

Univerzita Hradec Králové
Přírodovědecká fakulta
Katedra fyziky

Rozšíření učebního textu
o vývoj hvězdných systémů v HR diagramu
Bakalářská práce

Autor: Michal Šrejber
Studijní program: B0588A11CZ Fyzika se zaměřením na vzdělávání
Studijní obor: Fyzika se zaměřením na vzdělávání
Matematika se zaměřením na vzdělávání
Vedoucí práce: doc. RNDr. Jan Šlégr, Ph.D.

Hradec Králové

červenec 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem v seznamu použité literatury uvedl všechny prameny a literaturu.

V Hradci Králové dne

Michal Šrejber

Poděkování

Mé poděkování patří doc. RNDr. Janu Šlégrovi Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval.

Anotace

Šrejber, M. *Rozšíření učebního textu o vývoj hvězdných systémů v HR diagramu*. Hradec Králové, 2019. Bakalářská práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Hradec Králové. Vedoucí bakalářské práce doc. RNDr. Jan Šlégr, Ph.D. 67 s.

Bakalářská práce se zaměřuje na rozšíření učebního textu učebnic astrofyziky. Je vhodná pro závěrečný ročník gymnázií a semináře fyziky. Práce obsahuje oblast Hertzsprungova – Russellova diagramu. Čtenář je seznámen se základními veličinami potřebnými k popisu a klasifikaci. Rozebrány jsou oblasti hvězd podle hvězdné velikosti, svítivosti, harvardské klasifikace a teploty. Je vyložena vývoj dvojhvězd a hvězdných systémů v HR diagramu.

Klíčová slova

HR diagram, dvojhvězdy, vývoj hvězd, hvězdné systémy

Annotation

Šrejber, M. *Expansion of the study text with the development of the stellar systems in HR diagram*. Hradec Králové, 2019. Bachelor thesis at Faculty of Science University Hradec Králové. Thesis Supervisor doc. RNDr. Jan Šlégr, Ph.D. 67 s.

The bachelor thesis focuses on the extension of the study text of astrophysics textbooks. It is suitable for the final year of grammar schools and physics seminars. The thesis contains the area of Hertzsprung – Russell diagram. The reader is introduced with the basic quantities necessary for description and classification. Areas of stars are analyzed according to star size, luminosity, Harvard classification and temperature. The development of binary stars and star systems in the HR diagram is explained.

Keywords

HR diagram, binary star, evolution of stars, stellar systems

Obsah

Úvod	7
1 Jednotky a veličiny spojené s astronomií a astrofyzikou	8
1.1 Teplota a barevný index.....	8
1.2 Svítivost a zářivý výkon.....	9
1.3 Hvězdná velikost.....	10
2 Zakladatelé	12
2.1 Ejnar Hertzsprung	12
2.2 Henry Norris Russel	12
3 Charakteristika veličin HRD	13
3.1 Spektrální typ	15
4 Spektrální analýza a klasifikace hvězd	17
4.1 Spektrální čáry, spektrum vodíku	18
4.2 Harvardská klasifikace	20
4.3 Morganova-Keenanova klasifikace	21
4.4 Popsání oblastí HR diagramu	22
5 Hvězdné systémy	25
5.1 Astrometrické dvojhvězdy	25
5.2 Spektroskopické dvojhvězdy	26
5.3 Vizuální dvojhvězdy	26
5.4 Zákrytové dvojhvězdy.....	27
5.4.1 Rocheova mez	29
5.4.2 Světelná křivka	30
5.5 Hvězdokupy	32
5.6 Hvězdné asociace	32
5.7 Otevřené hvězdokupy	33
5.8 Kulové hvězdokupy.....	33
6 Vývoj hvězdných systémů v HRD	36
6.1 Dvojhvězdy	37
6.1.1 Vývoj malých hvězd	37
6.1.2 Vývoj středních hvězd	38
6.1.3 Vývoj velkých hvězd	40

6.2	Vývoj hvězdokup	42
6.2.1	Vývoj otevřené hvězdokupy	43
6.2.2	Vývoj kulové hvězdokupy	44
7	Pracovní list	46
8	Diskuze.....	51
9	Závěr	53
	Použitá literatura	54
	Přílohy	57
	Řešení pracovního listu A	58
	Řešení pracovního listu B	62

Úvod

Astrofyzika, byť jde o mladý obor, bývá na středních školách mnohdy opomíjená. Přesto však hvězdy a vesmír přitahují jedince již v útlém věku. Tato práce je tedy rozšířením učebnice astrofyziky pro gymnázia, a to zejména o oblast Hertzsprungova-Russellova diagramu, kde bude zaznamenáván vývoj dvojhvězd a hvězdných systémů.

S tímto tématem jsou spjaty nejen jednotky a veličiny oblasti astrofyziky, ale i známá jména dvou velkých astronomů, Ejnara Hertzsprunga a Henryho Norrisa Russella. Ti v letech 1911 – 1913 nezávisle na sobě zkoumali hvězdy z hlediska hvězdné velikosti a spektrálního typu.

Neopomenutelnou součástí Hertzsprungova-Russellova diagramu jsou hvězdy samotné. Proto se čtenář dozví podstatné informace o teplotě, spektrálním typu, svítivosti a magnitudě hvězd. Spektrální analýza a světelné křivky hvězd bývají nejdůležitějším zdrojem informací, díky které je možné hvězdy poznat a klasifikovat. Dále budou v této práci základní informace o dvojhvězdách a hvězdných systémech. Tyto informace v současné učebnici astrofyziky chybí.

Diagram je rozdělen dle oblastí odpovídajících typu hvězdy od bílých trpaslíků až po obry. Popsán je i vývoj dvojhvězdy s vlastnostmi a umístěním v diagramu pro danou fázi vývoje.

1 Jednotky a veličiny spojené s astronomií a astrofyzikou

Vzhledem k velkým vzdálenostem vesmírných objektů by bylo nepraktické určovat vzdálenost jednotlivých objektů v metrech. Pro výpočty týkajících se zejména naší sluneční soustavy je vhodné zavést tzv. astronomickou jednotku (au) odpovídající poloměru dráhy středu Slunce od středu Země.

Podle definice Mezinárodní astronomické unie se astronomická jednotka chápe jako poloměr ničím nerušené kruhové dráhy, po které oběhne těleso o zanedbatelné hmotnosti kolem Slunce úhlovou rychlostí 0,01720209895 radiánů za den. Její v současnosti nejpřesnější hodnota je stanovena resolucí Mezinárodní astronomické unie z r. 2009: [1]

$$1 \text{ au} = (149\,597\,870\,700 \pm 0,003) \text{ km} \quad (1)$$

Pro větší vzdálenosti je vhodné použít jednotku světelný rok (ly z anglického light year). Tato jednotka vyjadřuje vzdálenost, kterou světlo ve vakuu urazí za jeden Juliánský rok. Rychlost světla ve vakuu $c = 299\,479\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a Juliánský rok = 365,25 dne.

$$1 \text{ ly} = 9,4607 \cdot 10^{15} \text{ m} \quad (2)$$

Z astronomické jednotky vychází další jednotka zvaná parsec (pc). Jde o vzdálenost, pod kterou je vidět jedna astronomická jednotka pod úhlem jedné obloukové vteřiny.

$$1 \text{ pc} = \frac{1 \text{ au}}{\sin 1''} = (3,085677581503 \pm 0,000000000062) \cdot 10^{16} \text{ m} \quad (3)$$

1.1 Teplota a barevný index

Vesmírné objekty lze charakterizovat teplotou. Teplota T je stavová veličina patřící mezi základní veličiny SI a je jednou ze čtyř veličin, jež charakterizují Hertzsprungův-Russellův diagram. Základní jednotka teploty je kelvin [K], jehož stupnice byla určena dvěma teplotami, teplotou absolutní nuly (0 K) a teplotou trojného bodu (273,16 K).

Zjištění teploty hvězdy může být problém, neboť hvězda nemá teplotu rovnoměrnou. Pozorovatel naměří různé teploty pro odlišné části hvězdy. Přesto je však potřebné zjistit, zdali hvězda patří mezi teplejší nebo chladnější. Rozdíl mezi teplotami hvězd se pohybuje okolo 2 000 K – 100 000 K.

Jednou z možností pro určení teploty hvězdy je barevná teplota: Barevná teplota hvězdy je teplota absolutně černého tělesa, které vyzařuje elektromagnetické záření stejné frekvence (resp. stejné vlnové délky) jako hvězda. [2]

Určení barevné teploty není složitý proces. Pozorovatel musí určit teplotu absolutního černého tělesa, jež vyzařuje stejné elektromagnetické záření, jako pozorovaná hvězda.

Na základě spektrální analýzy určíme elektromagnetické záření pozorované hvězdy a porovnáme je s absolutně černých tělesem.

Hvězdy o teplotě 2 000 K mají červenou barvu. S rostoucí teplotou se barva hvězdy mění od oranžové (4 000 K), žluté (6 000 K), bílé-světle modré (9 000 K) až k tmavě modré, kde hvězdy mohou dosahovat až 100 000 K.

Další možností pro určení teploty hvězdy je tzv. efektivní teplota T_{ef} : Efektivní teplota hvězdy je teplota absolutně černého tělesa, které je stejně velké jako daná hvězda a které má stejný zářivý výkon.[2]

Efektivní teplotu můžeme určit pomocí Stefan – Boltzmanova zákona:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{ef}^4 \quad (4)$$

kde L je zářivý výkon, R poloměr hvězdy, T_{ef} efektivní teplota a σ je Stefan-Boltzmannova konstanta.

Další veličinou je barevný index, který je rozdílem hvězdných velikostí téže hvězdy ve vybraných spektrálních intervalech. Hodnotu barevného indexu nám udává barva hvězdy, která je určena její povrchovou teplotou. Nižší barevný index odpovídá modré barvě, naopak vyšší barevný index odpovídá červené barvě.

1.2 Svítivost a zářivý výkon

Svítivost I patří mezi fotometrické veličiny. Jednotkou svítivosti je kandela cd , které odpovídá zhruba svítivost jedné svíčky. Též spadá mezi základní jednotky SI.

Svítivost bodového zdroje v daném směru lze definovat jako podíl světelného toku $\Delta\Phi$ vyzářeného zdrojem v tomto směru do malého prostorového úhlu $\Delta\Omega$ a velikosti tohoto prostorového úhlu:

$$I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega} \quad (5)$$

Svítivost tedy vyjadřuje rozdělení světelného toku do různých směrů, do kterých vyzařuje zdroj světla. [3]

Jak bylo řečeno v 1. kapitole zářivý výkon L lze definovat, jako množství energie, které hvězda vyzáří do mezihvězdného prostoru za jednotku času. Zářivý výkon závisí na hmotnosti hvězdy. Pro výpočet využijeme vztah:

$$L = 4\pi^2 F \quad (6)$$

kde F je hustota zářivého výkonu. Jednotkou zářivého výkonu je watt. Lze také využít

vztah obsahující celkovou energii E vyzářenou do prostoru:

$$L = 4\pi r^2 E \quad (7)$$

kde po dosazení rovnice (4) ze Stefanova zákona dostaneme:

$$L = 4\pi r^2 \sigma T^4 \quad (8)$$

kde σ je Stefan-Boltzmannova konstanta a T povrchová teplota. Porovnáním s jinou hvězdou, např. Sluncem můžeme vztah upravit do tvaru:

$$L = \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^2 \left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^4 \quad (9)$$

kde R_{\odot} je poloměr Slunce a T_{\odot} je povrchová teplota Slunce. Dosazením hodnot veličin jiné hvězdy můžeme vypočítat její skutečný poloměr nebo povrchovou teplotu. Při výpočtech, kdy porovnáme dvě rozdílné hvězdy, musíme využívat data, kdy přicházející světlo není pohlceno mezihvězdnou hmotou, zejména porovnááme-li absolutní magnitudu.

1.3 Hvězdná velikost

Výraz hvězdná velikost (magnituda) pochází již ze starověku. Astronom Hipparchos sepsal hvězdný katalog ve kterém rozdělil hvězdy podle jasnosti, do šesti magnitud od $1^m - 6^m$. Paradoxně hvězdy první magnitudy byli ty nejjasnější, tudíž např. Slunce má zápornou magnitudu ($-26,8^m$). Veškeré řazení proběhlo podle Hipparchova osobního vjemu. V této době převládala myšlenka, že veškeré hvězdy jsou od Země stejně daleko, proto se nejedná o skutečné rozměry hvězd. Toto řazení se nazývá zdánlivá magnituda a značíme ji m .

Při výpočtu zdánlivé magnitudy vycházíme z dříve již pozorované hvězdy. Pomocí Pogsonovi rovnice je možné určit:

$$m_a - m_b = -2,5 \cdot \log \frac{\Phi_{eA}}{\Phi_{eB}} \quad (10)$$

kde m_a, m_b jsou zdánlivé magnitudy a Φ_{eA}, Φ_{eB} velikosti toku záření pozorovaných hvězd. Aby bylo možné porovnávat skutečné hvězdné velikosti hvězd, bude nutné zdánlivou hvězdnou velikost opravit o vliv vzdálenosti hvězdy od Země.

Pro určení jasnosti vesmírných objektů využijeme absolutní hvězdnou velikost. Jak uvádí Jaroslav Reichl [4]: Absolutní hvězdná velikost (skutečná hvězdná velikost) M je hvězdná velikost hvězdy, která se nachází ve vzdálenosti 10 parseků od Země.

Vztah pro zdánlivou hvězdnou velikost a absolutní hvězdnou velikost lze též odvodit z Pogsonovy rovnice:

$$m - M = 5 \log r - 5 \quad (11)$$

kde magnituda m byla měřená ve vzdálenosti r od zdroje. Rozdíl $m - M$ je modul vzdálenosti.[5]

2 Zakladatelé

Počátkem 20. století Henry Russell pracoval na studiu dvojhvězd, jenž by napomohlo zjištění informací o průběhu života hvězd a hvězdných soustav. Po výběru několika hvězd, jež splňovaly předpoklady teorií hvězdného vývoje, použil paralaxu ke změření hvězdné velikosti a zářivosti. Po srovnání svítivosti, barvy nebo spektra hvězd vyhledal Russell dánského astronoma Ejnara Hertzsprunga. Ten o několik let dříve našel souvislost, že modře zářící hvězdy jsou jasnější nežli žluté a žluté jasnější nežli červené. Russell vynesl spektrální třídu a barvu do diagramu a definoval vztah mezi absolutní magnitudou hvězdy a jejím spektrem. V roce 1913 pak uveřejnili výsledek známý jako Hertzsprungův-Russellův diagram.

2.1 Ejnar Hertzsprung

Ejnar Hertzsprung, (* 8. 10. 1873, † 21. 10. 1967) byl dánský astronom a chemik, ředitel Leiden Observatory a nositel Medaile Catheriny Bruceové. Společně s Henry Russellem prosluli svou prací na systému klasifikace hvězd známou jako Hertzsprungův-Russellův diagram. Dále objevil dvě planety a byl po něm pojmenován kráter na odvrácené straně Měsíce.

2.2 Henry Norris Russell

Henry Norris Russell, (* 25. 10. 1877, † 18. 2. 1957) byl americký astronom, student a později i profesor na Princeton Univerzity. Nositel řady ocenění, jako Zlaté Medaile Královské Astronomické Společnosti, jimiž byl členem. Kromě spoluúčasti na HR diagramu se podílel na výzkumu chemického složení hvězd a Vogt-Russellově teorému, podle kterého je struktura hvězdy, která je v tepelné a hydrostatické rovnováze, jednoznačně určena hmotností hvězdy a rozdělením chemických prvků v celém objemu.

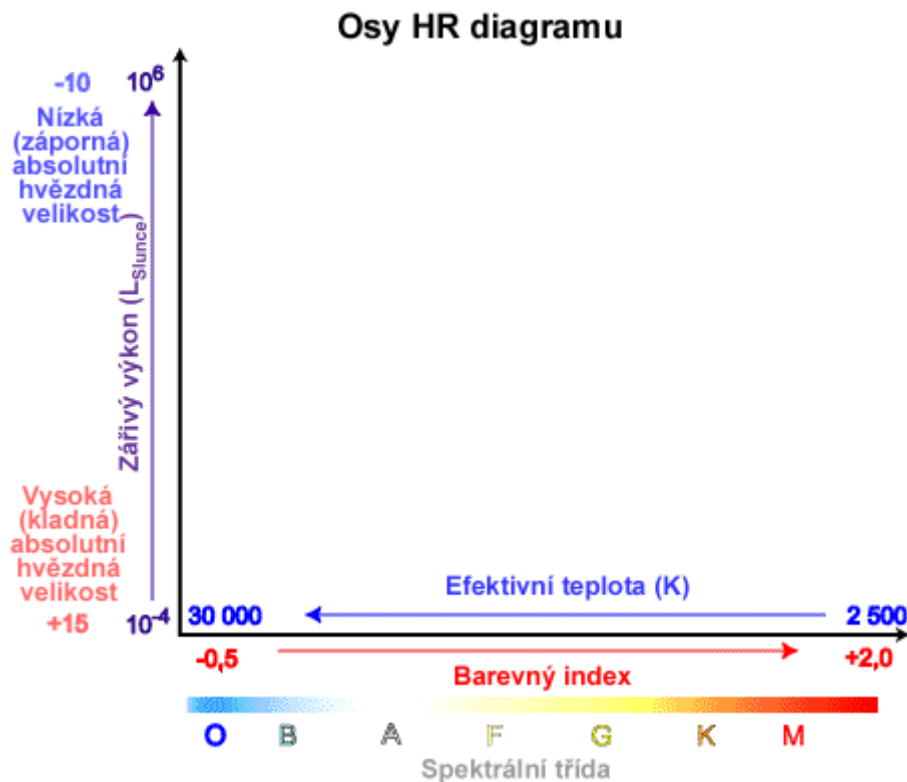
3 Charakteristika veličin HR diagramu

V této kapitole se zaměříme na popis os, jež celý diagram utváří. Jak můžete vidět na obr. 1 (převzatého z [6]), na vodorovné ose nachází teplota, jež klesá zleva doprava a Harvardská klasifikace, jež vyznačuje spektrální typ hvězdy. Na ose svislé je absolutní hvězdná velikost společně se zářivým výkonem.

Pro kulové a otevřené hvězdokupy se využívá upravený diagram, kde místo spektrálního typu vyneseme na vodorovnou osu barevný index. Diagram barva-svítilivost se nazývá barevný diagram a čtenář se více dozví v kapitole o vývoji hvězdokup. Ostatní parametry zůstávají zachovány.

Před hlubším popisem veličin hvězd je vhodné si charakterizovat model absolutně černého tělesa. Tento model zde zavádíme, neboť je potřebný pro pochopení druhů teplot a spektrálního typu.

Absolutně černým tělesem nazýváme těleso, jenž pohlcuje a zároveň neodráží záření jakékoli vlnové délky. V reálném světě absolutně černé těleso neexistuje, neboť každé těleso pohltí či odrazí část vlnových délek. Model však můžeme aproximovat pomocí dutiny s velmi malým otvorem se začerněnými stěnami o termodynamické teplotě T .



Obr. 1 Osy HR diagramu.

Vyšleme-li otvorem signál, bude se stěnami pohlcován a znovu vysílán. Pokud stěny pohltní a následně vyzáří veškeré fotony, pak mají vlastnosti absolutně černého tělesa. Plyn uvnitř dutiny nazvěme rovnovážným fotonovým plynem. Ten je izotropní a homogenní, tedy má ve všech směrech a místech stejné vlastnosti. Absolutně černé těleso však nemusí být nutně černé, neboť barva záření záleží zejména na teplotě. Intenzita záření I narůstá se zvětšující teplotou. Celková energie, kterou těleso vyzáří za jednu sekundu plochou jeden metr čtverečný je dána vztahem:

$$I = \sigma T^4 \quad (12)$$

kterému říkáme Stefan-Boltzmannův zákon, kde $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ je Stefanova konstanta a T je povrchová teplota tělesa.

Skutečností, že vzrůstající teplota tělesa zkracuje vlnovou délku záření, si roku 1893 všiml německý fyzik Wilhelm Wien. Vlnová délka λ_m je nepřímo úměrná absolutní teplotě tělesa a platí:

$$\lambda_m = \frac{b}{T} \quad (13)$$

kde T je absolutní teplota a $b = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ je konstanta. Rostoucí teplota T ovlivní vlnovou délku λ_m a posouvá ji k ultrafialové části elektromagnetického spektra, při klesající teplotě naopak k infračervenému konci. Tento zákon se nazývá Wienův zákon posuvu.

Problém nastal při experimentálním ověření. Podle představ měly mít kratší vlnové délky větší podíl energie. Výsledky však pro vlnové délky $\lambda \ll \lambda_{\max}$ byli neprokazatelné a černé těleso téměř nevyzařovalo. O problematiku se zajímal německý fyzik Max Planck. Pomocí kvantové teorie zjistil, že těleso nevyzařuje energii spojitě, ale po kvantech pro jejichž velikost platí:

$$\varepsilon = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (14)$$

kde f je frekvence záření a $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ je Planckova konstanta. Na základě kvantové teorie odvodil rovnici popisující elektromagnetické záření ve všech oblastech spektra vyzářené černým tělesem. Pro energii E pak platí:

$$E_\lambda = \frac{1}{\lambda^5} \frac{hc^2}{e^{k\lambda T} - 1} \quad (15)$$

kde c je rychlost světla a k Boltzmannova konstanta.

3.1 Spektrální typ

Spektrální typ je jeden z důležitých parametrů, jak hvězdu detailně analyzovat. Zprvu astronomové přisuzovali různé spektrální čáry chemické odlišnosti povrchu hvězd. Později bylo zjištěno, že důležitým parametrem ovlivňujícím spektrální čáry je povrchová teplota.

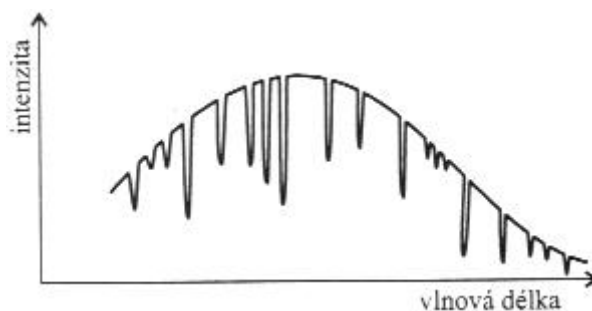
Atmosféry hvězd jsou mnohdy chladnější nežli zbylé vrstvy pod povrchem. Fotony různých vlnových délek putují z jádra hvězdy k povrchu a jsou cestou pohlcovány a následně vyzařovány. Tímto vznikají spektrální čáry dvojího typu.

1) Absorpční čáry – jsou tmavé čáry na světlém pozadí. Vznikají tak, že světlo prochází chladnějšími vrstvami hvězdné atmosféry. Ionty, atomy nebo molekuly, které jsou v atmosféře přítomny, mohou procházející foton pohltit – dochází k absorpci fotonu. Každý iont, atom a molekula ale může pohltit jen fotony určitých frekvencí v závislosti na svých energetických hladinách. O pohlcené fotony je záření hvězdy ochuzeno a ve spektru jsou vidět v daných místech těchto frekvencí tmavší čáry. Spektrum je znázorněno na obr. 2. [7]

2) Emisní čáry – jsou světlé čáry na tmavém pozadí. Vznikají skokem elektronu na nižší energetickou hladinu. Při tomto ději se je uvolněn foton o stejné frekvenci, jaké byl pohlcen.

Absorpčními a emisními čarami se zabývali Gustav Kirchhoff a Robert Bunsen, kteří položili základy spektroskopie a odvodili dva zákony.

1. Jednotlivé prvky v plynném stavu mají spektrum složené z čar, jejichž počet a vlnové délky jsou za všech podmínek (teploty, hustoty, tlaku) vždy stejné (mění se jen výraznost čar).



Obr. 2: Znázornění absorpčních čar ve spektru.

2. Spektrální čáry plynu umístěného mezi zdrojem spojitého záření a pozorovatelem se jeví jako absorpční, jestliže má plyn nižší teplotu než zdroj, nebo jako emisní, má-li plyn teplotu vyšší než zdroj. [5]

Na základě spektrálních čar jsou pak hvězdy kategorizovány podle do různých typů. Nejčastěji využívané klasifikace Harvardská a Morgan-Keenanova jsou rozebrány v kapitolách 4.2 a 4.3.

4 Spektrální analýza a klasifikace hvězd

Spektrální analýza je základní pilíř pro zjištění informací o vesmírných objektech. Pomocí spektroskopu jsou analyzovány emisní a absorpční čáry. Na základě těchto čar jsou objekty kategorizovány. Obor, který se hlouběji zabývá analýzou spekter se nazývá spektrografie. Při analýze spektra využíváme tří základních jevů, která nám o zkoumaném objektu dodají základní informace.

První je Dopplerův jev pojmenovaný po svém objeviteli Christianu Dopplerovi. Pohybuje-li se zdroj záření, pozorovatel zaznamená změnu vlnové délky spektrálních čar. Pokud se zdroj záření vzdaluje, zvětší se vlnová délka záření a čáry spektra se přibližují k infračervenému okraji spektra. V opačném případě, pokud se zdroj záření přibližuje, vlnová délka čar se zmenšuje a čáry se posouvají blíže k ultrafialovému okraji spektra. Pro změnu vlnové délky $\Delta\lambda$ pak platí přímá úměra:

$$\Delta\lambda = \frac{V_r}{c} \lambda \quad (16)$$

kde V_r značí radiální rychlost zdroje, c rychlost světla a λ vlnová délka. Dopplerův jevu tedy slouží k určení rychlosti objektů ve vesmíru, zda se k nám přibližují nebo se od nás vzdalují.

Vztah (16) platí pro klasickou fyziku. Dnes jsou nám známy objekty (např. vzdálené galaxie), které se vůči nám pohybují příliš vysokou rychlostí, která se blíží rychlosti c . Nutno tedy využít vztah využívající speciální teorii relativity:

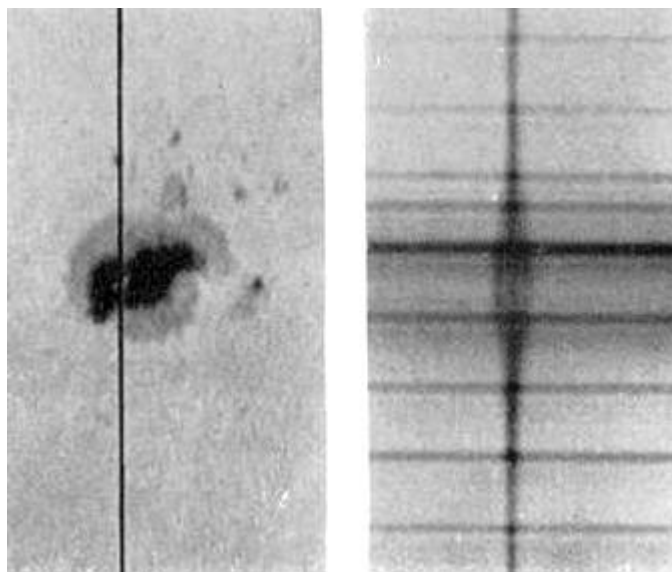
$$\lambda' = \lambda \sqrt{\frac{c + V_r}{c - V_r}} \quad (17)$$

kde λ' je vlnová délka naměřená pozorovatelem. Kromě výzkumu spektroskopických dvojhvězd (viz kapitola 5.1.3) bylo pomocí Dopplerova jevu dokázáno rozpínání časoprostoru. Důsledkem Dopplerova jevu je Einsteinův jev, známí též jako rudý posuv.

Uvažujme situaci, kdy foton vznikne v gravitačním poli. Pokud bude toto pole opouštět, ztratí část své energie, což má za následek prodloužení vlnové délky. Změnu vlnové délky $\Delta\lambda$ pak vypočítáme:

$$\Delta\lambda = 2,1 \cdot 10^{-6} \frac{M_*}{R_*} \lambda \quad (18)$$

kde M_* značí hmotnost hvězdy vyjádřenou v jednotkách hmotnosti Slunce M_\odot a R_* značí poloměr hvězdy vyjádřený v jednotkách poloměru Slunce R_\odot . Z rovnice je vidět, že platí nepřímá úměrnost a budeme-li uvažovat dvě hvězdy se shodnou hmotností a rozdílným



Obr. 3: Zeemanovo štěpení magnetických čar.

poloměrem, bude menší hvězda dosahovat většího posuvu. Pro Slunce platí posuv 0,0012 nm.

Koncem devatenáctého století, v období rozvoje teorie elektromagnetizmu, zkoumal Pieter Zeeman vliv magnetického pole na spektrální čáry. Nachází-li se v magnetickém poli zdroj záření, jsou jeho spektrální čáry rozštěpené. K tomuto jevu dochází přechodem elektronu mezi blízkými energetickými hladinami. Místo jedné čáry se pak objeví dvě až tři čáry. Vzdálenost jednotlivých čar je přímo úměrná velikosti magnetické indukce pole. Tento jev se nazývá Zeemanův jev.

Spektrální klasifikace je užívána pro přehledné zařazení hvězdy na základě jejich vlastností jako jsou povrchová teplota nebo absolutní hvězdná velikost. V současnosti bývá nejvyužívanější Harvardská klasifikace, jenž rozděluje hvězdy podle čárových spekter.

4.1 Spektrální čáry a spektrum vodíku

Mezi nejrozšířenější prvky ve vesmíru patří vodík a helium. Při analýze spektra vesmírných objektů se tak často objevují jejich emisní a absorpční čáry. Ty odpovídají přechodu elektronu mezi různými energetickými hladinami $n_a \leftrightarrow n_b$. Představme si nyní základní spektra atomu vodíku.

První spektrum se nazývá Lymanova série, jenž nese název podle Theodora Lymana. Leží ve ultrafialové oblasti spektra. Z povrchu Země je tato série nepozorovatelná, neboť

je pohlcena vrstvami atmosféry.

Při přechodu elektronu do základního stavu ($n = 1$) se ve spektrech objeví série emisních čar – Lymanova série, jejíž první čára L_α (přechod $2 \rightarrow 1$) má $\lambda = 121,6$ nm. [5]

Tab. 1: Vlnové délky Lymanovi série vodíku

n_b	λ [nm]	Označení
2	121,57	Lyman α
3	102,58	Lyman β
4	97,25	Lyman γ
∞	91,2	Hrana série
Spojité spektrum		

Druhá spektrální série se nazývá Balmerova série. Vlnová délka se nachází mezi 656 až 364 nanometry, tudíž se z největší části nalézá ve viditelné oblasti spektra.

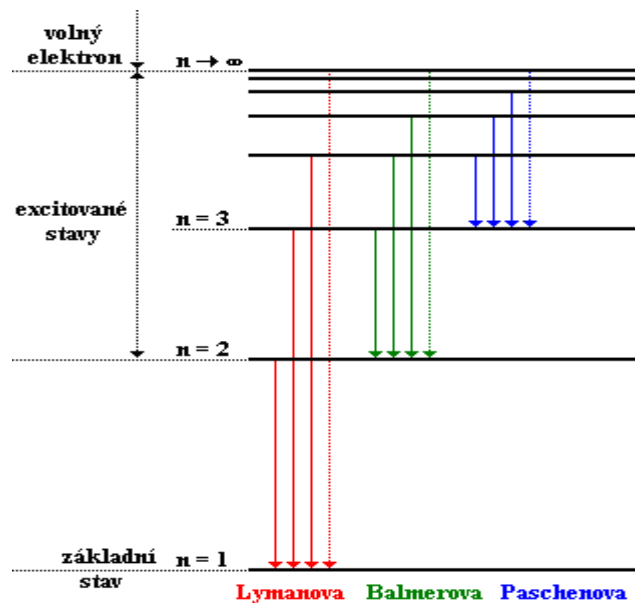
Tab. 2: Vlnové délky Balmerovi série vodíku

n_b	λ [nm]	Označení
3	656,282	H_α
4	486,133	H_β
5	434,047	H_γ
∞	364,598	Hrana série
Spojité spektrum		

Třetí spektrum se nazývá Paschenova série podle německého fyzika Fridricha Paschena. Nachází v oblasti infračerveného spektra v rozmezí 1875,1 – 820,4 nm.

Tab. 3: Vlnové délky Paschenovi série vodíku

n_b	λ [nm]	Označení
4	1875,1	Paschen α
5	1281,8	Paschen β
6	1093,8	Paschen γ
∞	820,4	Hrana série
Spojité spektrum		



Obr. 4: Energetické hladiny pro atom vodíku

Údaje uvedené v tabulkách 1 – 3 jsem převzal z [5]. Pro snadnější pochopení poslouží obr. 4 převzatý z [8]

Pro výpočet jednotlivých kvantových hladin vycházíme ze vzorce:

$$f = R \cdot \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (19)$$

kde f je frekvence záření, $R = 3,290 \cdot 10^{15}$ Hz je Rydbergova frekvence, m číslo nižší energetické hladiny a n číslo vyšší energetické hladiny.

4.2 Harvardská klasifikace

Počátkem dvacátého století byla zavedena Harvardská klasifikace. V této době již bylo shromážděno dostatečné množství fotografií hvězdných spekter a pozorovatelných dat. Hvězdná spektra se mezi sebou značně lišila, což bylo způsobeno ionizací atomů, zejména vodíku, vápníku a kovů, díky kterým vznikaly emisní a absorpční čáry. Další vliv na spektrum má i teplota atmosféry hvězdy.

Zprvu byla klasifikace provedena abecedně. Toto uspořádání však neodpovídalo teplotní škále, proto byly hvězdy rozděleny podle následujících písmen:

Q, P, W, O, B, A, F, G, K, M, S, R, N

kde Q představuje nejvyšší teplotu a N nejnižší.

Třída P je rezervována pro plynné mlhoviny, třída Q je charakteristická pro novy. Ani jedna z nich nemá přímou souvislost s ostatními spektrálními třídami.[9]

Třída W nese název podle dvou pařížských astronomů Wolfa a Rayeta. Tato skupina hvězd je velmi odlišná zejména širokými emisními čarami ionizovaného hélia a vodíku. Teploty mohou dosahovat i více nežli 80 000 K.

Tab. 4: Popis typů hvězd podle Harvardské klasifikace

Třída	Popis	Teplota [K]	Barva
O	Vyznačuje se značně spojitým spektrem. Znatelné absorpční čáry vodíku, hélia a dalších ionizovaných prvků. Nejsou znatelné čáry kovů.	60 000	Modrá
B	Obsahuje absorpční čáry Balmerovy série vodíku, vodíku, hélia, ionizovaného kyslíku a vápníku.	38 000	Modrobílá
A	Dosahuje maximální intenzity Balmerovy série vodíku, slabší čáry vápníku a začínají se objevovat čáry kovů.	15 400	Bílá
F	Silné čáry ionizovaného vápníku a kovů, začínají se objevovat čáry uhlovodíky, Balmerova série vodíku slábne.	9 000	Žlutobílá
G	Čáry ionizovaného vápníku jsou výrazné čáry kovů až po železo. Čáry vodíku již téměř vymizely.	6 700	Žlutá
K	Silně intenzivní čáry kovů a ionizovaného vápníku.	5 400	Oranžová
M	Čáry kovů již nejsou tak znatelné, výrazně se objevuje oxid titaničitý.	3 800	Červená

Spektra chladných hvězd typu S připomínají spektra hvězd typu K a M, obsahují však značné množství molekulárních pásů. Hvězdy R a M se často označují společných písmenem C. Jelikož se vyznačují výraznými pásy sloučením uhlíku (CN, CO, C₂), označují se také jako uhlíkové hvězdy.[9]

Při označování hvězdných spekter se intervaly mezi uvedenými třídami dělí na deset částí, čímž klasifikaci zjemňujeme.[10]

4.3 Morganova - Keenova klasifikace

Roku 1943 pracovali William Morgan, Philip Keenan a Edith Kellmanová na dvourozměrné spektrální klasifikaci, známou jako Morgan – Keenova nebo též Yerkeská klasifikace.

Parametrem první osy je spektrální typ, jenž se shoduje s Harvardskou klasifikací. Druhým parametrem je svítivost. Do klasifikace jsou zavedeny luminositní třídy odpovídající římským číslicím.

Tab. 5: Označení luminositních tříd dle typu hvězd

Označení	Typ hvězdy	Označení	Typ hvězdy
Ia	Jasní veleobři	IV	Podobři
Ib	Veleobři	V	Hvězdy hlavní posloupnosti (trpaslíci)
II	Jasní obři	VI	Podtrpaslíci
III	Obři	VII	Bílí trpaslíci

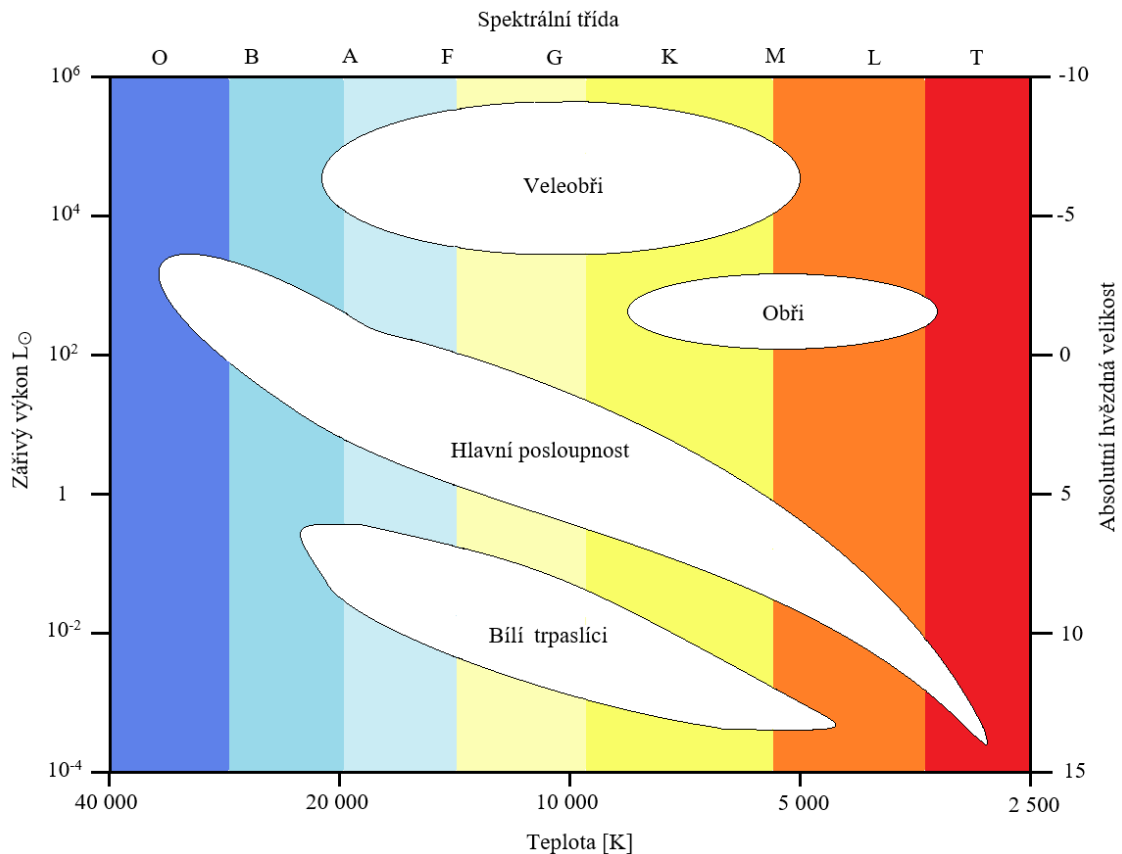
Určení spektrálního typu bývá jednodušší nežli určení svítivosti. Morganova Keenanova klasifikace využívá spektra nasnímaná s disperzí 12,5 nm/mm pro čáry H γ . Klasifikaci provádíme porovnáním spektra hvězdy se spektry v atlasu hvězdných spekter. Hlavním důvodem využití MK a Harvardské klasifikace před ostatními je rychlost. Ke klasifikaci postačí porovnat spektrum se spektry již známých hvězd. Nevýhodou může být nepřesnost. Spektrální klasifikace závisí jak na přístroji, tak na pozorovateli a může dojít k nepřesnostem.

Existují i přesnější metody, např. Chalongeova trojrozměrná klasifikace, kde veličiny jsou funkcí teploty a tlaku, ale pro velkou náročnost a omezení jen na některé typy hvězd bývá nejvyužívanější a nejlepším zdrojem informací spektrální klasifikace.

4.4 Popis oblastí HR diagramu

Vzhledem k velkému rozmezí teplot a zářivého výkonu je dobré zavést dělení. Bylo by neefektivní uvádět tyto údaje včetně spektrálního typu pro každou hvězdu, zvláště, když se jednotlivé údaje v čase mění. V HR diagramu existují oblasti, skrze které v průběhu života hvězda projde. Jednotlivá umístění pak záleží na vlastnostech hvězdy, jako je stáří nebo hmotnost.

Probereme si nyní jednotlivé oblasti. Pro přehlednost nám poslouží obr. 5. Nutno



Obr. 5: Hertzsprungův-Russelův diagram s jednotlivými oblastmi. Tenká čára na pravé straně představuje Halasiho linii.

podotknout, že některé HR diagramy se mohou lišit, zejména pak posunutím stupnic. Jednotlivé oblasti se však nacházejí přibližně na stejných místech. V novějších typech mohou být oblasti rozděleny do více podoblastí. Tuto různorodost můžeme přisoudit zejména objevům nových hvězd, detailnější analýze a práci různých autorů v průběhu času.

Oblast nejmenších a zároveň nejstarších hvězd nám znázorňuje oblast bílých trpaslíků. V HR diagramu je nalezneme v levé spodní oblasti. Jedná se o jádra vyhořelých hvězd, ve kterých již neprobíhají termonukleární reakce. Rozsah absolutní hvězdná velikost se pohybuje od +2^M do +14^M a spektrální typ od O po F. Teplota může být velmi vysoká. Zejména nově vzniklý bílý trpaslík může dosáhnout teploty přesahující 100 000 K. Jelikož bílý trpaslík vyzařuje své vnitřní teplo, postupem času se ochlazuje. Zhruba za 100 miliard let bílý trpaslík vychladne a stane se černým trpaslíkem.

Nejvíce hvězd se nachází na hlavní posloupnosti, zhruba (90 %) a stráví zde většinu svého života. Jde o velmi rozmanitou oblast. Hvězdy dosahují teplot od 3 000-60 000 K a spektrální třídy odpovídají všem typům od O po M. V HR diagramu se hvězdy nacházejí

podél křivky táhnoucí se vrchního levého rohu pro nejteplejší a nejjasnější hvězdy do spodního pravého rohu, kde jsou hvězdy chladnější.

V nižších části hlavní posloupnosti (pro hvězdy o hmotnosti $< 1,7 M_{\odot}$) se vodík účastní p-p řetězci. Ve hvězdách hmotnějších (v horní části posloupnosti) probíhá uhlíkový cyklus. [11]

Na hlavní posloupnosti se nachází naše Slunce a zůstane tak další 5 miliard let. Poté spotřebuje svou zásobu vodíku a přesune se do oblasti obrů.

Po přeměně vodíku začne hvězda ve svém jádře spotřebovávat hélium. Hvězdy v oblasti obrů se vyznačují velkým průměrem tvořený řídkou atmosférou. Absolutní hvězdná velikost je větší než 0^M .

Zářivost hvězdy je přímo úměrná druhé mocnině poloměru, z čehož plyne, že obři mají přibližně stokrát větší poloměry než hvězdy téže spektrální třídy na hlavní posloupnosti. [12]

V HR diagramu se oblast obrů nachází nad hlavní posloupností mezi spektrálním typem F až M a absolutní hvězdnou velikostí 0 až -5 . V pravé části oblasti obrů se nachází hvězdy s nižší teplotou a spektrálním typem tzv. červení obři. Na pravé části jsou modří obři s vyšší teplotou a spektrálním typem O a B.

Nejvrchnější oblast zabírá oblast veleobrů. Jde o hvězdy dostatečně hmotné, aby v jejich jádru nastala fúze hélia a nadále se spotřebovávaly těžší prvky až po železo. Absolutní hvězdná velikost se pohybuje mezi -5^M až -9^M . Vzhledem k velkým rozměrům a hmotnostem těchto hvězd probíhá spotřebovávání velmi rychle. Doba života se pohybuje od stovek tisíc po několik milionů let. Podobně jako u obrů můžeme veleobry rozdělit na modré a červené. Velmi řídkce existují i žlutí veleobři se spektrální třídou F až G. Nad oblast veleobrů můžeme zařadit hyperobry, což jsou hvězdy s maximální možnou velikostí a hmotností.

Na pravé straně se nachází Halashiho linie. Jedná se o mez oddělující fáze vzniku hvězd při vývoji. Za touto linií se nachází hvězdy, které nezažehly termonukleární reakce.

5 Hvězdné systémy

V první části popisu hvězdných systémů se budeme zabývat hvězdami, kde má celý systém dvě složky. Dvojhvězdy můžeme rozdělit do několika druhů, jenž si následně podrobněji rozebereme. Prvním typem jsou dvojhvězdy optické. Podíváme-li se dalekohledem na noční oblohu, jeví se nám tyto hvězdy velmi blízko sebe, přestože jejich vzdálenost je tak velká, že neovlivní samotný vývoj. Z tohoto hlediska pro nás nejsou optické dvojhvězdy příliš potřebné a blíže budeme rozebírat dvojhvězdy fyzikální. Fyzikální dvojhvězdy obíhají kolem společného těžiště a vývoj obou složek je vzájemně ovlivněn přítomností druhé hvězdy. Rozdělit je můžeme na dvojhvězdy vizuální, astrometrické, zákrytové a spektroskopické, přičemž jednotlivé druhy se mohou mít společné vlastnosti.

5.1 Vizuální dvojhvězdy

Jsou-li obě složky od sebe dostatečně vzdáleny, lze je rozlišit dalekohledem. Limitní rozlišovací schopnost dalekohledu však musí být menší nežli úhlová vzdálenost η obou složek. Pro výpočet úhlové vzdálenosti využijeme vztahu:

$$\eta > 1,22 \frac{\lambda}{D}, \quad (20)$$

kde λ je vlnová délka a D průměr vstupní pupily objektivu. Konstanta 1,22 platí pro dalekohled, v případě interferometru můžeme užít 0,5. Pomocí měření lze zjistit dobu oběhu P , velikost hlavní poloosy a , a vzdálenosti od těžiště r_1 a r_2 , pro které je vzdálenost $r_1 + r_2$ vzdálenost obou složek. Pomocí poměru vzdáleností

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{M_1}{M_2} \quad (21)$$

zjistíme poměr hmotnosti M_1 a M_2 jednotlivých složek. Z třetího Keplerova zákona pak plyne:

$$P^2 = \frac{4\pi^2(r_1 + r_2)^3}{G(M_1 + M_2)}, \quad (22)$$

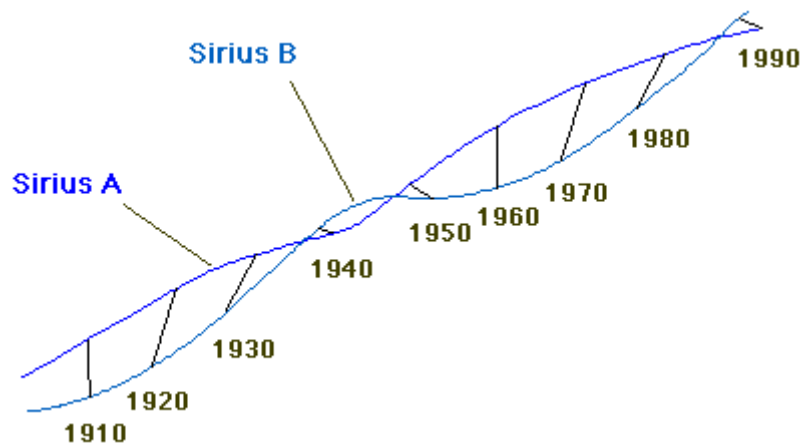
kde G je gravitační konstanta a P oběžná doba hvězdy. Pokud vzdálenost $r_1 + r_2$ nahradíme hlavní poloosou a , lze tento vztah zjednodušit na

$$M_1 + M_2 = \frac{a^3}{P^2}. \quad (23)$$

Dále uvažujme dvojhvězdy, které mají sklon dráhy vůči pozorovateli je menší nežli 90° .

5.2 Astrometrické dvojhvězdy

Při sledování vizuálních dvojhvězd jsme viděli a zkoumali obě složky. V případě astrometrických dvojhvězd zaznamenáváme pouze jednu složku dvojhvězdy. Druhá složka je buď dostatečně vzdálená, nebo malá, že ji nezaznamenáme. Její přítomnost však lze odhadnout z gravitačních účinků na první složku. Obě složky se pak pohybují kolem společného těžiště. Poloha pozorované hvězdy je zaznamenávána a porovnávána se vzdálenějšími hvězdami. Astrometrická hvězda pak na obloze v průběhu času koná pohyb po křivce (obr. 6).



Obr. 6: Pohyb hvězd Sirius A a Sirius B

5.3 Spektroskopické dvojhvězdy

Pokud jsou obě složky dvojhvězdného systému příliš blízko sebe natolik, že nedokážeme rozlišit jednotlivé hvězdy, užíváme tzv. Dopplerův posuv spektrálních čar

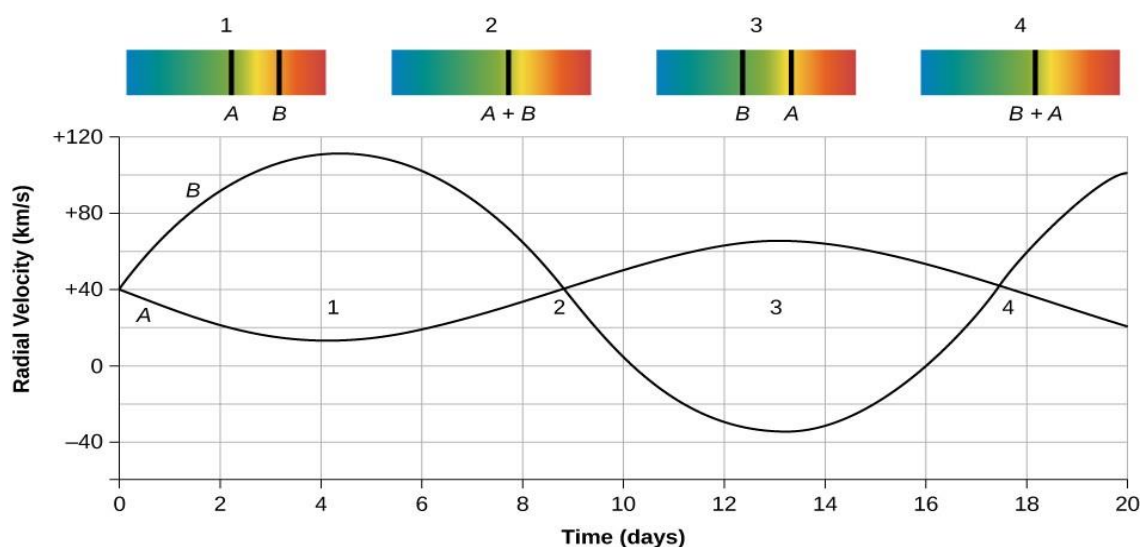
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}, \quad (24)$$

kde λ_0 odpovídá laboratorní vlnové délce a λ vlnové délce naměřené. Rozdíl vlnových délek rozestupu čar odpovídá rozdílu okamžitých radiálních rychlostí obou složek dvojhvězdy. [9]

Následnou úpravou vztahu dostaneme

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v_r}{c} = \frac{v \sin i}{c}, \quad (25)$$

kde v_r odpovídá okamžité radiální rychlosti hvězdy, i sklonu oběžné dráhy a c rychlosti světla. Máme-li k dispozici dostatečné množství informací z pozorování, lze sestavit křivku radiálních rychlostí, tedy křivku změny rychlosti v závislosti na čase.

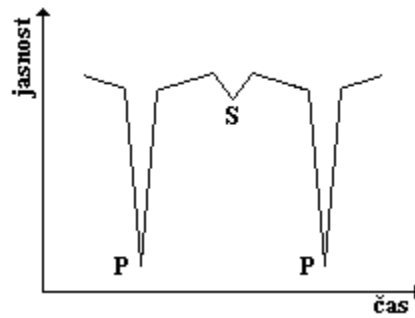


Obr. 7: Schéma představující změnu radiální rychlosti dvojhvězdy vzhledem k pozorovateli.

Uvedeme si nyní jeden příklad. Na obrázku 7 můžeme vidět radiální křivku dvojhvězdy. Křivka A odpovídá hmotnější složce a křivka B složce méně hmotné. Nárůst a pokles obou křivek značí, jak se mění rychlost vůči pozorovateli. Pokud křivka klesá, rychlost se snižuje, naopak pokud křivka stoupá, rychlost se zvyšuje. V případě hvězdy B po desátém dni křivka klesá do záporných hodnot, což značí že se hvězda přibližuje. Hvězda A do záporných hodnot neklesne a neustále se vzdaluje. V bodech 1 a 3 leží hvězdy v jedné přímce vůči pozorovateli. V bodech 2 a 4 jsou stejně daleko.

5.4 Zákrytové dvojhvězdy

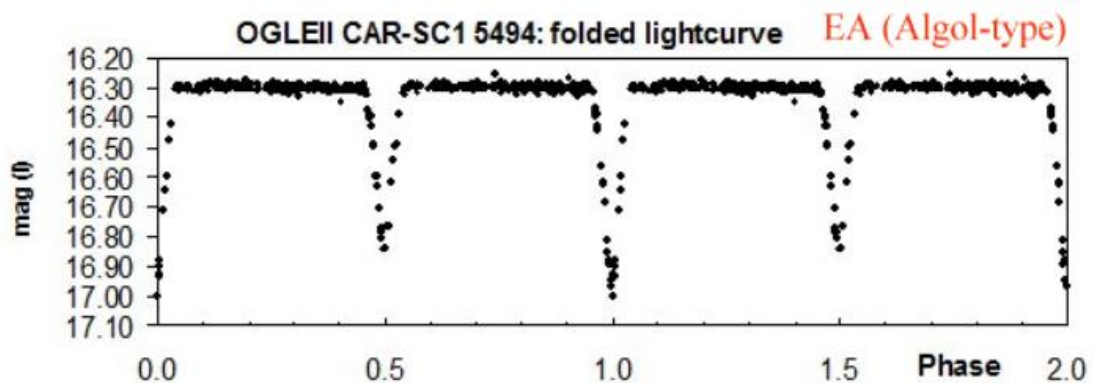
Posledním typem dvojhvězd jsou tzv. zákrytové dvojhvězdy. Jedná se o speciální případ spektroskopických dvojhvězd, pro které je sklon dráhy $i \approx 90^\circ$. Projevují se periodickými změnami jasnosti, díky čemuž mohou pozorovateli připadat jako proměnné hvězdy. Ty však mění svou jasnost z jiných důvodů. Budeme-li sledovat a zaznamenávat průběh změny jasnosti v závislosti na čase, získáme světelnou křivku. Tvar světelné křivky je ovlivněn několika faktory, zejména typem pozorovaného objektu, dobou pozorování nebo počtem a jasností složek, který objekt obsahuje. Na světelné křivce lze rozeznat zákryt jednotlivých složek. Dojde-li k zákrytu jasnější složky složkou tmavší výrazně se sníží jasnost a nastává primární minimum. V opačném případě nastává sekundární minimum. Viz. obrázek 8.



Obr. 8: Graf světelné křivky. Písmena P značí primární maxima, písmena S primární minima.

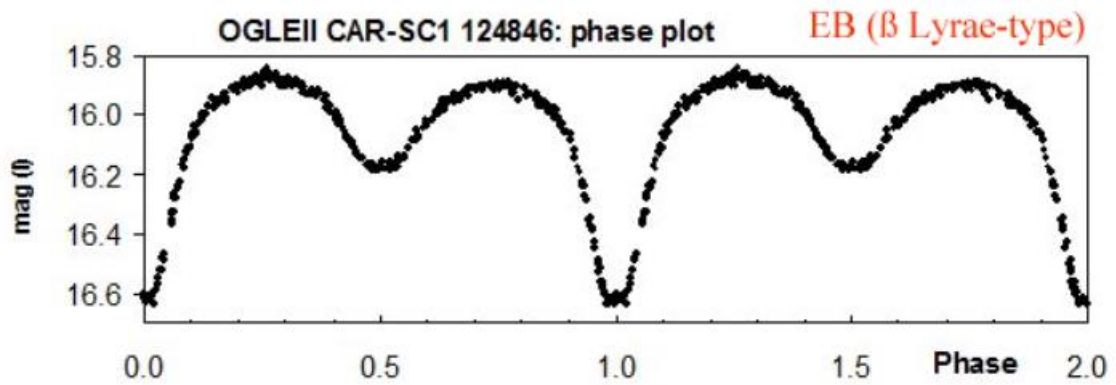
Zkoumání zákrytových dvojhvězd probíhá pomocí CCD kamery, která snímá proměnnou jasnost dvojhvězdy. Výstupem pak je světelná křivka, která bývá hlavním zdrojem informací o zákrytových dvojhvězdám. Pomocí tvaru světelné křivky lze rozdělit zákrytové dvojhvězdy do tří kategorií.

Typ Algol je pojmenován podle hvězdy Algol (β Persei) ze souhvězdí Persea. Křivky mají prudký vzestup i sestup. Ten je typický pro dvojhvězdy, jejichž složky mají kulový tvar.



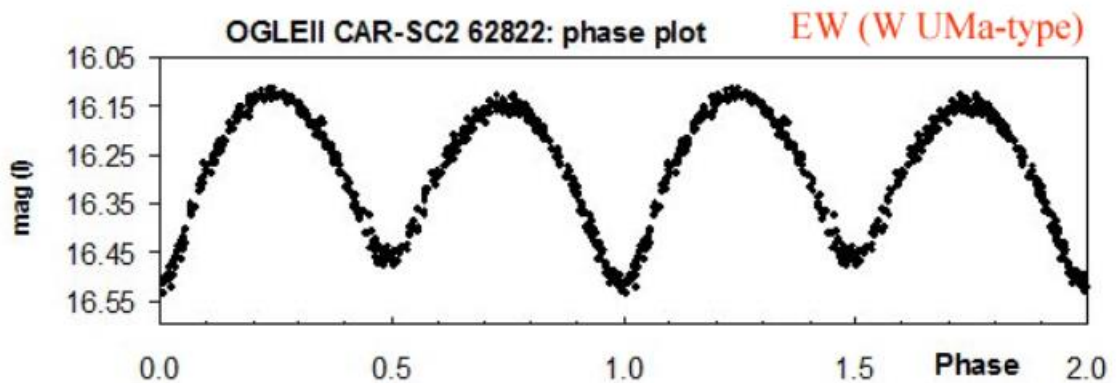
Obr. 9: Graf světelné křivky zákrytové hvězdy typu Algor. [13]

Typ β Lyrae nese pojmenování podle hvězdy ze souhvězdí Lyry. Světelná křivka je mnohem plynulejší nežli v předchozím případě. Výrazně se liší primární a sekundární minima. Složky systému mívají elipsoidní tvar.



Obr. 10: Graf světelné křivky zákrytové hvězdy typu β Lyrae. [13]

Typ W Ursae Maioris nese pojmenování podle hvězdy ze souhvězdí Velké medvědice. Hvězdy systému mají přibližně stejnou velikost a kratší periodu.



Obr. 11: Graf světelné křivky zákrytové hvězdy typu W Ursae Maioris. [13]

5.4.1 Rocheova mez

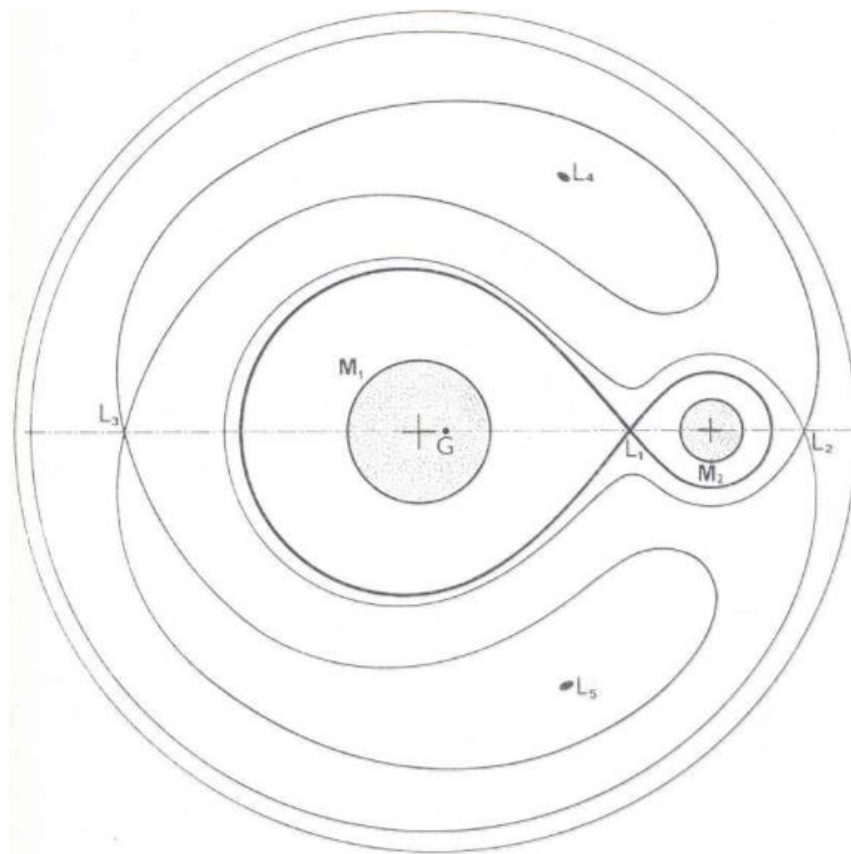
Hvězdy nemají konstantní poloměr. Zejména v závěrečných fázích hvězdného vývoje, když se hvězda přesunuje z hlavní posloupnosti do oblasti obrů, se mění její poloměr. V případě těsných dvojhvězdy pak začne hmota jedné složky přetékat na druhou.

Představme si dvě hvězdy v kartézské soustavě souřadnic x, y, z rotující kolem společného těžiště úhlovou rychlostí ω . V každém bodě pak působí gravitační síla obou těles o hmotnosti M_1, M_2 , jenž jsou od bodu vzdáleny r_1 a r_2 . Další působící silou je odstředivá síla, která vyvolává odstředivé zrychlení $r\omega^2$. Sečtením všech členů získáme vztah:

$$\varphi(x, y, z) = \frac{\kappa M_1}{r_1} + \frac{\kappa M_2}{r_2} + \frac{r^2 \omega^2}{2}, \quad (26)$$

kde φ představuje funkci gravitačního potenciálu pro jednotlivé body, které vytvářejí potenciální hladiny.

Čerchovaná čára na obrázku 12 značí osu x procházející těžištěm obou hvězd. Písmenem G určeno těžiště systému. M_1 a M_2 značí hmotnosti složek kde $M_1 > M_2$. Důležitá je zde tučná čára značící tzv. Rocheovu mez. Uvnitř této oblasti je hmota držena gravitací tělesa. Bod L_1 značí Lagrangeův librační bod, kde při překročení hranice dojde k přenosu hmoty z jednoho tělesa na druhé. V případě, že by hmota dosáhla bodů L_2 nebo L_3 , mohla by zcela opustit hvězdný systém.



Obr. 12: Průřez ekvipotenciálními plochami v soustavě dvou těles. [9]

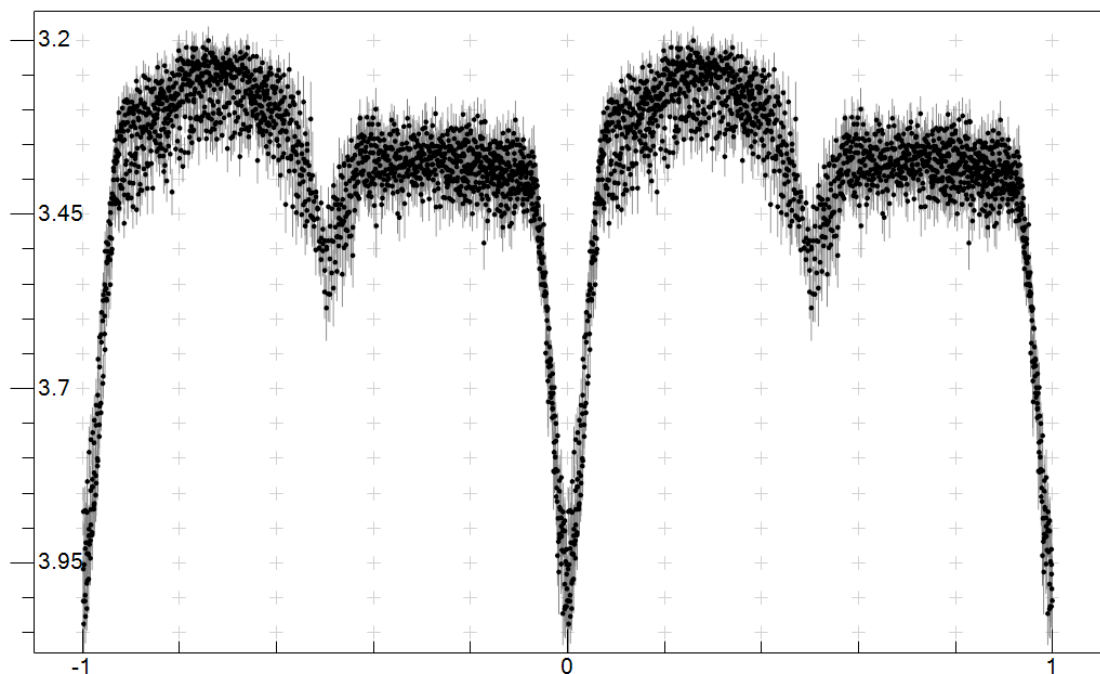
5.4.2 Světelná křivka

Světelná křivka bývá v astronomii využívána ke zkoumání objektů s proměnnou jasností jako jsou proměnné hvězdy, zákrytové dvojhvězdy, novy a supernovy.

Sestrojení světelné křivky nebývá obtížné, ale časově náročné. Dalekohledem se světlocitlivým detektorem monitorujeme objekt po dobu alespoň jedné periody, která může trvat i více nežli několik dnů. Pro dobré výsledky měření několikrát opakujeme.

Nyní si ukážeme příklad světelné křivky (obr. 13). Jak můžeme vidět, podle ostrých maxim a minim se jedná světelnou křivku typu Algol.

Pro některé dvojhvězdy lze využít křivku radiální rychlosti společně se světelnou křivkou a získat tak komplexnější informace o systému.



Obr. 13 Světelná křivka proměnné hvězdy CzeV1000. Hluboká minima jasnosti jsou způsobena zákryty svítivější složky méně svítivou hvězdou. [14]

5.5 Hvězdokupy

Hvězdokupou nazveme seskupení hvězd soustředěné do menšího prostoru se společnými vlastnostmi. Hvězdy se mohou gravitačně ovlivňovat a předpokládá se, že v jednotlivých hvězdokupách prošli společným vývojem. Hvězdokupy můžeme rozdělit do tří skupin na kulové hvězdokupy, otevřené hvězdokupy a hvězdné asociace. Jednotlivé typy hvězdokup se mohou lišit umístěním v galaxii, počtem hvězd a mírou gravitace, kterou jsou k sobě jednotlivé hvězdy vázány. Každou skupinu si podrobněji rozebereme.

5.6 Hvězdné asociace

Hvězdnou asociaci můžeme popsat jako hvězdokupu s malou prostorovou hustotou. Hvězdné asociace mají společné fyzikální vlastnosti, čas a místo vzniku, díky čemuž jsou jednotlivé hvězdy ve stejné fázi hvězdného vývoje. Rozpoznání asociace může být obtížné kvůli velkému plošnému rozložení. Průměrná velikost se pohybuje mezi 100–200 světelných let.

Jsou to nejméně kompaktní, nejmladší, nestabilní a rozpadající se hvězdné systémy.
[12]

Vzhledem ke stáří, které se pohybuje okolo pěti milionů let jsou i jednotlivé hvězdy poměrně mladé. V HR diagramu se tyto hvězdy nacházejí v pravém dolním okraji hlavní posloupnosti. Kvůli gravitační nestabilitě se životní doba celé asociace pohybuje okolo deseti milionů let. Jednotlivé hvězdy asociaci opouštějí a putují dál galaxií. Odhady ukazují, že se v naší Galaxii nachází až 1000 asociací, přestože dodnes jich známe pouze pár set. Ve starších učebních textech se asociace dělí na dvě skupiny podle spektrálního typu. Dnes se můžeme setkat s dělením na následující skupiny:

OB asociace – Převažují hvězdy spektrálního typu O a B2 s vysokou hmotností a svítivostí.

R asociace – Skládají se z jasných mladých hvězd o hmotnosti mezi 3–10 hmotnosti Slunce. V okolí těchto hvězd se nachází oblaka prachu, která pohlcují a odrážejí světlo.

T asociace - Seskupení hvězd s menší hmotností a svítivost. Často se nacházejí v mlhovinách z vodíku a hélia, kde se zrodili. Pojmenovány jsou podle proměnné hvězdy T-Tauri ze souhvězdí býka.

..

5.7 Otevřené hvězdokupy

Otevřené hvězdokupy patří mezi seskupení hvězd, jenž mají nepravidelný tvar. Celkový počet hvězd v jednotlivých hvězdokupách se pohybuje od několika desítek až po tisíce, proto i hmotnosti celé soustavy mohou být rozdílné. Vznikají v obřích molekulárních mračnecích, díky čemuž mívají jednotlivé hvězdy stejné chemické složení a stáří. Mezihvězdný plyn a prach, který se v molekulárních mračnecích nachází, nám také dává informace o stáří hvězdokupy. V případě mladých hvězdokup se mezi hvězdami vyskytuje neutrální vodík, jehož množství klesá se stářím hvězdokupy.

Stejně jako asociace jsou i otevřené hvězdokupy gravitačně nestabilní objekty s krátkou dobou života okolo několika milionů let, výjimečně až miliarda let. V průběhu času mohou některé z hvězd hvězdokupy zcela opustit. Mluvíme pak o tzv. vypařování hvězdokupy. Z tohoto důvodu jde o poměrně mladé objekty se stářím několika desítek až stovek milionů let. Nachází se nejčastěji u galaktické roviny a ve spirálních ramenech galaxie (obr. 15). V naší Galaxii se odhadem nachází přibližně 110 000 otevřených hvězdokup.

Podle B. E. Markarjana můžeme otevřené hvězdokupy rozdělit do tří základních skupin, a to podle spektrálních tříd hvězd, které je tvoří. Typ O obsahuje hvězdy raných spektrálních tříd O a B1, typ B se skládá z hvězd spektrálních tříd B1 až b5 a typ A obsahuje hvězdy tříd B až A3.

Další dělení zavedl Robert Trumpler podle počtu hvězd v hvězdokupě, koncentrace a jasnosti jednotlivých členů. Množství hvězd bylo pospáno písmeny p (poor = chudý) pro hvězdokupy s nízkým počtem hvězd, m (medium = střední) pro hvězdokupu do sta hvězd a r (rich = bohatý) pro větší počet. Koncentrace hvězd od středu kupy byla označena římskými číslicemi. Arabskými číslicemi rozsah jasnosti jednotlivých hvězd. Později Trumpler zavedl další dělení podle spektrálního typu. Rozdělil hvězdy podle písmen o, b, a, f, g, pro spektrální typ nejjasnějších hvězd a čísel 1, 2, 3, podle umístění v diagramu spektrum-svitivost. Pro 1 leží hvězdy na hlavní posloupnosti, 2 objevují se červení obři, 3 převažují hvězdy typu G až M.

5.8 Kulové hvězdokupy

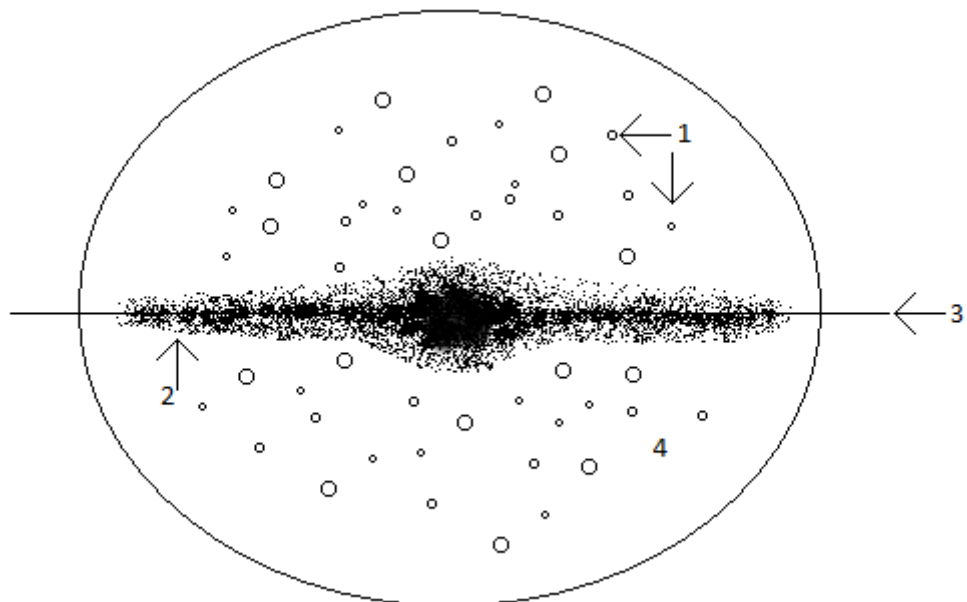
Kulové hvězdokupy se od asociací a otevřených hvězdokup značně liší. Jak napovídá název, kulové hvězdokupy mají kulový tvar a jsou sféricky symetrickými objekty o průměru 50-150 světelných let.

U mnoha kup bylo zjištěno zploštění a poměr největšího a nejmenšího průměru leží mezi 1 a 0,4. Některé hvězdokupy mají téměř kulové jádro a zploštělé vnější oblasti. [9]

Počet hvězd se pohybuje od několika tisíců až po milióny hvězd. Gravitačně jde o velmi stabilní objekty s dlouhou dobou života mezi 10^9 a 2×10^{10} let. Patří mezi jedny z nejstarších objektů naší Galaxie. Jednotlivé hvězdokupy se začaly formovat už při jejím vzniku před dvanácti miliardami let. Řada hvězd již opustila hlavní posloupnost a nachází se v oblasti červených obrů. Přestože vlivem gravitačního zrychlení a slapových sil mohou hvězdokupu některé hvězdy opustit, není tento úbytek natolik znatelný jako u otevřených hvězdokup a asociací, které disponují menším počtem hvězd. Pohyb jednotlivých hvězd není chaotický. Všechny obíhají kolem hmotného středu hvězdokupy.

Nacházejí se v galaktickém halo a jsou nejvzdálenějšími pozorovatelnými objekty v galaxii.

Počty kulových hvězdokup se v jednotlivých galaxiích mohou značně lišit. V galaxii M31 v souhvězdí Andromedy se odhaduje okolo 500 hvězdokup, v galaxii M87 v souhvězdí Panny počet přesahuje 10 000. Naše Galaxie zatím nebyla zcela prozkoumána a počet nalezených se pohybuje okolo 150. Skutečný počet je zatím předmětem zkoumání, odhady však hovoří okolo 1000 kup.



Obr. 14: Schéma průřezu Galaxie. 1. Kulové hvězdokupy rozprostřené v galaktickém halo 2. Galaktický disk 3. Galaktická rovina 4. Galaktické halo

Stáří hvězdokupy nelze určit jako v předešlém případě. Mezi hvězdami nebyla zjištěna mezihvězdná látka. Místo toho využíváme diagram barva – svítivost, kde určení stáří bude popsáno v kapitole 6.2.2. Významnou roli hrají proměnné hvězdy typu RR Lyrae. Jde o typ pulzující proměnné hvězdy s krátkou periodou změny jasu. Spolu s absolutní hvězdnou velikostí, která se pohybuje v rozmezí mezi $0^M - 0,5^M$ se stały hvězdy typu RR Lyrae vhodným prostředkem pro určení vzdálenosti kulových hvězdokup.

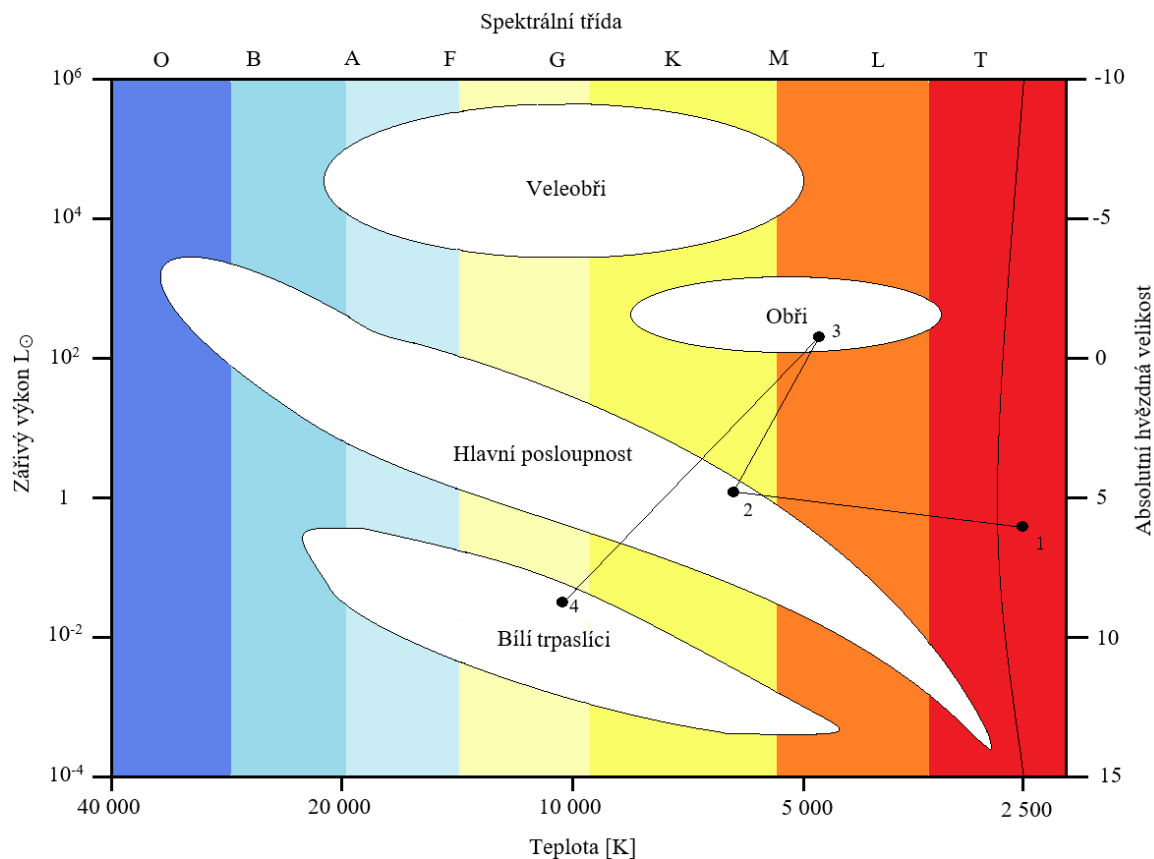
6 Vývoj hvězdných systémů v HR diagramu

V poslední kapitole si probereme, jak se jednotlivé hvězdné systémy vyvíjejí, a jejich řazení v Hertzsprungově-Russelově diagramu. Pro úplnost si nejprve vysvětlíme vývoj osamocené hvězdy. Získáme tak dobrou představu o vývoji hvězdy a některé informace budeme moci užít i při vývoji dvojhvězd.

O vývoji hvězdy rozhoduje mnoho faktorů. Nejdůležitějším je hmotnost samotné hvězdy. Je známo, že hmotnější hvězda při termonukleárních reakcích spaluje rychleji své palivo a délka života se mnohonásobně zkracuje. Délka života nejmotnějších hvězd je řádově několik milionů let, v případě málo hmotných hvězd jde o miliardy let. Dalším faktorem je metalicita, což je procentuální zastoupení těžších prvků vzhledem k vodíku a heliu.

Pro jednoduchou ilustraci uvažujme hvězdu o hmotnosti Slunce. V počátku vzniká hvězda v molekulárním mezihvězdném mračnu tvořeném plynem a prachem. Vlivem gravitačního smršťování se hmota začne kumulovat a zhušťovat. Vzniká kulovitý útvar zvaný protohvězda (obr. 15 bod 1). Postupným gravitačním smršťováním se hmota zahřívá. Silně zářící protohvězda se v HR diagramu nachází nad hlavní posloupností. Při teplotách milionů kelvinů překonají jádra vodíku elektrostatické síly, dochází ke srážkám a zažehnou se termonukleární reakce, při kterých dochází k přeměně vodíku na helium. Takto vzniklá hvězda se nalézá na hlavní posloupnosti (obr. 15 bod 2). Zde setrvá dalších 9 – 12 miliard let ve stabilním stavu. Po přeměně veškerého vodíku na helium se začne jádro hvězdy hroutit a zahřívát až nastane přeměna helia na těžší prvky. Zároveň se poloměr hvězdy mnohonásobně zvětší (obr. 15 bod 3). V případě Slunce bude poloměr sahat až za oběžnou dráhu Venuše.

Po spotřebování veškerého paliva hvězda již nemá možnost získávat energii a oddělí se vrchní vrstvy hvězdy, ze kterých se postupem času stane planetární mlhovina. Ta se nadále rozpíná rychlostí několika kilometrů za sekundu. Hustota plynu se neustále snižuje a za několik desítek tisíc let se hustota plynu vyrovná s hustotou plynu v mezihvězdném prostředí až mlhovina zanikne. Z původní hvězdy na místě zůstane jádro tvořené degenerovaným plynem, který bude postupně chladnout. Tento objekt se nazývá bílý trpaslík (obr. 15 bod 4).



Obr. 15: HR diagram s vyznačeným postupem vývoje hvězdy o hmotnosti Slunce.

6.1 Dvojhvězdy

Vývoj dvojhvězd se značně liší od vývoje osamocené hvězdy. Hlavním rozdílem je přesun hmoty hmotnější složky na složku méně hmotnou. Při pozorování se pak můžeme setkat s dvojhvězdami, kde se hmotnější složka nachází v nižší fázi vývoje. Tento fakt je v rozporu s tvrzením, že se hmotnější hvězdy vyvíjejí rychleji vlivem rychlejšího spalování jaderného paliva. Zároveň se budeme zabývat těsnými dvojhvězdami, kdy může dojít k přetékání z jedné složky na druhou.

6.1.1 Vývoj menších dvojhvězd

V případě malých hvězd může nastat hned několik situací. Pokud při vzniku nemá hvězda dostatečnou hmotnost, alespoň $0,08M_{\odot}$, nedosáhne potřebné teploty k zažehnutí termonukleárních reakcí. Ta se pohybuje v řádech desítek milionů stupňů. Americká astronomka Jill Tarter vymyslela pro toto těleso označení hnědý trpaslík. Pokud bychom si definovali hvězdu, je jedním z kritérií, že v jejím jádře probíhají termonukleární reakce. Z tohoto důvodu nemůžeme vzniklý objekt označit jako hvězdu. Proč se tedy hnědými trpaslíky zabývat?

Prvním důvodem je, že mají své místo v HR diagramu. Kvůli nízké povrchové teplotě a zářivému výkonu se nachází v pravém dolním rohu. Druhým a podstatnějším důvodem je, že i hnědý trpaslík může být součástí hvězdného systému. Představme si dvojhvězdu, kde první složkou je hnědý trpaslík a druhou hvězda o hmotnosti Slunce. Průběh života hvězdy a trpaslíka se budou značně lišit. Hvězda bude procházet obvyklým vývojem, popsáným v úvodu této kapitoly. Hnědý trpaslík nemůže kvůli nízké teplotě v jádru fúzovat vodík. Ve svém stavu setrvává a chladne. Mohou se vzájemně ovlivnit?

Jelikož hnědí trpaslíci nerostou v poloměru, je nemožné, aby hmota trpaslíka vyplnila Rocheovu mez. [15]

Lze tedy předpokládat, že hnědý trpaslík nezasáhne do vývoje svého společníka. Oproti tomu hmotnější složka se dostane do fáze, kdy spotřebuje veškerý vodík a zvětší svůj poloměr. Jsou-li obě složky dostatečně blízky, vyplní se Rocheova mez a dojde k přenosu hmoty. O dalším vývoji prozatím není dostatek věrohodných vědeckých informací.

Jednou z možností by bylo, že přenos dostatečného množství hmoty způsobí zažehnutí fúze vodíku. Hnědý trpaslík by se stal červeným trpaslíkem a přesunul na hlavní posloupnost. [16]

6.1.2 Vývoj středních dvojhvězd

Uvažujme vývoj středních dvojhvězd o hmotnosti do $12 M_{\odot}$. První složka bude mít značně menší hmotnost nežli druhá. Z počátku se obě hvězdy nachází v pravém dolním rohu HR diagramu v oblasti za Hyashiho linií (obr. 16 body 1 a 2). Vývoj druhé složky, kdy je hvězda na hlavní posloupnosti (obr. 16 bod 3), je podstatně rychlejší a po spotřebování vodíku a hélia se z hvězdy stává rudý obr (obr. 16 bod 4). Poloměr druhé složky se zvětšuje, hvězda začíná vyplňovat Rocheův lalok a přetékat skrze Langrangeův librační bod na méně hmotnou hvězd. Látka okolo méně hmotné hvězdy rotuje v tzv. akrečním disku. Díky přesunu hmoty začne méně hmotná hvězda zvětšovat svou hmotnost a poloměr.

Pokud je hmotnost dříve hmotnější složky menší nežli Chandrasekharova mez, která odpovídá $1,44 M_{\odot}$, zůstává hvězda stabilní a stává se z ní bílý trpaslík (obr. 16 bod 5). V případě překročení této meze hvězda začne spotřebovávat uhlík a přesune se do oblasti veleobrů (obr. 16 bod 6). Nežli hvězda spotřebuje své palivo, nachází se v hydrostatické rovnováze, kdy je gravitační síla kompenzována vztlakovou silou. Po vyčerpání paliva

gravitační síla převládne nad tlakem plynu a elektrony se vtlačí do jader atomu, kde se spojí s protony a vzniká degenerovaný neutronový plyn. Jádro hvězdy se smrští do útvaru, kterému říkáme protoneutronová hvězda. Pádem vnější vrstvy na protoneutronovou hvězdu vznikne mohutná rázová vlna a hvězda vybuchá jako supernova.

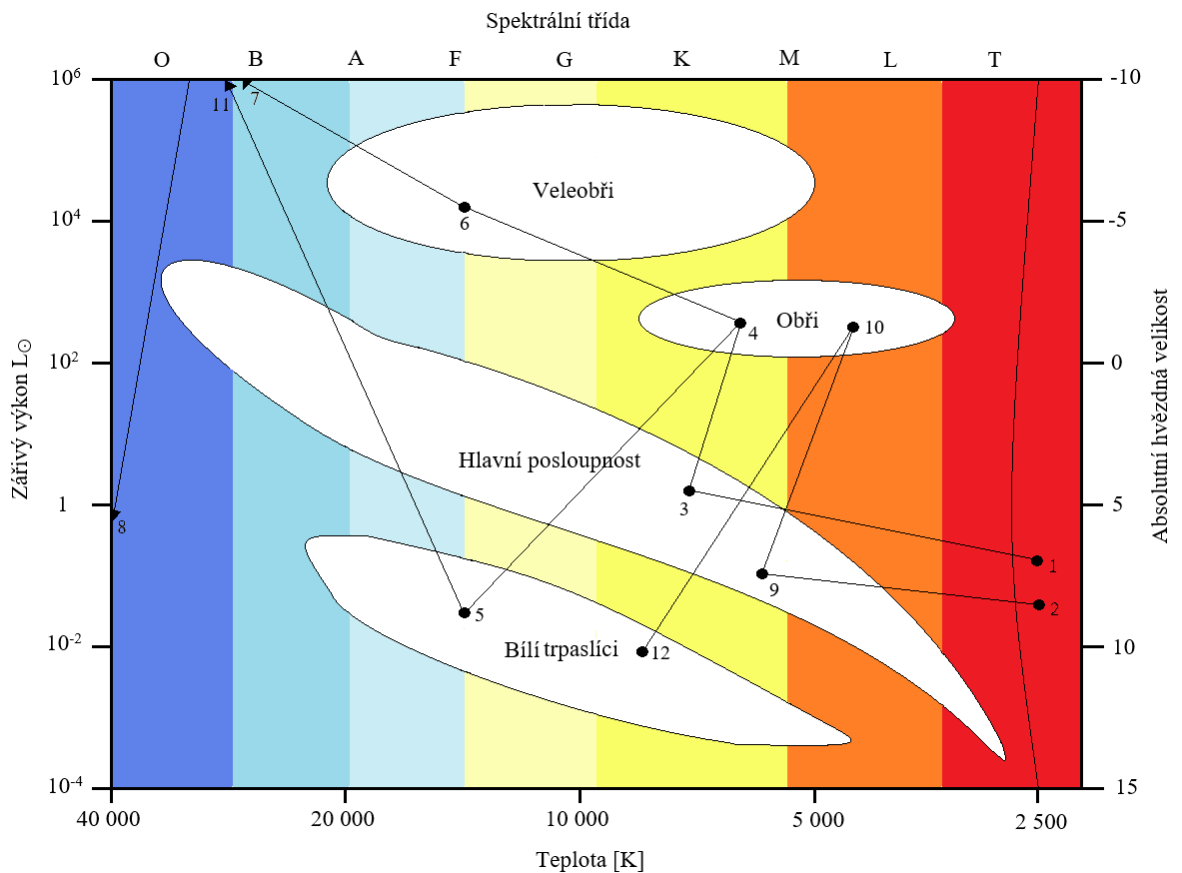
Kvůli vysokému zářivému výkonu a teplotě leží supernovy mimo oblast HR diagramu nad levým horním rohem (obr. 16 bod 7). Po explozi zůstane neutronová hvězda. Teplota neutronových hvězd může dosahovat až 10^7 K. [17]

Vzhledem k malému poloměru, který se pohybuje okolo 10 km, mají nízký zářivý výkon. S přihlédnutím k teplotě a zářivému výkonu leží neutronové hvězdy mimo oblast HR diagramu za levým dolním rohem (obr. 16 bod 8). S vývojem dvojhvězdy, kde jednu složku tvoří neutronová hvězda, se seznámíme v další kapitole.

Dále se budeme zabývat situací, kdy Chandrasekharova mez není překročena a druhá složka se stala bílým trpaslíkem.

Pokud se hmotnost hvězdy pohybuje okolo $0,25 M_{\odot}$, nemusí projít stádiem rudého obra a z hlavní posloupnosti se rovnou přesune do oblasti bílých trpaslíků. [18]

Díky přenosu látky může mít dříve méně hmotná hvězda hmotnost srovnatelnou s počáteční hmotnější složkou. Vývoj dále pokračuje, dokud se i první složka po spotřebování paliva na hlavní posloupnosti (obr. 16 bod 9) nestane rudým obrem (obr. 16 bod 10). Zvětší se její poloměr a hmota začne přetékat zpět na bílého trpaslíka. I zde bude záležet, zda kvůli nárůstu hmotnosti nepřekročí Chandrasekharovu mez. Pokud se tak nestane, příval nové hmoty může znovu zažehnout termonukleární reakce bílého trpaslíka. Hvězda vybuchuje jako nova, mnohonásobně zvětší svou jasnost a přesouvá se nad levý horní roh (obr. 16 bod 11). V důsledku explozí a přetékání látky mezi hvězdami se okolo dvojhvězdy utváří planetární mlhovina. Z méně hmotné složky zůstává bílý trpaslík (obr. 16 bod 12).



Obr. 16: HR diagram s vyznačeným postupem vývoje dvojhvězdy střední hmotnosti.

6.1.3 Vývoj velkých dvojhvězd

V poslední části budeme probereme vývoj hvězd o hmotnostech vyšších nežli $12M_{\odot}$. Pro naši představu postačí hvězdy o hmotnostech 12 a $25 M_{\odot}$.

Samotný vývoj je z počátku obdobný jako v předchozím příkladu. Začínají svůj život za Hyashiho linií (obr. 17 body 1 a 2), kde se po zažehnutí termonukleárních reakcí přesouvají na hlavní posloupnost (obr. 17 body 3 a 4). Hmotnější hvězda spotřebovává vodík, dokud své zásoby zcela nevyčerpá (obr 17 bod 5). Posléze se vlivem gravitační síly začne jádro hvězdy hroutit až se zažehnou další termonukleární reakce, při kterých dochází ke fúzování helia. Zároveň se hvězdě zvětší poloměr a dostává se do oblasti veleobrů (obr. 17 bod 6). Zvětšením poloměru dochází k vyplnění Rocheova laloku a přes librační bod začne hmota přetékat na hvězdu méně hmotnou. Z hmotnější hvězdy zůstává heliové jádro, které pokračuje ve spalování paliva. Postupně proběhne ještě několik zažehnutí termonukleárních reakcí, dokud se v jádře neutvoří železo. Další fúzování již není možné a hvězda exploduje jako supernova (obr 17 bod 7).

Pokud je dostatečně hmotná, gravitační síla překoná ostatní síly a hvězda se začne

stlačovat. Pokud hmota překoná Schwarzschildův poloměr

$$r_s = \frac{2G}{c^2}, \quad (27)$$

kde c je rychlost světla a G gravitační konstanta, je stlačena do gravitační singularity a vzniká černá díra. Ty se na HR diagramu nenachází. Mohli bychom najít vhodné místo? Černé díry nevyzařují žádné světlo. Nelze určit spektrální typ, ani zářivý výkon.

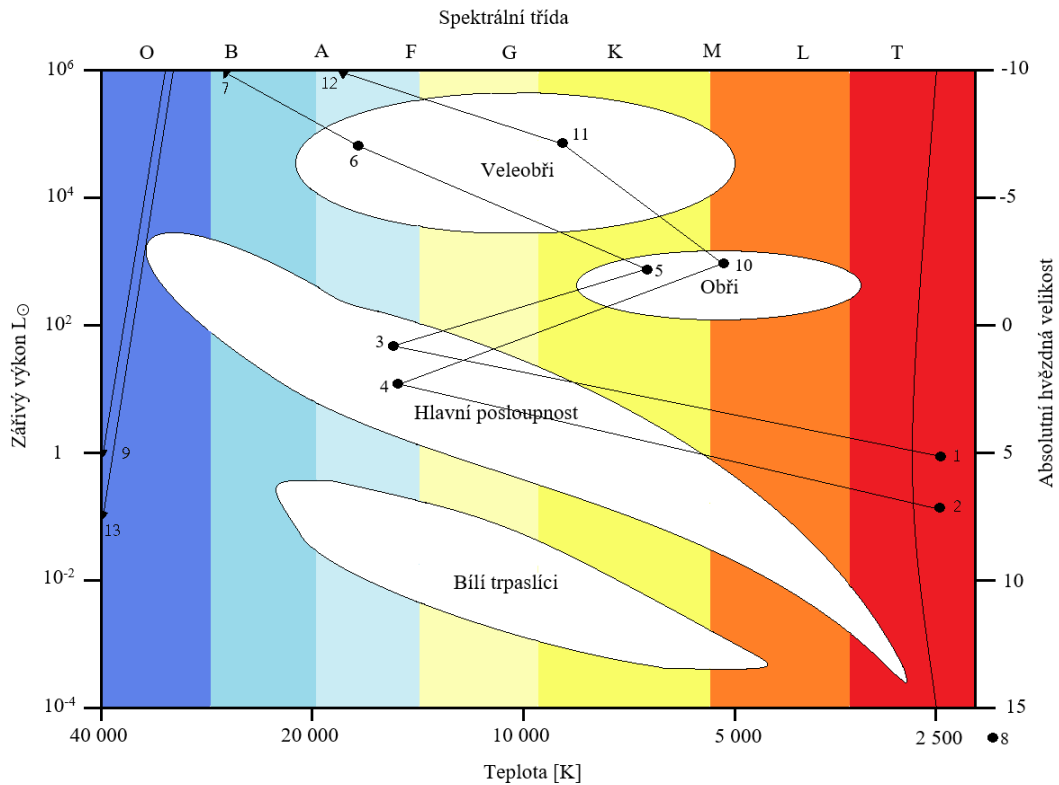
Teplota černé díry o hmotnosti Slunce je pouze 60 nanokelvinů. [19]

Na základě těchto údajů bychom černé díry mohli teoreticky umístit do pravého dolního rohu pod okraj HR diagramu, jako je tomu v elektronické encyklopedii [20] (obr. 17 bod 8).

Zabývejme se nyní případem, kdy není hvězda dostatečně hmotná, aby černá díra mohla vzniknout. Po explozi zůstává na místě neutronová hvězda s poloměrem srovnatelným s planetou Země (obr 17 bod 9). Moment hybnosti zůstává shodný s momentem hybnosti původní hvězdy, proto neutronové hvězdy rotují vysokou rychlostí v řádech sekund. Kvůli přesunu hmoty z hmotnější hvězdy může mít dříve lehčí hvězda vyšší hmotnost nežli původní. Pokračují v ní jaderné reakce a po spotřebování vodíku hvězda zvětší svůj poloměr (obr 17 bod 10). Stejně jako v předchozích případech vyplní svůj Rocheův lalok a látka začne kolem neutronové hvězdy utvářet akreční disk, kde se částice zahřívají a pohybují vysokou rychlostí. Vzhledem k silnému gravitačnímu poli se dopadem částic na povrch uvolní veliké množství energie a neutronová hvězda září převážně v rentgenové části spektra.

Takovým soustavám se říká rentgenové dvojhvězdy. Rozličné konfigurace zhroucené složky a její průvodkyně v podvojně soustavě dávají bezpočet variant neobvyklých projevů neutronových hvězd v podobě rentgenových pulzarů, zábleskových zdrojů, přechodných rentgenových zdrojů, rentgenových nov, zdrojů záblesků měkkého i tvrdého záření gama. [21]

Héliové jádro lehčí hvězdy se dále vyvíjí. Hvězda opouští oblast obrů (obr. 17 bod 11). Spotřebovává jaderné palivo až exploduje jako supernova (obr. 17 bod 12) a stane se neutronovou hvězdou (obr. 17 bod 13). Při explozi je do mezihvězdného prostoru vyvrženo velké množství hmoty obsahující řadu těžkých prvků, které dosahují rychlosti přes 1000 km/s. Pozůstatky supernov jsou dnes pozorovány jako emisní mlhoviny. Mezi nejznámější patří např. Krabí mlhovina v souhvězdí Býka, rozpínající se rychlostí 1300 km/s, uvnitř které rotuje neutronová hvězda.



Obr. 17: HR diagram s vyznačeným postupem vývoje dvojhvězdy s vyšší hmotností.

Další osud dále řídí moment hybnosti celé dvojhvězdy. Pokud je moment hybnosti velký, gravitační síla neudrží obě složky dvojhvězdy pohromadě a postupně se od sebe vzdalují. V opačném případě se k sobě obě složky přibližují, až dojde ke srážce. V závislosti na součtu hmotností pak na místě zůstává větší neutronová hvězda nebo černá díra.

6.2 Vývoj hvězdokup

Při studiu a kategorizaci hvězd jsme doposud užívali diagram spektrum-svítivost. Vzhledem k tomu, že barva hvězdy je funkcí spektrální třídy, můžeme jej nahradit barevným indexem a získat tak diagram barva-svítivost. Barvu hvězdy určuje teplota vrchní vrstvy atmosféry.

Jasnost hvězdy v modré oblasti a vizuální oblasti spektra EB, EV bude tedy určovat rozdíl magnitud B a V:

$$B - V = -2,5 \log EB/EV + \text{konstanta}, \quad (28)$$

kde aditivní konstanta je závislá na definici nulové hodnoty $B - V$.

Je zřejmé, že $B - V$ závisí na rozdělení energie ve spektru měřené hvězdy a je u různých hvězd různý. Rozdíl $B - V$ je barevný index.

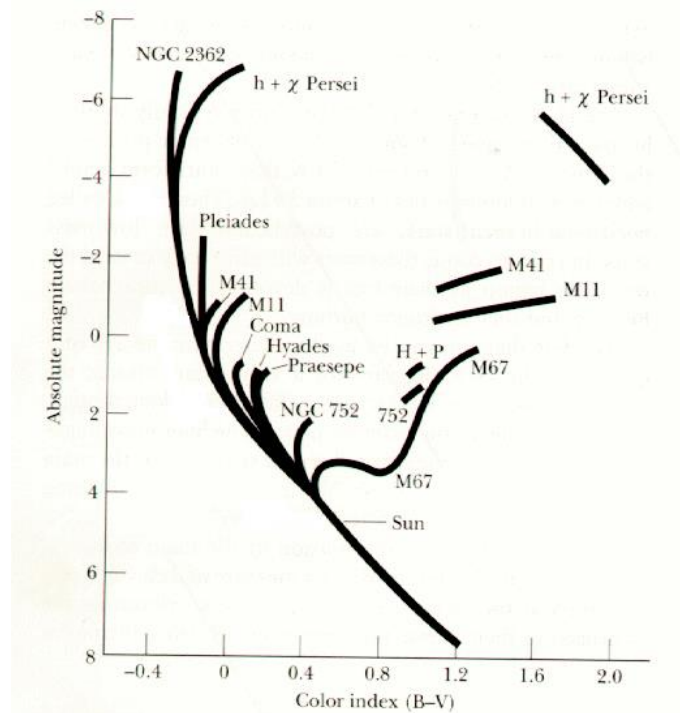
Při zkoumání hvězdokup pak vycházíme z faktů společných pro všechny hvězdokupy:

- 1) Jednotlivé hvězdy v hvězdokupě mají přibližně společné stáří.
- 2) Jednotlivé hvězdy v hvězdokupě mají vůči nám přibližně stejnou vzdálenost.
- 3) Díky společnému vzniku z mezihvězdné látky mají jednotlivé hvězdy přibližně stejné složení.

6.2.1 Vývoj otevřené hvězdokupy

Barvené diagramy barva-svítivost pro otevřené hvězdokupy mají společné rysy. Jednotlivé větve jsou tenčí a výraznější. Největší část zabírají hvězdy hlavní posloupnosti. Dle stáří hvězdokupy lze nalézt i několik červených obrů. Stejně starými hvězdami lze proložit křivku, tzv. izochronu, která prochází oblastí hvězd hlavní posloupnosti a dle stáří hvězdokupy se zakřivuje k oblasti hvězd s nižší teplotou a vyššímu zářivému výkonu, což je způsobeno vývojem hvězd.

Vzhledem k podobným vlastnostem jednotlivých hvězd otevřené hvězdokupy je lze využít pro další zkoumání hvězdné struktury a hvězdného vývoje. Porovnáme-li barevné diagramy různých hvězdokup, můžeme určit stáří či vzdálenost jednotlivých kup.



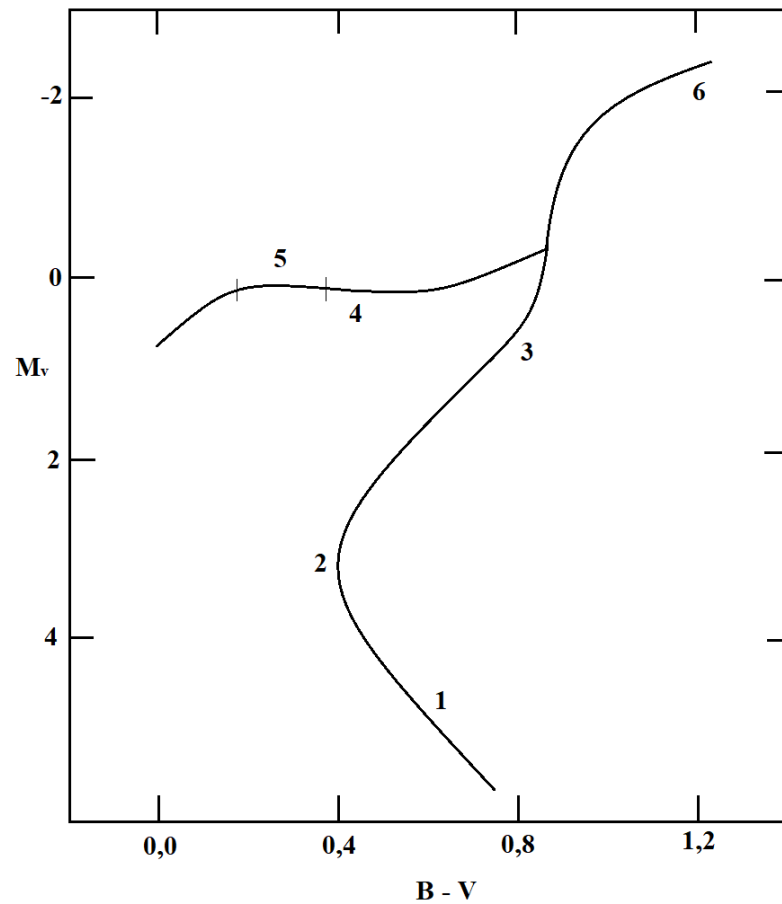
Obr. 18: Schématický diagram barva – svítivost s otevřenými hvězdokupami.

Diagramy jednotlivých hvězdokup mají výraznou hlavní posloupnost. Na obr. (18) začínající ve spodní části. Větve jednotlivých hvězdokup se postupem času otáčí k oblasti obrů. Lze si všimnout prázdné části v oblasti barevného indexu od 0,4 do 1,2 a absolutní magnitudy od 2 do -6. Jedná se o oblast, kde se hvězda nachází velmi krátkou dobu a vzniká tak prázdné místo. Tohoto faktu si všiml již Hertzsprung, po němž nese název Hertzsprungova mezera.

6.2.2 Vývoj kulové hvězdokupy

Od klasického HR diagramu se barevný diagram pro kulové hvězdokupy značně liší. Řada hvězd se nachází ve dvou větvích. Vzhledem ke velkému stáří kulových hvězdokup jsou méně zastoupeny mladé hvězdy s velkou jasností. Výraznou oblastí je větev obrů s velkým zastoupením červených obrů. V horních oblastech pravého rohu se nachází dlouhoperiodické proměnné hvězdy Miridy. Horizontální větev obsazují pulzující proměnné hvězdy typu RR Lyrae s krátkou periodou.

Podstatnou částí diagramu je bod odklonu (obr. 19), kde hvězdy hlavní posloupnosti přechází do oblasti obrů. Podle evoluční teorie hvězd hmotnější hvězdy opouštějí hlavní posloupnost a přesouvají se do oblasti obrů dříve než méně hmotné. Čím starší je hvězdokupa tím více obsahuje méně jasných hvězd, které se stihly přesunout do oblasti obrů. Bod odklonu se díky těmto přechodům dostává do spodních oblastí a platí, že čím je kulová hvězdokupa starší, tím více je bod odklonu posunut. Stejně jako u otevřených hvězdokup se i diagramy kulových hvězdokup porovnávají s teoretickým modelem HR diagramu.



Obr. 19: Schématický diagram barva-svítivost pro kulové hvězdokupy. Čísli jsou označeny jednotlivé oblasti. 1 Hlavní posloupnost. 2 Bod odklonu. 3 Větev obrů. 4 Horizontální větev. 5 Oblast s výskytem hvězd typu RR Lyrae. 6 Dlouhoperiodické proměnné hvězdy. Bílí trpaslíci by se nacházeli pod spodní oblastí.

7 Pracovní listy a závěsný plakát

Pro shrnutí a upevnění znalostí jsou k dispozici dva pracovní listy o rozdílné obtížnosti. Obsah pracovních listů lze shrnout od třech kategorií: klasifikace hvězd, hvězdné systémy a vývoj hvězdných systémů.

Pracovní list A je značně jednodušší. Obsahuje více uzavřených otázek se čtyřmi možnostmi. Lze jej využít při běžné výuce pro zopakování znalostí nebo jako opakovací test.

Pracovní list B je obtížnější. Obsahuje více složitějších výpočtů a otázky s otevřenou odpovědí. Je vhodný pro nadané žáky, kteří mají teoretické znalosti daného tématu a umí je aplikovat. Řešení pracovních listů je uvedeno v příloze.

Didaktickou pomůckou, této práce je závěsný plakát shrnující informace o vývoji hvězdných systémů

Jméno: _____ Hodnocení: _____

Pracovní list pro seminář astrofyziky A

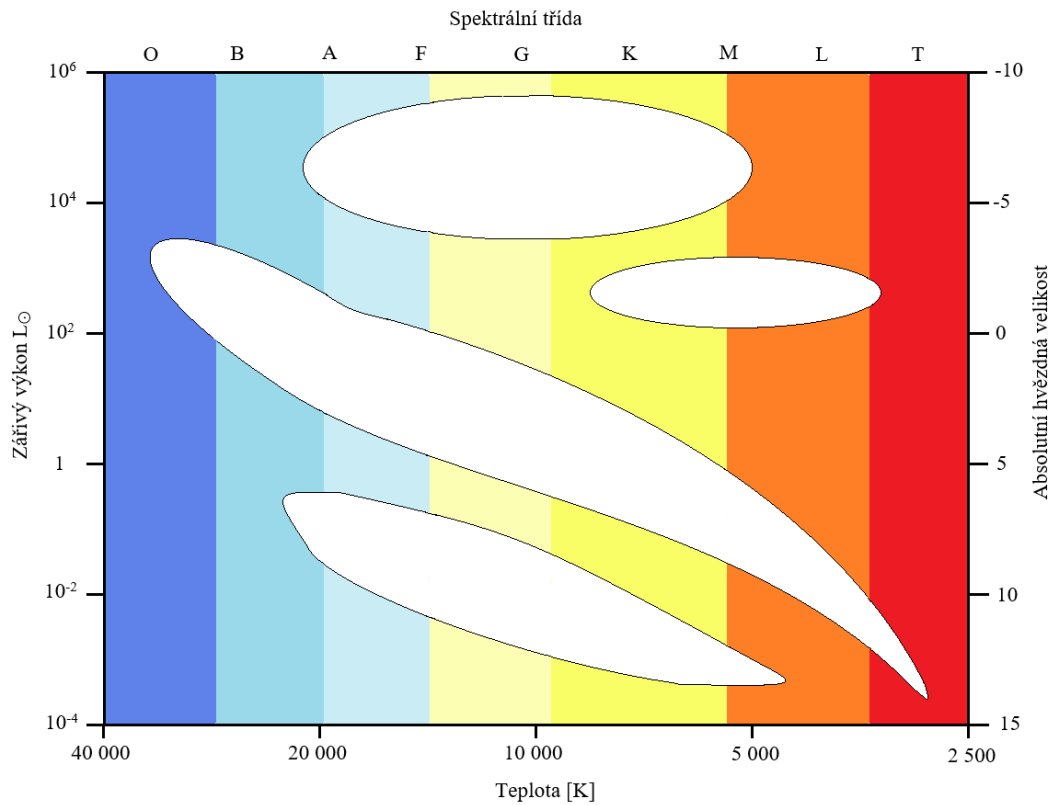
- 1) Vypočítejte, jaký je zářivý výkon Polárky, má-li povrchovou teplotu $T = 7200 \text{ K}$ a poloměr $r = 30R_{\odot}$. Porovnejte vypočtenou hodnotu se zářivým výkonem Slunce. ($L_{\odot} = 3,83 \cdot 10^{26} \text{ W}$)

- 2) Určete správné pořadí barev hvězd podle jejich narůstající teplot od nejchladnější k nejteplejší. Převzato z [26].
 - A. Modrá, červená, bílá.
 - B. Bílá, modrá, červená.
 - C. Modrá, bílá, červená.
 - D. Červená, bílá, modrá.

- 3) Jaká je rozlišovací schopnost dalekohledu o průměru $D = 254 \text{ mm}$ na vlnové délce 550 nm . Jak se změní rozlišovací schopnost dalekohledu, zvětšíme-li $10\times$ průměr?

- 4) Stáří otevřené hvězdokupy určujeme podle:
 - A. Mezihvězdného prachu.
 - B. Počtu hvězd hvězdokupy.
 - C. Nejjasnější hvězdy hvězdokupy.
 - D. Průměrné teploty hvězd.

- 5) Zaznamenejte do HR diagramu vývoj hvězdy menší hmotnosti, která nepřekročí Chandrasekharovu mez. Popište jednotlivé oblasti, jimiž prochází.



- 6) Vyjmenujte fáze hvězd o menší, střední a větší hmotnosti.

- 7) Ve které oblasti HR diagramu se nachází naše Slunce?

- A. V oblasti bílých trpaslíků.
- B. V oblasti rudých obrů.
- C. Na oblasti hvězd hlavní posloupnosti.
- D. V žádné ze zmíněných oblastí.

Jméno: _____ Hodnocení: _____

Pracovní list pro seminář astrofyziky B

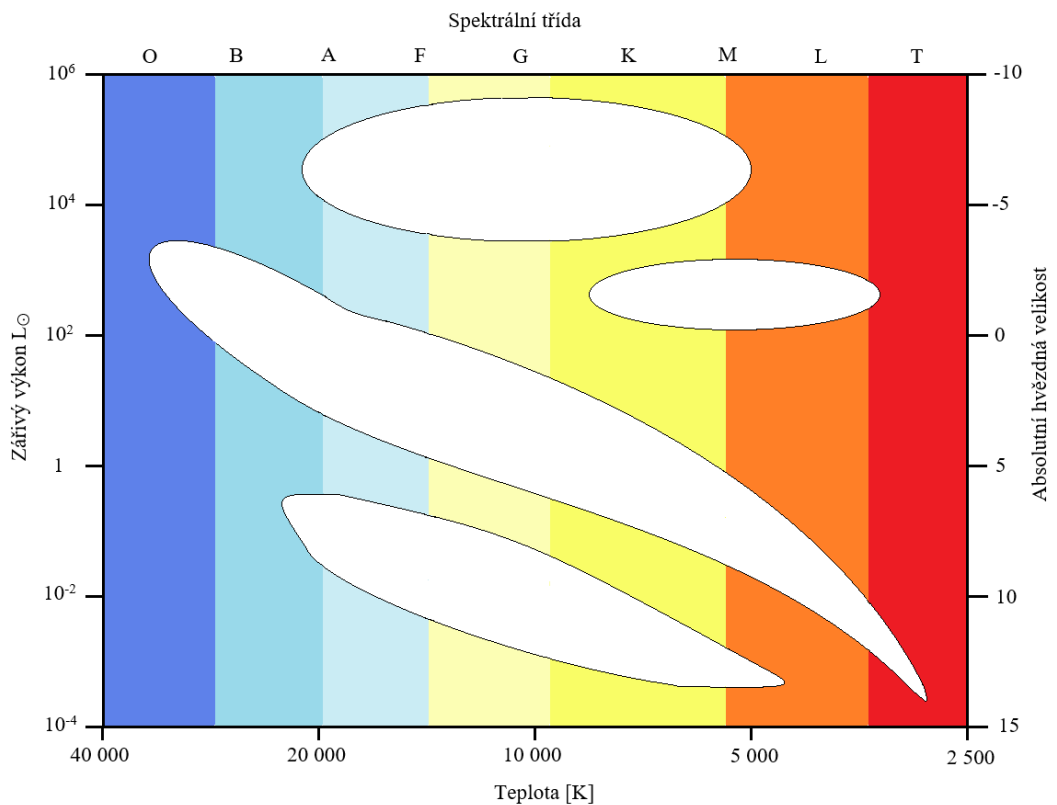
- 1) Jaký je poloměr hvězdy, má-li zářivý výkon $L = 7,412 \cdot 10^{25} \text{ W}$ a povrchovou teplotu $T = 40\,000 \text{ K}$? Určete, o jaký typ hvězdy se jedná. Vypočítejte její hustotu, pokud má hmotnost srovnatelnou se Sluncem.

- 2) Vypočtete, jaká je povrchová teplota a intenzita vyzařování hvězdy, naměří-li snímač záření vlnové délky 330 nm . O jaký typ hvězdy se jedná, je-li její poloměr $8,2 \cdot 10^5 \text{ km}$?

- 3) Jak velký je potřeba dalekohled, k rozlišení dvojhvězdy Albireo, víme-li, že úhlová vzdálenost složek je $34''$? Předpokládejme vlnovou délku 550 nm .

- 4) Stáří kulové hvězdokupy určujeme podle:
- HR diagramu.
 - Diagramu barva-svítivost.
 - Mezihvězdného prachu.
 - Tvaru hvězdokupy.
- 5) Jak se liší vývoj osamocené hvězdy a dvojhvězdy?

- 6) Zaznamenejte do HR diagramu vývoj dvojhvězdy, kde první složka končí svůj život jako neutronová hvězda a druhá jako černá díra. Jak se oblasti nazývají?



- 7) Představme si dvě hvězdy, které mají stejnou povrchovou teplotu, ale rozdílný zářivý výkon. Co lze o takovýchto hvězdách tvrdit?

8. Diskuze

Jelikož se bakalářská práce zabývá rozšířením učebnic astrofyziky, bylo by vhodné zde porovnat obsah několika učebnic a zjistit, kde je práce rozšiřuje. Využijeme přitom jak učebnice použité při tvorbě této práce, tak učebnice, které se využívají a využívaly na školách.

Jednou z dobrých učebnic je podle názoru autora této práce Fyzika hvězd a vesmíru [5]. Poskytuje rozsáhlé informace o veličinách, které jsou vhodné pro popis a klasifikaci hvězd. Jsou popsány jednotlivé oblasti HR diagramu i vývoj osamocené hvězdy. Kapitola zabývající se hvězdnými systémy poskytuje dostatečné informace o dvojhvězdách a hvězdokupách. Bakalářská práce rozšiřuje tuto učebnici o popis vývoje dvojhvězd a následném zavedení do HR diagramu.

Podobně obsáhlou učebnicí jsou Kapitoly z astrofyziky [12]. Zde se navíc nachází více informací o hvězdokup a světelných křivkách. I tuto učebnici bakalářská práce rozšiřuje o popis vývoje dvojhvězd a zavedení do HR diagramu.

V učebnice Fyzika pro IV. ročník gymnázií [22] se možné nalézt různé nedostatky. Je popsán princip konstrukce HR diagramu, ovšem chybí podrobnější informace ohledně jednotlivých oblastí a klasifikace. Chybí jakákoli zmínka o dvojhvězdách a světelné křivce. Bakalářská práce tuto učebnici rozšiřuje ve vícero oblastech. Zejména o oblasti HR diagramu, světelné křivky a vývoj dvojhvězd.

Fyzika pro III. ročník středních všeobecně vzdělávacích škol [23] se více jak polovinou obsahu zabývá optikou a astrofyzikou. Jsou dostatečně popsány spektra hvězd i veličiny popisující HR diagram. Stručně je vyobrazen vývoj hvězdy, ovšem bez zařazení do HR diagramu. Hvězdné systémy poskytují základní informace o dělení bez zmínky o vývoji.

Nejnovější učebnice Fyzika pro gymnázia: Astrofyzika [24] obsahuje rovněž řadu nedostatků. Chybí jakákoli zmínka o světelných křivkách a hvězdné systémy jsou popsány velmi okrajově bez vývoje. Kapitola Vznik a vývoj hvězd poskytuje základní informace pro hvězdy rozdílné hmotnosti. Bylo by vhodné rozšířit tuto kapitolu o HR diagram, ve kterém by byl vývoj těchto hvězd zaznamenán.

Poslední učebnicí je Astronomie [25]. Podává řadu informací o dvojhvězdách s využitím světelných křivek. Při výkladu spektrálního typu je odkazováno na diagram spektrum – svítivost. Vývoj hvězd je popsán pouze nepatrně, což lze přisoudit stáří učebnice.

Porovnáme-li obsah těchto učebnic, lze konstatovat, že bakalářská práce rozšiřuje tyto učebnice zejména v oblasti týkající se vývoje dvojhvězd a následného vyobrazení v HR diagramu.

9. Závěr

Cílem práce bylo seznámení čtenáře s vývojem dvojhvězd a hvězdných systémů, které jsou dle fáze vývoje kategorizovány a umístěny do vhodného místa na diagramu. Proto byl nejprve čtenář v 1. kapitole seznámen s efektivní teplotou, spektrálním typem, zářivým výkonem a absolutní hvězdnou velikostí, tedy veličinami, které se nacházejí na osách HR diagramu. Tyto údaje napomohly k popisu spektrální analýzy a následné kategorizaci hvězd. Hvězdu nelze zařadit bez znalosti příslušných informací. Nechybí základní informace o dvojhvězdách a hvězdokupách. Stěžejní částí je kapitola 6, která obsahuje zásadní informace o vývoji dvojhvězd a jejich zařazení do HR diagramu.

V kapitolách 1–5 bylo využito zejména teoretických poznatků z vícero zdrojů, kterými byly převážně učebnice, učební texty a encyklopedie. Nejobtížnější částí pro vypracování byla kapitola 6 kvůli odbornému popisu. Při její tvorbě bylo čerpáno zejména z vědeckých článků a odborných publikací.

Praktickou částí bylo zejména shrnutí informací, týkající se vývoje hvězdných systémů a jejich zařazení v HR diagramu. Pro práci v hodinách byly vytvořeny dva pracovní listy. Dále byl vytvořen závěsný plakát, který shrnuje učivo této práce. Při tvorbě plakátu byl kladen důraz jak na obsahovou část, tak na grafické zpracování, aby daná problematika žáky zaujala.

Z důvodu pandemie COVID-19 nebylo možné ověřit pracovní listy ve výuce. Jejich ověření je plánováno v následujícím školním roce. Řešení pracovních listů je uvedeno v příloze.

Přestože předpokládané cíle byly splněny, je možné toto téma dále rozšiřovat, a to především detailnějším popisem vývoje dvojhvězd a tematiku světelných křivek.

Použitá literatura

- [1] HARMANEC, Petr a Miroslav BROŽ. *Stavba a vývoj hvězd*. Praha: Matfyzpress, 2011. ISBN 978-80-7378-165-1.
- [2] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky [online]. 2006 – 2017 [cit. 05.02.2017]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1075-teplota-hvezd>
- [3] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky [online]. 2006 – 2017 [cit. 05.02.2017]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/index.php/main.article/view/535-fotometricke-veliciny>
- [4] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky [online]. 2006 – 2017 [cit. 05.02.2017]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1072-absolutni-hvezdna-velikost>
- [5] ŠOLC, Martin, Jiří ŠVESTKA a Vladimír VANÝSEK. *Fyzika hvězd a vesmíru: učebnice pro volitelný předmět seminář a cvičení z fyziky ve 4. roč. gymnázia. 3., upravené vyd.* Praha: SPN, 1991. Učebnice pro střední školy. ISBN 80-04-24965-5.
- [6] Autorský tým. HR diagram. *Astronomia*, multimediální učební text [online]. 2007 – 2017 [cit. 26.02.2017]. Dostupné z: <http://hvezdy.astro.cz/diagram/17-hr-diagram>
- [7] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky [online]. 2006 – 2017 [cit. 05.02.2017]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1073-spektrum-hvezd-a-barva-hvezd>
- [8] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky [online]. 2006 – 2017 [cit. 26.02.2017]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/752-spektrum-atomu-vodik>
- [9] VANÝSEK, Vladimír. *Základy astronomie a astrofyziky*. Praha: Academia, 1980.
- [10] PARENAGO, Pavel Petrovič. *Hvězdná astronomie*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1959. Věda všem, sv. 16.
- [11] KLECZEK, Josip. *Velká encyklopedie vesmíru*. Praha: Academia, 2002s., 48s. barev. obr. příl. ISBN 80-200-0906-x.
- [12] ŠIROKÁ, Miroslava a Jaromír ŠIROKÝ. *Kapitoly z astrofyziky*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1973. Knihnice všeobecného vzdělávání mládeže.
- [13] BERNHAR, Klaus, SRDOC, Gregor, HUMMERICH, Stefan. Twenty New W Ursae Majoris-type Eclipsing Binaries from the Catalina Sky Survey. *Variable Stars Observer Bulletin*. 2013, **24**(6), ISSN 2309-5539
- [14] CAGAŠ, Pavel. *Sekce proměnných hvězd a exoplanet* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <http://www.asu.cas.cz/articles/1139/19/objevena-1000-ceska-promenna-hvezda-v-nasi-galaxii>

- [15] WORDEN, Simon P. Astronomical image reconstruction. *Vistas in Astronomy* [online]. 1977, **20**, 301-317 [cit. 2019-05-07]. DOI: 10.1016/0083-6656(77)90007-1. ISSN 00836656. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0083665677900071>
- [16] LEE, Aaron T. Can a brown dwarf turn into a main sequence star if it gets more hydrogen? [online]. [cit. 21.03.2018] Dostupné z: <https://www.quora.com/Can-a-brown-dwarf-turn-into-a-main-sequence-star-if-it-gets-more-hydrogen>
- [17] ALPAR, M. A., D. PINES, P. W. ANDERSON a J. SHAHAM. Vortex creep and the internal temperature of neutron stars. I - General theory. *The Astrophysical Journal* [online]. 1984, **276** [cit. 2019-05-09]. DOI: 10.1086/161616. ISSN 0004-637X. Dostupné z: <http://adsabs.harvard.edu/doi/10.1086/161616>
- [18] ADAMS, F. C., P. BODENHEIMER a G. LAUGHLIN. M dwarfs: planet formation and long term evolution. *Astronomische Nachrichten*[online]. 2005, **326**(10), 913-919 [cit. 2019-05-10]. DOI: 10.1002/asna.200510440. ISSN 0004-6337. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/asna.200510440>
- [19] KUMAR, K. N. P.; KIRANAGI, B. S.; BAGEVADI, C. S. (2012). "Hawking Radiation – An Augmentation Attrition Model". *Adv. Nat. Sci.* **5** (2): 14–33. [cit.2019-05-10]. DOI:10.3968/j.ans.1715787020120502.1817 Dostupné z: <http://cscanada.net/index.php/ans/article/view/j.ans.1715787020120502.1817/2663>
- [20] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky [online]. 2006 – 2017 [cit. 26.02.2017]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/752-spektrum-atomu-vodik> <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1154-fyzikalni-charakteristika-cernych-der>
- [21] Autorský tým. Vývoj masivních těsných dvojhvězd, *Astronomia*, multimediální učební text [online]. 2007 – 2017 [cit. 21.06.2018]. Dostupné z: <http://hvezdy.astro.cz/tesne/806-vyvoj-masivnich-tesnych-dvojhvezd>
- [22] PIŠŮT, J. – Frei, V. – FUKA, J. – LEHOTSKÝ, D. – ŠIROKÝ, J. – TOMANOVÁ, E. – VANÝSEK, V.: *Fyzika pro IV. ročník gymnázií*, SPN, Praha 1987.
- [23] RUDOLF, Vladimír. *Fyzika pro 3. ročník středních všeobecně vzdělávacích škol (dříve pro 11. ročník JSS): pokusná učebnice*. 4. nezm. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1963. Učebnice pro střední všeobecně vzdělávací školy.
- [24] MACHÁČEK, Martin. *Fyzika pro gymnázia: astrofyzika*. Praha: Prometheus, 1998. Učebnice pro střední školy. ISBN 80-7196-091-8.
- [25] VORONCOV-VELJAMINOV, Boris Aleksandrovič. *Astronomie pro jedenáctý postupný ročník: (učebnice pro 10. třídu sovětských středních škol)*. Přeložil František LINK, přeložil Igor ZACHAROV. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1954.

[26] ŠTEFL, Vladimír a Jiří KRTIČKA. *Didaktika astrofyziky* [online]. 2003. [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/44648010-Didaktika-astrofyziky.html>

Přílohy

Příloha č. 1: Řešení pracovního listu A

Příloha č. 2: Řešení pracovního listu B

Příloha č. 1: Řešení pracovního listu A

- 1) Vypočítejte, jaký je zářivý výkon Polárky, má-li povrchovou teplotu $T = 7200 \text{ K}$ a poloměr $r = 30 R_{\odot}$. Porovnejte vypočtenou hodnotu se zářivým výkonem Slunce. ($L_{\odot} = 3,83 \cdot 10^{26} \text{ W}$)

Řešení:

$$T = 7200 \text{ K}$$

$$r = 30 R_{\odot}$$

$$L = ? [\text{W}]$$

Využijeme vztah pro zářivý výkon

$$L = 4\pi\sigma(30R_{\odot})^2 T^4$$

dosadíme

$$L = 4\pi \cdot (5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}) \cdot (30 \cdot 6,955 \cdot 10^8 \text{ km})^2 \cdot (7200 \text{ K})^4$$

dopočítáme

$$L \cong 8,34 \cdot 10^{29} \text{ W}$$

porovnáme zářivý výkon Polárky a Slunce

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \frac{8,34 \cdot 10^{29}}{3,83 \cdot 10^{26}} = 2177$$

Odpověď:

Pro zářivý výkon Polárky platí $L = 8,34 \cdot 10^{29} \text{ W}$. Porovnané hodnoty zářivého výkonu se blíží tabulkové hodnotě, která uvádí poměr $L = 2200 L_{\odot}$. Tato odchylka mohla nastat při zaokrouhlování.

- 2) Určete správné pořadí barev hvězd podle jejich narůstající teplot od nejchladnější k nejteplejší. Převzato z [26].
- A. Modrá, červená, bílá.
 - B. Bílá, modrá, červená.
 - C. Modrá, bílá, červená.
 - D. Červená, bílá, modrá.

Odpověď: D

- 3) Jaká je rozlišovací schopnost dalekohledu o průměru $D = 254$ mm na vlnové délce 550 nm. Jak se změní rozlišovací schopnost dalekohledu, zvětšíme-li 10x průměr?

Řešení:

- a) $D = 254$ mm = 0,254 m
 $\lambda = 550$ nm = $5,5 \cdot 10^{-7}$ m
 $\eta = ?$ [rad]

Pro rozlišovací schopnost platí

$$\eta = 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

dosadíme převedené jednotky

$$\eta = 1,22 \frac{5,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}}{0,254 \text{ m}} = 2,64 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$$

převédeme radiány na stupně

$$2,64 \cdot 10^{-6} \text{ rad} = 0,54''$$

- b) $D = 10 \cdot 254$ mm = 2,54 m
 $\lambda = 550$ nm = $5,5 \cdot 10^{-7}$ m
 $\eta = ?$ [rad]

Využijeme opět vztah pro rozlišovací schopnost

$$\eta = 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

dosadíme převedené jednotky

$$\eta = 1,22 \frac{5,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}}{2,54 \text{ m}} = 2,64 \cdot 10^{-7} \text{ rad}$$

převédeme radiány na úhly

$$2,64 \cdot 10^{-7} \text{ rad} = 0,054''$$

Odpověď:

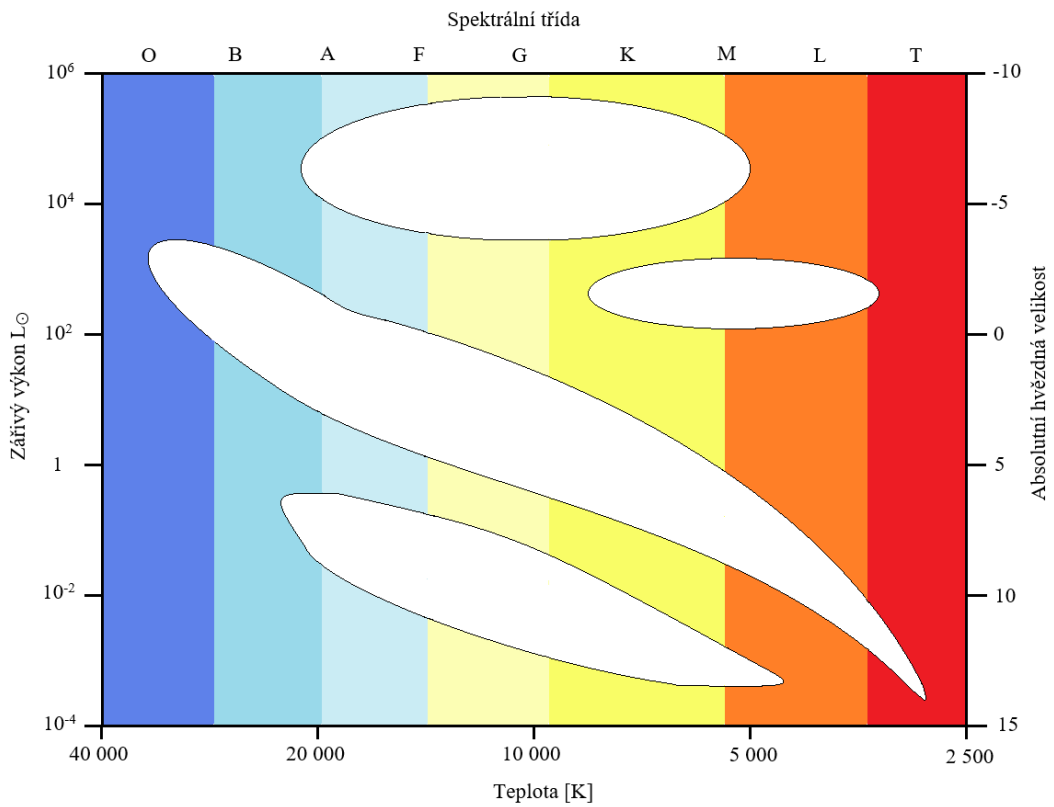
Rozlišovací schopnost dalekohledu o průměru 254 mm je 0,54". Pro dalekohled o desetinásobném průměru platí nepřímá úměra a rozlišovací schopnost je 0,054".

4) Stáří otevřené hvězdokupy určujeme podle:

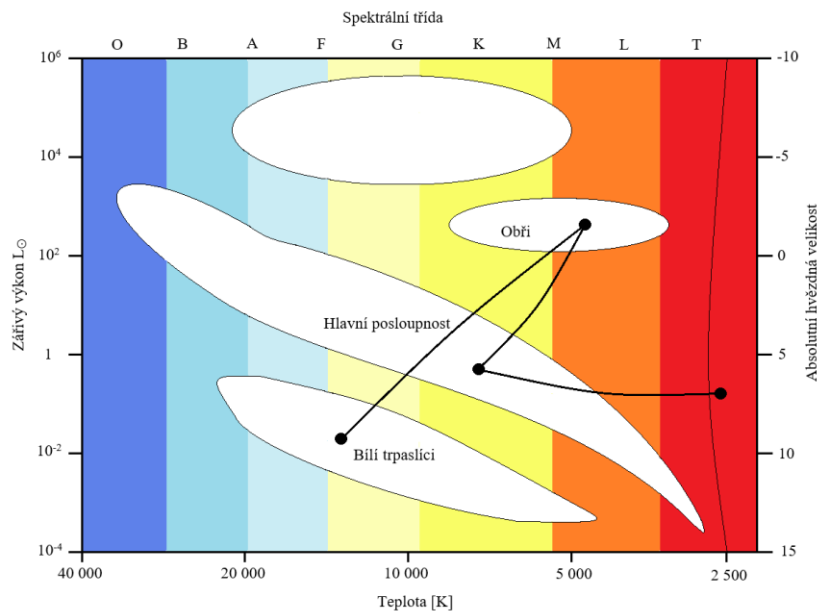
- A. Mezihvězdného prachu.
- B. Počtu hvězd hvězdokupy.
- C. Nejjasnější hvězdy hvězdokupy.
- D. Průměrné teploty hvězd.

Odpověď: A

5) Zaznamenejte do HR diagramu vývoj hvězdy menší hmotnosti, která nepřekročí Chandrasekharovu mez. Popište jednotlivé oblasti, jimiž prochází.



Odpověď:



6) Vyjmenujte fáze hvězd o menší, střední a větší hmotnosti.

Odpověď: Menší hvězda: Protohvězda, hvězda hlavní posloupnosti, obr, bílí trpaslík.

Střední hvězda: Protohvězda, hvězda hlavní posloupnosti, veleobr,
neutronová hvězda

Velká hvězda: Protohvězda, hvězda hlavní posloupnosti, veleobr, černá
díra.

7) Ve které oblasti HR diagramu se nachází naše Slunce?

- A. V oblasti bílých trpaslíků.
- B. V oblasti rudých obrů.
- C. Na oblasti hvězd hlavní posloupnosti.
- D. V žádné ze zmíněných oblastí.

Odpověď: C

Příloha č. 2: Řešení pracovního listu B

- 1) Jaký je poloměr hvězdy, má-li zářivý výkon $L = 7,412 \cdot 10^{25}$ W a povrchovou teplotu $T = 40\,000$ K? Určete, o jaký typ hvězdy se jedná. Vypočítejte její hustotu, pokud má hmotnost srovnatelnou se Sluncem.

Řešení:

- a) $L = 7,412 \cdot 10^{25}$ W
 $T = 40\,000$ K
 $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
 $r = ?$ [km]

Využijeme vztah pro zářivý výkon

$$L = 4\pi\sigma r^2 T^4$$

vyjádříme si poloměr

$$r = \sqrt{\frac{L}{4\pi\sigma T^4}}$$

dosadíme

$$r = \sqrt{\frac{7,412 \cdot 10^{25} \text{ W}}{4\pi \cdot (5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}) \cdot (40\,000 \text{ K})^4}}$$

dopočítáme

$$r \cong 6,378 \cdot 10^3 \text{ km}$$

- b) $M_{\odot} = 1,989 \cdot 10^{30}$ kg

$$r = 6378 \text{ km}$$

$$\rho = ? \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Pro objem koule platí

$$V = \frac{4\pi r^3}{3}$$

pro výpočet hustoty využijeme vztah

$$\rho = \frac{M_{\odot}}{V}$$

dosadíme objem do vzorce pro hustotu

$$\rho = \frac{3M_{\odot}}{4\pi r^3}$$

dosadíme hodnoty

$$\rho = \frac{3 \cdot 1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}}{4\pi \cdot (6\,378\,000 \text{ m})^3}$$

dopočítáme

$$\rho = 1,8 \cdot 10^9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Odpověď:

Hvězda má poloměr srovnatelný s poloměrem planety Země. Podle vypočteného poloměru a hustoty se jedná o bílého trpaslíky. Hustota látky je $1,8 \cdot 10^9 \text{ kg/m}^3$, což odpovídá hustotě degenerovaného plynu.

- 2) Vypočtete, jaká je povrchová teplota a intenzita vyzařování hvězdy, naměří-li snímač záření vlnové délky 330 nm. O jaký typ hvězdy se jedná, je-li její poloměr $8,2 \cdot 10^5 \text{ km}$?

Řešení:

a) $\lambda = 330 \text{ nm} = 3,3 \cdot 10^{-7} \text{ m}$

$$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

$$T = ? \text{ [K]}$$

Využijeme vztah pro Wienův zákon posunu

$$\lambda = \frac{b}{T}$$

vyjádříme si teplotu

$$T = \frac{b}{\lambda}$$

dosadíme

$$T = \frac{2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{3,3 \cdot 10^{-7} \text{ m}}$$

dopočítáme

$$T = 8787 \text{ K}$$

b) $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

$$T = 8787 \text{ K}$$

$$I_e = ? \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}\text{]}$$

Využijeme vztah pro Stefanův zákon

$$I_e = \sigma T^4$$

dosadíme

$$I_e = (5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}) \cdot (8787 \text{ K})^4$$

dopočítáme

$$I_e = 3,3 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^2$$

Povrchová teplota hvězdy je 8787 K. Intenzita vyzařované hvězdy je $3,3 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^2$.

c) Pro zařazení do HR diagramu potřebujeme znát zářivý výkon hvězdy.

$$T = 8787 \text{ K}$$

$$r = 8,2 \cdot 10^5 \text{ km}$$

$$L = ? [\text{W}]$$

$$L = 4\pi\sigma r^2 T^4$$

$$L = 4\pi \cdot (5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}) \cdot (8,2 \cdot 10^8 \text{ m})^2 \cdot 8787^4 \text{ K}$$

$$L = 2,85 \cdot 10^{27} \text{ W}$$

Odpověď: Zářivý výkon a teplota odpovídají hvězdě hlavní posloupnosti.

3) Jak velký je potřeba dalekohled, k rozlišení dvojhvězdy Albireo, víme-li, že úhlová vzdálenost složek je $34''$? Předpokládejme vlnovou délku 550 nm.

Řešení

$$\alpha = 34''$$

$$\lambda = 550 \text{ nm} = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$D = ? [\text{m}]$$

Pro rozlišovací schopnost platí

$$\eta = 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

Aby bylo možné obě složky rozlišit, musí platit

$$\eta \geq 34''$$

dosadíme

$$1,22 \frac{\lambda}{D} \geq \alpha$$

vyjádříme si průměr dalekohledu

$$D \leq 1,22 \frac{\lambda}{\alpha}$$

dosadíme

$$D \leq 1,22 \frac{5,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}}{1,648 \cdot 10^{-4}}$$

dopočítáme

$$D \leq 0,05 \text{ m}$$

Odpověď: Složky dvojhvězdy lze rozlišit dalekohledem o průměru minimálně 50 mm.

4) Stáří kulové hvězdokupy určujeme podle:

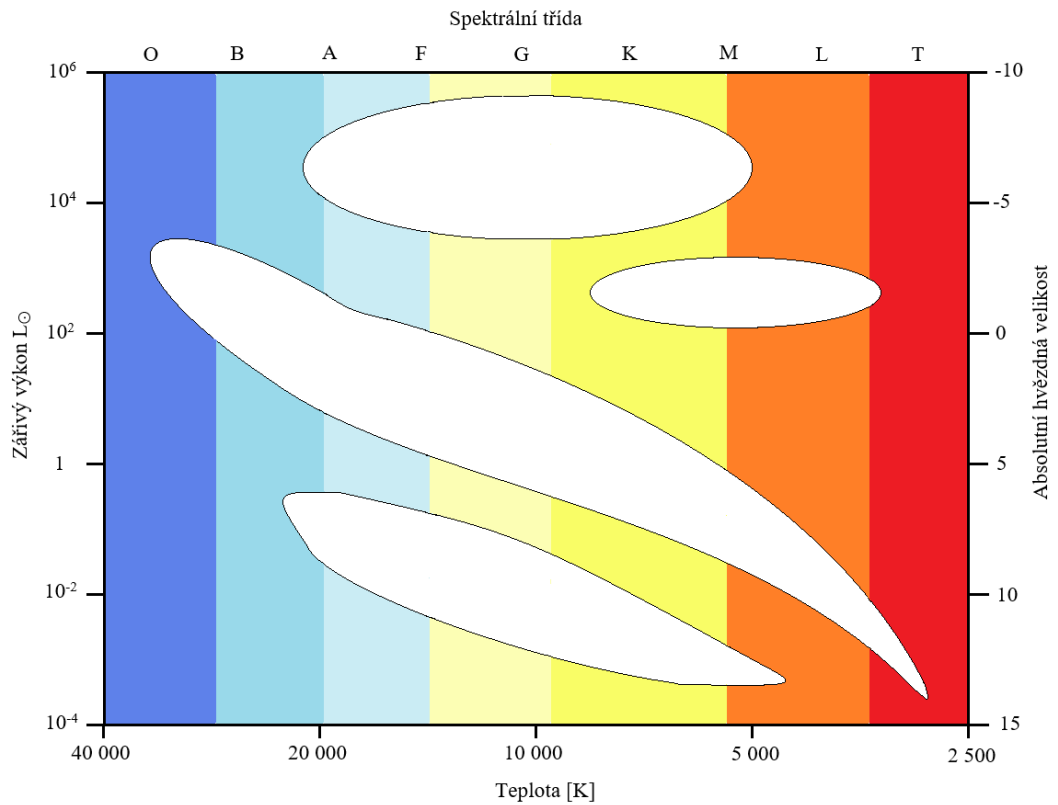
- A. HR diagramu.
- B. Diagramu barva-svítivost.
- C. Mezihvězdného prachu.
- D. Tvaru hvězdokupy.

Odpověď: B

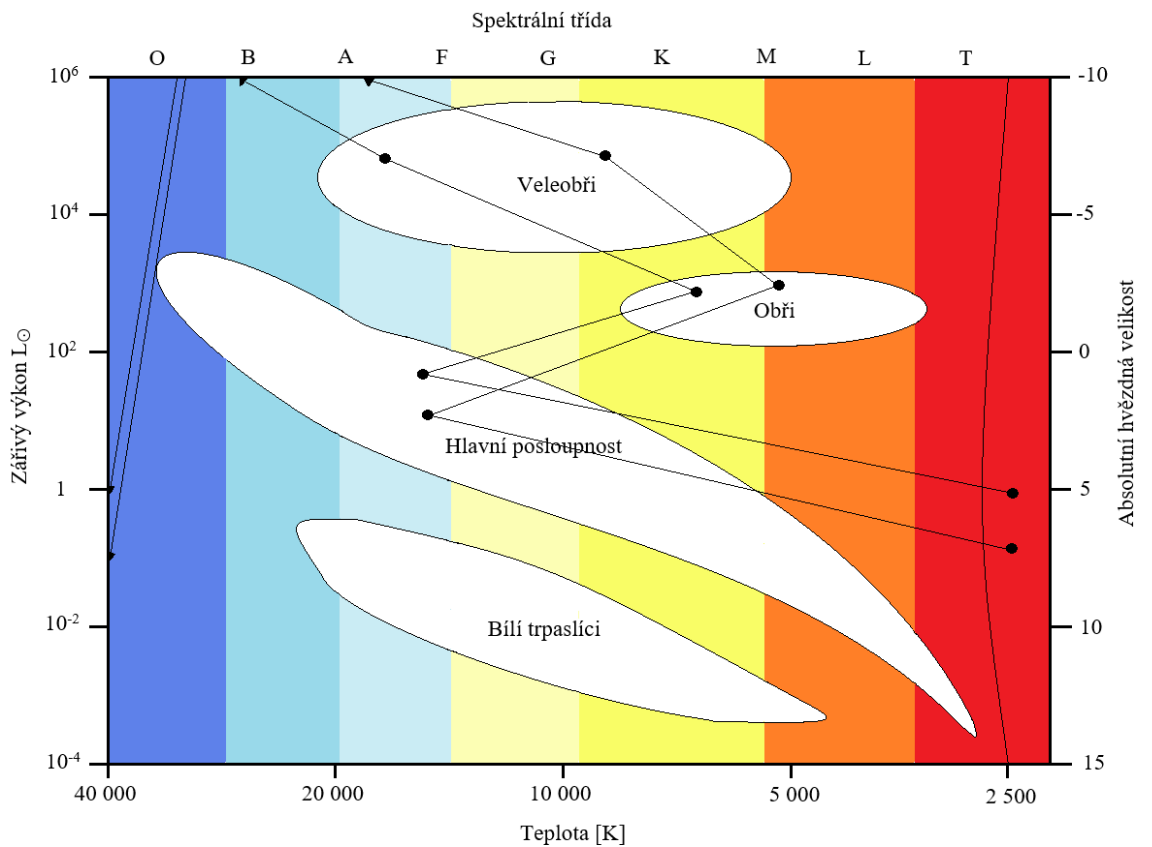
5) Jak se liší vývoj osamocené hvězdy a dvojhvězdy?

Odpověď: Při vývoji dvojhvězdy může dojít k výměně látky mezi hvězdami. Díky tomuto přenosu můžeme pozorovat hmotnější složky dvojhvězd v nižších fázích vývoje. Zároveň zvýšení hmotnosti zkrátí dobu života hvězdy.

- 6) Zaznamenejte do HR diagramu vývoj dvojhvězdy, kde první složka končí svůj život jako neutronová hvězda a druhá jako černá díra. Jak se oblasti nazývají?



Odpověď:



7) Představme si dvě hvězdy, které mají stejnou povrchovou teplotu, ale rozdílný zářivý výkon. Co lze o takovýchto hvězdách tvrdit?

Odpověď: Hvězda s větším zářivým výkonem bude mít větší poloměr. Jestliže hvězdy vznikli současně, pak větší hvězda dříve spotřebuje své palivo.