

# Něco málo o hvězdách II

**Jakub Rozehnal, Petr Kulháněk**

# Zárodečné mlhoviny

## Typická pramlhovina

$d \sim 20\text{--}30 \text{ ly}$

$M \sim 100\text{--}1000 M_{\text{Slunce}}$

$n \sim 10^5\text{--}10^9 \text{ m}^{-3}$

$T \sim 100 \text{ K}$

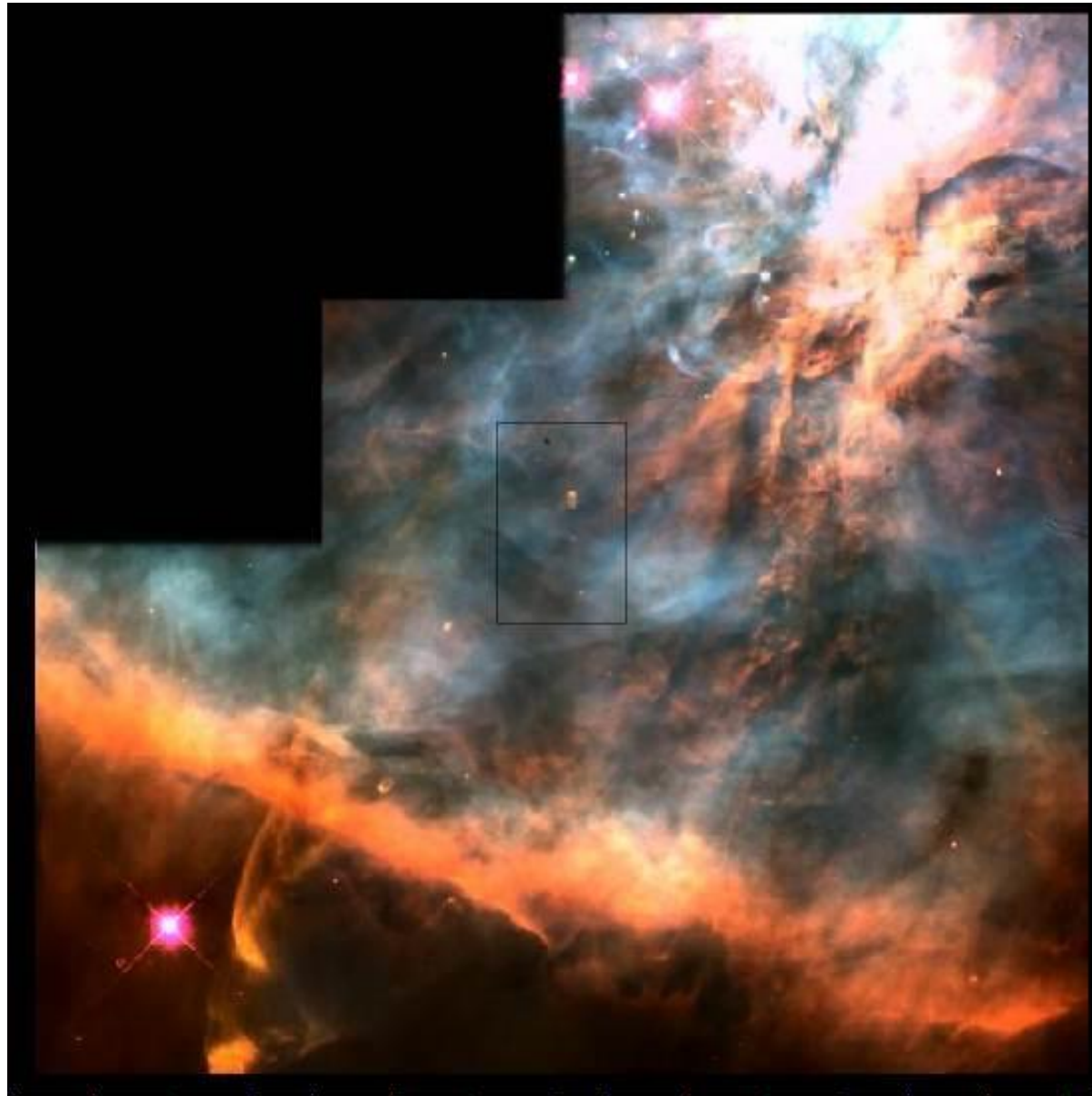
HII + prach

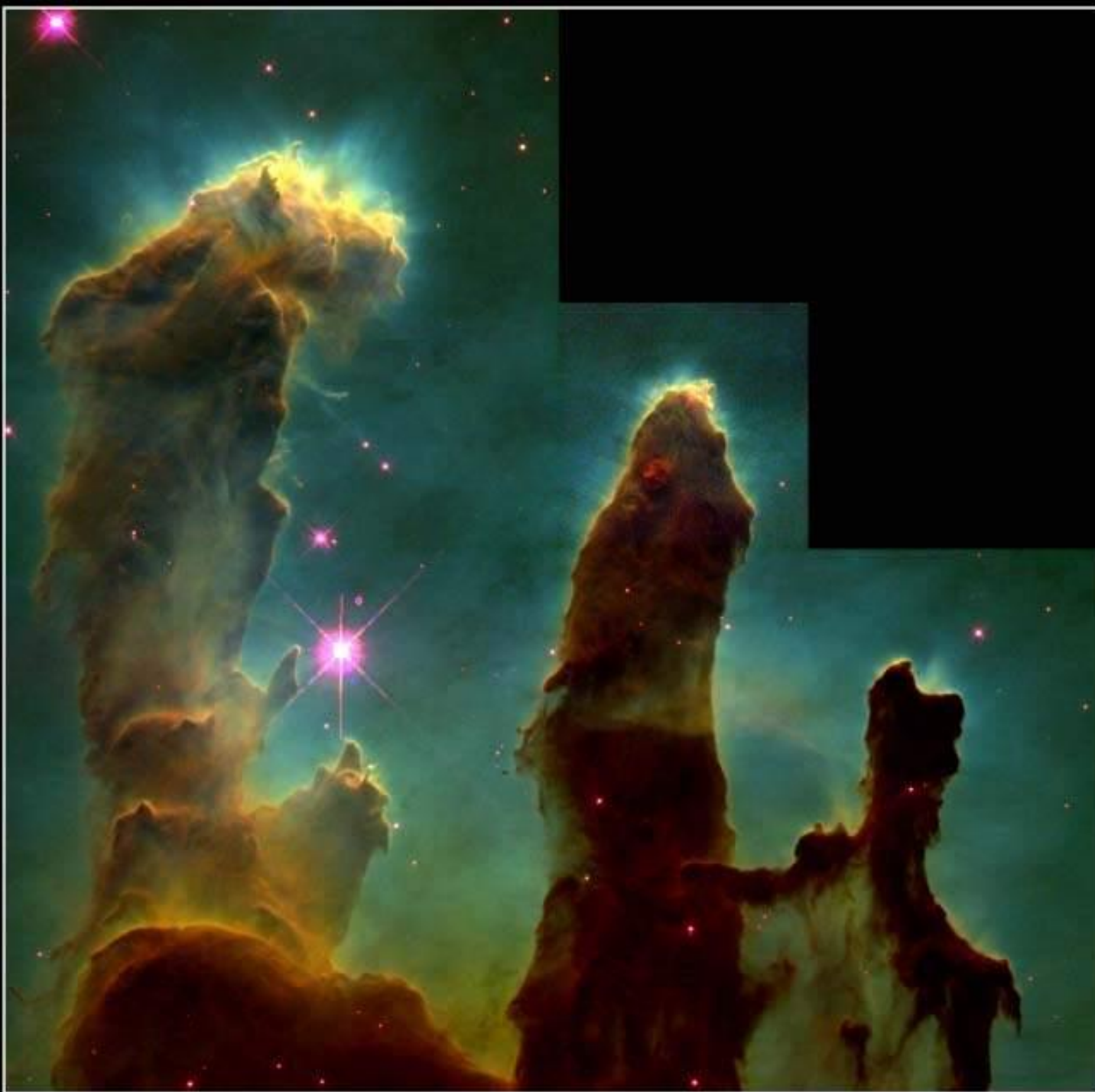
mlhovina  $\rightarrow$

globule  $\rightarrow$

protohvězda  $\rightarrow$

hvězda hl. posloupnosti





**M16**  
**Orlí**  
**mlhovina**

# Rosetta

molekulární mračno

Jednorožec

5 000 ly

Herschel/PACS/SPIRE

70/160/250  $\mu\text{m}$

12. 4. 2010



# Vela C

molekulární mračno

Plachty

2 300 ly

Herschel/PACS/SPIRE

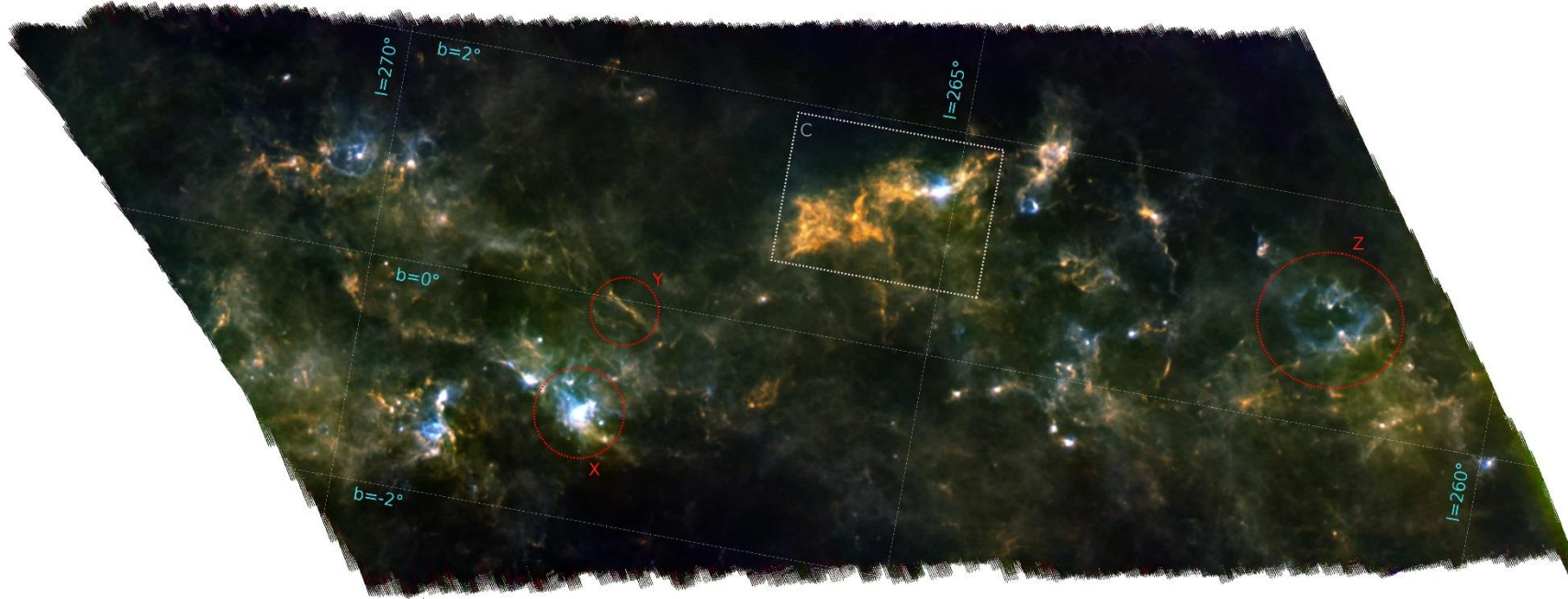
70/160/250  $\mu\text{m}$

18. 10. 2010

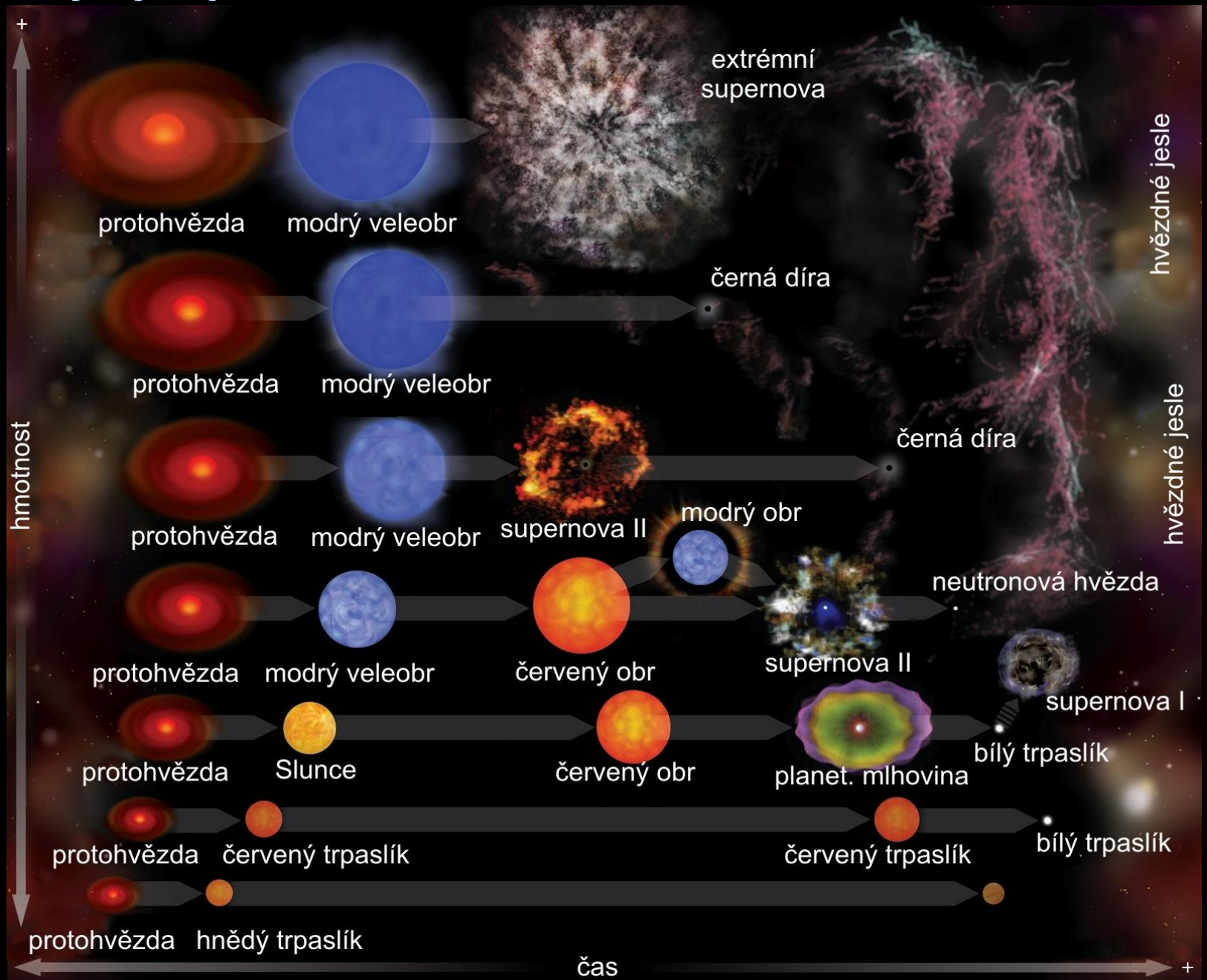
analýza 2011/2012



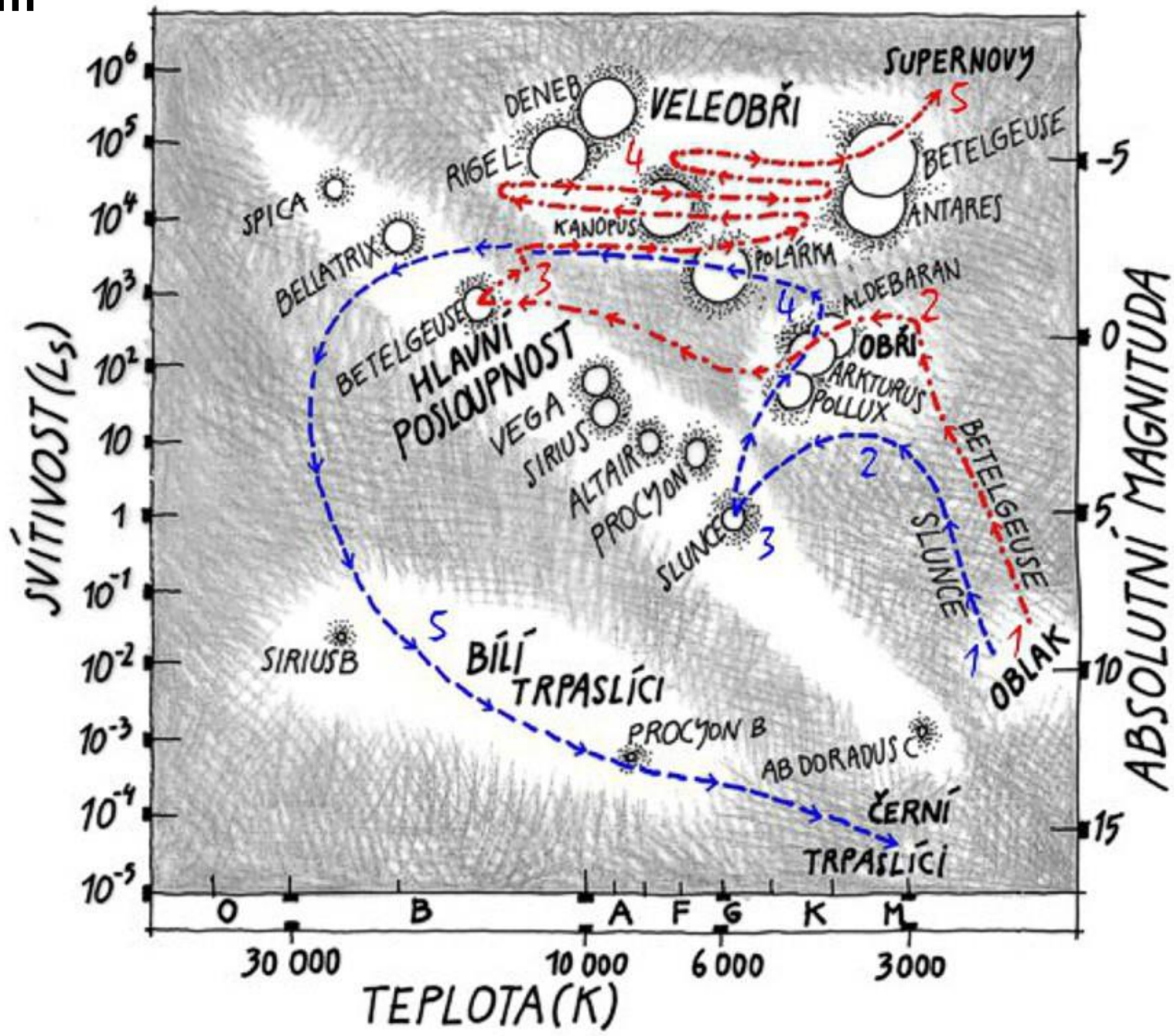
# Vela C



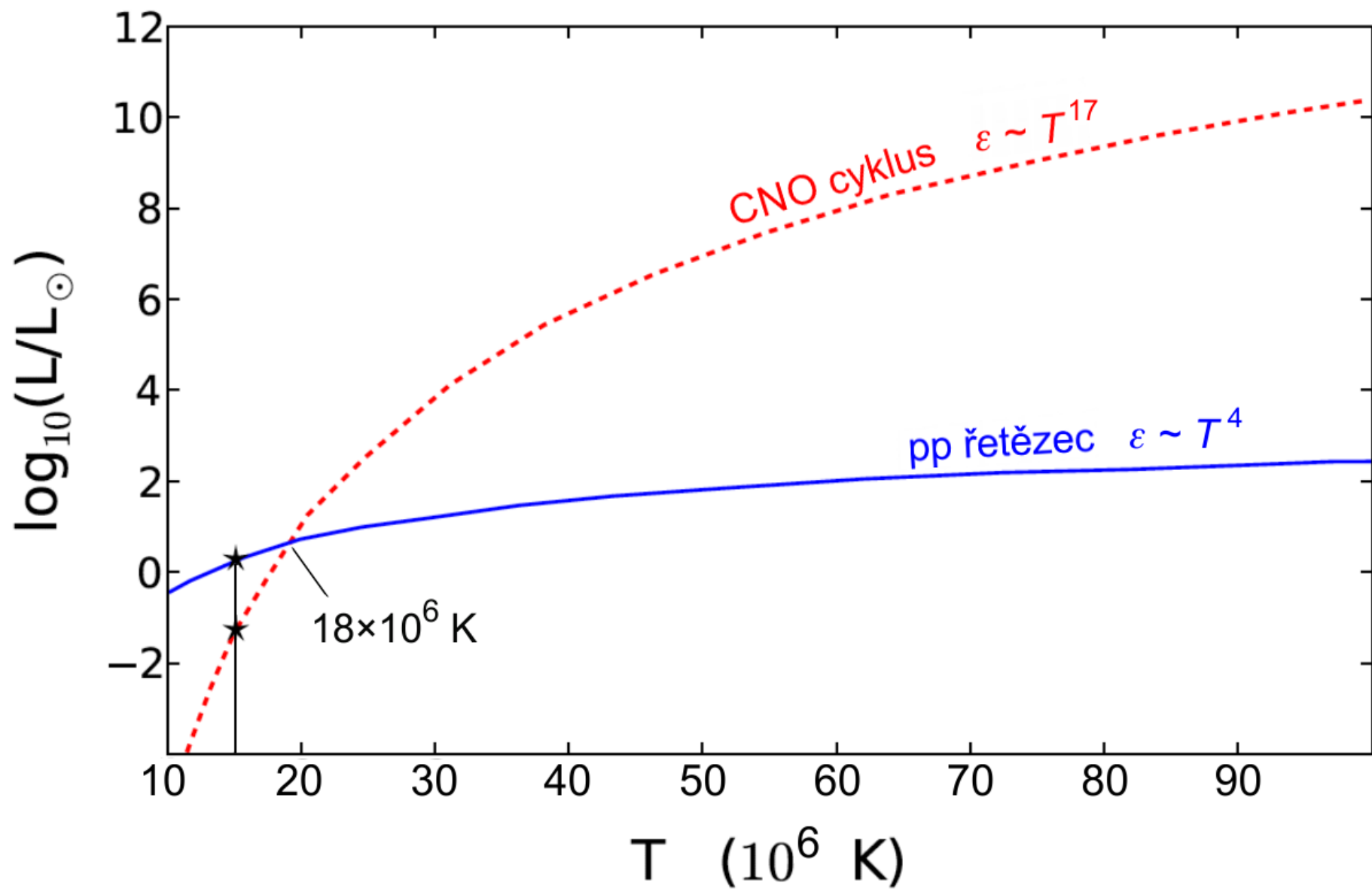
# Hvězdný vývoj



# HR diagram



# PP řetězec a CNO cyklus



# Konvekce

## ❑ vysoký teplotní gradient → fluktuační rozvoj *konvekce*

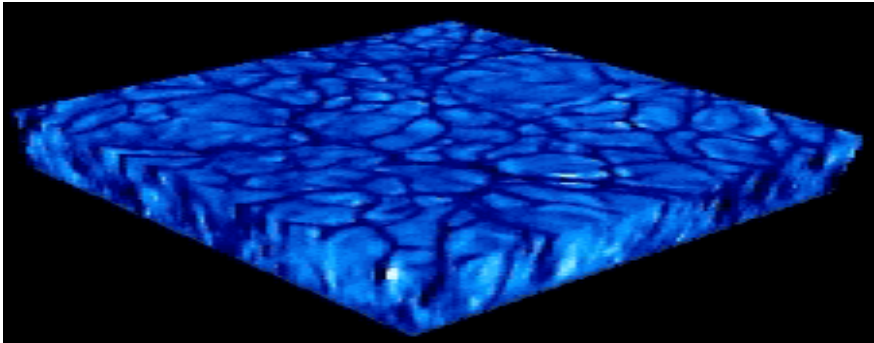
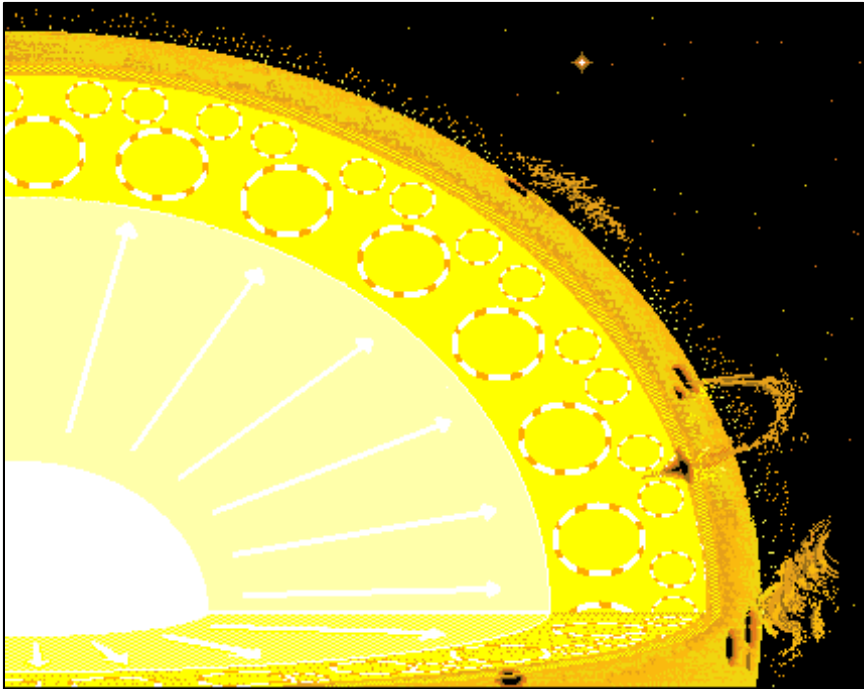
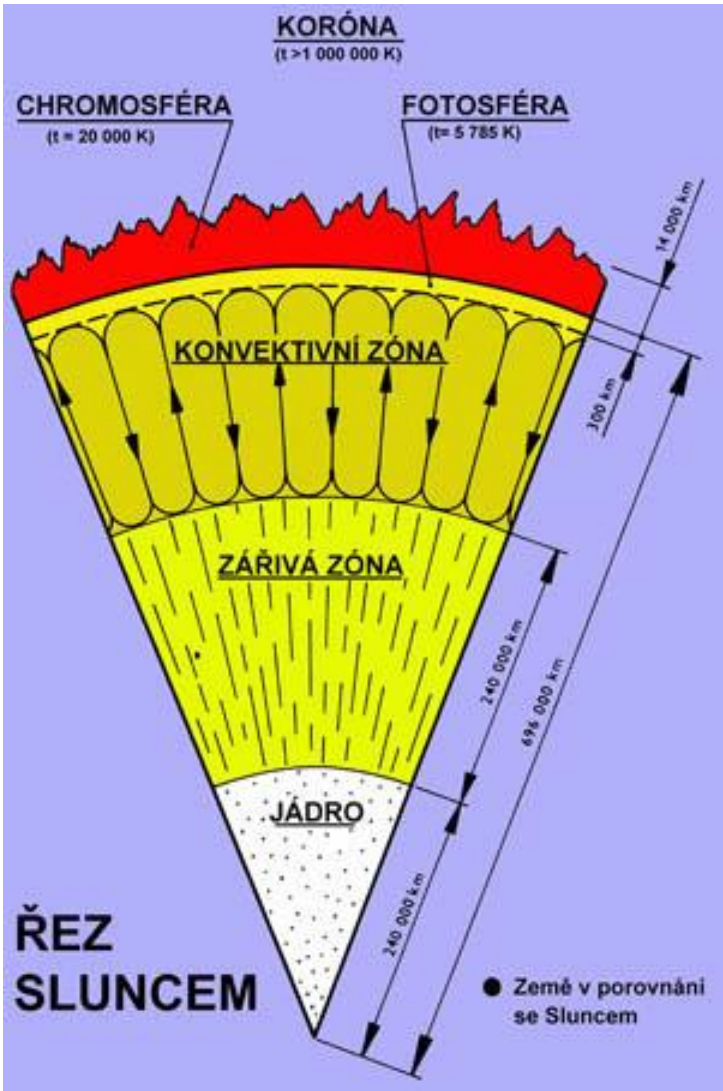
- je-li hustota vystupujícího objemu vyšší než hustota okolí, převládne gravitace a bublina se vrátí do své původní polohy. Taková část hvězdy je vůči *konvekci stabilní*
- je-li hustota materiálu v bublině nižší, bude objem nadále tlačěn směrem k povrchu.

## ❑ Schwarzschildova podmínka konvekce: $\frac{d(\ln P)}{d(\ln T)} > \frac{\gamma}{\gamma - 1}$

## ❑ důsledky konvekce:

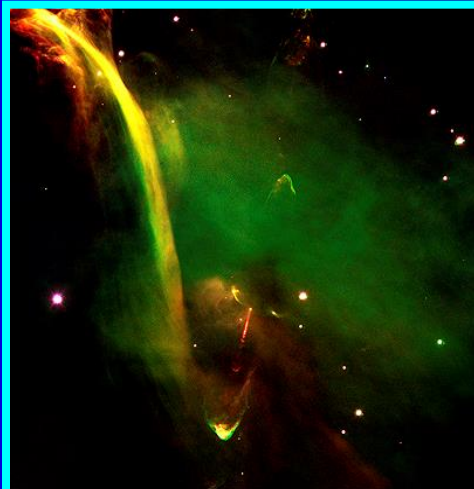
- konvektivní jádro = přísun čerstvého jaderného paliva
- konvekce ve vnějších vrstvách = generování magnetických polí

# Nitro Slunce



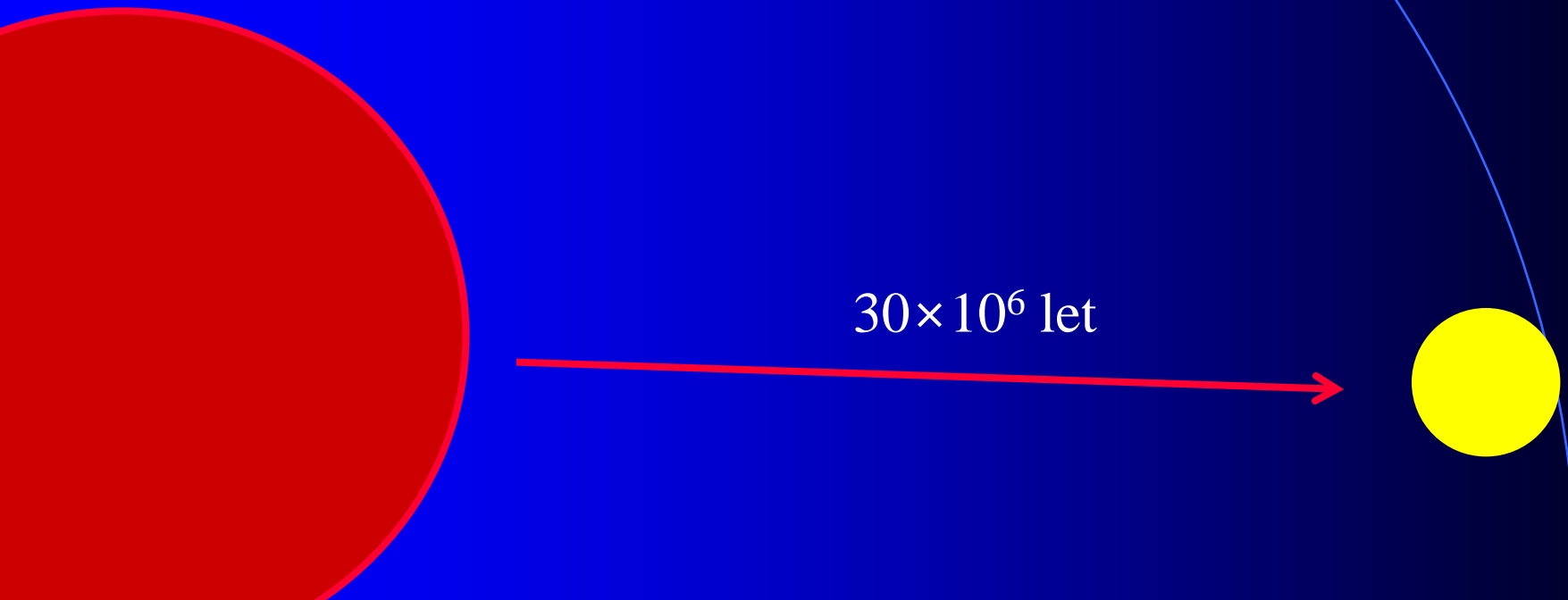
# Vznik a raný vývoj Slunce

- ❑ zhroucení části mlhoviny před 4,55 mld let
  - radiometrické datování meteoritů
- ❑ bezprostřední popud – výbuch blízké supernovy
- ❑ na počátku se budoucí hvězda hroutí volným pádem
  - rozdílné doby pádu v centru a na periferii → centrální zahušťování
- ❑ průměr 5 au – *protohvězda*
  - roste gradient tlaku → hydrostatická rovnováha



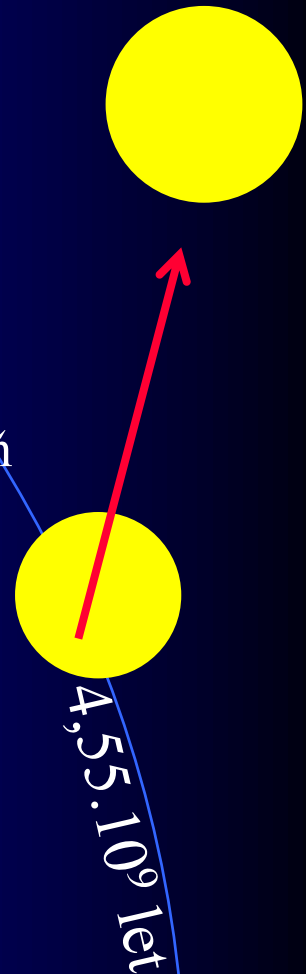
# Vývoj před vstupem na HP

- ❑ pokles  $R$  pod 90 % současného  $R_s \rightarrow T > 10 \times 10^6 \text{ K}$ 
  - zapálení termojaderných reakcí
- ❑ délka vývoje před usednutím na HP asi  $30 \times 10^6 \text{ let}$
- ❑ vznik sluneční soustavy (pokles momentu hybnosti)
- ❑ na HP Slunce usedá jako kvazistabilní hvězda typu T Tauri



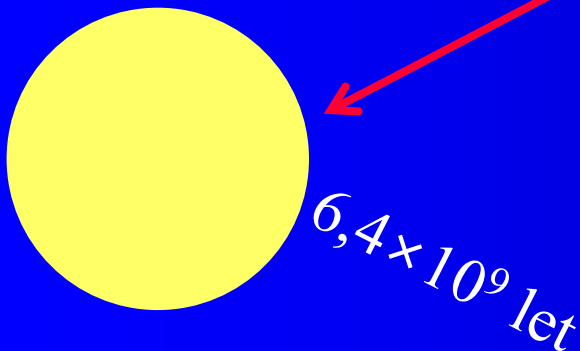
# Od 0 do dneška

- ❑ Slunce na HP stráví cca  $11 \times 10^9$  let
- ❑ Hodnoty pro nulové stáří:
  - $T_{\text{ef}} = 5\,586 \text{ K}$  (−3 %)
  - $R$  90 %
  - $L$  70 %
- ❑ Silná aktivita, díky poklesu rotace klesla na dnešní nízkou úroveň
- ❑ Vývoj:
  - centrální teplota vzrostla z 10 na 15,7 milionů K
  - centrální hustota vzrostla z  $80 \times 10^3$  na  $160 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$
  - výkon vzrostl o 41 %
  - poloměr vzrostl z  $0,9 R_{\text{S}}$  na dnešní  $1 R_{\text{S}}$



# Ode dneška k vyhoření vodíku v jádru

- ❑ zářivý výkon roste tempem 1 % / 100 milionů let
- ❑ na Zemi poroste teplota o 0,6 K / 100 milionů let
  - za 1,1 mld let se začnou rychle odpařovat oceány
  - za 3,5 mld let nebude tekutá voda existovat → zánik života
- ❑ za 4,8 mld let dojde k vyčerpání vodíku v centru
- ❑ za 6,4 mld let Slunce definitivně opustí HP
- ❑ v centru bude heliové jádérko o hmotnosti  $0,03 M_{\odot}$
- ❑ poloměr se oproti dnešnímu nafoukne na  $1,58 R_{\odot}$



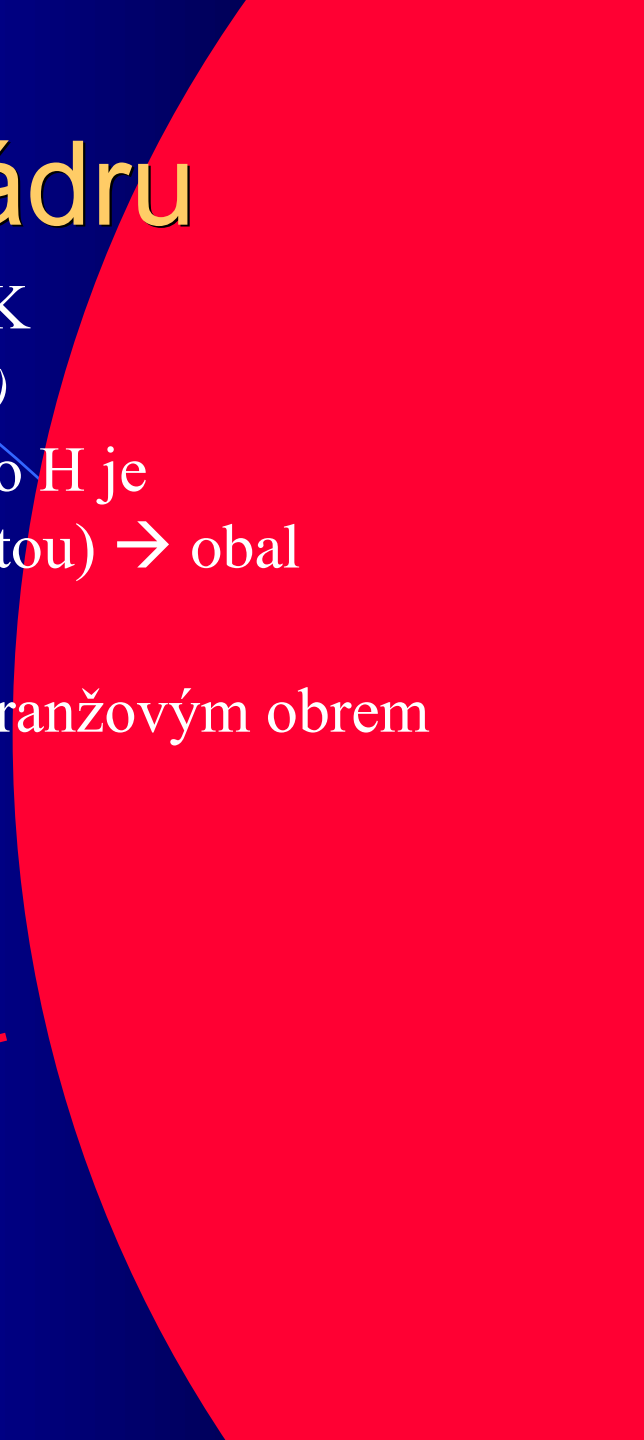
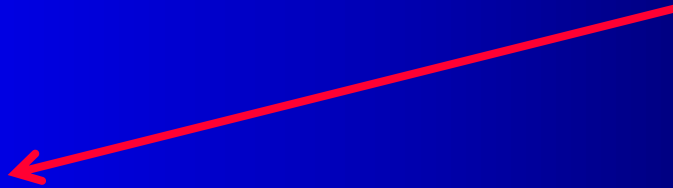
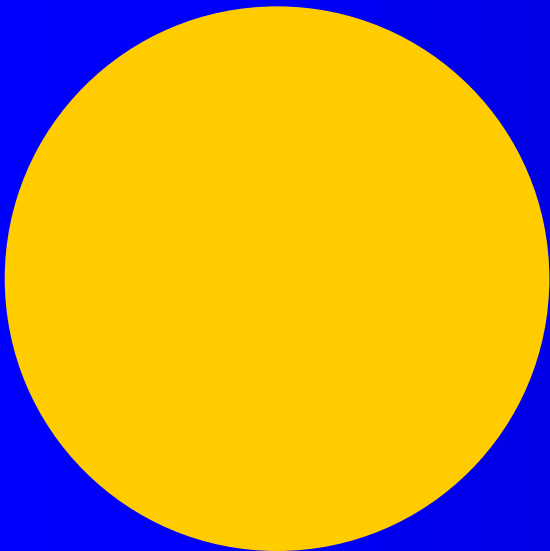
# Slunce červeným obrem

- ❑ hoření vodíku ve slupce kolem heliového jádra
- ❑ smrštění jádra → zvýšení hustoty a teploty
  - v okolí vyhořelého He jádra se znovu mohutně rozhoří vodíkové reakce
  - rychlá expanze obalu hvězdy
  - $L = 2\,350\,L_{\odot}$ ,  $R = 165\,R_{\odot}$  (0,77 au),  $T = 3\,100\,K$
- ❑ Slunce se stává červeným obrem sp. třídy M
- ❑ nárůst hmotnosti He jádra na  $0,13\,M_{\odot}$  → elektronová degenerace
- ❑ mohutná konvekce → silný hvězdný vítr
- ❑ za 600 milionů let ztráta 28 % počáteční hmotnosti
- ❑ Merkur vezme za své
- ❑ Venuši zachrání úbytek hmotnosti Slunce, odstěhuje se na 1,0 au
- ❑ Země se odstěhuje na 1,38 au, max. teplota povrchu  $2100\,^{\circ}C$



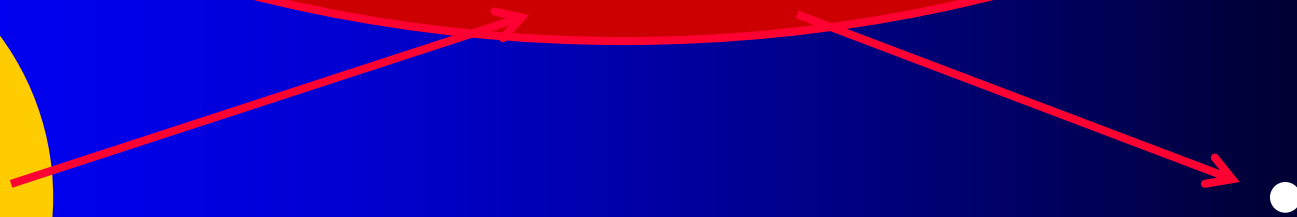
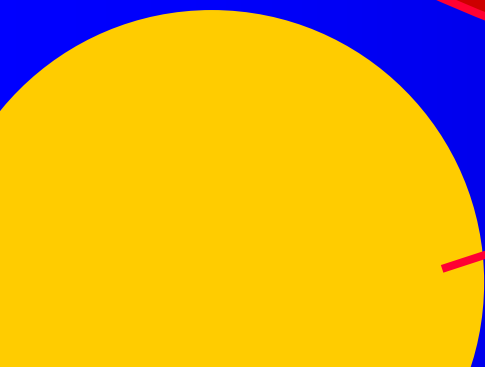
# Zapálení He v jádru

- ❑ nárůst teploty v He jádru na 100 milionů K
  - zažehnutí Salpeterovy reakce (*heliový záblesk*)
- ❑ paradoxně snížení výkonu (vrstva hořícího H je odtransportována do oblastí s menší teplotou) → obal hvězdy se rychle smrští a zahřeje
- ❑ na dobu 100 milionů let se Slunce stane oranžovým obrem
  - $T = 4\,700\text{ K}$ ,  $R = 5\,R_{\odot}$



# Zapálení He ve slupce

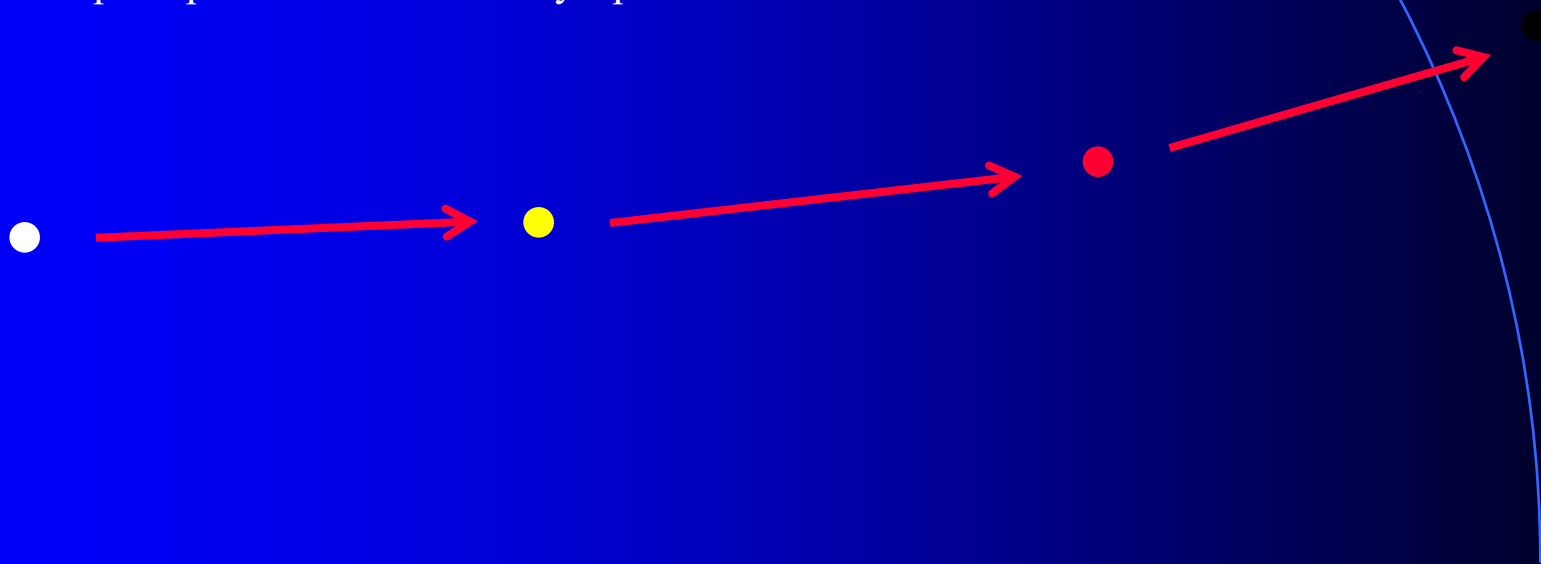
- ❑ na povrchu vyhořelého CO jádra se zapaluje He
  - hlavním zdrojem energie zůstává hoření vodíku „ve vyšším patře“
  - obal se znovu rozpíná
- ❑ etapa trvá pouhých 20 milionů let, v závěru bude Slunce
  - 180× větší než v současnosti
  - zářit bude 3000× více
- ❑ konvekce zasáhne do oblasti jaderného hoření, zbaví ji paliva
  - odhození planetární mlhoviny obnažuje zbytek:
  - degenerované C-O jádro o hmotnosti  $0,54 M_{\odot}$
- ❑ planetární mlhovina se během několika desítek tisíc let zcela rozptýlí
- ❑ Země bude obíhat ve vzdálenosti 1,8 au, jeden oběh za 3,3 roku



# Slunce bílým a černým trpaslíkem

## □ Slunce jako degenerovaný uhlíko-kyslíkový *bílý trpaslík*

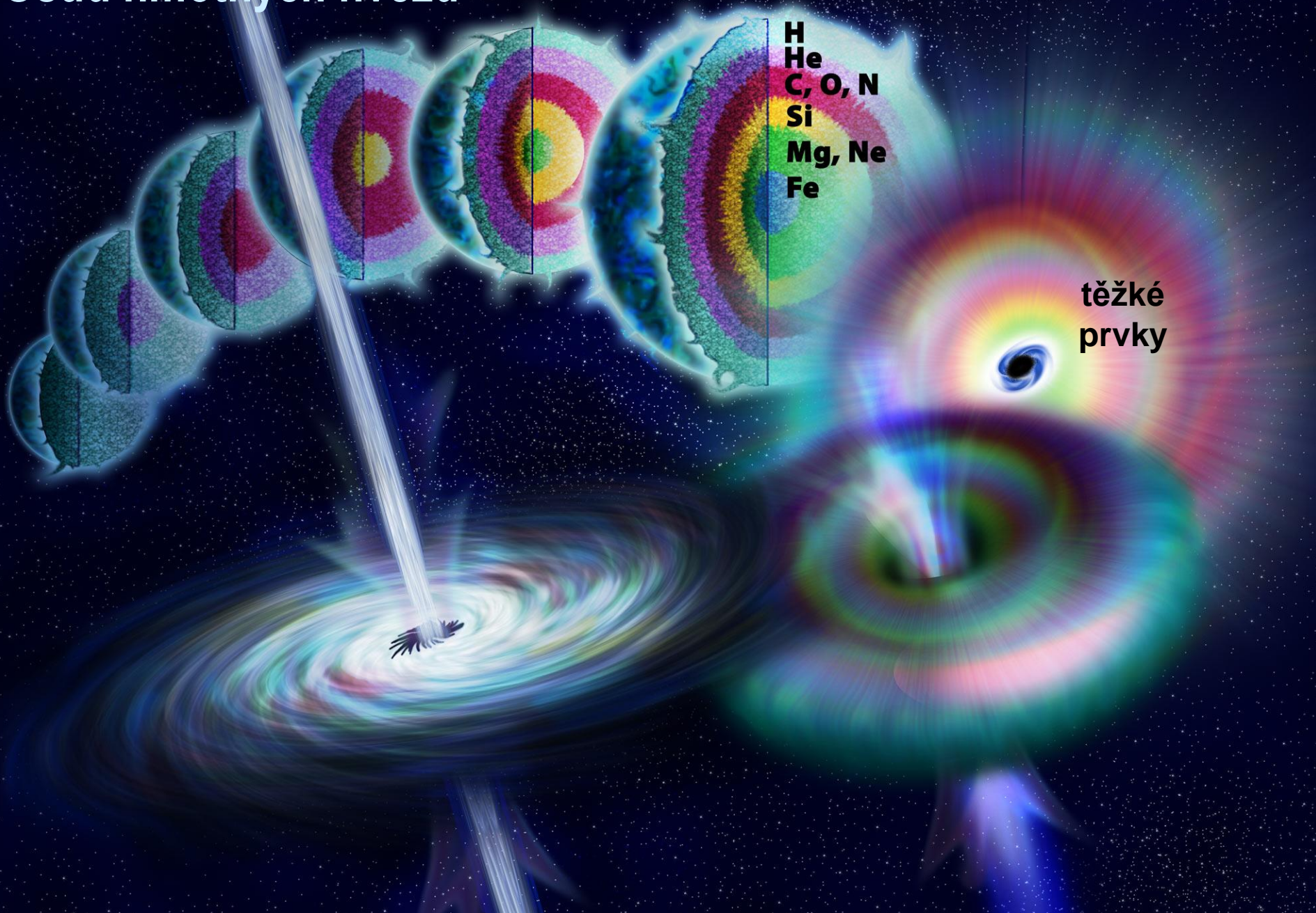
- hmotnost cca 55 % dnešního Slunce
- průměr cca 15 000 km (o málo větší, než je velikost Země)
- ze Země bude kotouček Slunce viditelný pod úhlem 10"
- svítivost setiny dnešního Slunce
- postupné chladnutí → černý trpaslík



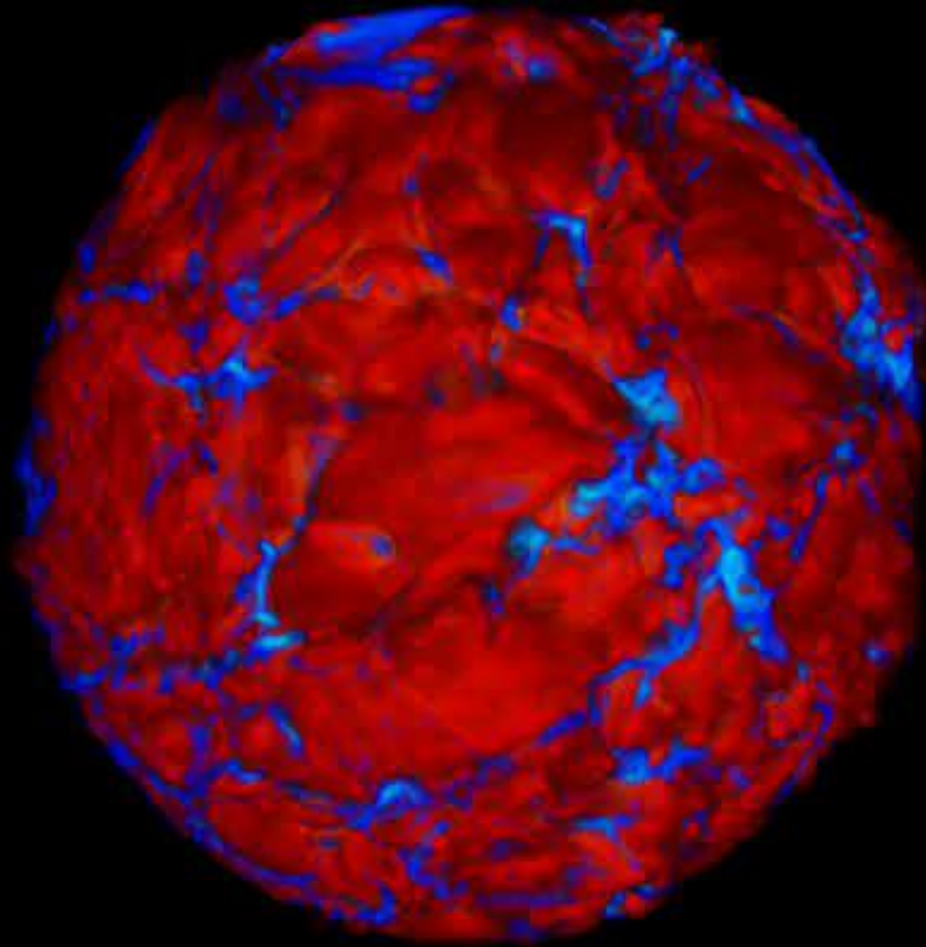


Osud Slunce

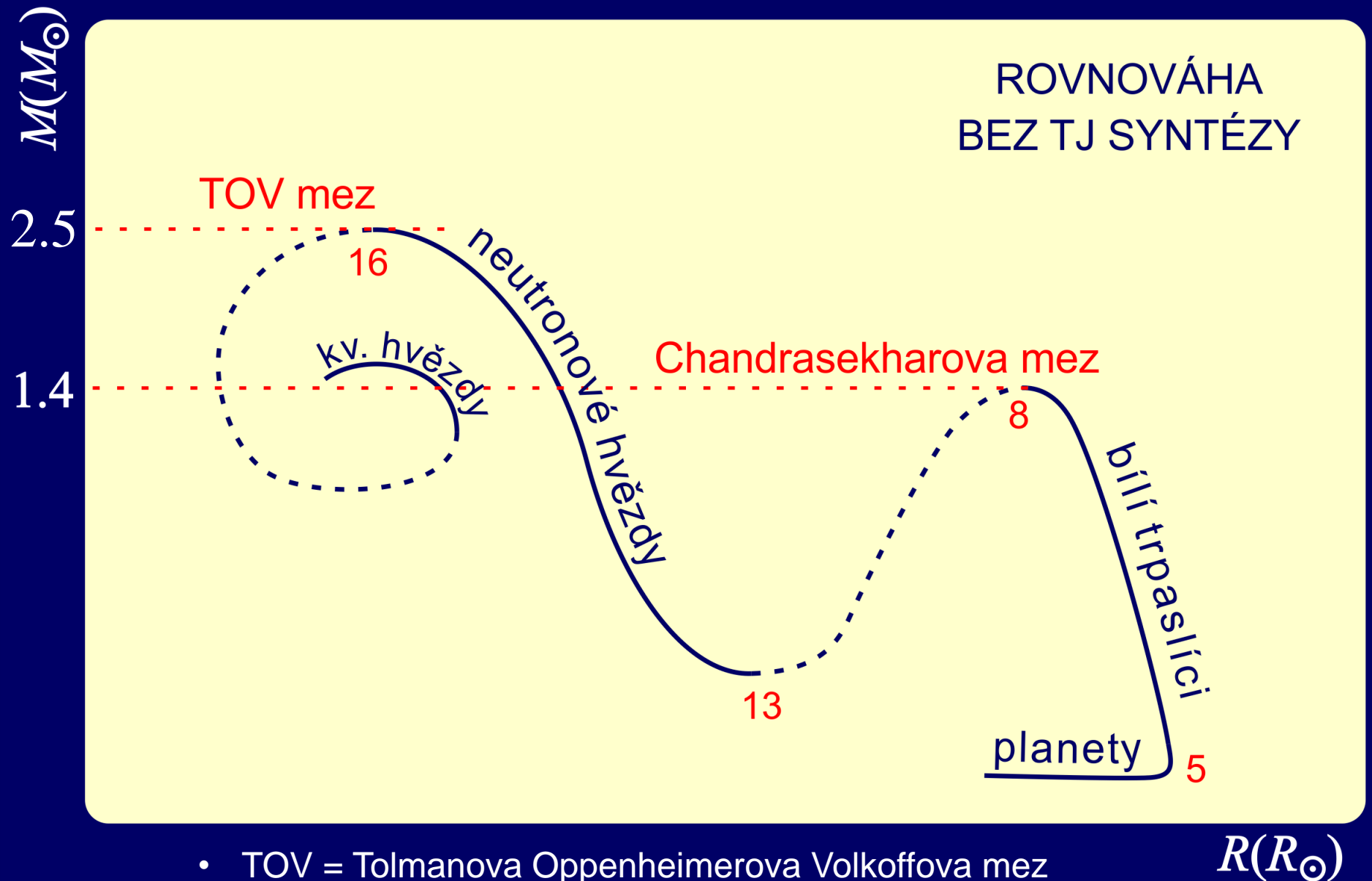
# Osud hmotných hvězd



# Obři a veleobři



# Diagram mrtvol



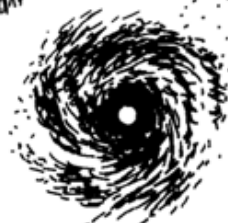
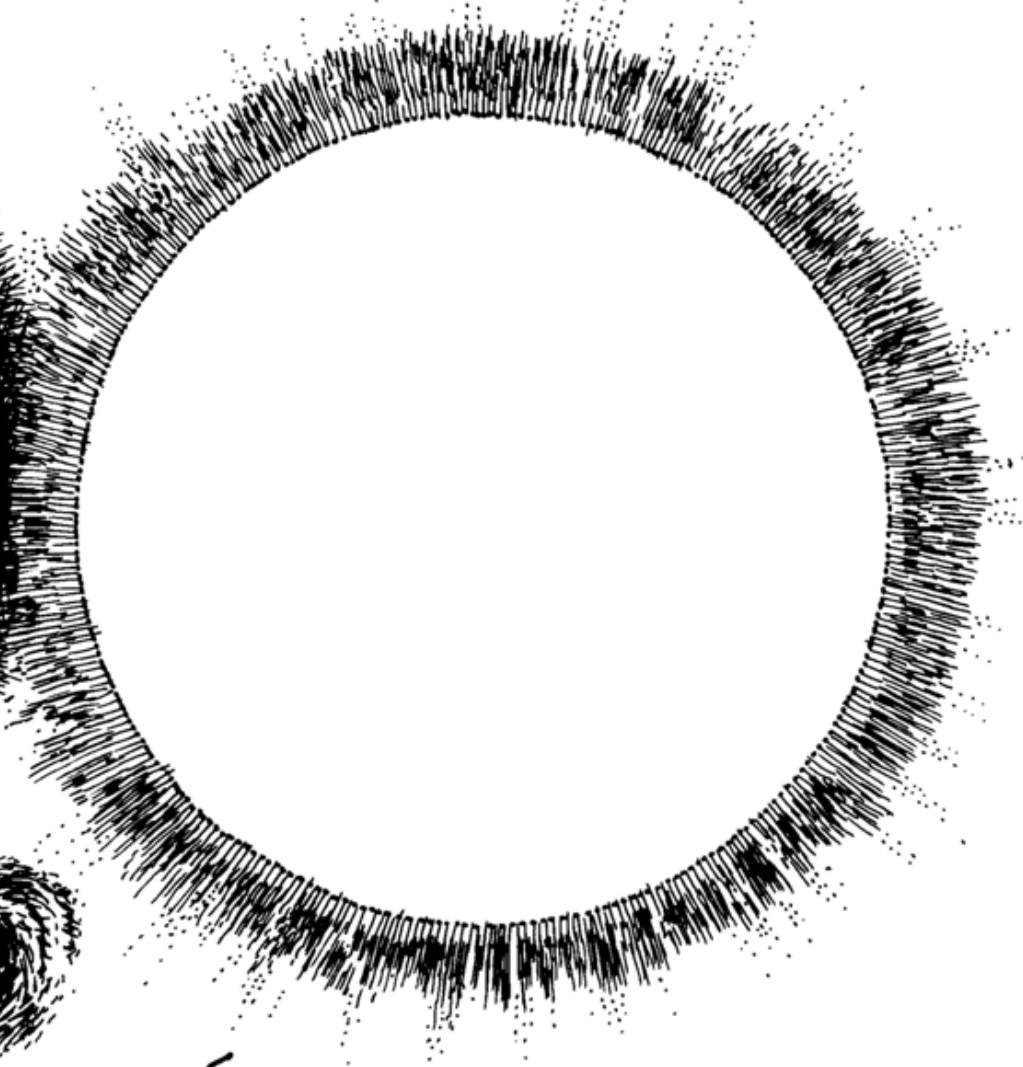
- TOV = Tolmanova Oppenheimerova Volkoffova mez
- červené číslo u křivky: exponent hustoty v  $\text{g/cm}^3$

závěrečné stádium	rozměry (km)	hustota (kg cm <sup>-3</sup> )	magnetické pole (T)	mechanismus udržení
bílý trpaslík (white dwarf)	3 000 ÷ 15 000	$10^2 \div 10^5$	$10^3 \div 10^7$	tlak elektronů
neutronová hvězda (neutron star)	20÷50	$10^{10} \div 10^{13}$	$10^7 \div 10^{12}$	tlak neutronů
kvarková hvězda	?	?	?	tlak kvarků

**degenerovaný plyn:** průměrná tepelná energie jedinců je nižší než Fermiho mez

ZEMĚ

BÍLÝ TRPASLÍK



NEUTRONOVÁ  
HVĚZDA

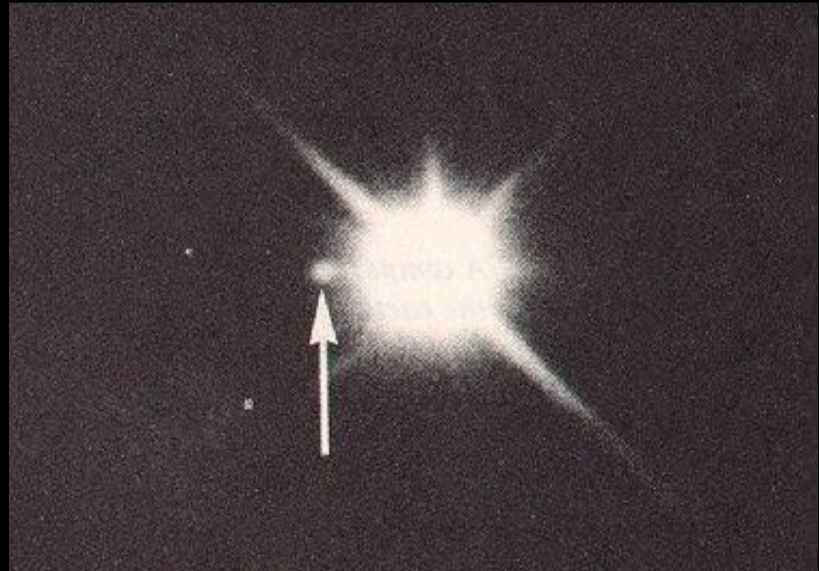
➤ ČERNÁ DÍRA

# Bílí trpaslíci

- rovnováha: degenerovaný elektronový plyn
- rozměry: 3 000 km až 15 000 km
- hustota: až  $10^4 \text{ kg/cm}^3$
- **1834:** Fridrich Bessel předpovídá existenci Síría B
- **1862:** objev Síría B v dílně bratří Clarků (Alvan Clark testoval objektiv o  $\varnothing$  45 cm)
- **1925:** Walter Adams (Mt. Wilson) – test OTR: grav. červený posuv spektrálních čar
- **1930:** Subrahmanyan Chandrasekhar odvodil horní mez hmotnosti na  $1,4 M_S$
- **2004:** přesné změření hmotnosti Síría B(HST)

## SÍRIUS B

- průměr: 11 736 km
- hustota:  $3 \times 10^3 \text{ kg/cm}^3$
- teplota: 25 200 K
- vzdálenost: 8,6 ly
- hmotnost:  $0,98 M_S$



# Neutronové hvězdy

- rovnováha: degenerovaný neutronový plyn
- rozměry: 20 km až 50 km
- hustota:  $10^{10} \text{ kg/cm}^3$  až  $10^{13} \text{ kg/cm}^3$
- rotace: milisekundy až sekundy
- magnetické pole:  $10^7$  až  $10^9 \text{ T}$
- mez stability:  $\sim 2,5 M_{\odot}$

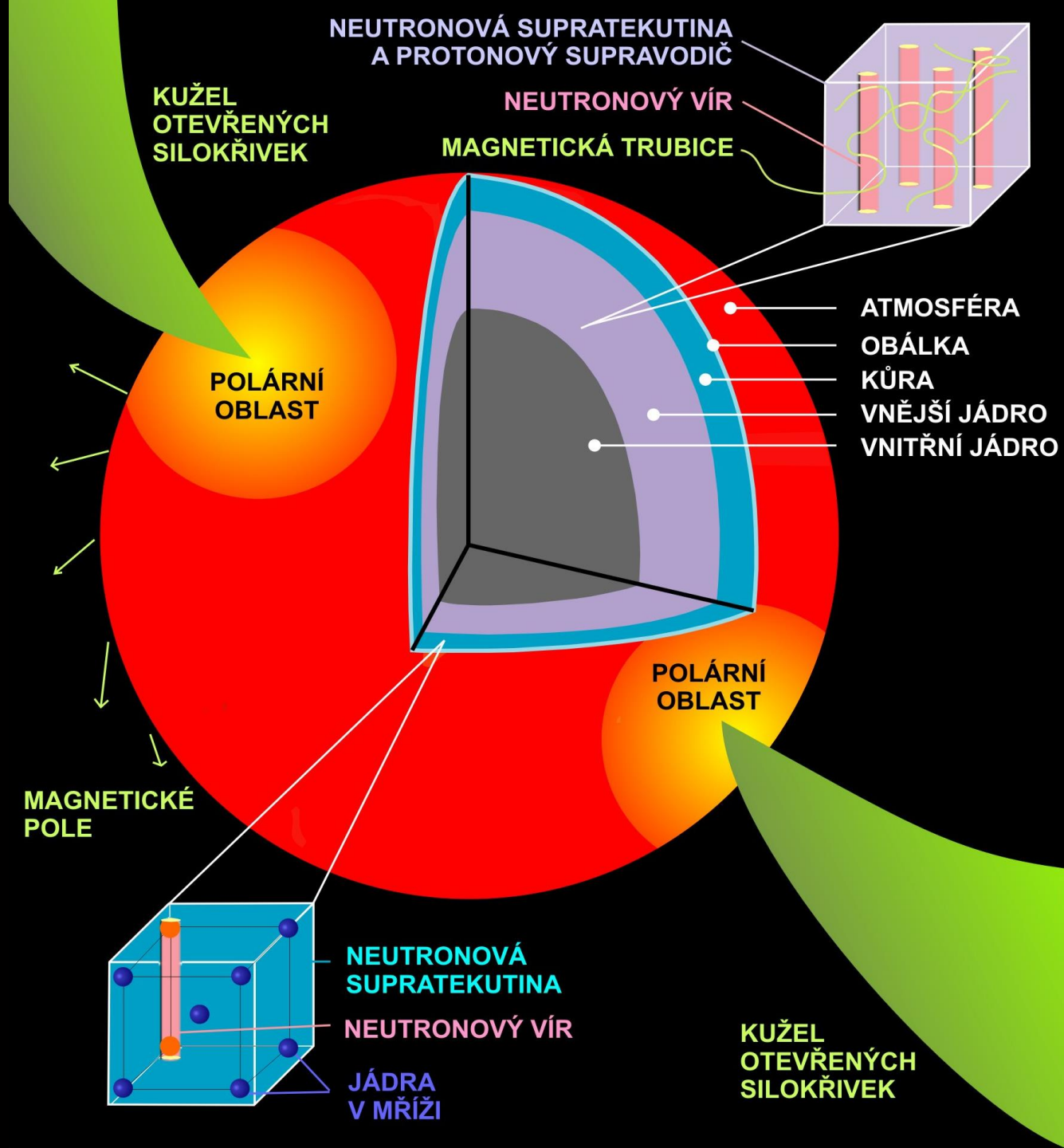
## VRSTVY

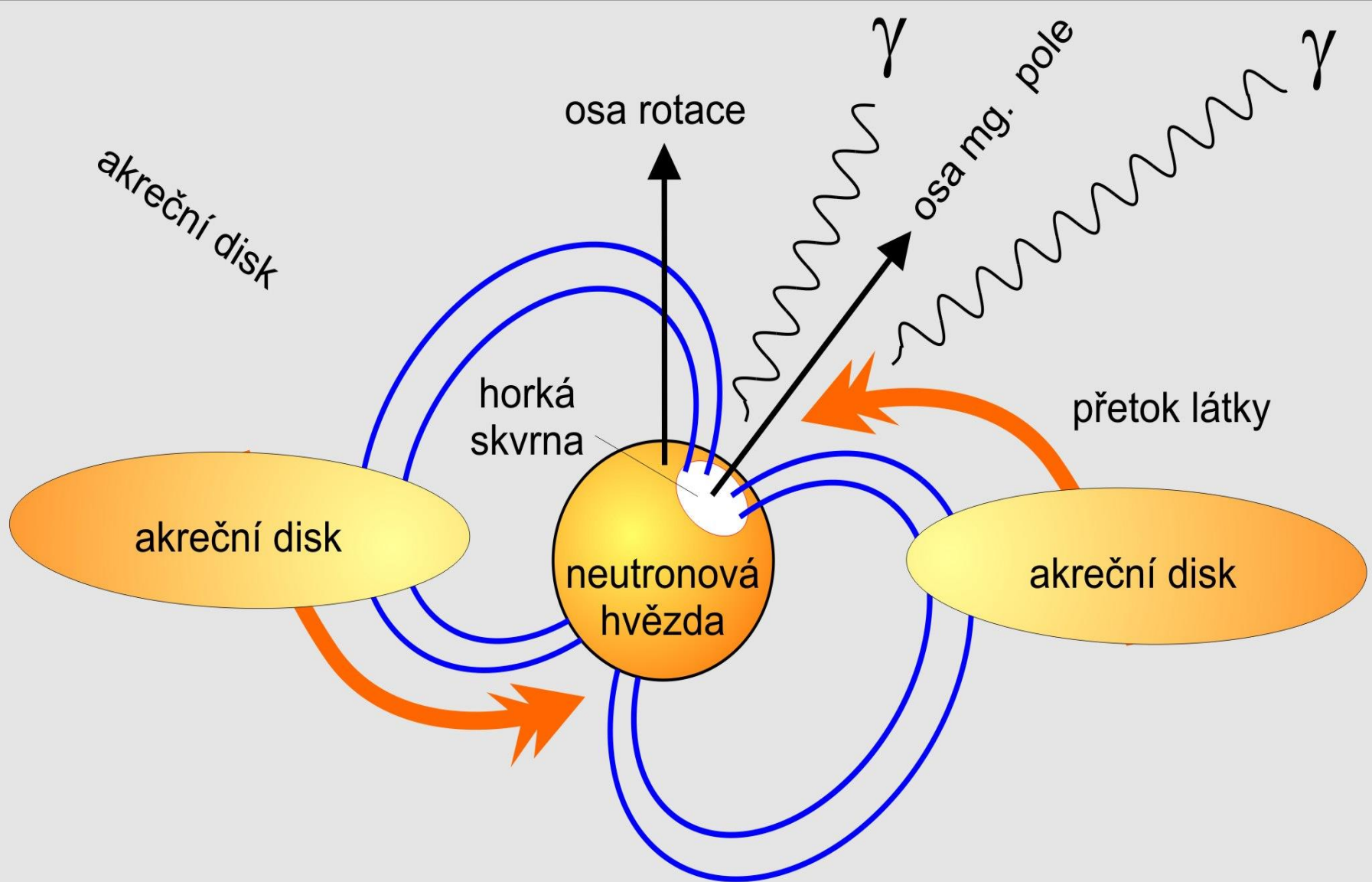
- atmosféra: tloušťka v cm, hustota  $< 1 \text{ kg/cm}^3$
- obálka s elektronovou degenerací: stovky metrů, hustota  $> 1 \text{ kg/cm}^3$
- kůra: 1 km, n kapky, vlákna, na vnitřní straně supratekutina s  $\rho > 10^6 \text{ kg/cm}^3$
- jádro:  $10^8$  až  $10^{12} \text{ kg/cm}^3$ , hyperony, QGP

## HISTORIE

- **1932:** J. Chadwick – objev neutronu
- **1933:** F. Zwicky, W. Baade – předpověď existence neutronových hvězd
- **1967:** J. Bellová: objev prvního pulzaru

# Neutronové hvězdy





**Neutronové hvězdy – pulzary**

# Neutronové hvězdy – pulzary

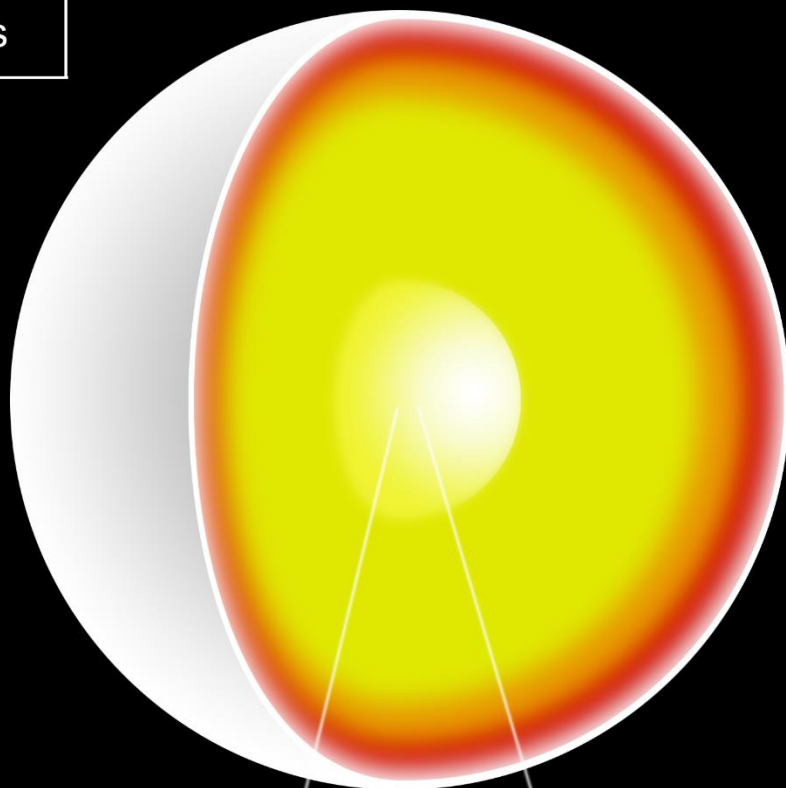
## HISTORIE

- 1967: J. Bellová: objev prvního pulzaru v Plachtách PSR B0833-45 (89 ms)
- 1968: Objev pulzaru v Krabí mlhovině (33 ms)
- 1974: Arecibo – objev PSR 1913+16 (59 ms)
- 1991: PSR 1534+12
- dnes: tisíce pulzarů

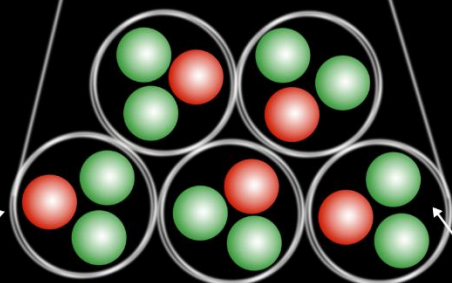


- kvark u
- kvark d
- kvark s

## NEUTRONOVÁ HVĚZDA

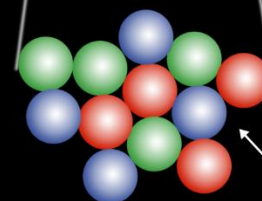
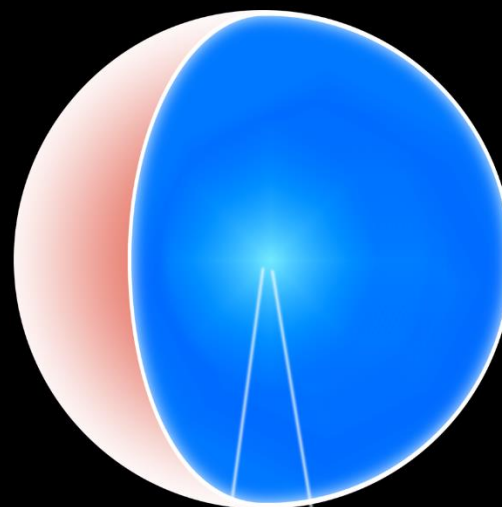


neutrony



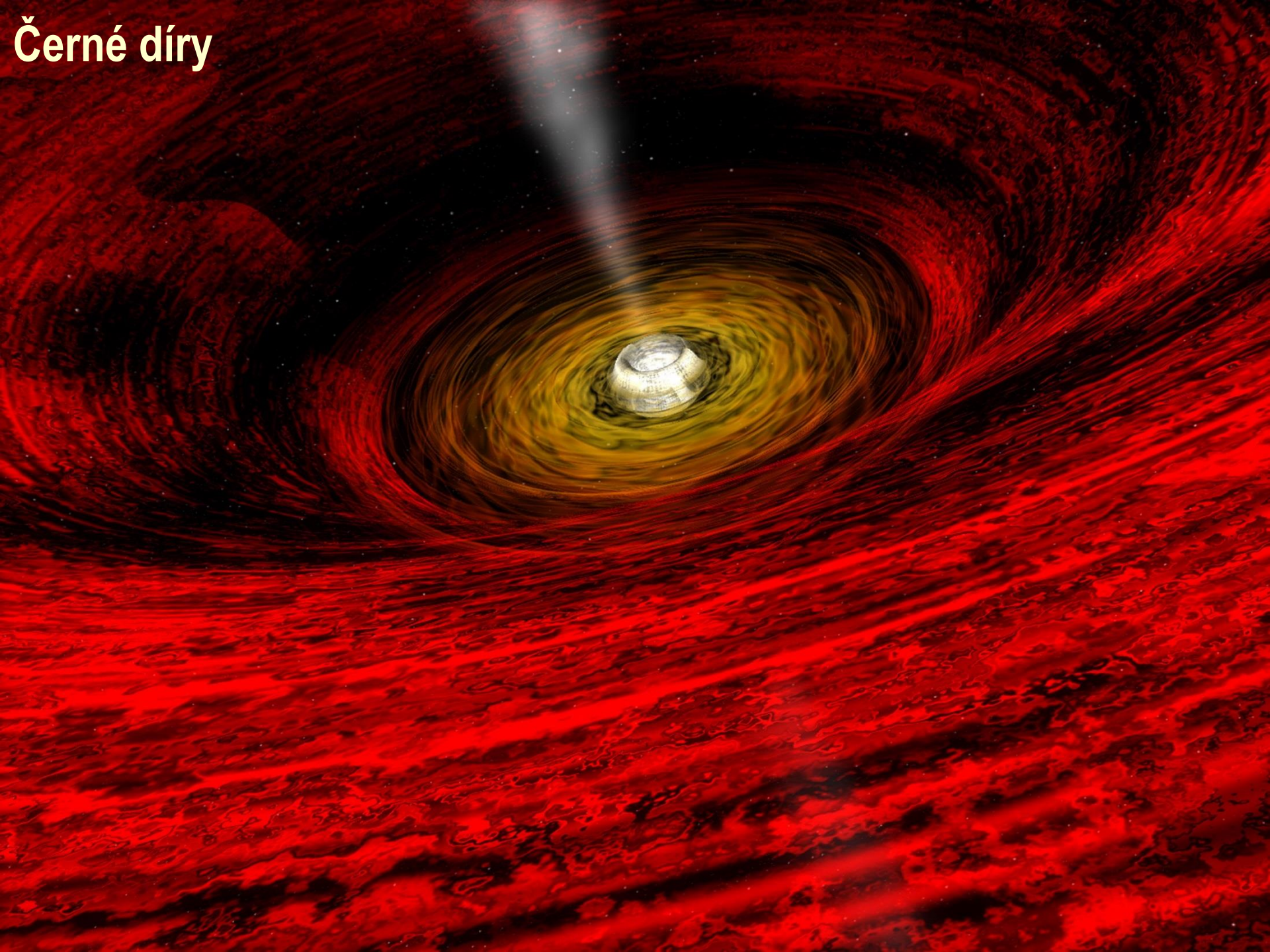
vázané  
kvarky

## KVARKOVÁ HVĚZDA



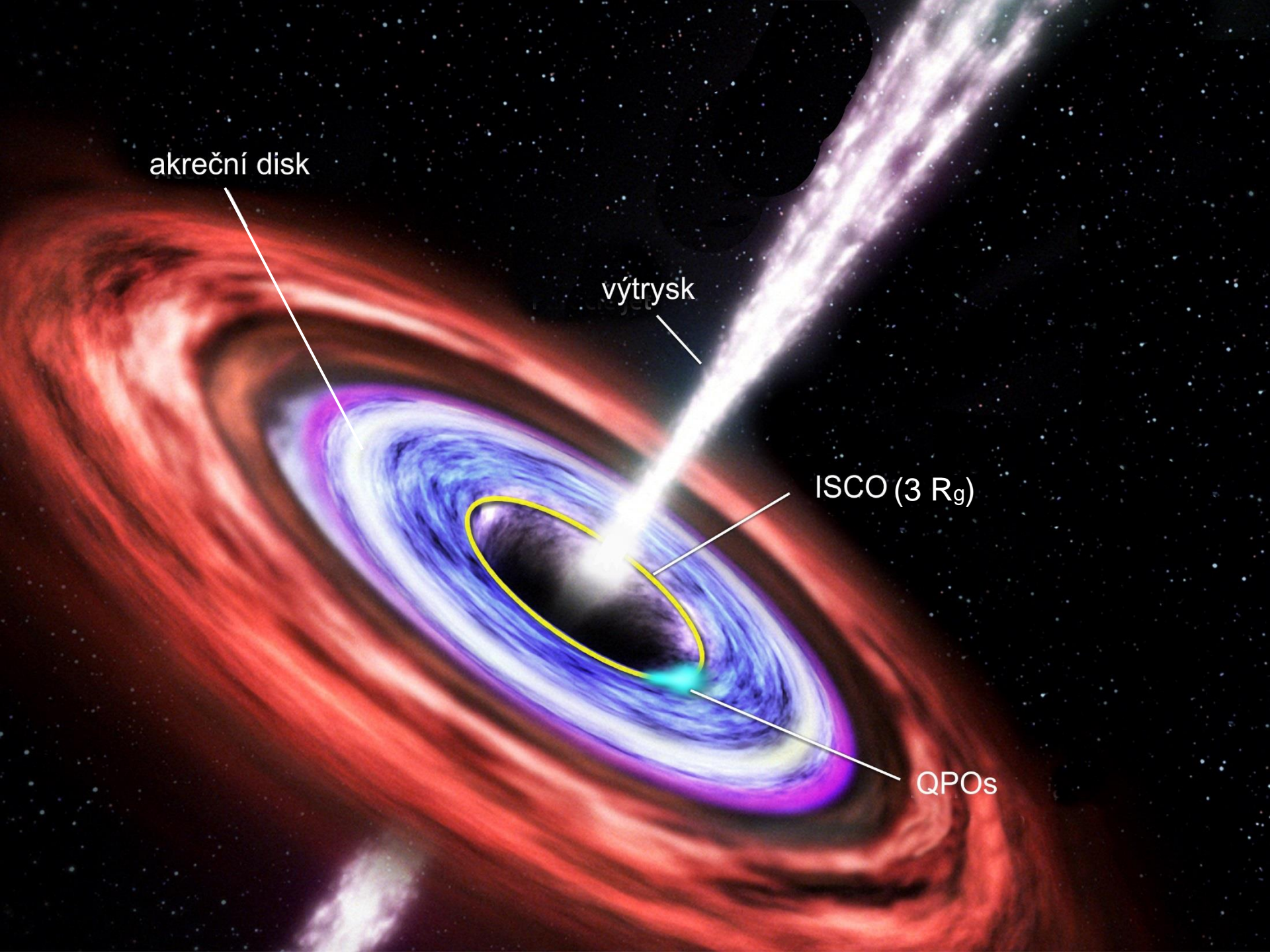
volné  
kvarky

# Černé díry



# Černé díry

- 
- 1783: John Michell
  - 1798: Pierre Simon Laplace
  - 1916: Karl Schwarzschild
  - 1967: John A. Wheeler
  - 1971: Cyg X1 (Paul Murdin)
  - 1992: NGC 4261 (HST)

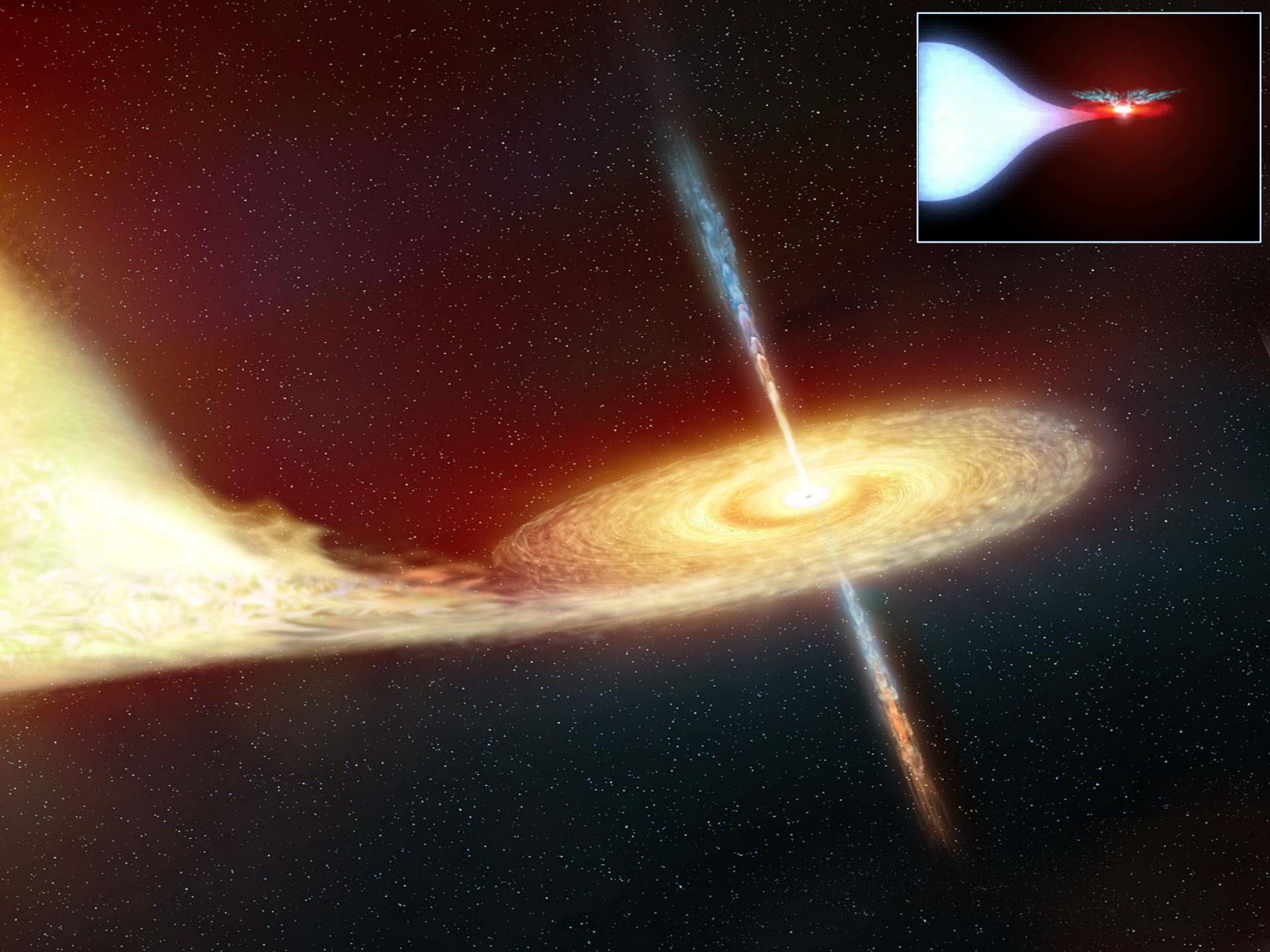


akreční disk

výtrysk

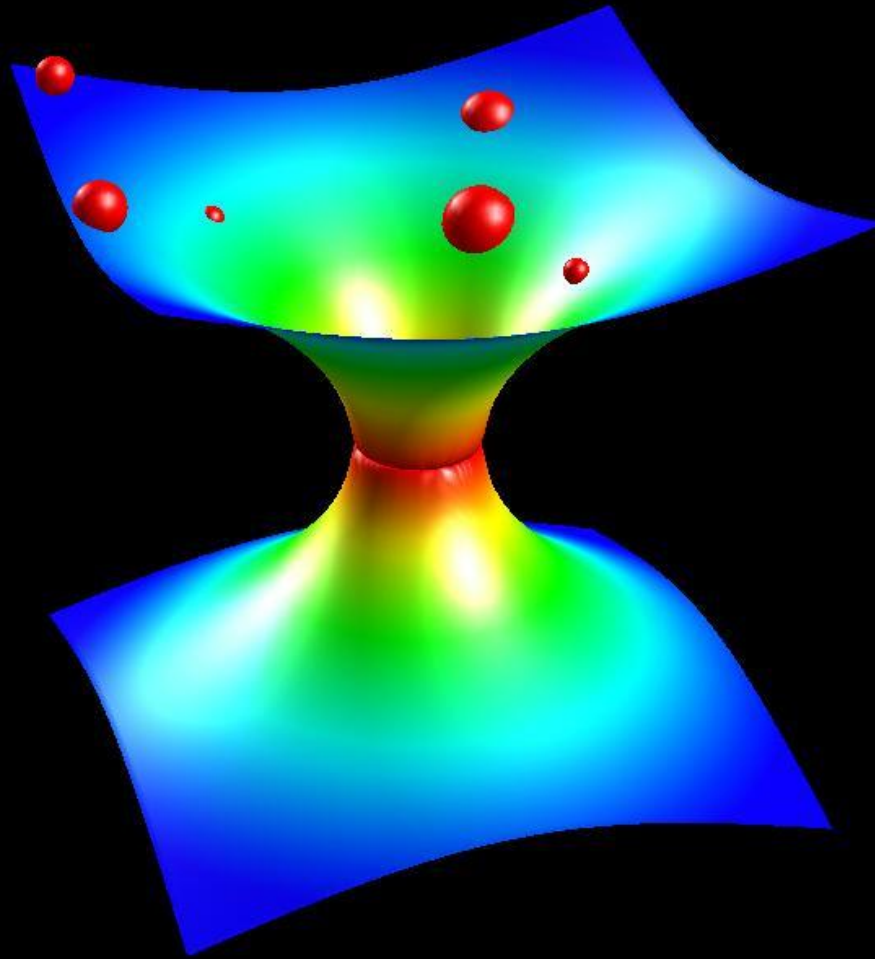
ISCO ( $3 R_g$ )

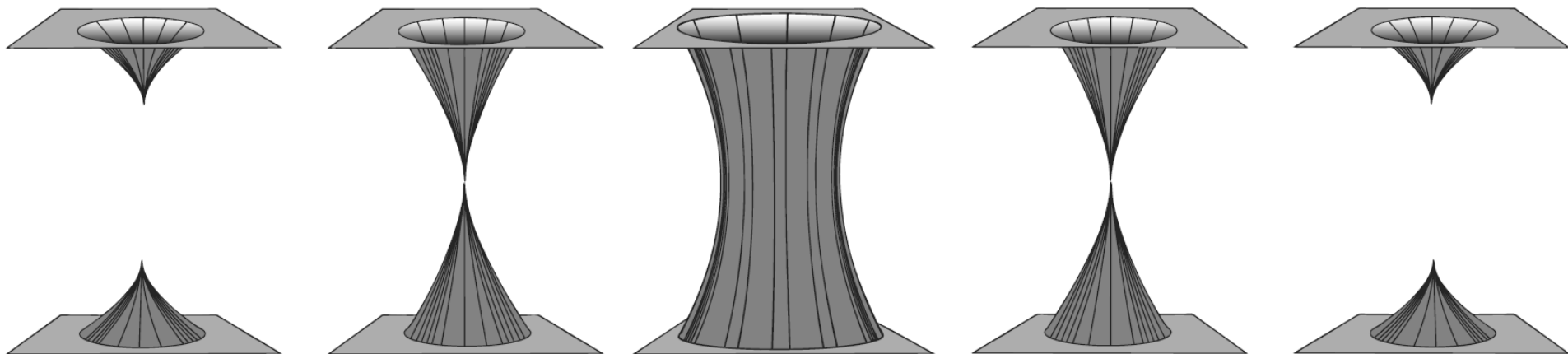
QPOs





# Červí díry





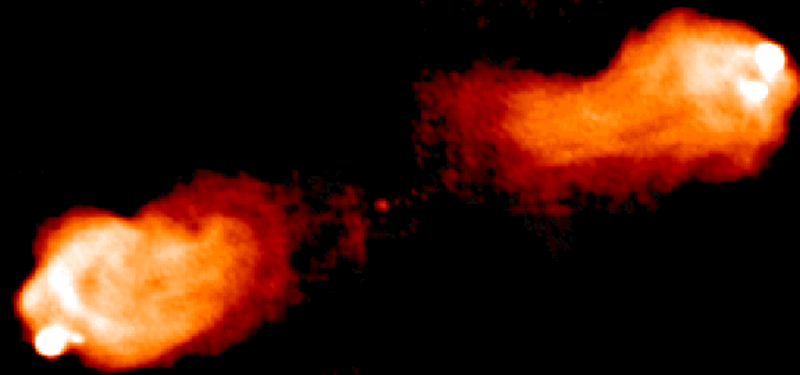
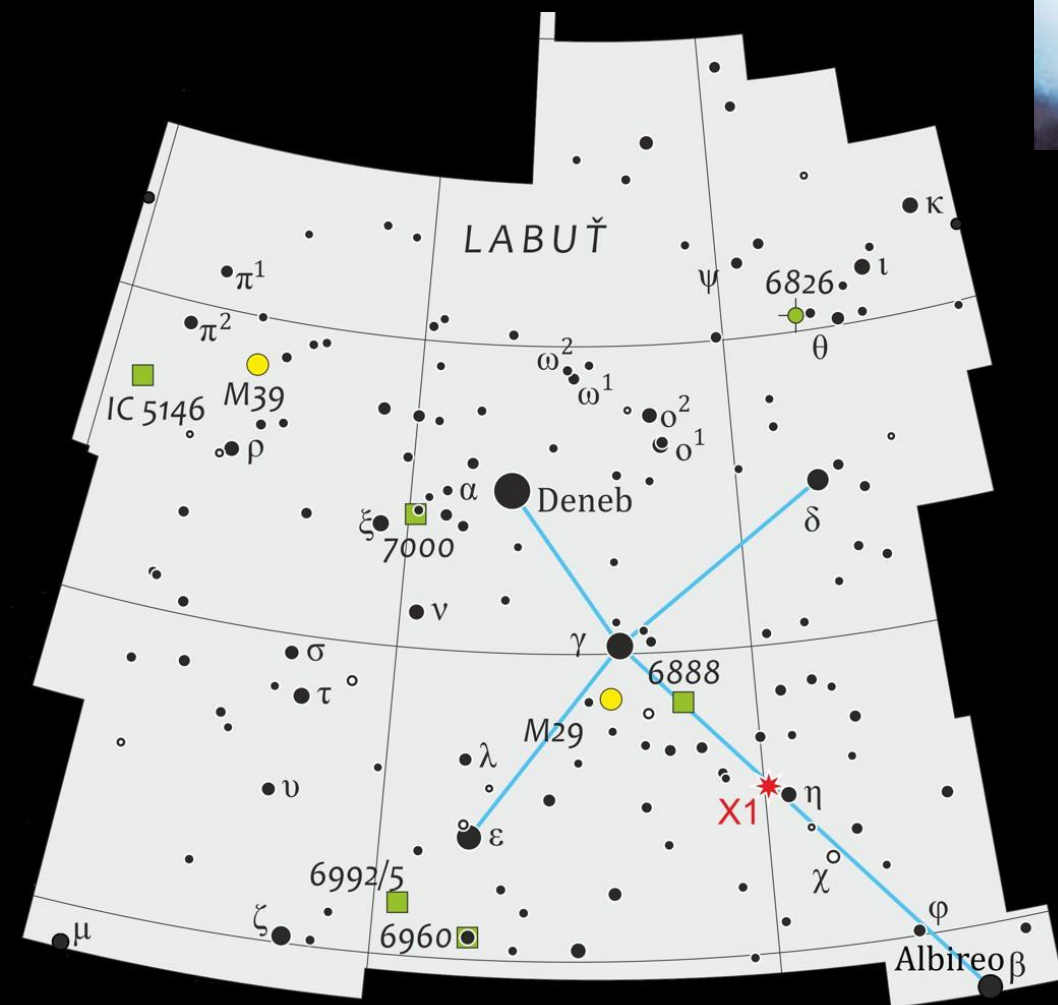
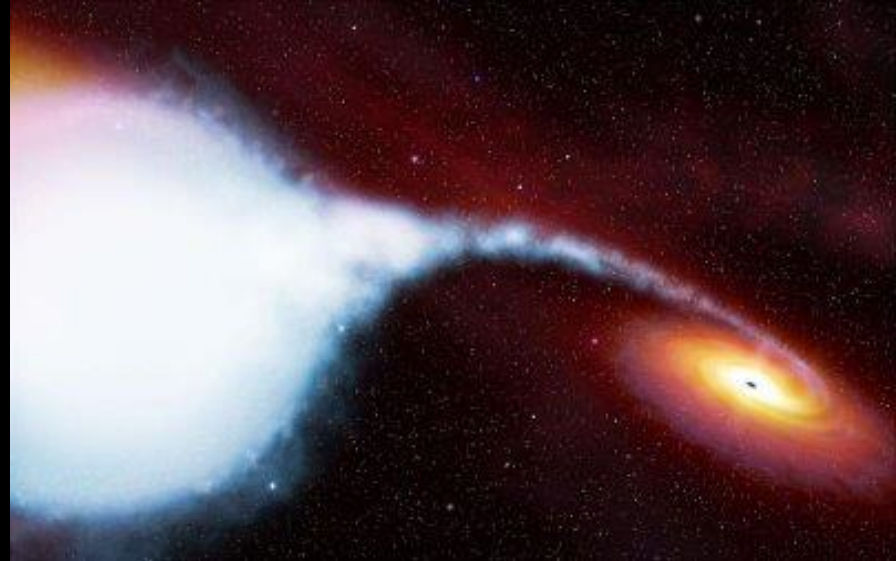
# Cyg X1

vzdálenost: 6 000 ly

souhvězdí: Labuť

hmotnost:  $8 M_{\odot}$

objev: 1964/1971



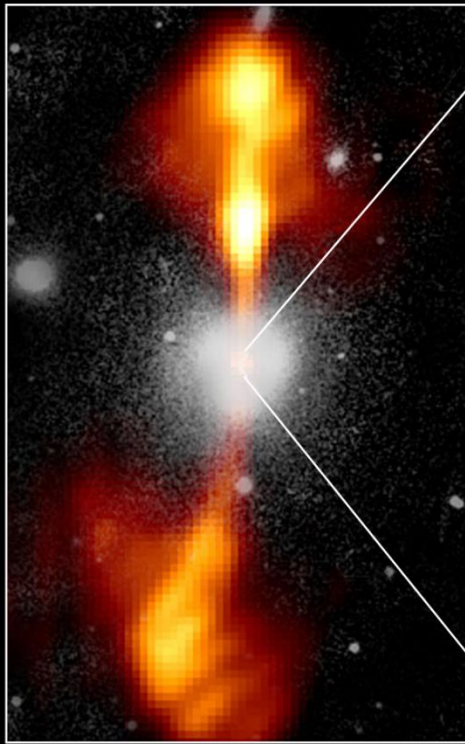
21 cm!

# NGC 4261

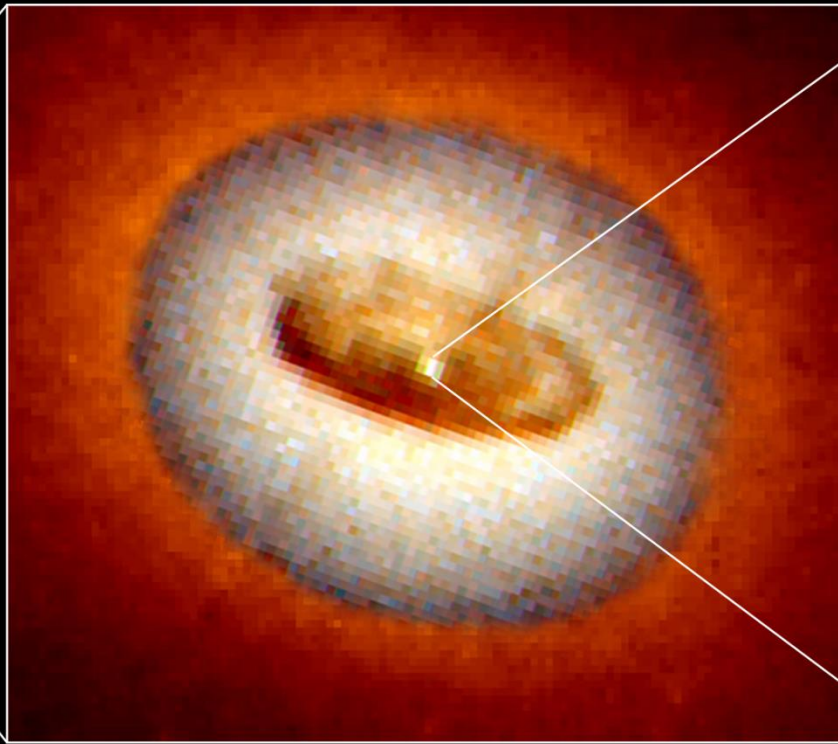
vzdálenost:  $10^8$  ly  
souhvězdí: Panna  
hmotnost černé díry:  $400 \times 10^6 M_{\odot}$   
hmotnost disku:  $10^5 M_{\odot}$

délka výtrysků: 88 000 ly  
průměr černé díry: 60 au  
průměr disku: 800 ly  
objev: 1992

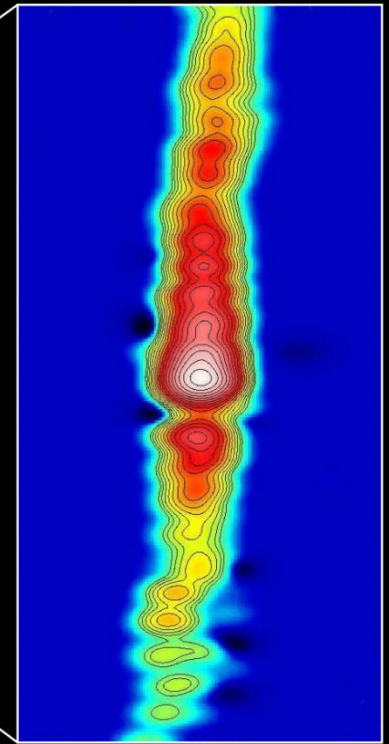
## NGC 4261



320" (200 000 l.y.)  
1992, VLA/HST



4" (2 500 l.y.)  
1995, HST



0,02" (13 l.y.)  
1995, VLBA

# Galaxie

vzdálenost: 26 000 ly

souhvězdí: Střelec

hmotnost:  $3,7 \times 10^6 M_{\odot}$

$R_g$ : 0,08 au ( $12 \times 10^6$  km)

1933: Karl Jansky

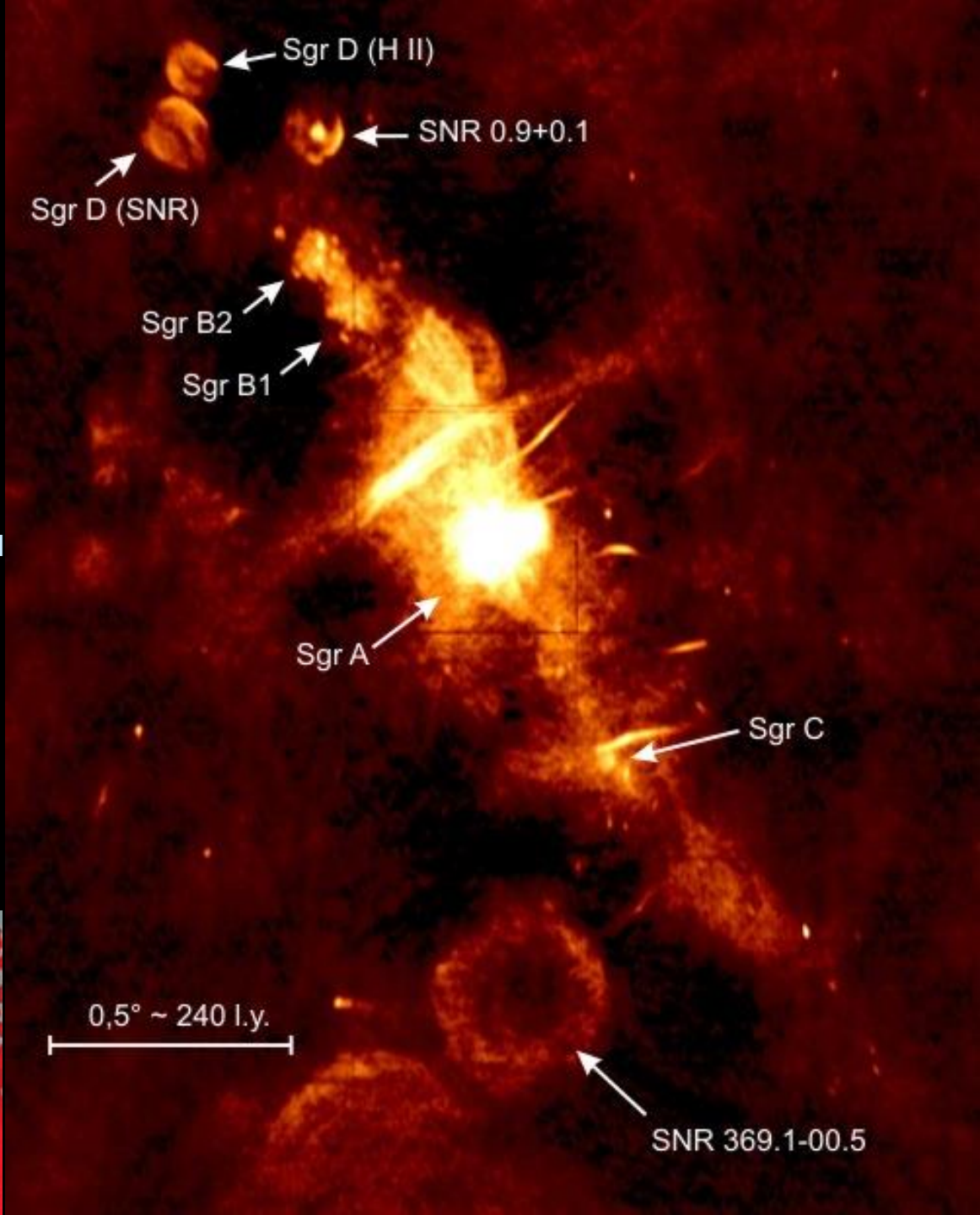
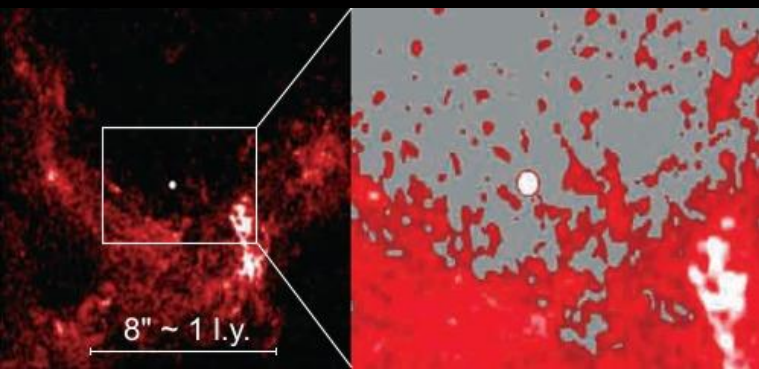
1974: VLA bodový zdroj

2005: pokus o změření velikosti  
(VLBA, rozlišení  $0,001''$ )  $R < 1$  au

2008:  $R < 50 \times 10^6$  km ( $4 R_g$ )

2008: první celý oběh \* (16 let)

VLA  
↓



# Galaxie

**Sgr A\*:** radiový, submilimetrový, IR, RTG zdroj

**Záblesky:** IR, RTG, cca 1 hodinu trvají,  
perioda několik hodin

**IR:** synchrotronní zář. elektronů,  
 $10^{11}$  až  $10^{12}$  K (VLT)

**RTG:** inverzní Comptonův rozptyl  
(XMM Newton)

kvaziperioda: 17 až 22 minut

poslední stabilní orbita: 30 minut

rozměry zdroje:  $0,3 R_g$  !!!

Co to je?

Snad rekonekce ve vnitřní části disku zahřeje elektrony a ty předají energii fotonům.  
Překrývá se perioda oběhu (20 minut) s periodicitou rekonexí (několik hodin)

