



základy astronomie a astrofyziky

STAVBA A VÝVOJ HVĚZD,
ZÁVĚREČNÁ STADIA HVĚZDNÉHO
VÝVOJE

vznik hvězd

obří molekulové oblaky

- ▶ hvězdy v současnosti vznikají nejčastěji ve skupinách z náhodného zhuštění v oblaku relativně chladné a husté mezihvězdné látky, uvnitř tzv. *obřích molekulových mračen*
- ▶ gravitačně vázané objekty složené z plynu a prachu o hmotnostech od 10^5 do $10^6 M_{\odot}$, o rozměru cca 50 pc, obsahují přes 50 % mezihvězdné látky v galaxiích, jsou útvary s životní dobou řádově 10^8 let
- ▶ jsou tvořeny molekulárním a neutrálním H, He a dalšími prvky, spojenými občas i do dosti složitých molekul, další složkou molekulových mračen jsou zrníčka mezihvězdného prachu, která hrají důležitou roli v energetice mračen tím, že stíní vnitřní části oblaku a přebytečné teplo dokáží účinně vyzářit do prostoru, čímž celý oblak dlouhodobě udržují na velmi nízké teplotě několika K
- ▶ tempo vznikání hvězd je obecně velmi nerovnoměrné, setkáváme se s údobími, kdy vznik hvězd na dlouho téměř ustává a naopak

Jeansovo kritérium

- ▶ řada skutečností vznikání nových hvězd brání.
- ▶ vznikne-li fluktuace hustoty, pak se tato část oblaku začne v důsledku vlastní gravitace hroutit
- ▶ proti působí neuspořádaný tepelný pohyb molekul, který má tendenci vzniklou fluktuaci opět vyhladit
- ▶ náhodně vzešlá fluktuace se nerozplyne, pokud je splněno tzv. *Jeansovo kritérium*, hmotnost zhustku M musí překročit jistou kritickou hmotnost M_J

$$M_J = \sqrt{\frac{3}{4\pi\rho} \left(\frac{5kT}{G\mu m_H} \right)^3}$$

Jeansovo kritérium

- ▶ hvězdy mohou vznikat jen v těch částech molekulových mračen, kde je co nejnižší teplota a co nejvyšší hustota látky
- ▶ pro vznik zárodků budoucích hvězd podmínky v molekulových oblacích nejpříznivější, samy o sobě ještě nestačí
- ▶ k žádoucímu zahuštění může posloužit třeba:
 - ▶ setkání molekulového oblaku s expandující oblastí velmi horkého a řídkého ionizovaného vodíku (oblasti H II)
 - ▶ vzplanutí blízké supernovy
 - ▶ průchod oblaku hustotní vlnou ve spirální galaxii – srážka oblaku se stacionární rázovou vlnou spojenou se spirální strukturou galaxie
 - ▶ nepružná srážka dvou galaxií, k nimž nezřídka dochází zejména v galaktických kupách

Jeansovo kritérium

- ▶ zhustek se v průběhu kontrakce začne drobit na menší části, které pak dávají vznik zárodkům jednotlivých hvězd, tzv. *protohvězdám*
- ▶ překážku vývoje představuje zákon zachování momentu hybnosti: osamostatní-li se nějaký zárodek hvězdy a začne se hroutit, začne se současně roztáčet, pokud odstředivé zrychlení vyvolané rotací někde v zárodku hvězdy přesáhne hodnotu gravitačního zrychlení, kontrakce se zde zastaví
- ▶ nastupují procesy, jimiž se zárodek hvězdy přebytečného momentu dostatečně účinně zbavuje
 - ▶ vytvořením rozsáhlého plochého, tzv. *akrečního disku* o poloměru stovek astronomických jednotek, který na sebe naváže nadbytečnou část momentu hybnosti
- ▶ protohvězda je relativně samostatné předhvězdné těleso, v níž nejdůležitější roli hraje vlastní gravitace nutící protohvězdu ke kontrakci
- ▶ v průběhu etapy gravitačního hroucení protohvězdy lze vysledovat dvě fáze: počáteční rychlou, po níž následuje pomalejší smršťování

rychlá fáze hvězdné kontrakce

- ▶ jedná se o víceméně volný pád částic do centra tíže, lze ukázat, že celková doba zhroucení kulového oblaku o hustotě ρ do bodu t_{ff} volným pádem, pokud by se síle gravitační nepostavila žádná síla odstředivá, je dána vztahem:

$$t_{ff} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}}$$

- ▶ Slunce by se volným pádem zhroutilo do bodu asi za 30 minut, pro oblak s typickou koncentrací 10^4 molekul H v cm^3 ($3,3 \cdot 10^{-17} \text{ kg m}^{-3}$) dostáváme charakteristický čas 350 000 let

pomalá fáze hvězdné kontrakce

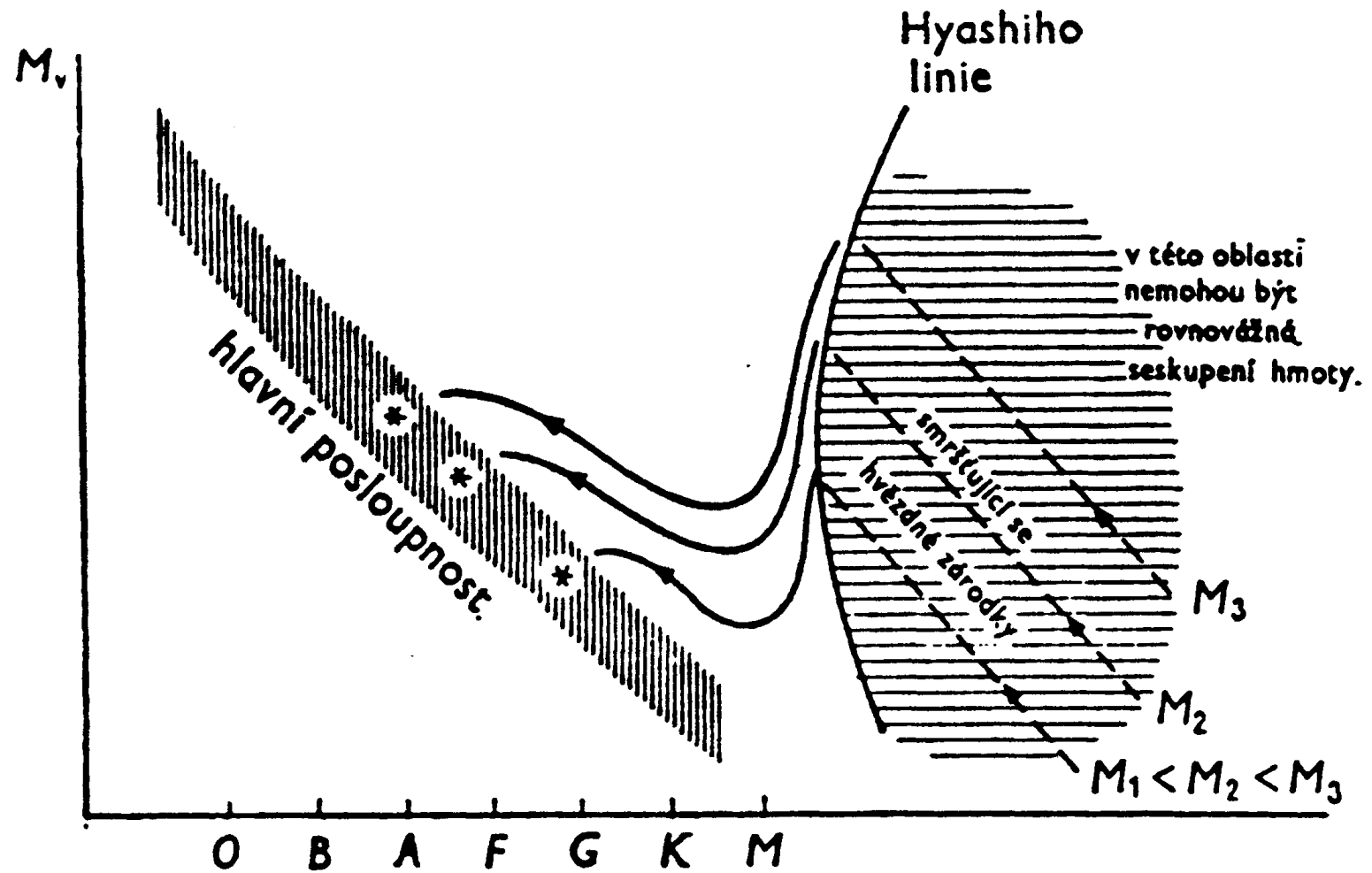
- ▶ v centrální části hvězdy v důsledku rychlého kolapsu rychle vzrůstá hustota, teplota a tedy i tlak materiálu, roste i gradient tlaku až do ustavení *hydrostatické rovnováhy*
- ▶ hvězda na počátku této *pomalé fáze kontrakce* je objektem v rovnovážném stavu drženým pohromadě vlastní gravitací
- ▶ jde o vázaný systém tvořený částicemi ovlivňujícími se navzájem především gravitací a lze na něj aplikovat větu o viriálu:

- ▶ $2 \langle E_k \rangle + \langle E_p \rangle = 0,$

- ▶ kde $\langle E_k \rangle$ je střední hodnota celkové vnitřní energie tělesa, převážně pak kinetické energie neuspořádaného tepelného pohybu, a $\langle E_p \rangle$ střední hodnota potenciální energie
- ▶ na počátku vývoje byl zárodek hvězdy velice rozlehlý a chladný, lze považovat jeho celkovou kinetickou a potenciální energii za nulovou
- ▶ v průběhu kolapsu pak nutně klesá potenciální energie a roste vnitřní – kinetická energie
- ▶ část energie se ale dostává do prostoru v podobě záření; celková vyzářená energie nechť je E_{rad} .

pomalá fáze hvězdné kontrakce

- ▶ ze zákona zachování energie:
- ▶ $\langle E_k \rangle + \langle E_p \rangle + E_{rad} = 0$.
- ▶ Kombinací této rovnosti s větou o viriálu dostaneme další zajímavé vztahy:
- ▶ $E_{rad} = \langle E_k \rangle = -\langle E_p \rangle / 2$,
- ▶ čili, že smršťováním uvolněná potenciální energie se rovným dílem rozděljuje na vyzářenou energii a celkovou vnitřní energii, zárodek hvězdy se musí ohřívat a zářit
- ▶ tempo smršťování a ohřívání bude diktováno rychlostí úniku energie, tedy zářivým výkonem hvězdy
- ▶ geometrické místo bodů na H-R diagramu, od nichž napravo jsou hroutící se hvězdy v kompletní konvektivní rovnováze, je tzv. *Hayashiho linie*
- ▶ vývoj hvězdy je diktován skutečností, že hvězda září do prostoru, ztráta energie vyzařováním se z větší části hradí z potenciální energie – hvězda se smršťuje, je využita pouze polovina uvolněné energie a zbytek se použije k „navýšení“ vnitřní energie hvězdy
- ▶ hvězda je tak únikem tepla z povrchu paradoxně zahřívána



jaderný vývoj hvězd

Zapálení termonukleárních reakcí

- ▶ v rané fázi vývoje vstupují do hry termonukleární reakce jako velmi vydatný alternativní zdroj energie
- ▶ termonukleární reakce probíhají nejúčinněji v centru smršťující se hvězdy, v místech, kde je největší hustota a teplota
- ▶ během smršťování se nejprve zapalují termonukleární reakce, při nichž se mění lehčí prvky, jako lithium, bór a deuterium, na helium
- ▶ vzhledem k malému obsahu zmíněných prvků i nižší energetické vydatnosti reakcí, představuje energetický výkon zmíněných reakcí vždy poměrně malý přínos k celkové energetické bilanci hvězdy a projeví se tím, že během hoření lehčích prvků tempo smršťování poněkud poleví
- ▶ po spotřebování prvků s relativně nízkou „zápalnou teplotou“ pokračuje smršťování jako předtím

jaderný vývoj hvězd

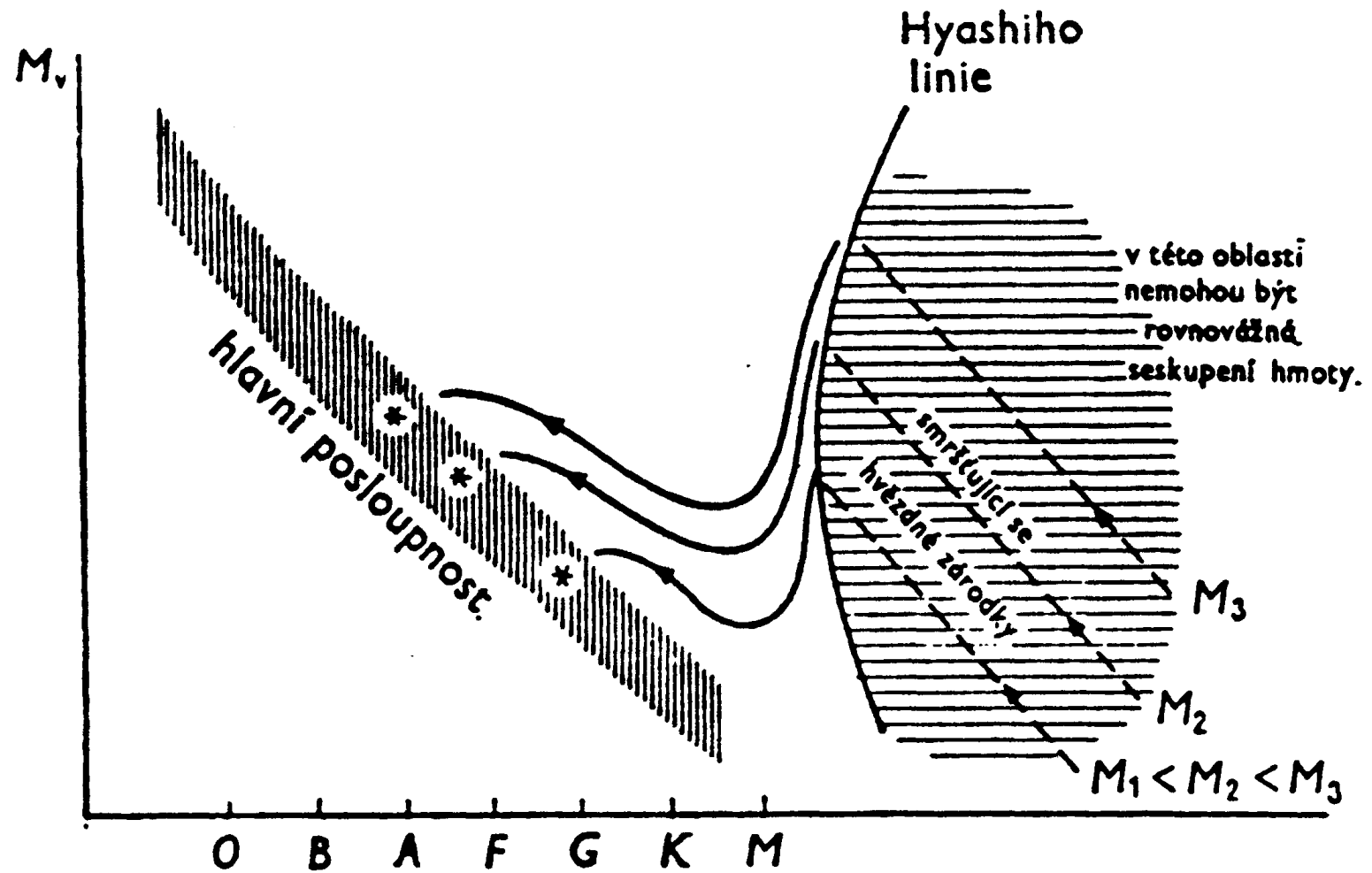
- ▶ pokud se v centru vytvoří teplota alespoň 8 milionů K, začnou ve hvězdě dostatečně rychle probíhat vodíkové reakce
- ▶ část zářivého výkonu hvězdy se totiž hradí z výkonu uvolněného vodíkovými reakcemi
- ▶ proces postupného smršťování se nyní postupně zvolňuje, nicméně teplota a hustota v centrálních oblastech hvězdy stále rostou
- ▶ zvyšuje se tempo vodíkových reakcí, a tím i jejich energetický přínos, v okamžiku, kdy je schopen výkon pocházející z termionukleárních reakcí **plně** hradit veškeré energetické ztráty hvězdy způsobené vyzařováním, se smršťování hvězdy zastaví
- ▶ uvolňování energie jadernými procesy je velmi účinné, hvězda přechází do kvazistabilního stavu, vývoj hvězdy se nyní odehrává v tzv. *nukleární časové škále*, která se počítá na miliardy let
- ▶ hvězda vstupuje do nejdelší etapy svého života – stává se *hvězdou hlavní posloupnosti*

jaderný vývoj hvězd

- ▶ výjimkou jsou objekty o hmotnosti menší než $0,075 M_{\odot}$
- ▶ v průběhu pomalé fáze smršťování v nich totiž naroste hustota natolik, že se v centrálních oblastech hvězdy objeví elektronová degenerace
- ▶ ta celou kontrakci zmrazí, teplota 8 milionů K nedosáhne, H se nezapálí
- ▶ objektům, jež stojí na pomezí mezi velkými planetami a hvězdami, říkáme *hnědí trpaslíci*.
- ▶ Hnědí trpaslíci po svém neúspěšném pokusu o zapálení vodíkových reakcí končí aktivní část svého vývoje a mění se v elektronově degenerované objekty složené převážně z vodíku. Vzhledem k tomu, že tlak v elektronově degenerovaných objektech prakticky nezávisí na teplotě, jejich poloměr se v průběhu času mění jen nepatrně. Hnědý trpaslík však má nenulovou povrchovou teplotu a nutně dále ztrácí svou energii vyzařováním. Tentokrát se tak děje výhradně na účet vnitřní energie hvězdy, potenciální energie se již nemění. Hvězda chladne, její vnitřní i povrchová teplota klesá. Tím ovšem klesá i zářivý výkon hvězdy, která se mění stále pomaleji. Hnědý trpaslík se pozvolna stává nezářícím *černým trpaslíkem*.

hvězdy hlavní posloupnosti – hoření vodíku v centru

- ▶ hvězdami hlavní posloupnosti (Main Sequence – MS) jsou ty hvězdy, jejichž zářivý výkon je takřka plně hrazen z energie, která se v jejich centrálních částech uvolňuje termionukleární přeměnou vodíku na helium. Ve stadiu hvězdy hlavní posloupnosti hvězdy stráví 80–90% svého aktivního života
- ▶ hvězdy do etapy hvězd hlavní posloupnosti vstupují jako důkladně promíchané, chemicky víceméně stejnorodé objekty
- ▶ množina všech bodů na H-R diagramu, které obsadí chemicky homogenní hvězdy standardního chemického složení (70% H, 28% He), je tzv. *hlavní posloupnost nulového stáří* (Zero Age Main Sequence – ZAMS)
- ▶ poloha na ZAMS je jednoznačně dána hmotností hvězdy



hvězdy hlavní posloupnosti – hoření vodíku v centru

- ▶ závislost hmotnost–zářivý výkon (zhruba $L \sim M^{3,5}$) je výsledkem vlastností vnitřní stavby hvězd, kdy teplejší hvězdy s větší hmotností jsou od okolí hůře izolovány než hvězdy méně hmotné
- ▶ potřebný výkon se ve hvězdě snadno zajistí vhodnou centrální teplotou
- ▶ hvězdy hmotnější musejí proto mít v centru vyšší teplotu, než hvězdy méně hmotné.
- ▶ Mimořádná stabilita hvězd na hlavní posloupnosti je dána faktem, že se zde jaderně mění nejvýhřevnější známé nukleární palivo – H, který je současně nejběžnějším prvkem ve hvězdách. Během fáze, kdy je objekt hvězdou hlavní posloupnosti, se jeho charakteristiky mění jen málo. Hvězda si podržuje svůj výkon, což je přirozený důsledek faktu, že tento výkon je dán izolačními vlastnostmi obalu hvězdy, který se v průběhu jaderného hoření v centru prakticky nemění. Díky tomu lze vcelku spolehlivě odhadnout celkovou dobu, kterou hvězda na hlavní posloupnosti stráví.

hvězdy hlavní posloupnosti – hoření vodíku v centru

- ▶ nehmotnější hvězdy stráví na hlavní posloupnosti řádově miliony let, nejméně hmotné pak stovky miliard let
- ▶ vesmír zřejmě není starší než 15 miliard let, ani ty nejstarší hvězdy ve vesmíru o hmotnosti menší než $0,85 M_{\odot}$ nestačily opustit hlavní posloupnost
- ▶ jejich vývoj po opuštění hlavní posloupnosti nelze tudíž ověřit pozorováním
- ▶ největší část svých zásob vodíku dokáží během stádia hvězdy na hlavní posloupnosti spořádat hmotné hvězdy

hvězdy hlavní posloupnosti – hoření vodíku v centru

- ▶ Ve hvězdách o hmotnosti menší než $2 M_{\odot}$ je energeticky nejvýznamnější tzv. *protonově-protonový řetězec*. Jaderné reakce hoří v blízkosti centra, přenos energie se děje zářivou difuzí, vyhořelý materiál se tu tudíž nepromíchává. Nejrychleji probíhají jaderné reakce v samotném centru, protože tam je největší teplota i hustota; směrem od centra se tempo jaderných reakcí zvolňuje. Největší odchylku od standardního chemického složení proto lze očekávat právě v centru, směrem k povrchu bude chemické složení monotónně přecházet ve složení standardní.
- ▶ Poněkud jiné poměry jsou ve hvězdách hmotnějších, kde se energeticky nejúčinnější jeví teplotně enormně citlivý *CNO cyklus*. Díky této precitlivělosti dochází ke spalování vodíku dostatečně rychle jen v nepatrném ohnisku v samotném centru. Zdroj energie je zde takřka bodový a zářivá difúze není schopna veškerou energii přenášet. Nastupuje tedy konvekce, která nejen že odvádí teplo z této přehřáté oblasti, ale slouží též jako účinný mechanismus dopravující do místa jaderného hoření stále čerstvý jaderný materiál.

hvězdy hlavní posloupnosti – hoření vodíku v centru

- ▶ I během vývoje hvězd hlavní posloupnosti dochází k závažným změnám ve vnitřní stavbě hvězdy, které se pak odrazí i v jistém pozvolném vývoji pozorovatelných charakteristik hvězd. Rozhodující příčinou vývoje je změna chemického složení hvězdy v oblasti jaderného hoření (u hmotných hvězd v oblasti konvektivního jádra).
- ▶ V centrálních oblastech hvězd se postupně hromadí popel vodíkových jaderných reakcí – He. Tato oblast je oddělena od povrchových vrstev hvězdy statickou zónou, kde se energie přenáší výhradně zářivou difuzí, k místům jaderného hoření se nemůže dostat čerstvý hvězdný materiál bohatý na vodík, třebaže je ho ve hvězdě dostatek.

hvězdy hlavní posloupnosti – hoření vodíku v centru

- ▶ V jádru se postupně zásoba vodíku vyčerpává. Dalo by se tak očekávat, že s postupem času bude jaderný výkon centra klesat. Opak je však pravdou. Souvisí to se skutečností, že při H reakcích klesá počet částic na 1 kg látky. Pokud by se udržovala na stejné teplotě a hustotě, pak by v ní klesal tlak, což by ovšem nutně muselo vést k narušení stavu mechanické rovnováhy. Ve skutečnosti je však tato rovnováha ve hvězdě neustále úzkostlivě udržována, což znamená, že hvězda uvnitř přestavuje – centrální části hvězdy se pozvolna hroutí, zahušťují, jejich konfigurační energie klesá.
- ▶ Při tomto pozvolném procesu se uvolňuje energie, která z části odchází z hvězdy, zčásti v ní však zůstává a způsobuje, že se vnitřek hvězdy pomalu dále nahřívá. Zvyšující se teplota je pak příčinou toho, že v centru tempo jaderných reakcí i jejich energetická vydatnost rostou, výkon jádra roste.

hvězdy hlavní posloupnosti – hoření vodíku v centru

- ▶ Na počátku stadia hvězdy hlavní posloupnosti bylo jen obtížné najít hranici mezi vnějším obalem hvězdy a jejím jádrem. S tím však, jak se jádro se zvyšujícím se podílem helia hroutí a zahušťuje, je však tento rozdíl stále patrnější. Pozorujeme zde i jistý skok, a to nejen v chemickém složení, ale i v hustotě. Jádro se v průběhu vývoje pozvolna osamostatňuje a začíná určovat i to, jak vyhlíží zbytek hvězdy.
- ▶ Monotónně rostoucí tok energie uvolňované v jádru hvězdy vede jak ke zvyšování jejího výkonu hvězdy, tak slouží k nárůstu potenciální energie obalu. Vnější vrstvy hvězdy expandují, hvězda se rozpíná, její poloměr i povrch se zvětšují. Dochází též k jisté pozvolné změně efektivní teploty hvězdy – u hvězd hmotnějších než $2 M_{\odot}$ teplota v průběhu času mírně klesá, u hvězd s hmotností sluneční a menší naopak po celou dobu stadia hvězdy hlavní posloupnosti mírně roste.

k větvi obrů – hoření vodíku ve slupce

- ▶ Jakmile se v centrálních částech hvězd hlavní posloupnosti vyčerpá zhruba 95 % zásob vodíku, nebude již s to výkon termonukleárního reaktoru zajistit celý výkon vyzařovaný hvězdou. V centru se okamžitě nasazuje přídatný zdroj energie – hvězda se zde začne rychle smršťovat. Centrální části hvězdy se rychle zahušťují, teplota zde roste.
- ▶ Rozměry takřka vyhořelého jádra se zmenšují, jádro za sebou strhává i ty oblasti hvězdy, které dosud nebyly jaderně aktivní, a vtahuje je do míst s výrazně vyšší teplotou. V přilehlých oblastech s vysokým obsahem vodíku se vzápětí zapalují vodíkové reakce probíhající zde v poměrně mocné vrstvě, které se záhy stanou dominantním zdrojem jaderné energie ve hvězdě. V jádru i nadále dobíhají vodíkové reakce, které po sobě záhy zůstaví prakticky čistě heliové jádro.

k větvi obrů

– hoření vodíku ve slupce

- ▶ Výkon uvolňovaný prostřednictvím termojaderných reakcí probíhajících ve slupce vrstvě brzy překoná předchozí výkon jádra. Obal hvězdy tak dostává z nitra více tepla než předtím, více než stačí přenést. Část toku energie se v tak obalu zadrží a poslouží k jeho expanzi. Poloměr hvězdy rychle roste, roste tím i plocha, jíž se do prostoru zvýšený výkon hvězdy odvádí. Obal se tak podřizuje diktátu nyní již takřka zcela samostatného jádra, které vyrábí stále více energie. Hvězda znásobuje své rozměry a chladne. Ve vnějších vrstvách těchto rozměrných hvězd se energie začne přenášet především konvekcí.
- ▶ Tempo vodíkových reakcí neustále roste, hmotnost vyhořelého jádra se zvolna zvětšuje. U méně hmotných hvězd, jejichž nitro je relativně hustší a chladnější, zakrátko dochází k elektronové degeneraci heliového jádra. Vrstvička hořícího vodíku se postupně ztenčuje, ale její teplota vzrůstá. Energetická produkce jádra vůči hledně roste. Na H-R diagramu se hvězda svižně přesouvá do extrémní oblasti rozměrných **červených obrů** (Red Giant Branch – RGB). Zde stav hvězdy už vůbec nezávisí na počáteční hmotnosti hvězdy, důležitý je vnitřní stav hvězdy daný zejména okamžitou hmotností jejího kompaktního jádra.

zapálení heliových reakcí

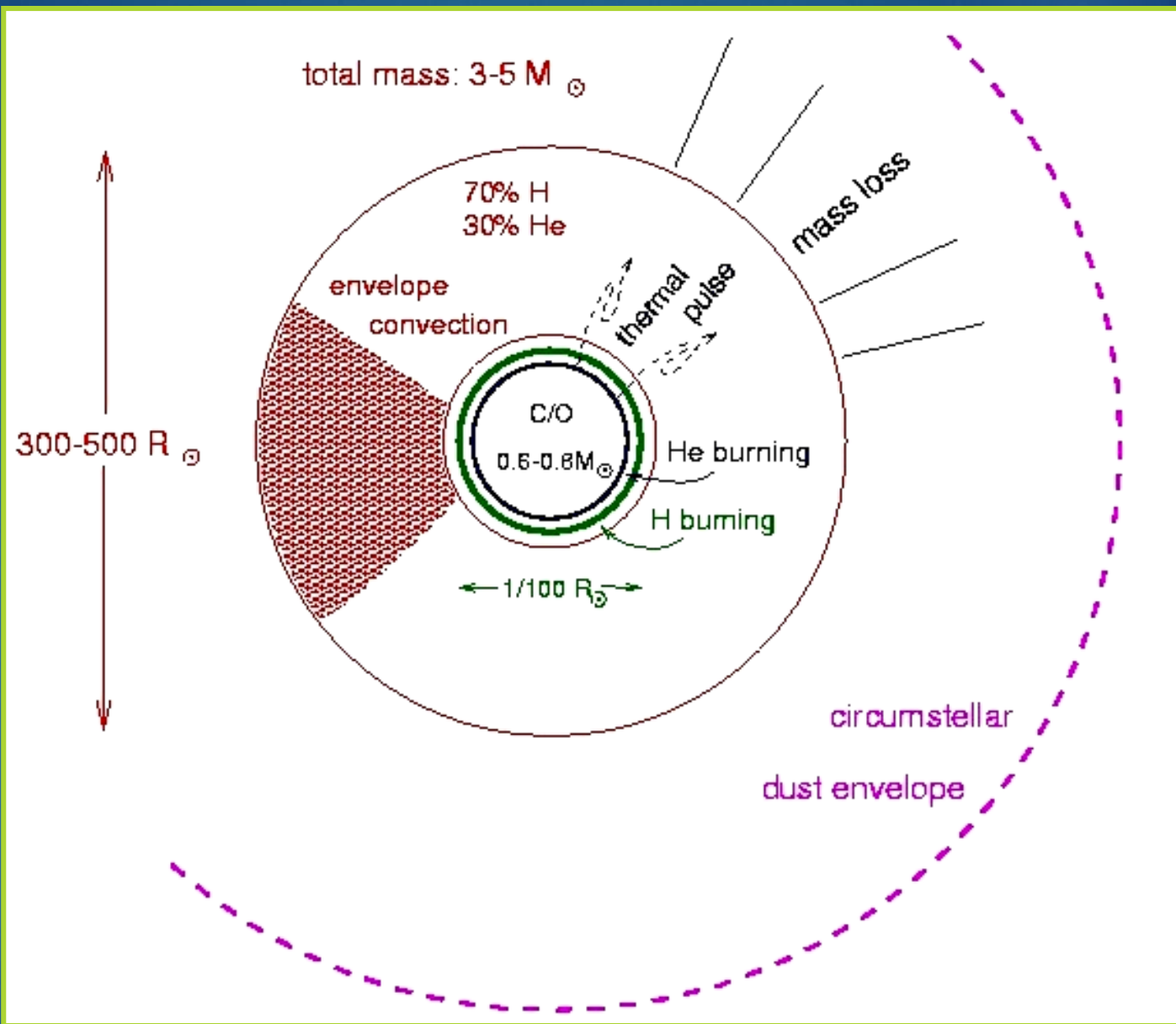
- ▶ S tím, jak se zvyšuje hmotnost vyhořelého heliového jádra, roste i jeho teplota. Jakmile hmotnost jádra přeroste $0,45 M_{\odot}$, přesáhne v něm teplota hranici 100 milionů K. Tehdy dojde v nitru hvězdy k významné události – k zažehnutí nového zdroje energie, jímž jsou *heliové reakce*, při nichž vzniká uhlík, případně i kyslík. Jakkoli jsou to reakce energeticky chudé, znamenají ve vývoji hvězdy důležitý obrat, daný skutečností, že se znovu energeticky aktivní jádro poněkud rozepne. Tím se ovšem ochladí vrstvička hořícího vodíku obalující heliové jádro a tempo jaderných reakcí zde výrazně klesne.
- ▶ Celkový výkon uvolňovaný termionukleárními reakcemi tak po zapálení dalšího jaderného zdroje paradoxně poklesne. Snížený příkon energie z centra vede k tomu, že se obal hvězdy smrští a zahřeje. Hvězda se stává běžným hvězdným obrem jen několikrát větším než Slunce, obrem typu Arctura či Capelly.

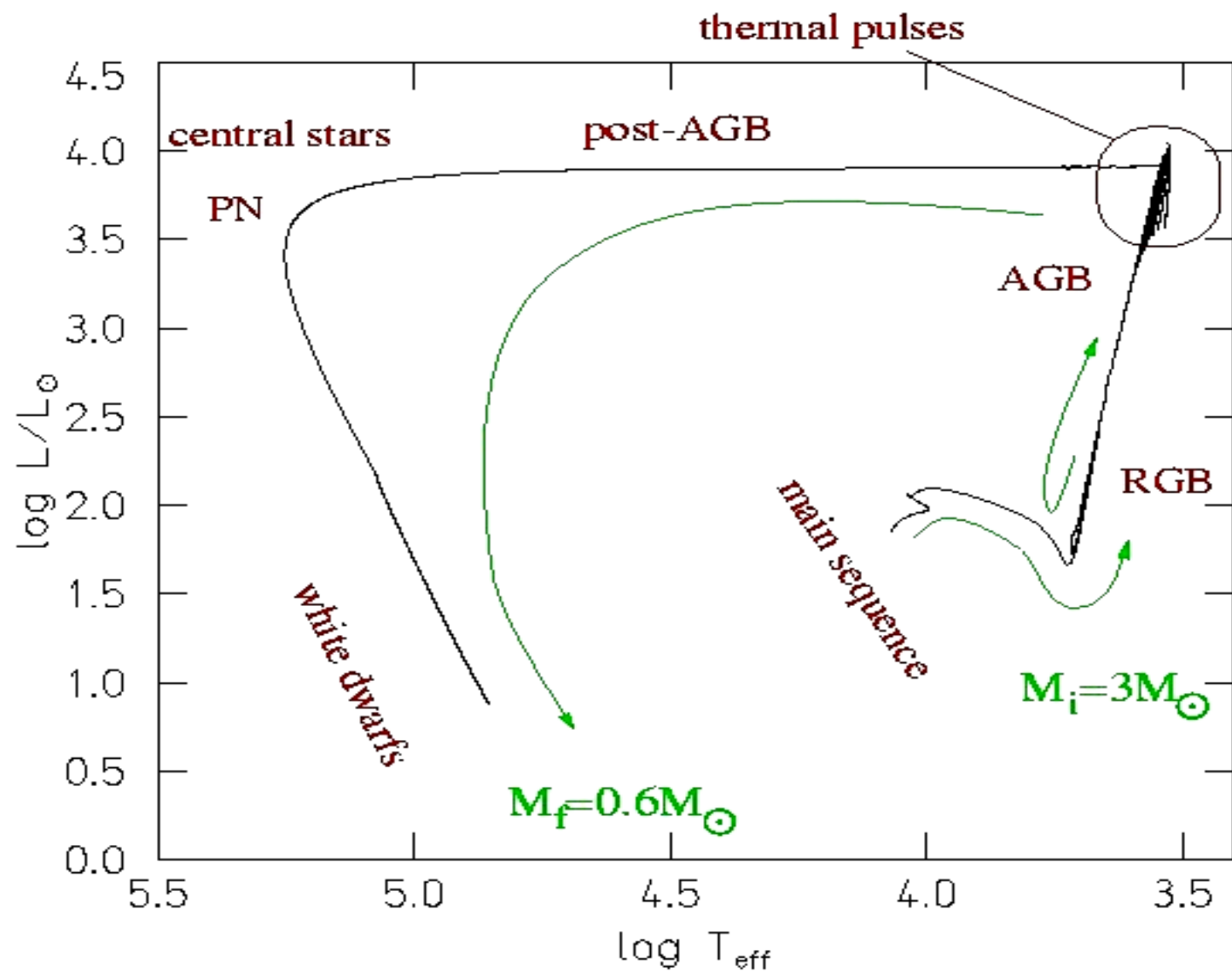
zapálení heliových reakcí

- ▶ Heliové reakce probíhají rychle, celá tato poměrně poklidná etapa trvá zhruba 10 let. V centru hořícího heliového jádra se brzy začíná hromadit popel reakcí – uhlík a kyslík. Jakmile se ve hvězdě vytvoří energeticky neaktivní jádro z vyhořelého jaderného materiálu, začne se vnitřek hvězdy opět hroutit. Na povrchu neaktivního C-O jádra se zažehne vrstvička hořícího helia. K ní zvnějšku přiléhá slupka neaktivního helia a nad níž nacházíme skutečnou energetickou centrálu hvězdy, již je vrstvička hořícího vodíku, která zajišťuje takřka celý výkon hvězdy.
- ▶ Hvězda se znovu nadýmá, tentokrát ještě více než kdykoli předtím, stává se příslušníkem tzv. *asymptotické větve obrů* (Asymptotic Giant Branch - AGB). Její zářivý tok až o 4 řády překonává tok, který dotyčná hvězda produkovala ve stadiu hvězdy hlavní posloupnosti.

zapálení heliových reakcí

- ▶ V závěru této dramatické vývojové fáze, kdy hvězda mohutně září a navíc rychle ztrácí svou hmotu hvězdným větrem a pulzacemi obalu, dojde v centru k několika explozivním znovuzažehnutím heliových reakcí ve slupce obalující C-O jádro. V důsledku těchto, tzv. *tepelných pulzů* se v centru prostřednictvím *s-procesu* (zachycování pomalých neutronů) syntetizují i poměrně vzácné nuklidy.
- ▶ Vzhledem k tomu, že konvektivní vrstva zasahuje až do oblasti jaderného hoření, jsou jeho zplodiny vynášeny do horních vrstev hvězdy, odkud se hvězdným větrem dostávají do prostoru. AGB hvězdy tak velice účinně ovlivňují chemické složení mezihvězdné látky a jsou motorem chemického vývoje Galaxie.





zapálení a hoření dalších prvků

- ▶ V jádru hvězdného obra, které se stává stále hustším a teplejším, se postupně vytvářejí podmínky pro zapálení další série termonukleárních reakcí, při nichž „termonukleárně hoří“ uhlík a kyslík na těžší prvky.
- ▶ Tempo jaderného vývoje v centrálních částech hvězdy se neustále zvyšuje, struktura jádra hvězdy je komplikovaná, ve hvězdě existuje řada aktivních i neaktivních vrstev. Dochází k zapalování i zhasení různých typů reakcí, jimiž se vytvářejí stále těžší prvky až po prvky skupiny železa. Jejich jádra jsou nejpevněji vázána, jimi poklidný jaderný vývoj končí.

zapálení a hoření dalších prvků

- ▶ Jakmile se ve hvězdě vytvoří degenerované železné jádro dostatečné hmotnosti ($1,4 M_{\odot}$) dojde k zhroucení celého vnitřku hvězdy – výsledkem je neutronová hvězda nebo černá díra – hvězda vzplane jako *supernova typu II*, respektive *I b*. Nicméně do takových konců dojde jen nepatrné procento hvězd.
- ▶ Po celou dobu nukleárního vývoje hraje v energetické bilanci hvězdy nejdůležitější úlohu energie uvolňovaná vodíkovými reakcemi. To tvrzení platí i ke konci vývoje, kdy v centru hvězdy nacházíme hned několik oblastí jaderného hoření a samotná vrstvička hořícího vodíku je až neuvěřitelně tenká. Navzdory tomu její výkon v rozhodující míře určuje výkon celé hvězdy.

zapálení a hoření dalších prvků

- ▶ Ve vývoji je nutno počítat ještě s dvěma dalšími okolnostmi, které mohou tempo i směr vývoje hvězdy zcela zvrátit – jsou jimi fenomény elektronové degenerace a úniku hmoty z hvězdy.

závěrečná stadia vývoje hvězd

- ▶ Po vyčerpání veškerých dosažitelných zásob své vnitřní energie přechází hvězda do konečného neaktivního stavu, kdy přestane zářit. Může skončit jako degenerovaný, gravitačně vázaný objekt, jako černá díra, může se též beze zbytku rozplynout do okolního prostoru.
- ▶ rozeznáváme dva typy završení hvězdného vývoje:
 - ▶ rovnovážný, kdy se hvězda mění v neaktivní gravitačně vázaný objekt ve stavu hydrostatické rovnováhy
 - ▶ nerovnovážný, kdy se ve zbytku hvězdy již nikdy hydrostatická rovnováha neustaví

závěrečná stadia vývoje hvězd

nerovnovážná závěrečná stadia vývoje

- ▶ výbuch *supernovy typu Ia*, který je výsledkem explozivního zapálení termionukleárních reakcí v elektronově degenerovaném C-O trpaslíkovi
- ▶ látka explodující hvězdy se smísí s okolní mezihvězdnou látkou, hvězda přestává definitivně existovat
- ▶ Protipólem je vznik *černé díry* - pokud probíhá kolaps degenerovaného železného jádra na konci jaderného vývoje ve hvězdách s mimořádně vysokou hmotností, pak jej nezastaví ani gradient tlaku neutronově degenerovaného plynu
- ▶ černou díru mezi nerovnovážné konfigurace řadíme z toho důvodu, že z našeho hlediska, tj. z hlediska vzdáleného pozorovatele kolaps hvězdy nikdy nekončí, maximálně tzv. „zamrzne“ na *Schwarzschildově gravitačním poloměru*

závěrečná stadia vývoje hvězd

závěrečná stadia hvězd v hydrostatické rovnováze

- ▶ nezářící objekty, v nichž je mechanická rovnováha udržovaná gradientem tlaku v látce hvězdy, jež je z větší části tvořena degenerovanou látkou
- ▶ útvary složené převážně z elektronově degenerované látky - tzv. *černí trpaslíci*
- ▶ objekty z neutronově degenerované látky - tzv. *neutronové hvězdy*
- ▶ elektronově degenerovaní trpaslíci jsou výsledkem vývoje:
 - ▶ hnědých trpaslíků s hmotností pod $0,075 M_{\odot}$, v nichž v průběhu počátečního smršťování centrální teplota nikdy nepřekročila 8 MK, takže se v nich nezažehly termionukleární reakce transformující vodík na helium. V tomto případě jde o tzv. vodíkové černé trpaslíky.

závěrečná stadia vývoje hvězd

- ▶ hvězd o hmotnosti menší než $0,5 M_{\odot}$, v jejichž nitru se úspěšně zapálily vodíkové reakce, hvězdy prošly fází hvězdy hlavní posloupnosti. Poté se v nich zažehly vodíkové reakce v slupce obalující vyhořelé heliové jádro, které brzy zdegenerovalo. Ke vznícení heliových reakcí v centru jádra u nich však nedojde, neboť hmotnost degenerovaného jádra nepřevýší nezbytnou hranici $0,4 M_{\odot}$. Hlavní složkou tohoto (zatím jen hypotetického) typu degenerovaných hvězd je helium.
- ▶ hvězd o počáteční hmotnosti menší než $11 M_{\odot}$, u nichž se jejich obal hvězdným větrem a pulzací rozplyne dříve, než v centru C-O jádra vzroste teplota natolik, aby se v něm zažehly reakce spalující uhlík a kyslík na těžší prvky. Jde o elektronově degenerované objekty složené především z uhlíku a kyslíku, výjimečně i z těžších prvků, jako hořčíku či křemíku.
- ▶ Z přehledu je zřejmé, že tento konec je společný pro valnou většinu hvězd, neboť hvězdy s hmotnostmi nad $11 M_{\odot}$ se vyskytují jen zcela výjimečně.

závěrečná stadia vývoje hvězd

- ▶ neutronové hvězdy, jejichž vnitřek je tvořen především neutrony a kůra je z elektronově degenerované látky, vznikají kolapsem železného elektronově degenerovaného jádra hmotných hvězd ($M > 11 M_{\odot}$). V důsledku kolapsu dochází též ke vzplanutí *supernov typu II a I b*
- ▶ Chceme-li pochopit chování degenerovaných objektů, musíme se blíže seznámit s chováním látky při vysokých hustotách a relativně nízkých teplotách, menších, než je teplota degenerace.

bílí trpaslíci

- ▶ Bílí trpaslíci jsou kompaktní hvězdy s hmotnostmi slunečními a rozměry planet zemského typu. Jejich střední hustoty jsou řádově milionkrát větší než střední hustota Slunce, tedy asi 10^9 kg m^{-3} . Z větší části jsou tvořeny elektronově degenеровaným plynem, který je s to vytvořit v nitru těchto hvězd potřebný gradient tlaku, jímž hvězda vzdoruje své vlastní gravitaci.
- ▶ Prvními objevenými představiteli tohoto typu objektů v závěrečné fázi svého vývoje byly bílí trpaslíci 40 Eri B a Sírius B. Tyto hvězdy raného spektrálního typu jsou řazeny mezi bílé hvězdy – odtud „bílí“ trpaslíci. Později byly objeveny žhavější, ale i chladnější hvězdy tohoto typu. S tím, jak budou tyto hvězdy chladnout, stanou se postupně nezářivými „černými trpaslíky“.
- ▶ Bílí trpaslíci jsou konečnou vývojovou fází hvězd s počáteční hmotností menší než $11 M_{\odot}$. V naší Galaxii dospělo do tohoto stadia vývoje asi 7 % hvězdné populace.

neutronové hvězdy

- ▶ jsou stabilní hvězdy v hydrostatické rovnováze složené převážně z neutronů. Jejich existence byla předpovězena ve třicátých letech Landauem, krátce po objevu neutronu Jamesem Chadwickem. Baade a Zwicky v roce 1934 poprvé spekulovali o možné existenci suprahustých neutronových hvězd.
- ▶ V roce 1968 byly ztotožněny s radiovými a optickými pulzary, v roce 1971 pak odhaleny v rentgenových pulzarech a vybuchujících zdrojích rentgenového záření, v roce 1975 byly nalezeny též v tzv. *burstech*. Dosud bylo objeveno několik stovek neutronových hvězd.
- ▶ Hustota v neutronových hvězdách, stejně jako ve všech hydrostaticky rovnovážných hvězdách, roste směrem k centru, kde dosahuje nebo i překračuje hustotu atomových jader (kolem $2 \cdot 10^{17} \text{ kg m}^{-3}$). Z tohoto hlediska bývají neutronové hvězdy někdy označovány jako gigantická atomová jádra s 10^{57} nukleony. Zásadní rozdíl oproti běžným jádrům tkví v tom, že neutronové hvězdy drží pohromadě gravitace, nikoli jaderné síly.

černé díry

- ▶ U hvězd s velmi vysokou počáteční hmotností ($50 M_{\odot}$ a více), pokračuje v jejich centrálních oblastech jaderný vývoj velice rychle: proběhnou zde veškeré možné exogenní jaderné reakce a vytvoří se hmotné železné jádro, v němž jaderné reakce již nehoří. Je-li hmotnost jádra vyšší než limitní hmotnost neutronové hvězdy (asi $3 M_{\odot}$), pak již nic nemůže pokračující kolaps odvrátit ani zastavit. Stabilní řešení neexistuje.
- ▶ Gravitační síly se zde stanou zcela dominantní, začne rychlý kolaps. Vnější vrstvy hvězdy explodují, hvězda vybuchuje jako tzv. supernova typu I b. Uvnitř však kolaps nezadržitelně pokračuje. Vnitřek hvězdy se mění v tzv. *černou díru*, objekt zahuštěný natolik, že jeho vlastní gravitace napříště zabráni čemukoli, aby z něj uniklo do vnějšího prostoru.

... finito