

Vývoj hvězd na hlavní posloupnosti

Hydrostatická rovnováha

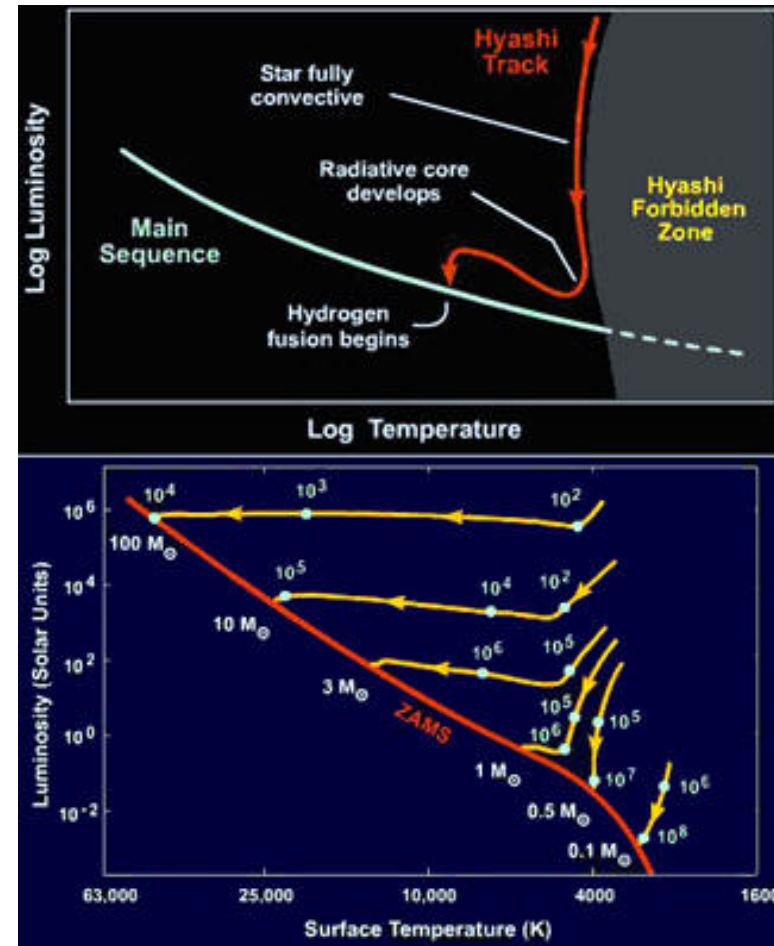
rostoucí teplota jádra => jaderné fúze vodíku rychleji => roste teplota a tlak v jádru => prvotní kolaps zpomaluje až se zcela zastaví (působení gravitace a gradientu tlaku v rovnováze)
gradient tlaku je v rovnováze s gravitací => hvězda se nerozpíná ani nesmršťuje;

Energiová 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 energiové rovnováhy – konec **fáze před-HP** (Pre-Main Sequence phase)



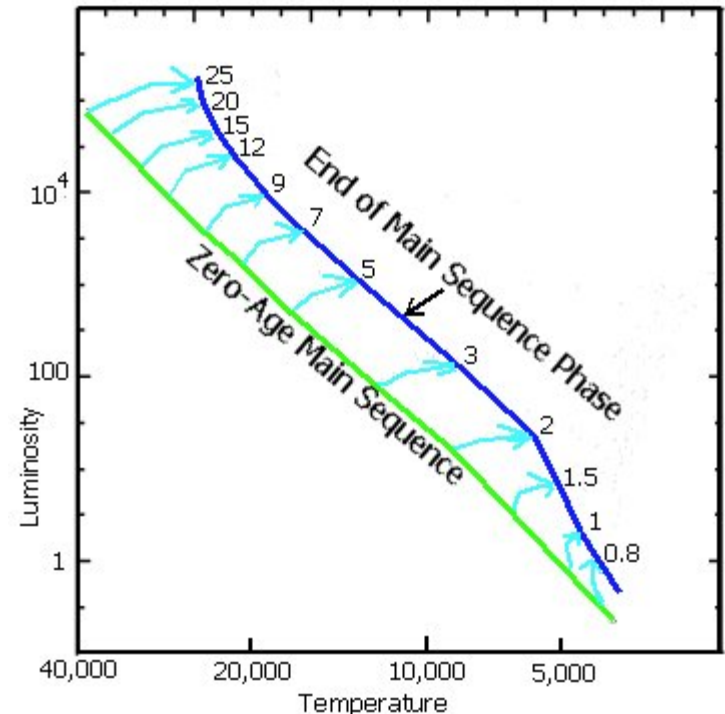
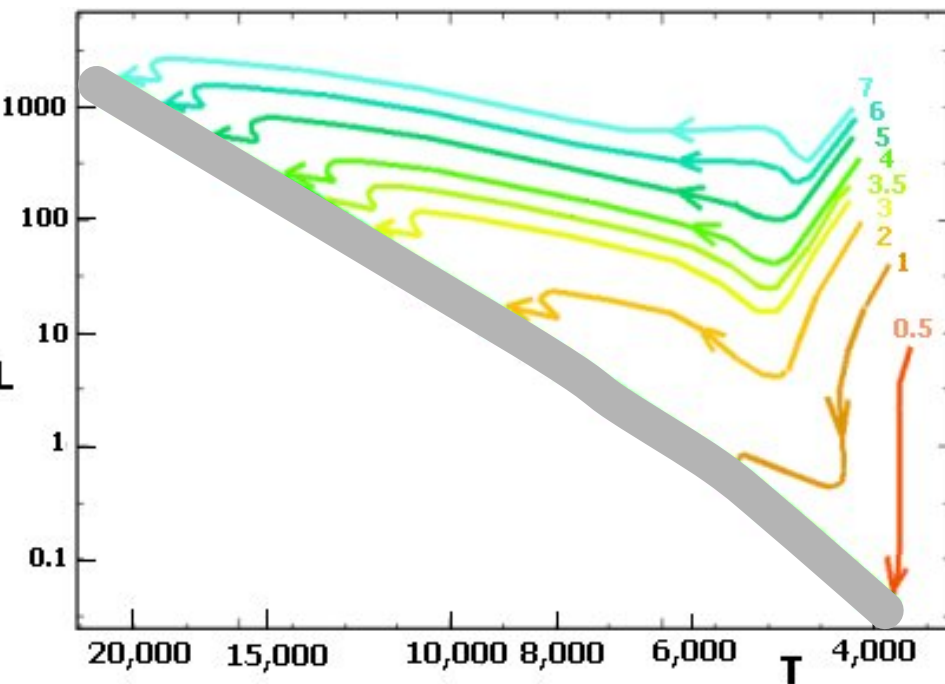
HR diagram - stopa vývoje hvězdy

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



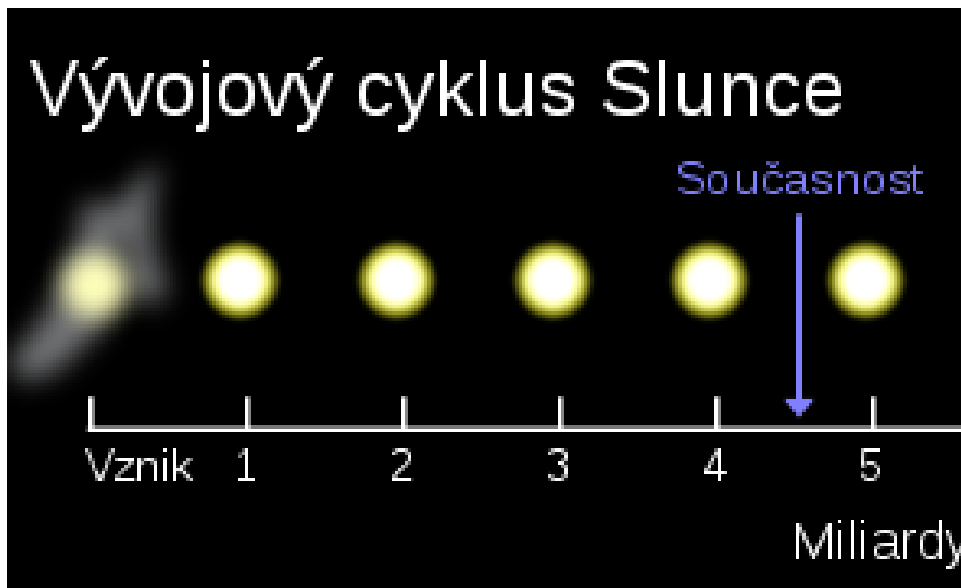
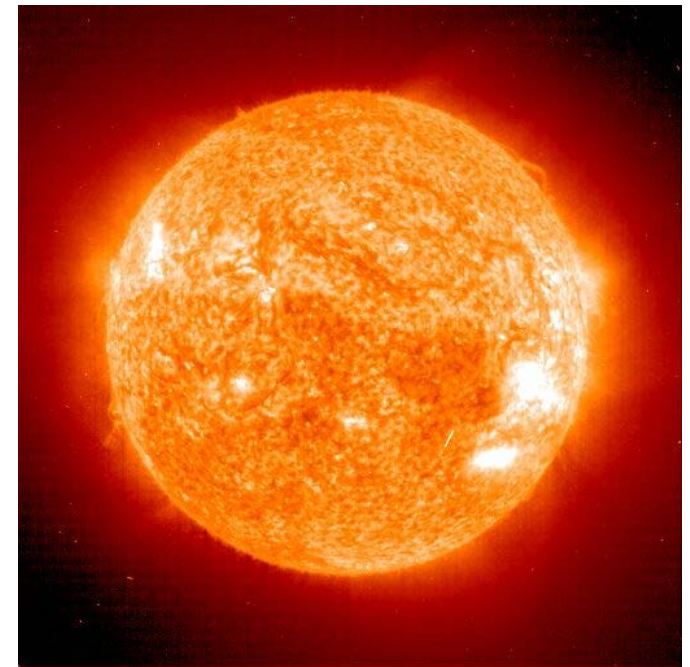
Hvězdy v nejlepších letech

= hvězdy na hlavní posloupnosti

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

(staré, dobré Slunce v rovnovážném stavu)

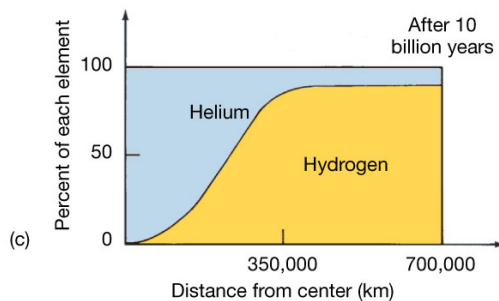
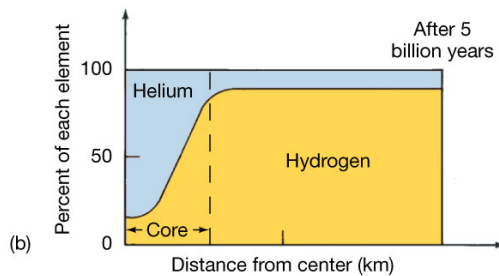
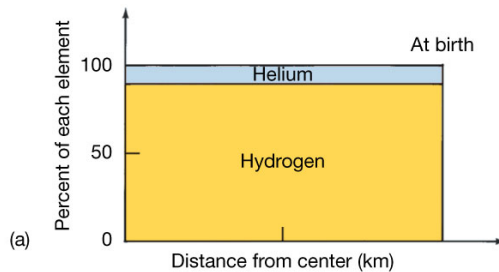
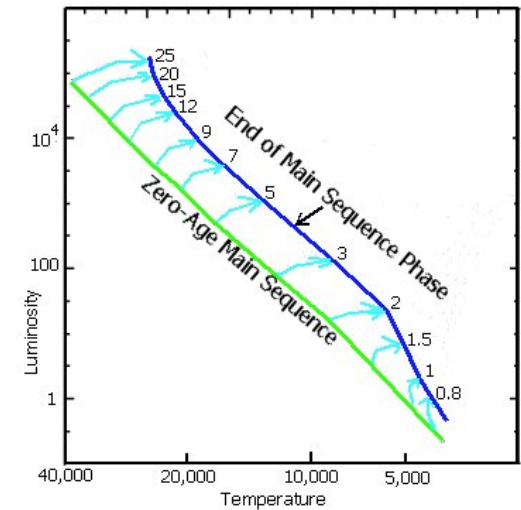
stáří 4.6 miliardy let



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



**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

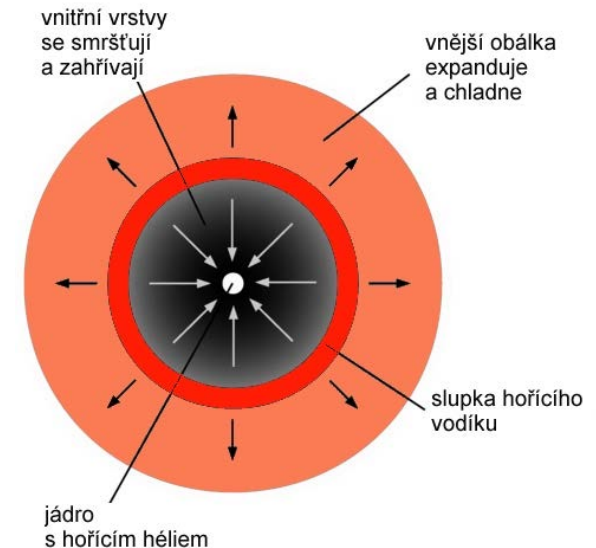
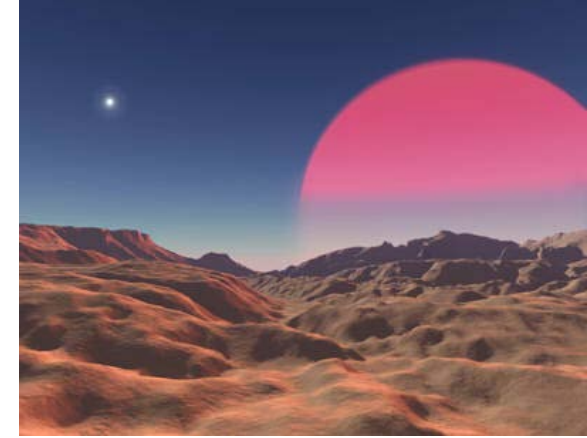
-> vyšší produkce energie ve slupce

- obálka hvězdy – zvýšený tok energie zdola

⇒ rozpíná se a chladne

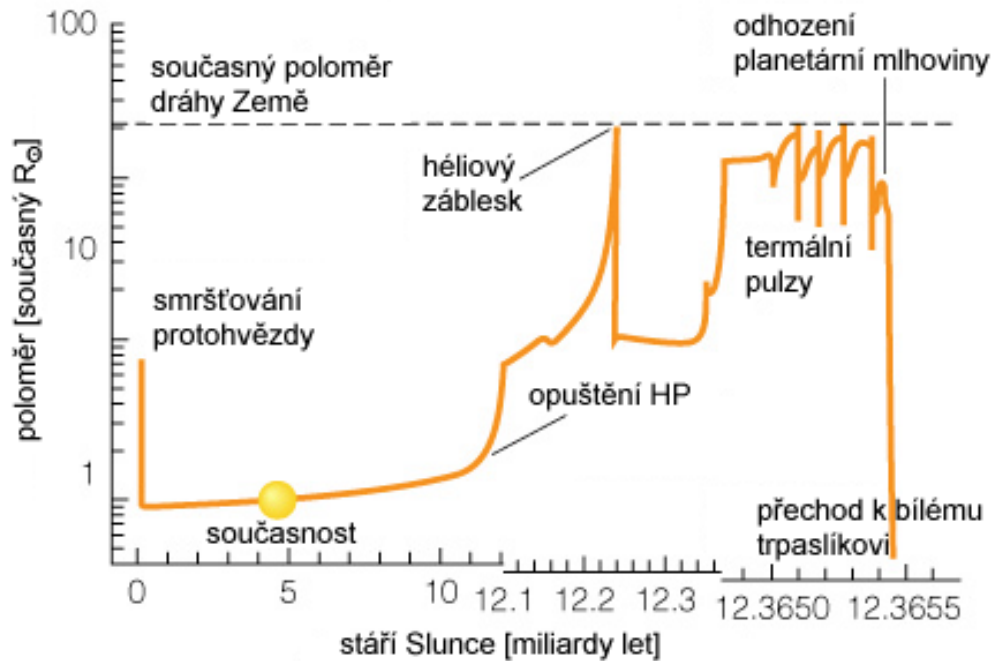
⇒ *červený obr* nebo *veleobr*

⇒ stěhování v HRD

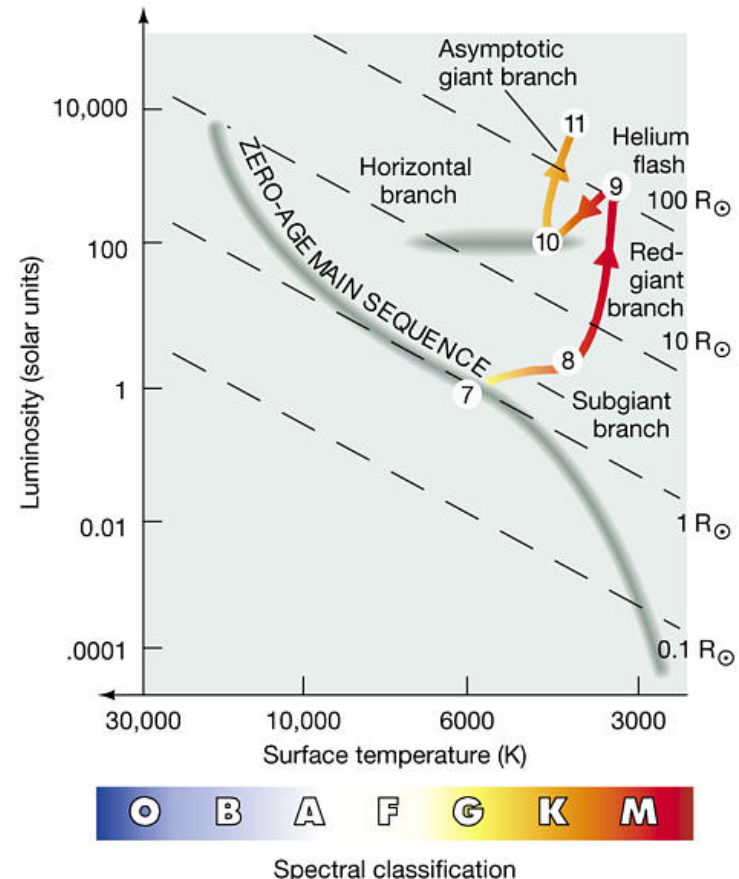


Hvězdní obři a veleobři

- 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 (3 α proces) – He záblesk
- v obálce silná konvekce – silný hvězdný vítr – hvězda nestabilní (ztráty 30 - 85 % hmoty)



Změny velikosti Slunce v průběhu vývoje.

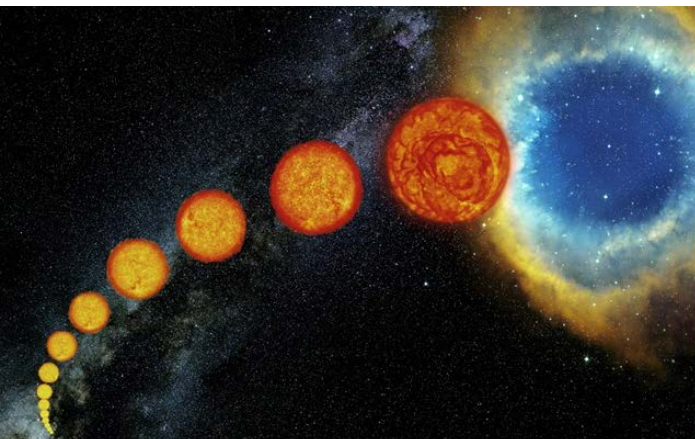
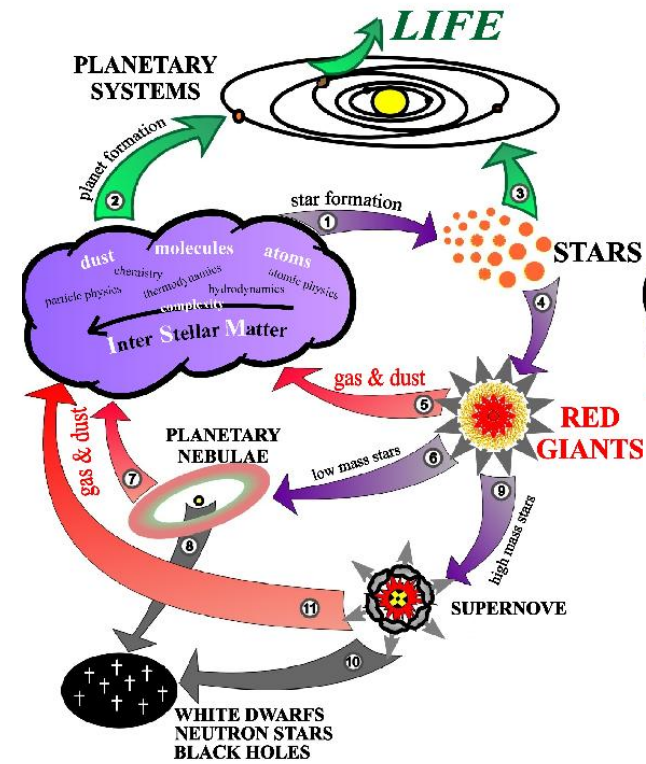


Konečný osud hvězd

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

Závěrečná stadia:

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



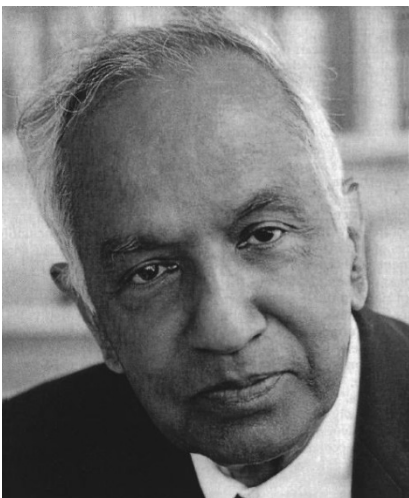
Stabilní řešení

$M_{\text{poč}} < 0.075 M_{\odot}$ – 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

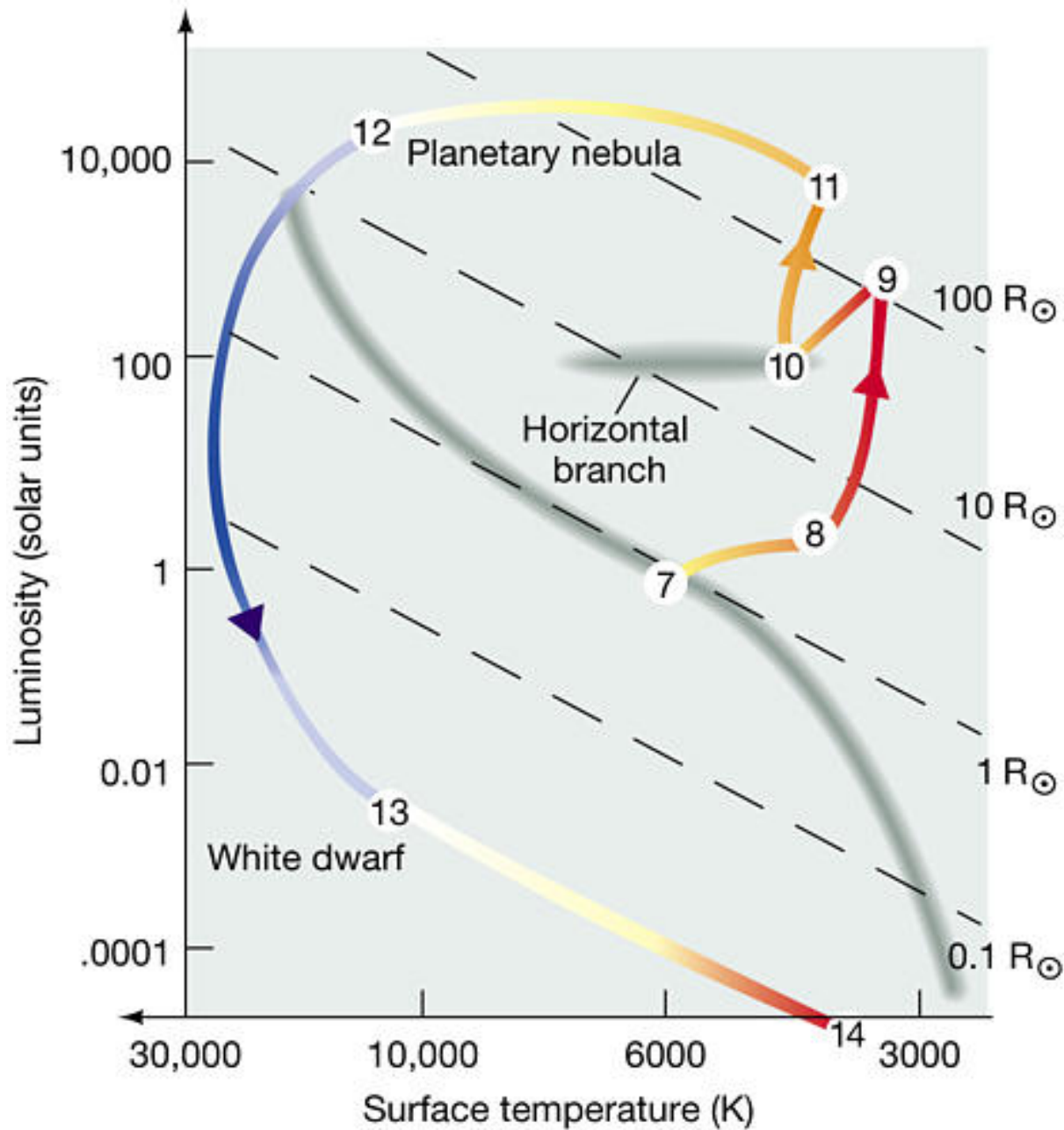
- hvězdný vítr odnese obal, zůstává žhavé hutné CO jádro, $M_j < 1.4 M_{\odot}$
- obálka – rozpínání - řádově km/s
- za 10 000 až 50 000 let - *planetární mlhovina*
- jádro – BT chladne -> černý CO trpaslík



S Chandrasekhar.

Subrahmanyan
Chandrasekhar



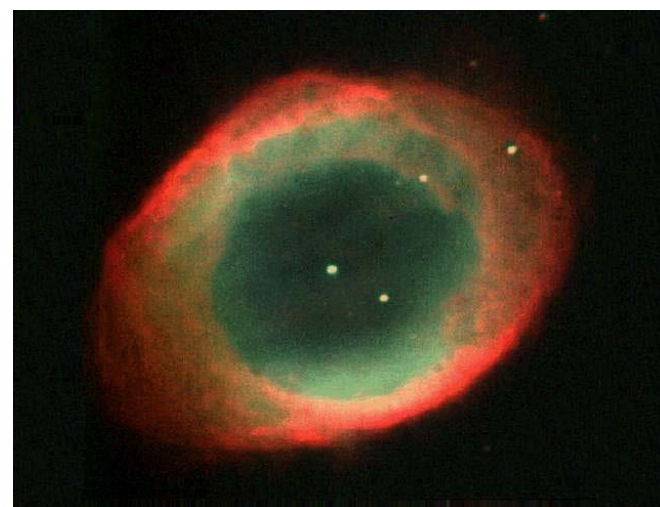




Jedna z najmladších planetárnych mlhovín, označená Hen 1357.



M 27

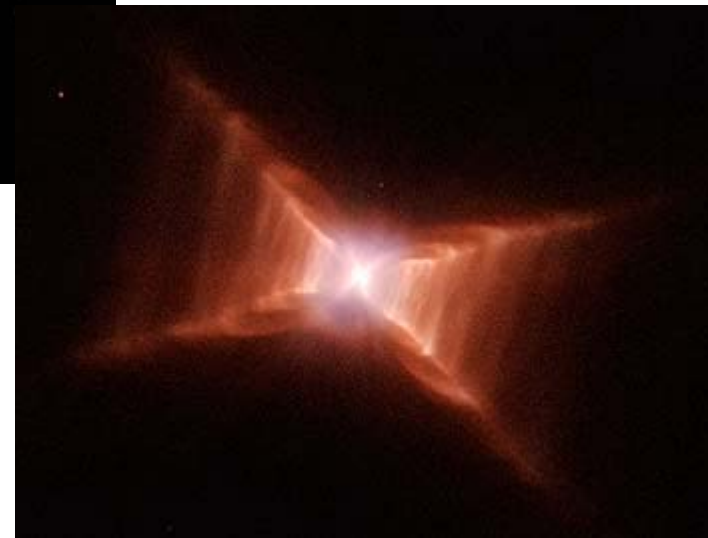
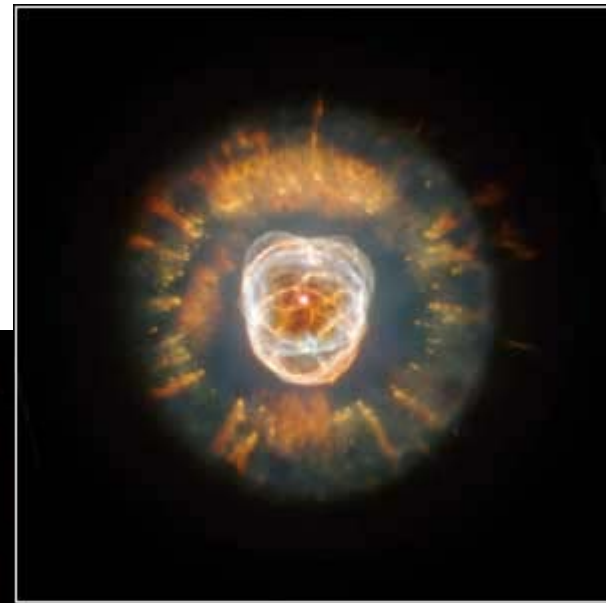


M57

V naší Galaxii – jen asi 1500 planetárních mlhovin

Proč tak málo?

je to velmi krátké vývojové období



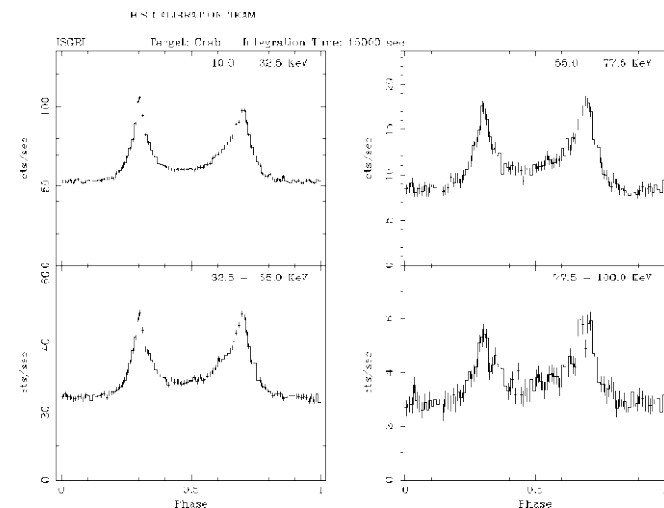
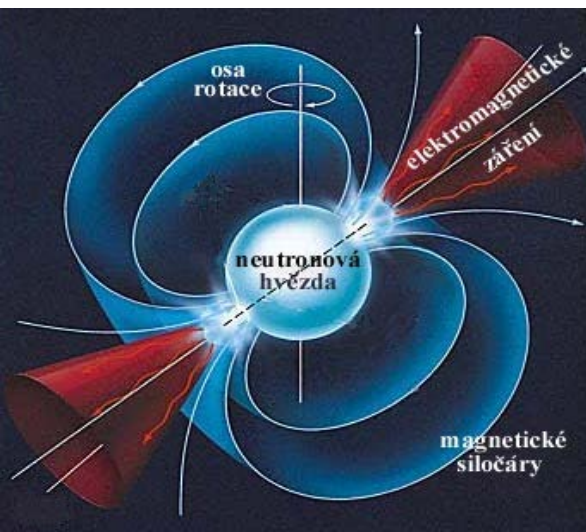
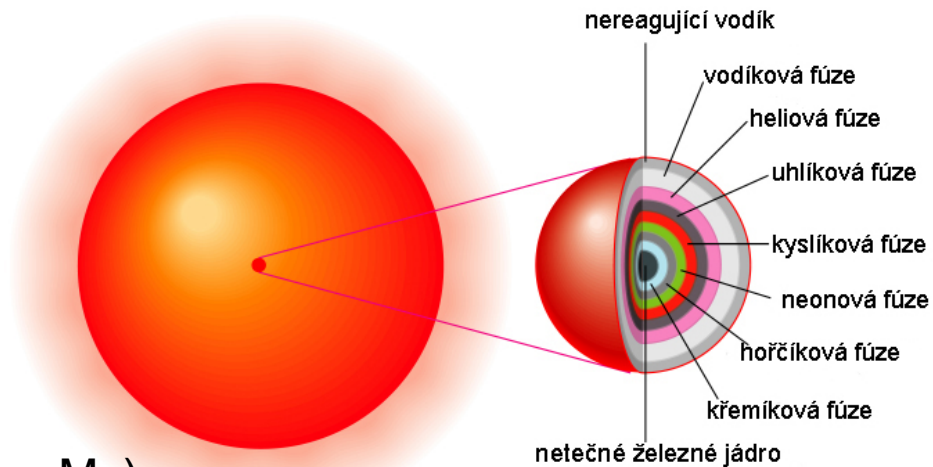
Nestabilní řešení

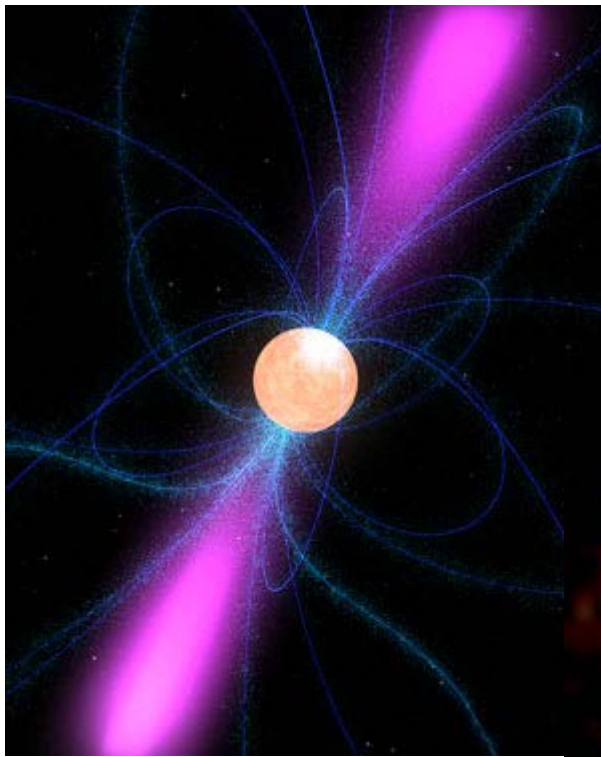
- $M_{\text{poč}} > 11 M_{\odot}$ (ve stadiu obra $M > 8 M_{\odot}$)
- v jádru a ve slupkách se postupně zapalují další jaderné reakce až po Fe ($1.4 M_{\odot} < M_j < 3 M_{\odot}$)
 - centrální oblasti zhroucení ->

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

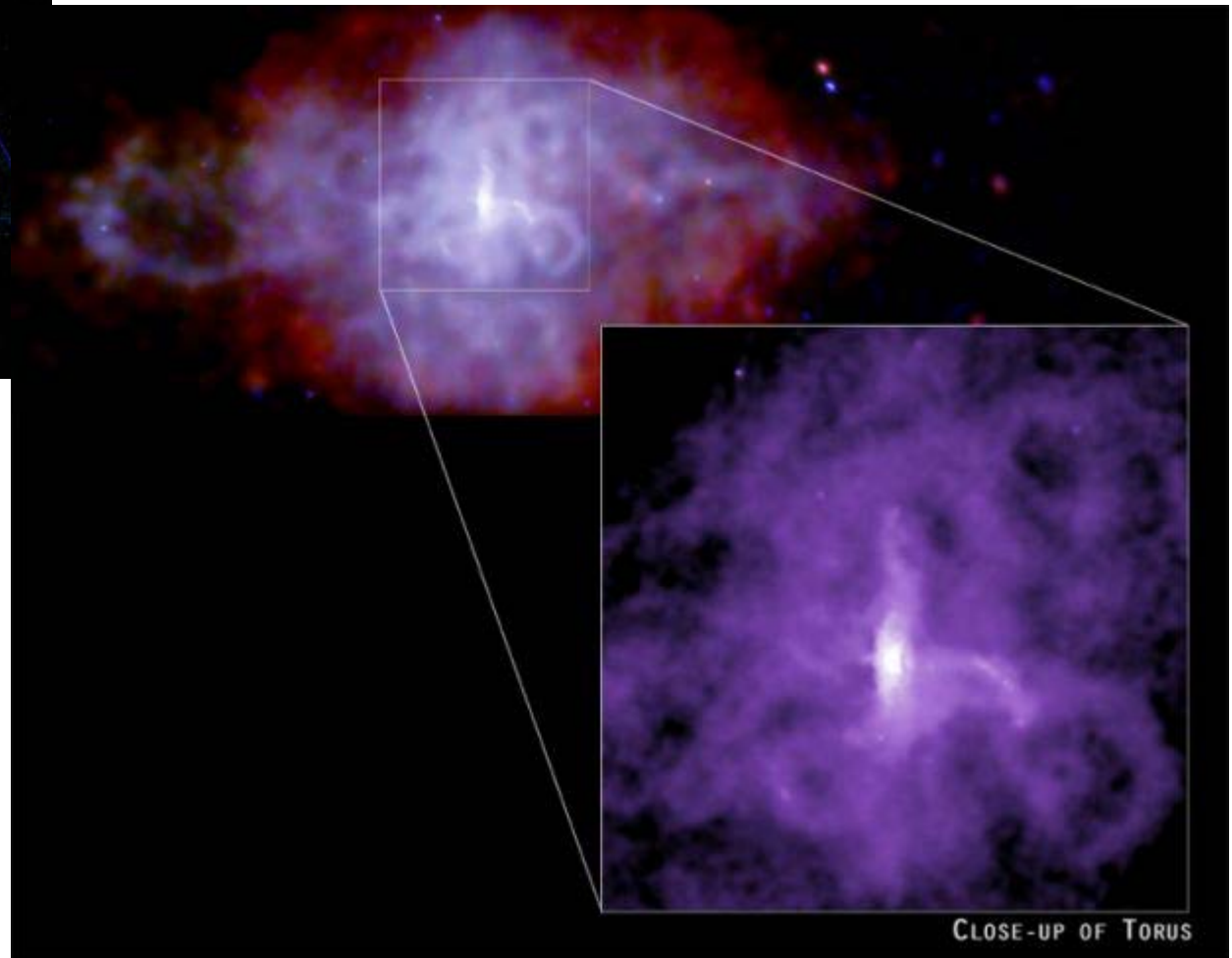
- uvolněná energie – výbuch *supernovy* – většina energie v neutrinech
- supernova II
- *pulsar* – nesouhlas rotační osy a osy mg. pole
 - rádiové pulsy, přísně periodické

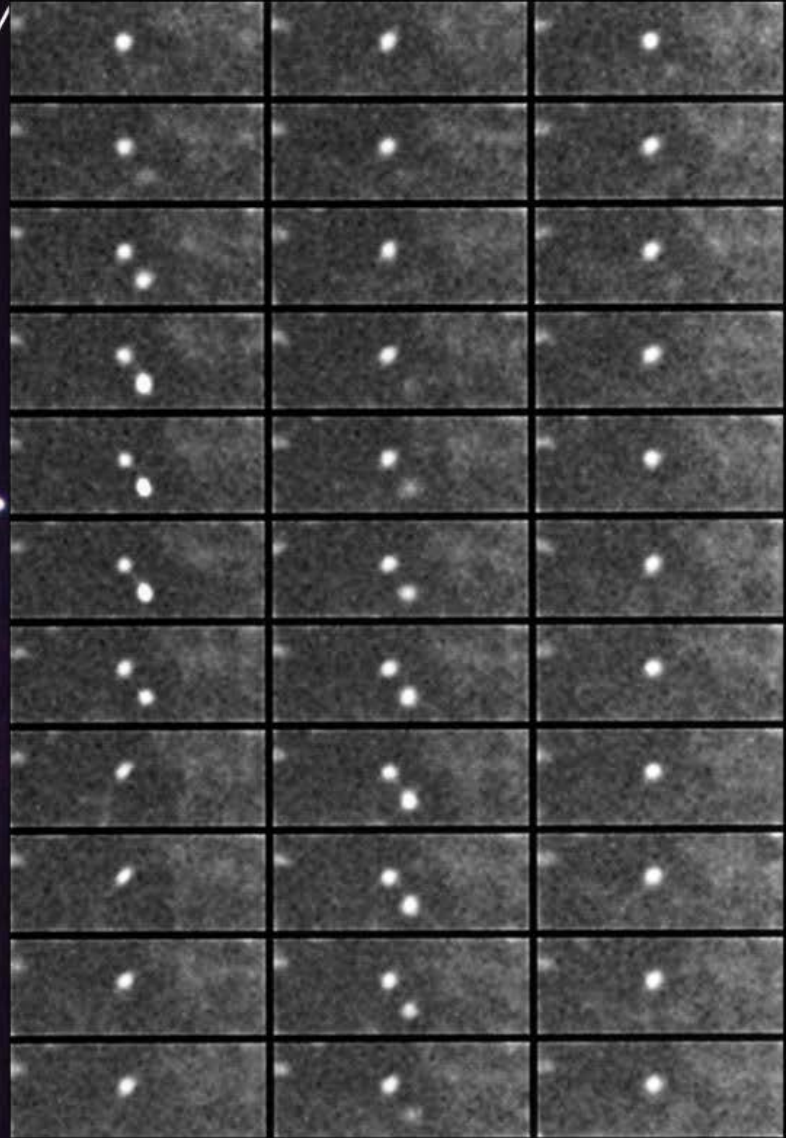
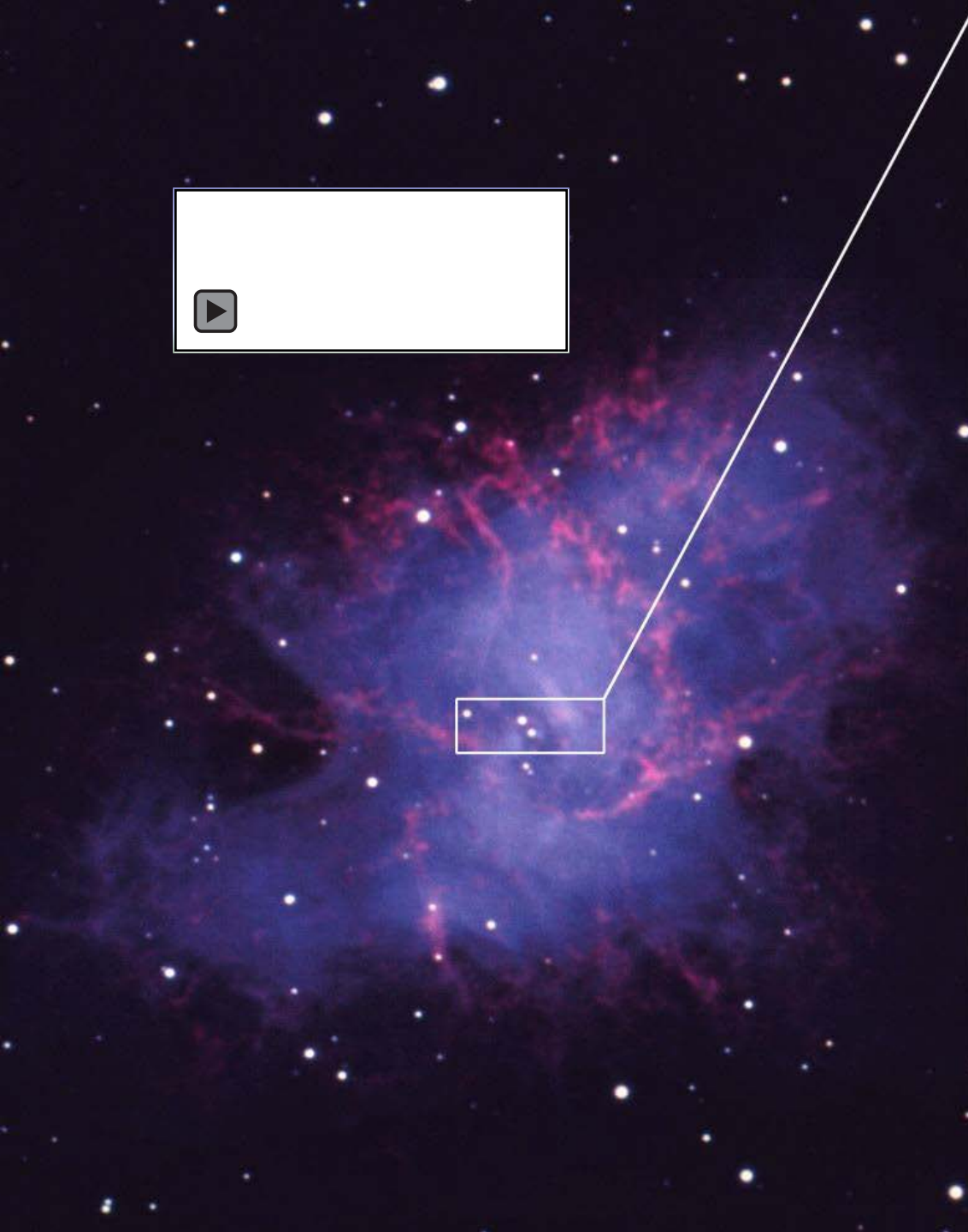
- $M_{\text{poč}} > \text{cca } 50 M_{\odot}$ – Fe jádro $M_j > 3 M_{\odot} \Rightarrow$ kolaps se nezastaví – vzniká *černá díra*
- uvolněná energie – výbuch *hypernovy* - SN1998bw

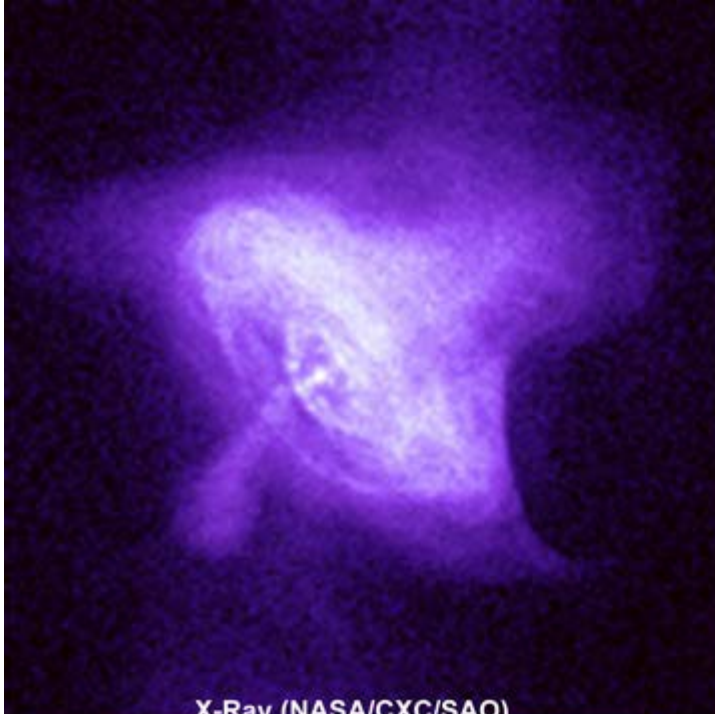




SN 1181, pozůstatek supernovy 3C58



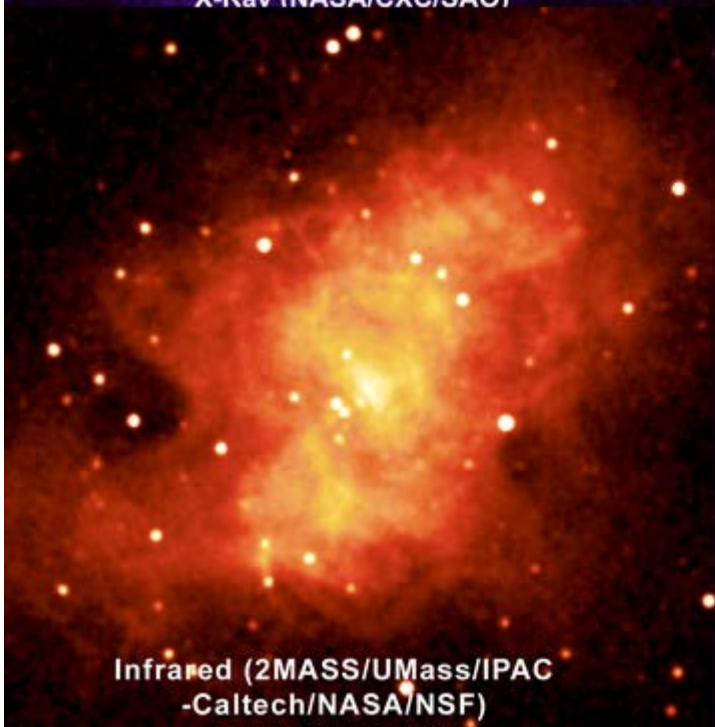




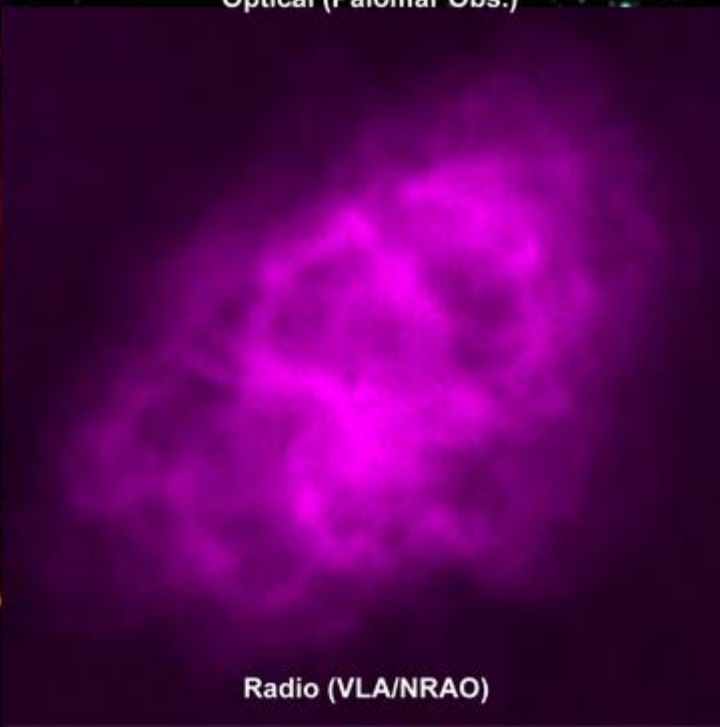
X-Ray (NASA/CXC/SAO)



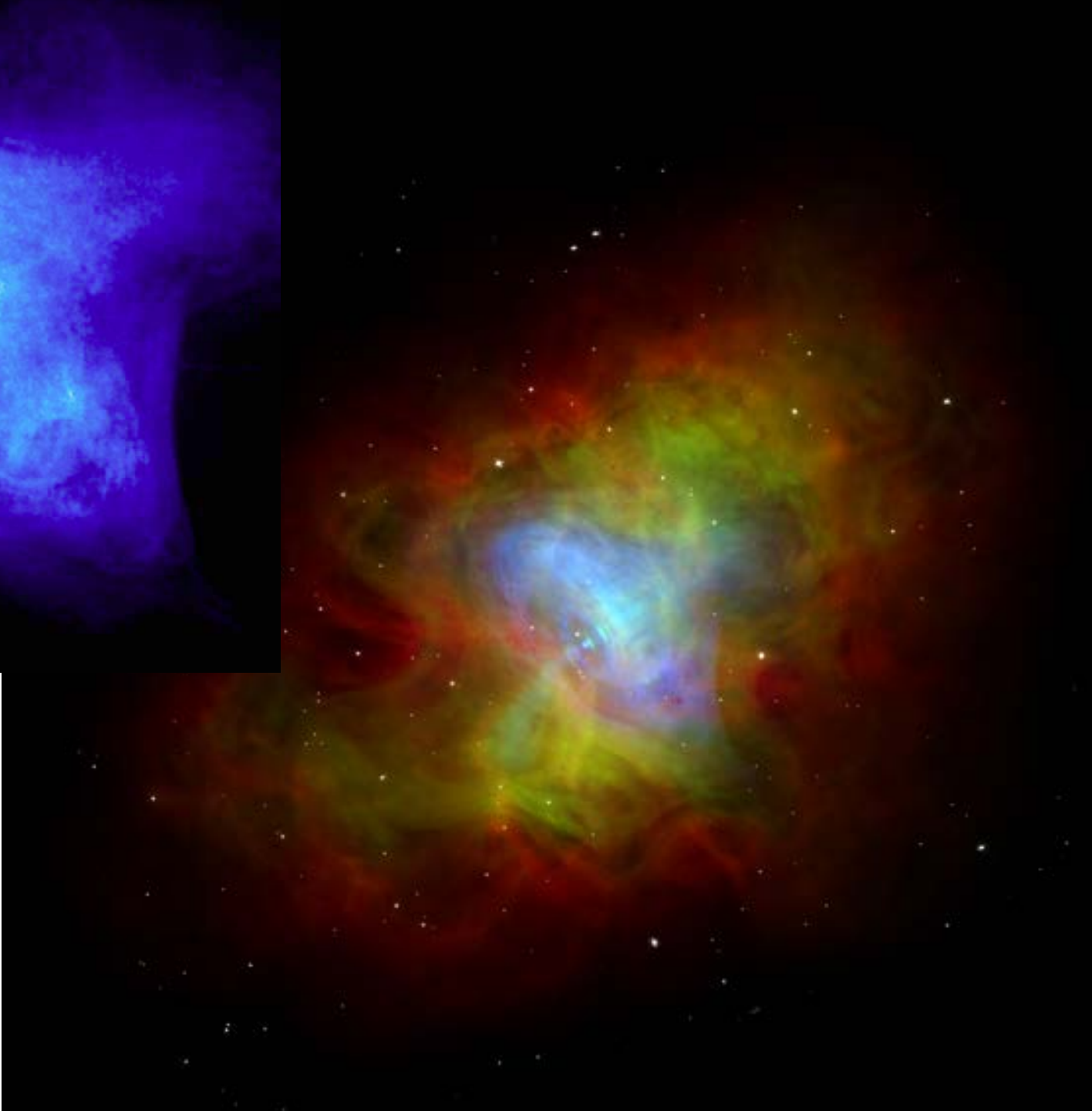
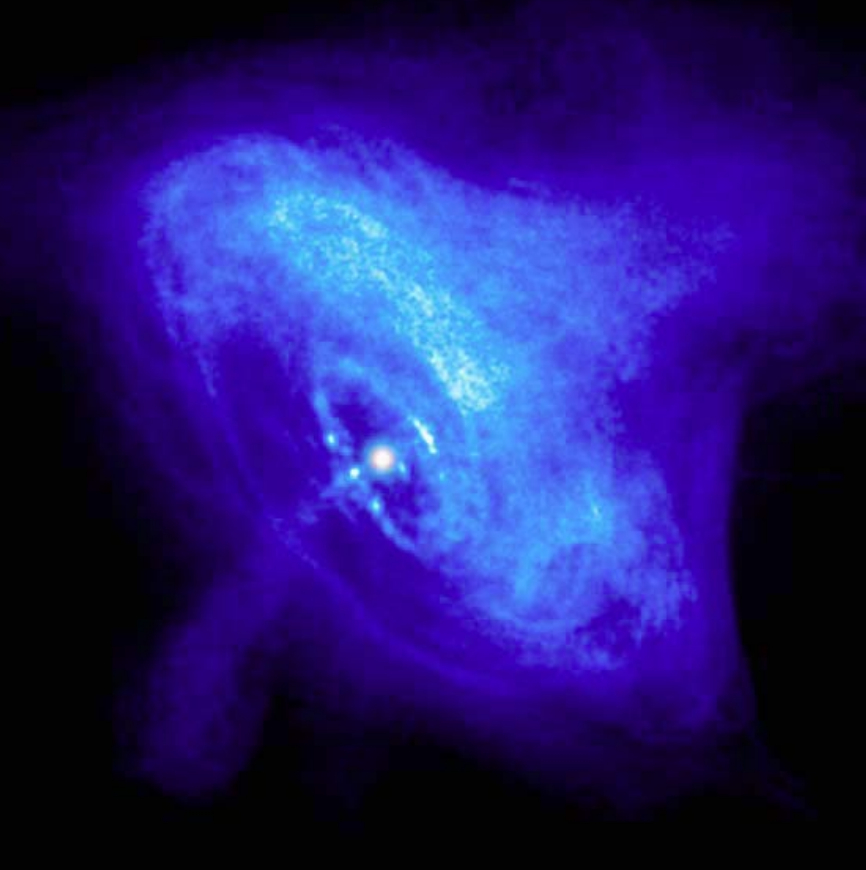
Optical (Palomar Obs.)

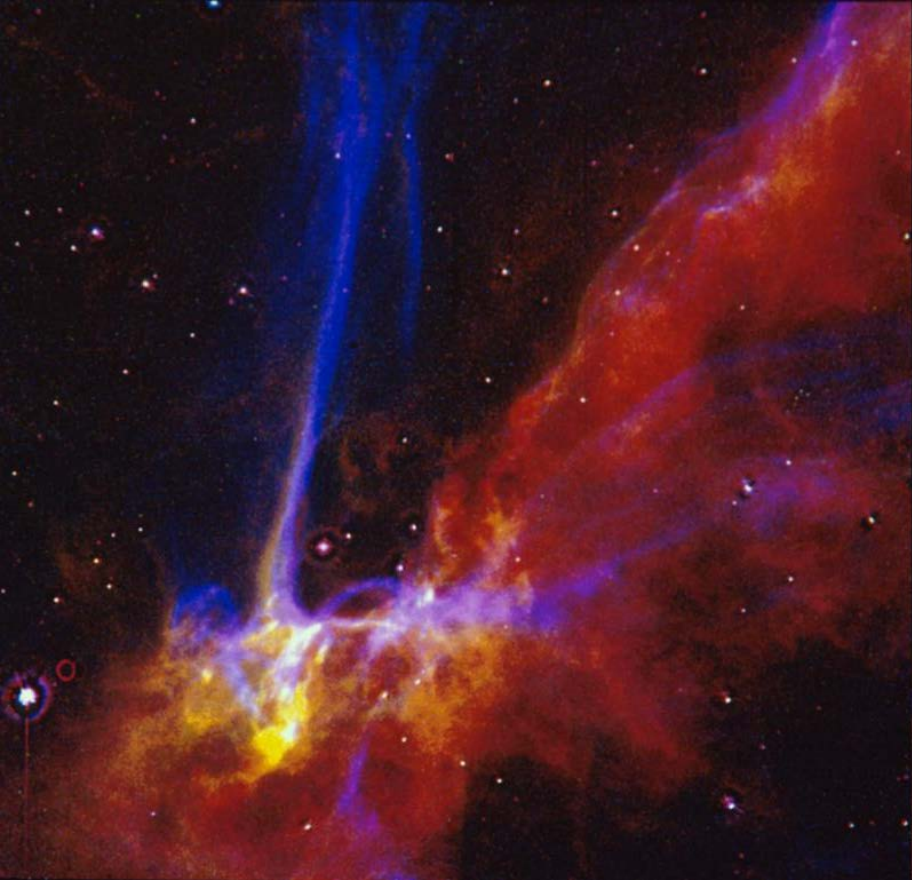


Infrared (2MASS/UMass/IPAC
-Caltech/NASA/NSF)

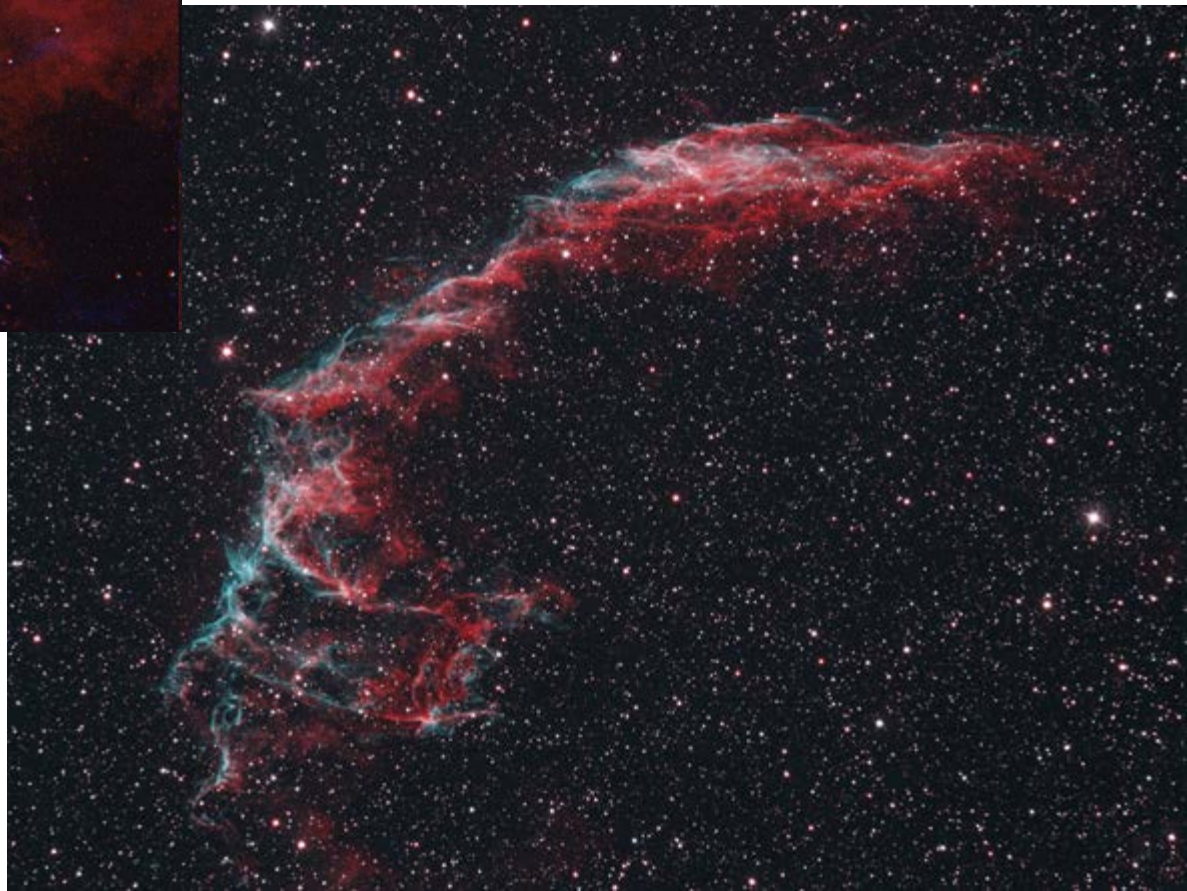


Radio (VLA/NRAO)





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

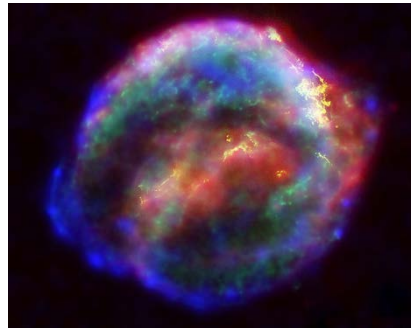
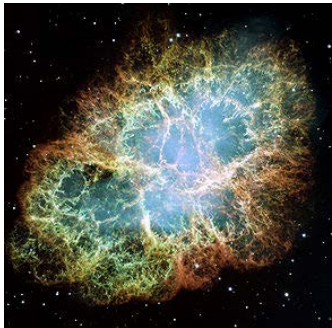
1054 - Tau – nejslavnější - Krabí mlhovina
s pulsarem

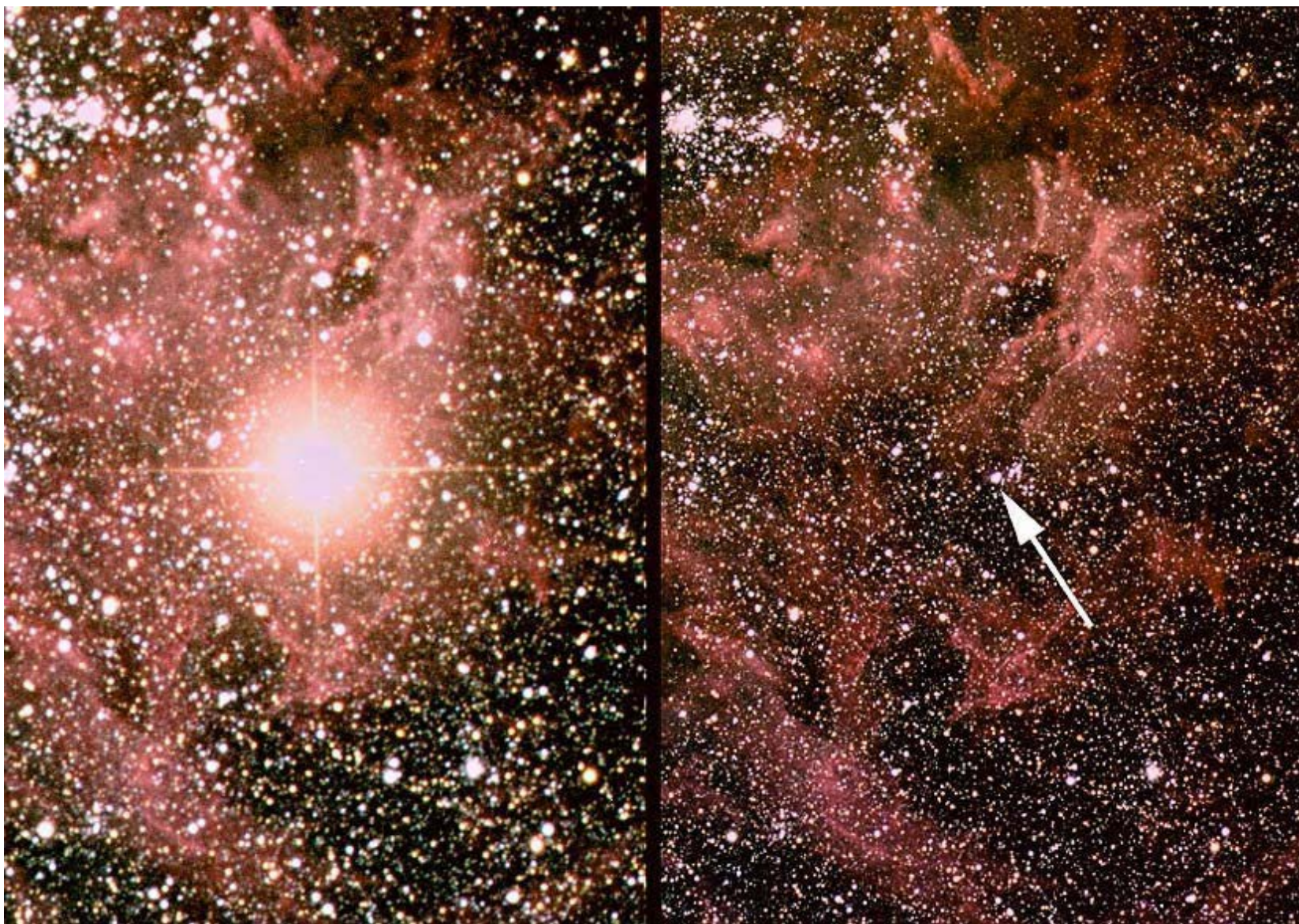
1572 - Cas - Tychonova supernova

1604 - Oph - Keplerova supernova

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

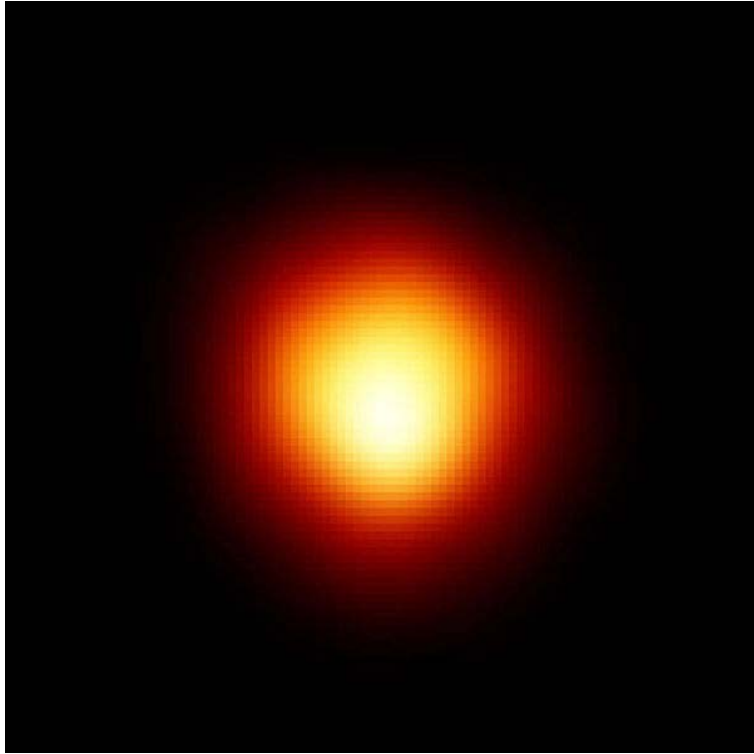
kdy vybuchne další supernova,
kterou uvidíme pouhýma očima?





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

Kandidáti na supernovy



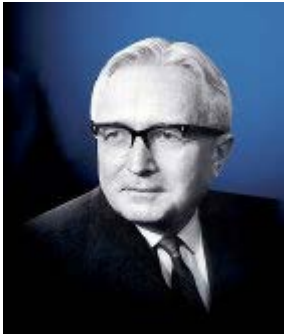
Betelgeuse



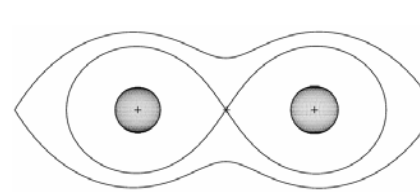
Zvláštnosti vývoje těsných dvojhvězd

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

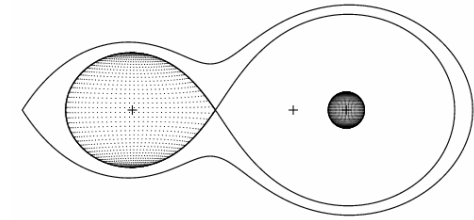
typický představitel – např. β Per, β Lyr



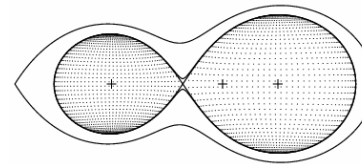
Zdeněk Kopal



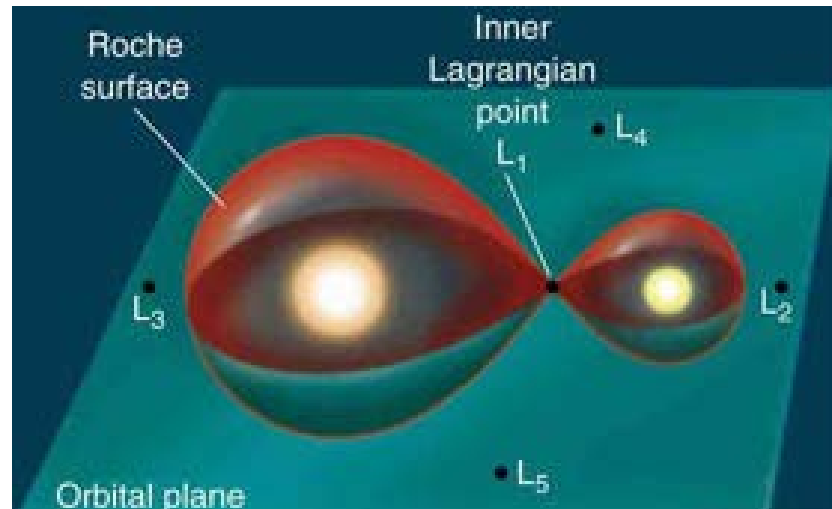
oddělená soustava



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 !

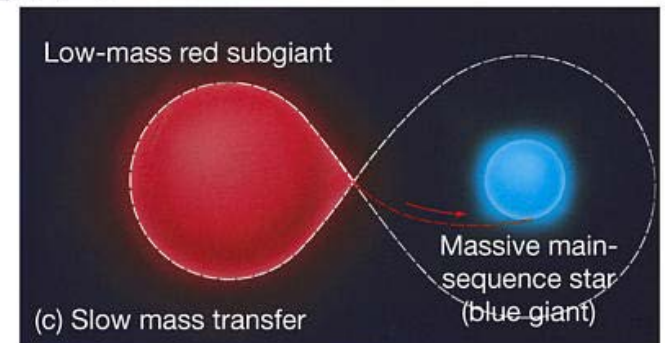
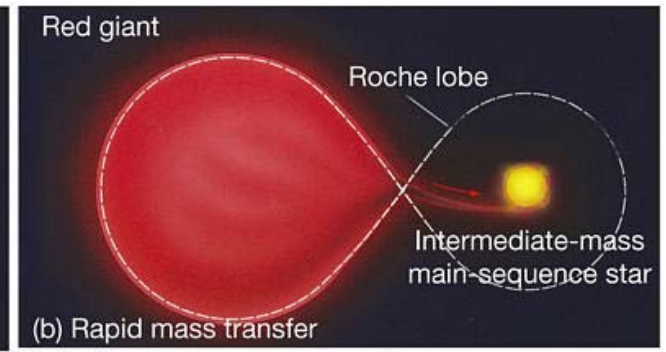
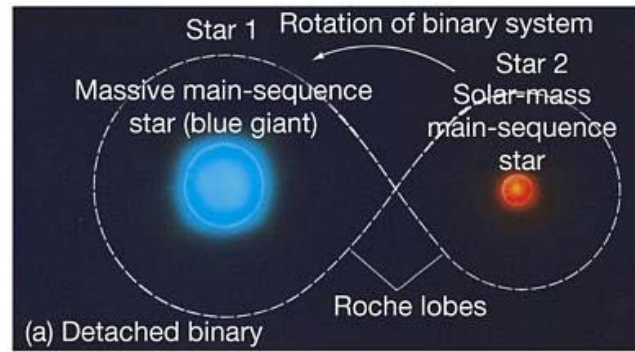
Vysvětlení - pes požívá psa!



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.)

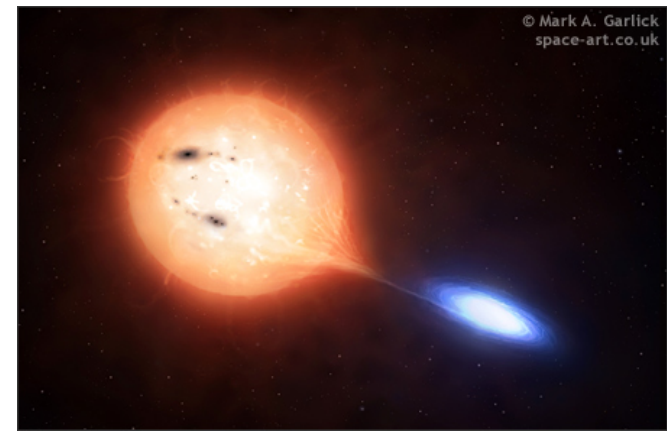
Příčiny – hvězdný vývoj, rozpínání hvězd (složek dvojhvězdy)

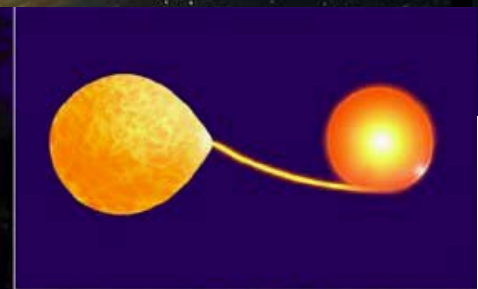
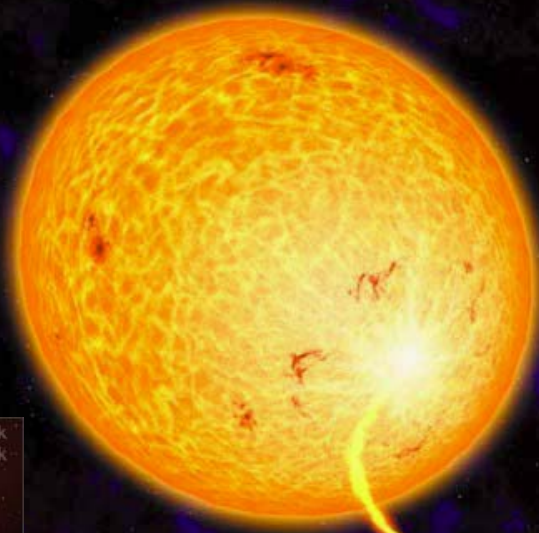
Průběh – i velmi rychlý, masivní

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

Důsledky (projevy) – změna periody oběhu,

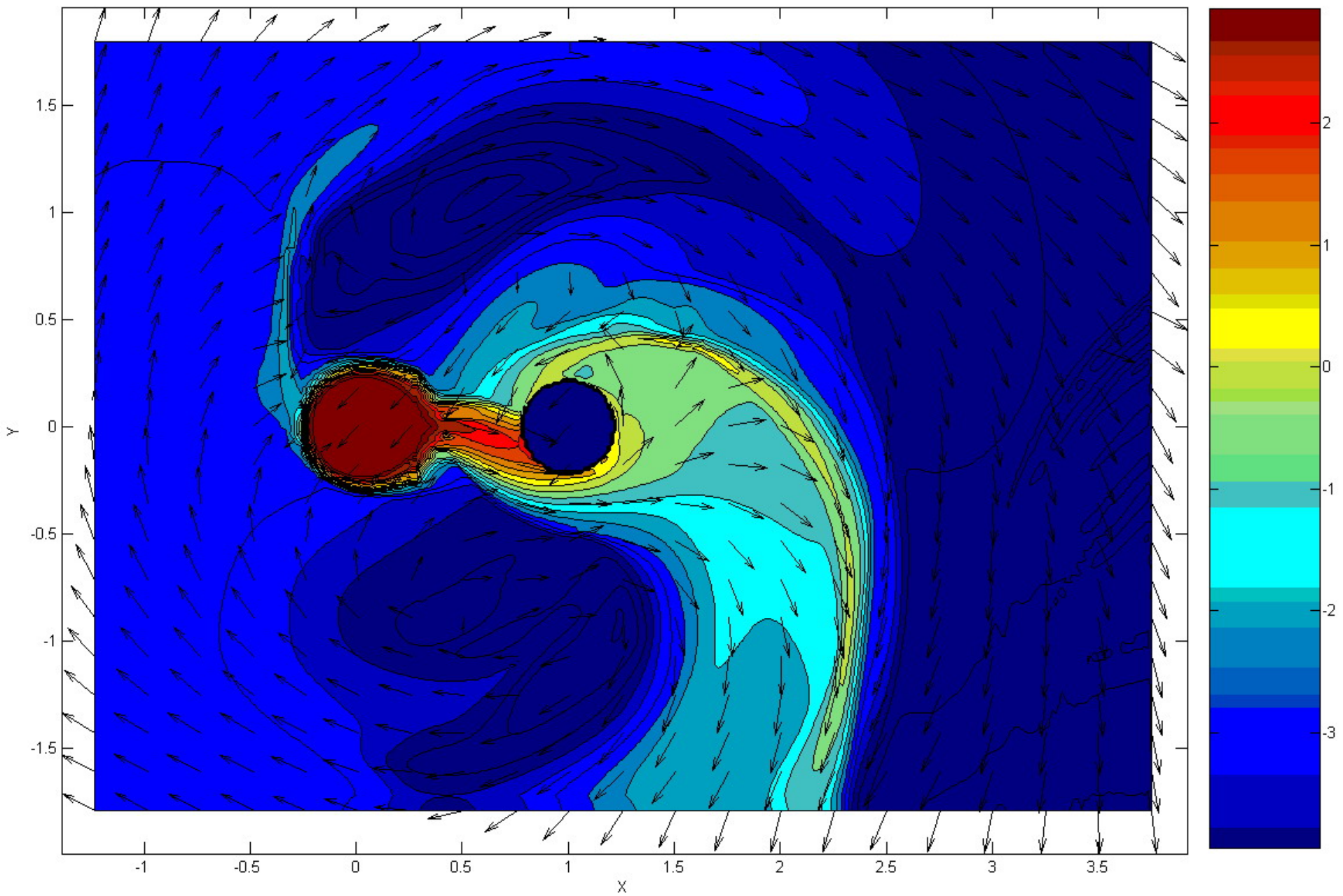
- změny jasnosti, projevy ve spektru



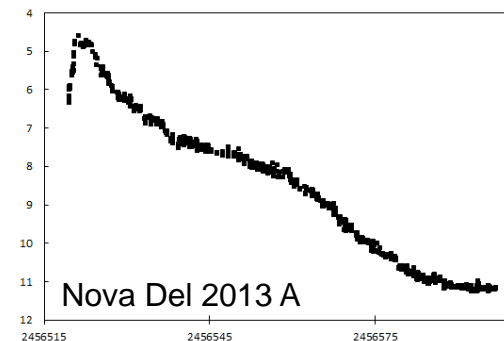


© Mark A. Garlick
space-art.co.uk





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

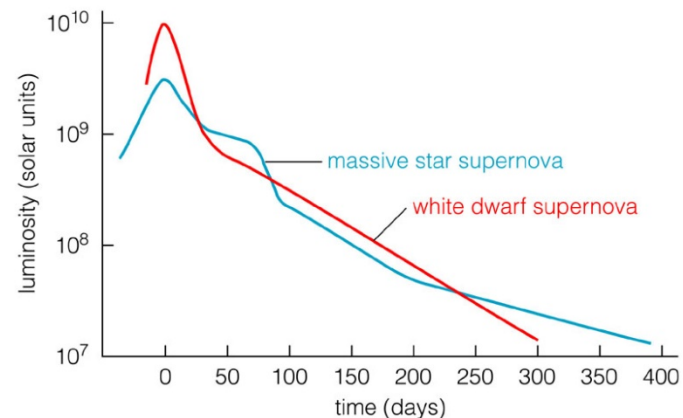
-> BT „vychytává“ hv. vítr

-> spad na BT



Supernovy typu Ia

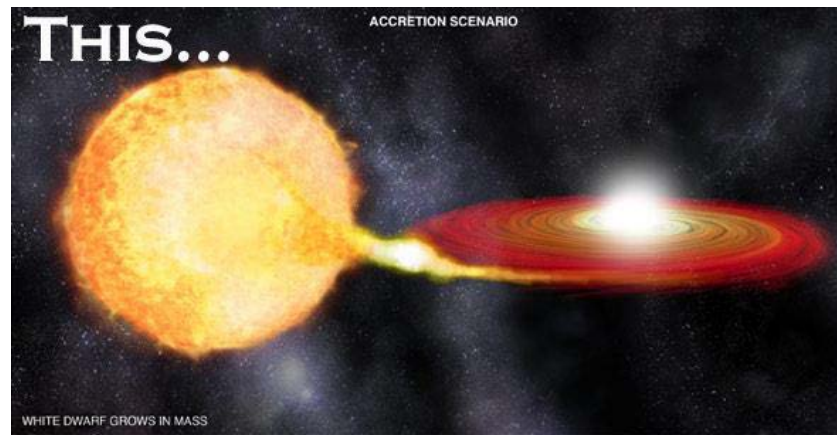
- ❖ vzniká v těsné dvojhvězdě (1 složka bílý trpaslík, kde ustaly jaderné reakce).
- ❖ standardní svíčky $M_v = -19.3$ mag, ale



Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.

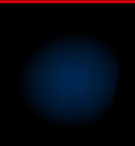

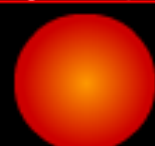


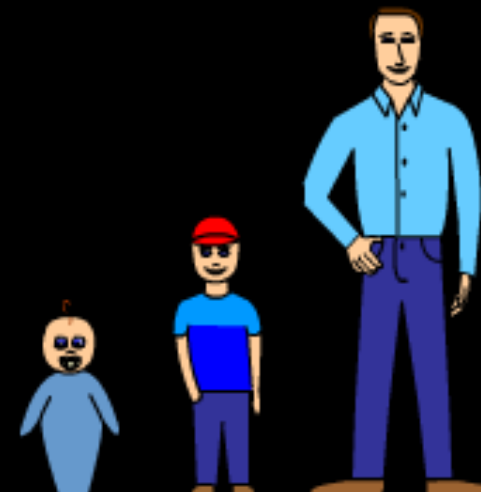


dva scénáře:

- 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!

