

ZE ŽIVOTA HVĚZD

Petr Kurfürst

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky - Masarykova univerzita

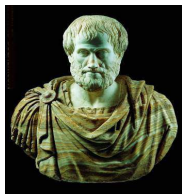
Brno, 13. ledna 2016

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)



Středověké vyobrazení nebeské sféry



Aristotelés

Schema huius praeiustae diuisionis Sphaerarum .



Ptolemaiovská soustava

Vývoj názorů na hvězdy

- ▶ I zastánci novověkého heliocentrického systému věřili na sféru stálic
- ▶ Tomu nasvědčovalo nadále neúspěšné měření tzv. *ročních parallax* 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 parallax* 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 parallax* 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



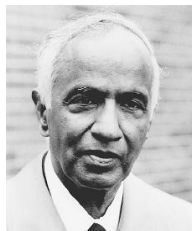
Friedrich Wilhelm Bessel

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



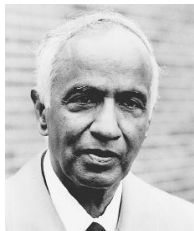
Subrahmanyan
Chandrasekhar

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*



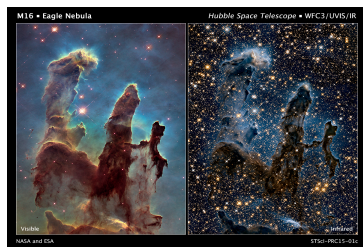
Arthur Stanley Eddington



Subrahmanyan
Chandrasekhar

Jak hvězdy vznikají?

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



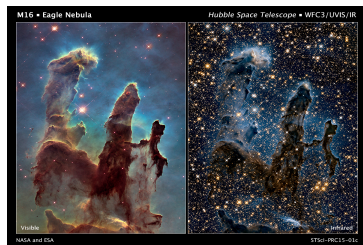
Oblaka „Sloupy stvoření“ v mlhovině M16



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

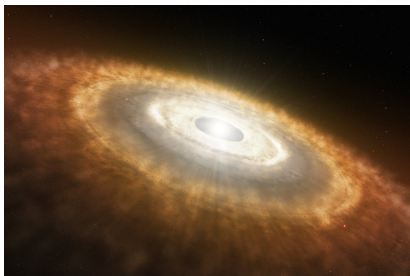


Oblaka ve spirálních ramenech „Vírové galaxie“

- ▶ *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?

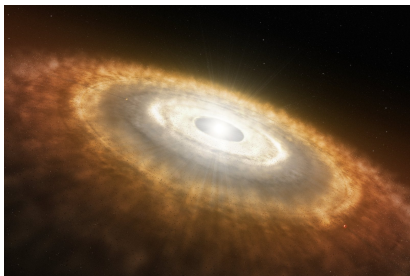
- ▶ V jisté fázi kolapsu oblaku začne teplota a tlak v centrální oblasti narůstat
- ▶ Okolo zárodku hvězdy se formuje *protostelární akreční disk*



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*

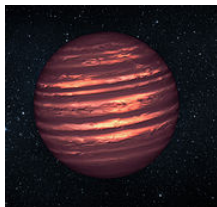


Předhvězdný (*protostelární + protoplanetární*) disk

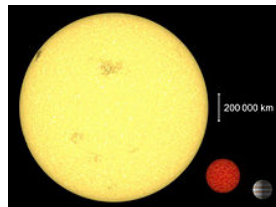
- ▶ Tento disk zajišťuje odtok přebytečného *momentu hybnosti*, tím umožňuje další nabalování látky na *protohvězdu*
- ▶ Samotný zárodek hvězdy je zahalen v husté *prachoplynové obálce*
- ▶ V chladnějších částech disku se mohou formovat zárodky *planet*

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



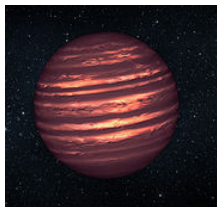
Vyobrazení hnědého trpaslíka



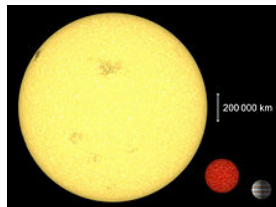
Porovnání rozměrů Slunce
s *hnědými trpaslíky* a planetami

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

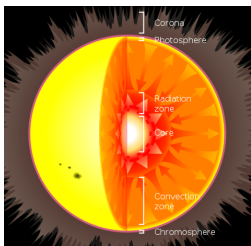
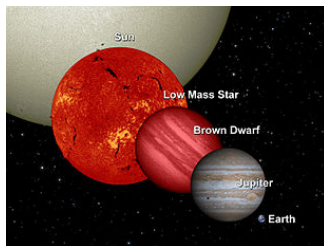


Schéma vnitřní stavby Slunce



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 nejdelší etapy „života“, čítající milióny až miliardy let, například naše Slunce se nachází zhruba uprostřed této fáze

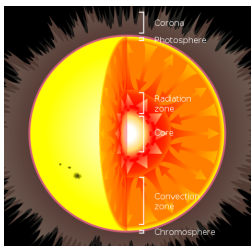
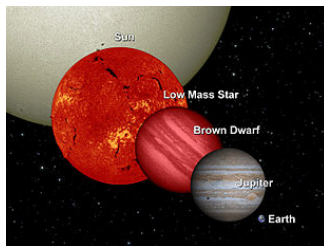


Schéma vnitřní stavby Slunce

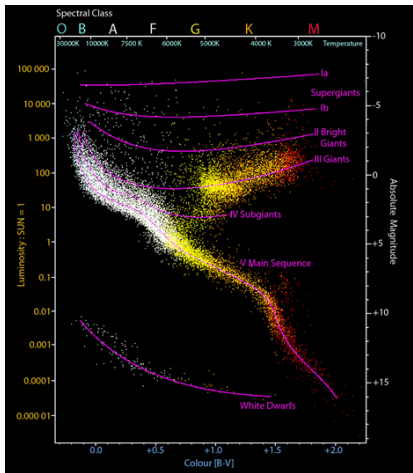


Porovnání rozměrů hvězd hlavní posloupnosti s
hnědými trpaslíky a planetami

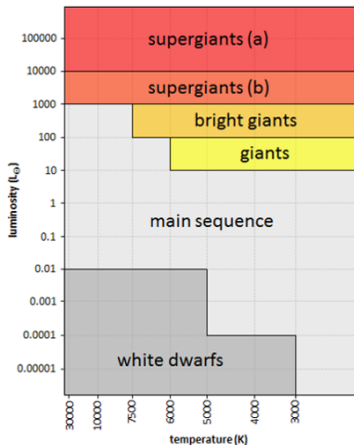
- ▶ Rozměry v rozmezí od zhruba 0,1 do několika desítek průměrů Slunce
- ▶ Povrchové (*efektivní*) teploty v rozmezí od 2 500 do několika desítek tisíc kelvinů, povrchová teplota a zářivý výkon rostou s hmotností

Hertzsprungův-Russellův (případně tzv. barevný) diagram

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



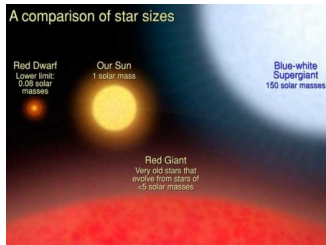
Barevný diagram hlavních posloupností



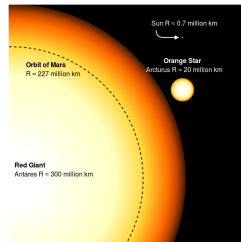
Schématický popis

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 rozpne
- ▶ Žářivý výkon hvězdy vzroste až tisíckrát při povrchové efektivní teplotě zhruba 3 000 kelvinů



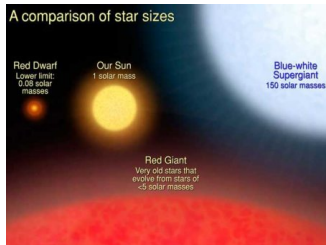
Porovnání rozměrů hvězd *hlavní posloupnosti* s *červenými obry* a *veleobry*



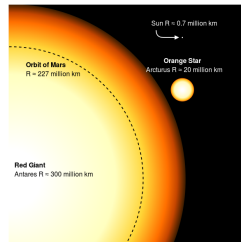
Jiné srovnání poloměrů *červených* a *oranžových obrů* s naším Sluncem

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
- ▶ Žářivý výkon hvězdy vzroste až tisíckrát při povrchové efektivní teplotě zhruba 3 000 kelvinů



Porovnání rozměrů hvězd hlavní posloupnosti s červenými obry a veleobry

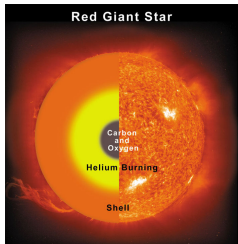


Jiné srovnání poloměrů červených a oranžových obrů s naším Sluncem

- ▶ 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*



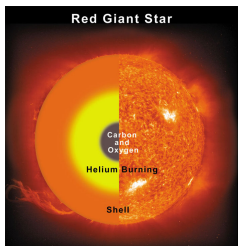
Vnitřní struktura hvězdy *asymptotické větve obrů*



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*

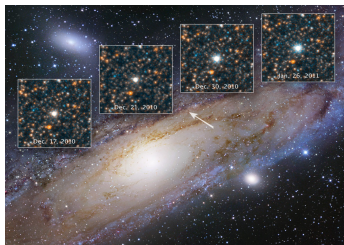


Planetární mlhovina *Kočičí oko* s obnaženým *bílým trpaslíkem* v centru

- ▶ 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*,
 $M_V(\text{mag}) = 2,80 \log P(d) - 1,43$
- ▶ Pomocí cefeid v roce 1923 prokázána vzdálenost galaxie M31 (Edwin Hubble) - určování vzdáleností až do desítek *megaparseků*



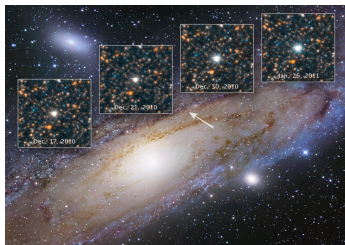
Cefeida V1 v galaxii M31, zdroj: NASA



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*,
 $M_V(\text{mag}) = 2,80 \log P(d) - 1,43$
- ▶ Pomocí cefeid v roce 1923 prokázána vzdálenost galaxie M31 (Edwin Hubble) - určování vzdáleností až do desítek *megaparseků*



Cefeida V1 v galaxii M31, zdroj: NASA

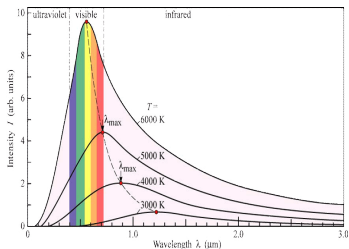


Supernova 1994D v galaxii NGC 4526,
zdroj: HST

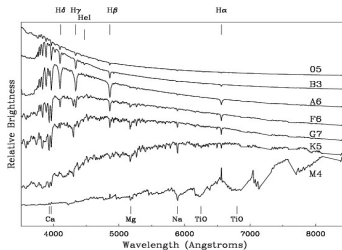
- ▶ Supernovy typu Ia - standardní *absolutní hvězdná velikost*
 $M_V(\text{mag}) \approx 19,3 \pm 0,3$, kosmologické vzdálenosti
- ▶ *Červený posuv a Hubbleův zákon*

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



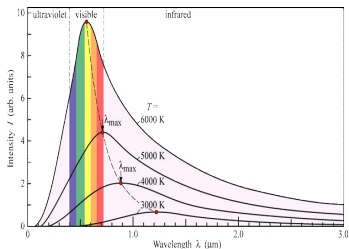
Spojité spektrum - Planckův zákon



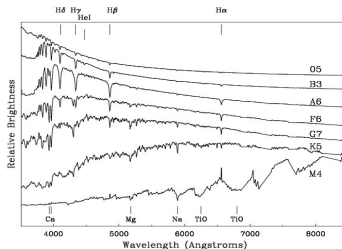
Čárová spektra pro různé teploty

Jak určujeme vzdálenosti, hmotnosti a teploty hvězd ?

- ▶ *Hmotnosti hvězd ve dvojhvězdách* (vícenásobných systémech) lze odvodit z oběžné periody pomocí 3. Keplerova zákona, $\sum M_{\star} \sim a^3 / P^2$
- ▶ 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

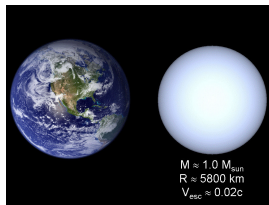


Čárová spektra pro různé teploty

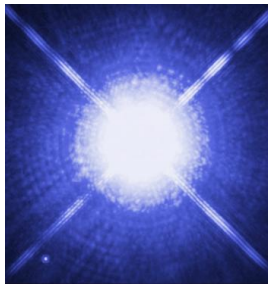
- ▶ Hvězdná *spojitá* i *čárová* spektra dávají informaci o teplotě
- ▶ Rozložení *spektrálních čar* jednotlivých prvků vytváří charakteristický „otisk“ typický pro různé teploty

Závěrečné fáze vývoje hvězd

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



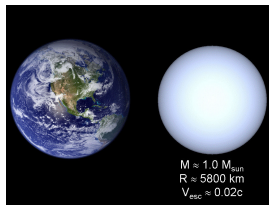
Porovnání obvyklé velikosti bílého trpaslíka a naší Země



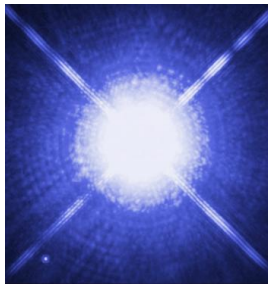
Sirius B, zdroj: HST

Závěrečné fáze vývoje hvězd

- ▶ Velká část hvězd končí tedy jako *bílý trpaslík* - obnažené *elektronově degenerované* jádro s hustotou až 10^9 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



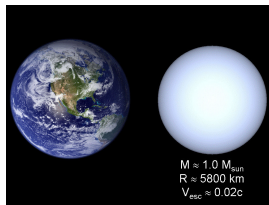
Porovnání obvyklé velikosti bílého trpaslíka a naší Země



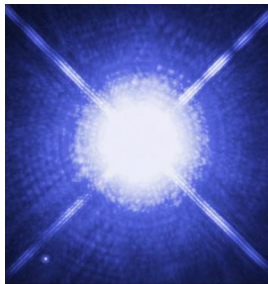
Sirius B, zdroj: HST

Závěrečné fáze vývoje hvězd

- ▶ Velká část hvězd končí tedy jako *bílý trpaslík* - obnažené *elektronově degenerované* jádro s hustotou až 10^9 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



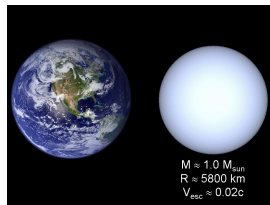
Porovnání obvyklé velikosti bílého trpaslíka a naší Země



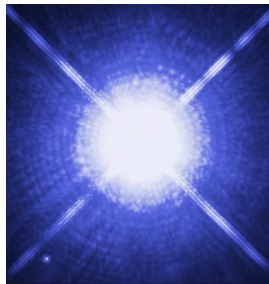
Sirius B, zdroj: HST

Závěrečné fáze vývoje hvězd

- ▶ Velká část hvězd končí tedy jako *bílý trpaslík* - obnažené *elektronově degenerované* jádro s hustotou až 10^9 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*



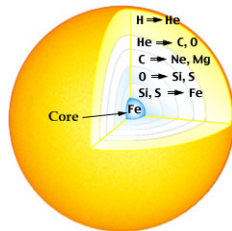
Porovnání obvyklé velikosti bílého trpaslíka a naší Země



Sirius B, zdroj: HST

Závěrečné fáze vývoje hmotných hvězd

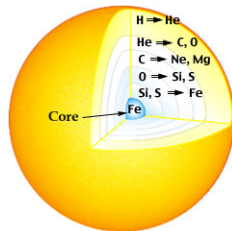
- ▶ U hvězd s počáteční hmotností vyšší než cca $8 M_{\odot}$ může dojít k syntéze dalších prvků, zejména
 $^{12}\text{C} \rightarrow ^{16}\text{O}, ^{16}\text{O} \rightarrow ^{20}\text{Ne}, ^{20}\text{Ne} \rightarrow ^{24}\text{Mg}$, až po ^{32}S
- ▶ Hvězdy s počáteční hmotností vyšší než cca $11 M_{\odot}$ 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

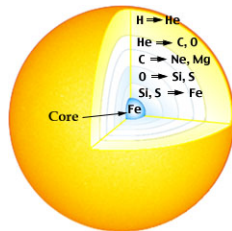
- ▶ U hvězd s počáteční hmotností vyšší než cca $8 M_{\odot}$ může dojít k syntéze dalších prvků, zejména
 $^{12}\text{C} \rightarrow ^{16}\text{O}$, $^{16}\text{O} \rightarrow ^{20}\text{Ne}$, $^{20}\text{Ne} \rightarrow ^{24}\text{Mg}$, až po ^{32}S
- ▶ Hvězdy s počáteční hmotností vyšší než cca $11 M_{\odot}$ 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

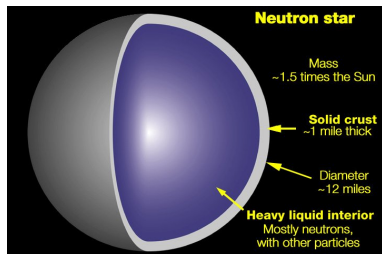
- ▶ U hvězd s počáteční hmotností vyšší než cca $8 M_{\odot}$ může dojít k syntéze dalších prvků, zejména
 $^{12}\text{C} \rightarrow ^{16}\text{O}$, $^{16}\text{O} \rightarrow ^{20}\text{Ne}$, $^{20}\text{Ne} \rightarrow ^{24}\text{Mg}$, až po ^{32}S
- ▶ Hvězdy s počáteční hmotností vyšší než cca $11 M_{\odot}$ 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*, $M_{\text{Ch}} \approx 1,44 M_{\odot}$



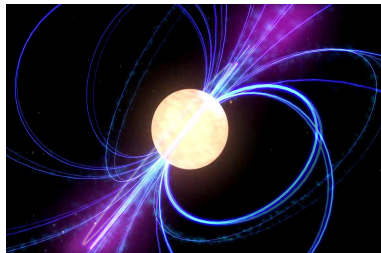
cibulová struktura vnitřní stavby hmotné hvězdy

Závěrečné fáze vývoje hmotných hvězd

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



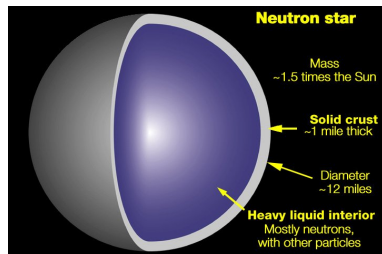
Struktura neutronové hvězdy



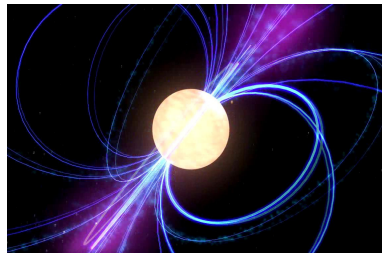
Pulsar

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



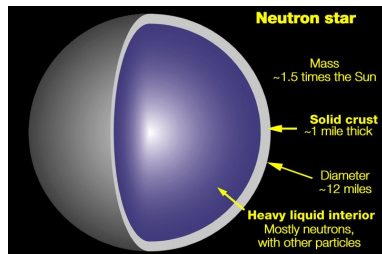
Struktura neutronové hvězdy



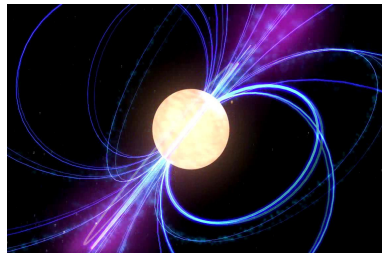
Pulsar

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

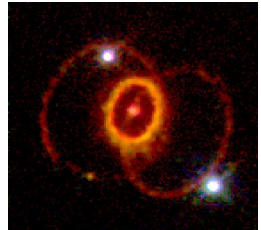


Pulsar

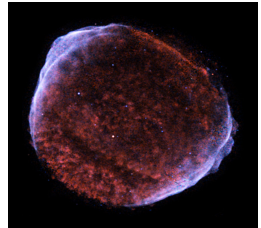
Hlavní typy supernov

- Supernovy typu II :

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



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

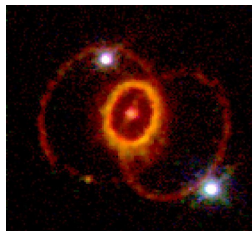


Supernova typu Ia, SN 1006,
zdroj: HST

Hlavní typy supernov

- Supernovy typu II :

- ▶ *Gravitačně kolabující* velmi hmotné hvězdy, pád vnějších vrstev rychlostí vyšší než 10^4 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

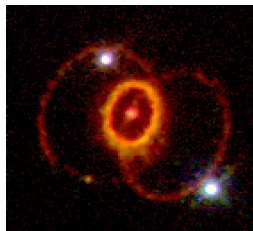


Supernova typu Ia, SN 1006,
zdroj: HST

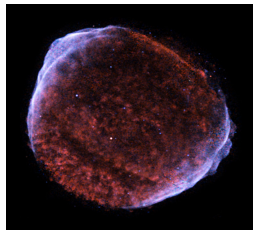
Hlavní typy supernov

- Supernovy typu II :

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



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



Supernova typu Ia, SN 1006,
zdroj: HST

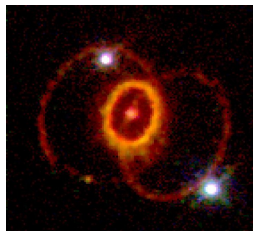
Hlavní typy supernov

- Supernovy typu II :

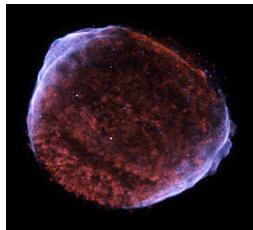
- ▶ *Gravitačně kolabující* velmi hmotné hvězdy, pád vnějších vrstev rychlostí vyšší než 10^4 km s^{-1}
- ▶ Mohutná odražená rázová vlna → počátek vlastní *exploze supernovy*, její ohromná energie zároveň “dotuje” syntézu jader těžších než železo
- ▶ Hlavním motorem exploze obrovská teplota (10^{11} 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 :

- ▶ Termonukleárně 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

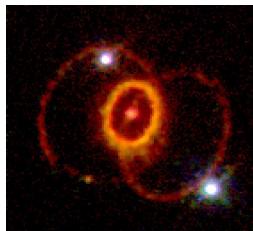
Hlavní typy supernov

• Supernovy typu II :

- ▶ *Gravitačně kolabující* velmi hmotné hvězdy, pád vnějších vrstev rychlostí vyšší než 10^4 km s^{-1}
- ▶ Mohutná odražená rázová vlna → počátek vlastní *exploze supernovy*, její ohromná energie zároveň “dotuže” syntézu jader těžších než železo
- ▶ Hlavním motorem exploze obrovská teplota (10^{11} 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 :

- ▶ Termonukleárně 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

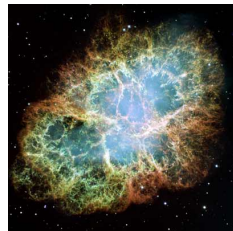
Animace exploze SNIa, zdroj: NASA

Video otevřete kliknutím na následující odkaz:

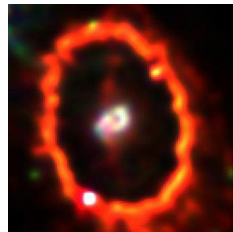
[oneA.mp4](#)

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



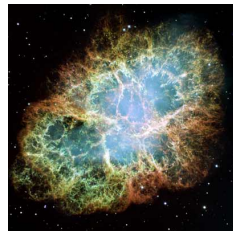
Krabí mlhovina, zdroj: HST



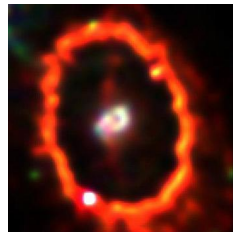
Světelné echo, zdroj: HST

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



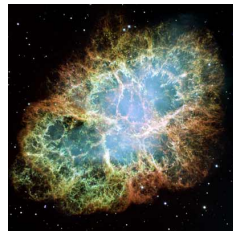
Krabí mlhovina, zdroj: HST



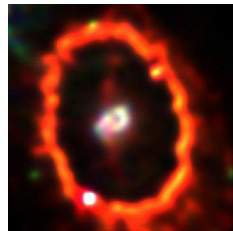
Světelné echo, zdroj: HST

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