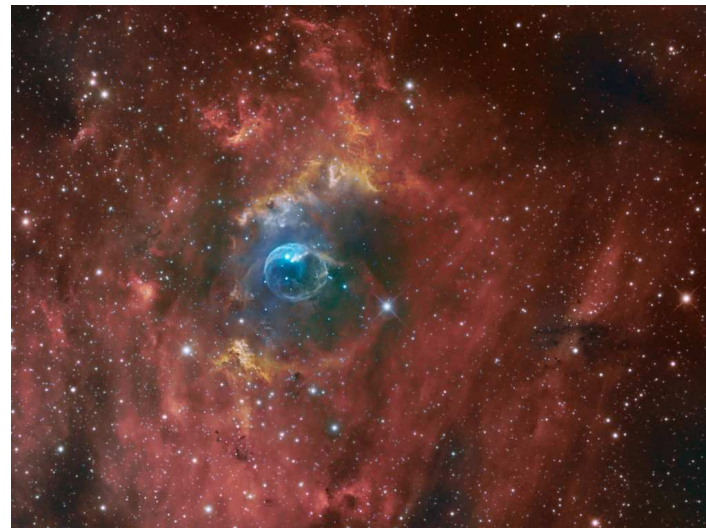

Horké hvězdy

prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky
Masarykova univerzita, Brno



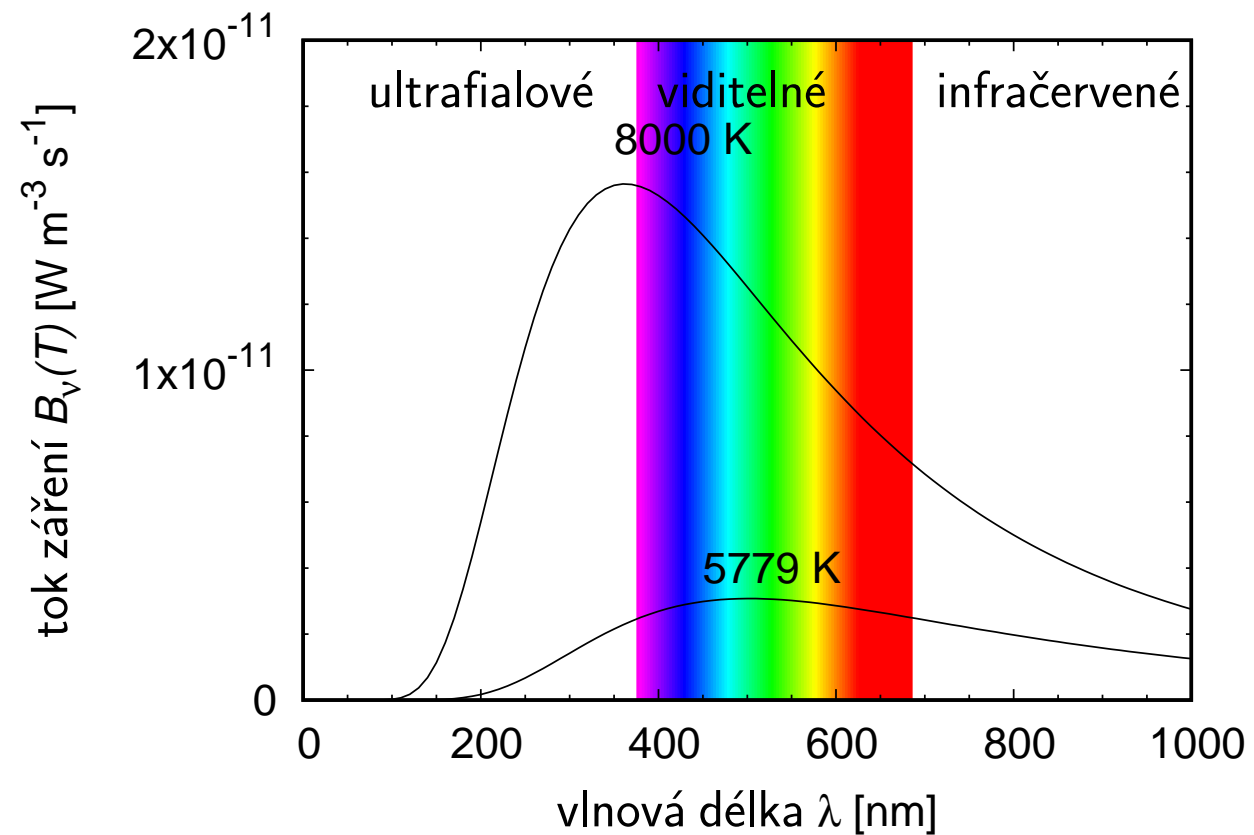


Horké hvězdy

- povrchové teploty vyšší než 7000 K

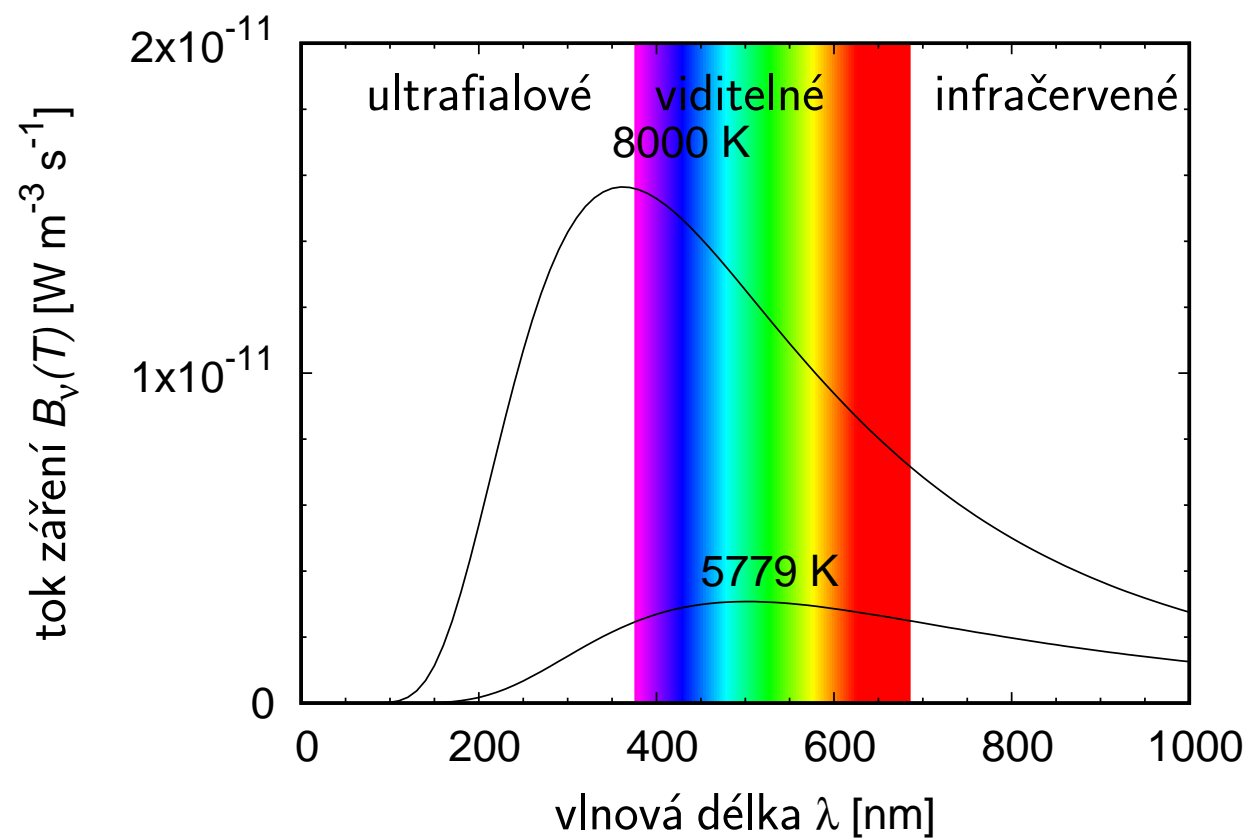
Horké hvězdy

- povrchové teploty vyšší než 7000 K



Horké hvězdy

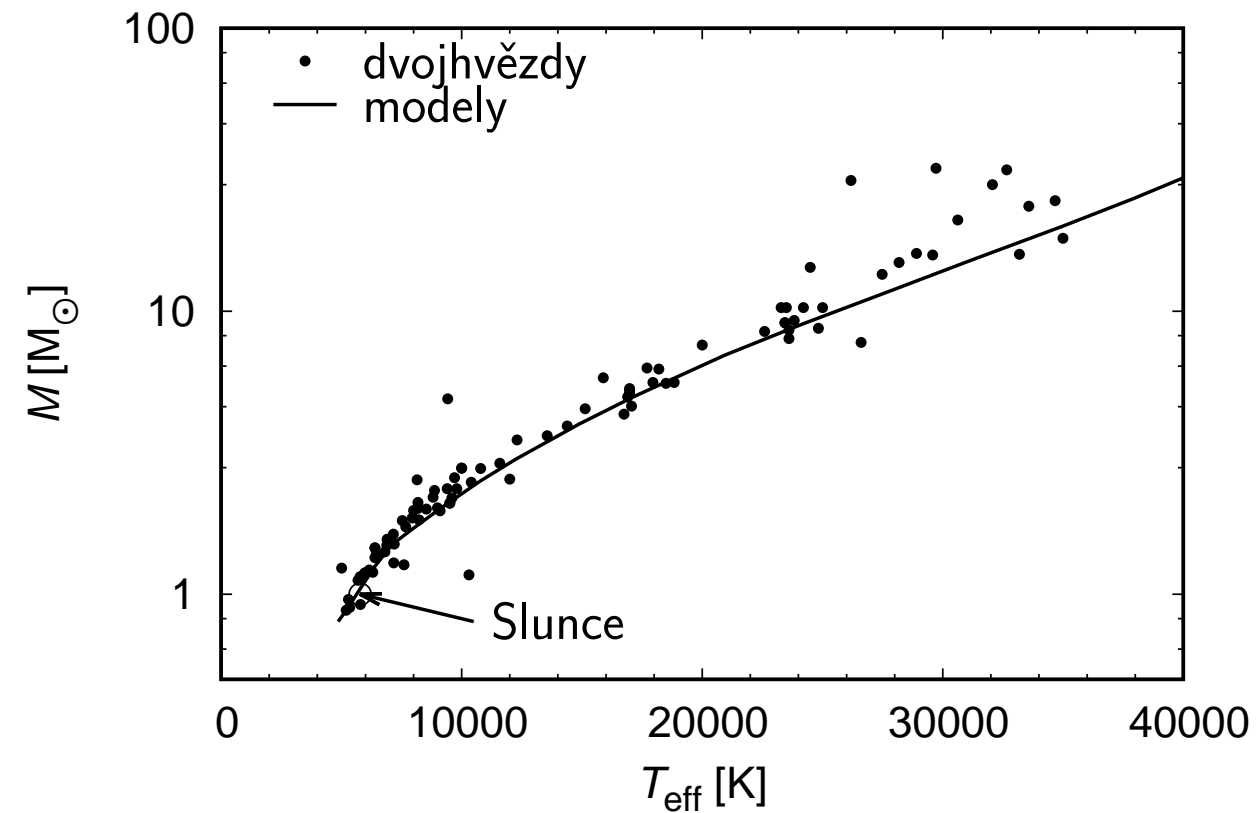
- povrchové teploty vyšší než 7000 K
- namodralá barva





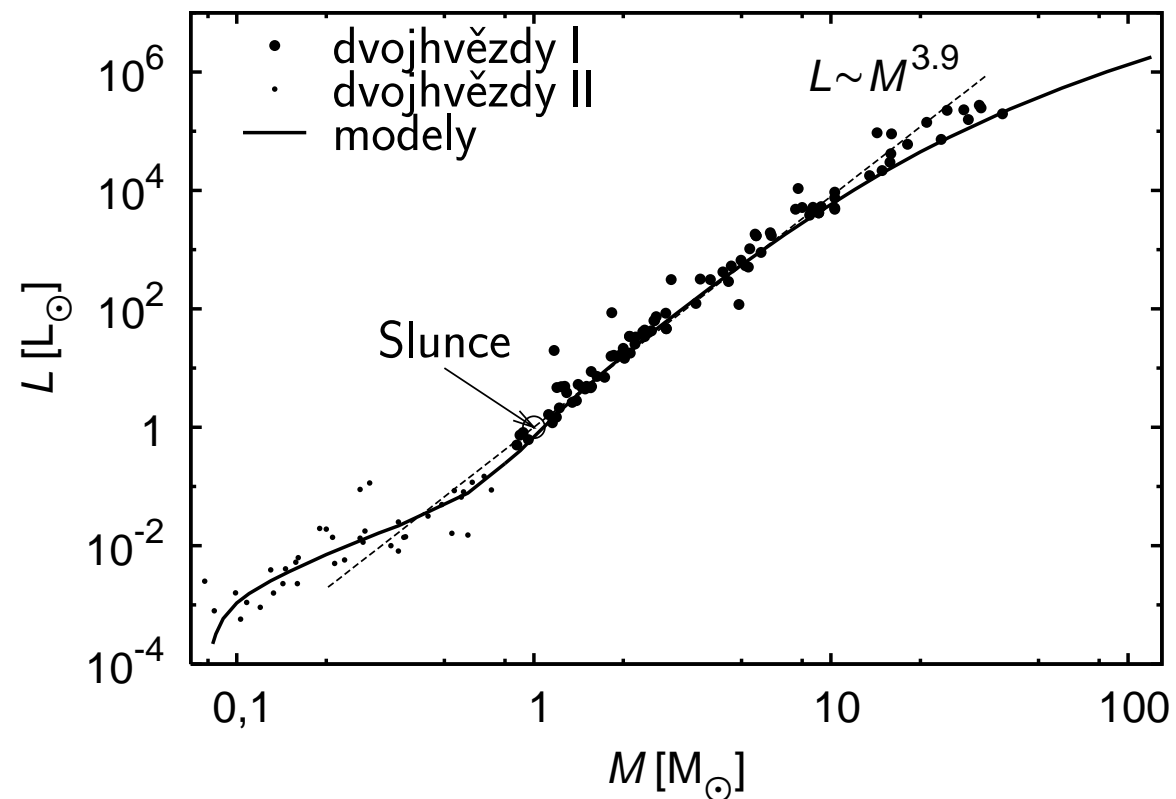
Horké hvězdy

- povrchové teploty vyšší než 7000 K
- namodralá barva
- typicky velmi hmotné hvězdy



Horké hvězdy

- povrchové teploty vyšší než 7000 K
- namodralá barva
- typicky velmi hmotné hvězdy
- typicky velmi zářivé hvězdy



Horké hvězdy

- povrchové teploty vyšší než 7000 K
- namodralá barva
- typicky velmi hmotné hvězdy
- typicky velmi zářivé hvězdy
- zhruba třetina hvězd na obloze, ale jen dvacetina v Galaxii

Jak vznikají hvězdy

James Jeans: smršťování mračna s hmotností M

Jak vznikají hvězdy

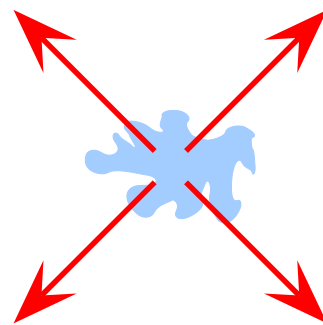
James Jeans: smršťování mračna s hmotností M



$$M < M_J$$

Jak vznikají hvězdy

James Jeans: smršťování mračna s hmotností M

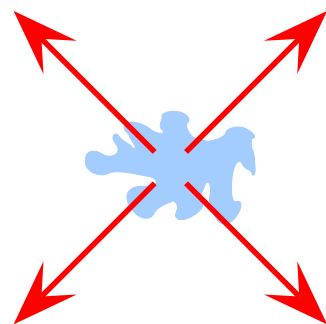


rozpad

$$M < M_J$$

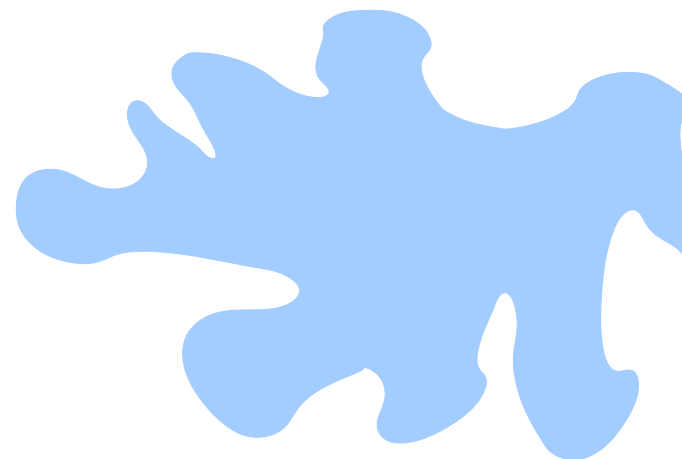
Jak vznikají hvězdy

James Jeans: smršťování mračna s hmotností M



rozpad

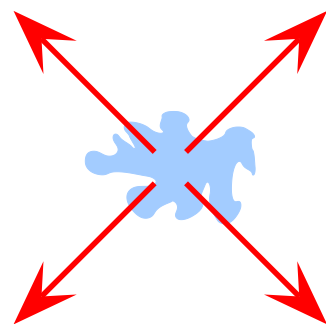
$$M < M_J$$



$$M > M_J$$

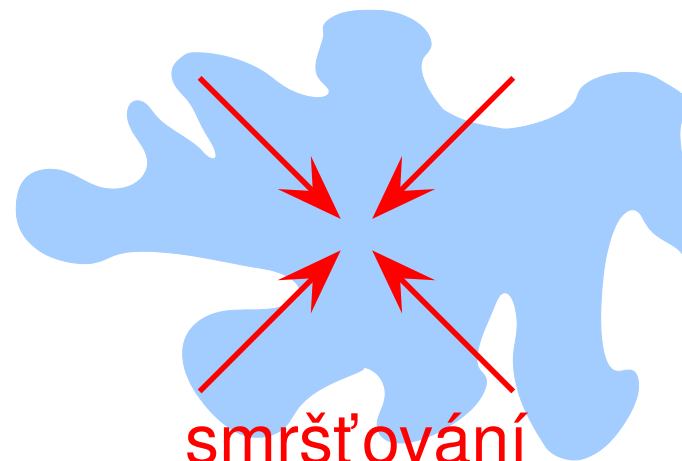
Jak vznikají hvězdy

James Jeans: smršťování mračna s hmotností M



rozpad

$$M < M_J$$

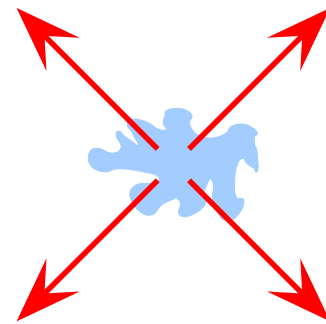


smršťování

$$M > M_J$$

Jak vznikají hvězdy

James Jeans: smršťování mračna s hmotností M



rozpad

$$M < M_J$$



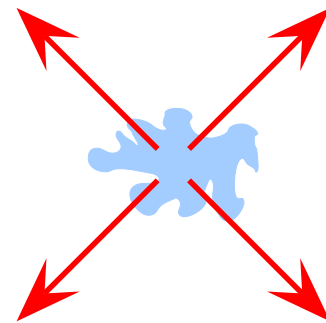
smršťování

$$M > M_J$$

$$M_J = \sqrt{\frac{3}{4\pi\rho} \left(\frac{5kT}{G\mu m_H} \right)^3}$$

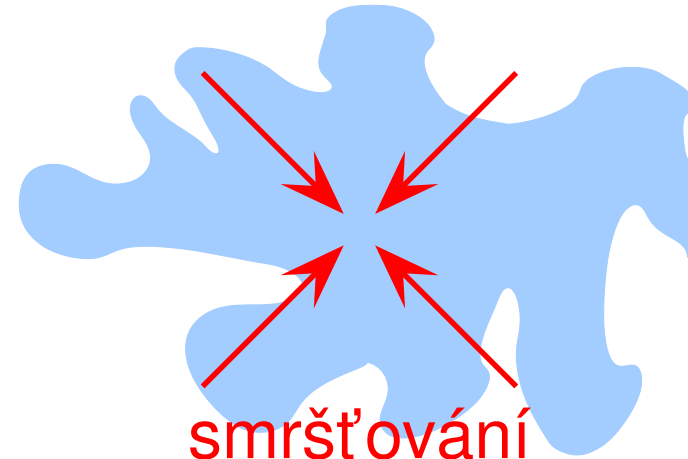
Jak vznikají hvězdy

James Jeans: smršťování mračna s hmotností M



rozpad

$$M < M_J$$



smršťování

$$M > M_J$$

$$M_J \approx 2,3 M_{\odot} \left(\frac{n}{10^{12} \text{ m}^{-3}} \right)^{-1/2} \left(\frac{T}{10 \text{ K}} \right)^{3/2}$$





Horké hvězdy hlavní posloupnosti

- chemické složení hvězd na počátku odráží složení prvotní mlhoviny: převážně vodík

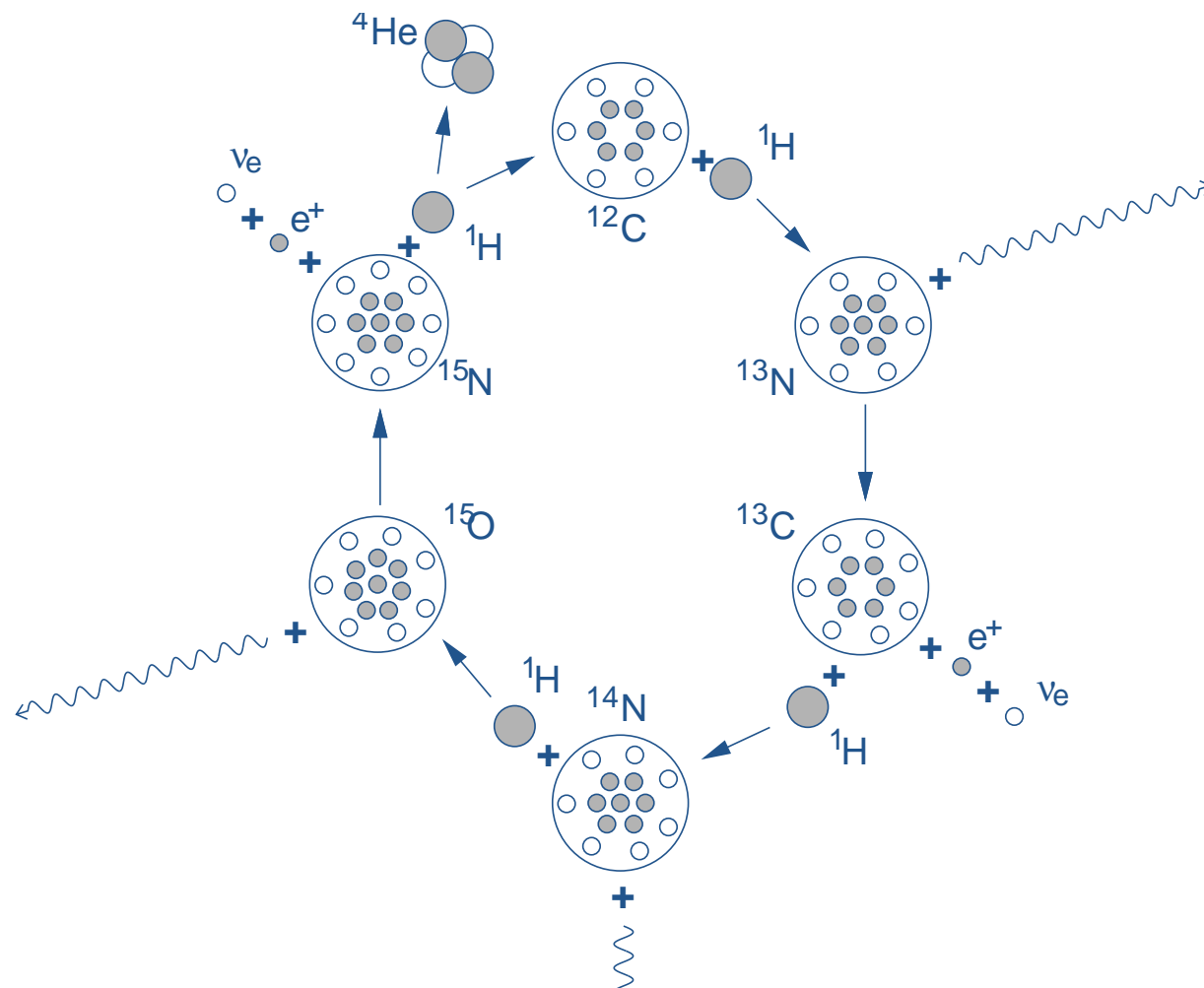
Horké hvězdy hlavní posloupnosti

- **hlavní posloupnost**: zářivý výkon hvězdy hrazen na úkor jaderného hoření vodíku v centru



Horké hvězdy hlavní posloupnosti

- hlavní posloupnost: zářivý výkon hvězdy hrazen na úkor jaderného hoření vodíku v centru: CNO cyklus



Horké hvězdy hlavní posloupnosti

- **hlavní posloupnost:** zářivý výkon hvězdy hrazen na úkor jaderného hoření vodíku v centru: CNO cyklus
- horké hvězdy mají typicky několikanásobně vyšší hmotnosti než Slunce, ale zářivé výkony až o šest řádů vyšší
- jepičí délka života hmotných horkých hvězd: milióny let



Proč jsou hmotné hvězdy zářivější?

- hmotné hvězdy větší a teplejší
 - ⇒ průhlednější pro procházející záření
 - ⇒ více fotonů přenáší energii
- ⇒ nutný větší výkon jaderných reakcí



Zářivá síla?

- předpověď:
James Clerk Maxwell:
A Treatise on Electricity and Magnetism (1873)
- experimentální ověření:
Pyotr Nikolaevich Lebedev,
Eenest Nichols a Gordon Hull
(1901)



Zářivá síla?

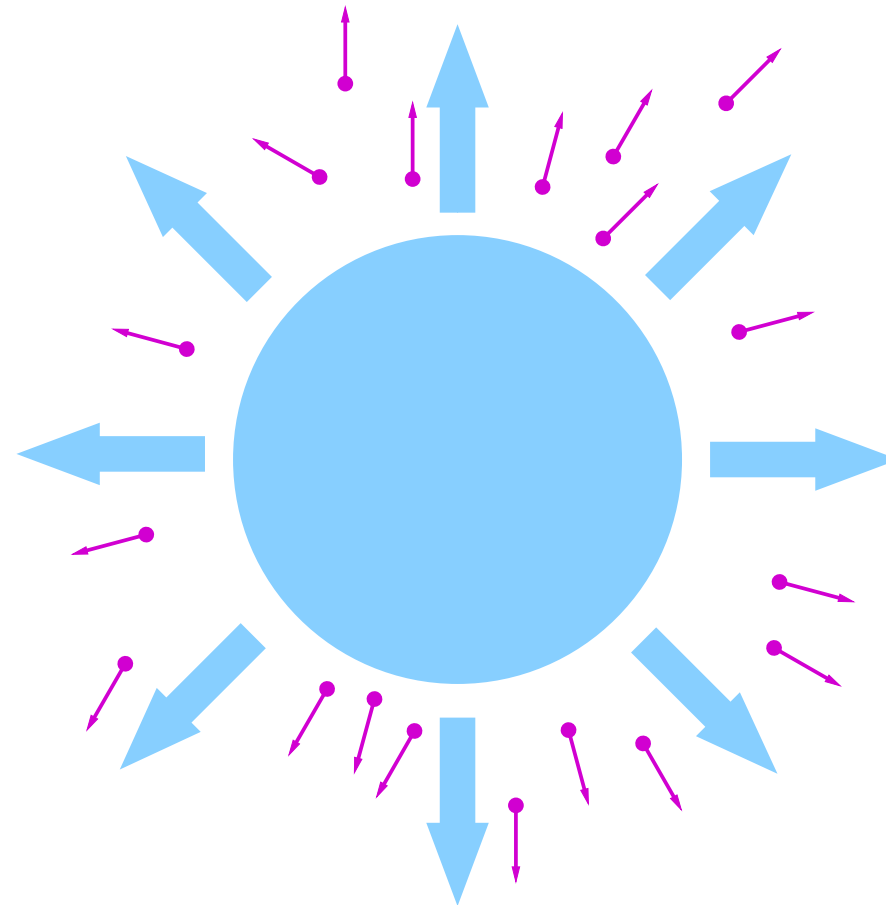
- předpověď:
James Clerk Maxwell:
A Treatise on Electricity and Magnetism (1873)
- experimentální ověření:
Pyotr Nikolaevich Lebedev,
Eenest Nichols a Gordon Hull
(1901)
- fotony mají energii $E_\nu = h\nu$, ale také hybnost

$$p_\nu = \frac{E_\nu}{c}$$

- urychlování látky v důsledku absorpce záření
těžšími prvky \Rightarrow hvězdný vítr



Zářením hnaný vítr horkých hvězd



Zářením hnaný vítr horkých hvězd

- míra ztráty hmoty v důsledku absorpce záření v jedné výrazné čáře (L je zářivý výkon hvězdy)

$$\dot{M} \approx \frac{L}{c^2}$$

Zářením hnaný vítr horkých hvězd

- míra ztráty hmoty v důsledku absorpce záření v jedné výrazné čáře (L je zářivý výkon hvězdy)

$$\dot{M} \approx \frac{L}{c^2}$$

- míra ztráty hmoty až $10^{-6} - 10^{-5} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$

Zářením hnaný vítr horkých hvězd

- míra ztráty hmoty v důsledku absorpce záření v jedné výrazné čáře (L je zářivý výkon hvězdy)

$$\dot{M} \approx \frac{L}{c^2}$$

- míra ztráty hmoty až $10^{-6} - 10^{-5} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$
- rychlost větru až řádově 10^3 km s^{-1}

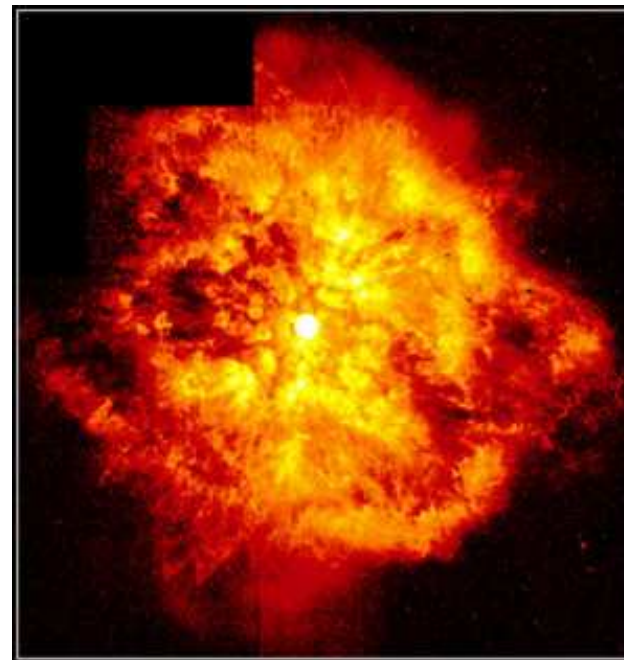
Je vítr horkých hvězd důležitý?

- nejhmotnější horké hvězdy mají hmotnost $\sim 10 M_{\odot}$
 - doba života těchto hvězd $\sim 10^6$ let
 - ztrácí hvězdným větrem $\sim 10^{-6} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$
 - horké hvězdy ztrácí hvězdným větrem podstatnou část své hmoty
- ⇒ hvězdný vítr zásadně ovlivňuje vývoj horkých hvězd

Obroušená jádra hvězd: hvězdy typu WR

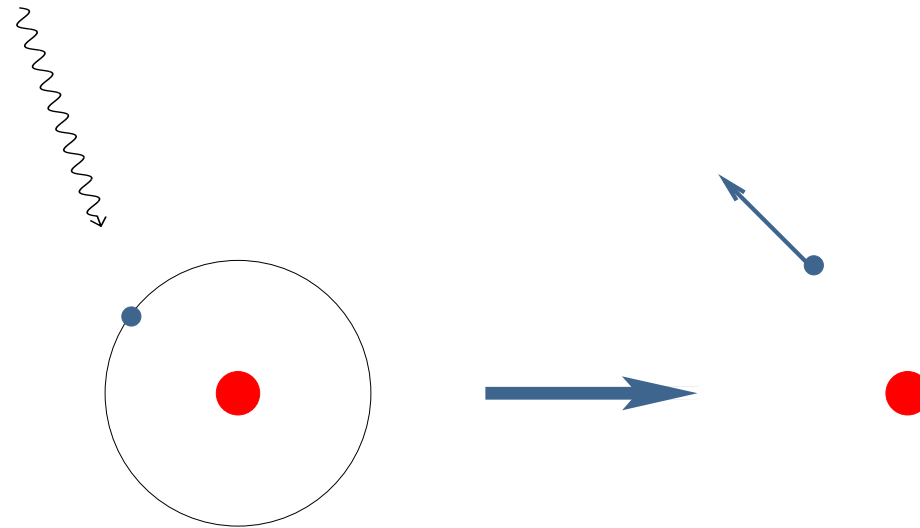
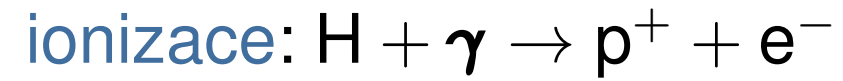
- velmi hmotné hvězdy: obroušení povrchové slupky větry
- odhalení jádra obohaceného produkty jaderných reakcí
- hvězdy s nadbytkem He, C, N, O

⇒ **Wolfovy-Rayetovy hvězdy**



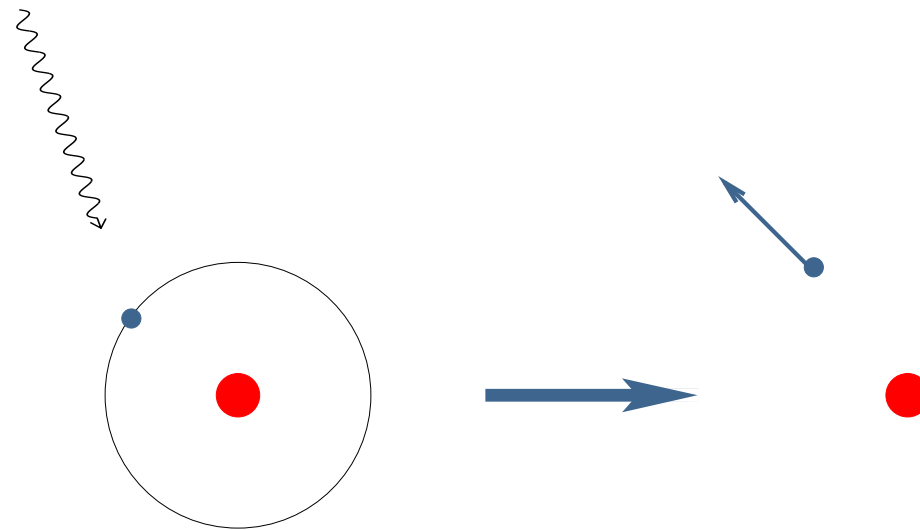
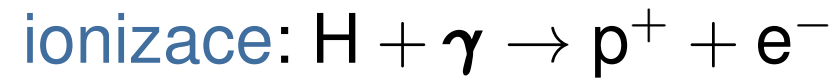


Ionizace vodíku v okolí horkých hvězd



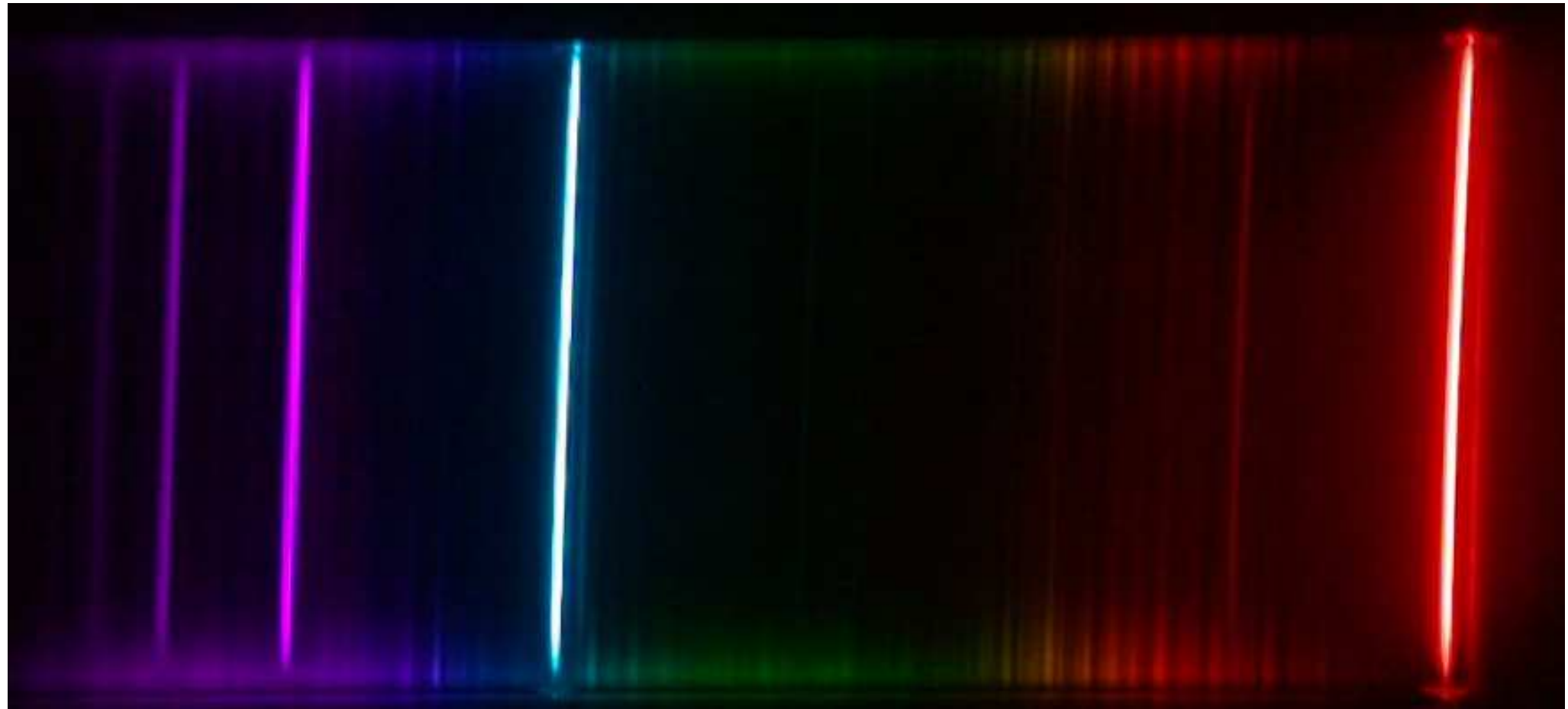
- záření horkých hvězd energetické, ionizuje látku ve svém okolí

Ionizace vodíku v okolí horkých hvězd



- záření horkých hvězd energetické, ionizuje látku ve svém okolí
- při obráceném procesu (**rekombinace**) vzniká charakteristické čarové spektrum

Ionizace vodíku v okolí horkých hvězd



- při obráceném procesu (**rekombinace**) vzniká charakteristické čarové spektrum







Přenos energie ve hvězdách

konvekce



záření



Přenos energie ve hvězdách

konvekce



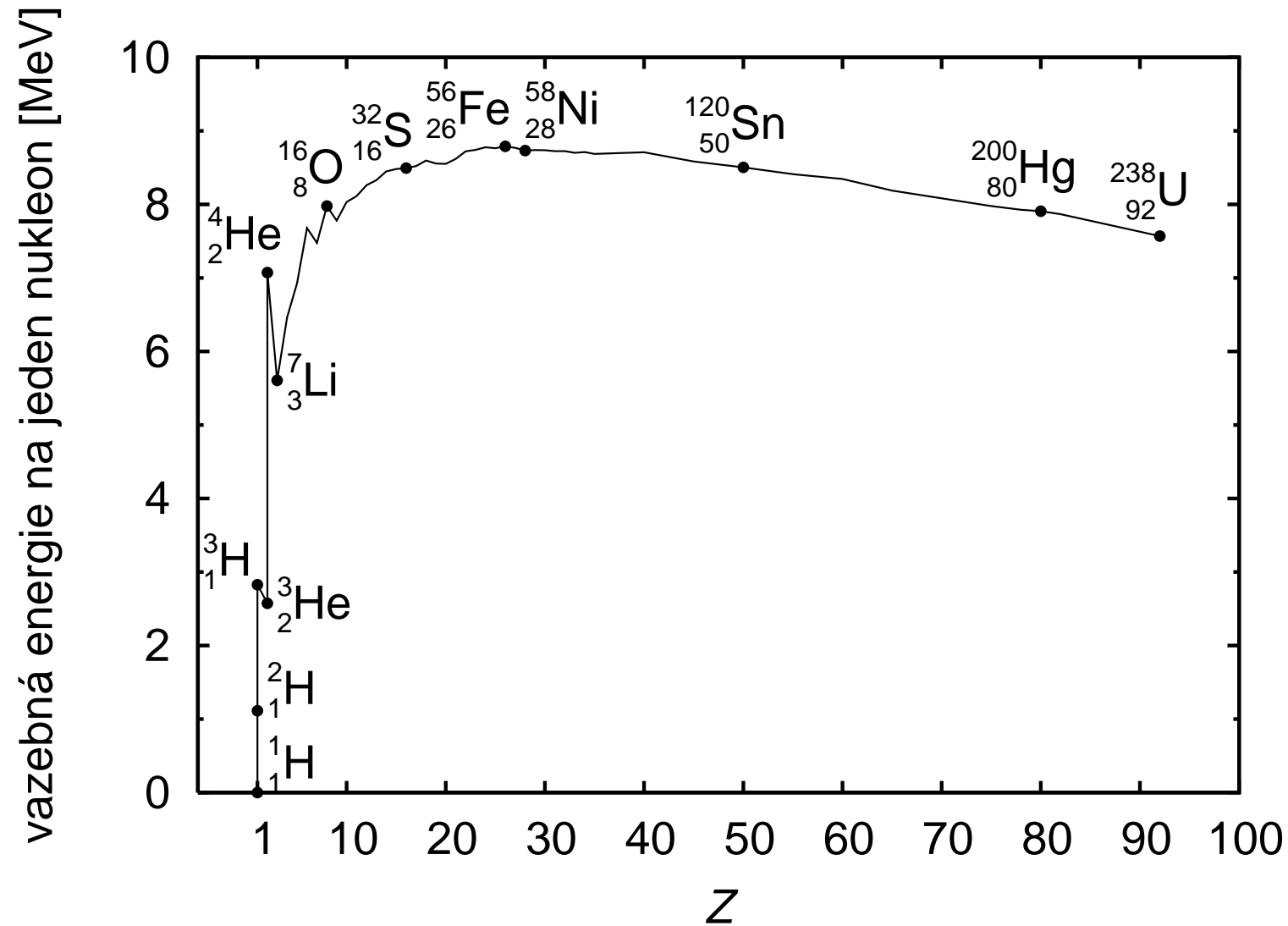
$$T \lesssim 7000 \text{ K}$$

záření

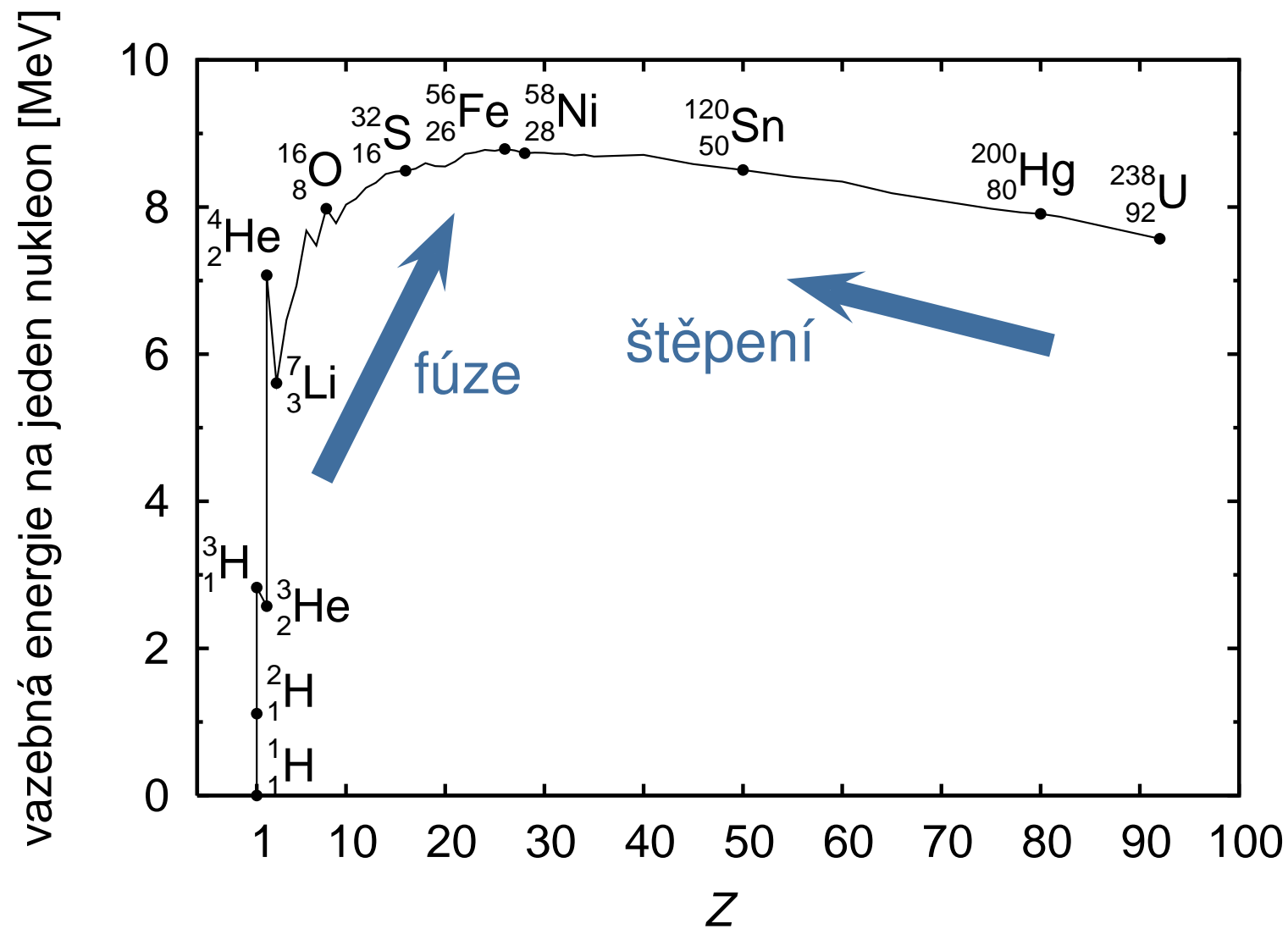


$$T \gtrsim 7000 \text{ K}$$

Vazebná energie jader



Vazebná energie jader



Pozdní vývoj hmotných horkých hvězd

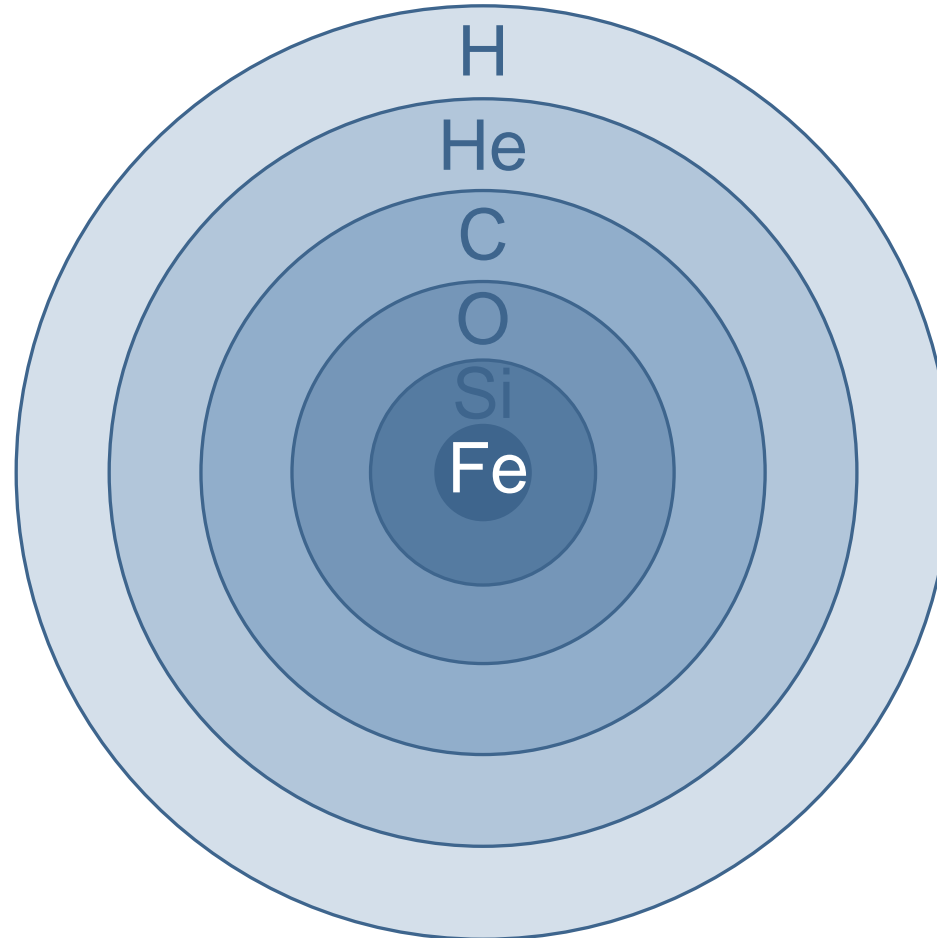
- postupně se zapalují těžší a těžší prvky

H → He → C → O → Si → Fe

Pozdní vývoj hmotných horkých hvězd

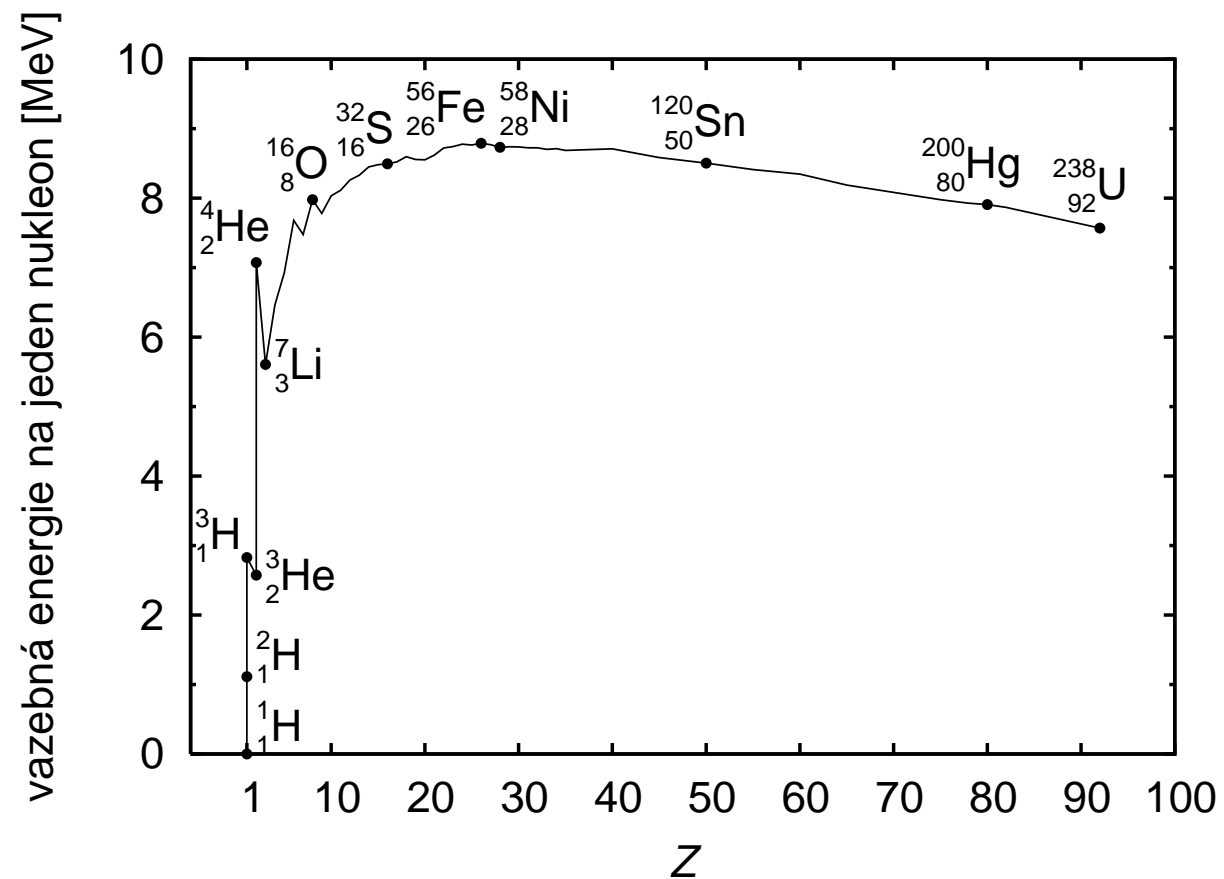
- postupně se zapalují těžší a těžší prvky

H → He → C → O → Si → Fe



Grandiózní finále: výbuch supernovy

- na konci svého vývoje mají hmotné hvězdy železné jádro
- spalováním železa už hvězdy nezískají žádnou energii



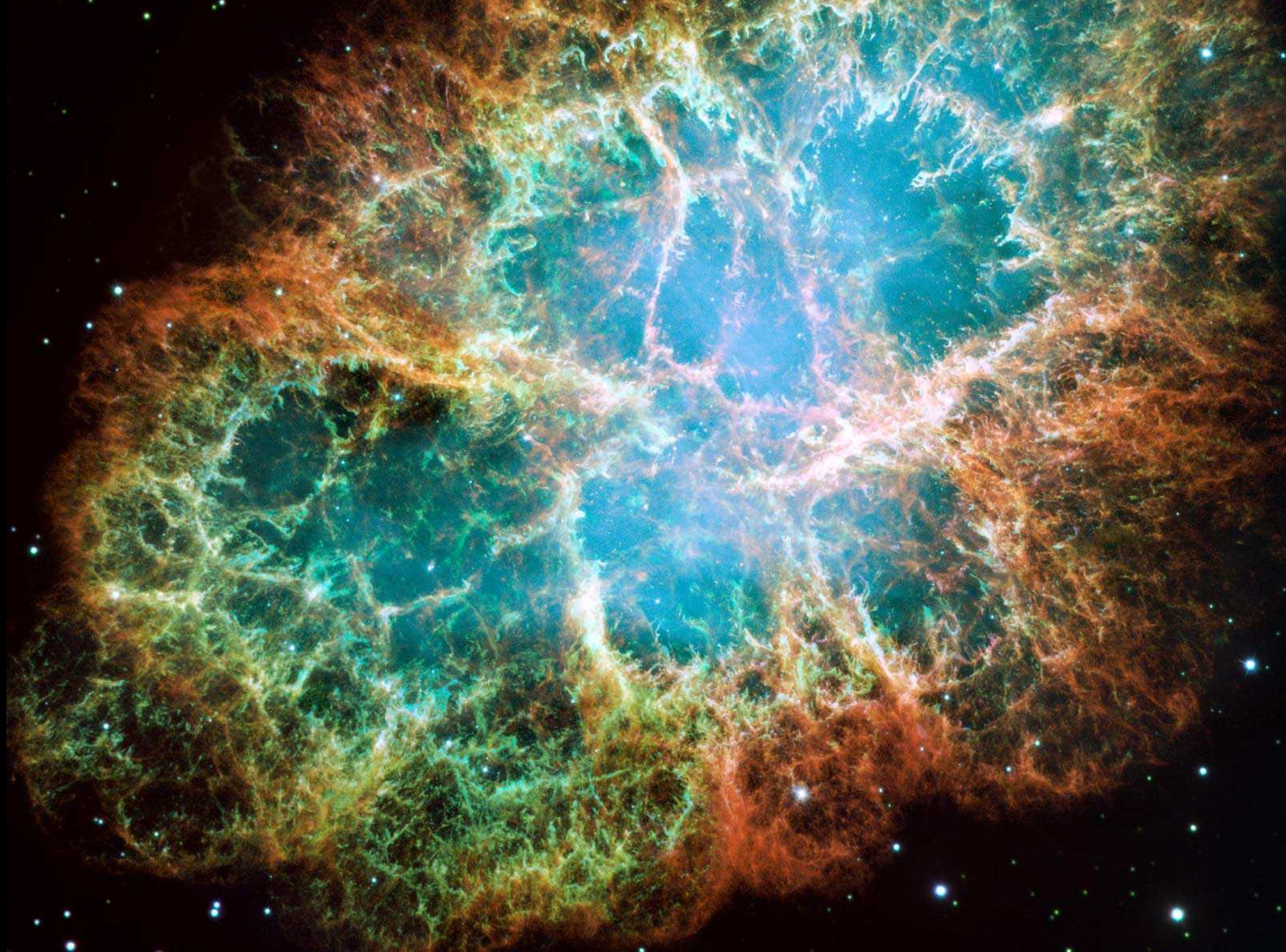
Grandiózní finále: výbuch supernovy

- na konci svého vývoje mají hmotné hvězdy železné jádro
 - spalováním železa už hvězdy nezískají žádnou energii
 - železné jádro dosáhne kritické hmotnosti a dojde k jeho zhroucení
 - vzniká neutronová hvězda, obálka rozptýlena do okolí
- ⇒ supernova typu II nebo Ib
- jasnost supernovy srovnatelná s jasností celé galaxie

SN 1993J
M81







Grandiózní finále: výbuch supernovy

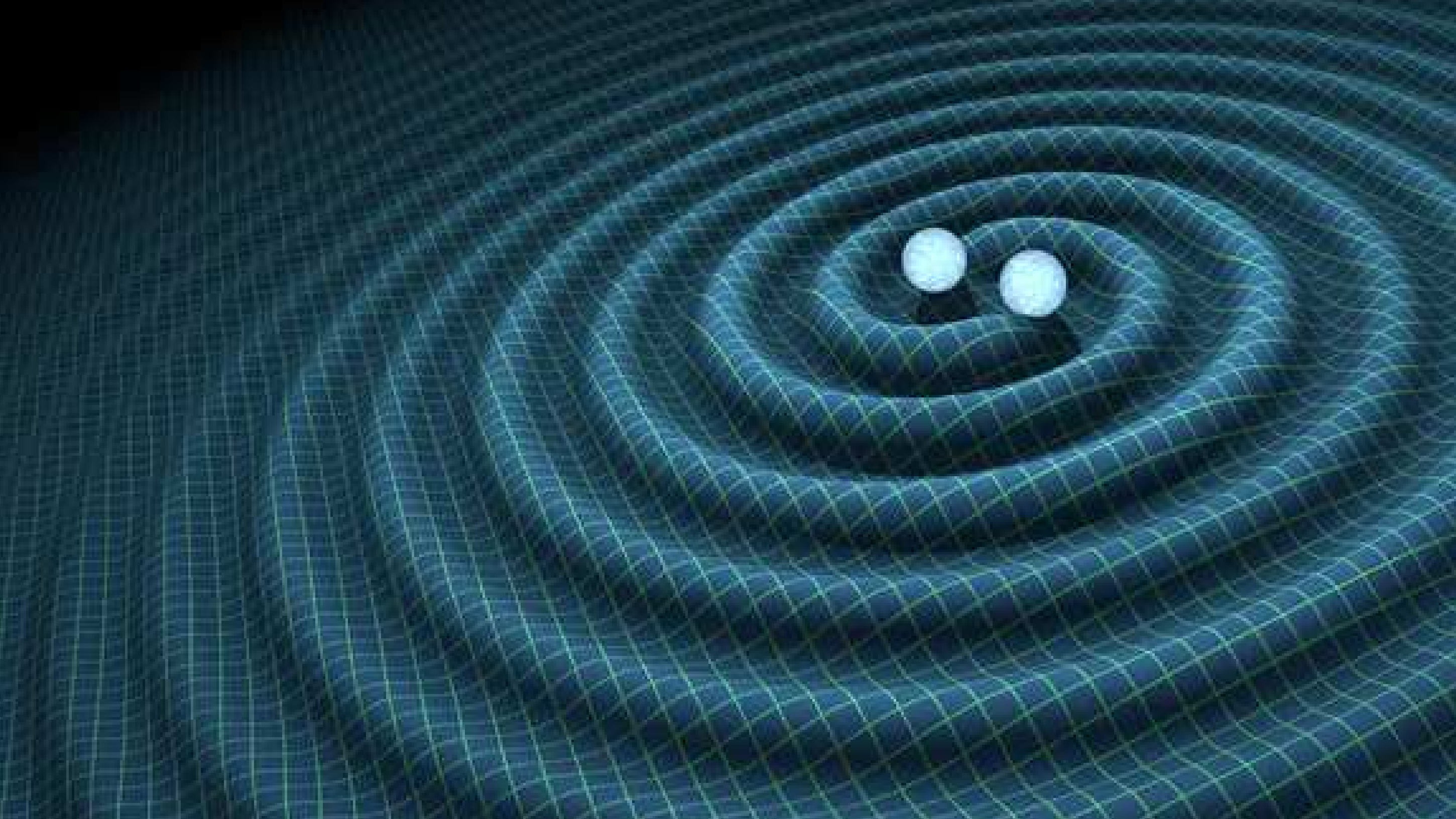
- na konci svého vývoje mají hmotné hvězdy železné jádro
 - spalováním železa už hvězdy nezískají žádnou energii
 - železné jádro dosáhne kritické hmotnosti a dojde k jeho zhroucení
 - vzniká neutronová hvězda nebo černá díra, obálka rozptýlena do okolí
- ⇒ supernova typu II nebo Ib
- obálka se rozptýlí, konec života hvězdy

Grandiózní finále: výbuch supernovy

- na konci svého vývoje mají hmotné hvězdy železné jádro
 - spalováním železa už hvězdy nezískají žádnou energii
 - železné jádro dosáhne kritické hmotnosti a dojde k jeho zhroucení
 - vzniká neutronová hvězda nebo černá díra, obálka rozptýlena do okolí
- ⇒ supernova typu II nebo Ib
- obálka se rozptýlí, konec života hvězdy
 - ... a nebo ne?

Grandiózní finále: druhé dějství

- velká část hmotných hvězd součástí dvojhvězd
- výsledkem vývoje může být soustava složená z neutronových hvězd nebo černých děr
- soustava vyzařuje gravitační vlny



Grandiózní finále: druhé dějství

- velká část hmotných hvězd součástí dvojhvězd
- výsledkem vývoje může být soustava složená z neutronových hvězd nebo černých děr
- soustava vyzařuje gravitační vlny
- v důsledku vyzařování gravitačních vln může dojít ke splynutí obou složek

Grandiózní finále: druhé dějství

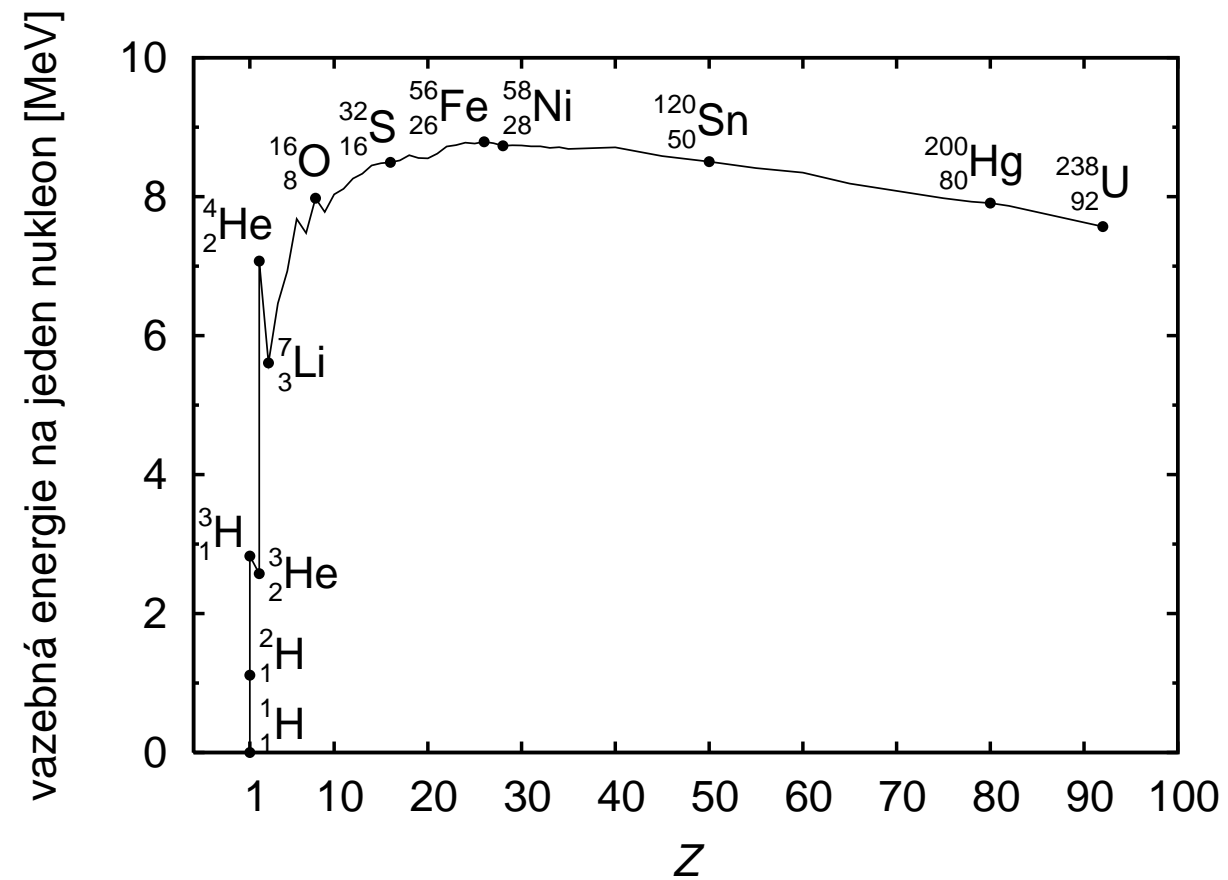
- velká část hmotných hvězd součástí dvojhvězd
- výsledkem vývoje může být soustava složená z neutronových hvězd nebo černých děr
- soustava vyzařuje gravitační vlny
- v důsledku vyzařování gravitačních vln může dojít ke splynutí obou složek
- při splynutí velmi silný zdroj gravitačních vln

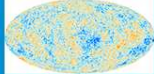
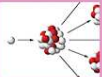






Grandiózní finále: druhé dějství

- velká část hmotných hvězd součástí dvojhvězd
- výsledkem vývoje může být soustava složená z neutronových hvězd nebo černých děr
- soustava vyzařuje gravitační vlny
- v důsledku vyzařování gravitačních vln může dojít ke splynutí obou složek
- při splynutí velmi silný zdroj gravitačních vln
- splynutí neutronových hvězd: výbuch [kilonovy](#)
- tvorba prvků těžších než železo

Grandiózní finále: druhé dějství



1 H	big bang fusion 										cosmic ray fission 					2 He						
3 Li	4 Be	merging neutron stars 										exploding massive stars 					5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	dying low mass stars 										exploding white dwarfs 					13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr					
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe					
55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn					
87 Fr	88 Ra																					
			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu					
			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U																