

Vývoj hvězd na hlavní posloupnosti

Hydrostatická rovnováha

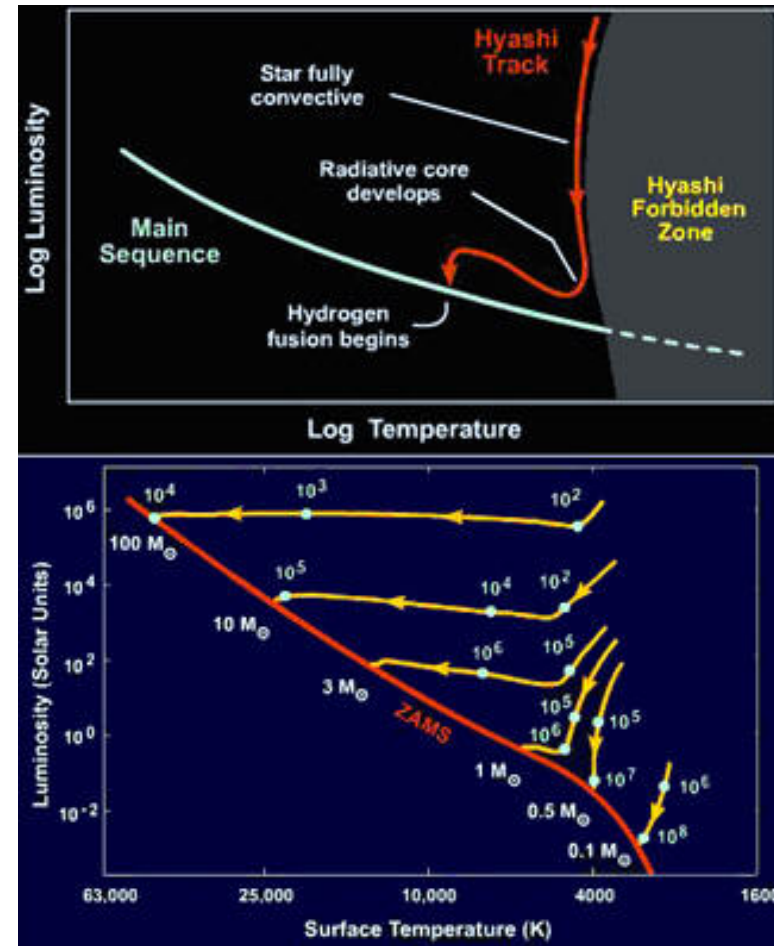
rostoucí teplota jádra => jaderné fúze vodíku rychleji => roste teplota a tlak v jádru => prvotní kolaps zpomaluje až se zcela zastaví (působení gravitace a gradientu tlaku v rovnováze)
gradient tlaku je v rovnováze s gravitací => hvězda se nerozpíná ani nesmršťuje;

Energetická rovnováha

přenos energie je v rovnováze s produkcí energie (ztráty způsobené vyzařováním jsou plně hrazeny z tvorby energie v jádře hvězdy)

Ustavení rovnováh = mez pro 2 vývojové procesy:

1. Ustavení hydrostatické rovnováhy - konec **fáze zrodu protohvězdy**
2. Ustavení energetické rovnováhy – konec **fáze před-HP** (Pre-Main Sequence phase)



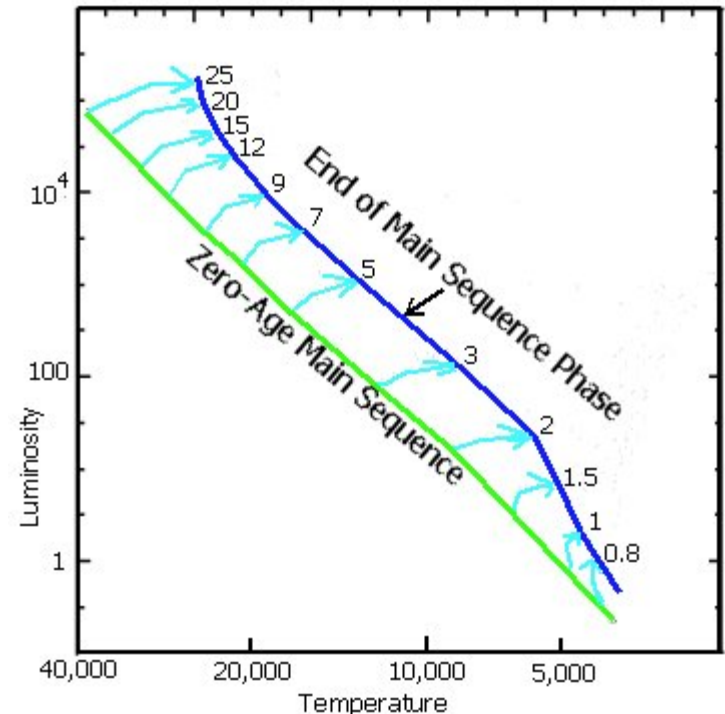
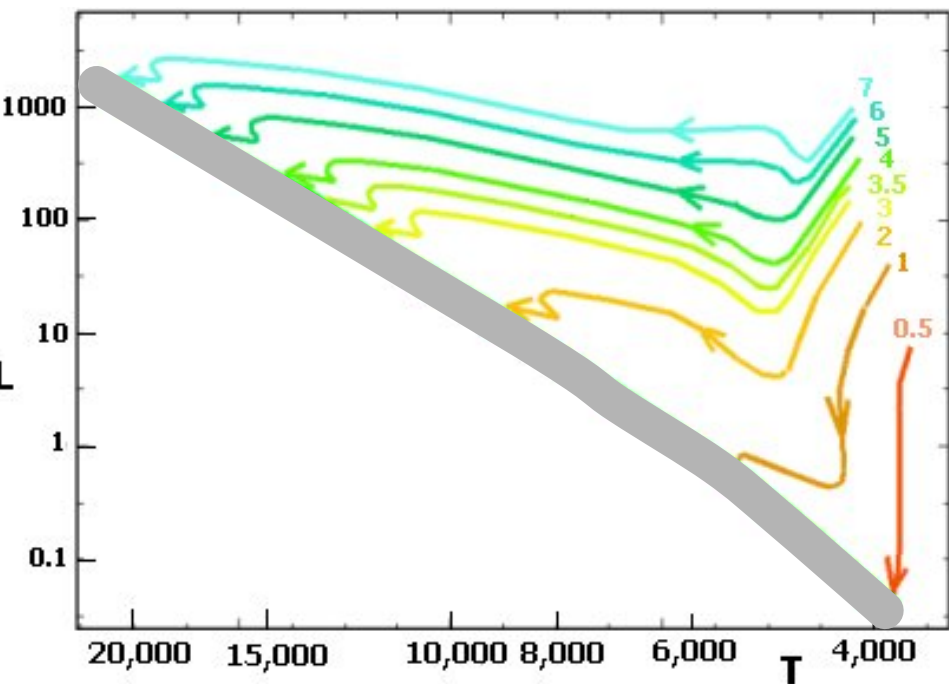
HR diagram - stopa vývoje hvězdy

Hvězda dosedne na hlavní posloupnost (HP) jako plně vyvinutá hvězda v hydrostatické i energiové rovnováze

ale

ZAMS = Zero-Age Main Sequence – hlavní posloupnost nulového stáří, počátek spalování vodíku v jádře

TAMS = Terminal-Age Main Sequence - HP konečného stáří, konec hoření vodíku v jádře



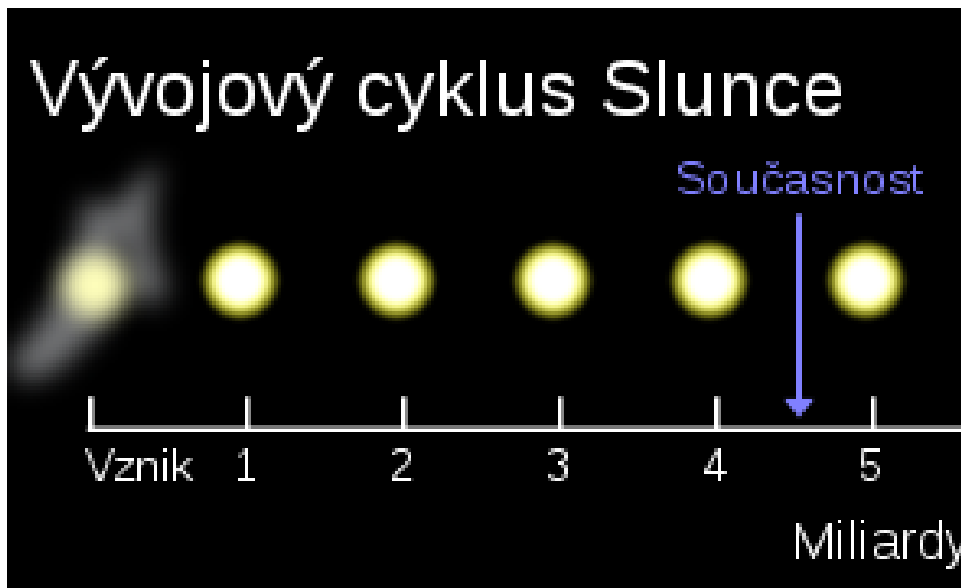
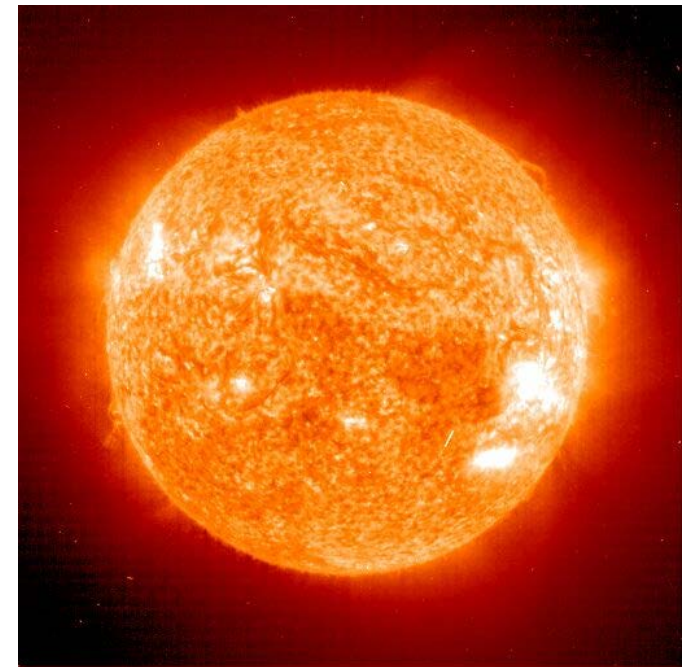
Hvězdy v nejlepších letech

= hvězdy na hlavní posloupnosti

**Slunce – v polovině doby života,
cca polovina vodíku v jádře spálena**

(staré, dobré Slunce v rovnovážném stavu)

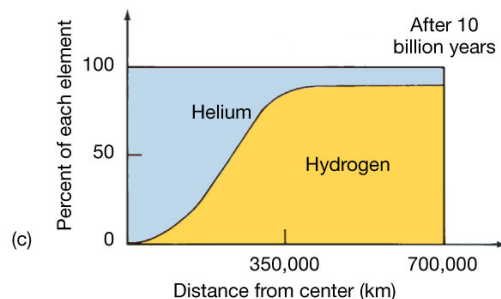
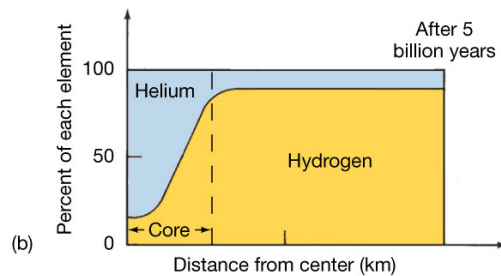
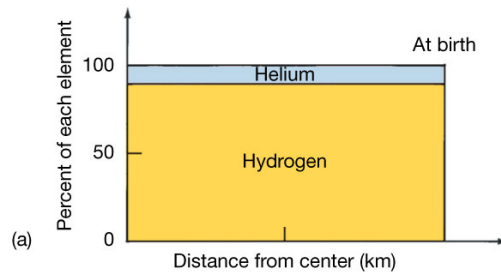
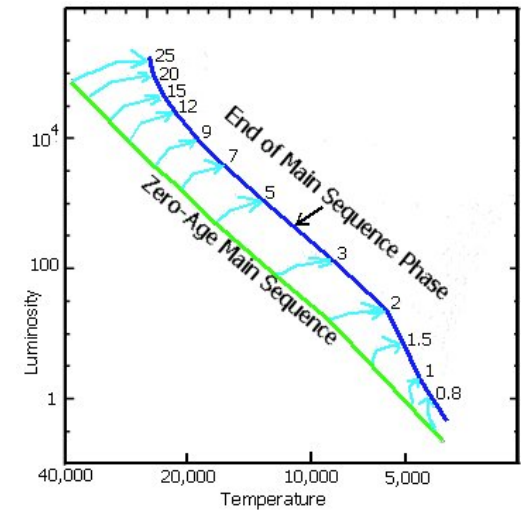
stáří 4.6 miliardy let



Hvězdy v nejlepších letech

během pobytu hvězdy na HP:

- průměr i zářivý výkon velmi zvolna roste
- mění se chemické složení – nejvíce v centru



změna složení Slunce v průběhu vývoje

hvězdné „období klidu“ - řádově $10^6 - 10^{10}$ let

$$\text{čas na hlavní posloupnosti } t_{HP} = 10^{10} \left(\frac{1}{M}\right)^{2.5} \text{ let} \quad (M \text{ v } M_{\odot})$$

čím má hvězda větší hmotnost, tím rychleji se vyvíjí!

proč?

hmotnost je určující pro centrální teplotu a tlak => rychlost jaderného hoření!

větší hmotnost

vyšší tlak
a teplota

rychlejší
jaderné reakce

KRATŠÍ ŽIVOT

menší hmotnost

menší tlak
a teplota

pomalejší
jaderné reakce

DELŠÍ ŽIVOT

veličiny

jednotky

T_{ef}	30	20	15	10	8	6	5	4	kK	
spekt	O5	B0	B5	A0	F0	G0	K0	M0		
M_V	-4	-2	0	2	4	6	8	mag		
M_b	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	mag
L	E5	E4	E3	E2	10	1	E-1	L_S		
M	30	20	10	5	3	2	1	0,6	M_S	
R	15	10	5	3,5	2	1	0,8	R_S		
ρ	0,02	0,1	0,3	0,5	1	2		$t \cdot m^{-3}$		
τ	E6	E7	E8	E9	E10	E11		rok		
$(B-V)$	-0,3	-0,2	0,0	0,2	0,5	1,0		mag		

Hvězdy hlavní posloupnosti.

T_{ef} efektivní teplota hvězdy, spektrální třída,

M_V absolutní vizuální hvězdná velikost, M_b absolutní bolometrická hv. velikost,

L zářivý výkon, M hmotnost, R poloměr, ρ střední hustota,

τ doba setrvání na hlavní posloupnosti, $(B-V)$ barevný index

The background of the slide is a deep space photograph showing a dense field of stars. A prominent feature is a diagonal band of stars, likely representing the Milky Way galaxy, which runs from the upper right towards the lower left. The stars vary in color, including bright blues, yellows, and oranges. A semi-transparent grey rectangular box is positioned in the upper center of the image, containing the title text in a bold, red, sans-serif font.

**Vývoj hvězd po opuštění
hlavní posloupnosti**

Konec klidu na HP

kdy k němu dojde? – až začne docházet palivo!

v centru jen cca 5 % H -> výrazné snížení výroby energie

⇒ smrštění jádra

⇒ místa s více H poklesnou hlouběji do teplejších míst

⇒ může se zapálit H ve slupce kolem jádra - *slupkové hoření vodíku*

Důsledky:

- jádro hvězdy - nadále se smršťuje a zahřívá

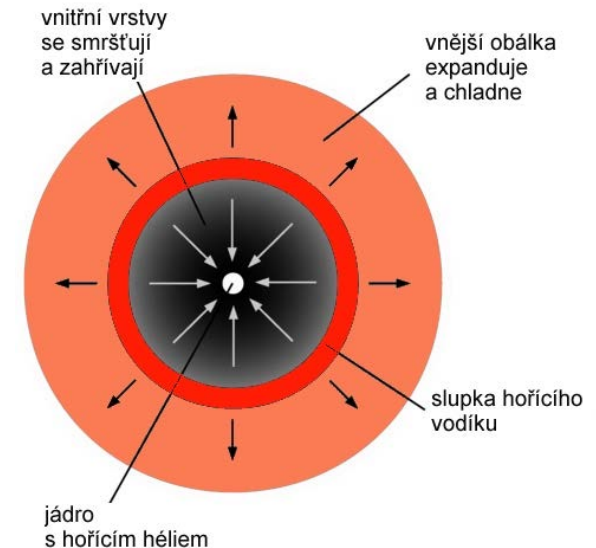
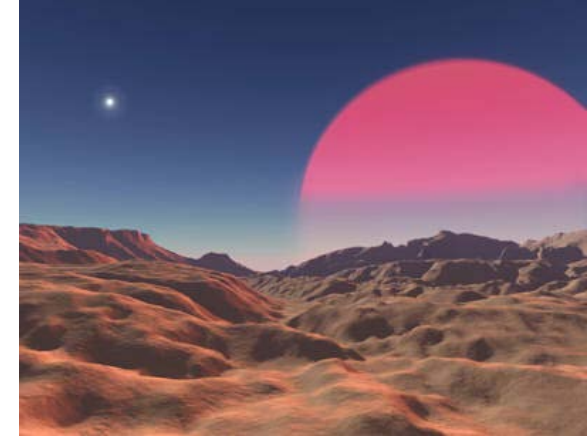
-> vyšší produkce energie ve slupce

- obálka hvězdy – zvýšený tok energie zdola

⇒ rozpíná se a chladne

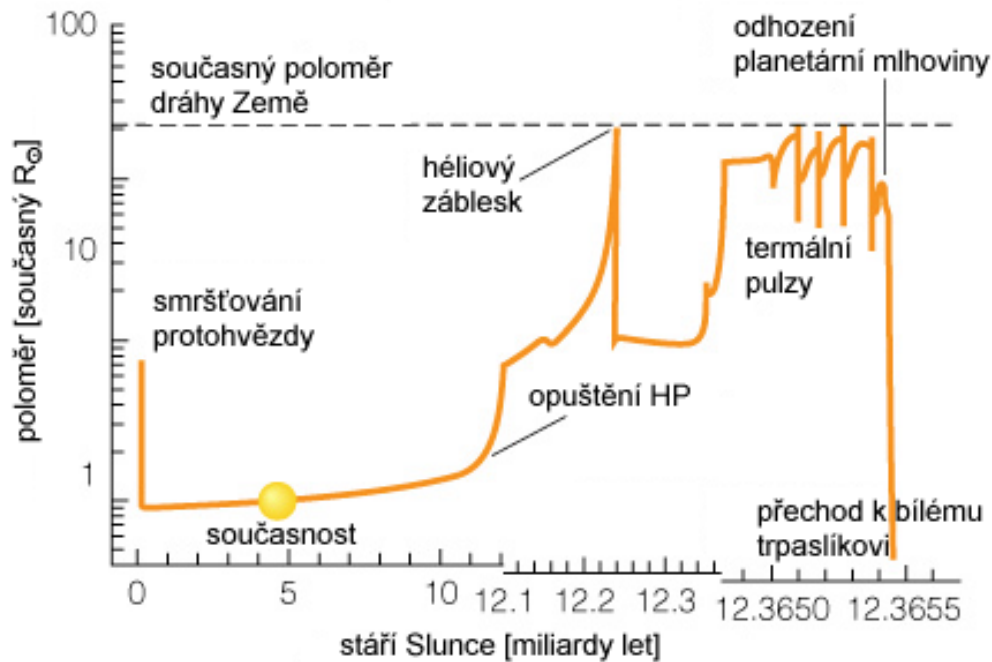
⇒ *červený obr* nebo *veleobr*

⇒ stěhování v HRD

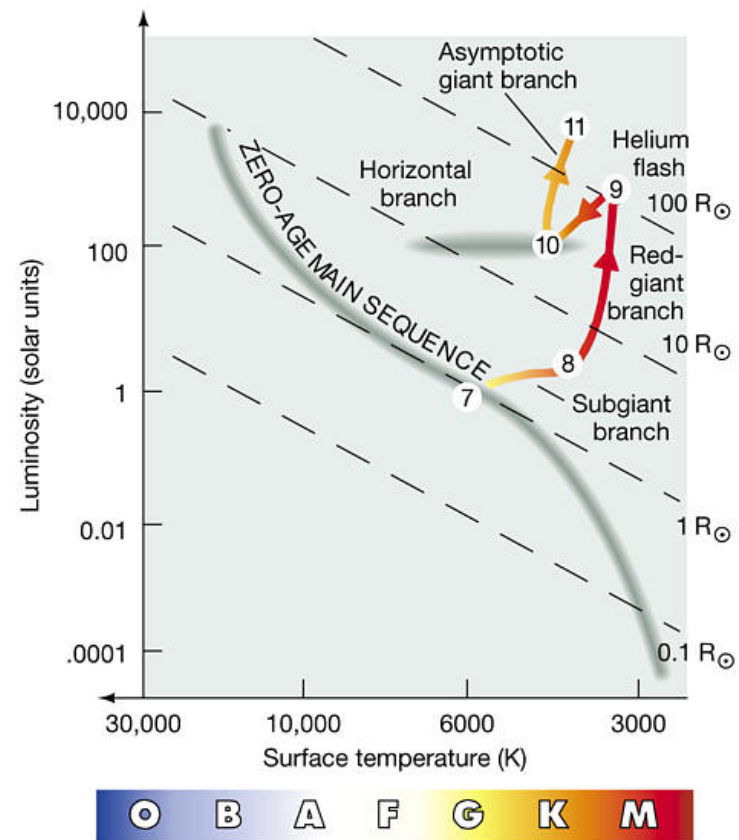


Hvězdní obři a veleobři

- ve fázi obra nebo veleobra - vývoj prudce zrychlí
- výrazné změny parametrů
- smršťování nitra hvězdy x rozpínání obálky
- při centrální teplotě $\sim 100 \cdot 10^6$ K – zažehnutí He \rightarrow C (3α proces) – He záblesk
(pro hvězdy $M < 2.3 M_{\odot}$)
- v obálce silná konvekce – silný hvězdný vítr – hvězda nestabilní (ztráty 30 - 85 % hmoty)



Změny velikosti Slunce v průběhu vývoje.

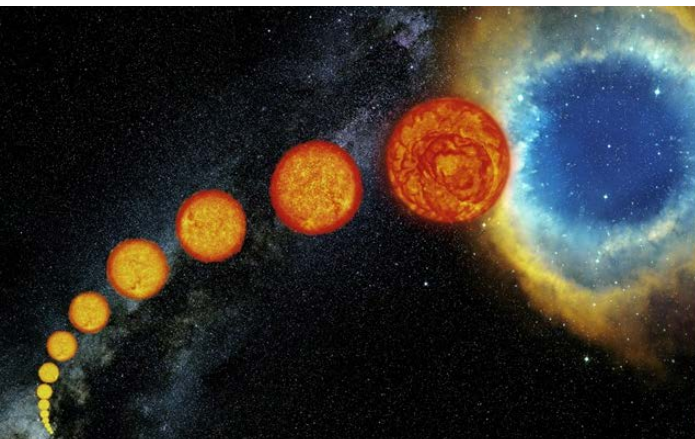
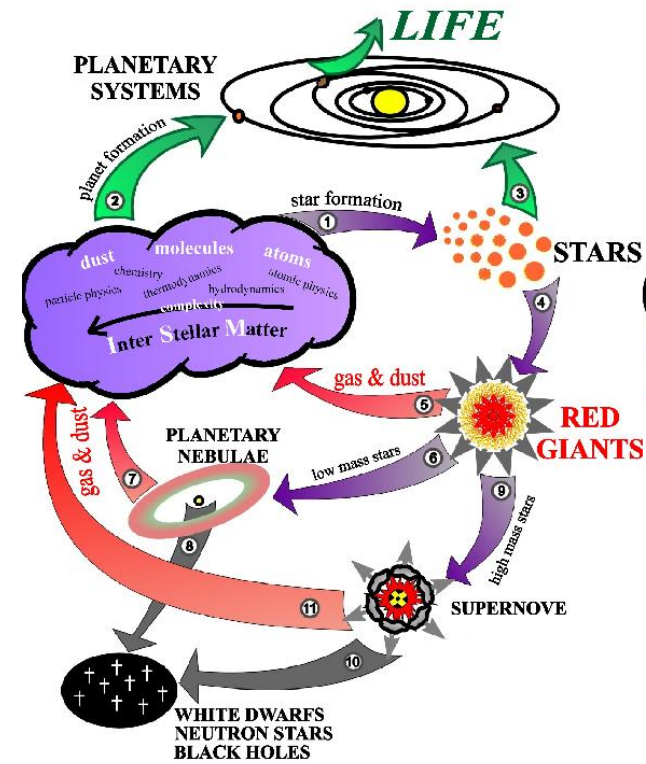


Konečný osud hvězd

Osud – je dán hvězdě „do vínku“ – počáteční hmotnost

Závěrečná stadia:

- stabilní (rovnovážná) – ČT, BT, (NH, KH)
- nestabilní (nerovnovážná) – novy, super- a hyper-



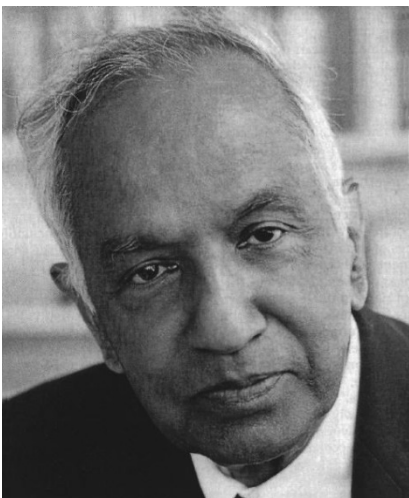
Stabilní řešení

$M_{\text{poč}} < 0.075 M_{\odot}$ – hnědý trpaslík -> vodíkový černý trpaslík

$0.075 < M_{\text{poč}} < 0.5 M_{\odot}$ – po vyhoření H v jádře -> héliový černý trpaslík
máme důkazy?

$0.5 < M_{\text{poč}} < 11 M_{\odot}$ – zapálí se H a později i He

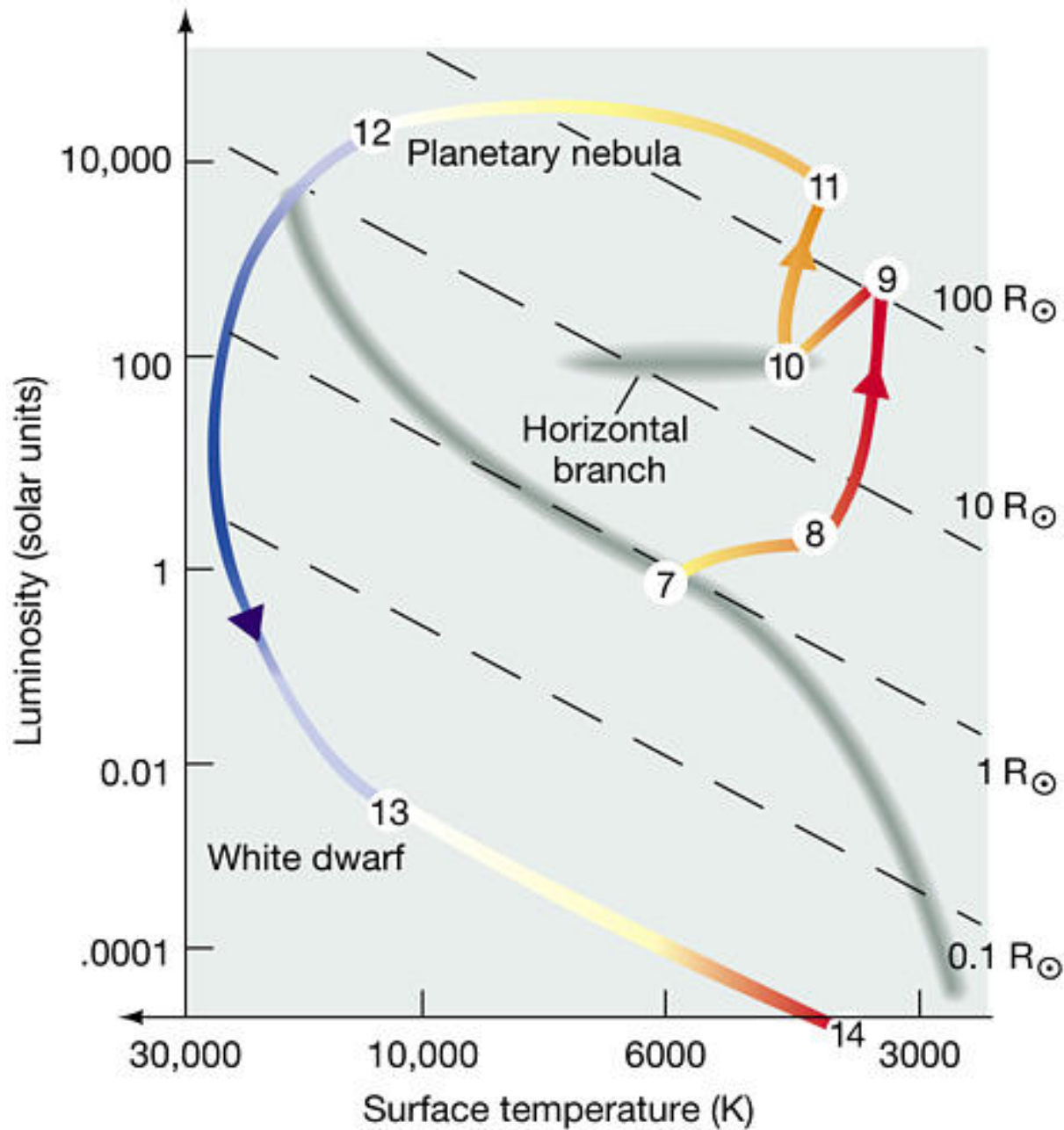
- hvězdný vítr odnese obal, zůstává žhavé hutné CO jádro, $M_j < 1.4 M_{\odot}$
- obálka – rozpínání - řádově km/s
- za 10 000 až 50 000 let - *planetární mlhovina*
- jádro – BT chladne -> černý CO trpaslík



S Chandrasekhar.

Subrahmanyan
Chandrasekhar



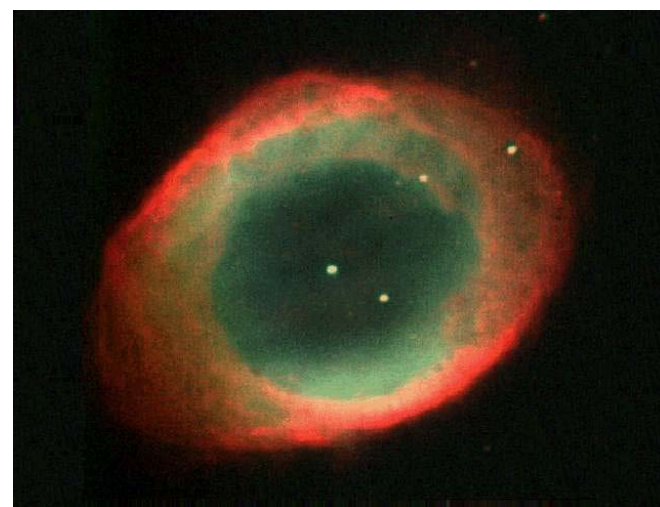




Jedna z najmladších planetárnych mlhovín, označená Hen 1357.



M 27

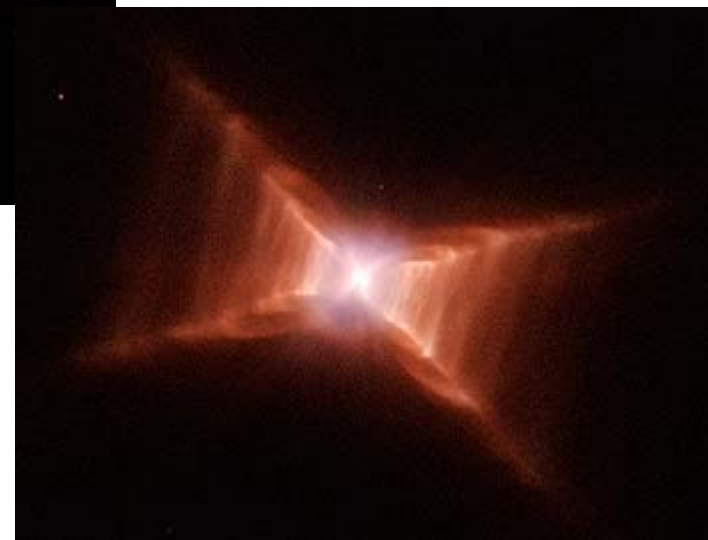
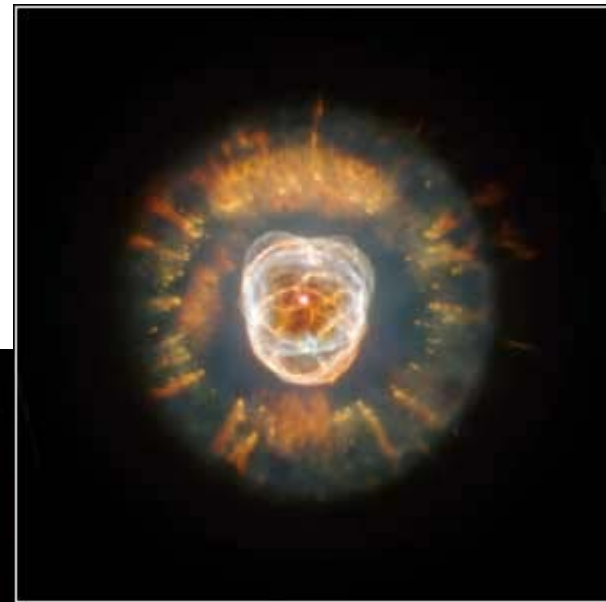


M57

V naší Galaxii – jen asi 1500 planetárních mlhovin

Proč tak málo?

je to velmi krátké vývojové období



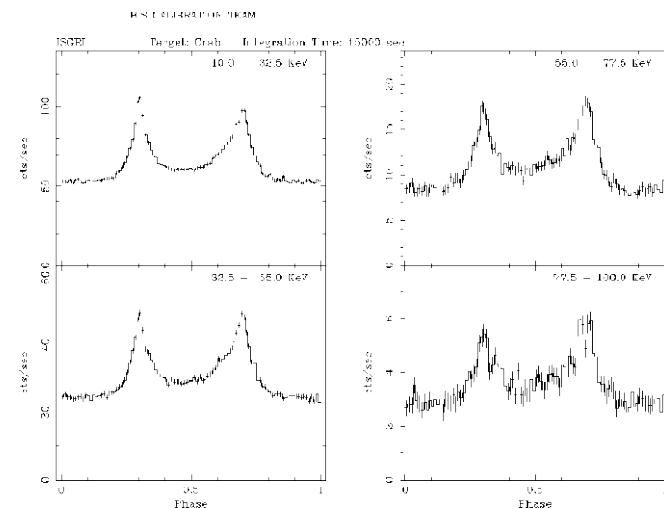
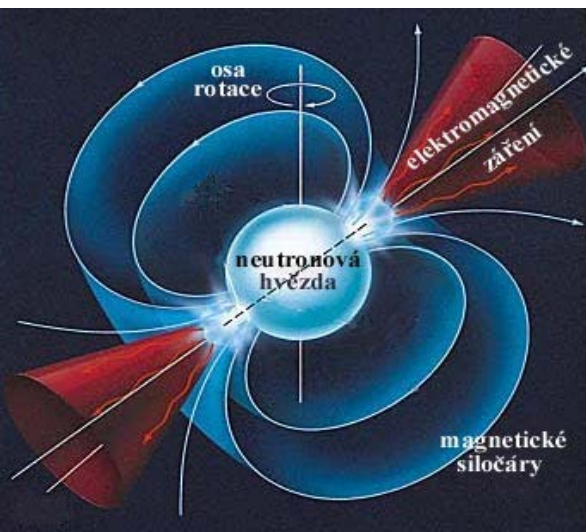
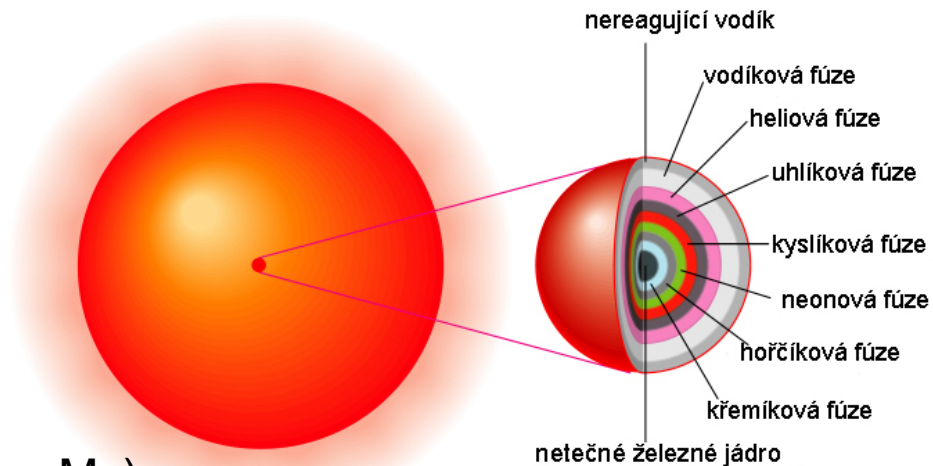
Nestabilní řešení

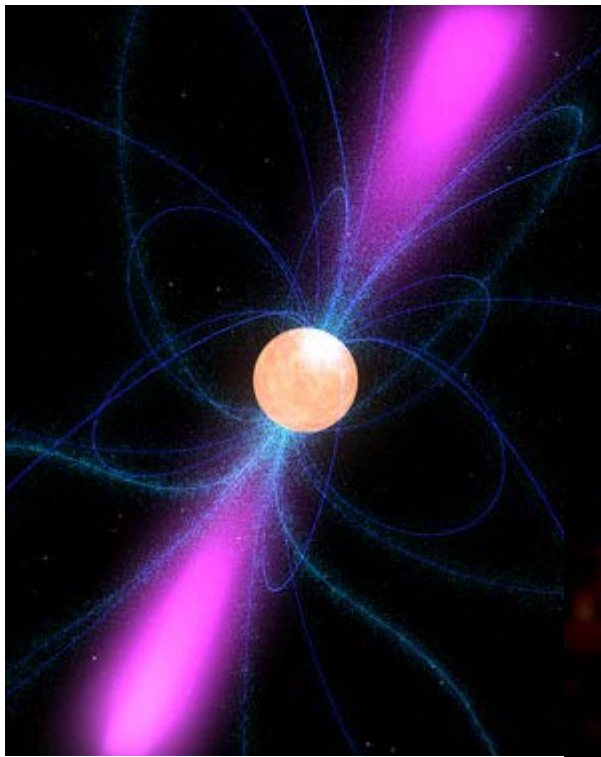
- $M_{\text{poč}} > 11 M_{\odot}$ (ve stadiu obra $M > 8 M_{\odot}$)
- v jádru a ve slupkách se postupně zapalují další jaderné reakce až po Fe ($1.4 M_{\odot} < M_j < 3 M_{\odot}$)
 - centrální oblasti zhroucení ->

neutronová hvězda (řádově 10 km, M_{\odot})

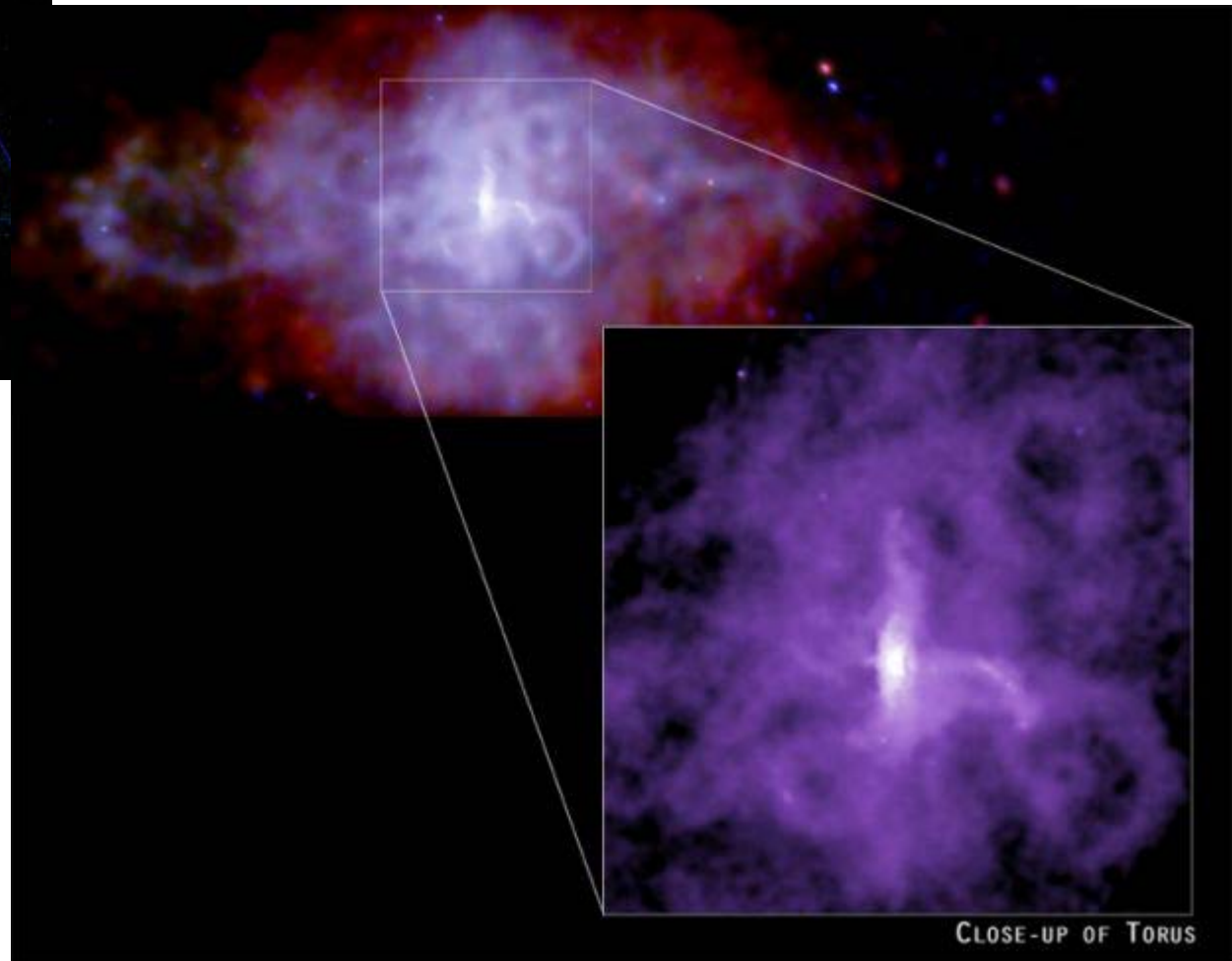
- uvolněná energie – výbuch *supernovy* – většina energie v neutrinech
- supernova II
- *pulsar* – nesouhlas rotační osy a osy mg. pole
 - rádiové pulsy, přísně periodické

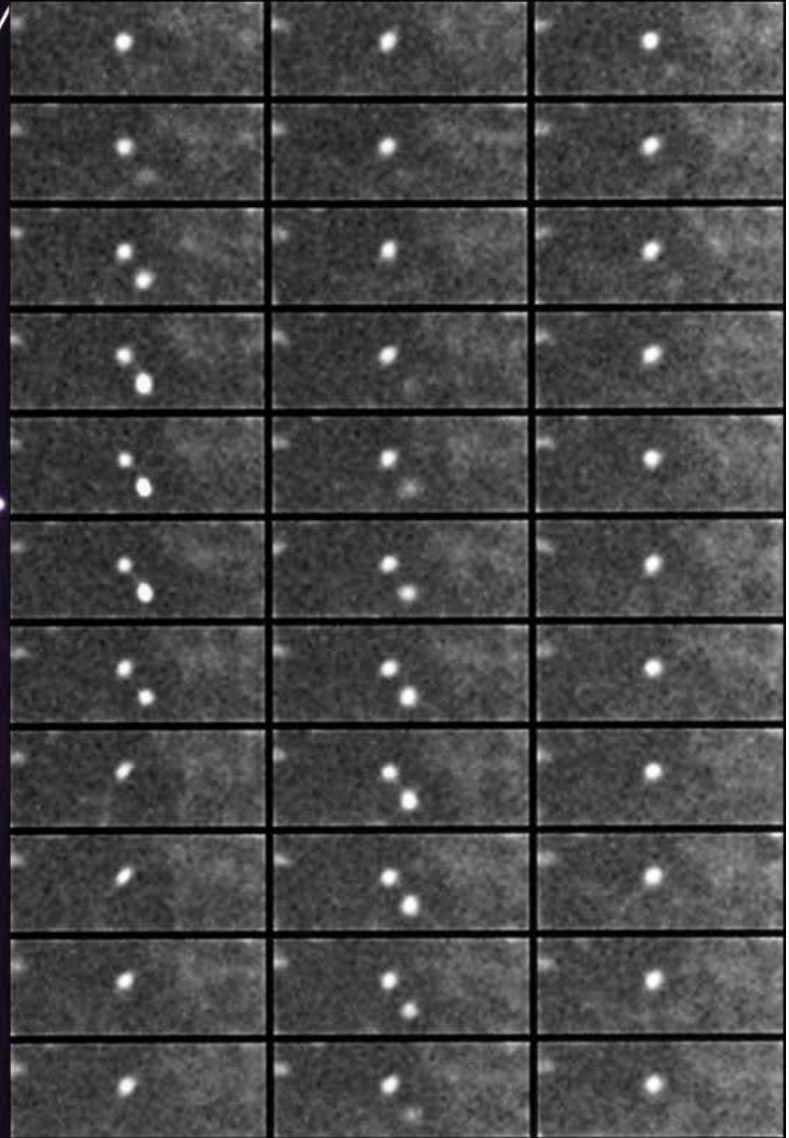
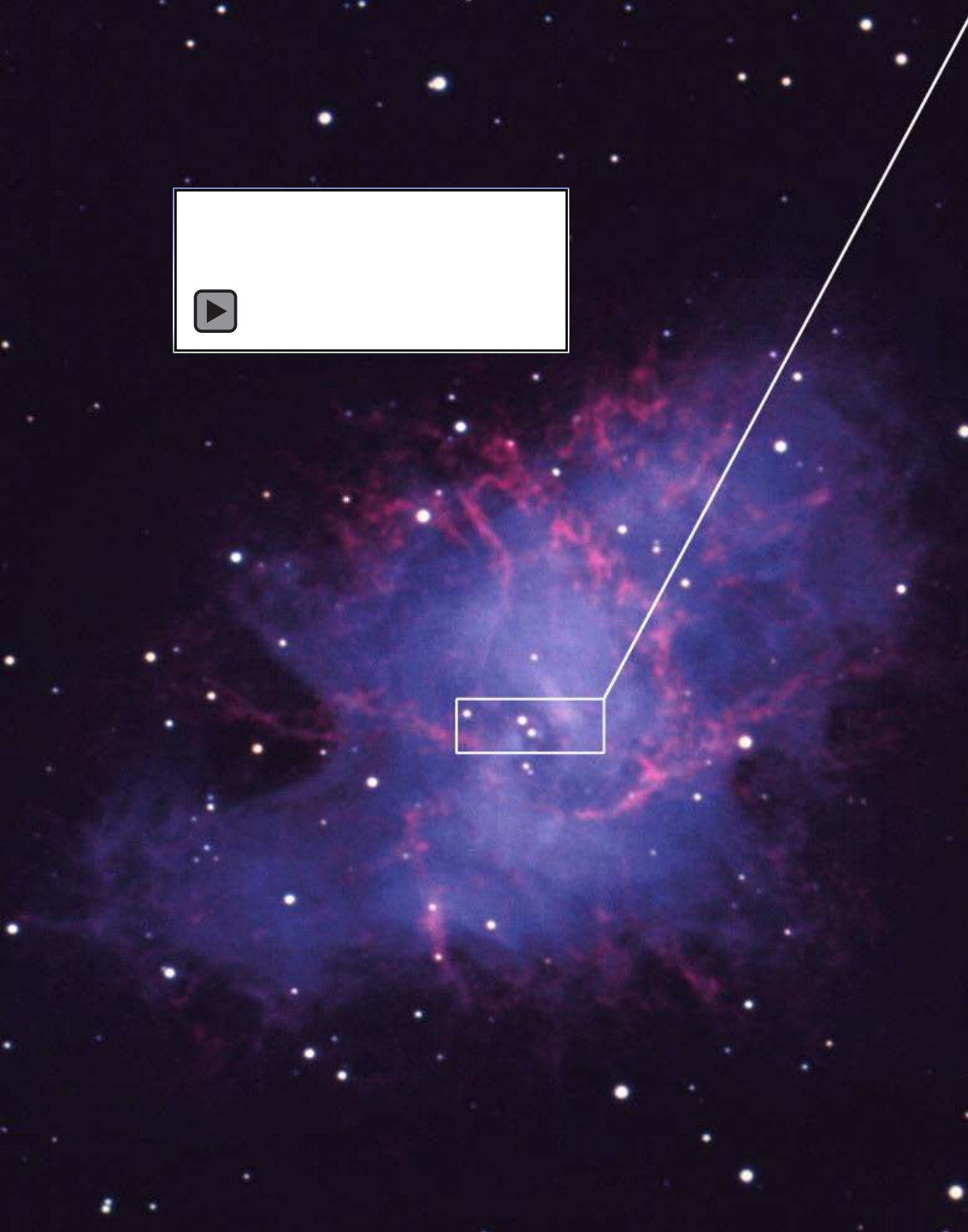
- $M_{\text{poč}} > \text{cca } 50 M_{\odot}$ – Fe jádro $M_j > 3 M_{\odot} \Rightarrow$ kolaps se nezastaví – vzniká *černá díra*
- uvolněná energie – výbuch *hypernovy* - SN1998bw

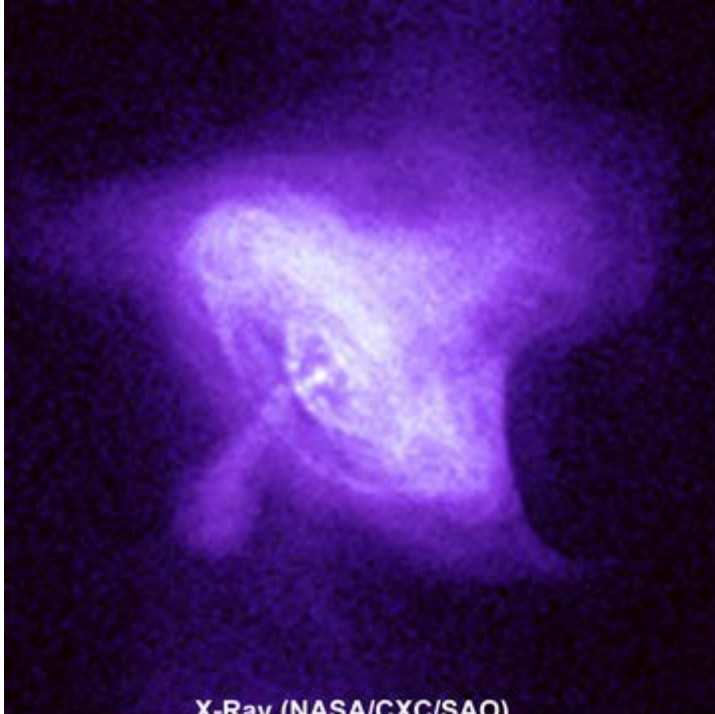




SN 1181, pozůstatek supernovy 3C58



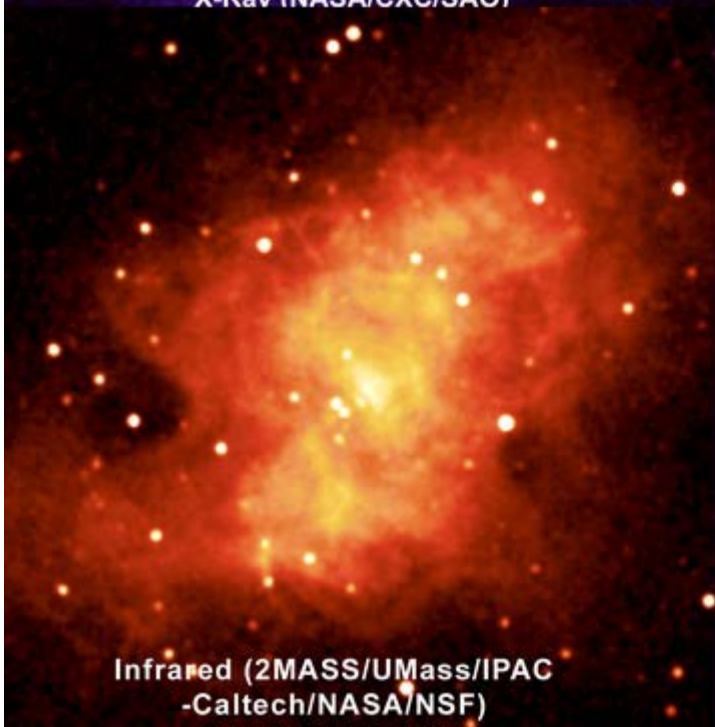




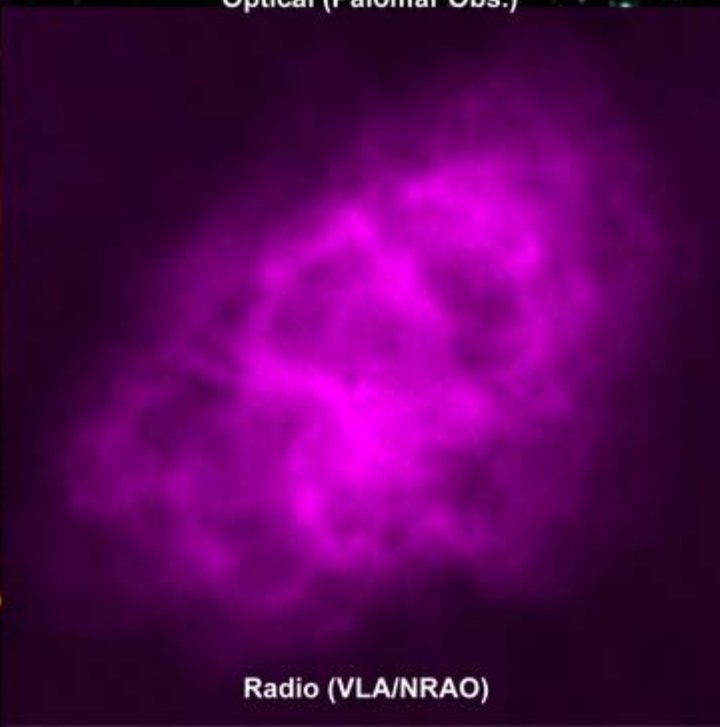
X-Ray (NASA/CXC/SAO)



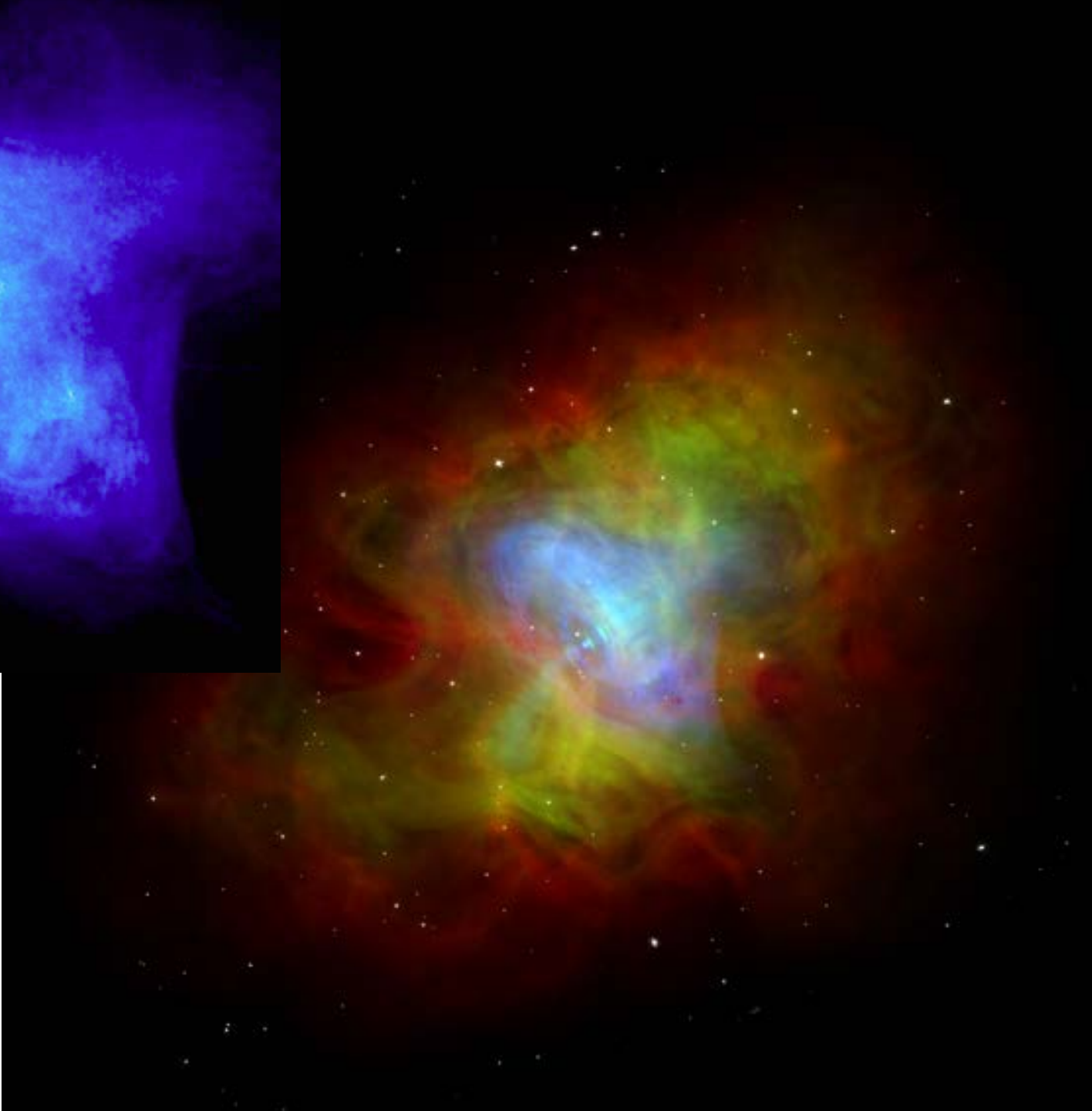
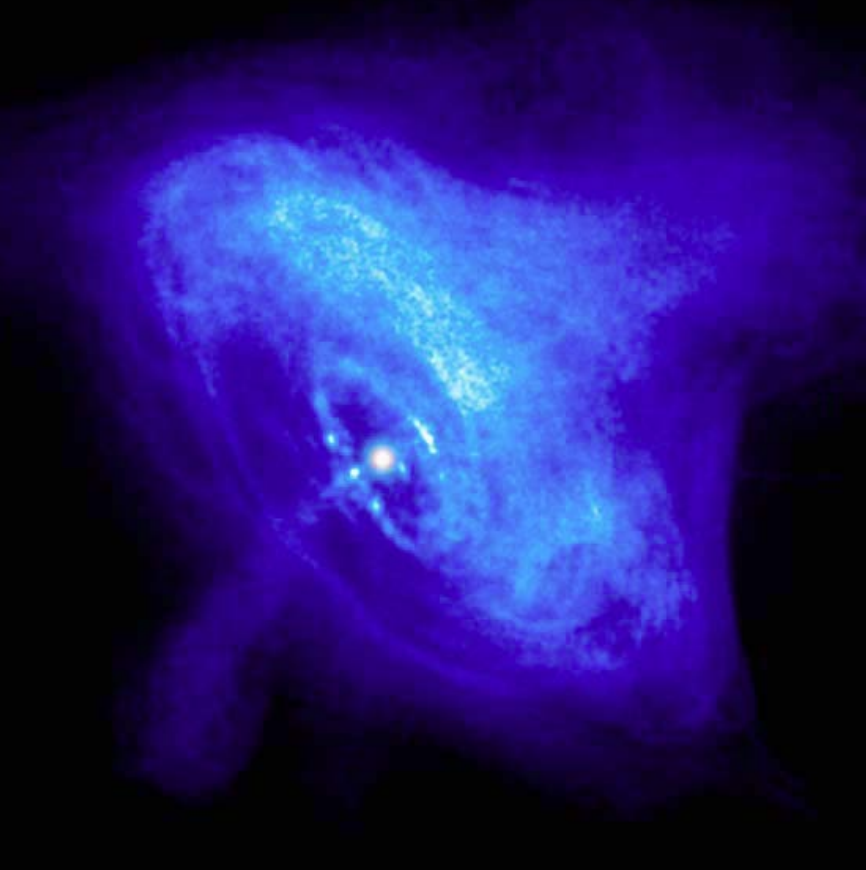
Optical (Palomar Obs.)



Infrared (2MASS/UMass/IPAC
-Caltech/NASA/NSF)

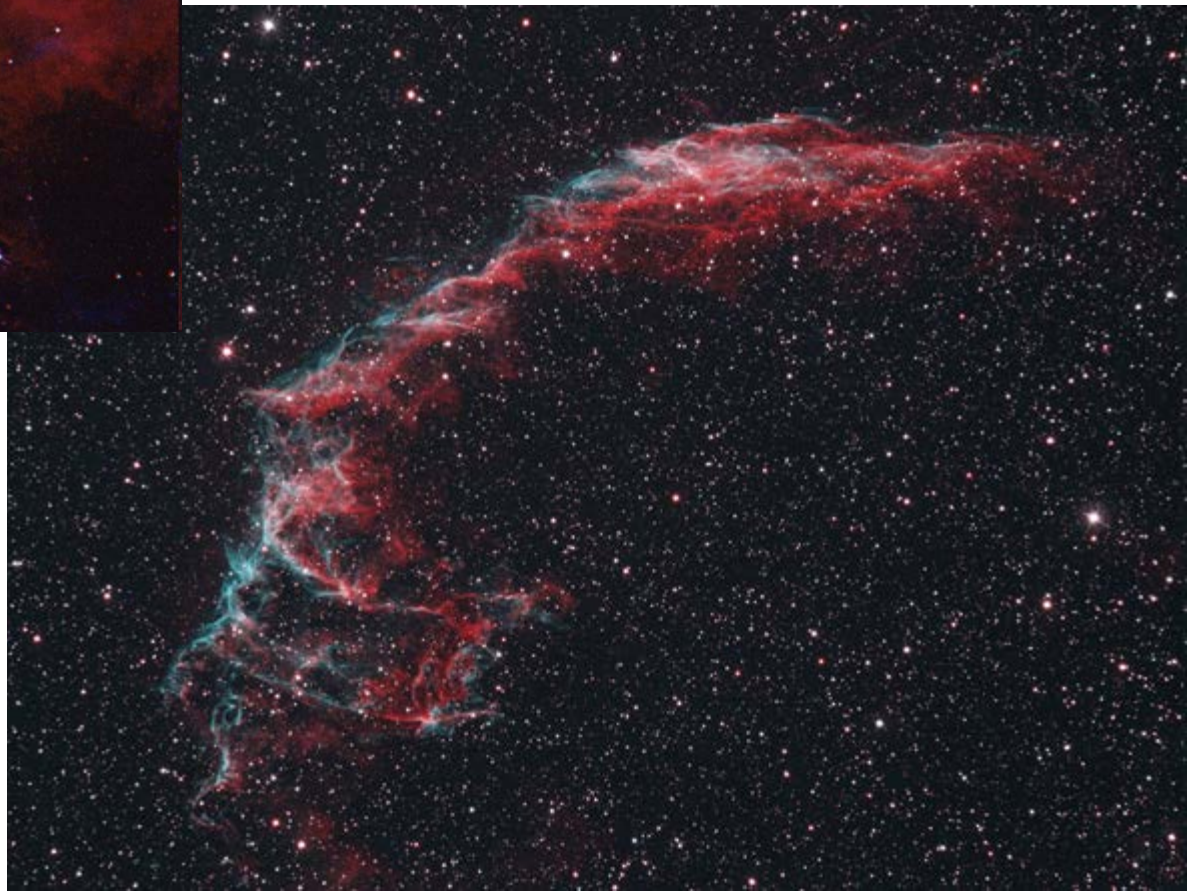


Radio (VLA/NRAO)





Zbytek po výbuchu supernovy v souhvězdí
Labutě před asi 15 000 lety.



Historické supernovy

supernovy viditelné pouhýma očima
- jen šest během n.l.

383 - Sco

1006 - Lup - nejjasnější

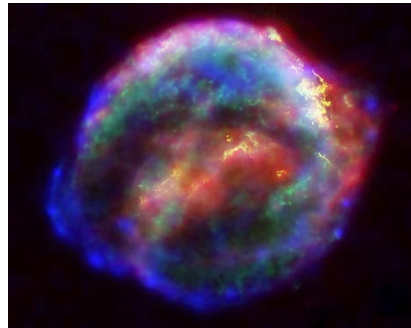
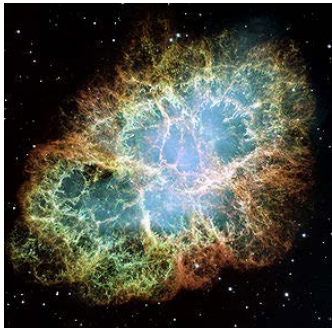
1054 - Tau – nejslavnější - Krabí mlhovina
s pulsarem

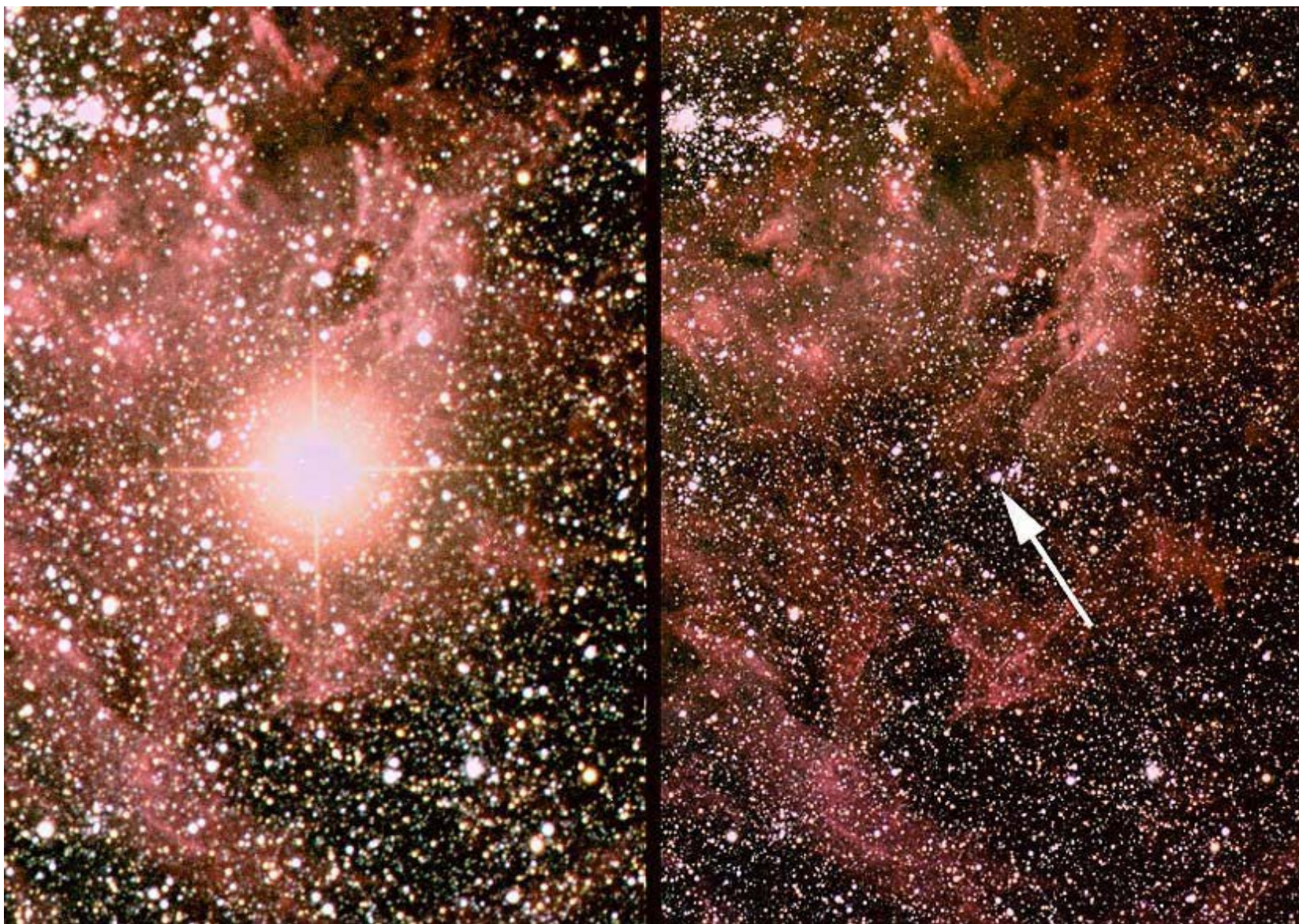
1572 - Cas - Tychonova supernova

1604 - Oph - Keplerova supernova

24. II. 1987 – Dor – LMC - v maximu 4 mag

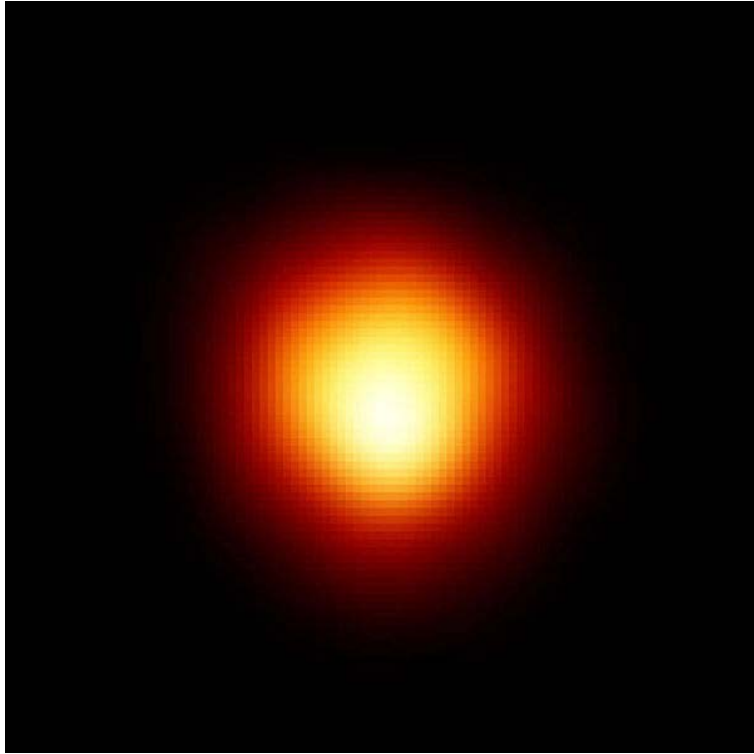
kdy vybuchne další supernova,
kterou uvidíme pouhýma očima?





Supernova z února 1987 LMC (vpravo je snímek téže oblasti před výbuchem).

Kandidáti na supernovy



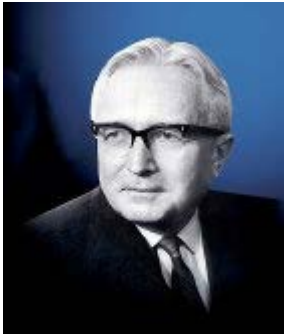
Betelgeuse



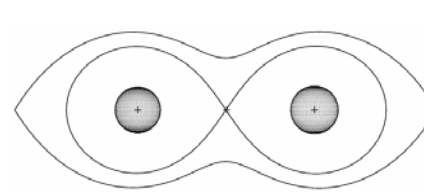
Zvláštnosti vývoje těsných dvojhvězd

těsná dvojhvězda – blízké složky, gravitací deformovaný tvar (výměna látky)
zákrytová dvojhvězda - vzájemné zákryty jednotlivých složek

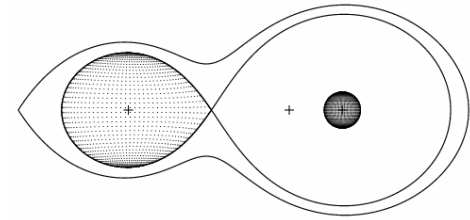
typický představitel – např. β Per, β Lyr



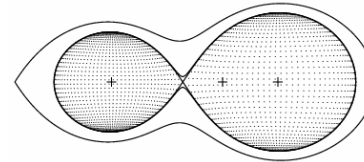
Zdeněk Kopal



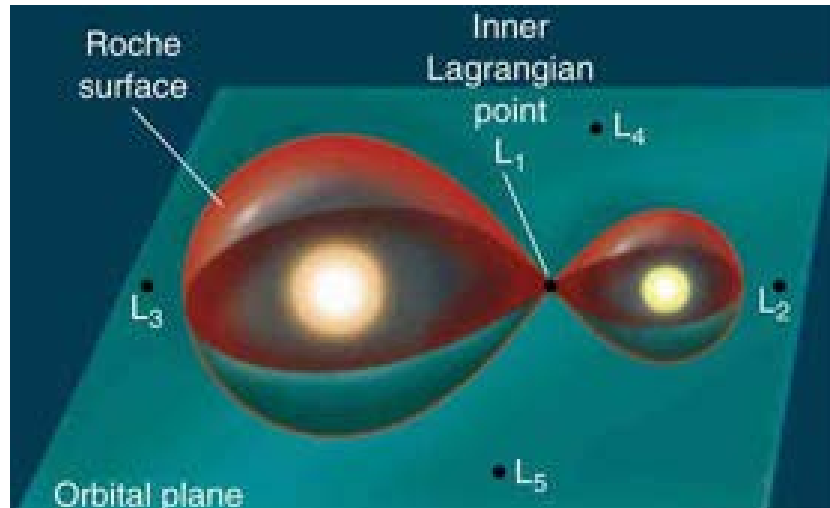
oddělená soustava



polodotyková soustava
(algolida)



dotyková soustava



Vývojový paradox Algolu

Algol - těsná zákrytová dvojhvězda => známe rozměry a hmotnosti složek dvojhvězdy

1. složka - žhavá hvězda hlavní posloupnosti ($5 M_{\odot}$),

2. složka - chladný obr ($1 M_{\odot}$) (!)

v čem je paradox?

dvojhvězda = současný vznik obou hvězd => více hmotná by měla být dál ve vývoji

ALE NENÍ !

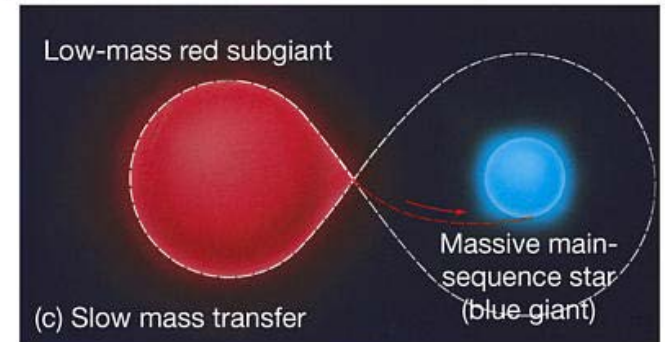
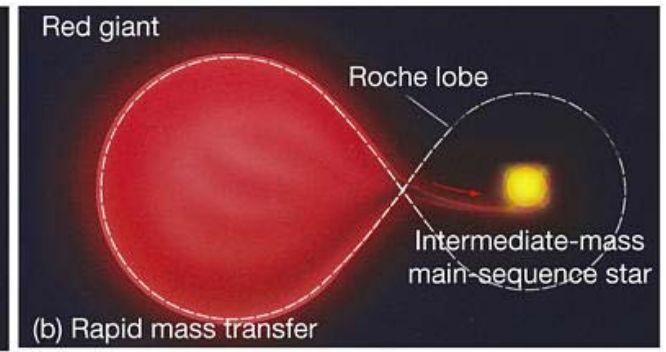
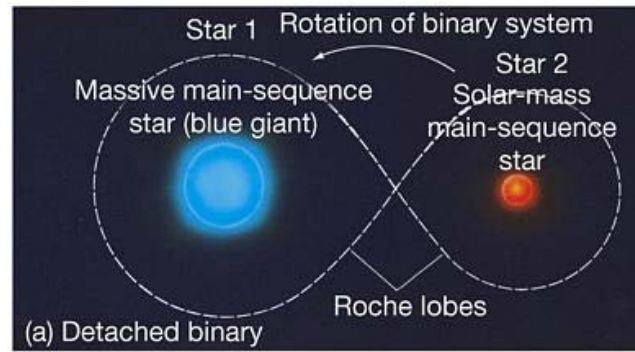
Vysvětlení - pes požívá psa!



John Crawford & Fred Hoyle – vývojový scénář

- společný vznik => obě hvězdy v páru se vyvíjejí jako osamocené hvězdy
- hmotnější hvězda – rychlejší vývoj => začne se rozpínat -> vzniká obr, ale prostor omezen!
- Rocheův lalok („šaty, které začínají být obrovi těsné“) - ekvipotenciální hladina deformována – vliv druhé složky a rotace => zploštělá kapka

Vývojový paradox Algolu



- hmotnější složka vyplní Rocheův lalok – přetok hmoty k vývojově opožděné složce; na druhou složku přeteče až 80 % hmoty!
⇒ 2. složka nyní hmotnější (ale vývojově je opožděná – hvězda na HP) = stadium Algola
- nyní hmotnější hvězda zrychlí vývoj -> i ona se začne rozpínat -> vyplní svůj Rocheův lalok – přetok opačným směrem

=> pes požírá psa

Přetok hmoty

hypotéza nebo prokázaný poznatek?

teorie výměny hmoty mezi složkami těsných dvojhvězd
– prvotní nedůvěra

Mirek Plavec – jeden z prvních zastánců (v 60. letech 20. st.)

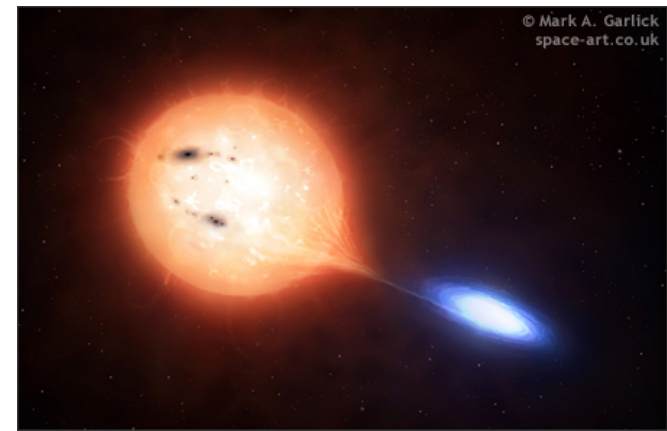
Příčiny – hvězdný vývoj, rozpínání hvězd (složek dvojhvězdy)

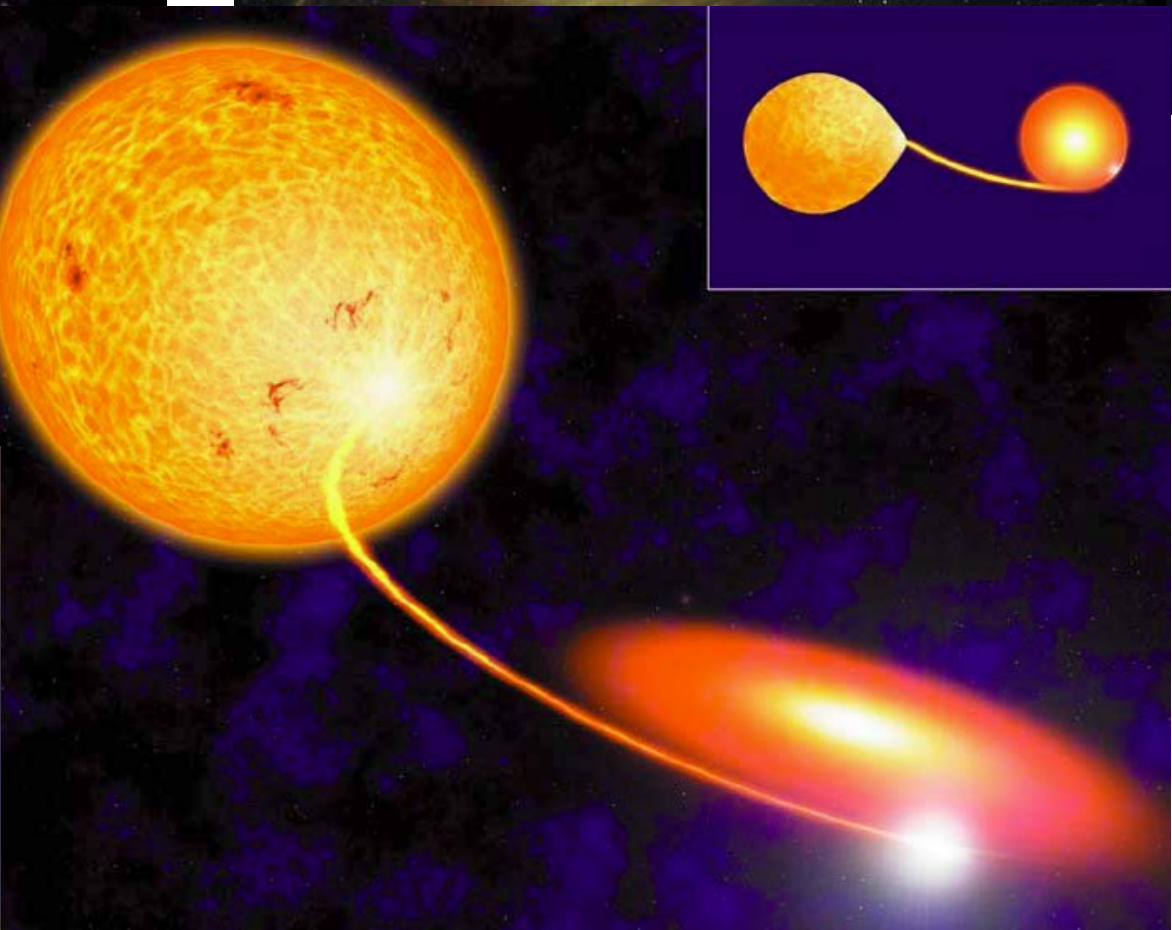
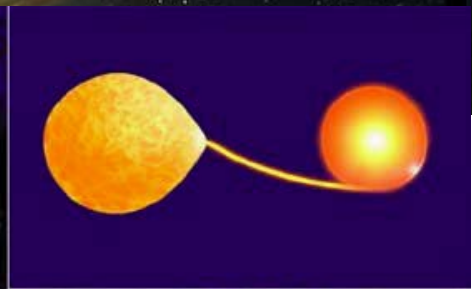
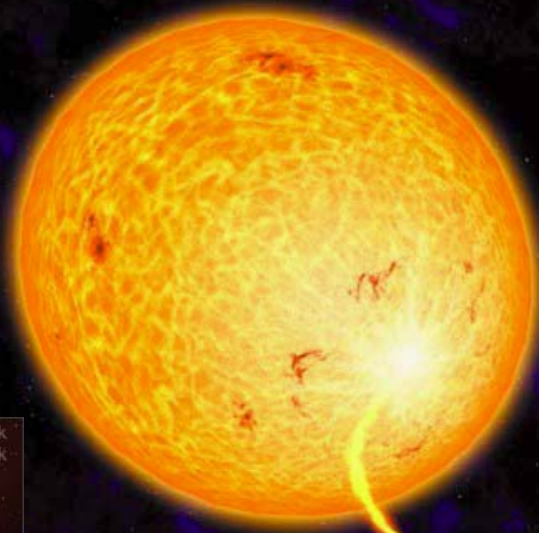
Průběh – i velmi rychlý, masivní

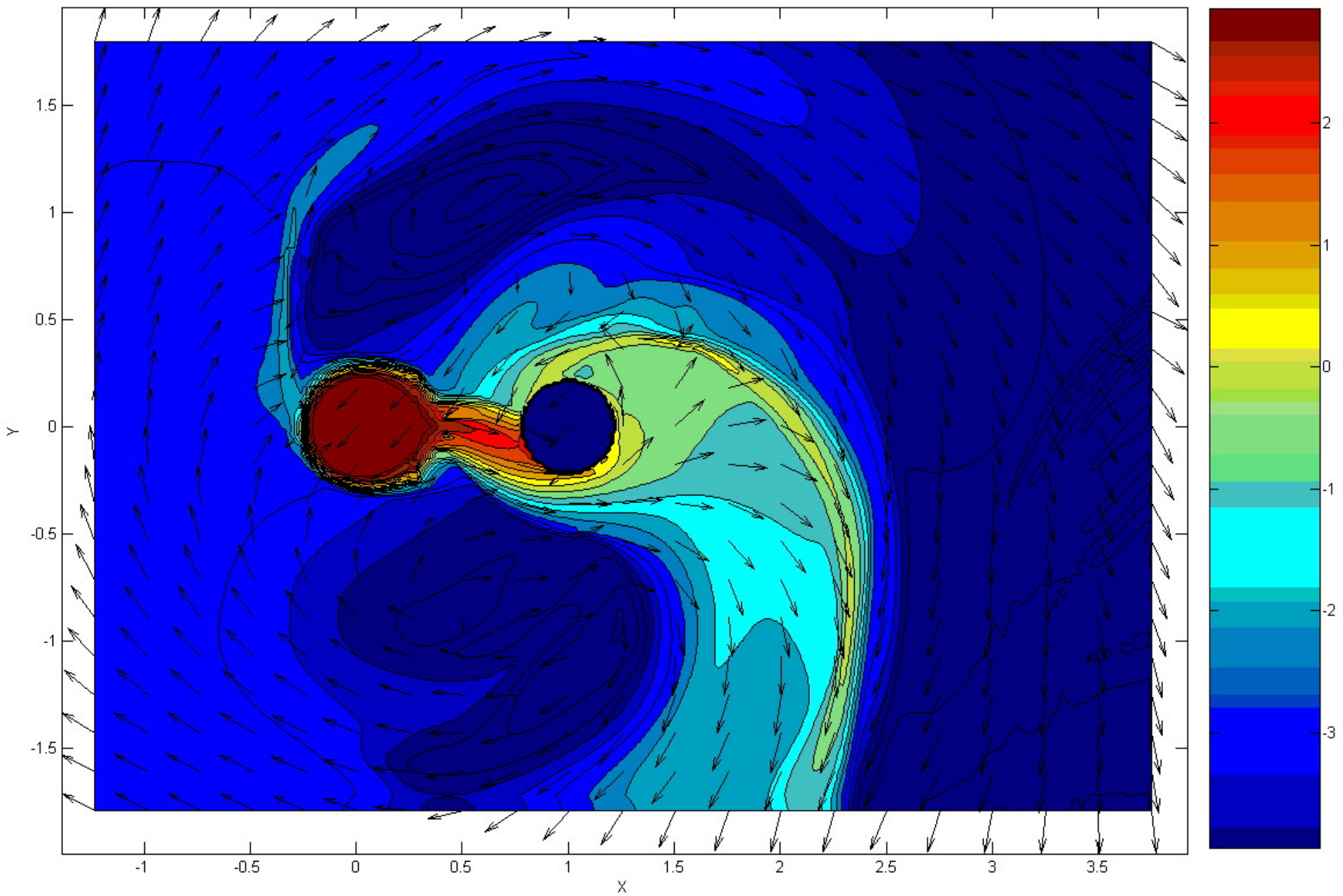
- dopad – přímo na souputníka
- do okolí – vznik akrečního disku, z něj hmota vypadává na souputníka, horká skvrna

Důsledky (projevy) – změna periody oběhu,

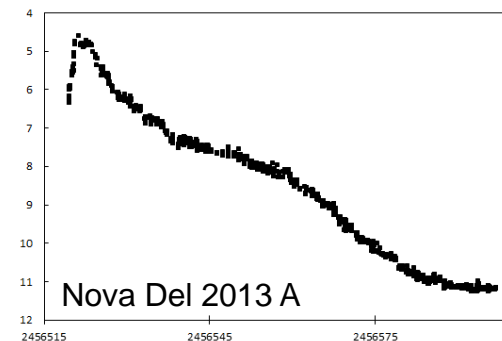
- změny jasnosti, projevy ve spektru







Novy



změna jasnosti - během několika dní se zjasní o 10 mag i více, a pak pozvolna (typicky během 40 dní) pokles na počáteční úroveň

1963 - Robert Kraft - novy = zvláštní typ těsných dvojhvězd

1 složka = bílý trpaslík

- přetok hmoty na BT - pomalé (řád. 10^4 let) ukládání do povrchové vrstvy

-> tlustá slupka na BT -> roste T, p -> zapálení termonukleární reakce ->

výbuch – slupka zničena, BT zůstává - vše se může opakovat

jiný scénář – *symbiotické proměnné hvězdy*

- není třeba přetok přes L_1 – stačí

hvězdný vítr z červeného obra

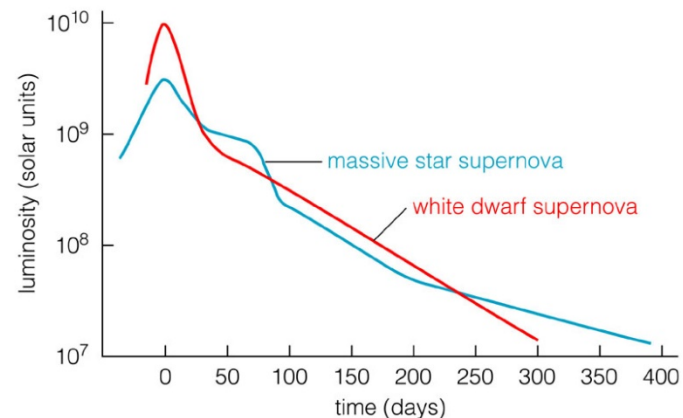
-> BT „vychytává“ hv. vítr

-> spad na BT



Supernovy typu Ia

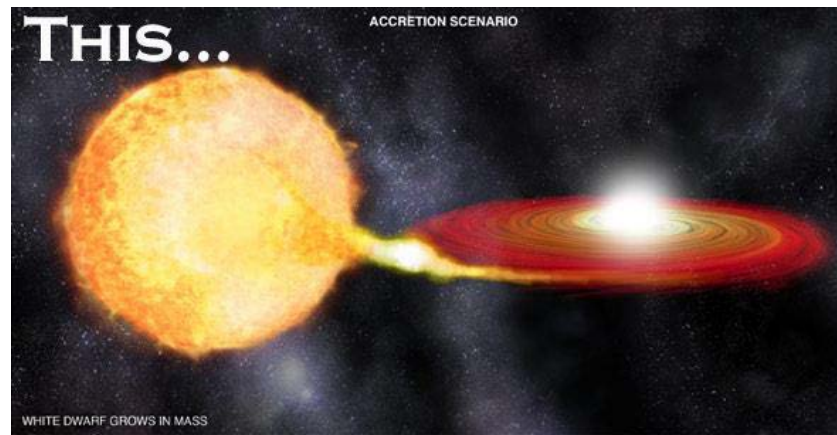
- ❖ vzniká v těsné dvojhvězdě (1 složka bílý trpaslík, kde ustaly jaderné reakce).
- ❖ standardní svíčky $M_v = -19.3$ mag, ale



Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.

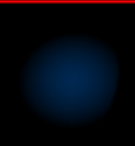

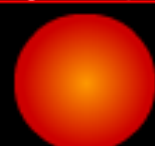


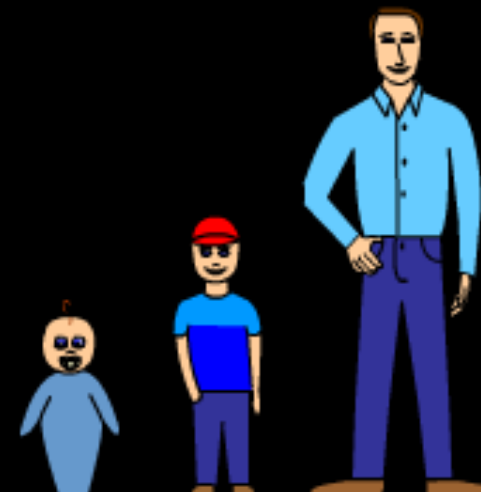


dva scénáře:

- přenos hmoty ze souputníka na BT -> po překročení jisté meze => kolaps => exploze ($1-2 \times 10^{44}$ J)
- BT splyne se souputníkem => překročení hmotnosti -> kolaps => exploze ($1-2 \times 10^{44}$ J)



Rekapitulace

vývoj hvězd = *nevratný* děj

protohvězda	počátek jad. hoření - hl. posloupnost	červený obr / veleobr	bílý trpaslík/černá díra
			
plod	od plenek k dospělosti	střední věk	stáří - smrt
			

recyklace – opětovné použití látky - hvězdný vítr, supernovy...
myslíci prach supernov

vývoj (osamocených) hvězd - určen změnami jejich chemického složení

jaderné reakce – příčina změn chemického složení => příčina vývoje hvězd
- hlavní zdroj energie hvězdy

POZOR – probíhají v nitru =>

=> *stav jádra* určuje zářivý výkon, celkovou stavbu a vývoj!

