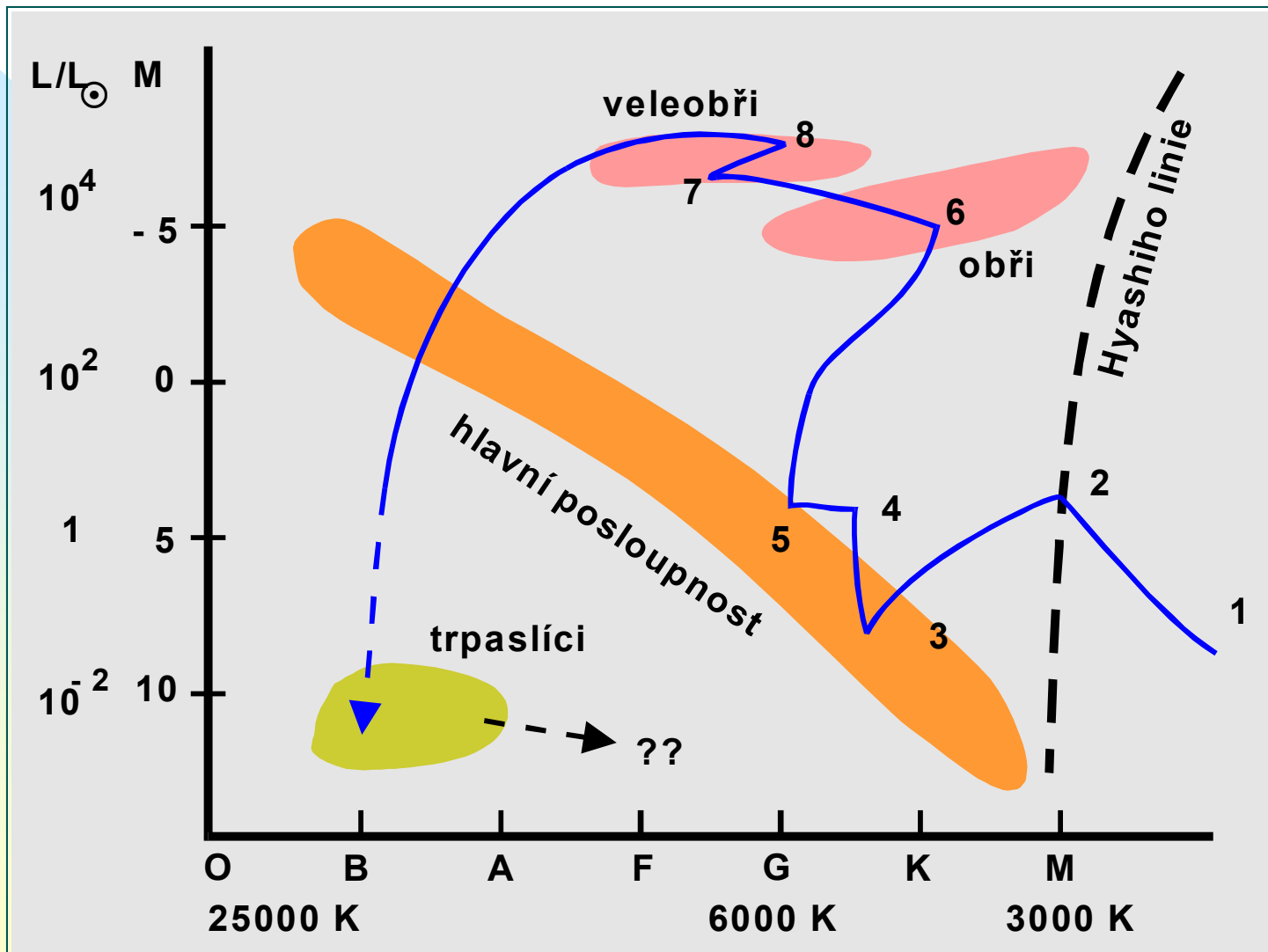
Whisky od babičky Anastázie – fantasticky geniální koupě! Moderní léčivo traumat.

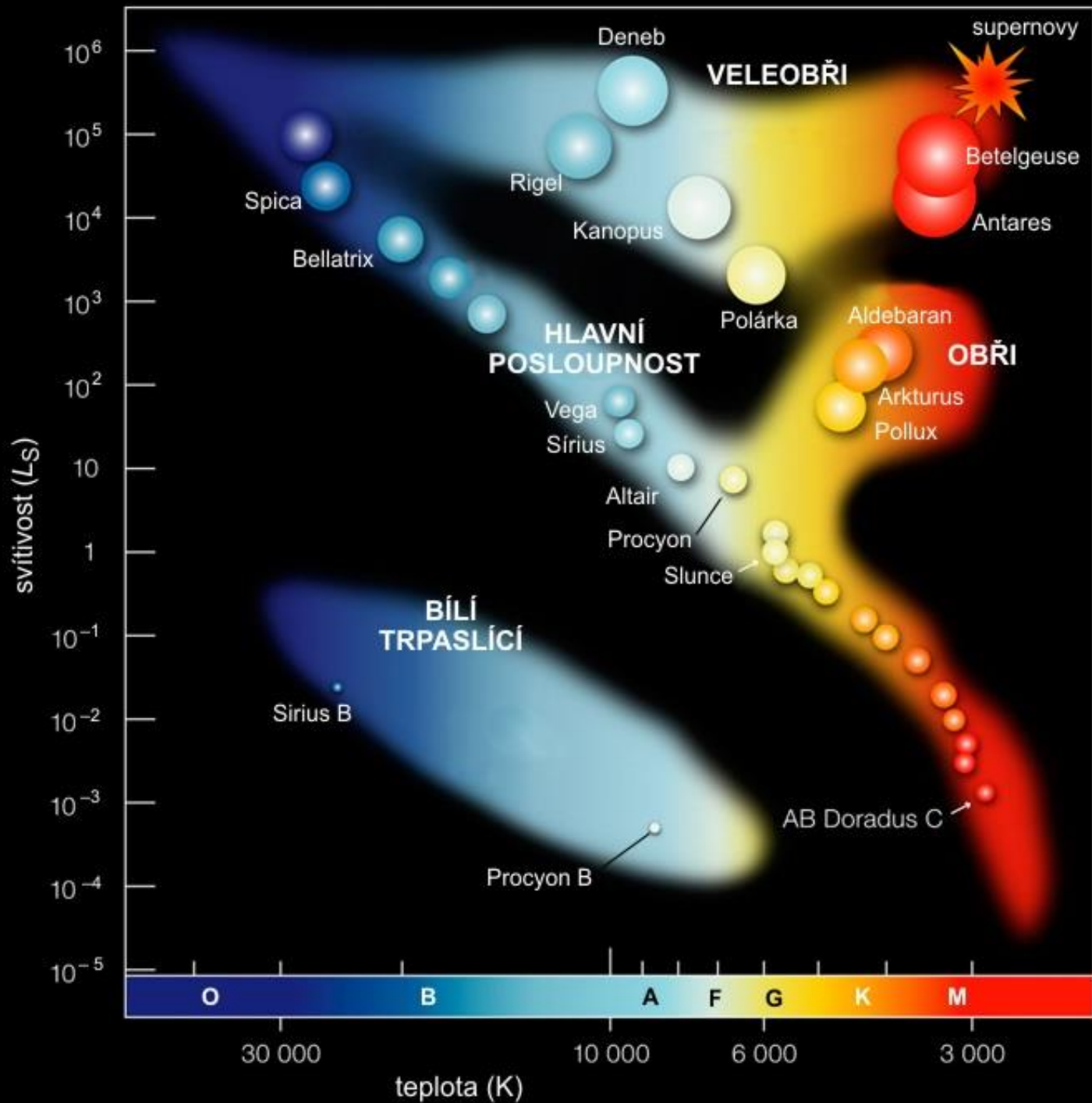
Widely Over Broad Amazon Forests, Geologists Know Many Leafless Trees.

HR diagram

- Hans Rosenberg (1910) , první HR diagram
- závislost mezi jasností a spektrální třídou hvězd v Plejádách
- závislost $\log I / T_{\text{ef}}$
- expozice Plejád objektivovým hranolem
- další dgm. Ejnar Hertzsprung (1912), Henry Norris Russel (1913)
- základní rozdělení: hlavní posloupnost, trpaslíci, obři

Hertzprungův-Russelův diagram





Základní charakteristiky hvězd

„Nejdůležitější charakteristikou hvězdy je její hmotnost“

Arthur Stanley Eddington (1924)

- ☐ **platí pro hvězdy hlavní posloupnosti, pro obry rámcově, pro bílé trpaslíky vůbec**
- ☐ **hmotnost hvězdy nelze měřit přímo → studium dvojhvězd**



Hvězdy hlavní posloupnosti

$$L \sim M^{7/2}$$

$$R \sim M^{3/4}$$

$$T \sim M^{1/2}$$

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^{7/2}$$

$$\frac{R_1}{R_2} \sim \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^{3/4}$$

$$\frac{T_1}{T_2} \sim \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^{1/2}$$

Střední hodnoty charakteristik hvězd hlavní posloupnosti

Sp	T_{ef}/K	M/M_{\odot}	R/R_{\odot}	$\log(L/L_{\odot})$	$\log(100g/ms^{-2})$	$\rho_s/kg\ m^{-3}$
B0	29 900	14,5	5,8	4,4	4,05	100
A0	9 400	2,25	2,1	1,5	4,15	350
F0	7 200	1,50	1,55	0,75	4,25	560
G0	5 900	1,15	1,25	0,25	4,30	830
K0	5 200	0,90	1,00	-0,15	4,40	1 300
M0	3 900	0,45	0,50	-1,25	4,65	4 500
M8	2 600	0,10	0,15	-3,2	5,25	75 000

□ se vzrůstající hmotností

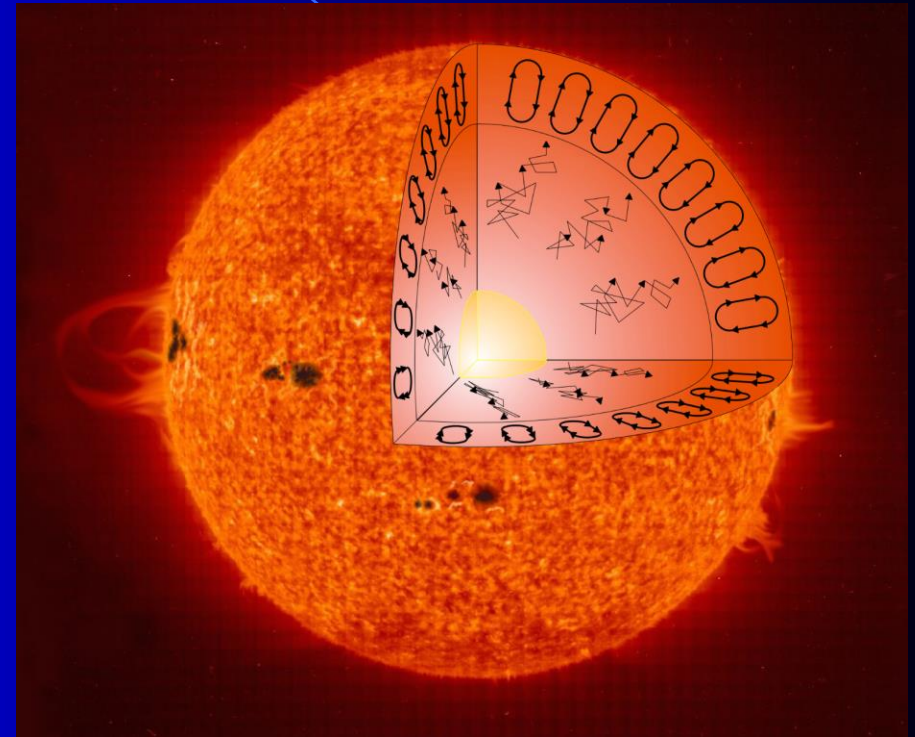
- roste povrchová teplota, poloměr a zejména svítivost
- klesá povrchové gravitační zrychlení a střední hustota hvězdy

Co jsou hvězdy?

- ❑ Hvězdy jsou samostatná gravitačně vázaná tělesa o hmotnostech od $0,075 M_{\odot}$ do cca $200 M_{\odot}$.
- ❑ v méně hmotných útvarech nedojde k zažehnutí energetických (vodíkových) termonukleárních reakcí → *hnědí trpaslíci* (planety)
- ❑ planeta × hnědý trpaslík: tělesa o hmotnostech od $0,03$ do $0,075 M_{\odot}$ mohou vznikat i samostatně stejně jako hvězdy – gravitačním zhroucením části oblaku mezihvězdné látky
- ❑ útvar o hmotnosti nad cca $200 M_{\odot}$ nemůže být díky enormně vysokému zářivému výkonu dlouhodobě stabilní

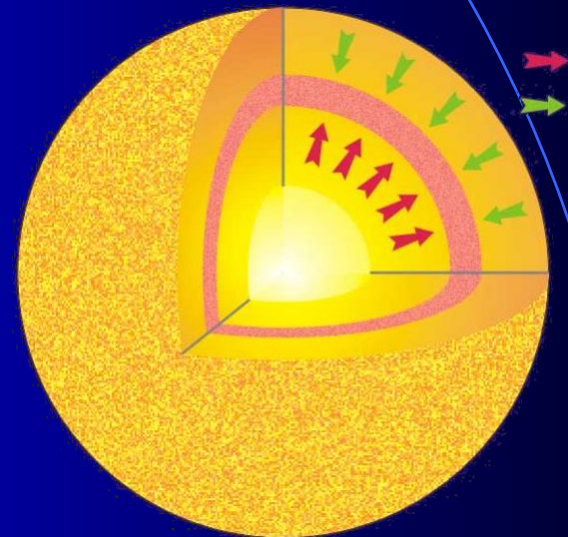
Modely hvězd

- ❑ $T = 10^7$ K, $p = 10^{10}$ atm, vývoj 10^9 let → matematické *modely*
- ❑ **ideální hvězdy**
 - nerotují
 - nemají makroskop. mag. pole
- ❑ **základní charakteristiky se v měřítku milionů let nemění**
 - vnitřní části hvězd jsou ve stavu *mechanické* (hydrostatické) a *energetické rovnováhy* →
 - *statický model*
- ❑ **vývojové efekty**
 - posloupnosti měnících se statických modelů



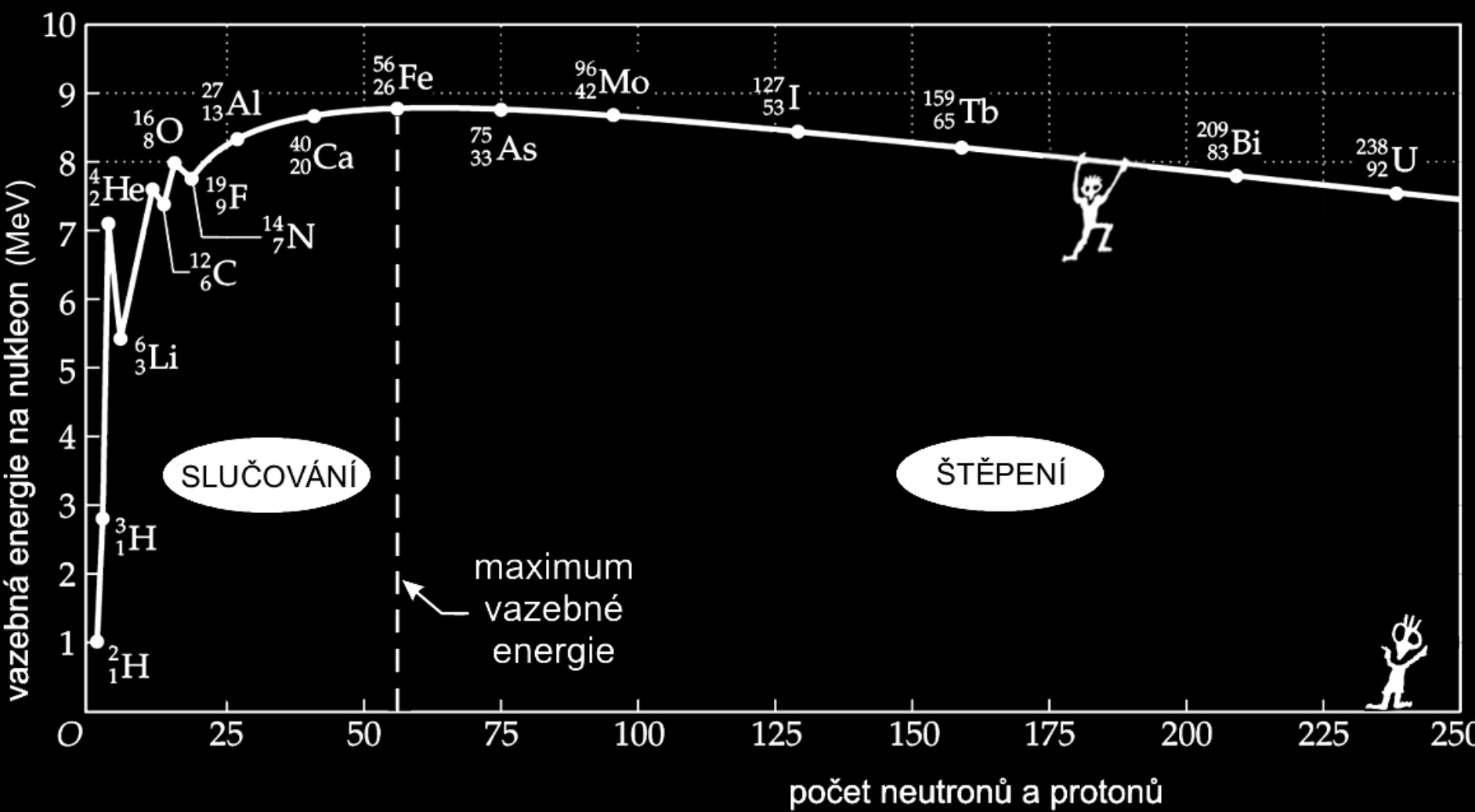
Mechanická rovnováha ve hvězdě

- ❑ **hydrostatická rovnováha**
výslednice gravitačních a všech ostatních mechanických sil působících na libovolný elementární objem tělesa je nulová
- ❑ **pokud by působila jen gravitace, hvězda by se během několika desítek minut zhroutila**
- ❑ **proti dostředivé gravitaci působí „odstředivá“ síla**

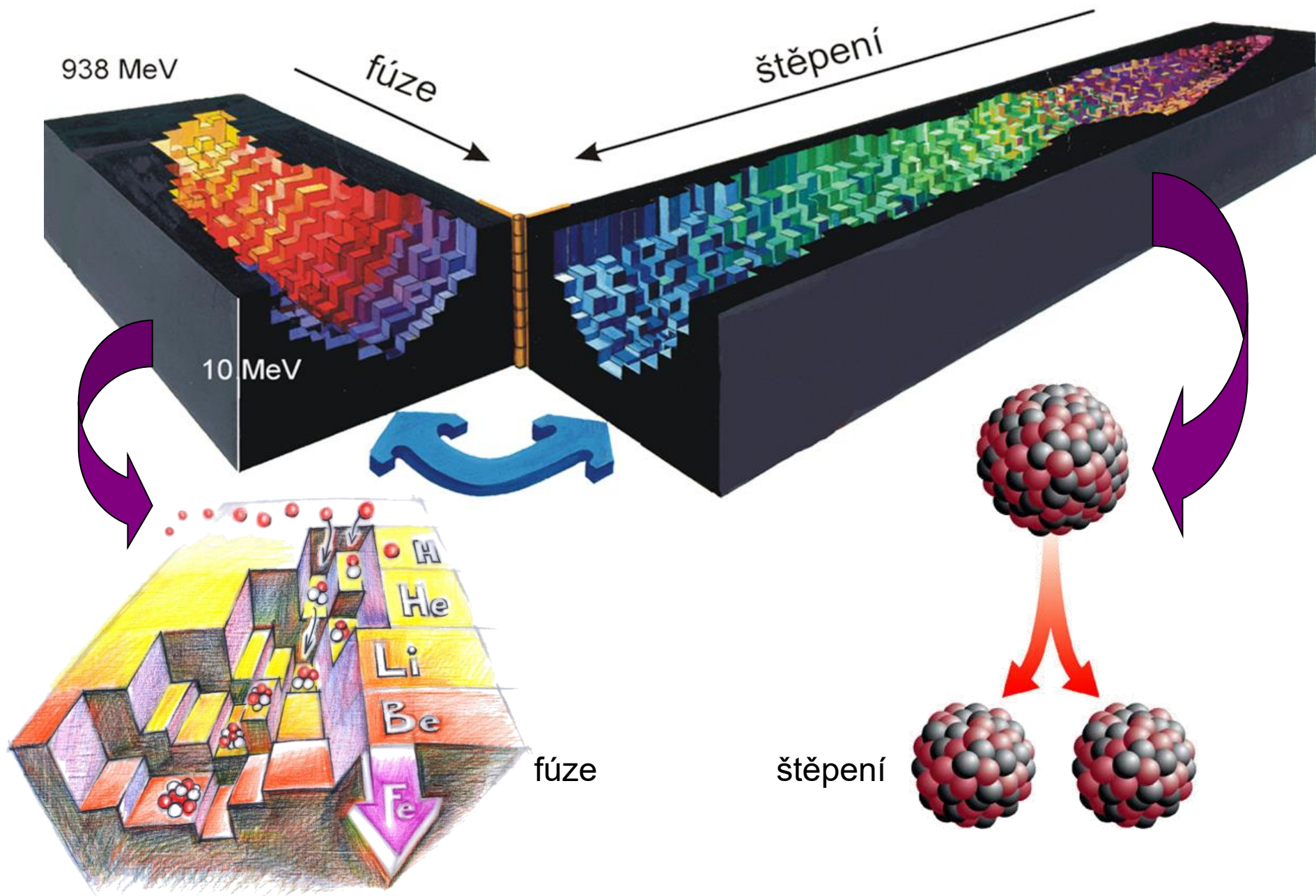


Zdroje hvězdné energie a nukleosyntéza

Nukleosyntéza

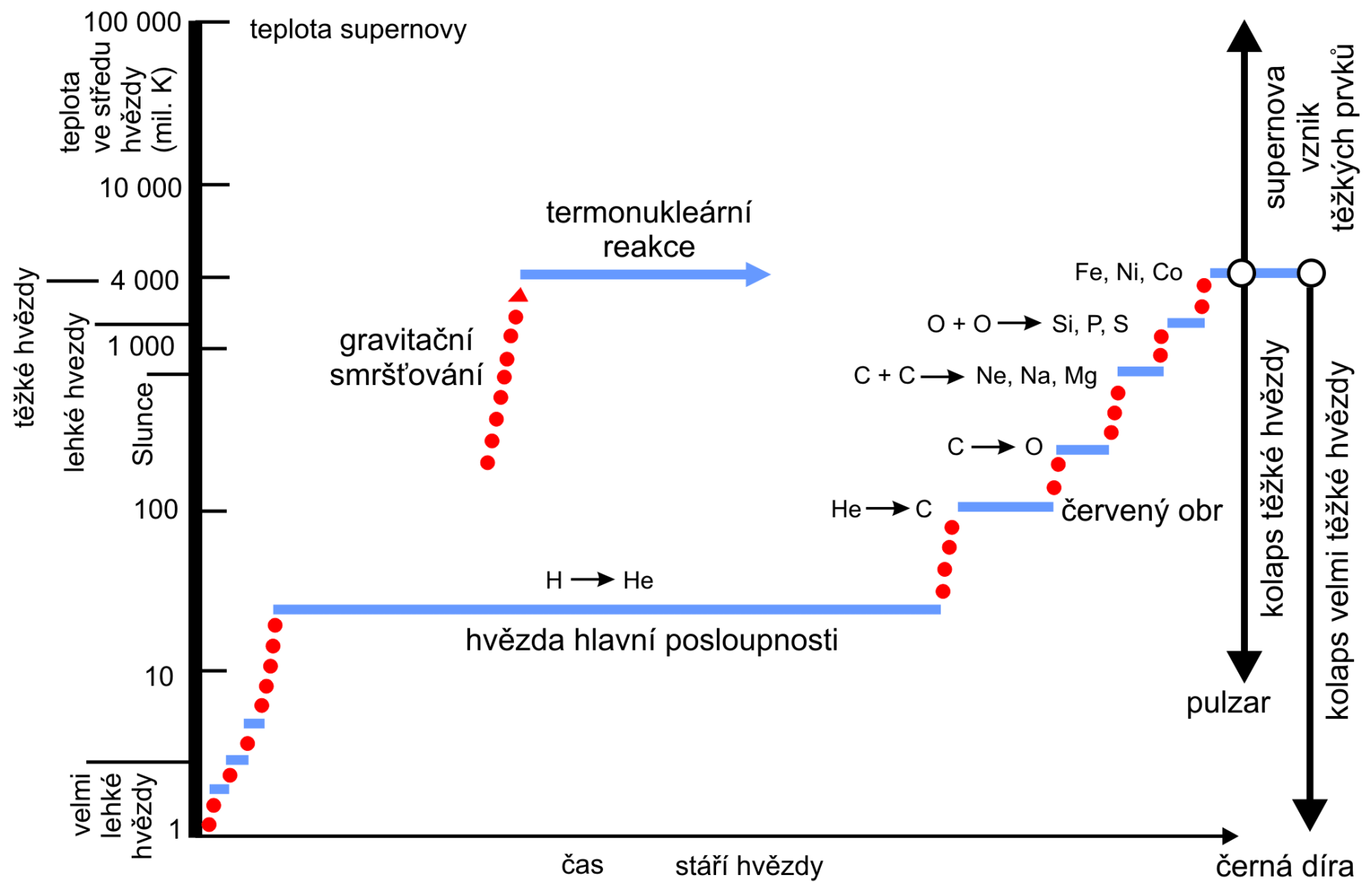


Fúze a štěpení



Fúze ve hvězdách

H (71 %), He (23 %), O (1 %)



Nukleosyntéza ve hvězdách

□ s rostoucím Z slučovaných prvků:

- roste potřebná teplota
- klesá energetický výtěžek na nukleon
- minimum výtěžnosti u prvků skupiny železa (reakce při teplotě 4×10^9 K)

□ tvorba těžších prvků:

- **α -proces**: postupné napojování částic α
→ syntéza prvků až po ^{40}Ca ($T \sim 10^9$ K)
- **s -proces**: Zachycení neutronů v atomových jádrech. Proces je relativně pomalý ve srovnání s probíhajícím β rozpadem → vznikají lehčí izotopy.
- **r -proces**: Stejný princip jako s -proces, probíhá ovšem mnohem rychleji (při vysokém toku neutronů). Umožňuje vznik jader těžších než železo (až po uran).

□ neutrony vznikají v dostatečném množství pouze v supernovách

Příčina hvězdného vývoje

- ❑ látka v nitru hvězd se chová velmi podobně jako *ideální plyn*
- ❑ není to divné?
- ❑ není to divné!

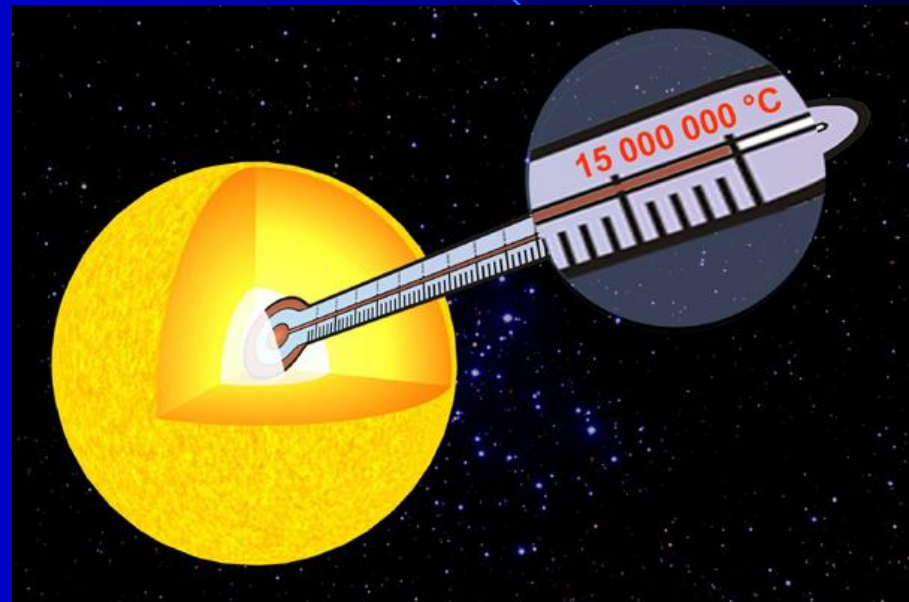
$$P \sim NT/V$$

$$PV \sim NT$$

$$PV = NkT$$

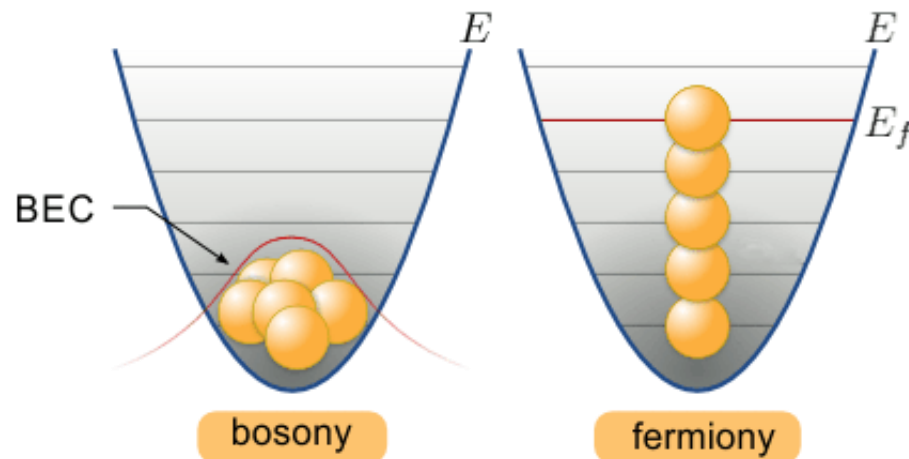
$$P = n kT \quad (n = N/V)$$

- ❑ odhad centrální teploty



Elektronově degenerovaný plyn

- ❑ při vysoké hustotě částice interagují i *mezi srážkami* kvantově mechanické efekty mezi volnými elektrony (Pauliho princip)
- ❑ tlak degenerovaného plynu závisí zejména na koncentraci elektronů, tedy na hustotě
- ❑ degenerovaná látka je obtížně stlačitelná, vlastnostmi připomíná kovy
- ❑ elektronová degenerace nastává při hustotě kolem 5 kg/cm^3
- ❑ degeneraci lze z látky sejmout ohřátím nad teplotu degenerace



Vodíkové reakce

- přeměnou 1 kg vodíku na helium “ubude” 7 g hmoty
uvolní se přitom energie $6,4 \cdot 10^{14} \text{ J}$ ($E = mc^2$)
zářivý výkon Slunce $P_s = 3,85 \cdot 10^{26} \text{ W}$ ($P = E / t$)
→ každou sekundu se na helium přemění $6 \times 10^{11} \text{ kg}$ vodíku
- Souhrnně lze psát: $4 \text{ } ^1\text{H} \rightarrow \text{ } ^4\text{He} + 2 \text{ e}^+ + 2 \text{ } \nu_e + 2 \gamma$

Proton-protonový řetězec

- účinnost jaderné syntézy silně závisí na teplotě
při teplotě 8 - 18 milionů K se nejvíce uplatňuje *proton-protonový řetězec*

- tempo určuje první reakce *p-p* řetězce:

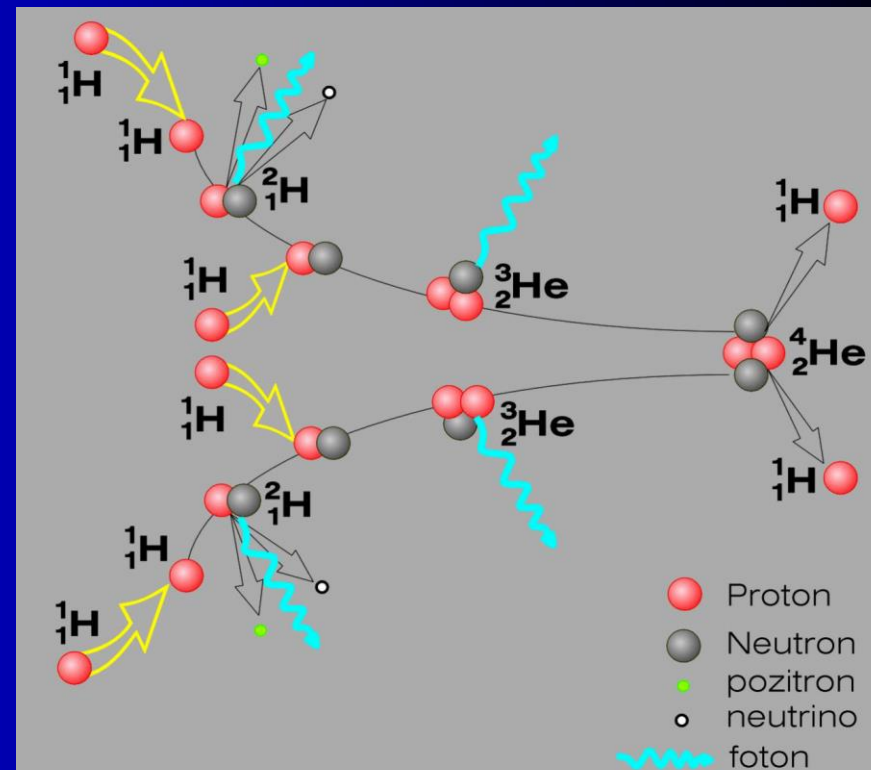


dostatečně prudká srážka protonů jednou za 10^{10} let!

nutnost kvantového „tunelování“

závislost na 4. – 6. mocnině teploty

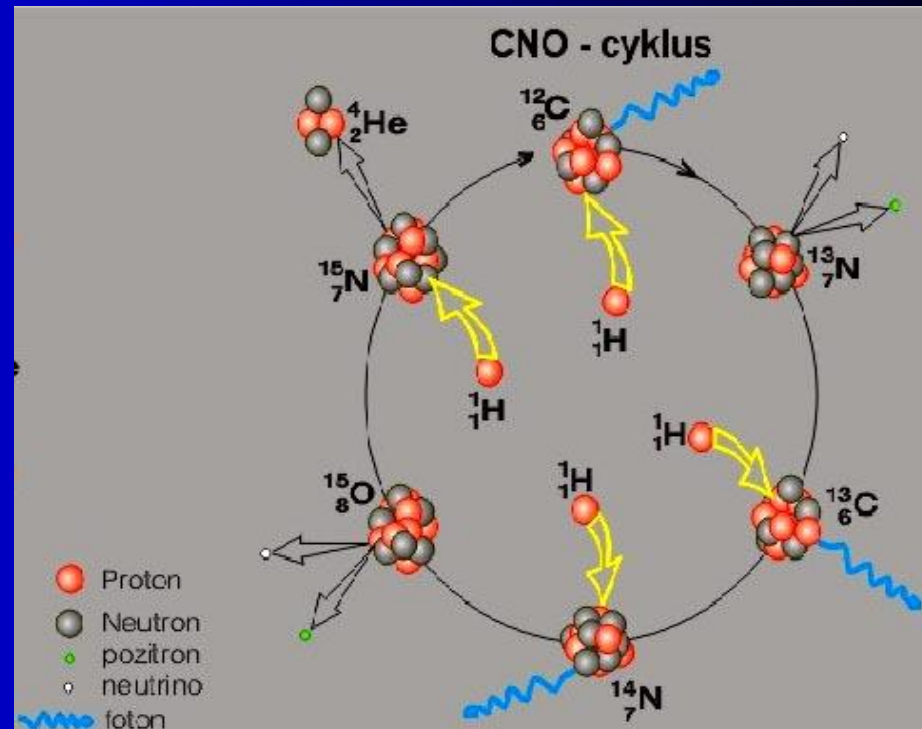
- Jedna z variant průběhu *p-p* řetězce:



CNO cyklus

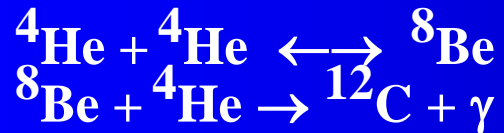
□ probíhá při teplotách nad 18×10^6 K
závislost rychlosti na 16. – 18. mocnině teploty

□ jedna z variant cyklu:



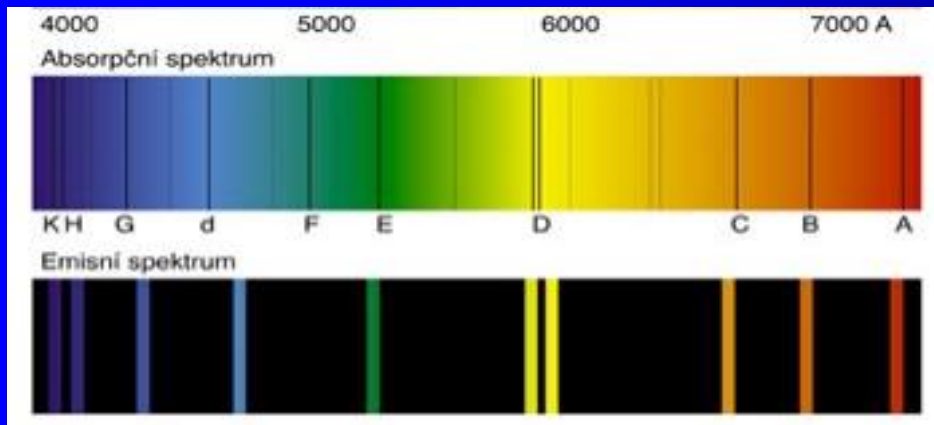
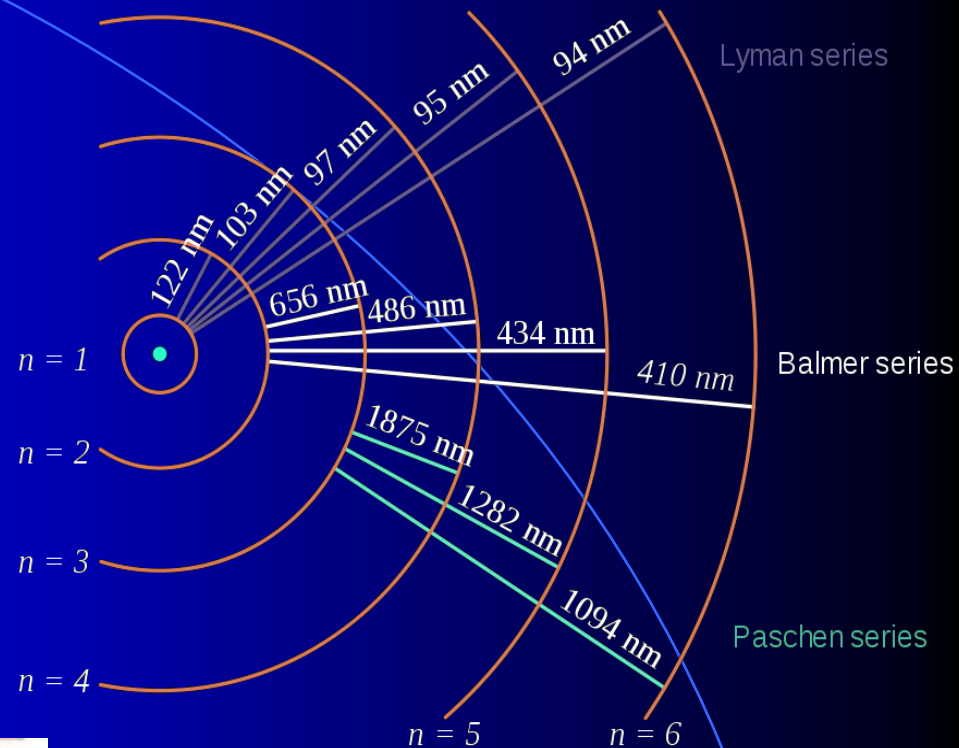
Heliové reakce

- v heliovém jádru může probíhat tzv. *Salpeterova reakce* (*3 α reakce*):



- zápalná teplota kolem 10^8 K
- tempo je úměrné 30. mocnině teploty
- zásoby helia se spotřebují o řád rychleji než zásoby vodíku (Slunce spaluje H deset miliard let, ale He jen sto milionů let)

Záření hvězd

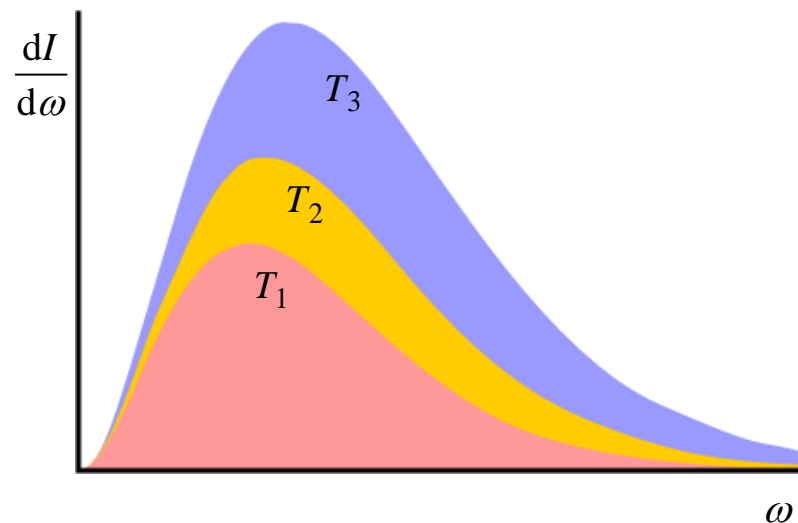
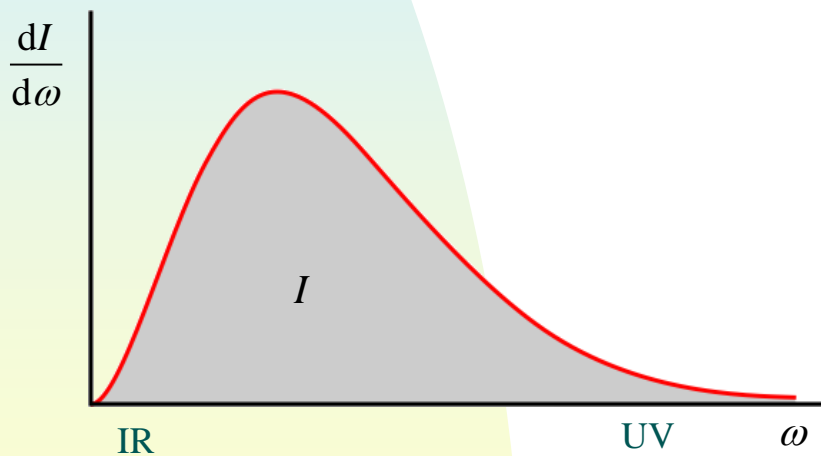


**záření absolutně černého tělesa
a vznik spektra hvězd**

záření absolutně černého tělesa

$$\frac{dI}{d\omega} = A \frac{\omega^3}{e^{\frac{\hbar\omega}{k_B T}} - 1}; \quad \frac{dI}{d\lambda} = -\frac{B}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{2\pi\hbar c}{\lambda k_B T}} - 1} d\lambda$$

deriváty



$$I = \sigma_B T^4; \quad \sigma_B = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

Stefanův-Boltzmannův zákon

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}; \quad b = 0.00289 \text{ K} \cdot \text{m}$$

Wienův posunovací zákon