

# ZE ŽIVOTA HVĚZD

The background of the slide is a dark, star-filled sky. A prominent, bright blue star with a four-pointed diffraction pattern is located on the right side of the image. Numerous other stars of varying colors and brightness are scattered across the field of view.

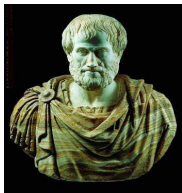
Petr Kurfürst

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky - Masarykova univerzita

Brno, 13. ledna 2016

# Vývoj názorů na hvězdy

- ▶ Hvězdy byly všeobecně považovány za *stálice*
- ▶ Aristotelés - hvězdy jsou útvary na nejvzdálenější kruhové sféře, jsou složeny z *éteru*
- ▶ Tato sféra je zcela neproměnnou kulisou, tvořící pouhé pozadí pro zajímavé a důležité děje (Slunce, Měsíc, planety)



Aristotelés

Schema huius praeiudicis diuisionis Sphaerarum.



Středověké vyobrazení nebeské sféry



Ptolemaiovská soustava



## Vývoj názorů na hvězdy

- ▶ I zastánci novověkého heliocentrického systému věřili na sféru stálic
- ▶ Tomu nasvědčovalo nadále neúspěšné měření tzv. *ročních paralax* hvězd (Tycho Brahe)



Johannes Kepler



David Fabricius

## Vývoj názorů na hvězdy

- ▶ I zastánci novověkého heliocentrického systému věřili na sféru stálic
- ▶ Tomu nasvědčovalo nadále neúspěšné měření tzv. *ročních paralax* hvězd (Tycho Brahe)
- ▶ Aristotelovský pohled na svět nabouraly teprve „nové“ hvězdy
- ▶ V roce 1572 *Tychonova* supernova v souhvězdí *Kassiopeia*, v roce 1604 *Keplerova* supernova v *Hadonoši*



Johannes Kepler



David Fabricius

## Vývoj názorů na hvězdy

- ▶ I zastánci novověkého heliocentrického systému věřili na sféru stálic
- ▶ Tomu nasvědčovalo nadále neúspěšné měření tzv. *ročních paralax* hvězd (Tycho Brahe)
- ▶ Aristotelovský pohled na svět nabouraly teprve „nové“ hvězdy
- ▶ V roce 1572 *Tychonova* supernova v souhvězdí *Kassiopeia*, v roce 1604 *Keplerova* supernova v *Hadonoši*
- ▶ V roce 1596 David Fabricius objevuje periodicky proměnnou hvězdu Miru
- ▶ „Propracovaná a nehybná“ středověká kosmologie se počala hroutit



Johannes Kepler



David Fabricius

## Vývoj názorů na hvězdy

- ▶ Vynález a zavedení dalekohledu přináší další podněty
- ▶ Galileo Galilei zjišťuje, že hvězd je mnohem více, než kolik jich vidíme pouhým okem, objevuje také hvězdnou podstatu Mléčné dráhy



Edmund Halley



Friedrich Wilhelm Bessel



## Vývoj názorů na hvězdy

- ▶ Vynález a zavedení dalekohledu přináší další podněty
- ▶ Galileo Galilei zjišťuje, že hvězd je mnohem více, než kolik jich vidíme pouhým okem, objevuje také hvězdnou podstatu Mléčné dráhy
- ▶ V roce 1717 Edmund Halley prokázal existenci tzv. *vlastního pohybu hvězd*
- ▶ Porovnáním vlastních i starších měření zjistil, že Aldebaran, Sirius, Arktur a Betelgeuze jeví na pozadí ostatních hvězd zřetelný posuv



Edmund Halley



Friedrich Wilhelm Bessel

## Vývoj názorů na hvězdy

- ▶ Vynález a zavedení dalekohledu přináší další podněty
- ▶ Galileo Galilei zjišťuje, že hvězd je mnohem více, než kolik jich vidíme pouhým okem, objevuje také hvězdnou podstatu Mléčné dráhy
- ▶ V roce 1717 Edmund Halley prokázal existenci tzv. *vlastního pohybu hvězd*
- ▶ Porovnáním vlastních i starších měření zjistil, že Aldebaran, Sirius, Arktur a Betelgeuze jeví na pozadí ostatních hvězd zřetelný posuv
- ▶ V roce 1760 Tobias Mayer odvodil vlastní pohyby 57 hvězd, představa křišťálových sfér tak byla nadále neudržitelná
- ▶ Okolo roku 1830 změřeny první *roční paralaxy* nejbližších hvězd (Bessel, Struve, Henderson)



Edmund Halley



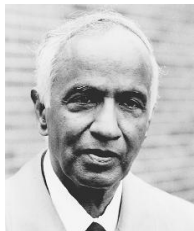
Friedrich Wilhelm Bessel

## Vývoj názorů na hvězdy

- ▶ V moderním pojetí za hvězdy obvykle považujeme horká (tudíž svítící), relativně stabilní, gravitačně vázaná tělesa
- ▶ Hvězdy jsou samostatná souvislá gravitačně vázaná tělesa o hmotnostech zhruba od 0,013 do několika set hmotností Slunce



Arthur Stanley Eddington



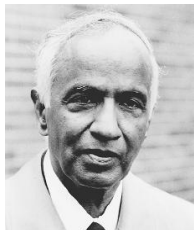
Subrahmanyan  
Chandrasekhar

## Vývoj názorů na hvězdy

- ▶ V moderním pojetí za hvězdy obvykle považujeme horká (tudíž svítící), relativně stabilní, gravitačně vázaná tělesa
- ▶ Hvězdy jsou samostatná souvislá gravitačně vázaná tělesa o hmotnostech zhruba od 0,013 do několika set hmotností Slunce
- ▶ Za zdroj hvězdné energie bylo od druhé poloviny 19. století pokládáno *postupné smršťování hvězdy* - vycházela tak ovšem jejich příliš krátká „životnost“
- ▶ Ve 20. letech 20. století nalezeno (Arthur S. Eddington a jiní) správné vysvětlení energetického zdroje hvězd - *jaderná fúze v jejich nitru*



Arthur Stanley Eddington



Subrahmanyan  
Chandrasekhar

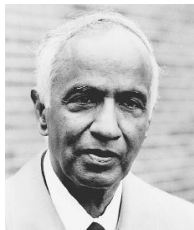


## Vývoj názorů na hvězdy

- ▶ V moderním pojetí za hvězdy obvykle považujeme horká (tudíž svítící), relativně stabilní, gravitačně vázaná tělesa
- ▶ Hvězdy jsou samostatná souvislá gravitačně vázaná tělesa o hmotnostech zhruba od 0,013 do několika set hmotností Slunce
- ▶ Za zdroj hvězdné energie bylo od druhé poloviny 19. století pokládáno *postupné smršťování hvězdy* - vycházela tak ovšem jejich příliš krátká „životnost“
- ▶ Ve 20. letech 20. století nalezeno (Arthur S. Eddington a jiní) správné vysvětlení energetického zdroje hvězd - *jaderná fúze v jejich nitru*
- ▶ Byly položeny i teoretické základy popisu „bizarních“ závěrečných fází hvězdného vývoje - *bílých trpaslíků, neutronových hvězd, černých děr*



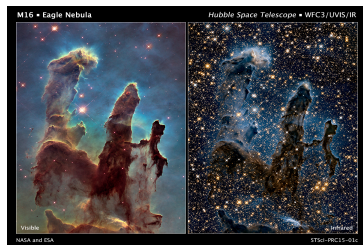
Arthur Stanley Eddington



Subrahmanyan Chandrasekhar

# Jak hvězdy vznikají?

- ▶ Na počátku *obří vodíková molekulová mračna*, zpravidla ve spirálních ramenech galaxií, stovky až milióny slunečních hmotností



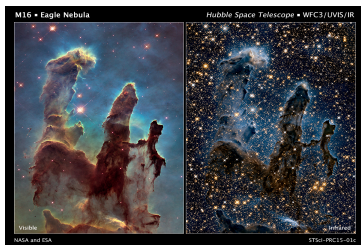
Oblaka „Sloupy stvoření“ v mlhovině M16



Oblaka ve spirálních ramenech „Vírové galaxie“

# Jak hvězdy vznikají?

- ▶ Na počátku *obří vodíková molekulová mračna*, zpravidla ve spirálních ramenech galaxií, stovky až milióny slunečních hmotností



Oblaka „Sloupy stvoření“ v mlhovině M16

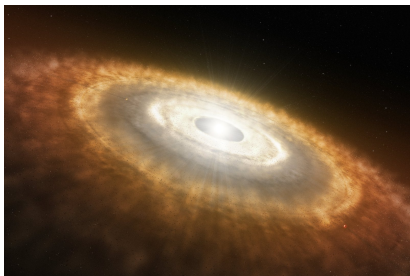


Oblaka ve spirálních ramenech „Vírové galaxie“

- ▶ *Impuls* k zahuštění (kontrakci, kolapsu) oblaku - *rázové vlny* od mladých hmotných hvězd, explozí supernov, atd.
- ▶ *Jeansovo kritérium* udává minimální hmotnost oblaku v závislosti na teplotě a hustotě, nutnou k jeho kontrakci
- ▶ Primární *fragmentace* oblaku, díky jeho ne zcela rovnoměrné hustotě

## Jak hvězdy vznikají?

- ▶ V jisté fázi kolapsu oblaku začne teplota a tlak v centrální oblasti narůstat
- ▶ Okolo zárodku hvězdy se formuje *protostelární akreční disk*

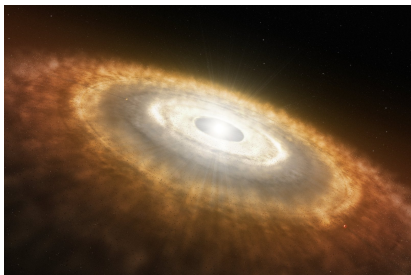


Předhvězdný (*protostelární + protoplanetární*) disk



## Jak hvězdy vznikají?

- ▶ V jisté fázi kolapsu oblaku začne teplota a tlak v centrální oblasti narůstat
- ▶ Okolo zárodku hvězdy se formuje *protostelární akreční disk*

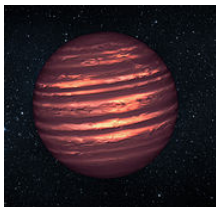


Předhvězdný (*protostelární + protoplanetární*) disk

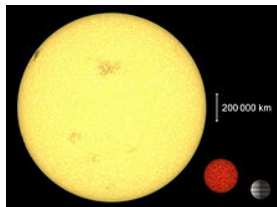
- ▶ Tento disk zajišťuje odtok přebytečného *momentu hybnosti*, tím umožňuje další nabalování látky na *protohvězdu*
- ▶ Samotný zárodek hvězdy je zahalen v husté *prachoplynové obálce*
- ▶ V chladněších částech disku se mohou formovat zárodky *planet*

## Hnědí trpaslíci - přechod mezi hvězdami a planetami

- ▶ Objekty v rozmezí hmotností 0,013 až 0,075 hmotnosti Slunce, menší tělesa již řadíme mezi planety
- ▶ Až do roku 1995 byli hnědí trpaslíci jen hypotetickými objekty, v současnosti jich s jistotou známe téměř 3 000



Vyobrazení hnědého trpaslíka



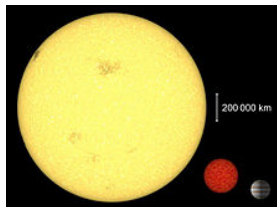
Porovnání rozměrů Slunce s *hnědými trpaslíky* a planetami

## Hnědí trpaslíci - přechod mezi hvězdami a planetami

- ▶ Objekty v rozmezí hmotností 0,013 až 0,075 hmotnosti Slunce, menší tělesa již řadíme mezi planety
- ▶ Až do roku 1995 byli hnědí trpaslíci jen hypotetickými objekty, v současnosti jich s jistotou známe téměř 3 000



Vyobrazení hnědého trpaslíka



Porovnání rozměrů Slunce s hnědými trpaslíky a planetami

- ▶ Jsou jedinými hvězdami, které nikdy nehradí svůj *energetický výdej* jaderným spalováním vodíku, pouze postupně ztrácí svou energii vyzařováním
- ▶ Hnědý trpaslík pozvolna chladne a stává se nezářícím *černým trpaslíkem*, složeným převážně z vodíku

## Hlavní část „života“ většiny hvězd - fáze hlavní posloupnosti

- ▶ Smršťování hvězdy se zastaví, veškeré energetické ztráty hvězdy jsou plně hrazeny *termojadernými reakcemi*, spalujícími vodík na helium
- ▶ Hvězda vstupuje do absolutně nejdelší etapy „života“, čítající milióny až miliardy let, například naše Slunce se nachází zhruba uprostřed této fáze

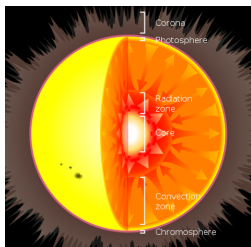
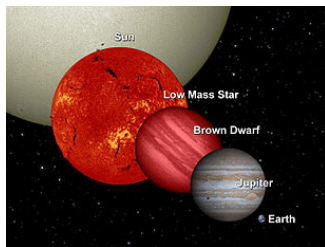


Schéma vnitřní stavby Slunce



Porovnání rozměrů hvězd hlavní posloupnosti s *hnědými trpaslíky* a planetami



## Hlavní část „života“ většiny hvězd - fáze hlavní posloupnosti

- ▶ Smršťování hvězdy se zastaví, veškeré energetické ztráty hvězdy jsou plně hrazeny *termojadernými reakcemi*, spalujícími vodík na helium
- ▶ Hvězda vstupuje do absolutně nejdélejší etapy „života“, čítající milióny až miliardy let, například naše Slunce se nachází zhruba uprostřed této fáze

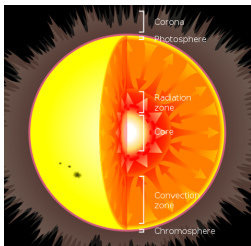
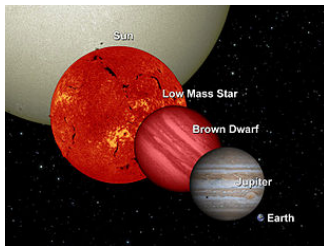


Schéma vnitřní stavby Slunce

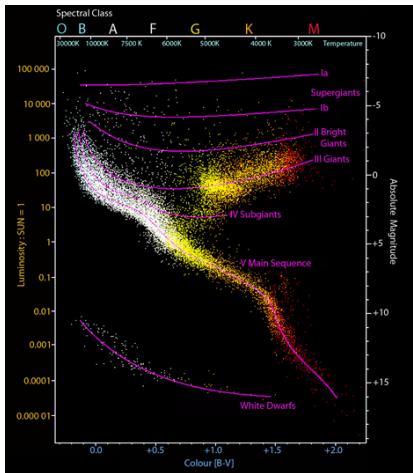


Porovnání rozměrů hvězd hlavní posloupnosti s *hnědými trpaslíky* a planetami

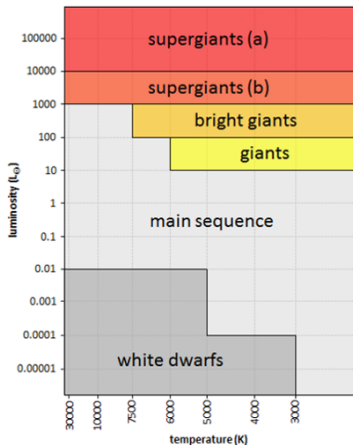
- ▶ Rozměry v rozmezí od zhruba 0,1 do několika desítek průměrů Slunce
- ▶ Povrchové (*efektivní*) teploty v rozmezí od 2 500 do několika desítek tisíc kelvinů, povrchová teplota a zářivý výkon rostou s hmotností

# Hertzprungův-Russellův (případně tzv. barevný) diagram

- ▶ *Hertzprungův-Russellův diagram* vyjadřuje závislost zářivého výkonu (svítivosti) hvězd, nebo skupin hvězd, na jejich *efektivních teplotách* (spektrálním typu, barevném indexu)



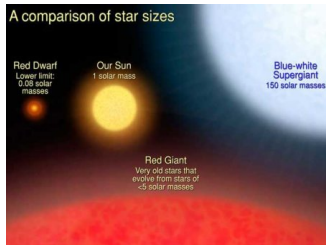
Barevný diagram hlavních posloupností



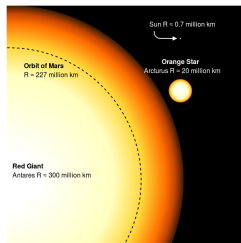
Schématický popis

## Větev červených obrů (včetně tzv. *veleobrů*)

- ▶ Po vyhoření zhruba 95 % zásob vodíku se hvězda opět začne rychle smršťovat
- ▶ Teplota a energetický výkon jádra hvězdy se mnohonásobně zvýší, hvězda se následně až o dva řády rozepne
- ▶ Zářivý výkon hvězdy vzroste až tisíckrát při povrchové efektivní teplotě zhruba 3 000 kelvinů



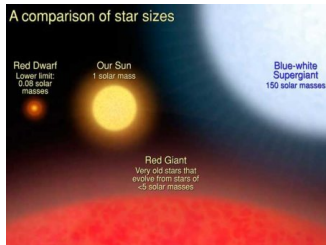
Porovnání rozměrů hvězd hlavní posloupnosti s červenými obry a veleobry



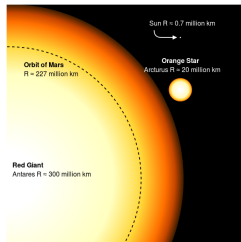
Jiné srovnání poloměrů červených a oranžových obrů s naším Sluncem

## Větev červených obrů (včetně tzv. *veleobrů*)

- ▶ Po vyhoření zhruba 95 % zásob vodíku se hvězda opět začne rychle smršťovat
- ▶ Teplota a energetický výkon jádra hvězdy se mnohonásobně zvýší, hvězda se následně až o dva řády rozepne
- ▶ Zářivý výkon hvězdy vzroste až tisíckrát při povrchové efektivní teplotě zhruba 3 000 kelvinů



Porovnání rozměrů hvězd hlavní posloupnosti s červenými obry a veleobry

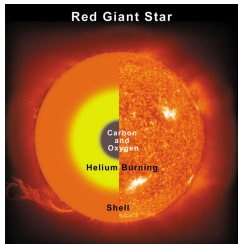


Jiné srovnání poloměrů červených a oranžových obrů s naším Sluncem

- ▶ Později dojde i k zapálení *heliových reakcí* v jádře hvězdy, ta se poněkud smrští a její povrch se zahřeje, hvězda se přesouvá na tzv. *horizontální větev (oranžových) obrů*

## Větev červených obrů (včetně tzv. *veleobrů*)

- ▶ V jádru hvězdy se hromadí „popel“ heliových reakcí - uhlík a kyslík
- ▶ Hvězda se znovu nadme, tentokrát ještě více než kdykoli předtím, přesune se na tzv. *asymptotickou větev obrů*
- ▶ V závěru této fáze dojde k několika tzv. *tepelným pulzům*



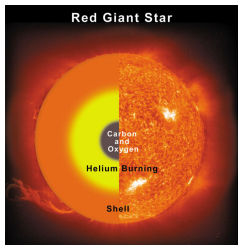
Vnitřní struktura hvězdy *asymptotické větve obrů*



Planetární mlhovina *Kočičí oko* s obnaženým *bílým trpaslíkem* v centru

## Větev červených obrů (včetně tzv. *veleobrů*)

- ▶ V jádru hvězdy se hromadí „popel“ heliových reakcí - uhlík a kyslík
- ▶ Hvězda se znovu nadme, tentokrát ještě více než kdykoli předtím, přesune se na tzv. *asymptotickou větev obrů*
- ▶ V závěru této fáze dojde k několika tzv. *tepelným pulzům*



Vnitřní struktura hvězdy *asymptotické větve obrů*

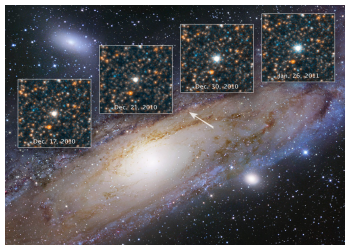


Planetární mlhovina *Kočičí oko* s obnaženým *bílým trpaslíkem* v centru

- ▶ V případě hvězd s počáteční hmotností od 0,4 do 11 hmotností Slunce se hvězdný obal rozptýlí jako tzv. *planetární mlhovina*, obnažené husté jádro se mění na *bílého trpaslíka*

## Jak určujeme vzdálenosti, hmotnosti a teploty hvězd ?

- ▶ *Trigonometrická roční paralaxa* - v současnosti dokážeme určit vzdálenosti až do řádu 1000 *parseků*
- ▶ *Cefeidy* - proměnné hvězdy se známým vztahem *zářivý výkon - perioda*,  
 $M_V(\text{mag}) = 2,80 \log P(\text{d}) - 1,43$
- ▶ Pomocí cefeid v roce 1923 prokázána vzdálenost galaxie M31 (Edwin Hubble) - určování vzdáleností až do desítek *megaparseků*



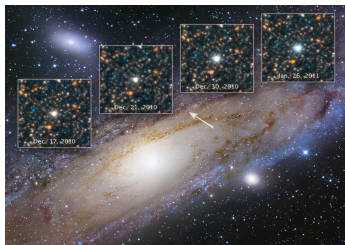
Cefeida V1 v galaxii M31, zdroj: NASA



Supernova 1994D v galaxii NGC 4526, zdroj: HST

## Jak určujeme vzdálenosti, hmotnosti a teploty hvězd ?

- ▶ *Trigonometrická roční paralaxa* - v současnosti dokážeme určit vzdálenosti až do řádu 1000 *parseků*
- ▶ *Cefeidy* - proměnné hvězdy se známým vztahem *zářivý výkon - perioda*,  
 $M_V(\text{mag}) = 2,80 \log P(\text{d}) - 1,43$
- ▶ Pomocí cefeid v roce 1923 prokázána vzdálenost galaxie M31 (Edwin Hubble) - určování vzdáleností až do desítek *megaparseků*



Cefeida V1 v galaxii M31, zdroj: NASA



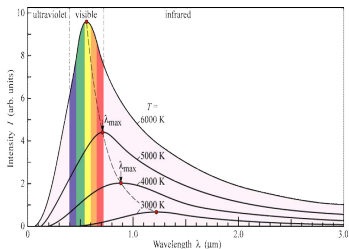
Supernova 1994D v galaxii NGC 4526, zdroj: HST

- ▶ Supernovy typu Ia - standardní *absolutní hvězdná velikost*  
 $M_V(\text{mag}) \approx 19,3 \pm 0,3$ , kosmologické vzdálenosti
- ▶ *Červený posuv a Hubbleův zákon*

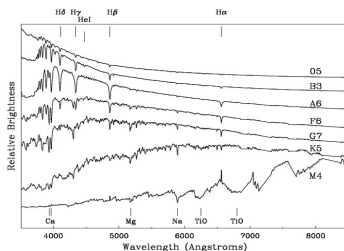


# Jak určujeme vzdálenosti, hmotnosti a teploty hvězd ?

- ▶ *Hmotnosti hvězd ve dvojhvězdách (vícenásobných systémech)* lze odvodit z oběžné periody pomocí *3. Keplerova zákona*,  $\sum M_{\star} \sim a^3 / P^2$
- ▶ *Hmotnosti osamocených hvězd* určíme z jejich teploty a zářivého výkonu (a dalších parametrů), tj. z jejich polohy na Hertzsprungově-Russellově diagramu



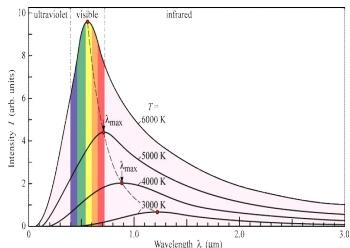
Spojité spektrum - Planckův zákon



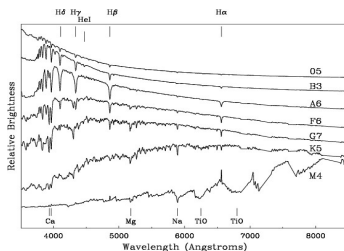
Čárová spektra pro různé teploty

# Jak určujeme vzdálenosti, hmotnosti a teploty hvězd ?

- ▶ *Hmotnosti hvězd ve dvojhvězdách* (vícenásobných systémech) lze odvodit z oběžné periody pomocí *3. Keplerova zákona*,  $\sum M_* \sim a^3 / P^2$
- ▶ Hmotnosti *osamocených hvězd* určíme z jejich teploty a zářivého výkonu (a dalších parametrů), tj. z jejich polohy na Hertzsprungově-Russellově diagramu



Spojité spektrum - *Planckův zákon*

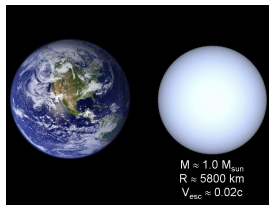


Čárová spektra pro různé teploty

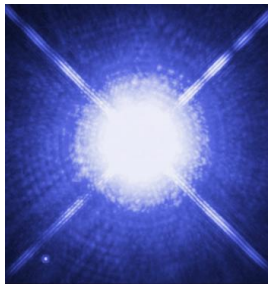
- ▶ Hvězdná *spojitá* i *čárová* spektra dávají informaci o teplotě
- ▶ Rozložení *spektrálních čar* jednotlivých prvků vytváří charakteristický „otisk“ typický pro různé teploty

## Závěrečné fáze vývoje hvězd

- ▶ Velká část hvězd končí tedy jako *bílý trpaslík* - obnažené *elektronově degenerované* jádro s hustotou až  $10^9 \text{ kg m}^{-3}$
- ▶ Jejich teplota dosahuje až stovek tisíc kelvinů, v časové škále řady miliard let postupně chladnou a vyhasínají



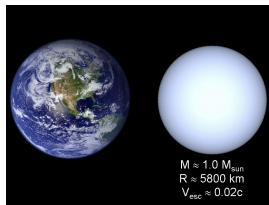
Porovnání obvyklé velikosti bílého trpaslíka a naší Země



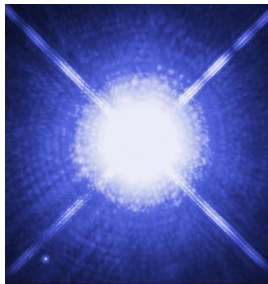
Sirius B, zdroj: HST

## Závěrečné fáze vývoje hvězd

- ▶ Velká část hvězd končí tedy jako *bílý trpaslík* - obnažené *elektronově degenerované* jádro s hustotou až  $10^9 \text{ kg m}^{-3}$
- ▶ Jejich teplota dosahuje až stovek tisíc kelvinů, v časové škále řady miliard let postupně chladnou a vyhasínají
- ▶ Dalšímu smršťování brání tlak elektronově degenerované látky
- ▶ Čím hmotnější bílý trpaslík, tím paradoxně menší



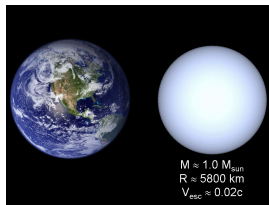
Porovnání obvyklé velikosti bílého trpaslíka a naší Země



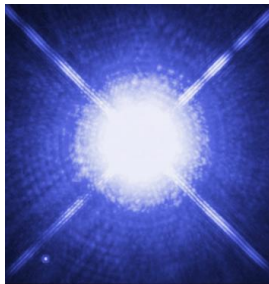
Sirius B, zdroj: HST

## Závěrečné fáze vývoje hvězd

- ▶ Velká část hvězd končí tedy jako *bílý trpaslík* - obnažené *elektronově degenerované* jádro s hustotou až  $10^9 \text{ kg m}^{-3}$
- ▶ Jejich teplota dosahuje až stovek tisíc kelvinů, v časové škále řady miliard let postupně chladnou a vyhasínají
- ▶ Dalšímu smršťování brání tlak elektronově degenerované látky
- ▶ Čím hmotnější bílý trpaslík, tím paradoxně menší
- ▶ Nejznámějším bílým trpaslíkem je Sirius B, objevený v roce 1862, s hmotností  $0,98 M_{\odot}$ , s poloměrem  $0,008 R_{\odot}$ , okolo Siria A obíhá s periodou cca 50 let



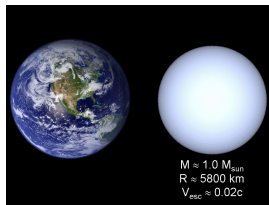
Porovnání obvyklé velikosti bílého trpaslíka a naší Země



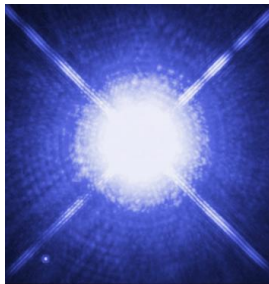
Sirius B, zdroj: HST

## Závěrečné fáze vývoje hvězd

- ▶ Velká část hvězd končí tedy jako *bílý trpaslík* - obnažené *elektronově degenerované* jádro s hustotou až  $10^9 \text{ kg m}^{-3}$
- ▶ Jejich teplota dosahuje až stovek tisíc kelvinů, v časové škále řady miliard let postupně chladnou a vyhasínají
- ▶ Dalšímu smršťování brání tlak elektronově degenerované látky
- ▶ Čím hmotnější bílý trpaslík, tím paradoxně menší
- ▶ Nejznámějším bílým trpaslíkem je Sirius B, objevený v roce 1862, s hmotností  $0,98 M_{\odot}$ , s poloměrem  $0,008 R_{\odot}$ , okolo Siria A obíhá s periodou cca 50 let
- ▶ Málo hmotné hvězdy (od  $0,075$  do  $0,4 M_{\odot}$ ) skončí nejspíš jako tzv. *helioví trpaslíci*



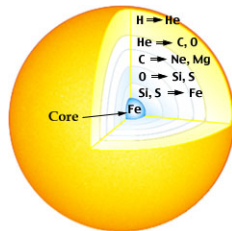
Porovnání obvyklé velikosti bílého trpaslíka a naší Země



Sirius B, zdroj: HST

## Závěrečné fáze vývoje hmotných hvězd

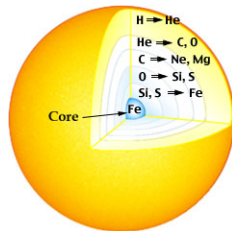
- ▶ U hvězd s počáteční hmotností vyšší než cca  $8 M_{\odot}$  může dojít k syntéze dalších prvků, zejména  
 $^{12}\text{C} \rightarrow ^{16}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O} \rightarrow ^{20}\text{Ne}$ ,  $^{20}\text{Ne} \rightarrow ^{24}\text{Mg}$ , až po  $^{32}\text{S}$
- ▶ Hvězdy s počáteční hmotností vyšší než cca  $11 M_{\odot}$  jsou „schopné“ projít kompletním jaderným vývojem, syntetizují *prvky skupiny železa*, např. Ni, Co, Fe



cibulová struktura vnitřní stavby hmotné hvězdy

## Závěrečné fáze vývoje hmotných hvězd

- ▶ U hvězd s počáteční hmotností vyšší než cca  $8 M_{\odot}$  může dojít k syntéze dalších prvků, zejména  
 $^{12}\text{C} \rightarrow ^{16}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O} \rightarrow ^{20}\text{Ne}$ ,  $^{20}\text{Ne} \rightarrow ^{24}\text{Mg}$ , až po  $^{32}\text{S}$
- ▶ Hvězdy s počáteční hmotností vyšší než cca  $11 M_{\odot}$  jsou „schopné“ projít kompletním jaderným vývojem, syntetizují *prvky skupiny železa*, např. Ni, Co, Fe
- ▶ Zde veškeré *exotermické jaderné reakce* končí, další termojaderná syntéza není možná

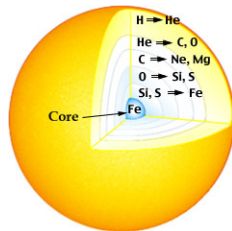


cibulová struktura vnitřní stavby hmotné hvězdy



## Závěrečné fáze vývoje hmotných hvězd

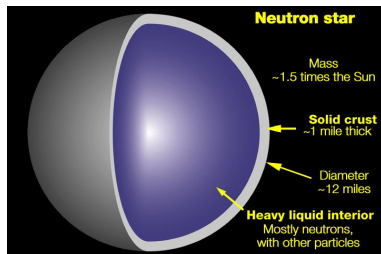
- ▶ U hvězd s počáteční hmotností vyšší než cca  $8 M_{\odot}$  může dojít k syntéze dalších prvků, zejména  
 $^{12}\text{C} \rightarrow ^{16}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O} \rightarrow ^{20}\text{Ne}$ ,  $^{20}\text{Ne} \rightarrow ^{24}\text{Mg}$ , až po  $^{32}\text{S}$
- ▶ Hvězdy s počáteční hmotností vyšší než cca  $11 M_{\odot}$  jsou „schopné“ projít kompletním jaderným vývojem, syntetizují *prvky skupiny železa*, např. Ni, Co, Fe
- ▶ Zde veškeré *exotermické jaderné reakce* končí, další termojaderná syntéza není možná
- ▶ Následuje další rychlé smršťování a zahřívání „železného“ jádra hvězdy
- ▶ Zároveň se v jádru hvězdy hromadí železný „popel“, dokud jeho hmotnost nepřekročí tzv. *Chandrasekharovu mez*,  $M_{\text{Ch}} \approx 1,44 M_{\odot}$



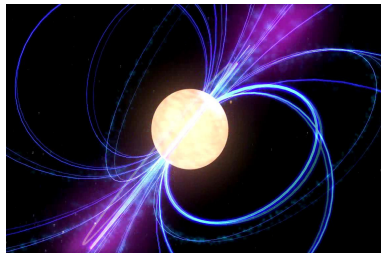
cibulová struktura vnitřní stavby hmotné hvězdy

## Závěrečné fáze vývoje hmotných hvězd

- ▶ Subrahmanyan Chandrasekhar (1910 - 1995) - americký fyzik indického původu, pomocí teorie relativity stanovil tento hmotnostní limit



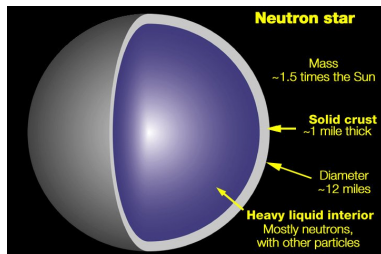
Struktura neutronové hvězdy



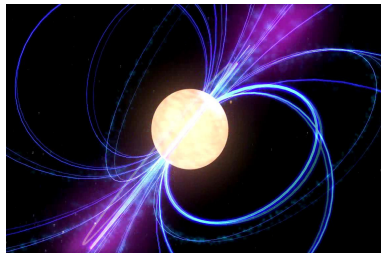
Pulsar

## Závěrečné fáze vývoje hmotných hvězd

- ▶ Subrahmanyan Chandrasekhar (1910 - 1995) - americký fyzik indického původu, pomocí teorie relativity stanovil tento hmotnostní limit
- ▶ Při jeho překročení se elektronově degenerované jádro začne gravitačně hroutit



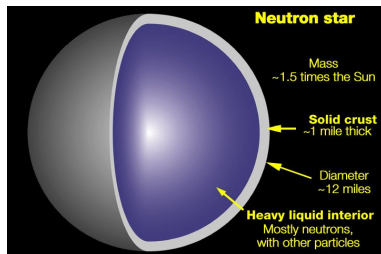
Struktura neutronové hvězdy



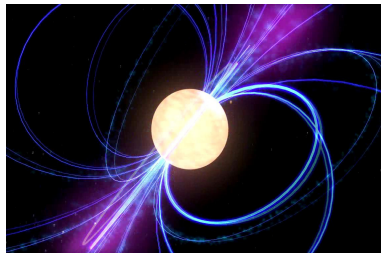
Pulsar

## Závěrečné fáze vývoje hmotných hvězd

- ▶ Subrahmanyan Chandrasekhar (1910 - 1995) - americký fyzik indického původu, pomocí teorie relativity stanovil tento hmotnostní limit
- ▶ Při jeho překročení se elektronově degenerované jádro začne gravitačně hroutit
- ▶ Hroucení se zastaví se vznikem extrémně husté, tzv. *neutronové* hvězdy ( $10^{17} - 10^{18} \text{ kg m}^{-3}$ )
- ▶ Ve výjimečných případech ( $M_{\text{init}} \gtrsim 50 M_{\odot}$ ) hvězda kolabuje „nade všechny meze“, vytvoří *černou díru*
- ▶ Rychlý gravitační kolaps hvězdy do stadia neutronové hvězdy, případně černé díry → *exploze supernovy*



Struktura neutronové hvězdy

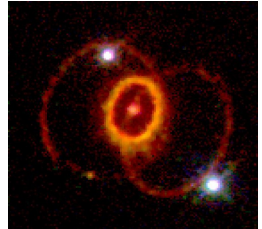


Pulsar

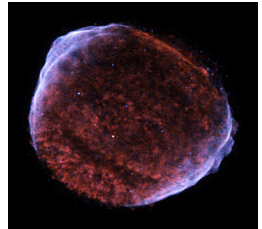
# Hlavní typy supernov

- Supernovy typu II :

- ▶ *Gravitačně kolabující* velmi hmotné hvězdy, pád vnějších vrstev rychlostí vyšší než  $10^4 \text{ km s}^{-1}$



Supernova typu II, SN 1987A,  
zdroj: D. Arnett

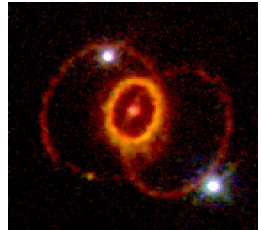


Supernova typu Ia, SN 1006,  
zdroj: HST

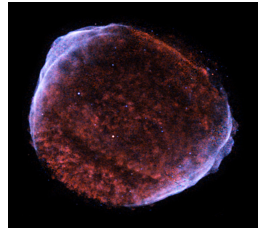
# Hlavní typy supernov

- Supernovy typu II :

- ▶ *Gravitačně kolabující* velmi hmotné hvězdy, pád vnějších vrstev rychlostí vyšší než  $10^4 \text{ km s}^{-1}$
- ▶ Mohutná odražená rázová vlna → počátek vlastní *exploze supernovy*, její ohromná energie zároveň “dotuje” syntézu jader těžších než železo



Supernova typu II, SN 1987A,  
zdroj: D. Arnett

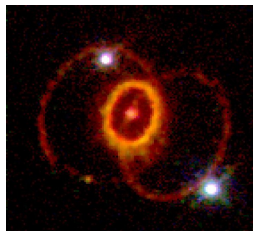


Supernova typu Ia, SN 1006,  
zdroj: HST

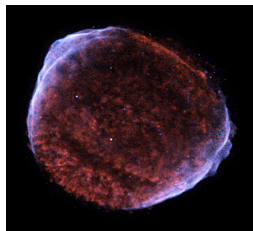
# Hlavní typy supernov

- Supernovy typu II :

- ▶ *Gravitačně kolabující* velmi hmotné hvězdy, pád vnějších vrstev rychlostí vyšší než  $10^4 \text{ km s}^{-1}$
- ▶ Mohutná odražená rázová vlna → počátek vlastní *exploze supernovy*, její ohromná energie zároveň “dotuje” syntézu jader těžších než železo
- ▶ Hlavním motorem exploze obrovská teplota ( $10^{11} \text{ K}$ ), *neutrinová „exploze“* →  $E_\nu = 10^{46} \text{ J}$ ,  $E_{\text{kin}} = 10^{44} \text{ J}$ ,  $E_{\text{rad}} = 10^{42}\text{-}10^{43} \text{ J}$ , *radioaktivní ohřev*



Supernova typu II, SN 1987A,  
zdroj: D. Arnett



Supernova typu Ia, SN 1006,  
zdroj: HST

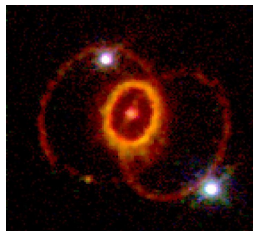
# Hlavní typy supernov

- Supernovy typu II :

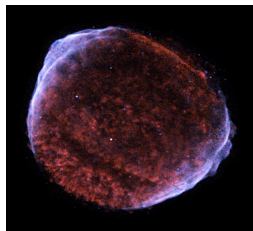
- ▶ *Gravitačně kolabující* velmi hmotné hvězdy, pád vnějších vrstev rychlostí vyšší než  $10^4 \text{ km s}^{-1}$
- ▶ Mohutná odražená rázová vlna → počátek vlastní *exploze supernovy*, její ohromná energie zároveň “dotuje” syntézu jader těžších než železo
- ▶ Hlavním motorem exploze obrovská teplota ( $10^{11} \text{ K}$ ), *neutrinová „exploze“* →  $E_\nu = 10^{46} \text{ J}$ ,  $E_{\text{kin}} = 10^{44} \text{ J}$ ,  $E_{\text{rad}} = 10^{42}\text{-}10^{43} \text{ J}$ , *radioaktivní ohřev*

- Supernovy typu Ia :

- ▶ Termonuleárně explodující C-O bílý trpaslík v podvojném systému
- ▶ Téměř totožné světelné křivky → *standardní svíčky*



Supernova typu II, SN 1987A,  
zdroj: D. Arnett



Supernova typu Ia, SN 1006,  
zdroj: HST



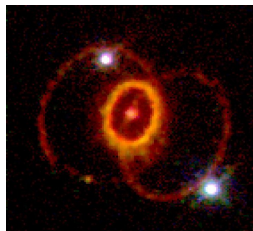
# Hlavní typy supernov

- Supernovy typu II :

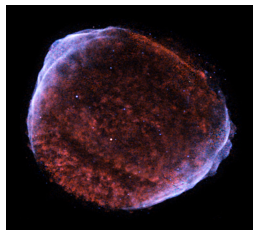
- ▶ *Gravitačně kolabující* velmi hmotné hvězdy, pád vnějších vrstev rychlostí vyšší než  $10^4 \text{ km s}^{-1}$
- ▶ Mohutná odražená rázová vlna → počátek vlastní *exploze supernovy*, její ohromná energie zároveň “dotuje” syntézu jader těžších než železo
- ▶ Hlavním motorem exploze obrovská teplota ( $10^{11} \text{ K}$ ), *neutrinová „exploze“* →  $E_\nu = 10^{46} \text{ J}$ ,  $E_{\text{kin}} = 10^{44} \text{ J}$ ,  $E_{\text{rad}} = 10^{42}\text{-}10^{43} \text{ J}$ , *radioaktivní ohřev*

- Supernovy typu Ia :

- ▶ Termonuleárně explodující C-O bílý trpaslík v podvojném systému
- ▶ Téměř totožné světelné křivky → *standardní svíčky*
- ▶ Nejvíce obohacují mezihvězdnou látku nejen o prvky skupiny železa, ale i o uhlík a kyslík



Supernova typu II, SN 1987A,  
zdroj: D. Arnett



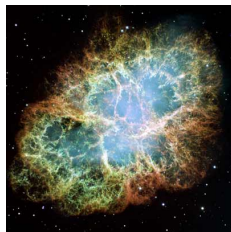
Supernova typu Ia, SN 1006,  
zdroj: HST

## Hlavní typy supernov

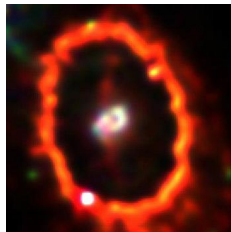
- Supernovy typu Ia :
  - ▶ Látka postupně přetéká z „normální“ hvězdy hlavní posloupnosti na bílého trpaslíka, vytváří mohutný *akreční disk*
  - ▶ Po překročení hmotnostní *Chandrasekharovy meze* u bílého trpaslíka dochází k explozi

## Zbytky po supernovách

- ▶ *Mlhovinné zbytky*, pozorovatelné několik tisíc let
- ▶ *Pulsary* → rychle rotující neutronové hvězdy, záření směřované magnetickým polem
- ▶ *Světelné echo* - pozorováno u SN 1987A, SN 1993J, SN 1998bu



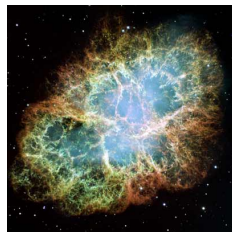
Krabí mlhovina, zdroj: HST



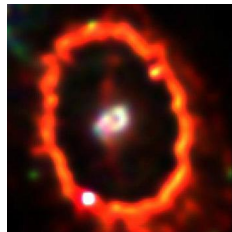
Světelné echo, zdroj: HST

## Zbytky po supernovách

- ▶ *Mlhovinné zbytky*, pozorovatelné několik tisíc let
- ▶ *Pulsary* → rychle rotující neutronové hvězdy, záření směřované magnetickým polem
- ▶ *Světelné echo* - pozorováno u SN 1987A, SN 1993J, SN 1998bu
- ▶ Chemický vývoj galaxií a vesmíru vůbec
- ▶ Impulz k tvorbě nových hvězd



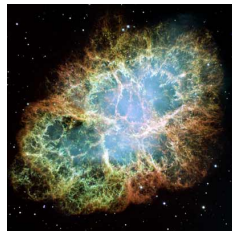
Krabí mlhovina, zdroj: HST



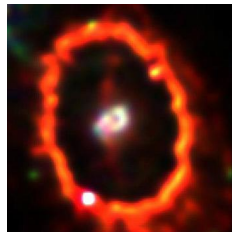
Světelné echo, zdroj: HST

## Zbytky po supernovách

- ▶ *Mlhovinné zbytky*, pozorovatelné několik tisíc let
- ▶ *Pulsary* → rychle rotující neutronové hvězdy, záření směřované magnetickým polem
- ▶ *Světelné echo* - pozorováno u SN 1987A, SN 1993J, SN 1998bu
- ▶ Chemický vývoj galaxií a vesmíru vůbec
- ▶ Impulz k tvorbě nových hvězd
- ▶ Záblesky gama záření (*kolapsary*?)
- ▶ *Geminga*



Krabí mlhovina, zdroj: HST



Světelné echo, zdroj: HST

***Děkuji za pozornost***