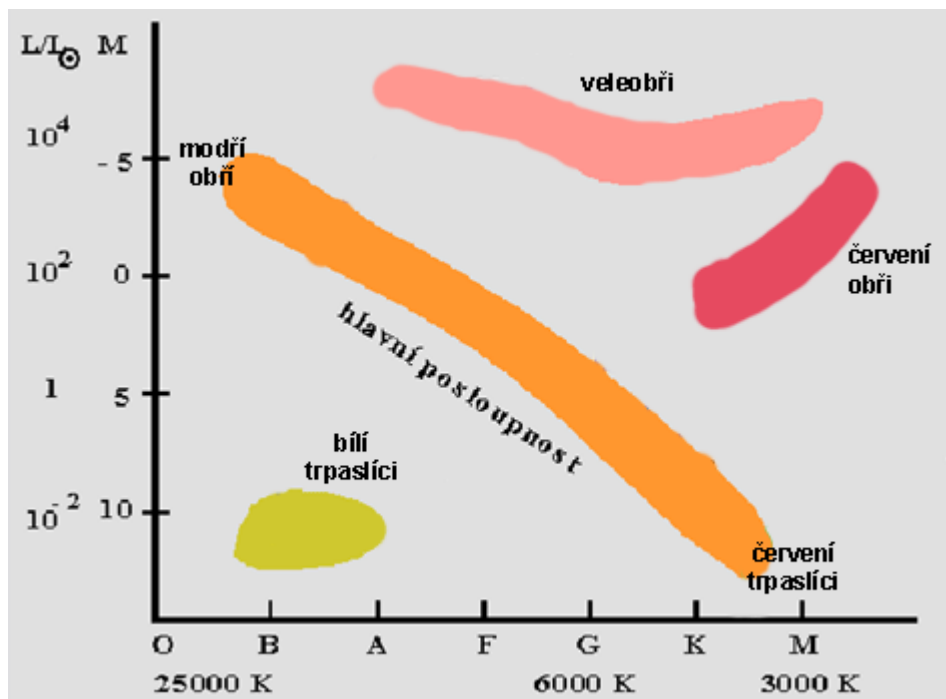


Vznik, vývoj a zánik hvězd

Hertzsprungův-Russelův diagram

HR-diagram (OBR. 1) sestavili Hertzsprung a Russel (odtud HR) začátkem 20. století. Na vodorovné ose jsou vyneseny spektrální třídy (nebo povrchové teploty), na svislé ose svítivost (nebo absolutní hvězdná velikost). Proto se mu říká také diagram spektrum-svítivost. Polohou v diagramu se jasně odlišují různé typy hvězd. Hvězdy (přesněji: body, odpovídající jednotlivým hvězdám) nejsou v diagramu rozmístěny rovnoměrně, ale „shlukují“ se v určitých, v obrázku vyznačených a pojmenovaných oblastech. Neznamená to ale, že hvězda nemůže existovat i mimo tyto oblasti; doba existence hvězdy v takovém stavu je však krátká, proto je i počet hvězd v tomto stavu (v daném okamžiku) malý.

Úhlopříčně diagramem probíhá **hlavní posloupnost**. Vlevo nahoře zahrnuje horké hvězdy s vysokou svítivostí – **modré obry**, vpravo dole jsou v ní málo svítiví a málo žhaví **červení trpaslíci**, uprostřed hlavní posloupnosti jsou hvězdy podobné Slunci a samozřejmě také Slunce. Hvězdy hlavní posloupnosti mění ve svých jádrech vodík na helium – to se děje v každé hvězdě po většinu její existence. A tak je zřejmé, že většina hvězd je na hlavní posloupnosti.



OBR. 1

Prahvězda

Z prvopočátečních plynoprachých mlhovin se vyvíjejí nestabilitami prvotní shluky (**globule**), budoucí zárodky hvězd. Typická **pramlhovina** má průměr 20 až 30 ly, hmotnost 100 až 1000 M_{\odot} a teplotu 100 K. Vlivem gravitačních sil se mračno postupně smršťuje; v centru uvolňuje tepelná energie. Roste tlak a teplota v nitru, vzniká **prahvězda**. Na tzv. Hyashiho linii (viz dále OBR. 5) se zastaví rychlé smršťování.

Později stoupne teplota a tlak v nitru natolik, že se zapálí termonukleární reakce – vznikne **hvězda**. Nově zrozená hvězda se umístí na hlavní posloupnosti HR diagramu podle své hmotnosti. Čím má hvězda větší hmotnost, tím větší má zářivost a tím výše je na hlavní větvi HR diagramu. Pobyť hvězdy na hlavní posloupnosti je tím kratší, čím je hvězda hmotnější.

Jestliže z prachových a plynných částic vznikne těleso o hmotnosti menší než $0,001 M_{\odot}$, stane se **planetou**; tedy tělesem bez výrazného zdroje vnitřní energie. Těleso o hmotnosti sice vyšší,

nepřekračující však $0,08 M_{\odot}$ se nestane ani planetou, ani „pořádnou hvězdou“. Nazývá se **hnědý trpaslík**. (Hnědá barva se totiž – jak známo z optiky – ve spektru nevyskytuje!) Jde o tělesa o hmotnosti řádově desetkrát větší než Jupiter; plynné koule vodíku s příměsí hélia, čerpající energii z vlastního, pomalého gravitačního smršťování. Působením gravitace se smršťují, degenerují a chladnou. Jejich velmi slabé záření, které je převážně v infračervené oblasti spektra, lze pozorovat jen u několika nejbližších z nich. Až se energie vyčerpá, záření ustane zcela – objekt se nazývá **černý trpaslík**. Hnědí a černí trpaslíci tvoří možná podstatnou část hmotnosti vesmíru; protože jsou „téměř neviditelní“, mluví se o skryté hmotě.

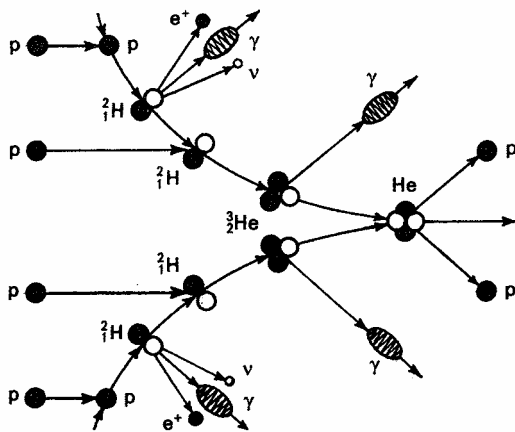
Hvězda na hlavní posloupnosti

Gravitační smršťování prahvězdy se zastavuje, jakmile se v jejím nitru zapálí termonukleární reakce. Po dosažení teplot 1–4 miliónů kelvinů se ve středové oblasti zapalují první termonukleární reakce, jimiž se deuterium, lithium, beryllium a bor mění v helium. Obsah těchto prvků je malý, takže stačí hvězdě jen po krátkou dobu. Vyhořením Li, Be a B v počátečním stadiu termonukleárního období hvězdy se vysvětluje jejich malý obsah ve vesmíru. Po vyčerpání těchto prvků se nitro dále zahřívá gravitačním smršťováním, až dosáhne ve svém středu teplot dostatečně vysokých pro hoření vodíku. Tím se hvězda umístí na hlavní posloupnost HR diagramu a zůstane tam dlouhou dobu, protože vodík je nejhojnějším prvkem.

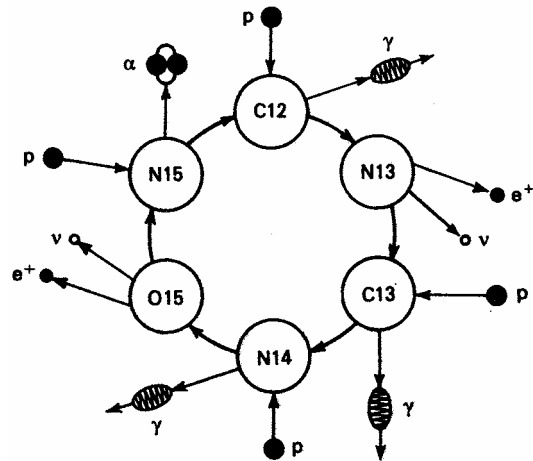
Protože spalování vodíku trvá velmi dlouho (s výjimkou velmi hmotných hvězd), nacházíme velkou většinu hvězd v naší Galaxii ještě na hlavní posloupnosti. To znamená, že velká většina hvězd v naší Galaxii září z přeměny vodíku v helium. Tato přeměna probíhá různými způsoby:

Hvězdy o hmotnosti 0,08 až $1,7 M_{\odot}$: proton-protonový řetězec (pp-řetězec, OBR. 3). Do reakce vstupuje: šest protonů. Z reakce vystupuje: jádro ${}^4_2\text{He}$, dva protony, pozitron, neutrino a foton.

Hvězdy hmotnější než $1,7 M_{\odot}$: CNO cyklus (OBR. 4). Uhlíkové jádro je pouze katalyzátorem a po proběhnutí cyklu je opět uvolněno. Výsledkem je složení heliového jádra (částice α) ze čtyř protonů. Vazebná energie každého protonu se přitom uvolní ve formě dvou pozitronů, dvou neutrin a jako γ fotony.



OBR. 3



OBR. 4

Stárnoucí hvězda

Přeměnou vodíku v helium v jádru hvězdy ubylo částic. To má za následek pokles tlaku v jádře hvězdy. „Tíha“ hořejších vrstev stlačí jádro a zahřívá je. Zahřívá se také vrstva vodíku bezprostředně nad jádrem; v této tenké vrstvě (slupce) probíhá dále přeměna vodíku na helium. Hmotnost heliového jádra hvězdy takto pozvolna narůstá a spalování vodíku v tenké slupce se pozvolna posouvá k vyšším, nevyhořelým vrstvám.

Zářivost hvězdy vzrůstá, vnější obal hvězdy se rozpíná a její povrch chladne. Vzrůst zářivosti a pokles povrchové teploty se projevuje tím, že se hvězda v HR diagramu posouvá doprava nahoru, to jest do oblasti **červených obrů**. Hvězdy v této oblasti HR diagramu (vpravo nahoře) se nazývají obři, neboť

jejich poloměr je několiksetkrát větší než poloměr Slunce. Velikost obra je srovnatelná s trajektorií Země kolem Slunce.

Uvedeme zde postupně hlavní termonukleární reakce, jak k nim dochází se vzrůstající teplotou uvnitř hvězdy. Na hmotnosti hvězdy závisí, kam až dospěje její vývoj. Čím je hvězda hmotnější, tím vyšších hodnot dosáhne teplota v její středové oblasti. Čím vyšší je teplota ve hvězdě, tím těžší atomová jádra spolu mohou reagovat: pohybují se rychleji a překonají větší odpudivou elektrickou sílu mezi sebou. V posloupnosti reakcí, které dále uvedeme, se tedy hvězda zastaví tím později, čím je hmotnější. Ve hvězdách nejhmotnějších proběhnou postupně všechny tyto reakce:

1. Hoření¹ helia. Jak se hvězda posouvá do oblasti červených obrů, roste její heliové jádro, které se smršováním stále zahřívá. Při teplotách cca 10^8 K se zapálí samotné helium. Při reakcích, které probíhají, vzniká uhlík a kyslík, popř. neon.

2. Hoření uhlíku. Červení obři spalují uhlík při teplotách kolem $8 \cdot 10^8$ K. Vznikají jádra Ne, Na, Mg.

3. Hoření kyslíku. Jádro kyslíku obsahuje osm protonů. Dvě jádra se odpuzují při setkání větší elektrickou silou než dvě jádra uhlíková, proto se musí atomy kyslíku pohybovat větší rychlostí, aby překonaly vzájemnou odpudivou sílu a mohly spolu reagovat silnou interakcí. Jinak řečeno, k hoření kyslíku je třeba vyšších teplot než k hoření uhlíku. Jestliže teplota v nitru těžké hvězdy dostoupí k hodnotě $2 \cdot 10^9$ K, jádra kyslíku se mohou slučovat v jádra Si, P, S.

4. Hoření křemíku probíhá ve dvou krocích: při rozkladu jader zářením se uvolní neutrony, protony a částice alfa; tyto uvolněné částice jsou snadno zachycovány jádry křemíku a jiných prvků. Tak se vybudují prvky až po skupinu železa.

V závěrečných obdobích vývoje obrů resp. veleobrů dochází ke značným ztrátám hmoty vnějších atmosférických obalů. To znamená, že lehcí červení obři jsou v podstatě žhaví degenerovaní trpaslíci obklopení chladnějším plazmovým obalem, velmi rozsáhlým a málo přitahovaným ke středu. Takový rozsáhlý obal může být tlakem záření žhavé, centrální hvězdy snadno „odfouknut“. Potom ho pozorujeme jako **planetární mlhovinu**. Tento (nevhodný) název (planetární mlhovina nemá nic společného s planetami) označuje horkou malou hvězdu obklopenou rozpínajícím se obalem.

Po vyčerpání termojaderných zdrojů energie je porušena rovnováha sil; převládá gravitační síla, jejímž působením se zbylé jádro hvězdy začne smršťovat.

Zánik hvězdy

Každá hvězda někde skončí – v závislosti na počáteční hmotnosti – posloupnost termonukleárních reakcí. Další vývoj je dán gravitační silou a opět tedy závisí na (nynější) hmotnosti hvězdy. Nastávají tyto možnosti:

Hvězdy do hmotnosti menší než $1,44 M_{\odot}$ (do této skupiny patří i Slunce) se po vyčerpání jaderného paliva se smršťují. Při velmi malém objemu hvězdy (příklad: Sirius B, hmotnost $1,02 M_{\odot}$, poloměr jen 5 400 km) se smršťování hvězdy tlakem elektronového plynu zastaví. Vzniká objekt obrovské hustoty 10^9 kg/m³ (hmota Slunce je napchána do objemu Země) a extrémně silného magnetického pole. Energie získaná při smršťování stačí k tomu, aby si hvězda (i bez termojaderných reakcí) udržela vysokou teplotu. Nazývá se proto **bílý trpaslík**. Poznamenejme, že jako bílý trpaslík končí i hvězdy, jejichž počáteční hmotnost byla větší než $1,44 M_{\odot}$, ale ve stadiu obra část hmoty „odhodily“ ve formě planetární mlhoviny. Stadium bílého trpaslíka je nejčastějším konečným stádiem vývoje hvězdy.

Význačná hodnota hmotnosti $1,44 M_{\odot}$ se nazývá **Chandrasekharova mez**; tuto mez při vysvětlování podstaty bílých trpaslíků spočítal indický astrofysik Subrahmanyan Chandrasekhar.

Bílý trpaslík velmi pomalu (řádově desítky miliard let) chladne a nakonec utuhne v obří krystal. Toto zcela poslední, definitivní stádium se nazývá **černý trpaslík**.

Hvězdy o hmotnosti $1,44 M_{\odot}$ až $3 M_{\odot}$. Gravitační kolaps hmotnější hvězdy probíhá rychleji. Její hustota prudce roste, nesmírný tlak řítící se látky přemůže tlak elektronového plynu. Při dopadu vnějších vrstev hvězdy do jejího centra vznikne rázová vlna, která při odrazu zpět vymrští značnou část látky hvězdy do mezihvězdného prostoru. Při výbuchu se uvolní značná energie a hvězda velmi intenzivně září. Hovoříme o **výbuchu supernovy II. typu**. Exploze rozptýlí do okolního prostoru

¹ Slovo „hoření“ nebo „spalování“ zde ani v dalším textu neznamená hoření v běžném, chemickém smyslu (okysličování). Je to v astrofyzice často užívaný název pro přeměnu jednoho prvku v prvek složitější, přesněji řečeno jader jednodušších v jádra složitější.

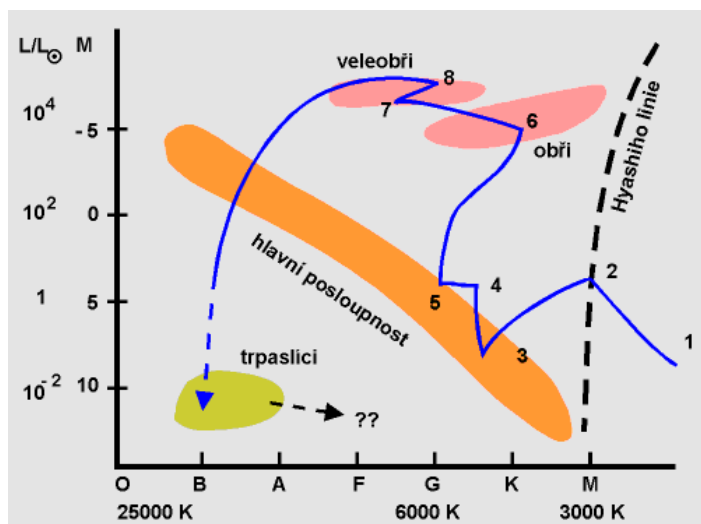
těžší prvky; příští pokolení hvězd a planet vzniká z tohoto „obohaceného materiálu“. (Kyslík a uhlík, prvky, které vytvářejí i lidská těla, by se bez takových výbuchů nedostaly do koloběhu vesmírné látky.) Po výbuchu zůstane **neutronová hvězda**; útvar připomínající obrovské atomové jádro složené ze samých neutronů. Hustota neutronové hvězdy je obrovská: 10^{17} kg/m^3 (hmotnost rovná hmotnosti Slunce je tedy napěchována do objemu několika km^3).

Neutronové hvězdy rychle rotují a vysílají záření jen v určitém směru, proto je pozorujeme jako pulsující zdroje rádiového záření, **pulsary**.

Hvězdy s hmotností větší než $3 M_{\odot}$. Při smršťování takové hvězdy neexistuje mechanismus, který by smršťování zastavil – dochází ke gravitačnímu kolapsu hvězdy. Poloměr hvězdy se stále zmenšuje a intenzita gravitačního pole na povrchu roste. Po zmenšení poloměru hvězdy pod **Schwarzschildův poloměr** je gravitační pole natolik silné, že žádné těleso a dokonce ani elektromagnetické záření (světlo) nemůže hvězdu opustit – vznikla **černá díra**. Nelze ji pozorovat, projevuje se pouze svým gravitačním působením. Černé díry si zachovávají si hmotnost, moment hybnosti a elektromagnetický náboj; vše ostatní je potlačeno.

Vývojový HR diagram

Vývoj hvězdy (velikosti Slunce) můžeme zaznamenat do HR-diagramu (OBR. 5). Získáme tak představu o jednotlivých vývojových stádiích.



- 1-2 protohvězda, smršťování volným pádem, zvyšování teploty
- 2 rovnováha gravitace a tlaku látky
- 2-3 pomalé smršťování při rovnováze
- 3 zapálení termojaderných reakcí, „pobyt“ na hlavní posloupnosti
- 3-4 dohoření H v jádře
- 4-5 smršťování jádra, zvyšování teploty
- 5 zapálení H ve slupce kolem jádra
- 5-6 hoření H ve slupce, zvyšování hmotnosti He jádra
- 6 zapálení He v jádře; červený, žlutý, oranžový obr
- 6-7 rozpínání a chladnutí obalu → únik hmoty
- 7 dohoření He v jádře, smršťování jádra, zapálení He v obálce, atd. až po skupinu železa
- 8 stadia pulsací, gravitační smršťování.

OBR. 5

Nestabilní stadia a exploze hvězd

Nova. V této fázi hvězda ztrácí své obaly, odhazuje obálku (rychlost 10^4 km/s), vytváří **efekt novy**. Hvězda malé svítivosti prudce zvýší jas během několika hodin či dnů až o 4 řády vlivem překotné termonukleární reakce na povrchu hvězdy. Materiál bohatý na vodík je dotován průvodcem (druhou složkou dvojhvězdy). Potom pomalu její svítivost v průběhu několika měsíců klesá na původní hodnotu. **Rekurentní nova** je nova, jejíž záblesky se periodicky opakují v průběhu řádově desítek let.

Supernova typu I. Rozmetání podstatné části hvězdy. Binární systém, přetok hmoty na bílého trpaslíka, po překročení Chandrasekharovy meze stability trpaslíka ($1,44 M_{\odot}$) dojde k překotné termonukleární syntéze v celém bílém trpaslíku a jeho následnému rozmetání. Vzhledem k přesné definované hmotnosti bílého trpaslíka ($1,44 M_{\odot}$) mají všechny SN I stejnou absolutní magnitudu a slouží jako standardní svíčky k měření vzdáleností.

Hypernova. Náhlé zhroucení velmi masivní hvězdy přímo na černou díru doprovázené vzplanutím gama o obrovském zářivém výkonu.