

# Vývoj hvězd na hlavní posloupnosti



## Hydrostatická rovnováha

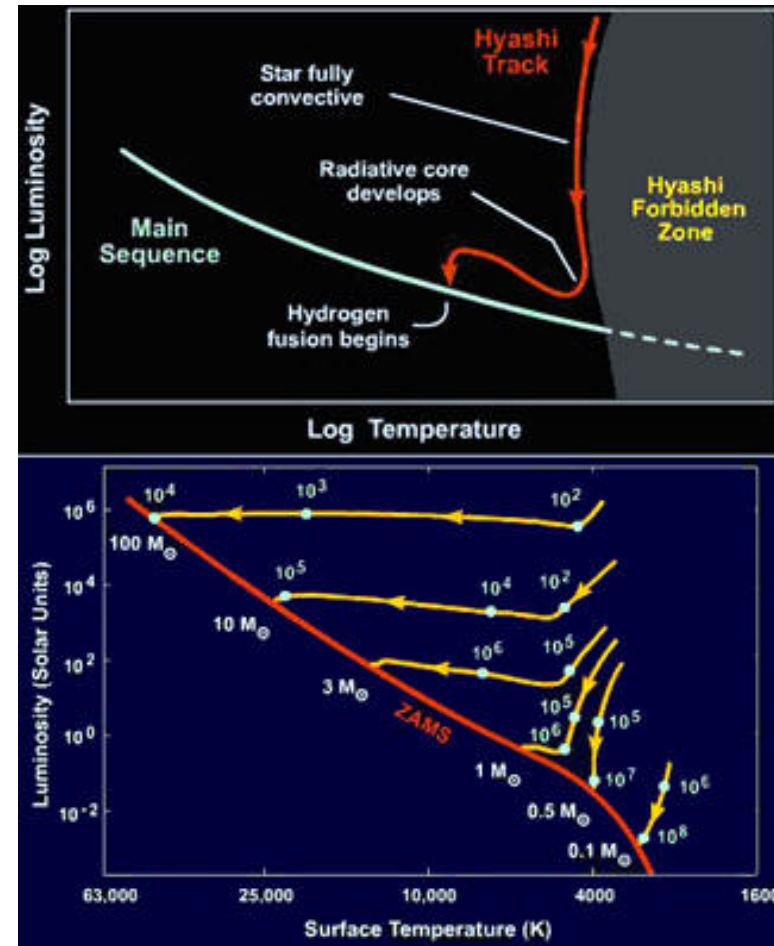
rostoucí teplota jádra => jaderné fúze vodíku rychleji => roste teplota a tlak v jádru => prvotní kolaps zpomaluje až se zcela zastaví (působení gravitace a gradientu tlaku v rovnováze)  
gradient tlaku je v rovnováze s gravitací => hvězda se nerozpíná ani nesmršťuje;

## 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)



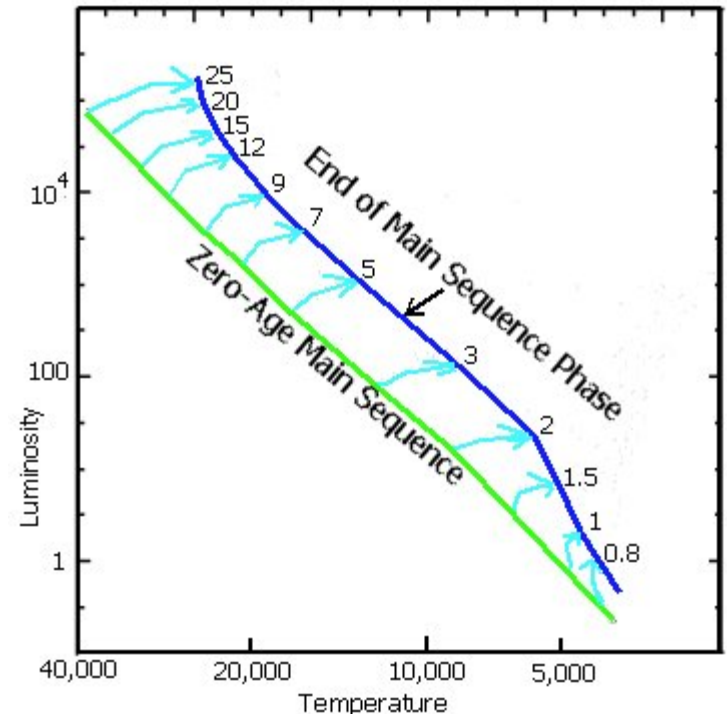
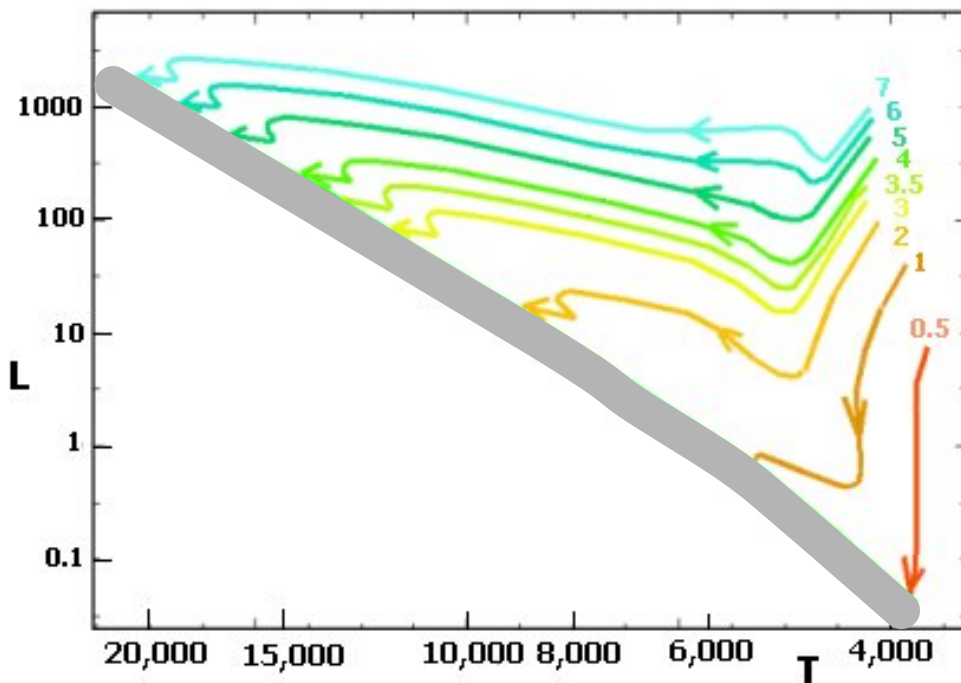
# HR diagram - stopa vývoje hvězdy

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



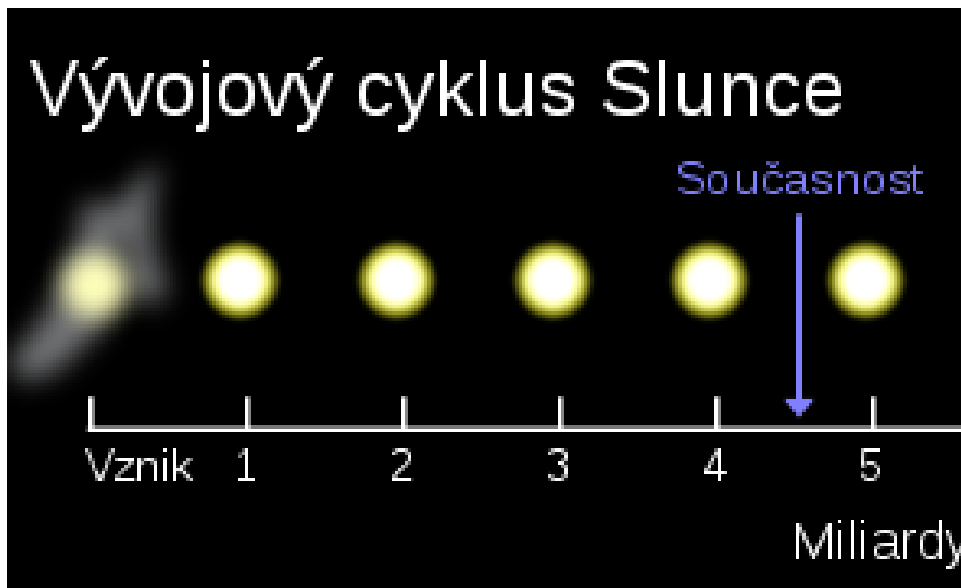
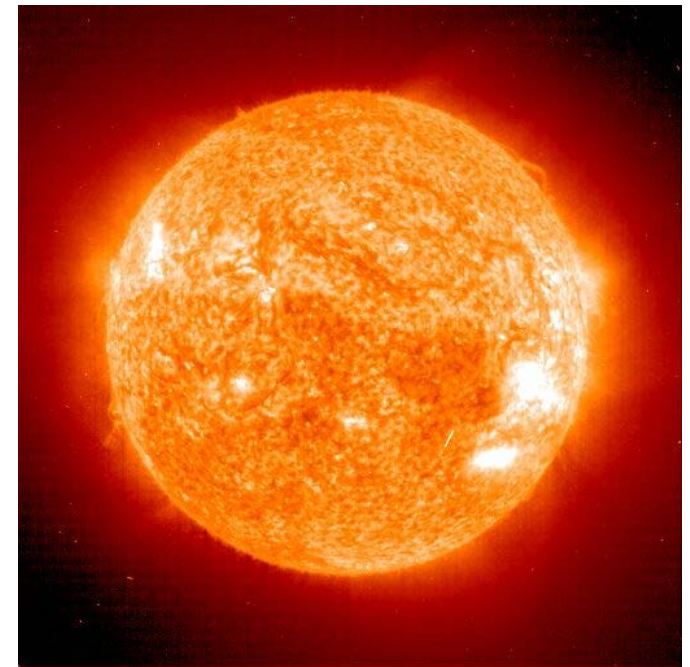
# Hvězdy v nejlepších letech

= hvězdy na hlavní posloupnosti

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

(staré, dobré Slunce v rovnovážném stavu)

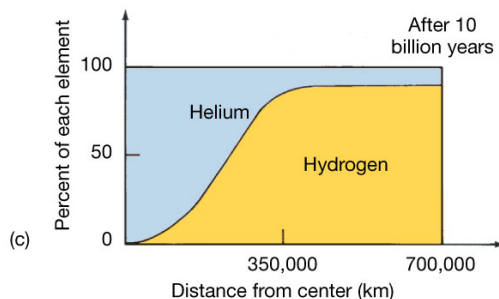
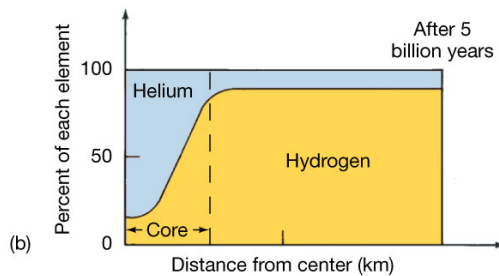
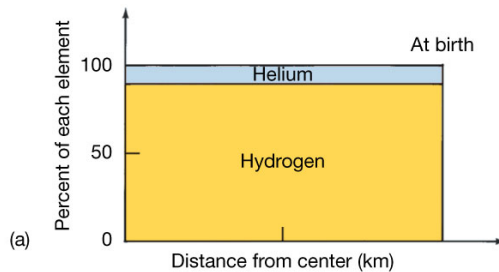
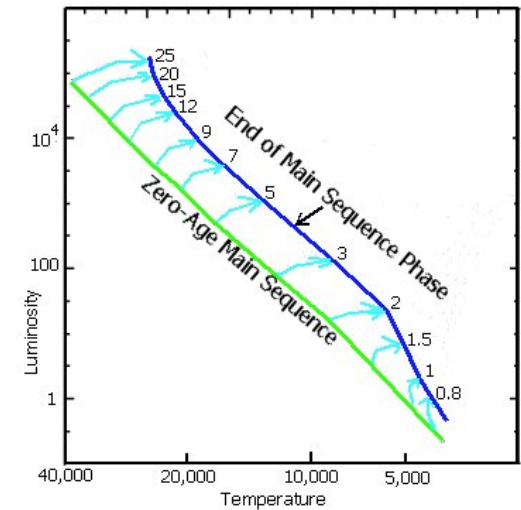
stáří 4.6 miliardy let



# 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

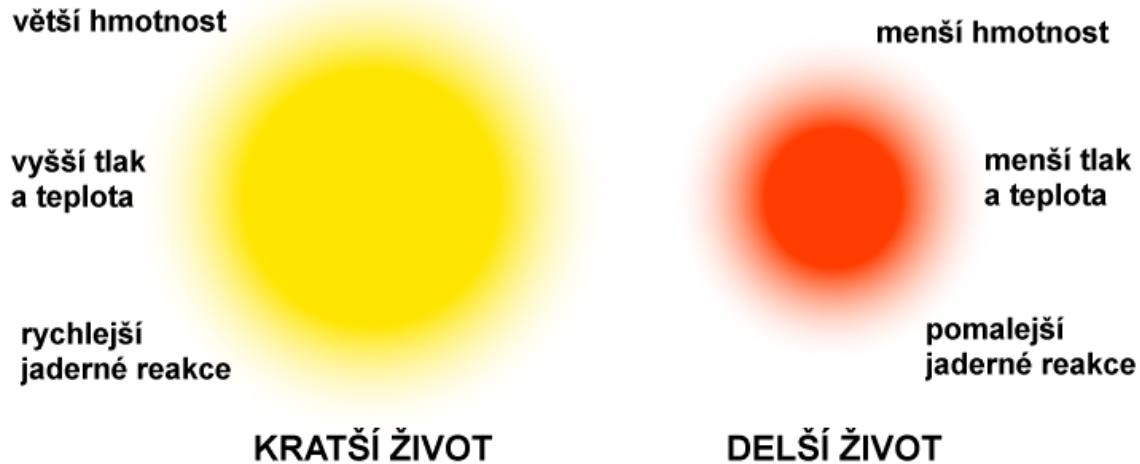
hvězdné „období klidu“ - řádově  $10^6 - 10^{10}$  let

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

**čím má hvězda větší hmotnost, tím rychleji se vyvíjí!**

proč?

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



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	$R_S$		
$\rho$	0,02	0,1	0,3	0,5	1	2		$t \cdot m^{-3}$		
$\tau$	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,  $\rho$  střední hustota,

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



The background is a deep space photograph showing a vast field of stars. A prominent feature is a diagonal band of stars, likely the Milky Way, which is brighter and more densely populated with stars, showing a color gradient from blue to red. The text is overlaid on a semi-transparent grey rectangular box in the upper-middle part of the image.

**Vývoj hvězd po opuštění  
hlavní posloupnosti**



# Konec klidu na HP

kdy k němu dojde?

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

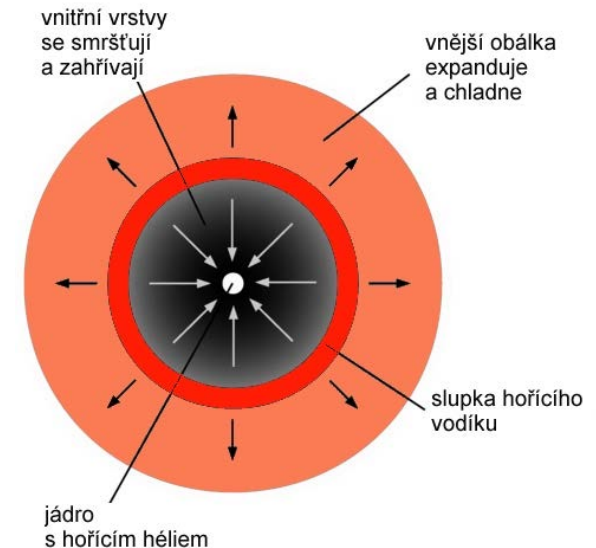
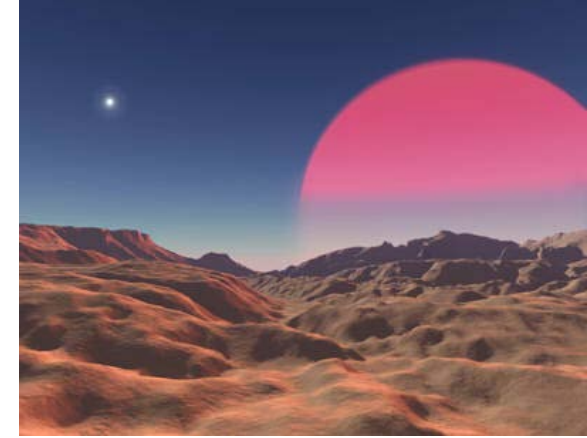
-> vyšší produkce energie ve slupce

- obálka hvězdy – zvýšený tok energie zdola

⇒ rozpíná se a chladne

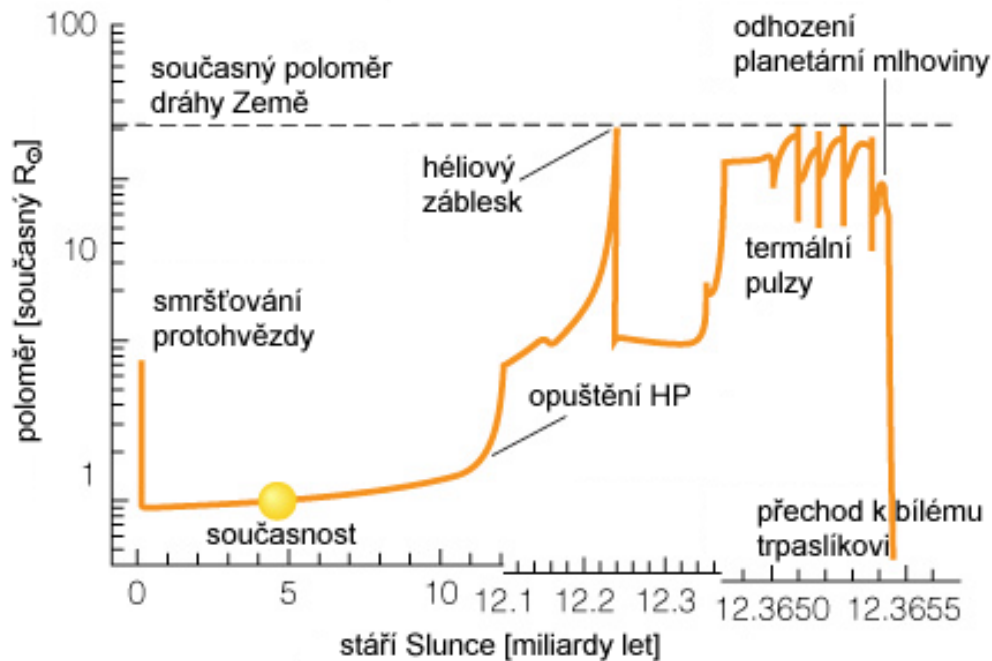
⇒ *červený obr* nebo *veleobr*

⇒ stěhování v HRD

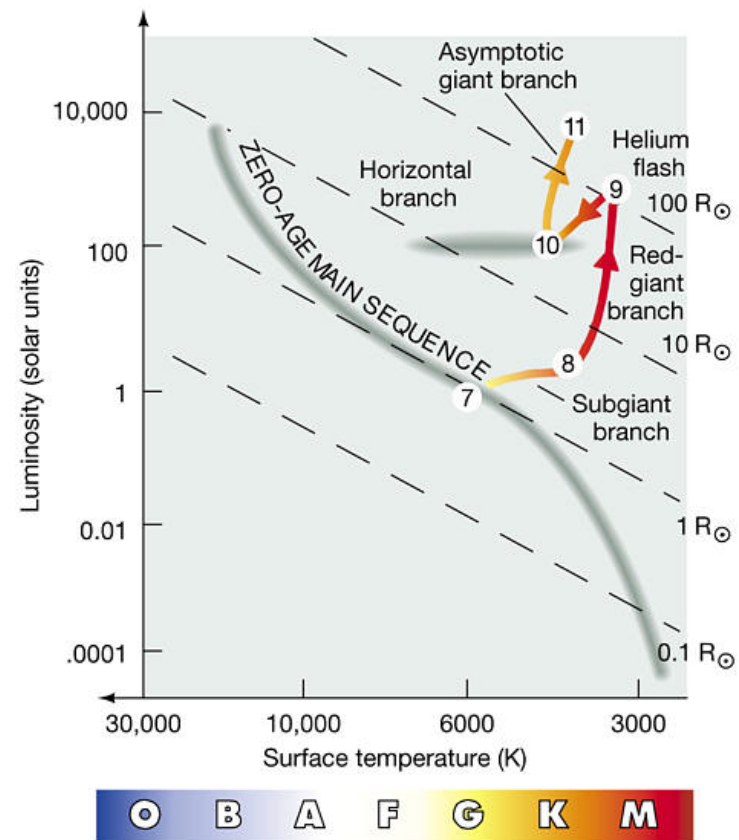


# Hvězdní obři a veleobři

- 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 ( $3 \alpha$  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.



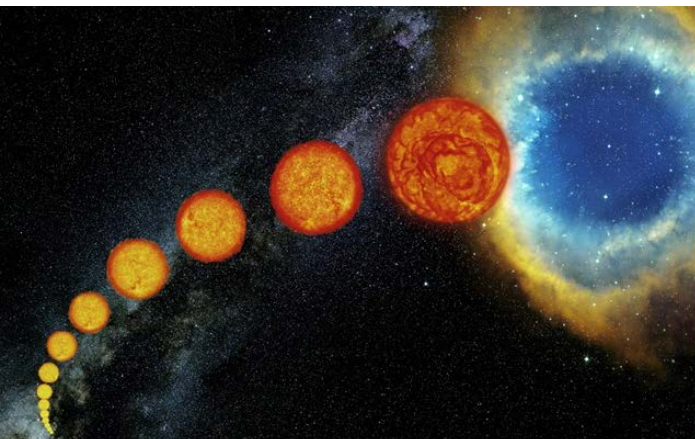
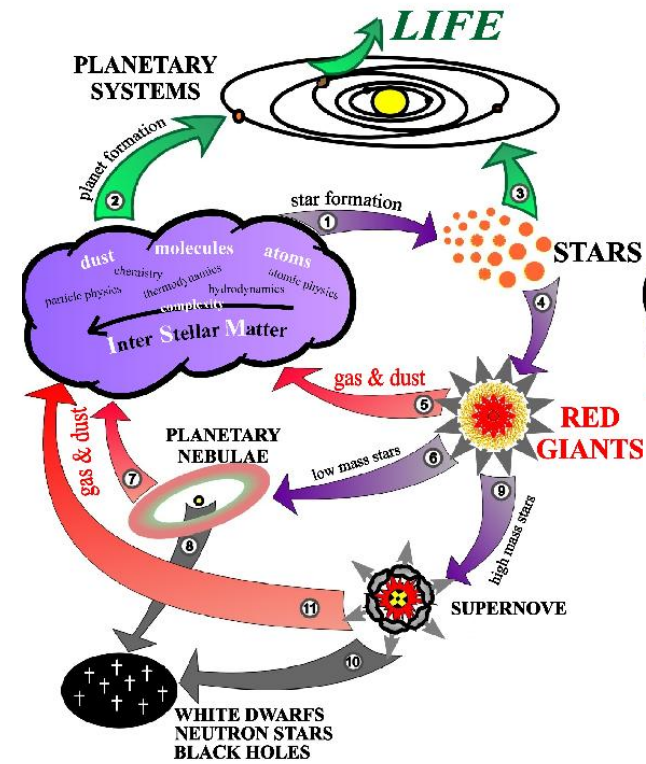


# Konečný osud hvězd

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

## Závěrečná stadia:

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



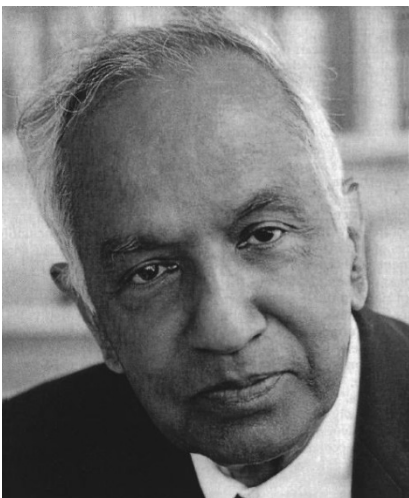
# Stabilní řešení

$M_{\text{poč}} < 0.075 M_{\odot}$  – 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

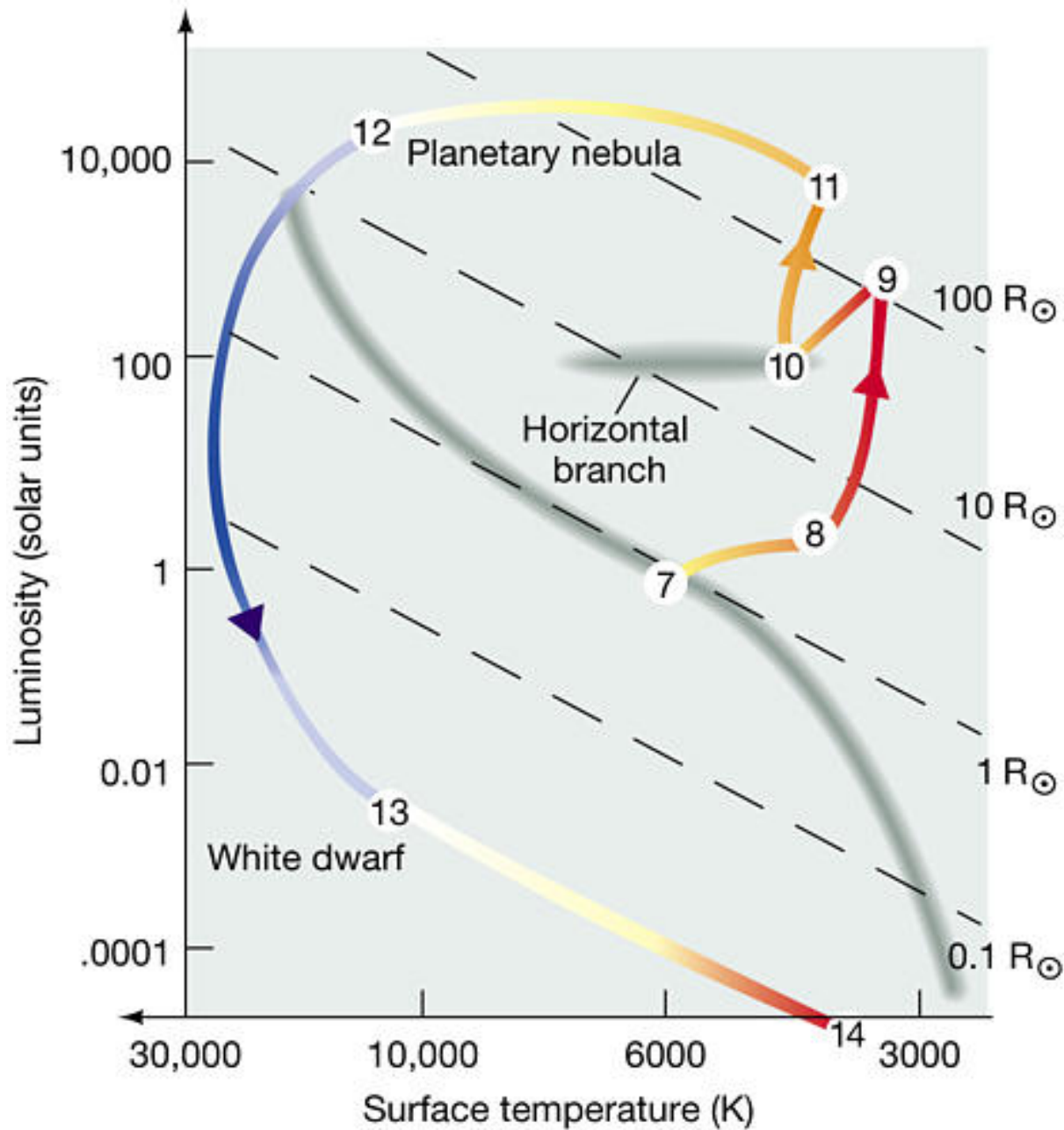


*S Chandrasekhar.*

Subrahmanyan  
Chandrasekhar





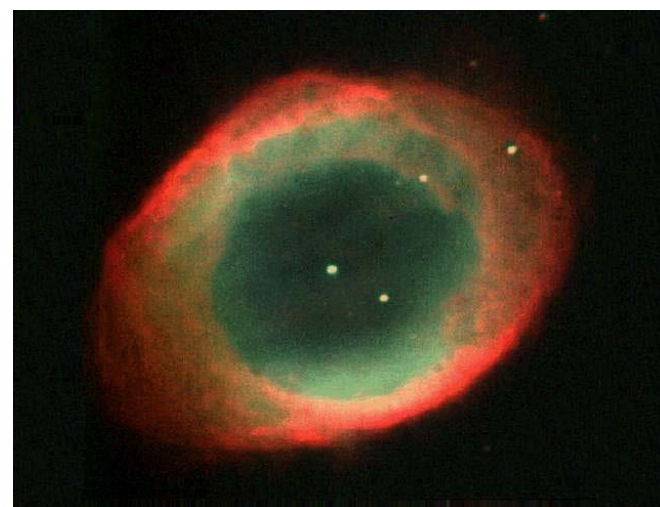




Jedna z najmladších planetárnych mlhovín, označená Hen 1357.



M 27



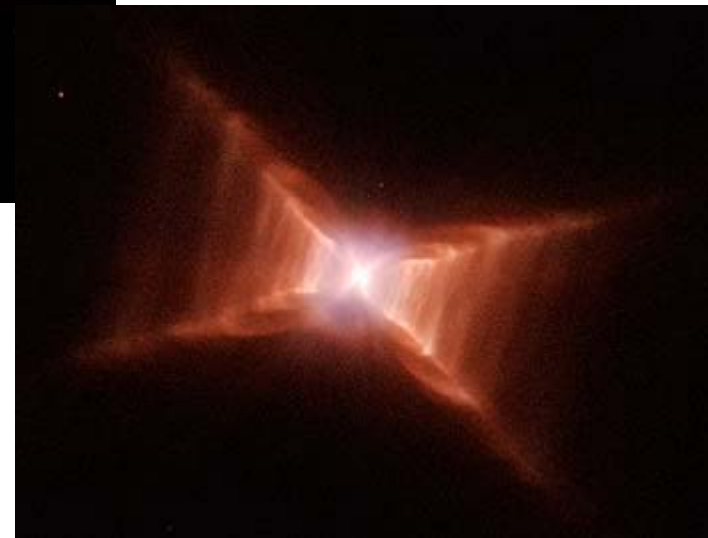
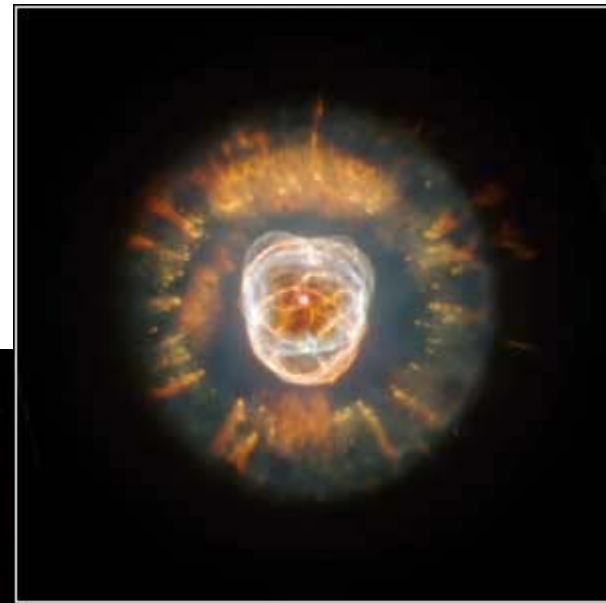
M57



V naší Galaxii – jen asi 1500 planetárních mlhovin

Proč tak málo?

je to velmi krátké vývojové období



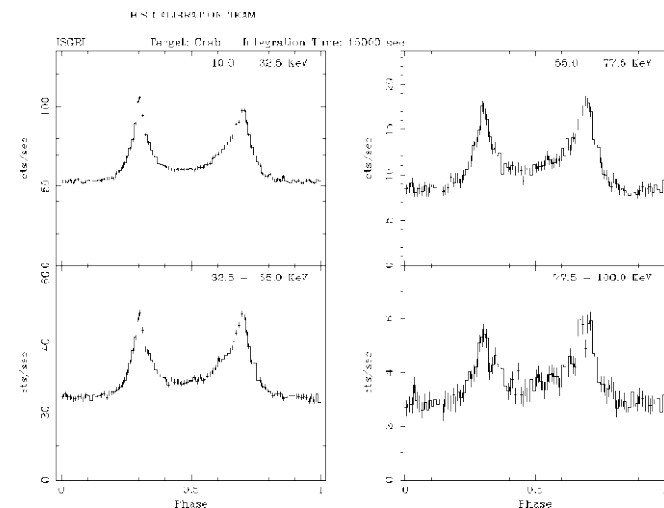
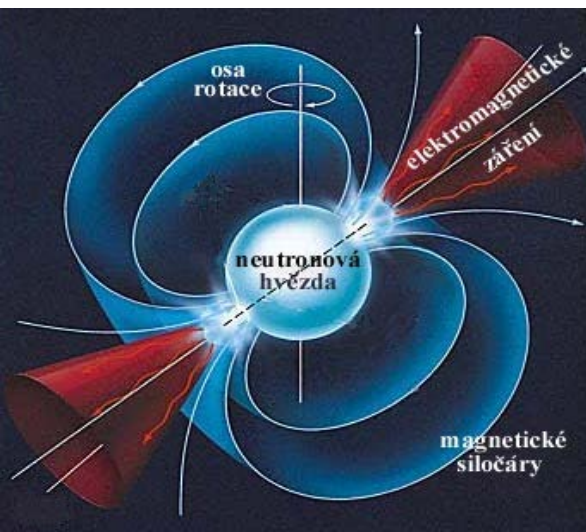
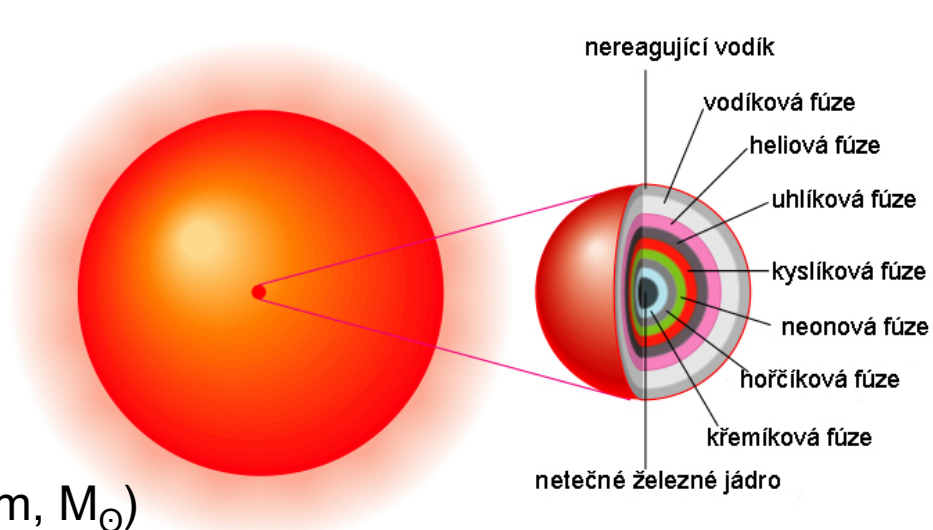
# Nestabilní řešení

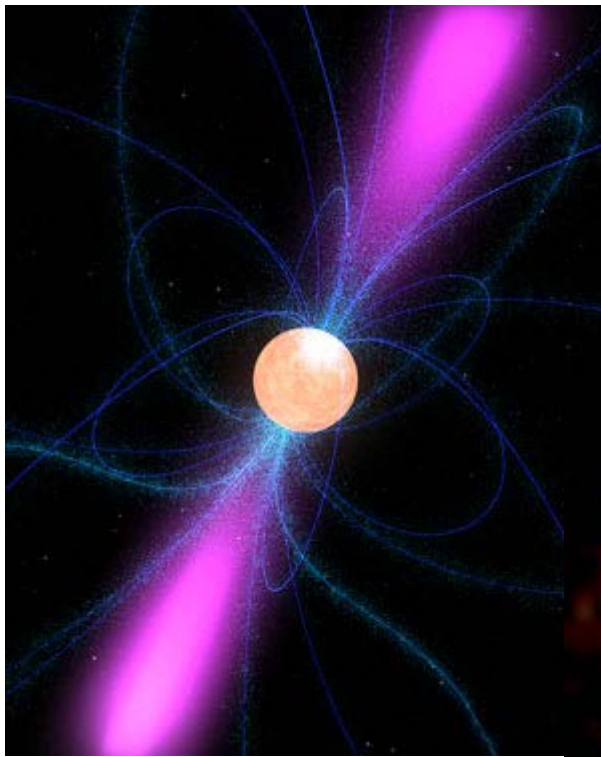
- $M_{\text{poč}} > 11 M_{\odot}$  (ve stadiu obra  $M > 8 M_{\odot}$ )
- v jádru a ve slupkách se postupně zapalují další jaderné reakce až po Fe ( $1.4 M_{\odot} < M_j < 3 M_{\odot}$ )
  - centrální oblasti zhroucení ->

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

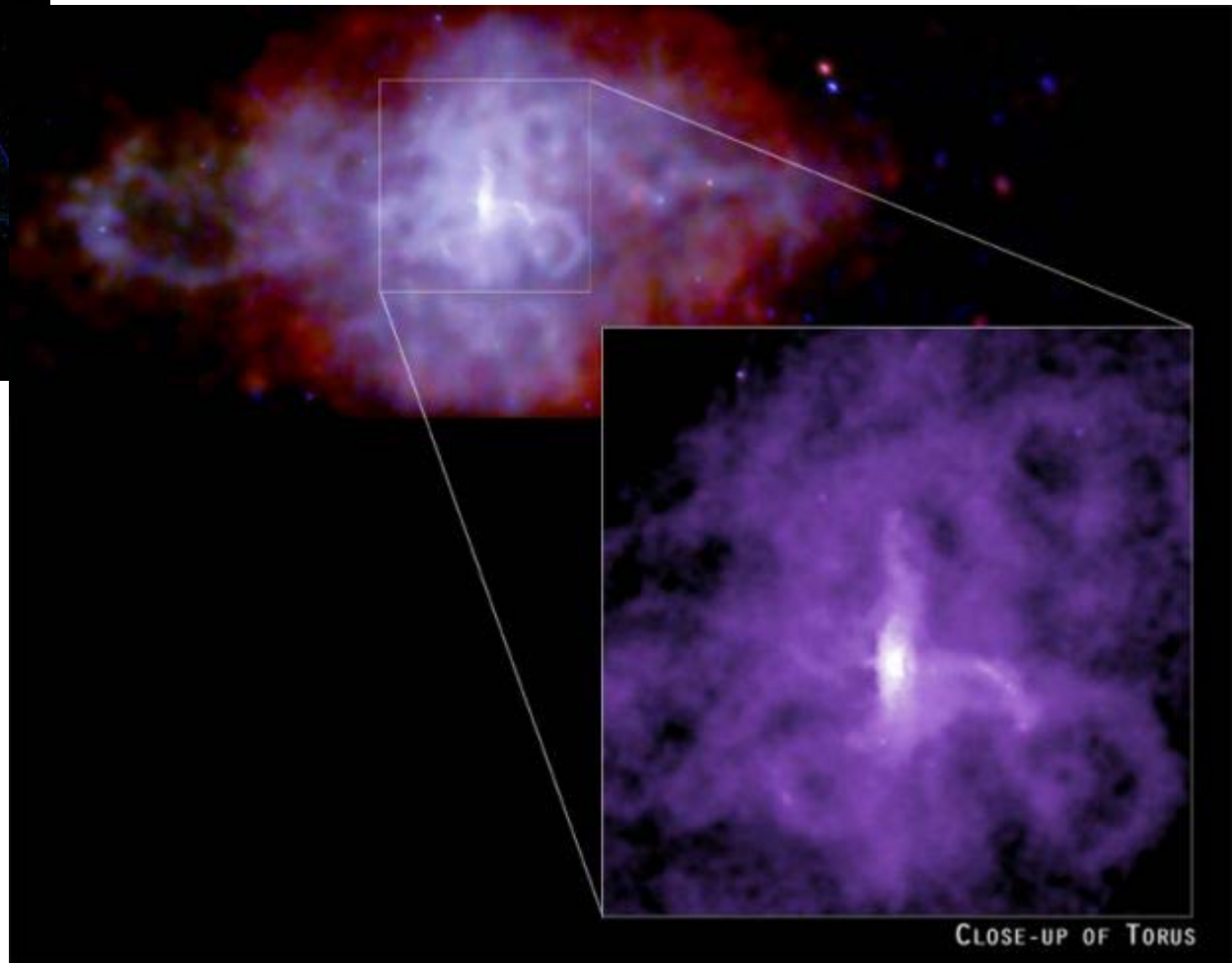
- uvolněná energie – výbuch *supernovy* – většina energie v neutrinech
- supernova II
- *pulsar* – nesouhlas rotační osy a osy mg. pole
  - rádiové pulsy, přísně periodické

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

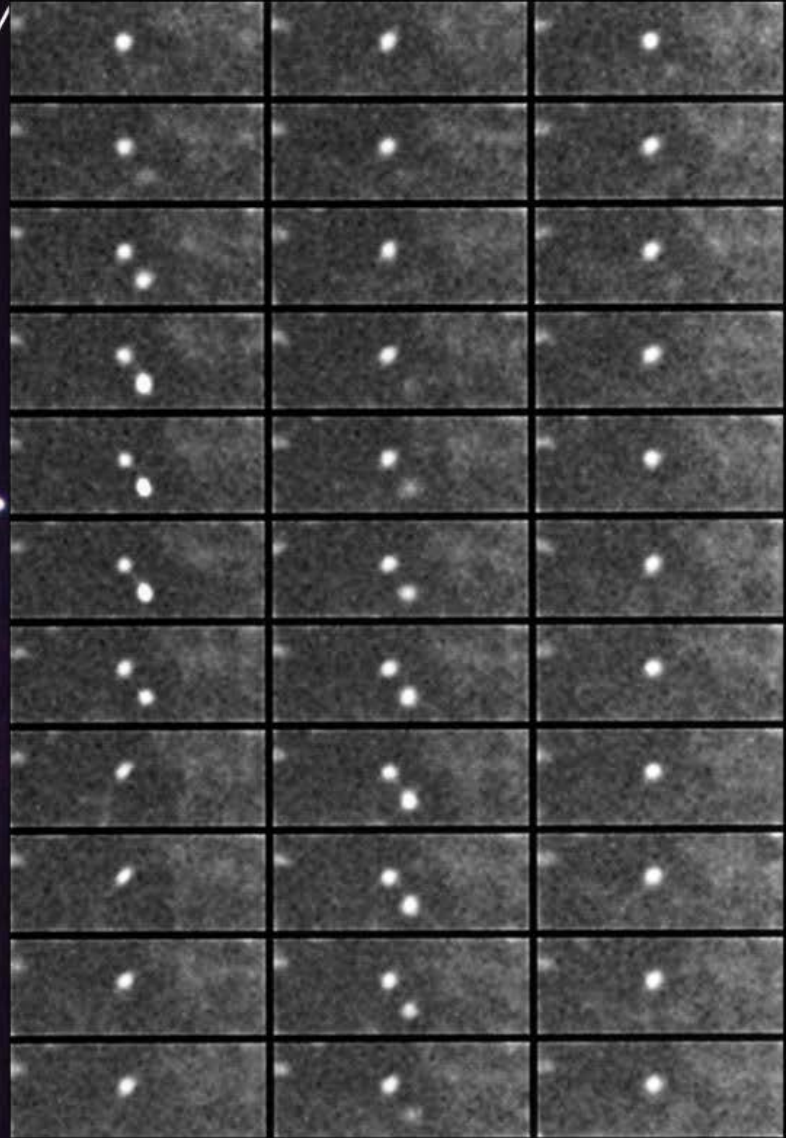
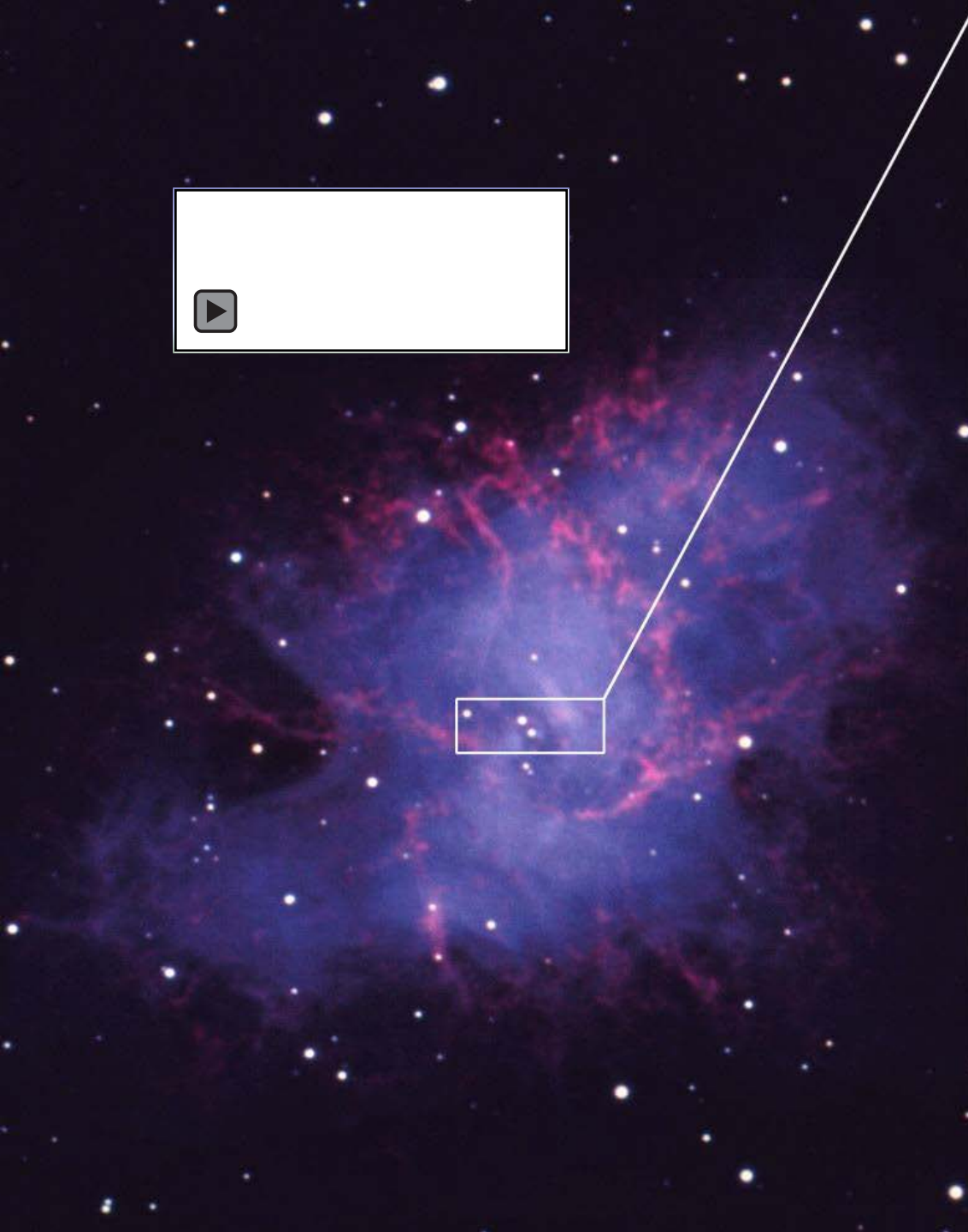


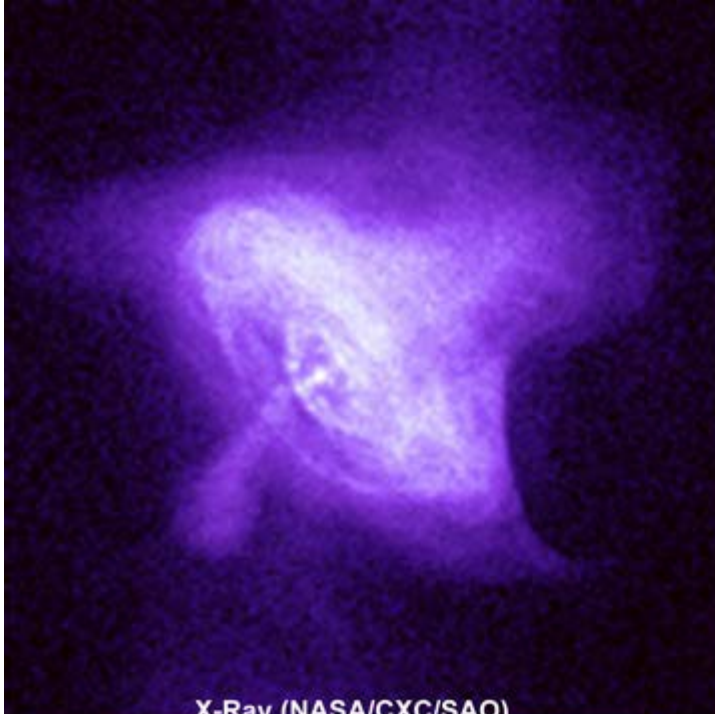


SN 1181, pozůstatek supernovy 3C58





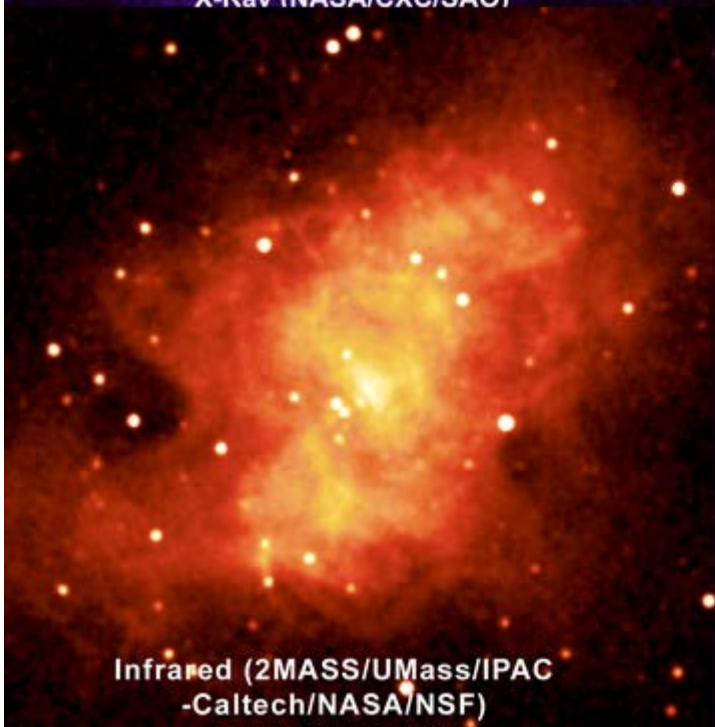




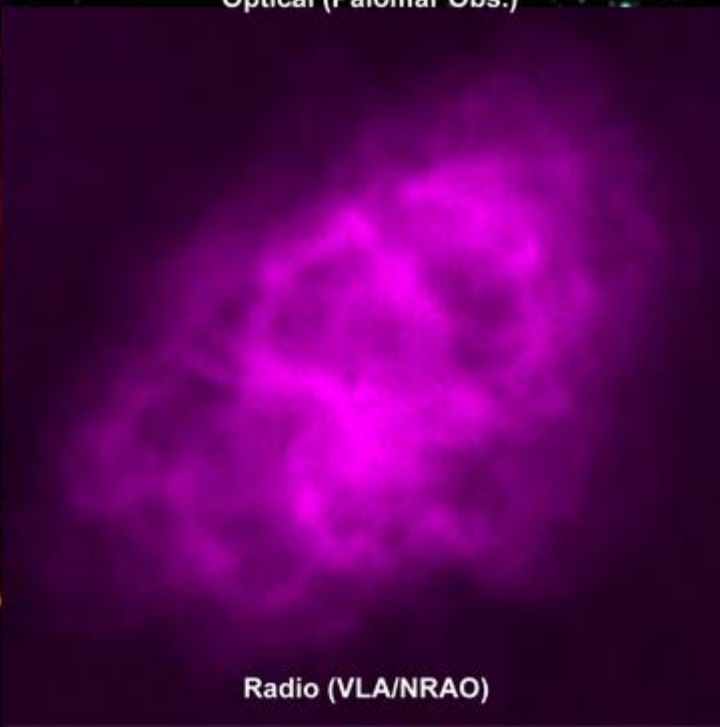
X-Ray (NASA/CXC/SAO)



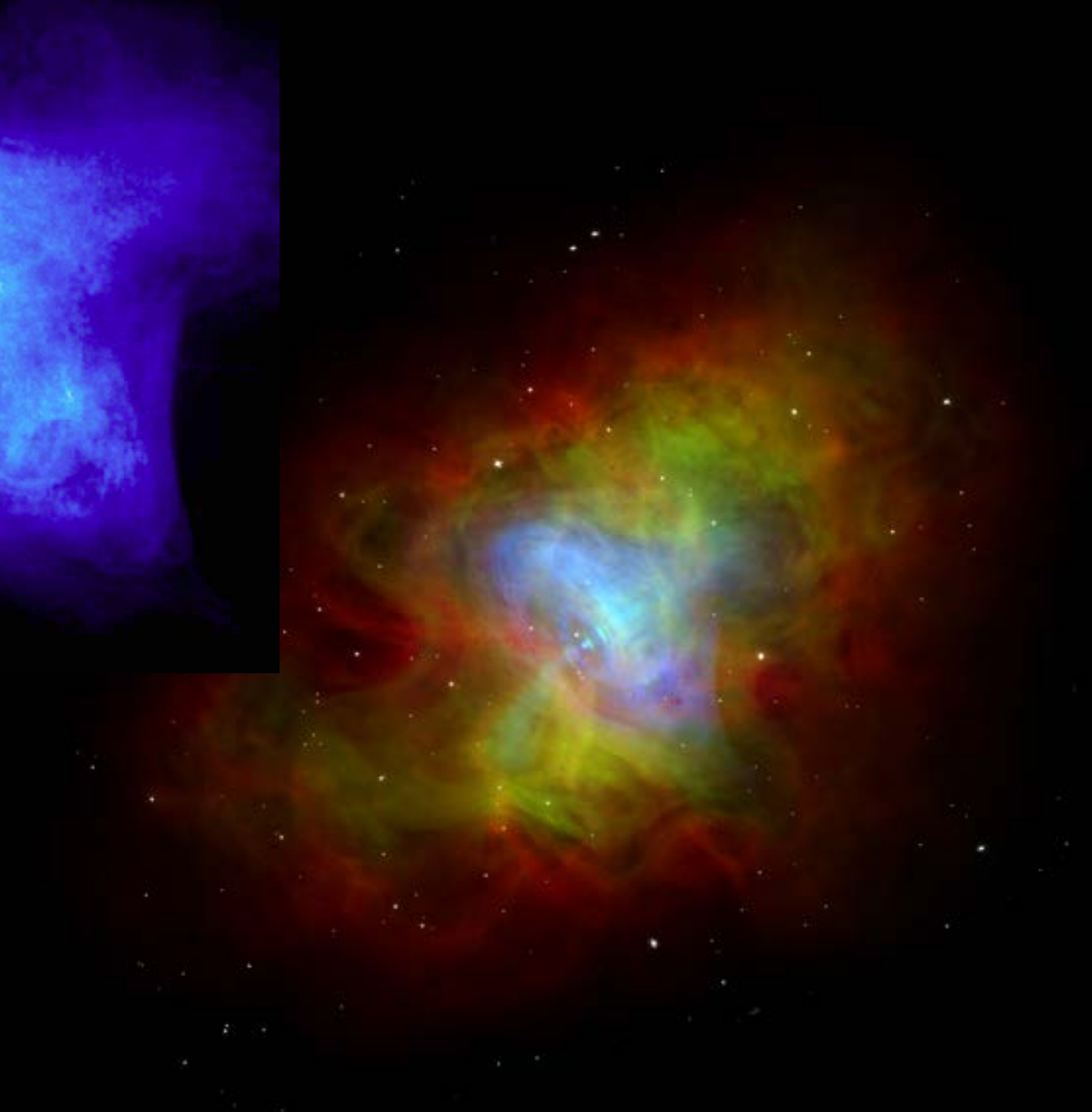
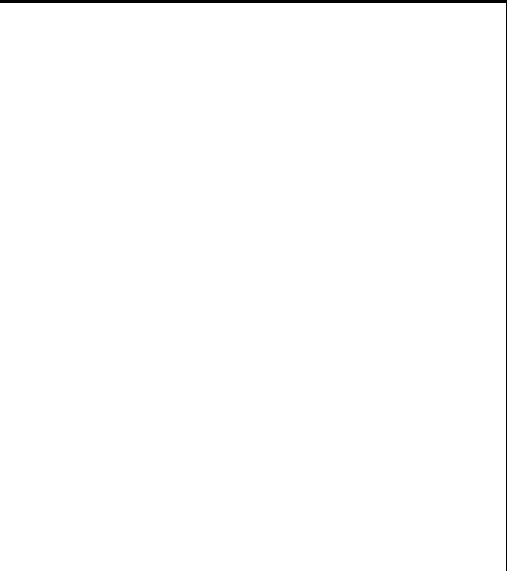
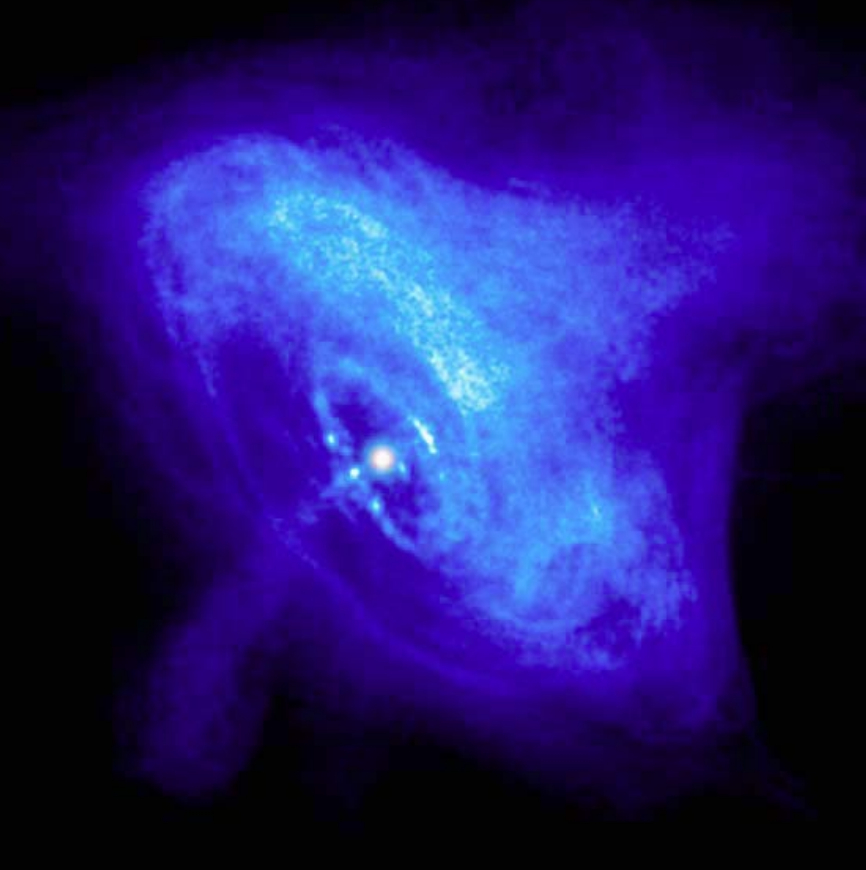
Optical (Palomar Obs.)



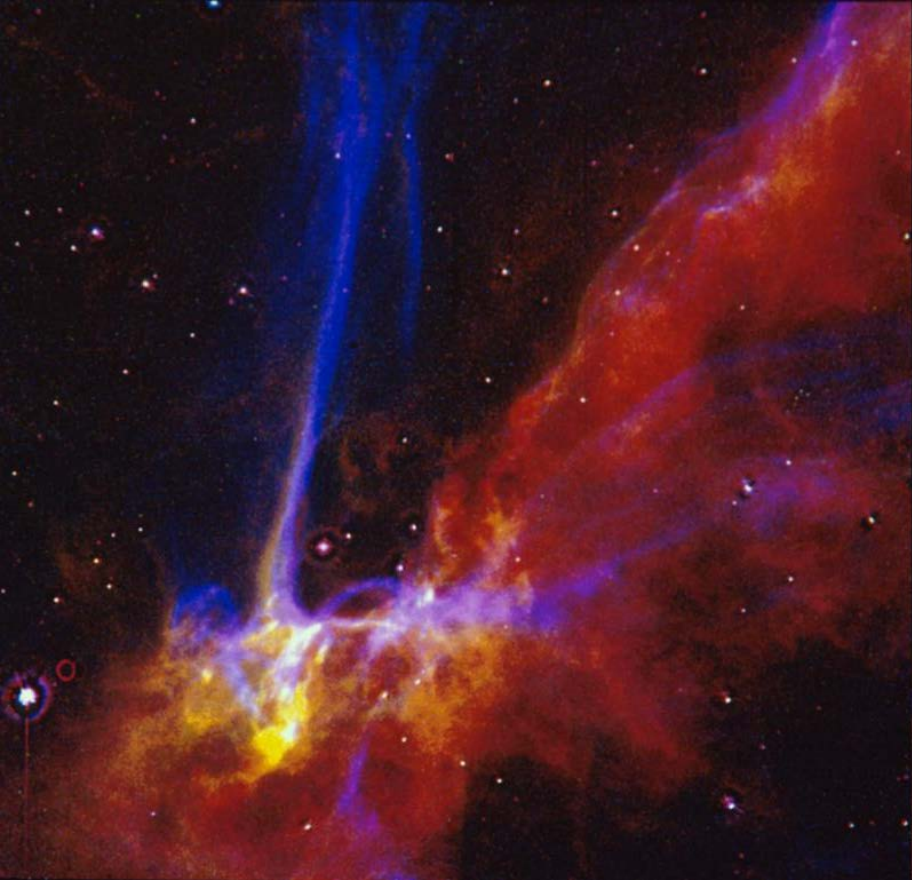
Infrared (2MASS/UMass/IPAC  
-Caltech/NASA/NSF)



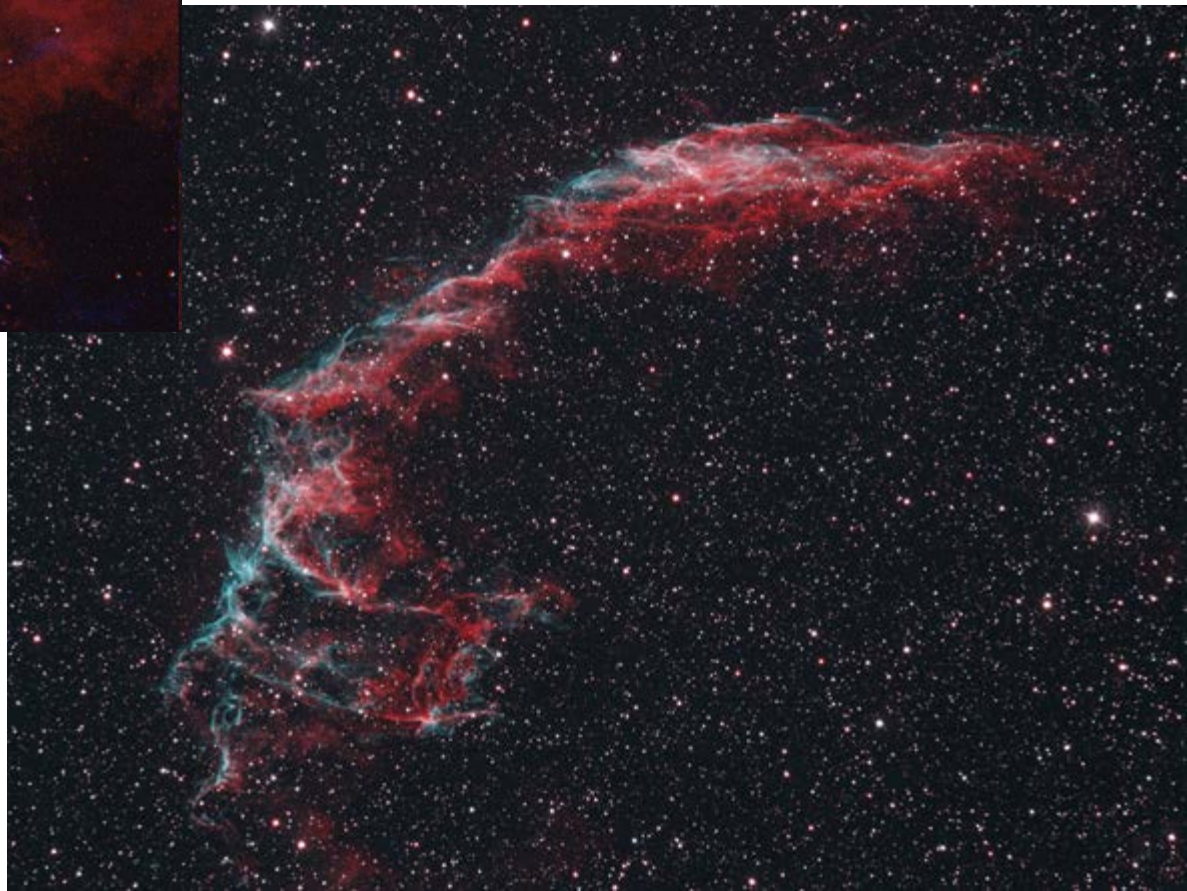
Radio (VLA/NRAO)







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



# Historické supernovy

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

185 – Cir/Cen - RCW 86 – Čína - nejstarší  
393 - Sco

1006 - Lup - nejjasnější (-7.5 mag)

1054 - Tau – nejslavnější - Krabí mlhovina  
s pulsarem (-6 mag)

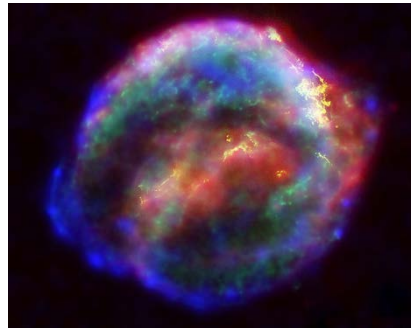
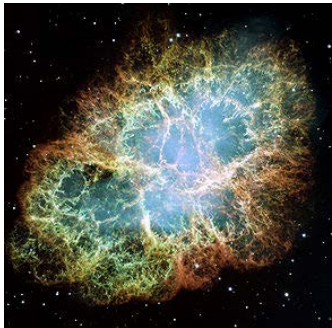
1181 – Cas – nyní pulsar 3C58

1572 - Cas - Tychova supernova

1604 - Oph - Keplerova supernova

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

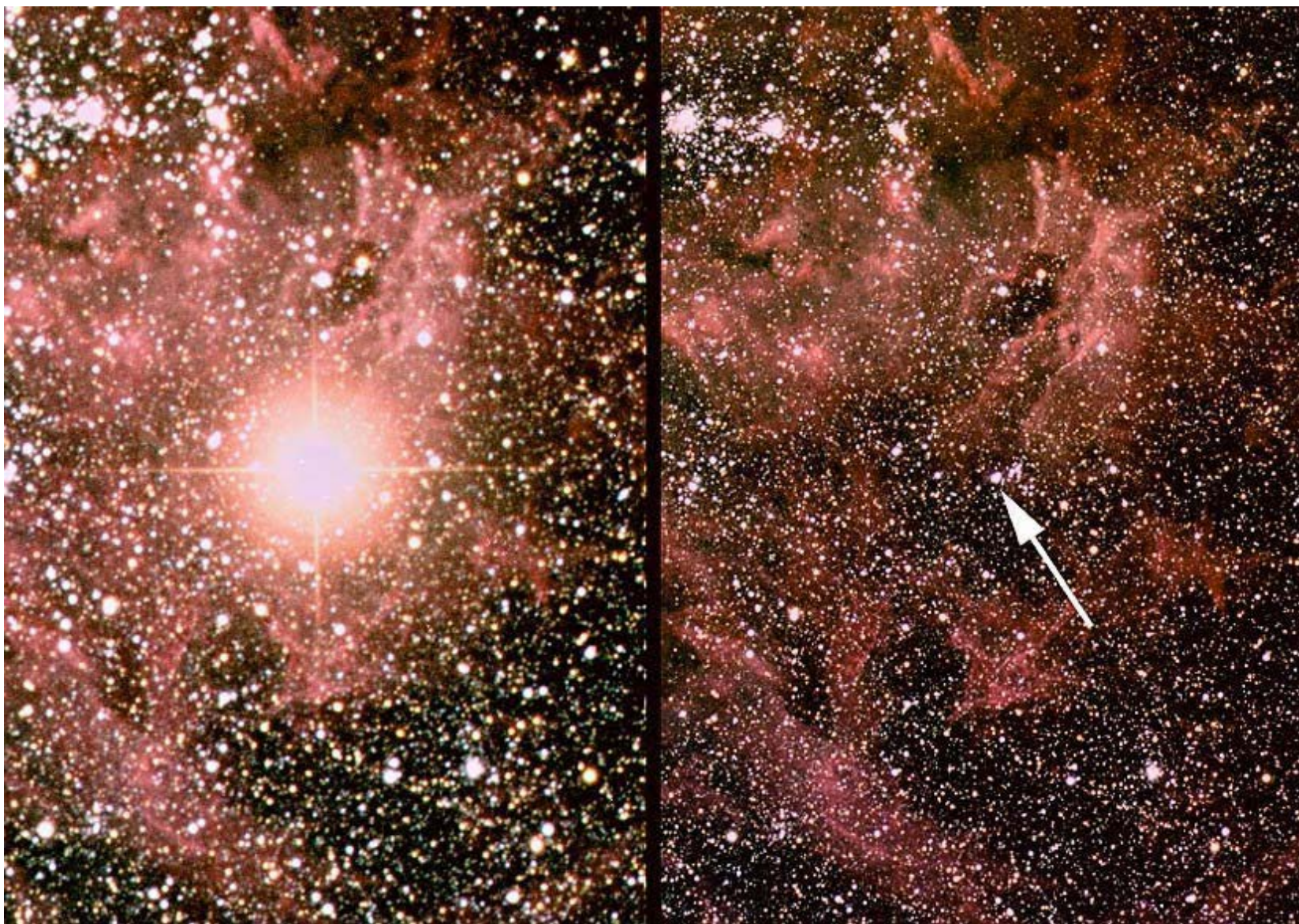
kdy vybuchne další supernova,  
kterou uvidíme pouhýma očima?



IMAGO CASSIOPEÆ.



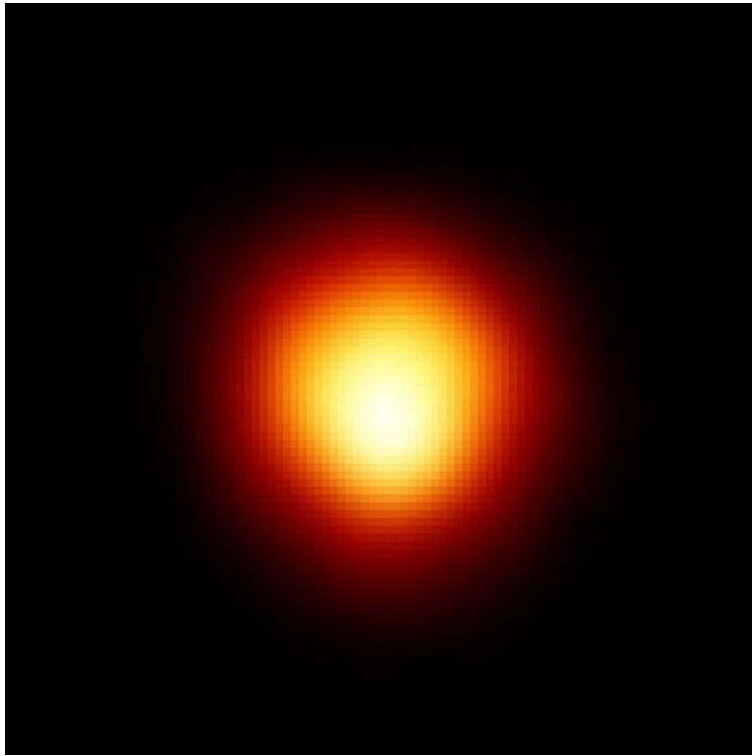




Supernova z února 1987 LMC (vpravo je snímek téže oblasti před výbuchem).



# Kandidáti na supernovy



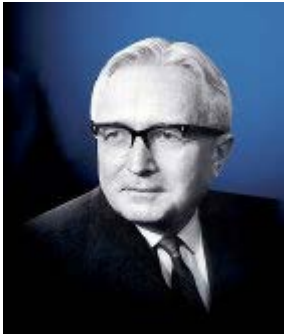
Betelgeuse



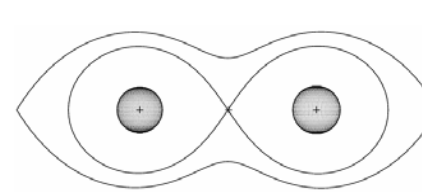
# Zvláštnosti vývoje těsných dvojhvězd

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

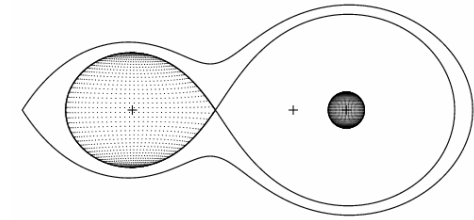
typický představitel – např.  $\beta$  Per,  $\beta$  Lyr



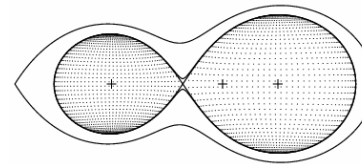
Zdeněk Kopal



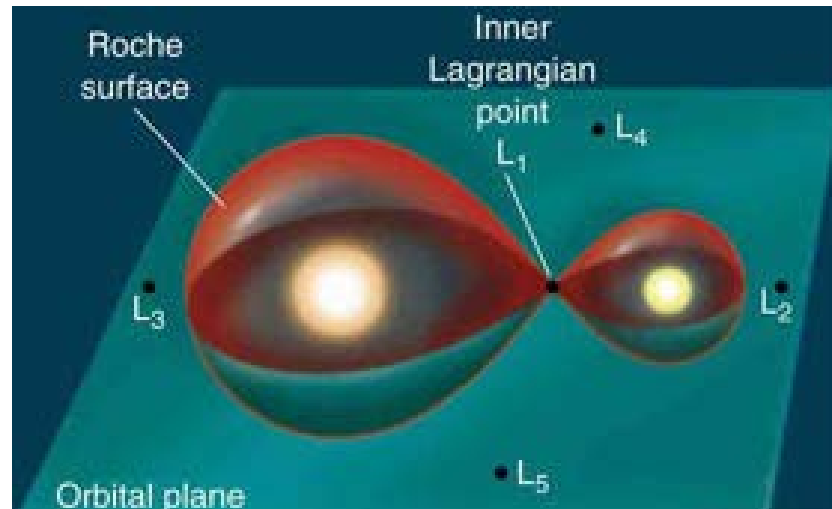
oddělená soustava



polodotyková soustava (algolida)



dotyková soustava



## Vývojový paradox Algolu

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

1. složka - žhavá hvězda B8 V hlavní posloupnosti ( $3.17 M_{\odot}$ ),

2. složka - chladný obr K0 IV ( $0.70 M_{\odot}$ ) (!)

v čem je paradox?

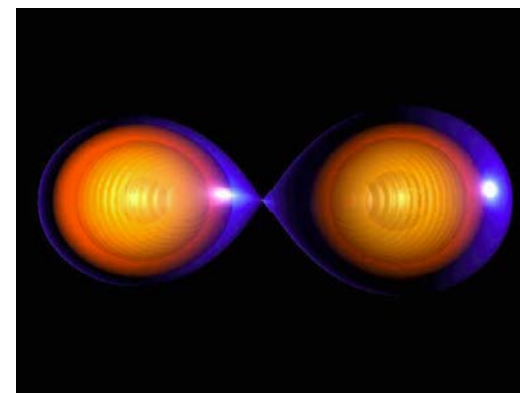
dvojhvězda = současný vznik obou hvězd => více hmotná by měla být dál ve vývoji

**ALE NENÍ !**

**Vysvětlení - pes požírá psa!**



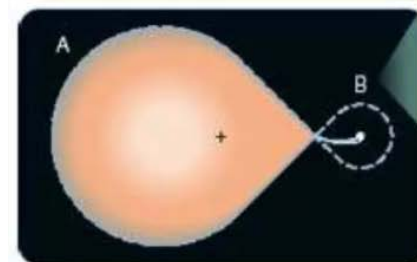
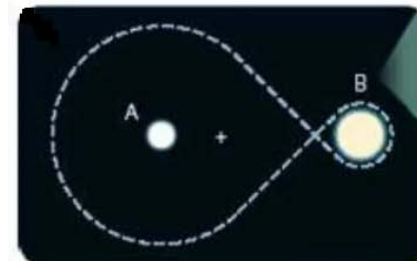
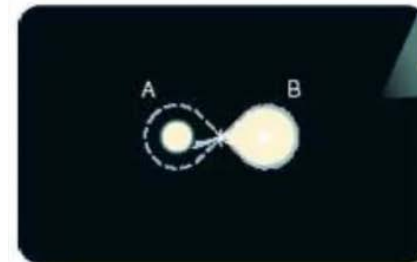
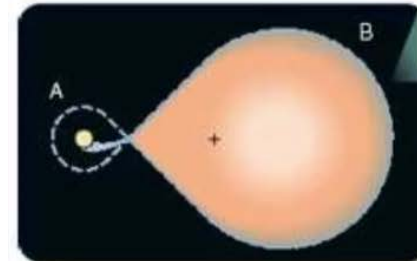
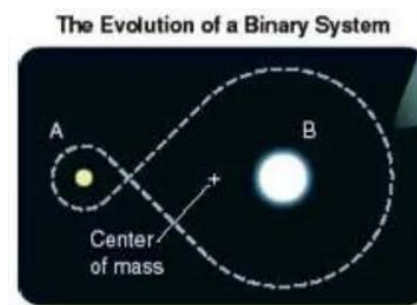
50. léta 20. st. – několik autorů např. Crawford, Wood, Struve, Hoyle aj. – vývojový scénář s přenosem hmoty





## Vývojový paradox Algolu

- společný vznik => obě hvězdy v páru se vyvíjejí jako osamocené hvězdy, hvězda B je hmotnější
- hmotnější hvězda –rychlejší vývoj => začne se rozpínat -> vzniká obr, ale prostor omezen! - Rocheův lalok („šaty, které začínají být obrovi těsné“)
- přetok hmoty z hmotnější složky, přenese se až 80 % hmoty => postupně se hmotnější složkou stává hvězda A => změna poměru hmotností, oběžné periody
- složka A nyní hmotnější (ale vývojově je opožděná – je to stále hvězda na HP) = stadium Algola
- po čase může probíhat i přetok opačným směrem!



# 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.)

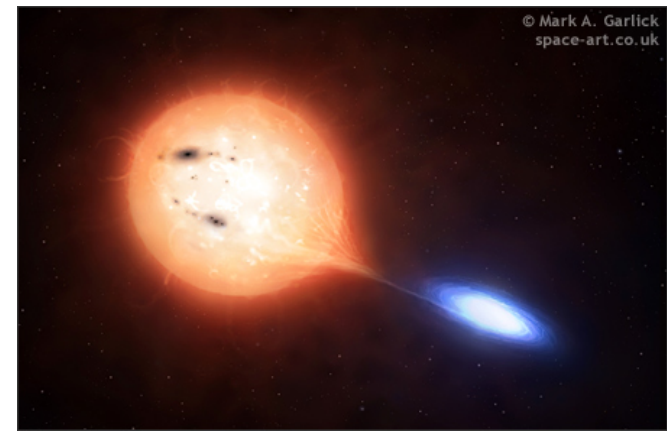
**Příčiny** – hvězdný vývoj, rozpínání hvězd (složek dvojhvězdy)

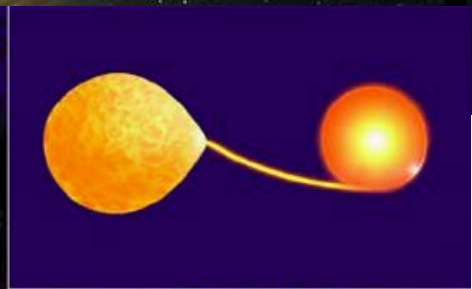
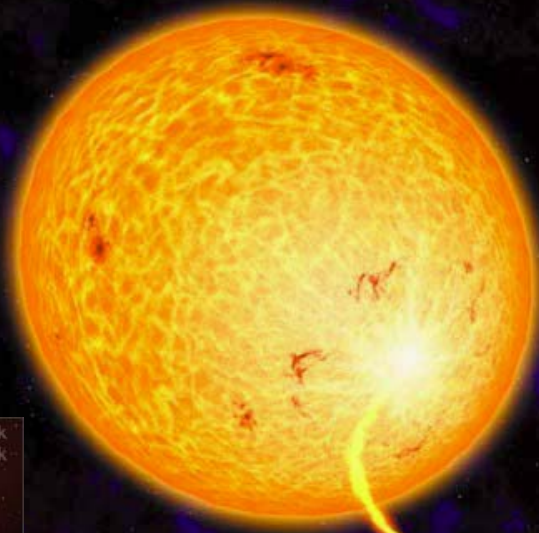
**Průběh** – i velmi rychlý, masivní

- 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

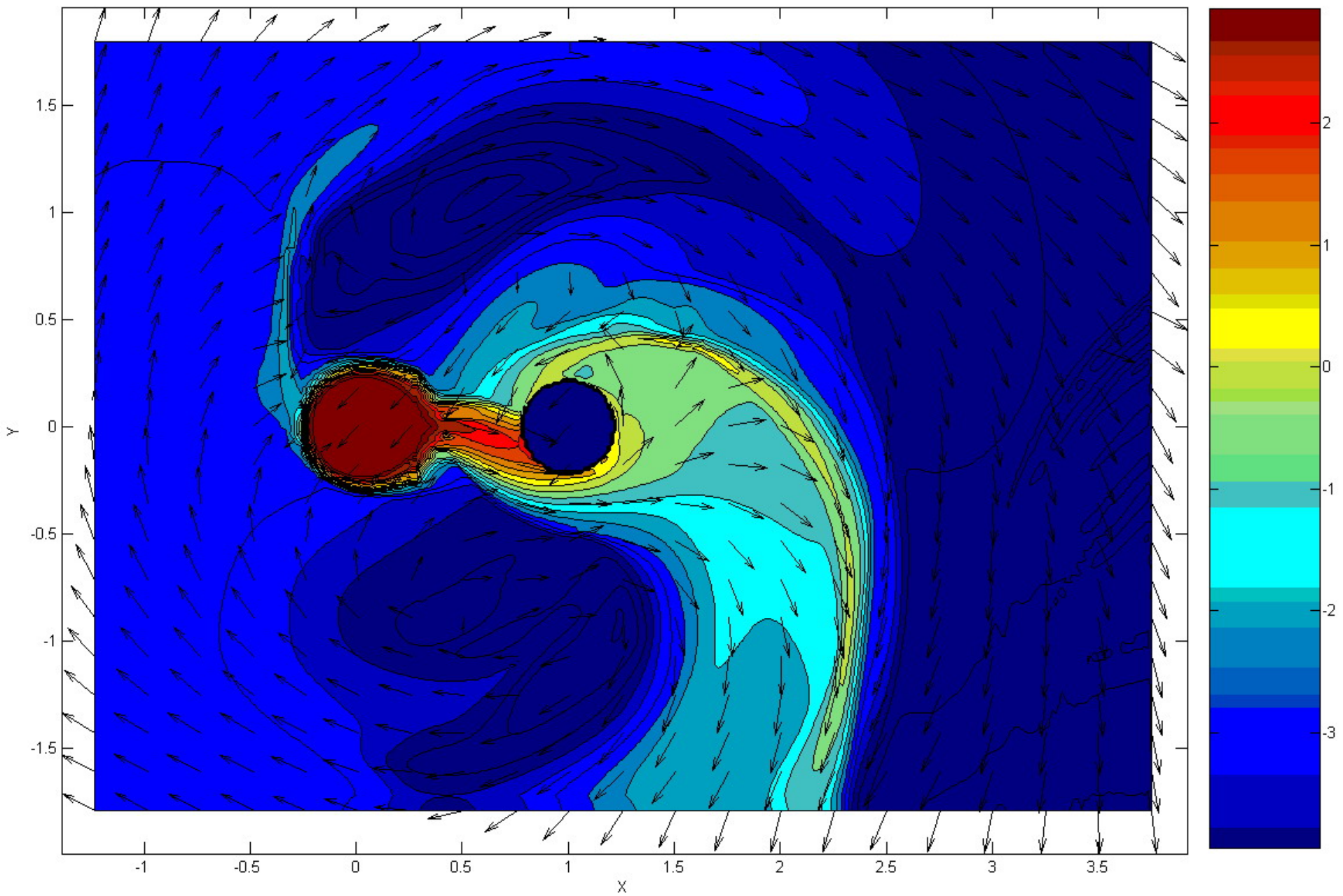




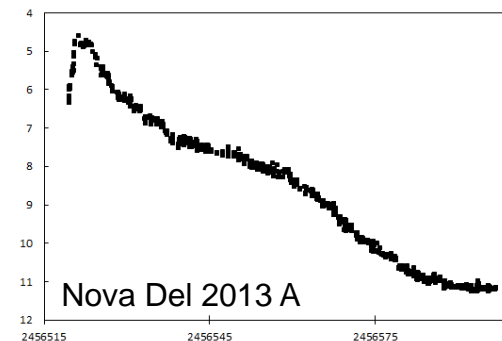
© Mark A. Garlick  
space-art.co.uk







# 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

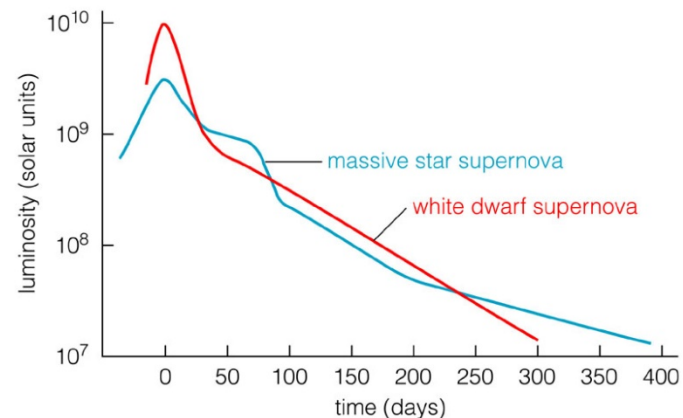
-> BT „vychytává“ hv. vítr

-> spad na BT



# Supernovy typu Ia

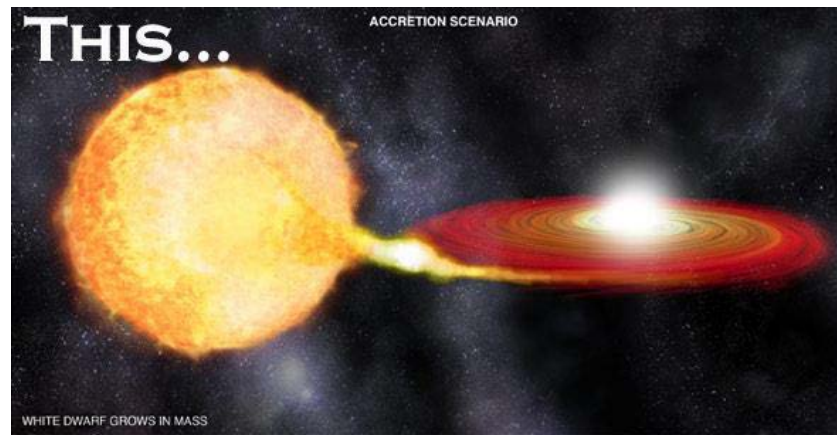
- ❖ vzniká v těsné dvojhvězdě (1 složka bílý trpaslík, kde ustaly jaderné reakce).
- ❖ standardní svíčky  $M_v = -19.3$  mag, ale ....



Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.

dva scénáře:

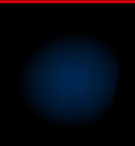

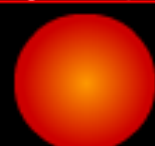


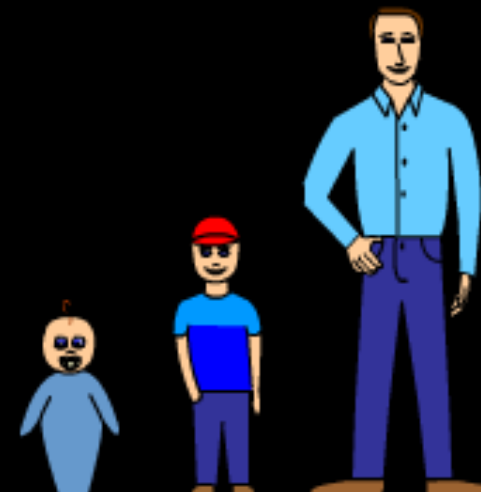


- přenos hmoty ze souputníka na BT -> po překročení jisté meze => kolaps => exploze ( $1-2 \times 10^{44}$  J)
- BT splyne se souputníkem => překročení hmotnosti -> kolaps => exploze ( $1-2 \times 10^{44}$  J)





# 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
			

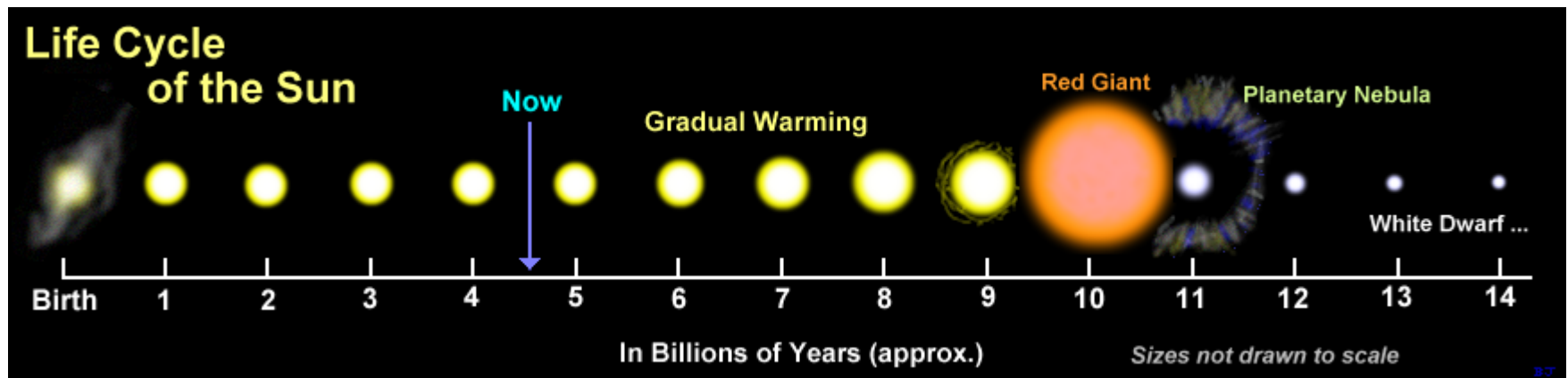
recyklace – opětovné použití látky - hvězdný vítr, supernovy...  
myslíci prach supernov

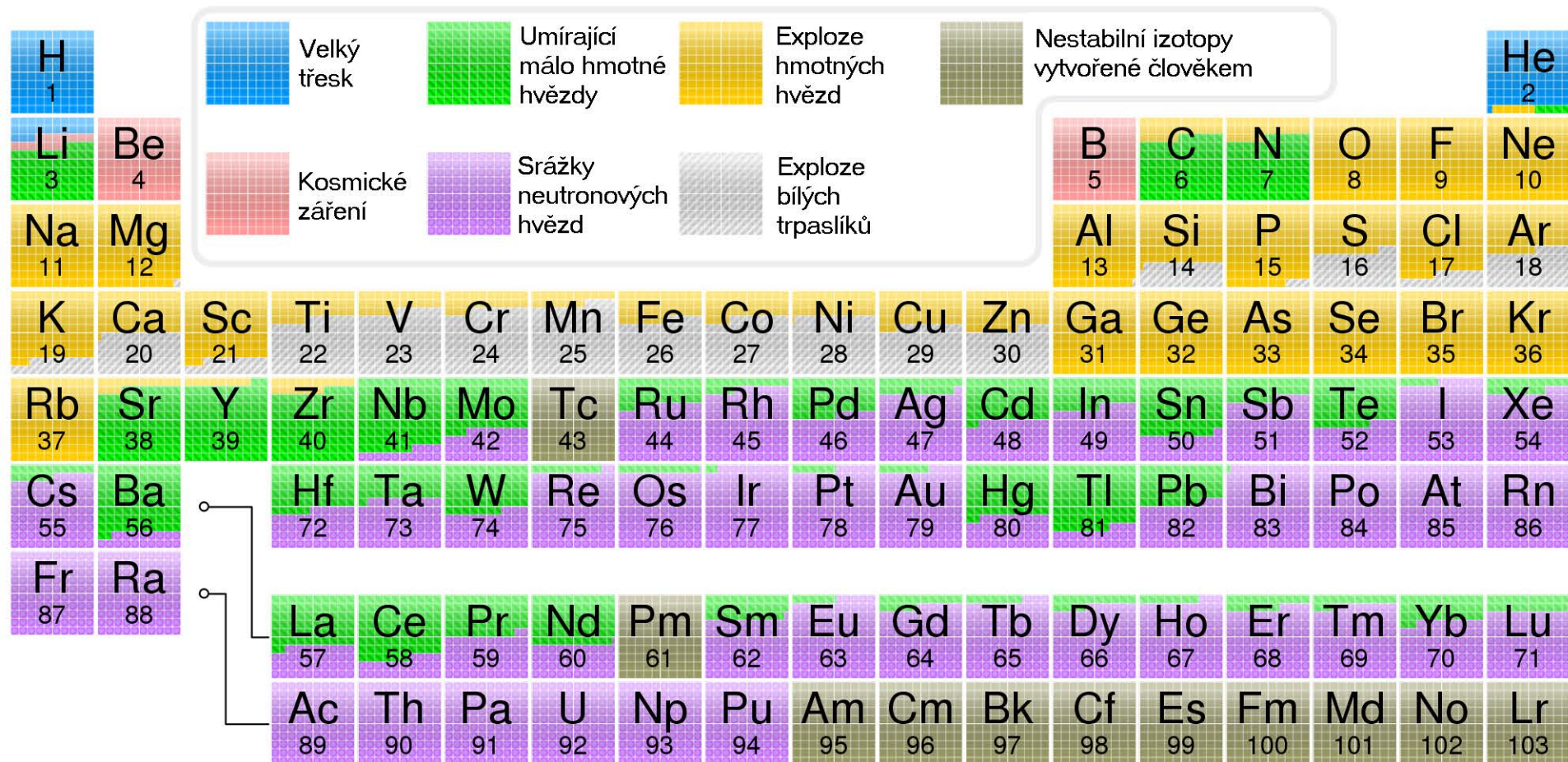
vývoj (osamocených) hvězd - určen změnami jejich chemického složení

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

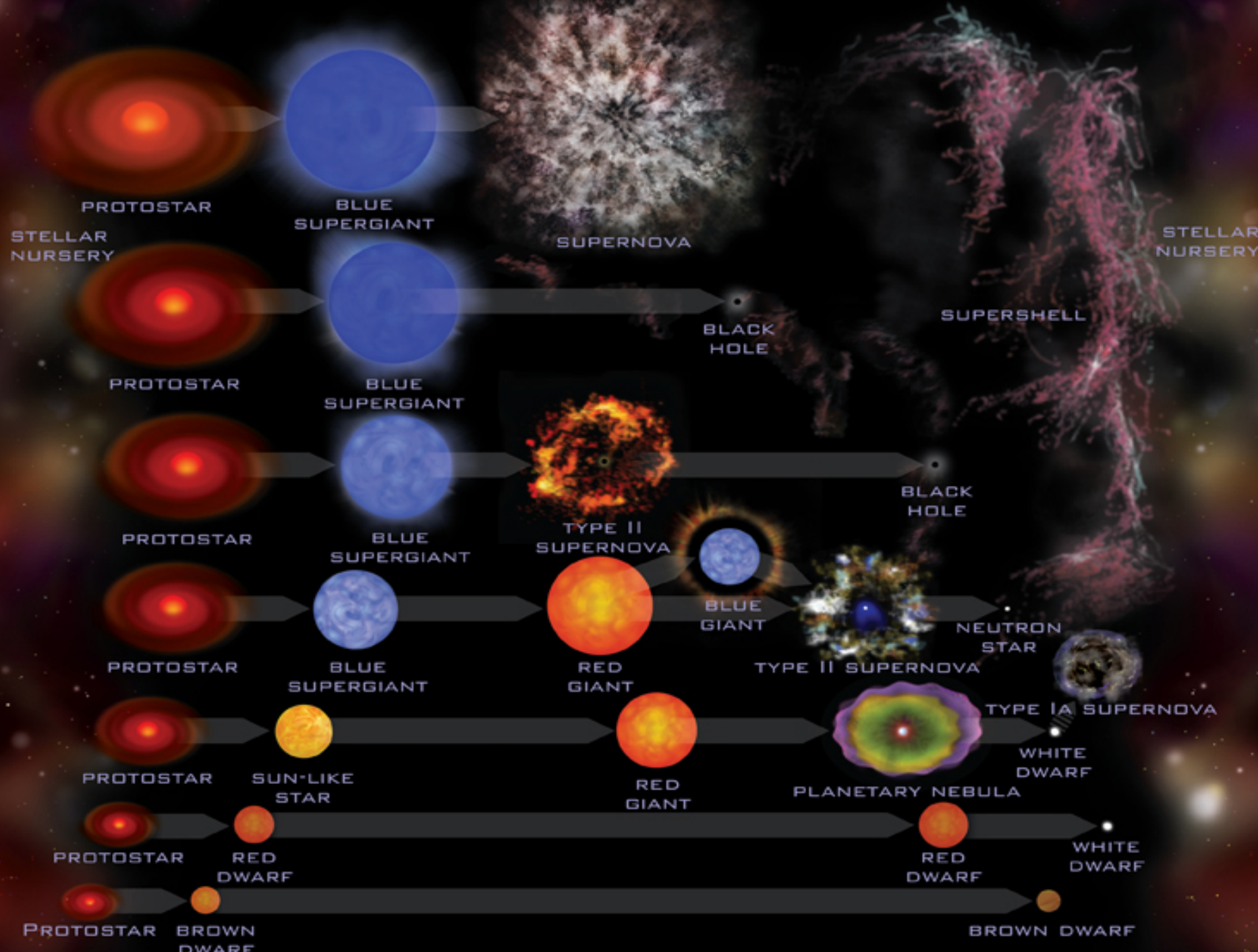
POZOR – probíhají v nitru =>

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









PROTOSTAR

BLUE SUPERGIANT

SUPERNOVA

STELLAR NURSERY

STELLAR NURSERY

SUPERSHELL

BLACK HOLE

PROTOSTAR

BLUE SUPERGIANT

TYPE II SUPERNOVA

BLACK HOLE

PROTOSTAR

BLUE SUPERGIANT

BLUE GIANT

NEUTRON STAR

PROTOSTAR

BLUE SUPERGIANT

RED GIANT

TYPE II SUPERNOVA

TYPE IA SUPERNOVA

PROTOSTAR

SUN-LIKE STAR

RED GIANT

PLANETARY NEBULA

WHITE DWARF

PROTOSTAR

RED DWARF

RED DWARF

WHITE DWARF

PROTOSTAR BROWN DWARF

BROWN DWARF