MASARYKOVA UNIVERZITA

Přírodovědecká fakulta
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Výuka tématu Hvězdy na gymnáziích

Zdeněk Šustek

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Vladimír Štefl, CSc.

2009

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Brně 10. května 2009

Děkuji doc. RNDr. V. Šteflovi, Csc. za vedení práce, cenné rady, vstřícný přístup, čas a ochotu.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá vytvořením návrhu učebního textu tématu „Hvězdy“ ve výuce fyziky na gymnáziích v České republice. Nejprve je provedena stručná analýza vybraných učebnic. Ve druhé kapitole je uveden návrh výukové textu. Obsahem třetí kapitoly je test znalostí. V poslední kapitole je rozebráno využití multimediální prezentace a interaktivní tabule ve výuce. Jsou zde dále uvedeny konkrétní příklady užití této moderní techniky.

Obsah

Úvod **11**

1 Analýza učebnic **12**

1.1 Gymnaziální učebnice Astrofyzika 12

1.1.1 Hloubka zpracování 12

1.1.2 Mezipředmětové vztahy 13

1.1.3 Problémové postupy 13

1.1.4 Umístění a funkce úloh 13

1.1.5 Didaktické principy přiměřenosti a vědeckosti 14

1.1.6 Charakter a stupeň názornosti 14

1.2 Srovnání pojmové struktury učebnic 14

1.2.1 Fyzika pro IV. ročník gymnázií 14

1.2.2 Physik 3 14

1.2.3 Astronomija vidusskolai 15

2 Návrh učebního textu **17**

2.1 Získávání informací o hvězdách 17

2.2 Zářivý výkon a jasnost 19

2.3 Hvězdná velikost 19

2.4 Měření vzdáleností ve vesmíru 21

2.4.1 Metoda roční paralaxy 21

2.4.2 Metoda cefeid 24

2.4.3 Metoda rudého posuvu 25
2.5 Spektra hvězd 26
2.5.1 Spojité spektrum 27
2.5.2 Absorpční čárové spektrum 28
2.5.3 Spektrální klasifikace 29
2.6 Další stavové veličiny 30
2.6.1 Poloměr 30
2.6.2 Hmotnost 30
2.7 Rozsah základních charakteristik hvězd 32
2.8 Vnitřní charakteristiky hvězd 33
2.8.1 Centrální tlak 34
2.8.2 Centrální teplota 34
2.9 Zdroje energie ve hvězdách 35
2.9.1 Proton-protonový řetězec 36
2.9.2 CNO cyklus 37
2.10 H-R diagram 38
2.10.1 Stavová interpretace 38
2.10.2 Vývojová interpretace 42
2.11 Vznik a vývoj hvězd 42
2.11.1 Hnědí trpaslíci 43
2.11.2 Hvězdy hlavní posloupnosti 43
2.11.3 Závěrečná stadia vývoje hvězd 44

3 Test znalostí 46

4 Využití multimédií ve výuce tématu „Hvězdy“ 51

4.1 Materiální didaktické prostředky ve výuce fyziky 51
4.1.1 Multimediální prezentace 52
4.1.2 Interaktivní tabule 53

4.2 Konkrétní příklady využití multimédií 53
4.2.1 Vzdálenosti hvězd 54
4.2.2 Hvězdná velikost 54
4.2.3 H-R diagram 55
4.2.4 Vývoj hvězd 56
4.2.5 Závislost vývoje hvězdy na hmotnosti 56
4.2.6 Srovnání poloměrů hvězd 56

Závěr **59**

Literatura **60**

Seznam obrázků

2.1 Propustnost zemské atmosféry 17
2.2 Astronomické observatoře 18
2.3 Určení vzdálenosti nedostupného bodu 21
2.4 Měření paralaxy 22
2.5 Roční paralaxa 23
2.6 Metody určování vzdáleností 25
2.7 Spojité, absorpční a emisní spektrum 26
2.8 Závislost charakteru spektra na teplotě 28
2.9 Harvardská spektrální klasifikace 29
2.10 Obrázek k úloze 4 31
2.11 Pozorovaná dráha Síria B obíhajícího kolem Síria A 32
2.12 Rozsah hvězdných charakteristik 33
2.13 Mechanická rovnováha uvnitř hvězdy 33
2.14 Proton-protonový řetězec 36
2.15 CNO cyklus 38
2.16 Graf závislosti absolutní hvězdné velikosti na spektrální třídě sestrojený H. N. Russellem 39
2.17 H-R diagram 40

4.1 Nejbližší hvězdy a jejich rozložení v prostoru 54
4.2 H-R diagram – řešení úlohy 55
4.3 Zakreslení vývoje hvězdy do H-R diagramu 56

4.4 Obrázek vývoje hvězd bez popisků 57
4.5 Srovnání poloměrů různých planet a hvězd 58

Seznam tabulek

1.1 Srovnání pojmové struktury 16

2.1 Hvězdné velikosti některých objektů 20
2.2 Absolutní hvězdné velikosti některých hvězd 21
2.3 Paralaxy vybraných hvězd 23
2.4 Přehled spektrálních tříd 29
2.5 Poloměry vybraných hvězd 30
2.6 Základní charakteristiky Slunce 32
2.7 Seznam nejbližších hvězd 41
2.8 Seznam nejjasnějších hvězd 42

4.1 Srovnání poloměrů hvězd 57

Úvod

Astronomie a astrofyzika jsou vědy popisující a vysvětlující daleký vesmír i nejbližší okolí Země. Astronomie se řadí mezi nejstarší vědní obory vůbec. Její počátky sahají do období přibližně před šesti tisíci roky. Od té doby neustále vzrůstá množství nových poznatků a orientace v nich je stále složitější. Pokud se studenti o tuto problematiku zajímají, potřebují při orientaci v této oblasti pomoc učitelů.

Na gymnáziích v České republice je tématu astronomie a astrofyzika věnováno jen velmi málo času. V dokumentu Rámcový vzdělávací program pro gymnázia, kterým se mají školy řídit při vytváření vlastních školních vzdělávacích programů, podle kterých se bude od 1. 9. 2009 vyučovat na všech českých gymnáziích, chybí ucelený astrofyzikální celek v závěru gymnaziálního vzdělávání. Bude tedy záležet pouze na jednotlivých učitelích, zda toto téma do výuky zařadí či nikoliv. Studenti však o problematiku astrofyziky mají zájem, neboť s novými informacemi z tohoto oboru se velmi často setkávají v hromadných sdělovacích prostředcích, v denním tisku, v časopisech, knihách a na internetu. A učitelé budou muset tyto nové poznatky zařazovat do vyučování a vysvětlovat.

Hlavní pomůckou k výuce je učebnice. Doporučenou učebnicí pro výuku tématu „Hvězdy“ na gymnáziích je [2]. V dnešní době je dalším důležitým prostředkem při výuce výpočetní technika. S její pomocí může učitel vyhledávat, třídit a poté prezentovat moderní astrofyzikální poznatky.

Cílem této práce je vytvoření učebního textu zabývajícího se výukou tématu „Hvězdy“ na gymnáziích na základě přibližné analýzy a srovnání vybraných evropských učebnic astrofyziky, včetně sady testových otázek. A dále ukázat možnosti využití moderních didaktických prostředků, kterými jsou multimediální prezentace a interaktivní tabule.

Kapitola 1

Analýza učebnic

Pro potřeby diplomové práce jsem si z nabídky učebnic astrofyziky vybral následující čtyři: starší českou učebnici [1], dále českou učebnici [2], podle které se momentálně vyučuje astrofyzika na gymnáziích, z evropských to byla rakouská učebnice [3] a lotyšská [4]. U učebnice [2] jsem provedl stručnou analýzu, která je obsahem následující části. Dále jsem provedl srovnání pojmové struktury ve všech čtyřech učebnicích. Toto srovnání mi bylo inspirací k vytvoření návrhu učebního textu.

1.1 Gymnaziální učebnice Astrofyzika

Cílem této části je analyzovat téma „Hvězdy“ v učebnici [2]. Tato učebnice se zabývá hvězdami ve třetí kapitole s názvem Hvězdy a galaxie. Tématu „Hvězdy“ jsou v této kapitole věnovány první tři podkapitoly s rozsahem 18 stran. První podkapitola obsahuje úvod do hvězdné astronomie, druhá podkapitola pojednává o hvězdných charakteristikách a ve třetí podkapitole se autor zabývá vznikem a vývojem hvězd.

1.1.1 Hloubka zpracování

Hloubka zpracování textu týkajícího se dvojhvězd, proměnných hvězd, nov a supernov je dostačující pro gymnaziální úroveň. Pogsonova rovnice je zde popsána velmi stručně a zařazena pouze jako doplňkové učivo. V části Paralaxa a vzdálenost nejsou uvedeny další metody určování vzdáleností. V kapitole týkající se spekter hvězd úplně chybí klasifikace do spektrálních tříd, kterou autor později používá v H-R diagramu. Text neobsahuje přesný tvar III.

Keplerova zákona, nedostatečně je zde probrán H-R diagram a jeho stavová a vývojová interpretace. Autor věnuje H-R diagramu půl stránky a celá učebnice obsahuje jeden H-R diagram, který není příliš názorný. Dále zde na rozdíl od učebnice [1] nejsou kapitoly týkající se fyzikálních podmínek v nitru hvězd, chemického složení a zdrojů energie hvězd. Kapitola Vznik a vývoj hvězd je až na zmíněný H-R diagram zpracována dostatečně do hloubky.

1.1.2 Mezipředmětové vztahy

V učivu o hvězdných velikostech se v odvození Pogsonovy rovnice ukazuje studentům využití jejich znalostí o počítání s logaritmy, a proto je škoda, že tuto část autor vložil jen jako doplňkovou. Přímo se nabízí ukázat studentům, k čemu jim bylo zdánlivě samoúčelné logaritmování v hodinách matematiky. V kapitole o spektrech by mohla být zmínka o Stefanově-Boltzmannově zákoně, aby si student uvědomil propojení s dříve probraným učivem. Stejně tak by měl být zmíněn i Wienův posunovací zákon. Na těchto dvou zákonech lze spatřovat využití nabytých fyzikálních znalostí.

1.1.3 Problémové postupy

Celá učebnice je pojata jako výkladová a uvnitř textu se neobjevují, snad až na doplňkové odvození Pogsonovy rovnice, žádné problémové postupy ani úlohy či otázky, které by plnily funkci upevňování vědomostí. Problémové úlohy jsou zařazeny vždy až na konci podkapitol a jsou zamíchány mezi úlohy výpočtové a jednoduché otázky, což je škoda, protože řada z těchto problémových úloh je zajímavá a podporuje samostatnou práci studentů.

1.1.4 Umístění a funkce úloh

Úlohy jsou umístěny vždy na konci podkapitoly, autor je označuje jako problémy. V části týkající se sledovaného tématu je 16 úloh. Za podkapitolou Charakteristiky hvězd je 12 úloh, z toho 8 úloh je numerických, 2 problémové, 2 odvozovací. Za podkapitolou Vznik a vývoj hvězd jsou 4 úlohy, z toho 2 úlohy jsou numerické a 2 problémové. Obtížnost úloh je velmi rozdílná. Například problém 8 na str. 87 je podle mého názoru zbytečně jednoduchý a neplní žádnou didaktickou funkci.

1.1.5 Didaktické principy přiměřenosti a vědeckosti

Učebnice nesplňuje úplně ani jeden z těchto principů. Výkladový text obsahuje minimum matematických zápisu a odvození. Autor se snaží neodradit studenty od fyziky vzorci, což může být někdy na škodu, protože něco, co je popsáno dlouhým souvětím, by mohlo být jednoduše zapsáno jazykem matematiky, který by měl být pochopitelný všem studentům 4. ročníku gymnázia. V textu chybí více odvozování neznámých poznatků z poznatků již dříve nabytých. Pokud zde již nějaké odvozování je, většinou je příliš stručné.

1.1.6 Charakter a stupeň názornosti

Na rozdíl od jiných evropských učebnic je v textu velmi málo názorných obrázků, příkladů či grafů. Například zde chybí tabulka či seznam nejjasnějších či nejbližších hvězd s jejich vzdálenostmi, hvězdnými velikostmi, popřípadě dalšími charakteristikami, dále obrázky ukazující vzdálenosti a rozložení nejbližších hvězd, ukázky jednoduchých spekter hvězd. V kapitole Vznik a vývoj hvězd není kromě jednoho H-R diagramu žádný obrázek. Zde by bylo možné zařadit např. schéma vývoje hvězd podle hmotnosti a samozřejmě další H-R diagramy (nejbližších či nejjasnějších hvězd), a ukázat na H-R diagramu vývoj nějaké hvězdy.

1.2 Srovnání pojmové struktury učebnic

1.2.1 Fyzika pro IV. ročník gymnázií

Česká učebnice fyziky [2] se zabývá astrofyzikou ve své poslední kapitole. Tato kapitola je rozdělena na 3 části: Záření – zdroj informací o hvězdách, Zdroje energie, stavba a vývoj hvězd, Struktura a vývoj vesmíru. Výkladový text je psán přehledně, autor využívá znalostí z předchozích kapitol. Nechybí zde zmínka o Stefanově-Boltzmanově zákoně ani III. Keplerův zákon v přesném tvaru. Každá kapitola je doplněna úlohami. Této učebnici schází více obrázků a údaje o konkrétních astrofyzikálních objektech.

1.2.2 Physik 3

Rakouská učebnice fyziky [3] obsahuje kapitolu Astrofyzika, která se na sedmadvaceti stranách zabývá astrofyzikou, teorií relativity a kosmologií. První

podkapitola Hvězdy a galaxie je rozdělena na 3 části: Pozorované veličiny, Vývoj hvězd, Struktury ve vesmíru. Na čtrnácti stranách textu je rozebrána fyzika hvězd. Výklad je velmi hutný. Text je doplněn obrázky, fotografiemi, tabulkami a grafy. Text navazuje na předchozí fyzikální znalosti čtenáře a ukazuje aplikaci některých zákonů (Wienův posunovací, Stefanův-Boltzmanův). Je zde také zmíněn III. Keplerův zákon v přesném tvaru, odvození vztahů pro centrální tlak a teplotu.

1.2.3 Astronomija vidusskolai

Lotyšská učebnice [4] se zabývá astronomií, astrofyzikou i kosmologií. Učebnice je velmi bohatě ilustrována, na každé straně alespoň 1 obrázek, což činí učebnici přitažlivou. Na konci je obrazová příloha s barevnými fotografiemi. Kniha je rozdělena do šesti kapitol.

1. Úvod (38 stran)
2. Vývoj astronomie (38 stran)
3. Sluneční soustava (68 stran)
4. Hvězdy (32 stran)
5. Galaxie a vesmír (28 stran)
6. Praktická astronomie (17 stran)
7. Fotografická příloha (16 stran)

Čtvrtá kapitoly s názvem Hvězdy obsahuje velmi podrobný výklad učiva o Slunci a hvězdách. Kapitola je rozdělena na 9 podkapitol, první dvě se zabývají Sluncem, ve zbývajících je rozebrána fyzika hvězd. Výkladový text je přehledně členěn do odstavců. Důležité pojmy jsou zvýrazněny tučně. Méně důležitý výkladový text je psán menším fontem. Text je doprovázen kreslenými obrázky a tabulkami. Na konci každé podkapitoly je vždy 7 otázek. Některé jsou jednoduché a odpověď na ně lze najít v předchozím výkladu. Odpovědi na některé si musí čtenář najít sám z jiných zdrojů.

Celý text je pojat jako výkladový a je psán spíše z pohledu astronomie než astrofyziky. Nejsou zmíněny Stefanův-Boltzmanův zákon, Wienův posunovací zákon ani III. Keplerův zákon. Pozitivem je velký počet obrázků a tabulek, ve kterých jsou konkrétní údaje o hvězdách a čtenář si tak může udělat určitou představu o rozměrech, vzdálenostech a jejich poměrech.

Vilks I.: *Astronomija vidusskolai*	Sexl, Raab, Streeruwitz: *Physik 3*	Macháček M.: *Astrofyzika*	Pišút J.: *Fyzika IV.*
Zářivý výkon a hvězdná velikost Vdálenosti hvězd Spektrum a teplota Spektrální klasifikace Rozměry a hmotnost H-R diagram Chemické složení a jaderné reakce CNO cyklus Stavba hvězd, modely Hvězdná atmosféra a rotace Blízké hvězdy Pozorovaný pohyb hvězd Neviditelní průvodci hvězd Klasifikace dvojhvězd Oběžná dráha a hmotnost Proměnné hvězdy Novy Zrod hvězd Protohvězdy Hvězdy HP Odchod z hl. posl. Bílí trpaslíci Supernovy Neutronové hvězdy Pulsary Černé díry	Hvězdná velikost Vdálenosti hvězd Jasnost hvězd Zářivý výkon Wienův posunovací zákon Povrchová teplota Poloměr hvězd H-R diagram Hmotnost a hustota hvězd III. Keplerův zákon Proměnné hvězdy Stavba galaxií Vznik hvězd Hvězdy hlavní posloupnosti Centrální tlak, teplota Stavová rovnice Závěrečná stadia hvězd Bílý trpaslík Neutronová hvězda Černá díra	Modely hvězd Jednoduché hvězdy a dvojhvězdy Zákrytové a spektroskopické dvojhvězdy Proměnné hvězdy Novy Supernovy Hvězdná velikost Zářivý výkon Jasnost Paralaxa a vzdálenost Absolutní hvězdná velikost Spojité spektrum Spektrální čáry Spektrální typ Poloměr Hmotnost Rotace Rychlost pohybu H-R diagram Vznik hvězd Hnědí trpaslíci Hvězdy hlavní posloupnosti Červení obři Bílí trpaslíci Supernovy Neutronové hvězdy Pulzary Černé díry	Vzdálenosti hvězd Hmotnosti hvězd III. Keplerův zákon Zářivý tok Zářivý výkon Hvězdná velikost Absolutní hvězdná velikost Spojité spektrum Absorpční spektrální čáry Dopplerův jev Spektrální třídy Chemické složení hvězd Zdroje energie ve hvězdách p-p řetězec CNO řetězec Stavový diagram hvězd H-R Vývoj hvězd Červený obr Bílý trpaslík Neutronová hvězda Pulsar Černá díra

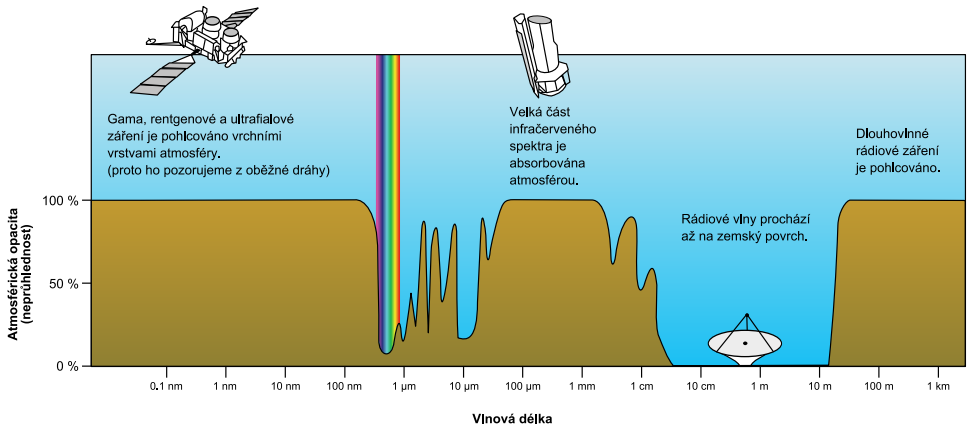
Tabulka 1.1: Srovnání pojmové struktury

Kapitola 2

Návrh učebního textu

2.1 Získávání informací o hvězdách

Poznatky o hvězdách a celém vesmíru získáváme především studiem elektromagnetického záření, které dopadá na povrch Země, popřípadě pomocí družic kroužících kolem Země. Zemská atmosféra propouští jen záření v určitých intervalech vlnových délek (obr. 2.1).

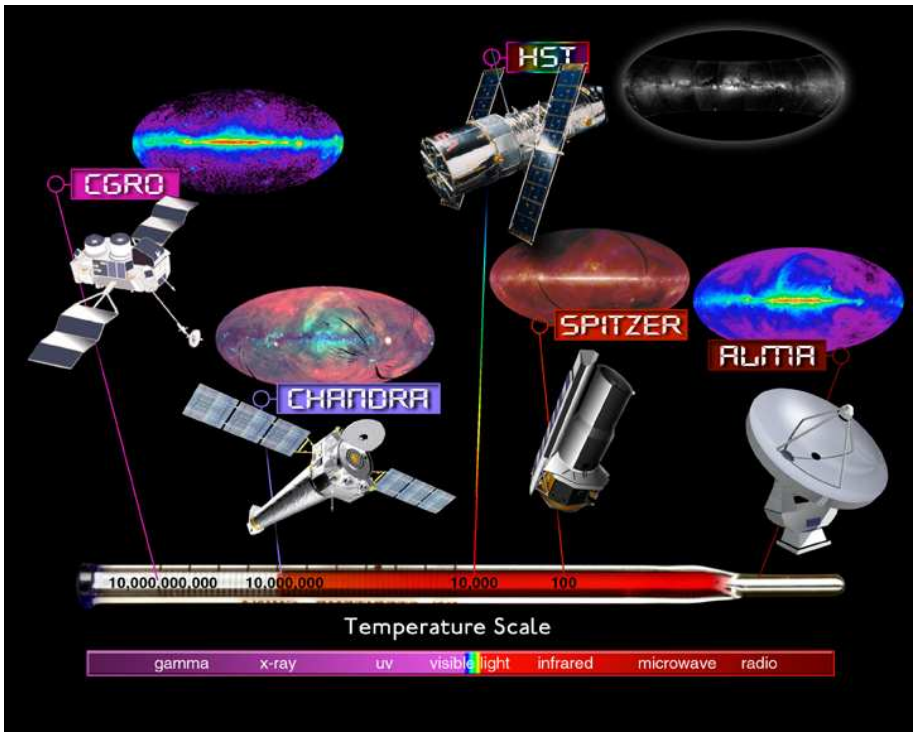


Obrázek 2.1: Propustnost zemské atmosféry

Až do 30. let 20. století bylo jediným zdrojem informací o vesmíru záření z viditelné oblasti spektra. Informace o hvězdách byly získávány pomocí dalekohledů. V roce 1931 zachytil jako první americký fyzik českého původu Karl Guthe Jansky rádiové signály přicházející z vesmíru. Po zdokonalení rá-

diové techniky se rádiové záření z vesmíru stalo důležitým zdrojem poznání a přispělo k mnohým objevům, jako jsou např. pulsary, kvasary a reliktní záření. Základním zařízením pro příjem rádiových vln jsou rádiové teleskopy.

Po vypuštění prvních umělých družic v 60. letech bylo možné zkoumat vesmír také v jiných oblastech vlnových délek. Podle oblasti spektra studovaného záření hovoříme dnes o rádiové, mikrovlnné, infračervené, optické, ultrafialové, rentgenové a gamma astrofyzice. Další informace získáváme i pomocí částic kosmického záření. Toto „záření“ je vlastně proud vysokoenergetických částic, zejména protonů (někdy i jader prvků s malou atomovou hmotností), dopadajících na Zěmi z kosmického prostoru.



Obrázek 2.2: Astronomické observatoře

Na obr. 2.2 jsou velké astronomické observatoře pracující v různých oblastech vlnových délek. Comptonova gama observatoř (CGRO) pracuje v oblasti gamma záření, Rentgenová observatoř Chandra v rentgenové oblasti, Hubbleův vesmírný dalekohled (HST) zkoumá vesmír ve viditelné části spektra, Spitzerův vesmírný dalekohled v infračervené části spektra. Všechny tyto observatoře pracují na oběžné dráze Země. Na zkoumání vesmíru v radiové oblasti vzniká v Chile síť 64 radioteleskopů s názvem ALMA (Atacama Large Millimetr Array).

2.2 Zářivý výkon a jasnost

Zářivý výkon je jednou ze základních charakteristik hvězdy. Je to celkový výkon záření vysílaného celým povrchem hvězdy do prostoru, značíme ho L. Zářivý výkon Slunce je $L = 3{,}84.10^{26}$ W.

Jsou-li dvě hvězdy o stejném zářivém výkonu od nás různě vzdáleny, uvidíme je na obloze různě jasně. Tuto vlastnost popíšeme veličinou zvanou *jasnost*. Jasností světelného zdroje rozumíme hustotu světelného toku způsobeného daným zdrojem v místě pozorování. Pokud budeme předpokládat jasnost jako veličinu, která v sobě zahrnuje celé spektrum vlnových délek, nebudeme používat pojem bolometrická jasnost, ale užijeme pojem hustota zářivého toku. Uvědomme si rozdíl mezi hustotou světelného a zářivého toku: v prvním případě uvažujeme vlnové délky z viditelné oblasti spektra, v druhém z celého spektra.

Hustota zářivého toku udává, kolik zářivé energie hvězdy projde za 1 s plochou o obsahu $1\,\mathrm{m}^2$. Pokud tedy máme hvězdu o zářivém výkonu L a nacházíme se ve vzdálenosti r od ní, veškerý zářivý výkon hvězdy prochází kulovou plochou o poloměru r. Obsah této plochy je tedy $S = 4\pi r^2$ a jedním metrem čtverečním za sekundu projde energie

$$\Phi = \frac{L}{4\pi r^2} \ , \tag{2.1}$$

což je hustota zářivého toku. Obdobný vztah lze použít pro hustotu světelného toku – jasnost, přičemž pro výpočet použijeme vizuální zářivý výkon.

2.3 Hvězdná velikost

Pozorovaná hvězdná velikost je fotometrická veličina udávající jasnost hvězd či jiných objektů na obloze. Hvězdná velikost nemá nic společného se skutečnou velikostí hvězdy. Obvyklou značkou hvězdné velikosti je m, její jednotkou je magnituda (mag).

Starověcí astronomové uspořádali hvězdy viditelné pouhým okem do 6 tříd (magnitud) podle jasnosti, přičemž hvězdy první třídy byly nejjasnější. Později se zjistilo, že vzhledem k vlastnostem oka tyto třídy tvoří geometrickou řadu a že poměr jasnosti hvězdy první velikosti j_1 a hvězdy šesté velikosti j_6 je

$$\frac{j_1}{j_6} = 100 \ .$$

Potom kvocient této geometrické řady je $q = \sqrt[5]{100} \doteq 2{,}512$ a pro poměr jasností dvou hvězd o hvězdných velikostech m_1 a m_2 tedy platí

$$\frac{j_1}{j_2} = q^{(m_2 - m_1)} = 2{,}512^{-(m_1 - m_2)}.$$

Tuto rovnici, známou jako Pogsonovu rovnici, můžeme zlogaritmovat a zapsat ve tvaru

$$\log \frac{j_1}{j_2} = -0{,}4(m_1 - m_2) \qquad \text{nebo} \qquad m_1 - m_2 = -2{,}5 \log \frac{j_1}{j_2}\ . \tag{2.2}$$

Podobně, jako jsme zavedli hvězdnou velikost pomocí jasnosti, můžeme zavést bolometrickou hvězdnou velikost pomocí hustoty zářivého toku Φ.

Poznámka: V předchozím textu se dvakrát objevuje číslo 2,5. Poprvé je zde jako $\sqrt[5]{100} \doteq 2{,}512$ a podruhé jako $\dfrac{1}{\log 2{,}512} = \dfrac{1}{0{,}4} = 2{,}5$(přesně).

Slunce	−26,6 mag
Měsíc v úplňku	−12,6 mag
Sírius	−1,46 mag
Vega	0,03 mag

Tabulka 2.1: Hvězdné velikosti některých objektů

V tabulce 2.1 jsou uvedeny hodnoty hvězdné velikosti některých objektů na obloze.

Pozorovaná hvězdná velikost však nepodává informaci o skutečném zářivém výkonu hvězdy, protože závisí na vzdálenosti hvězdy od pozorovatele. Proto byla definována *absolutní hvězdná velikost* M jako pozorovaná hvězdná velikost přepočtená na vzdálenost 10 pc[1] (která je určena konvencí). Rovnici pro převod pozorované hvězdné m velikosti na absolutní hvězdnou velikost M (a naopak) lze sestavit z definice M. Není-li světlo absorbováno, je jasnost hvězdy ve vzdálenosti r

$$j_r = \frac{L}{4\pi r^2}$$

a jasnost stejné hvězdy přesunuté do vzdálenosti 10 pc

$$j_{10} = \frac{L}{4\pi \cdot 100}$$

[1] pc je značka pro jednotku parsek, která bude definována v odstavci 2.4

Pro jejich poměr platí

$$\frac{j_r}{j_{10}} = \frac{100}{r^2} \qquad \text{nebo} \qquad \log \frac{j_r}{j_{10}} = 2 - 2 \log r$$

Dosadíme do vztahu (2.2) a získáme vztah

$$m - M = 5 \log r - 5 \tag{2.3}$$

mezi pozorovanou a absolutní hvězdnou velikostí, za r dosazujeme vzdálenost v parsecích. V tabulce 2.2 vidíte absolutní hvězdné velikosti některých hvězd.

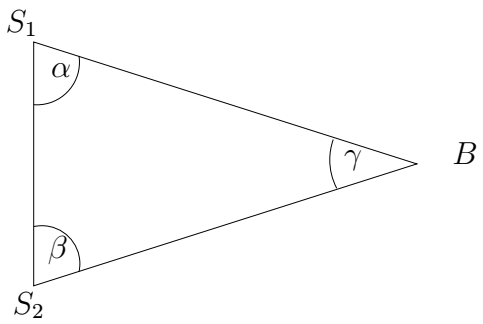
Slunce	4,83 mag
Sírius	1,42 mag
Vega	0,58 mag
Canopus	−5,53 mag
Rigel	−6,70 mag

Tabulka 2.2: Absolutní hvězdné velikosti některých hvězd

2.4 Měření vzdáleností ve vesmíru

2.4.1 Metoda roční paralaxy

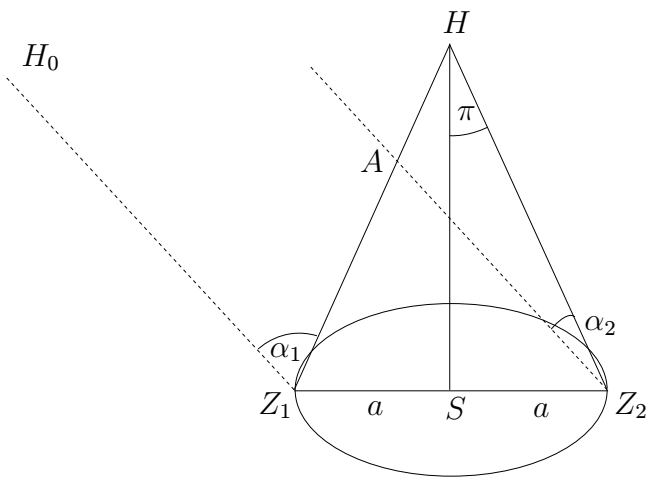
V astronomi jsou známé různé metody měření vzdáleností kosmických objektů. Pro nejbližší hvězdy (zhruba do vzdálenosti 100 pc) se používá metoda roční paralaxy.



Obrázek 2.3: Určení vzdálenosti nedostupného bodu

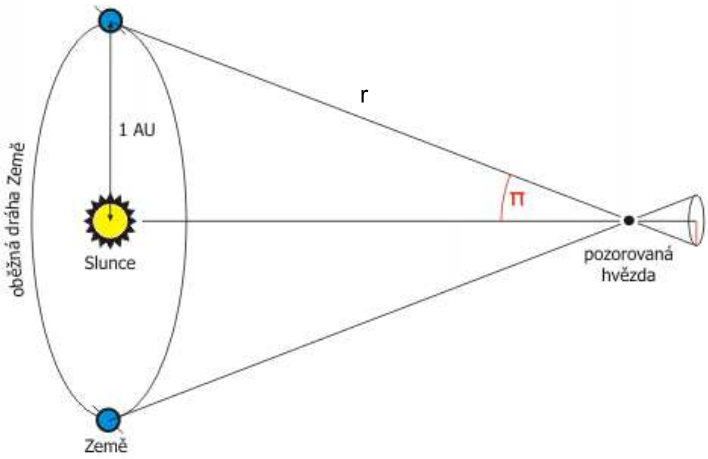
Tato metoda vychází z geodetické metody určování vzdálenosti nedostupného bodu B měřením úhlů na dvou stanovištích S_1 a S_2, která jsou od sebe ve vzdálenosti d (obr. 2.3). Změříme-li úhel α, který svírají spojnice BS_1 a S_1S_2, a potom úhel β, který svírají spojnice BS_2 a S_1S_2, můžeme zkonstruovat trojúhelník o vrcholech S_1S_2B. Spojnice S_1S_2 je základna o známé délce d. Úhel γ, který vznikne u vrcholu B, je úhel, pod kterým vidíme základnu z bodu B, a nazýváme jej paralaxa.

V astronomii se měří velké vzdálenosti, a proto musí být základna dostatečně velká. Je proto volen jednak rovníkový poloměr Země pro vzdálenosti ve sluneční soustavě, jednak poloměr dráhy Země kolem Slunce (astronomická jednotka) pro vzdálenosti větší.



Obrázek 2.4: Měření paralaxy

V praxi měření probíhá tak, že se změří poloha hvězdy vzhledem k okolním velmi slabým hvězdám, o nichž se předpokládá, že jsou mnohem dále než měřená hvězda, a stejné měření se opakuje po půl roce. Konkrétně k určení úhlové vzdálenosti hvězdy H je nutné stanovení úhlových vzdáleností α_1 a α_2 (viz. obr. 2.4), tedy měření úhlů vykonané po půl roce, H_0 je vzdálená srovnávací hvězda. Z trojúhelníku AZ_2H obdržíme paralaxu hvězdy H – velikost úhlu $\pi = \dfrac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}$. Při tomto měření v podstatě určujeme úhel, pod kterým bychom viděli poloměr trajektorie Země. Tento úhel se nazývá *roční paralaxa* a značí se π (obr. 2.5). Paralaxy všech hvězd kromě Slunce jsou menší než 1”. Paralaxy některých známých hvězd jsou v tabulce 2.3.



Obrázek 2.5: Roční paralaxa

Proxima Centauri	0,772”
Sírius	0,379”
Vega	0,129”
Aldebaran	0,050”
Polárka	0,008”

Tabulka 2.3: Paralaxy vybraných hvězd

Pro vzdálenost hvězd byla zavedena jednotka parsek (pc), což je vzdálenost, ze které bychom viděli poloměr dráhy Země pod úhlem 1 obloukové vteřiny. Odvodíme si vztah mezi pc a AU.

Mějme hvězdu, jejíž paralaxa je α. Tato hvězda se nachází ve vzdálenosti r. Pak platí (z obr. 2.5)

$$\sin\alpha = \frac{1\,\mathrm{AU}}{r} \qquad \Rightarrow \qquad r = \frac{1\,\mathrm{AU}}{\sin\alpha}\ .$$

Poněvadž paralaxa hvězd je vždy menší než 1”, můžeme nahradit výraz $\sin\alpha$ přímo úhlem α. Úhel α je nutné zadávat v radiánech, ale v astronomii se používá pro vyjadřování paralax hvězd jednotka úhlová vteřina. Platí $1\,\mathrm{rad} \doteq 206265”$. Potom místo úhlu α zadávaného v radiánech můžeme tento úhel zadávat v úhlových vteřinách. Výpočet vzdálenosti hvězdy r bude mít tvar

$$r = \frac{1\,\mathrm{AU}}{\alpha\,\mathrm{rad}} = \frac{1\,\mathrm{AU}}{\frac{\alpha”}{206265}} = \frac{206265\,\mathrm{AU}}{\alpha”}\ .$$

Vzhledem k tomu, že paralaxa hvězd je vždy menší než 1", vycházejí číselné hodnoty vzdáleností v astronomických jednotkách příliš vysoké. Proto se definuje jednotka parsek takto:

$$1\,\mathrm{pc} \doteq 206265\,\mathrm{AU}\,.$$

Díky této definici platí velmi jednoduchý vztah mezi vzdáleností a paralaxou

$$r = \frac{1}{\pi}\,.$$

Je však důležité nezapomínat, že úhel je zadán v úhlových vteřinách a vzdálenost hvězdy v parsecích.

Někdy se v populární literatuře pro větší názornost používá jednotka nazvaná světelný rok (l.y.). Je to vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za jeden rok. Velmi snadno odvodíme, že platí

$$1\,\mathrm{pc} \doteq 3{,}26\,\mathrm{l.y.}$$

Trigonometrickou metodu lze při měření z povrchu Země použít jen do vzdálenosti 10 pc. Paralaxa menší než 0,01" se nedá měřit kvůli atmosférickému neklidu. Pozorováním z družice se podařilo změřit paralaxy hvězd až do vzdálenosti 100 pc.

Většina kosmických objektů však je příliš daleko na to, abychom mohli měřit jejich paralaxu. K určení jejich vzdáleností se používá nepřímých metod. My si rozebereme metodu cefeid a metodu rudého posuvu spektrálních čar.

2.4.2 Metoda cefeid

Cefeidy jsou stadiem vývoje hvězd, ve kterém je porušena hydrostatická rovnováha v důsledku periodických změn absorpce hvězdné látky v některých vrstvách hvězdy. Navenek se tato vlastnost projevuje periodickými změnami objemu cefeid, tedy pulsacemi zářivého výkonu. Bylo zjištěno, že čím je delší perioda, tím je větší zářivý výkon.

Konkrétně prostřednictvím fotometrického pozorování cefeid stanovujeme pozorovanou hvězdnou velikost m a periodu pulsace P cefeid. Z naměřené periody pulsace lze pomocí empiricky zjištěného vztahu (2.4) určit absolutní hvězdnou velikost M

$$M = a + b \log P\,. \tag{2.4}$$

Dosazením m a M do vztahu (2.3) získáme vzdálenost r cefeidy a tím i hvězdného systému, jehož je součástí.

Tuto metodu lze použít pro hvězdné systémy vzdálené desítky Mpc.

2.4.3 Metoda rudého posuvu

Pro nejvzdálenější dosud známá kosmická tělesa (vnější galaxie, kvasary) je používán k určování vzdáleností Hubbleův zákon, což je závislost rudého posuvu z spektrálních čar v jejich spektrech a vzdálenosti kosmického tělesa r. Čáry jsou posunuty k dlouhovlnnému rudému konci spektra vzhledem ke stejným čarám ve spektrech laboratorních zdrojů, které jsou vzhledem k pozorovateli v klidu. Posuv spektrálních čar $\Delta\lambda$ k vlnové délce λ je stejný pro všechny spektrální čáry ve spektru, nazývá se *rudý posuv* z a platí

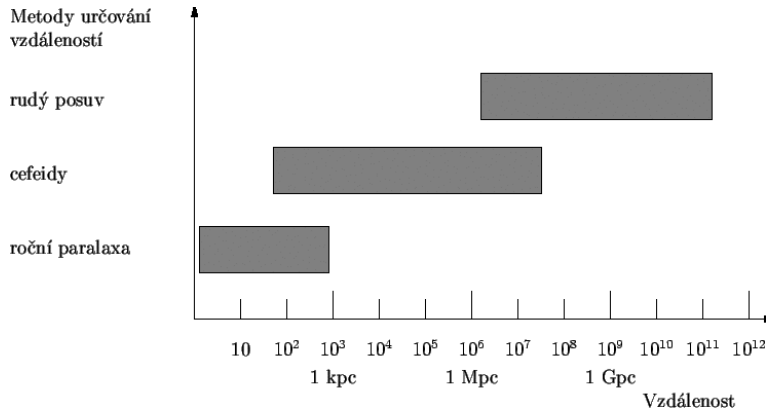
$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}\,.$$

Studium spekter ukázalo, že čím jsou kosmická tělesa vzdálenější, tím více jsou spektrální čáry ve spektru posunuty směrem k rudému konci. Bylo zjištěno, že pro vzdálenost r platí vztah

$$r = \frac{c}{H} z\,,$$

kde H je Hubbleova konstanta, jejíž velikost je přibližně $75\,\mathrm{km}\cdot\mathrm{s}^{-1}\cdot\mathrm{Mpc}^{-1}$ a c je rychlost světla.

Na obrázku 2.6 je ukázán rozsah použitelnosti probraných metod.



Obrázek 2.6: Metody určování vzdáleností

Úlohy

1. Nejjasnější hvězdou na obloze je Sírius v souhvězdí Velkého psa. Světlo ze Síria k nám dospěje za 8,7 let. Jakou má Sírius paralaxu?

2. Pod jakým úhlem bychom viděli poloměr Jupiterovy trajektorie (r = 5,2 AU) z hvězdy, která je ve vzdálenosti 10 pc od Slunce?

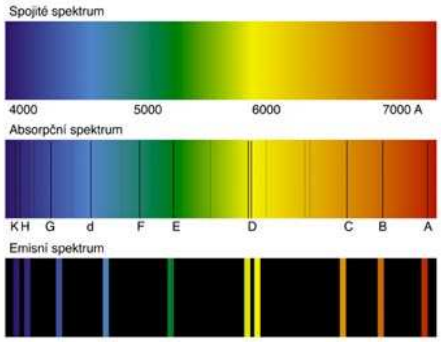
3. Kdybyste trajektorii Země (Saturnu) znázornili obvodem jednokorunové mince, jak daleko by od této mince byla Proxima Centauri?

4. Doplňte chybějící údaje v následující tabulce.

hvězda	m [mag]	π ["]	r [pc]	M [mag]
Sírius	−1,46		2,64	
Vega		0,129		0,58
Proxima Centauri			1,3	15,49
Betelgeuze	0,58			−5,94

2.5 Spektra hvězd

Spektrum je hlavním zdrojem informací o kosmických tělesech. Řada objevů v astrofyzice, například H-R diagram, Hubbleův zákon atd. je těsně spjata se zdokonalováním způsobů získávání informací, které o zdroji dává jeho spektrum. Poznatky získávané spektrální analýzou, zvláště znalost chemického složení a fyzikálních vlastností kosmických těles, umožnily například vytvořit teorie vzniku a vývoje hvězd, pomohly odhalit úlohu mezihvězdné látky ve vývoji Galaxie. Studium spekter vnějších galaxií a kvasarů pomáhá řešit otázky kosmologie. Spektrum hvězd i jiných kosmických objektů se zpravidla



Obrázek 2.7: Spojité, absorpční a emisní spektrum

skládá ze spojitého spektra, na jehož pozadí jsou absorpční nebo emisní čáry. Nejčastějším typem spektra je absorpční čárové spektrum, jehož zdrojem je převážná většina hvězd a vnějších galaxií. Emisní čárové spektrum poskytují plynné mlhoviny, hvězdy s rozsáhlými atmosférami, například Wolfovy-Rayetovy hvězdy s povrchovými teplotami až 100 000 K, dále také kvasary.

Spektra hvězd získáváme pomocí hranolového spektrografu, pro získávání podrobnějších spekter, například při určování chemického složení a fyzikálních podmínek v atmosférách hvězd, se používají štěrbinové spektrografy. V současné době se v nich dává přednost mřížkám, ve kterých jsou ztráty světelné energie menší než v hranolech. Objektiv dalekohledu vytváří zobrazení sledované hvězdy v rovině štěrbiny, která odřezává okolní oblohu.

2.5.1 Spojité spektrum

Hvězdy vysílají záření, jehož rozdělení intenzity vyzařování lze zhruba popsat pomocí zákonů záření černého tělesa. Spojité záření vzniká při srážkách volných elektronů s jádry atomů vodíku a hélia. Záření uvolňované při termojaderných reakcích v jádrech hvězd má maximum intenzity v oblasti gama záření a postupuje z nitra hvězd řetězcem absorpčních a emisních procesů pozvolna směrem k povrchu. Výsledkem těchto procesů je pole záření, které má téměř izotropní charakter. Tepelné záření nižších vrstev fotosférické plazmy, vyvolané při srážkách nabitých částic a následné změně směru jejich pohybu, poskytuje spojité spektrum.

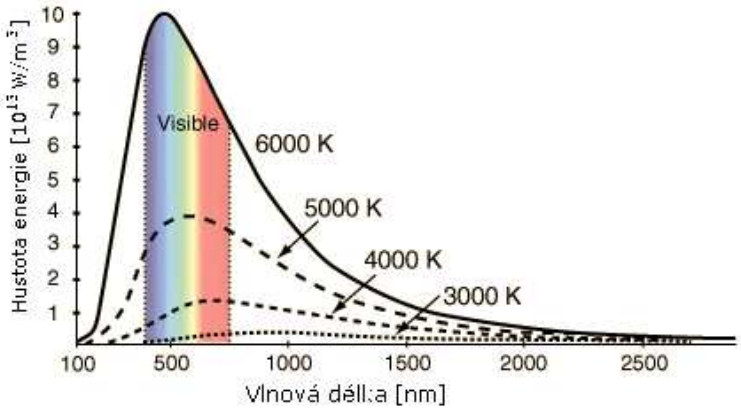
Porovnáme-li křivky intenzit vyzařování hvězd o různých povrchových teplotách, zachycující průběh spojitých spekter, dospějeme k závěru, že charakter spojitého spektra hvězd je závislý na teplotě, neboť na ní závisí rozdělení energie podle vlnových délek (obr. 2.8).

Celkový zářivý výkon hvězdy vyjadřujeme pomocí Stefanova-Boltzmannova zákona. Zářivý výkon je dán obsahem povrchu hvězdy a její povrchovou teplotou. Předpokládáme-li, že hvězda září jako absolutně černé těleso, platí:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{ef}^4 \,, \tag{2.5}$$

kde $\sigma = 5,67.10^{-8}$ W.m^{-2}.K^{-4} je Stefanova-Boltzmannova konstanta, R je poloměr hvězdy, T_{ef} je *efektivní povrchová teplota*. Určíme-li zářivý výkon hvězdy a známe-li její poloměr, můžeme jednoduše určit efektivní povrchovou teplotu.

Povrchovou teplotu hvězdy lze též určit z křivky intenzity vyzařování hvězdy



Obrázek 2.8: Závislost charakteru spektra na teplotě

pomocí Wienova posunovacího zákonu (2.6).

$$\lambda_{max} = \frac{0,002898}{T} \tag{2.6}$$

2.5.2 Absorpční čárové spektrum

Na tomto místě si stručně vysvětlíme vznik absorpčních spektrálních čar ve spektru hvězdy. Teplota hvězdy v nitru je velmi vysoká (např. u Slunce dosahuje až $1,5.10^7$ K) a směrem k povrchu postupně klesá. Záření, které vzniká v nitru hvězdy, je pohlcováno sousedními vrstvami, které také vyzařují. Záření, které se dostane až k nám, vzniká ve fotosféře, jež tvoří viditelný povrch hvězdy a je nejnižší vrstvou hvězdné atmosféry. Ve fotosféře vzniká záření se spojitým spektrem. Ve vnějších vrstvách fotosféry a v atmosféře nad ní je pohlcováno záření s vlnovými délkami odpovídajícími přechodům mezi stacionárními stavy atomů těch prvků, z nichž se atmosféra skládá. Jsou-li např. v atmosféře atomy vodíku ve stavu s energií E_2 (první excitovaný stav), bude pohlcováno záření, pro jehož vlnové délky platí vztah

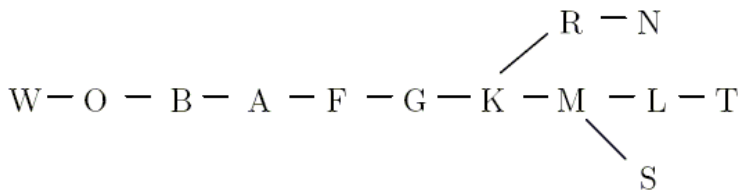
$$hf = h\frac{c}{\lambda} = E_n - E_2\,, \quad n = 3, 4, \ldots$$

V záření přicházejícím od hvězdy vidíme pak tmavé čáry o vlnových délkách Balmerovy série. Tak zjistíme, že v atmosféře hvězdy jsou atomy vodíku ve stavu s $n = 2$.

2.5.3 Spektrální klasifikace

Ve spektru hvězd můžeme vidět spektrální čáry různých prvků. Nejdříve si astronomové domnívali, že tyto rozdíly jsou způsobeny odlišným chemickým složením hvězd. Později se ukázalo, na základě výsledků kvantové mechaniky, že různost spekter je způsobena především odlišnou teplotou hvězdných atmosfér. Na teplotě závisí, které atomy mohou pohlcovat nebo vyzařovat světlo.

Podle výskytu spektrálních čar ve spektru a jejich intenzity se hvězdy dělí na různé spektrální třídy. Jedná se hlavně o čáry vodíku, vápníku a čáry kovů. V současné době jsou hvězdy rozděleny do 13 tříd (viz. obr. 2.9).



Obrázek 2.9: Harvardská spektrální klasifikace

Posloupnost tříd vyjadřuje klesající teplotu od písmene W k písmenu T, Každá spektrální třída je rozdělena na 10 podtříd, které jsou označeny číslicí $0, 1, 2, \ldots, 9$. Máme tedy např. hvězdy typu B2, A0, M7, atd. Přibližné rozsahy povrchových teplot hvězd jednotlivých tříd s typickými představiteli jsou uvedeny v tabulce 2.4.

Sp. třída	Povrchová teplota [K]	Typický představitel
W	nad 50000	V 444 Cyg
O	50000–30000	Hatysa, Menkib
B	30000–11000	Regulus, Rigel
A	11000–7500	Vega, Sírius A
F	7500–5900	Polárka, Canopus
G	5900–5200	Slunce, Capella
K	5200–3900	Arktur, Aldebaran
M	3900–2500	Antares, Betelgeuze

Tabulka 2.4: Přehled spektrálních tříd

2.6 Další stavové veličiny

2.6.1 Poloměr

Přímé určení poloměru hvězd je vzhledem k jejich vzdálenosti nemožné. Pomocí metod, které využívají interferenci světla je možné přibližné určování poloměrů blízkých hvězd. Další možností, jak určit poloměr hvězdy, je výpočet ze znalosti zářivého výkonu L a efektivní povrchové teploty T_{ef} použitím vztahu (2.5).

V tabulce 2.5 jsou poloměry některých hvězd.

hvězda	R/R_{Slunce}
Proxima Centauri	0,2
Sírius A	1,7
Vega	2,8
Achernar	10,0
Rigel	62,0

Tabulka 2.5: Poloměry vybraných hvězd

2.6.2 Hmotnost

Hmotnost hvězdy lze snadno určit jen tehdy, pozorujeme-li pohyb jiného tělesa v jejím gravitačním poli. Například můžeme určit hmotnost Slunce, známe-li oběžnou dobu a vzdálenost některé obíhající planety.

Úloha:
Vypočítejte hmotnost Slunce, víte-li, že Země obíhá kolem Slunce po kružnici o poloměru $r = 1\,\mathrm{AU} = 1{,}496 \cdot 10^{11}\,\mathrm{m}$ s oběžnou dobou $T = 1\,\mathrm{rok} = 3{,}156 \cdot 10^{7}\,\mathrm{s}$. Při řešení použijte podmínku $F_g = F_d$.

U vzdálených hvězd ale planety pozorovat nemůžeme. Víme však, že velký počet hvězd je sdružen do dvojhvězd (nebo vícenásobných hvězd). Obě složky dvojhvězdy obíhají kolem společného hmotného středu (těžiště) dvojhvězdy. Je-li r vzdálenost mezi složkami dvojhvězdy a jejich hmotnosti jsou M_1 a M_2, pak lze podobně jako v předchozí úloze odvodit vztah

$$M_1 + M_2 = \frac{4\pi^2}{G} \cdot \frac{r^3}{T^2}\ , \tag{2.7}$$

kde G je gravitační konstanta. Tento vztah je III. Keplerův zákon v přesném tvaru. Když vyjádříme vzdálenost složek v astronomických jednotkách,

hmotnost jako násobky hmotnosti Slunce a oběžnou dobu v rocích dostaneme zjednodušený vztah

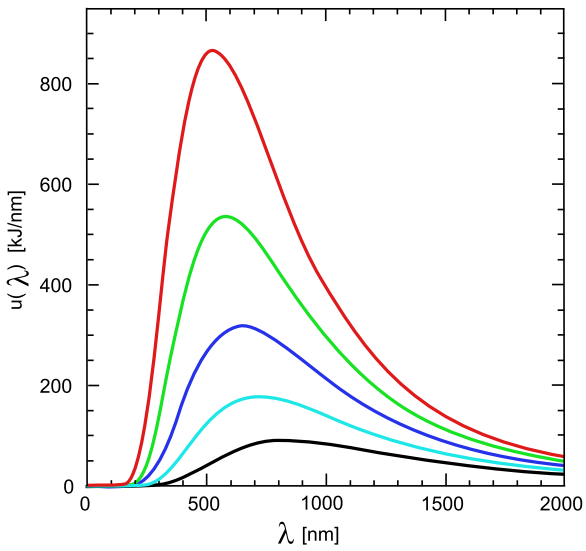
$$M_1 + M_2 = \frac{r^3}{T^2} \ .$$

$M_1 + M_2$ je hmotnost celé soustavy. Abychom zjistili hmotnosti jednotlivých hvězd dvojhvězdy, musíme ještě zjistit jejich vzdálenosti r_1, r_2 od hmotného středu. Pro poměr hmotností platí

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{r_2}{r_1} \ .$$

Úlohy

1. Určete teploty hvězd z grafů na obr. 2.10.

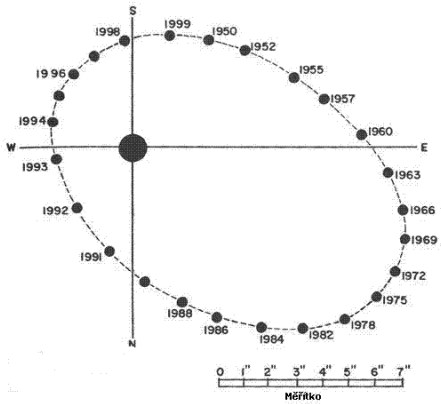


Obrázek 2.10: Obrázek k úloze 4

2. Zářivý tok záření dopadajícího z hvězdy Vega na plochu o obsahu 1 m^2 na Zemi je $2 \cdot 10^{-8}$ W. Znáte-li povrchovou teplotu této hvězdy $T_{ef} = 9600\,\mathrm{K}$, určete poloměr hvězdy v jednotkách poloměru Slunce.

3. Podobně jako v předchozím textu určete hmotnost Země, znáte-li střední vzdálenost Měsíce od Země $r = 384400\,\mathrm{km}$. Určete také střední hustotu Země. Zemi považujte za kouli o poloměru 6370 km.

4. Složky dvojhvězdy Sírius mají střední vzdálenost 19,8 AU a oběžnou dobu 51 let. Vypočtěte hmotnosti jednotlivých hvězd, víte-li, že vzdálenost Síria A od hmotného středu soustavy je 6,6 AU. (obr. 2.11)



Obrázek 2.11: Pozorovaná dráha Síria B obíhajícího kolem Síria A

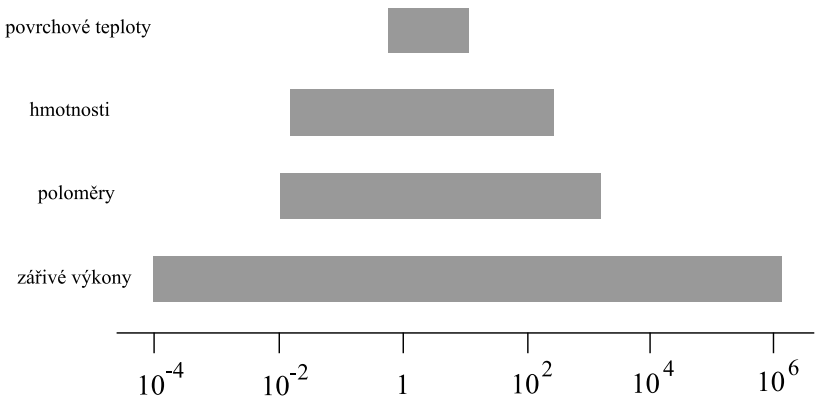
2.7 Rozsah základních charakteristik hvězd

V předešlých částech jsme se dozvěděli, jakým způsobem se získávají základní údaje o hvězdách, o jejich vzdálenostech, zářivých výkonech, povrchových teplotách, atd. Pomocí těchto údajů bylo možné začátkem 20. století získat představu o rozložení hvězd v našem okolí a o jejich fyzikálních vlastnostech. V tabulce 2.6 jsou přehledně shrnuty základní charakteristiky Slunce.

hmotnost Slunce	$M_S = 1{,}99 \cdot 10^{30}$ kg
poloměr Slunce	$R_S = 6{,}96 \cdot 10^{8}$ m
povrchová teplota Slunce	$T_S = 5780$ K
zářivý výkon Slunce	$L_S = 3{,}83 \cdot 10^{26}$ W

Tabulka 2.6: Základní charakteristiky Slunce

Rozsahy základních charakteristik ostatních hvězd vyjádřené v odpovídajících jednotkách Slunce jsou znázorněny na obr. 2.12.

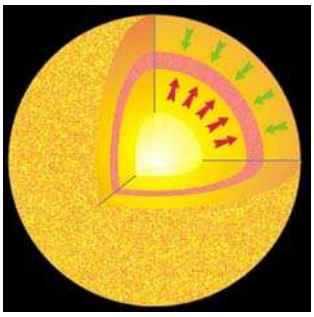


Obrázek 2.12: Rozsah hvězdných charakteristik

2.8 Vnitřní charakteristiky hvězd

V této části probereme fyzikální podmínky v nitru hvězd. Bude nás zajímat centrální tlak a centrální teplota. Informace z nitra hvězd nelze získat přímo z pozorování. Podmínky uvnitř hvězd lze zjistit pomocí výpočtů a jistých předpokladů.

Budeme předpokládat, že v celé hvězdě platí známé fyzikální zákony a že látka uvnitř hvězdy se chová jako plyn. Hvězdu si tedy představíme jako plynný kulový útvar. Aby byla hvězda stabilní, musí být v rovnováze gravitační síla směřující dovnitř hvězdy a vztlaková síla, která působí směrem ven z hvězdy (viz. obr. 2.13).



Obrázek 2.13: Mechanická rovnováha uvnitř hvězdy

Představme si válec se základnou S, výškou Δr, osa válce směřuje radiálně ke středu hvězdy. Na spodní podstavu působí síla, která je rovna $p \cdot S$, na

horní podstavu $(p + \Delta p) \cdot S$. Rozdíl těchto sil $\Delta p \cdot S$ označíme F_1. Tíha válce je $F_2 = \rho S \Delta r g$. Platí $F_1 + F_2 = 0$. Odtud vyplývá rovnice hydrostatické rovnováhy

$$\Delta p = -\rho g \Delta r$$

Tento vztah vyjadřuje skutečnost, že tlak roste od povrchu směrem do středu hvězdy. V následujícím textu provedeme odhad centrálního tlaku a teploty uvnitř Slunce.

2.8.1 Centrální tlak

Pro tlak plynu platí vztah

$$p_g = \frac{A}{\mu} \rho T \,,$$

kde A je plynová konstanta, $A = 8{,}31 \cdot 10^3\,\mathrm{J \cdot kg \cdot K^{-1}}$, μ je střední hmotnost připadající na jednu částici. Dále vyjdeme z rovnice hydrostatické rovnováhy zapsané zjednodušeně $p = p_{\mathrm{g}}$. Tuto podmínku si můžeme názorně představit tak, že tlak plynu v blízkosti středu plynné koule se musí rovnat tlaku vytvářenému tíhou sloupce plynu s příčným průřezem $1\,\mathrm{m}^2$ a výškou rovnou poloměru koule - hvězdy. Tíha sloupce plynu je rovna síle, kterou je přitahována ke středu koule. Dosadíme do zákona všeobecné gravitace

$$F = -G \frac{M m_2}{\left(\frac{R}{2}\right)^2} \,,$$

kde M je hmotnost celé koule a m_2 je hmotnost výše definovaného sloupce plynu. Označíme-li symbolem ρ průměrnou hustotu plynu v sloupci, pak $m_2 = \rho R$, kde R je poloměr koule. Vzdálenost mezi středy koule a sloupce plynu je $r = R/2$. Za těchto podmínek je tíha vytyčeného sloupce plynu na $1\,\mathrm{m}^2$ rovna

$$p_c = G \frac{M \rho R}{\left(\frac{R}{2}\right)^2} = 4G \frac{\rho M}{R} \,.$$

Po dosazení základních charakteristik Slunce, $M = 2 \cdot 10^{30}\,\mathrm{kg}$, $R = 7 \cdot 10^8\,\mathrm{m}$, $\rho = 1{,}4 \cdot 10^3\,\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$ obdržíme

$$p_c \approx 10^{15}\,\mathrm{N \cdot m^{-2}} \,.$$

2.8.2 Centrální teplota

Zde provedeme výpočet průměrné teploty v nitru Slunce T. Budeme předpokládat, že přibližně platí $p = p_c/2$, kde p je průměrný tlak ve vzdálenosti

$r = R/2$ od středu Slunce. Dosazením do vztahu pro tlak obdržíme

$$p = \frac{2G\rho M}{R}\,.$$

Ze stavové rovnice vyjádříme

$$T = p\frac{\mu}{\rho A} = \frac{2G\mu M}{AR}\,.$$

Odtud po dosazení, při $\mu = 0{,}6$ získáme

$$T \approx 10^7\,\mathrm{K}\,.$$

2.9 Zdroje energie ve hvězdách

Prvním vysvětlením pro záření hvězd bylo hoření. Tuto myšlenku však vyvrátil John Herschel, uvědomil si, že není znám způsob hoření, jenž by na dlouho pokryl zářivý výkon hvězdy. Herman von Helmholtz vypočítal, že naše Slunce by hořením spálilo veškerou hmotu asi za 3000 let. Další teorií vysvětlující záření hvězd byla gravitace, ale Helmholtz a Kelvin v 19. století dokázali, že tato energie je nedostačující. Dalším možným zdrojem záření mohla být anihilace hmoty, ale hvězda složená z hmoty a antihmoty by vyzářila veškerou energii naráz při mohutném výbuchu.

Na správnou cestu se vědci dostali, díky objevu Einsteinovu vztahu $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$, až ve dvacátých letech minulého století, kdy předpokládali v nitru hvězdy jaderné reakce. Na konci třicátých let minulého století bylo teoreticky určeno o jaké jaderné reakce může jít. Současné fyzikální poznatky nás vedou k vysvětlení záření hvězd pomocí slučování jader – termonukleární syntézy.

Termonukleární syntéza je fyzikální proces, který probíhá za vysokých teplot (od 10^7 K) a velkých tlaků v nitru hvězdy. Sloučením lehčích prvků vznikají prvky těžší. Při této reakci se v důsledku existujícího hmotnostního úbytku uvolňuje vazebná energie.

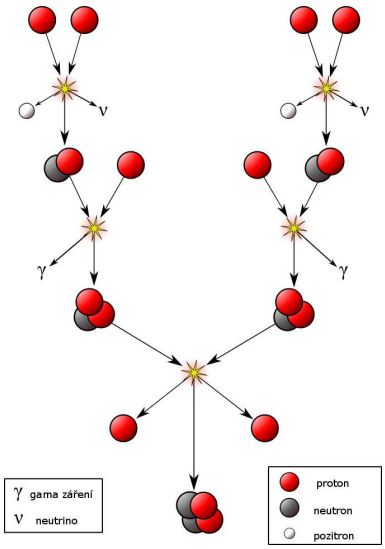
Známe dva základní řetězce termojaderných reakcí syntézy vodíku na helium. Při relativně nižších teplotách, přibližně $(5\text{–}15)\cdot 10^6\,\mathrm{K}$, se uplatňuje proton-protonový řetězec. Ve hvězdách s větší hmotností a tedy i vyšší centrální teplotou se na termonukleárních reakcích podílejí i prvky s vyšší atomovou hmotností. Převládá zde tzv. CNO cyklus.

2.9.1 Proton-protonový řetězec

Tato reakce začíná srážkou dvou protonů, při níž vzniká deuteron, pozitron a neutrino. Deuteron snadno reaguje s dalším protonem, vzniká jádro ${}^{3}_{2}\mathrm{H}$ a vyzáří se částice γ. Jádro ${}^{3}_{2}\mathrm{H}$ reguje s dalším jádrem ${}^{3}_{2}\mathrm{H}$, přičemž vznikne jádro ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ a dva protony. Reakce p-p řetězce můžeme zapsat takto:

$$
\begin{aligned}
{}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{2}_{1}\mathrm{H} + \mathrm{e}^{+} + \nu\,, \\
{}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + \gamma\,, \\
{}^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{3}_{2}\mathrm{He} &\rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}\,.
\end{aligned}
$$

Na obr. 2.14 je schéma p-p řetězce.



Obrázek 2.14: Proton-protonový řetězec

Do těchto reakcí vstupuje celkem 6 protonů, vystupuje jádro ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$, dva protony, pozitron, neutrino a γ částice. Jednoduše se dá zjistit (viz. úloha 1), že celková energie uvolněná při vzniku jádra helia ze čtyř protonů je 26,2MeV. Neutrino uniká z hvězdy do mezihvězdného prostoru. Pozitron i γ částice jsou pohlceny zpět a zvyšují teplotu hvězdy. Záření vznikající v hlubinách hvězdy je pohlcováno vyššími vrstvami, které také vysílají záření. Zářivá energie tak pozvolna postupuje z nitra na povrch hvězdy. Záření které k nám doletí, je vysíláno fotosférou blízko povrchu hvězdy.

2.9.2 CNO cyklus

Tento cyklus je jinou cestou přeměny vodíku na helium za přítomnosti uhlíku. Na začátku interaguje atom uhlíku ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ s vodíkem za vzniku izotopu dusíku ${}^{13}_{7}\mathrm{N}$ a záření γ. Potom se nestabilní izotop dusíku ${}^{13}_{7}\mathrm{N}$ přemění na izotop uhlíku ${}^{13}_{6}\mathrm{C}$ při současném vyzáření pozitronu a neutrina. Izotop ${}^{13}_{6}\mathrm{C}$ poté reaguje s dalším protonem a vzniká normální dusík a záření γ. Dusík reaguje s dalším protonem a dává vznik záření γ a nestabilnímu izotopu ${}^{15}_{8}\mathrm{O}$, který se následně přemění na izotop dusíku ${}^{15}_{7}\mathrm{N}$ s vyzářením pozitronu a neutrina. Poslední reakce CNO cyklu probíhá mezi izotopem ${}^{15}_{7}\mathrm{N}$ a protonem. Vznikne uhlík ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ a helium ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$.

Reakce tohoto cyklu můžeme zapsat následovně, schéma je na obr. 2.15

$$
\begin{aligned}
{}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{13}_{7}\mathrm{N} + \gamma\,,\\
{}^{13}_{7}\mathrm{N} &\rightarrow {}^{13}_{6}\mathrm{C} + \mathrm{e}^{+} + \nu\,,\\
{}^{13}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + \gamma\,,\\
{}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{15}_{8}\mathrm{O} + \gamma\,,\\
{}^{15}_{8}\mathrm{O} &\rightarrow {}^{15}_{7}\mathrm{N} + \mathrm{e}^{+} + \nu\,,\\
{}^{15}_{7}\mathrm{N} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}\,.
\end{aligned}
$$

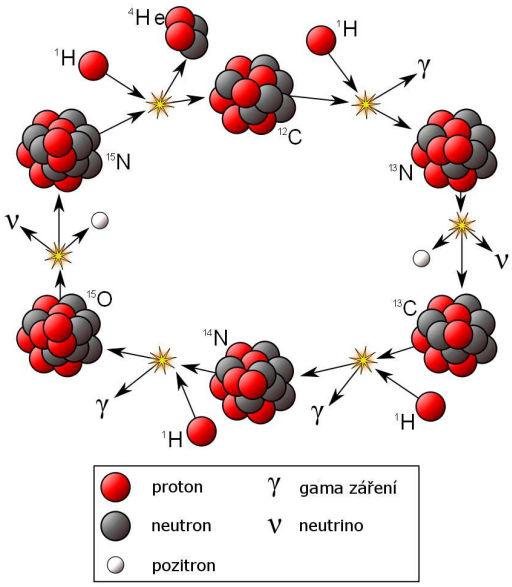
Jádro nuklidu uhlíku ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ tedy vystoupí z řetězce beze změny a může se účastnit dalších reakcí. Energie uvolněná při vzniku helia v tomto cyklu je téměř stejná jako u p-p řetězce.

Vodíkové reakce jsou nejefektivnějším způsobem uvolňování hvězdné energie a jsou hlavním zdrojem jejich energie po celou dobu aktivního života.

Po vyčerpání zásob helia proběhne smršťování a zahřívání centrálních oblastí hvězdy, až jsou nastoleny vhodné fyzikální podmínky, centrální teplota řádově $10^8\,\mathrm{K}$ a hustota řádově $10^6\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$, pro uskutečnění další termojaderné přeměny jader atomu helia na jádra atomu uhlíku. Pokračující jadernou exotermickou syntézou vznikají těžší prvky až po skupinu železa včetně. Vznik dalších prvků vyžaduje naopak dodání energie, například při explozích supernov.

Úlohy

1. Jaký je hmotnostní úbytek a energetický zisk z termojaderné syntézy 4 protonů na jádro helia?



Obrázek 2.15: CNO cyklus

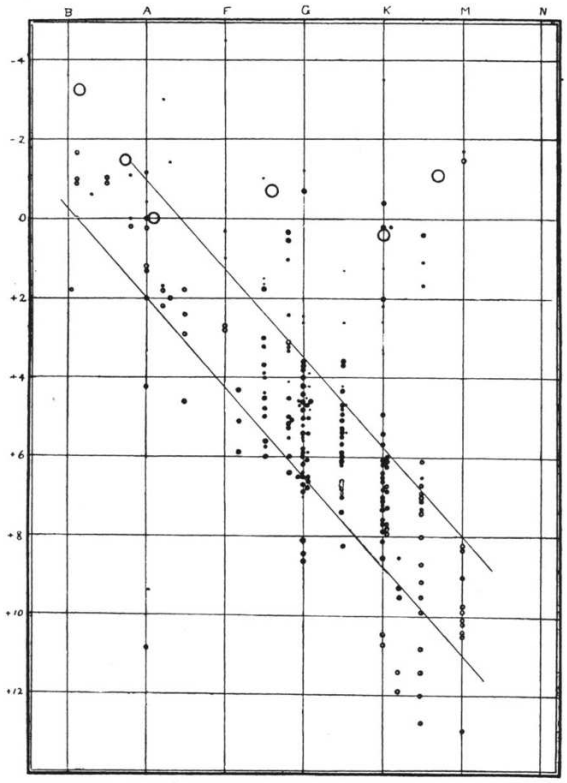
2. Jaké množství vodíku se za 1 s přemění na helium ve hvězdě, jejíž celkový zářivý výkon je $3{,}83 \cdot 10^{26}$ W ?

2.10 H-R diagram

2.10.1 Stavová interpretace

Na počátku 20. století začali astronomové zkoumat statistické závislosti mezi spektrálními třídami a dalšími charakteristikami hvězd získávanými z fotometrických pozorování (např. pozorovanou hvězdnou velikostí, absolutní hvězdnou velikostí a zářivým výkonem). Ejnar Hertzsprung uvádí v roce 1905 v tabulkové podobě rozdělení hvězd se známou vzdáleností na posloupnost trpaslíků a obrů. Roku 1913 sestrojil Henry Norris Russell diagram závislosti absolutní hvězdné velikosti na spektrální třídě pro vybrané hvězdy s tehdy známými paralaxami – viz. obr. 2.16. Podle těchto dvou astronomů se tento diagram nazývá Hertzsprungův-Russellův, zkráceně H-R diagram.

Na vodorovnou osu vynášíme efektivní teplota T_{ef} nebo spektrální typ. Efektivní teplota klesá zleva doprava. Na svislou osu je vynášen zářivý výkon hvězdy L v jednotkách zářivého výkonu Slunce, nebo absolutní hvězdná velikost M. Pro efektivní teplotu a zářivý výkon je použita logaritmická stupnice

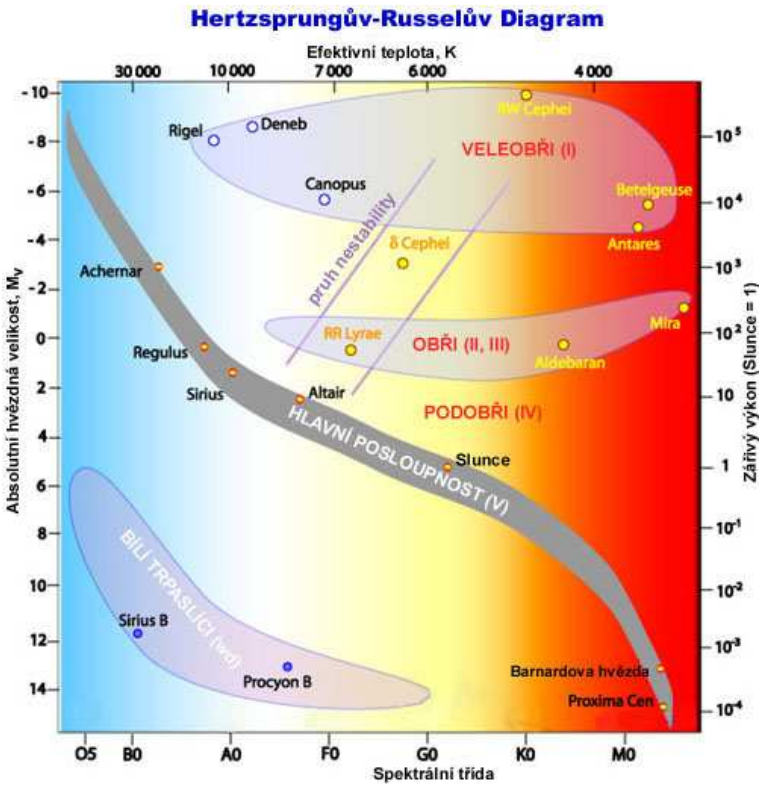


Obrázek 2.16: Graf závislosti absolutní hvězdné velikosti na spektrální třídě sestrojený H. N. Russellem

(viz. obr. 2.17).

Zářivý výkon (absolutní hvězdnou velikost) a efektivní povrchovou teplotu (spektrální třídu) lze stanovit z pozorování hvězd a podle zjištěných hodnot můžeme každou hvězdu znázornit jako bod H-R diagramu. Po zakreslení velkého počtu hvězd zjistíme, že diagram není těmito body zaplněn rovnoměrně, body se hromadí do několika oblastí. Úhlopříčně probíhá diagramem nejpočetnější skupina hvězd, tzv. hlavní posloupnost. Patří sem asi 90 % všech hvězd. Nad hlavní posloupností jsou dvě skupiny nazvané větev obrů větev nadobrů. V levém dolní rohu jsou hvězdy zvané bílí trpaslíci.

Pro zářivý výkon platí vztah (2.5). Zářivý výkon je tedy přímo úměrný efektivní teplotě a poloměru hvězdy. Hvězdy, které leží v H-R diagramu nad sebou, mají stejnou teplotu a hvězda ležící výš má větší zářivý výkon. Z toho plyne, že výše položená hvězda musí mít větší poloměr a naopak. Proto tedy označení obři a trpaslíci.



Obrázek 2.17: H-R diagram

Pro představu o množství hvězd v jednotlivých skupinách, uvedem příklad naší Galaxie. Na 10 miliónů hvězd hlavní posloupnosti zde připadá 1 milión bílých trpaslíků, 1 tisíc obrů a pouze jeden veleobr.

Úlohy

1. Určete přibližný poloměr hvězd Sírius B, Slunce, Aldebaran a Betelgeuse z H-R diagramu na obr. 2.17

2. U následujících hvězd byla zjištěna jejich paralaxa, pozorovaná hvězdná velikost a byl určen spektrální typ. V tabulce 2.7 je seznam nejbližších hvězd a v tabulce 2.8 seznam nejjasnějších hvězd. Na základě zadaných informací zakreslete hvězdy do H-R diagramu.

hvězda	spektrální třída	paralaxa ["]	pozorovaná hv. velikost [mag]
Proxima Centauri	M5	0,769	11,09
Alfa Centauri A	G2	0,747	0,01
Alfa Centauri B	K0	0,747	1,34
Barnardova hvězda	M4	0,547	9,53
Wolf 359	M6	0,419	13,44
Lalande 21185	M2	0,393	7,47
Sírius A	A1	0,379	−1,46
Sírius B	A2	0,379	8,44
Luyten 726-8 A	M5	0,374	12,54
Luyten 726-8 B	M6	0,374	12,99
Ross 154	M3	0,337	10,43
Ross 248	M5	0,316	12,29
Epsilon Eridani	K2	0,310	3,73
Lacaille 9352	M1	0,304	7,34
Ross 128	M4	0,299	11,13
Luyten 789-6A	M5	0,290	13,33
Procyon A	F5	0,286	0,38
Procyon B	A	0,286	10,70
61 Cyg A	K5	0,286	5,21
61 Cyg B	K7	0,286	6,03
Struve 2398 A	M3	0,283	8,90
Struve 2398 B	M3	0,283	9,69
Groombridge 34 A	M1	0,281	8,08
Groombridge 34 B	M3	0,281	11,06

Tabulka 2.7: Seznam nejbližších hvězd

hvězda	spektrální třída	paralaxa ["]	pozorovaná hv. velikost [mag]
Sírius	A1	0,380	−1,46
Canopus	F0	0,010	−0,72
Arctur	K1	0,089	−0,04
Alfa Centauri	G2	0,747	0,01
Vega	A0	0,129	0,03
Capella	G6	0,077	0,08
Rigel	B8	0,004	0,18
Procyon	F5	0,286	0,38
Achernar	B3	0,023	0,50
Betelgeuze	M2	0,005	0,58
Agena	B1	0,009	0,60
Altair	A7	0,194	0,77
Acrux	B1	0,010	0,81
Aldebaran	K5	0,050	0,85
Spica	B1	0,012	1,04
Antares	M1	0,005	1,09
Pollux	K0	0,097	1,15
Fomalhaut	A3	0,131	1,16
Deneb	A2	0,002	1,25
Mimosa	B0	0,009	1,30
Regulus	B7	0,042	1,35

Tabulka 2.8: Seznam nejjasnějších hvězd

2.10.2 Vývojová interpretace

Každá hvězda během svého vývoje mění svou teplotu i zářivý výkon a prochází postupně určitými oblastmi H-R diagramu, proto ho můžeme chápat také jako obraz minulosti a budoucnosti hvězd. V další kapitole budeme používat H-R diagram k popisu vzniku a vývoje hvězd.

2.11 Vznik a vývoj hvězd

Hvězdy vznikají z mezihvězdného plynu, který obsahuje převážně vodík. Velké mračno plynu a prachu se postupně smršťuje vlivem gravitačních sil. Hmotnost plynu, při níž toto smršťování začíná, je mnohem větší než hmotnost typické hvězdy. Při smršťování plynu dochází ke dvěma důležitým pro-

cesům. Plyn se zahřívá a vznikají místní nestability. Z těchto zhuštění postupně vznikají hvězd. Další vývoj vznikající hvězdy (protohvězdy) závisí na její hmotnosti.

2.11.1 Hnědí trpaslíci

Je-li hmotnost protohvězdy menší než asi 0,07 M_S, pak dřív, než by v jejím nitru mohly začít probíhat termojaderné reakce, tam vznikne velmi hustá a téměř nestlačitelná látka – degenerovaný plyn. Tím se zastaví další smršťování a hvězda už jen chladne a tuhne. Takovým hvězdy nazýváme hnědí trpaslíci. Protože jsou mnohem menší a chladnější než klasické hvězdy, je obtížné je pozorovat – zatím jich známe jen stovky. Hnědý trpaslík postupně vychladne a stane se z něj černý trpaslík.

2.11.2 Hvězdy hlavní posloupnosti

Je-li hmotnost rodící se hvězdy větší než $0,07\,M_S$, zvyšuje se smršťováním teplota v jejím středu až na několik miliónů stupňů Celsia. Během smršťování se obraz hvězdy v H-R diagramu přibližuje k hlavní posloupnosti a „usadí“ se tam v okamžiku „zapálení“ termojaderných reakcí (p-p řetězec, CNO cyklus). Místo na hlavní posloupnosti, v němž hvězda začne zářit, závisí na její hmotnosti. Čím větší má hmotnost, tím větší má zářivý výkon a efektivní povrchovou teplotu. Období, po které je hvězda na hlavní posloupnosti, je poměrně stabilní a doba setrvání na ní je dána hmotností hvězdy. Hvězdy s větší hmotností září obrovským výkonem a brzy spotřebují zásoby vodíkového paliva. Pro hvězdy s hmotností řádově $10\,M_S$ vychází doba pobytu na hlavní posloupnosti několik milionů roků, zatímco hvězdy s hmotností Slunce setrvají na hlavní posloupnosti asi 10 miliard roků.

Postupnou syntézou jader atomu vodíku na jádra helia v centrální oblasti hvězdy dochází ke změnám vnitřní struktury hvězdy. Jádro se smršťuje, roste jeho teplota, vnější oblasti hvězdy expandují a klesá efektivní povrchová teplota. Hvězda zvětšuje svůj poloměr a vzhledem ke zvětšení objemu roste zářivý výkon hvězdy, barva se mění na červenou a obraz hvězdy se přesouvá do oblasti červených obrů. Poloha obrazu hvězdy na H-R diagramu se posouvá směrem vpravo nahoru. Rychleji probíhá tento vývoj pro hvězdy s větší hmotností a tedy i zářivým výkonem.

Po dosažení oblasti červených obrů se zvýší teplota v jádře hvězdy až na několik set milionů stupňů. Při této teplotě se helium explozivně spaluje a obraz

hvězdy se přesouvá na H-R diagramu doleva ke hvězdám nejvyšší teploty. Přitom může hvězda procházet stadiem pulsací, několikrát se zvyšuje a snižuje její zářivý výkon. V závěrečných obdobích vývoje obrů respektive veleobrů dochází ke značným ztrátám hmoty vnějších atmosférických obalů. Z nich postupně vznikají tzv. planetární mlhoviny. Vnitřní přestavba spotřebuje převážnou část uvolněné energie. Po vyčerpání termojaderných zdrojů energie je porušena rovnováha sil, převládá gravitační síla, jejímž působením se zbylé jádro hvězdy začne smršťovat. Obraz hvězdy se přesouvá do levé spodní části H-R diagramu.

2.11.3 Závěrečná stadia vývoje hvězd

Poslední vývojové stadium závisí především na hmotnosti jádra, které ještě hvězda má. Může vzniknout bílý trpaslík, neutronová hvězda či černá díra.

Je-li hmotnost hvězdy po všech ztrátách hmoty menší než $2{,}5\,M_S$, smršťování hvězdy se zastaví tlakem degenerovaného plynu. Tento tlak zastaví smršťování až při velmi malém objemu hvězdy. Např. Sírius B má hmotnost $1{,}02\,M_S$ a poloměr pouze 5400 km. Hvězdy s těmito hmotnostmi se stávají bílými trpaslíky. Jejich hustoty jsou obrovské. Energie získaná termojadernými reakcemi během celého vývoje hvězdy stačí k tomu, aby si hvězda ještě dlouho udržela vysokou teplotu.

U hvězd s hmotností $2{,}5\,M_S$ až zhruba $5\,M_S$ nestačí tlak degenerovaného plynu zastavit jejich gravitační smršťování. V nitru hvězdy dochází pod vysokým tlakem k reakci

$$e^- + p \rightarrow n + \nu\,,$$

při které z elektronů a protonů vznikají neutrony. Z neutronů v centrální oblasti vznikne neutronová hvězda. Je to útvar připomínající obrovské atomové jádro složené ze samých neutronů. Neutronové hvězdy mají obrovskou hustotu až 2 triliony tun na krychlový metr (malá lžička této hmoty by na Zemi měla hmotnost 5 miliard tun). Přitom jejich průměr je malý, pouze 20–30 kilometrů. Teplota povrchu dosahuje několika milionů K, ve středu až několik set milionů K. Hvězdy vyzařují do okolí viditelné, rádiové, rentgenové i kosmické záření i rychlé relativistické částice.

Při smršťování hvězdy s hmotností větší než $5\,M_S$ neznáme žádný mechanismus, který by toto smršťování zastavil – dochází ke gravitačnímu kolapsu hvězdy. Poloměr hvězdy se neustále zmenšuje a současně s tím roste intenzita gravitačního pole na jejím povrchu. Po zmenšení poloměru hvězdy pod určitou mez je gravitační pole hvězdy už natolik silné, že žádné těleso, a do-

konce ani záření, nemůže hvězdu opustit. Hvězdu, u níž proběhl gravitační kolaps, nazýváme černá díra. Černou díru nemůžeme pozorovat, protože nevysílá žádné záření. Její existenci je možné dokázat, protože se projevuje svým gravitačním působením. Může být například složkou dvojhvězdy.

Kapitola 3

Test znalostí

Obsahem této kapitoly je 20 testových otázek, které mají ověřit znalost probraného učiva. Ze čtyř možností odpovědi je vždy jen jedna správná.

1. Slunce dodá každému čtverečnímu metru plochy atmosféry Země výkon 1400 W. Jaký výkon obdrží čtvereční metr plochy na Jupiteru, který je od Slunce pětkrát dále?

   (a) 56 W

   (b) 280 W

   (c) 7000 W

   (d) 14000 W

2. Hvězda Proxima Centauri je od Slunce vzdálena 1,3 pc a má pozorovanou hvězdnou velikost $m = 11{,}1\,\mathrm{mag}$. Jaká je její absolutní hvězdná velikost?

   (a) 6,6 mag

   (b) 11,1 mag

   (c) 15,5 mag

   (d) 16,7 mag

3. Jaká je pozorovaná hvězdná velikost hvězdy, která se nachází ve vzdálenosti 100 pc a má absolutní hvězdnou velikost −1,5 mag?

   (a) −4,5 mag

   (b) 0,5 mag

(c) 3,5 mag

(d) 6,5 mag

4. Rozdíl $m - M$ pozorované a absolutní hvězdné velikosti je roven 10. Jaká je vzdálenost této hvězdy v parsecích?

   (a) 10

   (b) 100

   (c) 1000

   (d) 10000

5. V které z možností jsou objekty srovnány správně podle vzdálenosti od Země od nejbližších k nejvzdálenějším?

   (a) Sírius, Proxima Centauri, Neptun, galaxie M 31

   (b) Neptun, Sírius, Proxima Centauri, galaxie M 31

   (c) Neptun, Proxima Centauri, galaxie M 31, Sírius

   (d) Neptun, Proxima Centauri, Sírius, galaxie M 31

6. Roční paralaxa Barnadovy hvězdy je $\pi = 0,55"$. Jaká je její vzdálenost od Slunce?

   (a) 1,2 pc

   (b) 1,8 pc

   (c) 3,6 pc

   (d) 7,2 pc

7. Ve spektrech vzdálených galaxií pozorujeme

   (a) malý modrý posuv,

   (b) velký modrý posuv,

   (c) malý rudý posuv,

   (d) velký rudý posuv.

8. Ve spektru kvasaru 3C 273 je emisní čára vodíku o laboratorní vlnové délce 486,1 nm posunuta o 77,8 nm směrem k rudému konci spektra. Jaká je vzdálenost kvasaru? ($H = 75\,\mathrm{km} \cdot \mathrm{s}^{-1} \cdot \mathrm{Mpc}^{-1}$)

   (a) 640 Mpc

(b) 6400 Mpc
(c) 64000 Mpc
(d) 640000 Mpc

9. Posloupnost metod používaných k určování vzdáleností v astronomii podle narůstající vzdálenosti od Země je
   (a) metoda roční paralaxy, metoda cefeid, Hubbleův zákon,
   (b) Hubbleův zákon, metoda roční paralaxy, metoda cefeid,
   (c) metoda cefeid, metoda roční paralaxy, Hubbleův zákon,
   (d) metoda roční paralaxy, Hubbleův zákon, metoda cefeid.
10. Hlavní příčinou rozdílnosti čárových spekter hvězd je
   (a) chemické složení,
   (b) tlak,
   (c) rychlost hvězdy,
   (d) teplota.
11. Teploty hvězd lze získat astrofyzikálním měřením
   (a) rozdělení intenzity vyzařování podle vlnových délek,
   (b) Dopplerovského posuvu,
   (c) pozorované hvězdné velikosti,
   (d) absolutní hvězdné velikosti.
12. Mějme dvě hvězdy se stejnými poloměry. Efektivní povrchová teplota první z nich je 5000 K. Kolikrát větší zářivý výkon má druhá hvězda, jestliže její efektivní povrchová teplota je 15000 K?
   (a) 3krát
   (b) 9krát
   (c) 27krát
   (d) 81krát
13. Wienův posunovací zákon je vztahem mezi
   (a) energií fotonu a frekvencí,
   (b) teplotou a výkonem vyzařování na plochu,

(c) vlnovou délkou a frekvencí,

(d) vlnovou délkou a teplotou.

14. Maximum křivky závislosti intenzity vyzařování na vlnové délce pro Slunce připadá na vlnovou délku zhruba 480 nm. Na jakou vlnovou délku připadá maximum podobné křivky pro hvězdu, jejíž povrchová teplota je dvakrát větší než u Slunce?

    (a) 120 nm

    (b) 240 nm

    (c) 960 nm

    (d) 1920 nm

15. Seřaďte spektrální třídy podle teploty od nejchladnější po nejteplejší.

    (a) M, K, G, F, A, B

    (b) B, A, F, G, K, M

    (c) A, B, F, G, K, M

    (d) M, K, G, F, B, A

16. Hmotnost dvojhvězdy je $40\,M_S$, vzdálenost jednotlivých hvězd je 15 AU. První hvězda je ve vzdálenosti 12 AU od hmotného středu soustavy. Jaká je hmotnost první a druhé hvězdy?

    (a) $3\,M_S$, $12\,M_S$

    (b) $8\,M_S$, $32\,M_S$

    (c) $32\,M_S$, $8\,M_S$

    (d) $12\,M_S$, $3\,M_S$

17. Povrchová teplota Slunce je přibližně

    (a) 3800 K,

    (b) 4800 K,

    (c) 5800 K,

    (d) 6800 K.

18. Nejrozšířenějšími prvky zjištěnými v atmosférách hvězd jsou

    (a) dusík, kyslík,

(b) vodík, helium,
(c) železo, nikl,
(d) plutonium, uran.

19. Co je zdrojem energie Slunce?

(a) slučování lehkých prvků na těžší
(b) rozpad těžších prvků na lehčí
(c) záření z roztavených hornin
(d) teplo vzniklého za velkého třesku

20. Naše Slunce bude ve svém závěrečném stadiu

(a) hnědým trpaslíkem,
(b) bílým trpaslíkem,
(c) neutronovou hvězdou,
(d) černou dírou.

Správné odpovědi:
1. (a), 2. (c), 3. (c), 4. (c), 5. (d), 6. (b), 7. (d), 8. (a), 9. (a), 10. (d), 11. (a), 12. (d), 13. (d), 14. (b), 15. (a), 16. (b), 17. (c), 18. (b), 19. (a), 20. (b)

Kapitola 4

Využití multimédií ve výuce tématu „Hvězdy“

4.1 Materiální didaktické prostředky ve výuce fyziky

Didaktické prostředky zaujímají stále výraznější místo v edukačním procesu, jsou důležitým motivačním prvkem ve vyučování. S rozvojem kultury a techniky se didaktické prostředky mění a vyvíjejí. Prostředkem se rozumí všechno, čeho učitel a žáci mohou využít k dosažení edukačního cíle. Prostředkem mohou být metody výuky, formy výuky, didaktická zásada, ale i školní tabule, učební prostory, učebnice, výpočetní technika apod. Obecně lze prostředky dělit na materiální a nemateriální (metody výuky, formy výuky, edukační cíle, ...)

Funkce materiálních didaktických prostředků vyplývá z faktu, že člověk získává 80 % informací zrakem, 12 % informací sluchem, 5 % informací hmatem a 3 % ostatními smysly. V edukačním procesu však není tato skutečnost respektována a zapojení smyslů je odlišné: 80 % informací je získáváno sluchem, 12 % zrakem, 5 % hmatem a 3 % ostatními smysly.[19]

Ve fyzice slouží materiální didaktické prostředky zejména k realizaci principu názornosti. Pro fyziku jsou charakteristické některé rysy, plynoucí přímo z podstaty fyziky jako vědního oboru. Značná část jevů v přírodě je nedostupná bezprostřednímu smyslovému vnímání a informace o nich získáváme pomocí různých prostředků a zařízení, které transformují jevy do oblasti dostupné smyslům.

V současnosti se často uvažuje, jakým způsobem využít při výuce elektronická média jako moderní didaktické prostředky. Na základě toho se konstituují nové oblasti tzv. mediální pedagogiky (výchovy) a mediální didaktiky. Zatímco mediální didaktika se zabývá tím, jak optimálně zařadit média do procesu vyučování, mediální pedagogika analyzuje vlastní média a jejich používání.

4.1.1 Multimediální prezentace

Jedním z moderních didaktických prostředků je multimediální prezentace. V poslední době dochází k prudkému rozvoji využití prezentací ve výuce. Učitelé si uvědomují, že je nezbytné „jít s dobou“, zefektivnit výuku, udělat ji zajímavější a snaží se různými způsoby využít multimediální prezentace v edukačním procesu.

Prezentace by neměla sloužit jen jako náhrada křídy a tabule, je možné s její pomocí formulovat i problémové úlohy, a tak v žácích vzbudit zájem o danou učební látku. Prezentace tedy působí jako významný motivační prvek. Možností, jak využít multimediální prezentaci ve výuce, je nepřeberné množství. Záleží jen na učiteli, k jakému výukovému účelu prezentace využije.

Podobně jako všechny ostatní didaktické prostředky, i multimediální prezentace mají svoje výhody a nevýhody. Tvorba prezentací je sice velmi náročná a zdlouhavá, nicméně se vyplatí z dlouhodobého hlediska. Vyučujeme-li pomocí prezentace, stihneme probrat více učiva než při klasických metodách výuky. Některá témata mohou být dokonce vhodná i pro samostudium. Prezentace je komplexním prostředkem výuky, učitel nemusí hledat obrázky, spouštět video, psát na tabuli atd., ale zároveň je třeba dávat si pozor, aby výuka pomocí prezentace nepůsobila monotónně.

Také pro žáky je prezentace příjemnější a je-li navíc vhodně doplněna například krátkým videem, vzbudíme v žácích větší zájem o danou problematiku. Uvidí-li žáci nový obrázek, tak je zaujme. Pokud jim řekneme novou větu při výkladu, většina žáků ji ignoruje. Je dobré mít na paměti, že asi 80 % informací získávají žáci zrakem.

Pro učitele je prezentace velkou oporou, neboť díky jednotlivým poznámkám v prezentaci je výuka ucelenější, učitel má jistotu, že na nic nezapomene. Výhodou je také to, že si žáci mohou prezentaci odnést domů a použít ji při upevňování svých znalostí.

Zdá se tedy, že vyučování pomocí multimediálních prezentací má jen výhody, ale není tomu tak. Prezentace musí být připravena velmi pečlivě, aby

žáci byli schopni danou učební látku pochopit. Nejčastějším nedostatkem je právě nekvalitně připravená prezentace. Také u použití prezentací platí „všeho s mírou“. Je třeba si uvědomit, že pokud budeme vyučovat pouze pomocí multimediálních prezentací, budeme naopak žáky značně demotivovat. Pro pomalejší žáky mohou představovat úskalí, protože hodiny s prezentacemi jsou rychlejší a dynamičtější. Toto bychom měli mít na zřeteli a umožnit žákům, aby si prezentaci mohli prohlédnout znovu, nebo lépe, aby si ji mohli odnést domů.

Nevýhodou prezentace by mohla být i částečná ztráta individuálního kontaktu se žáky. Tomu se dá ovšem předejít, pokud budeme prezentaci průběžně prokládat vhodnými otázkami, úkoly apod. Multimediální prezentace je vynikajícím moderním didaktickým prostředkem, který nám ve výuce může velmi dobře posloužit. Mějme ale na paměti, že i prezentace mají jistá omezení, nelze je používat neustále a nahradit jimi ostatní metody a formy výuky.

4.1.2 Interaktivní tabule

Dalším moderním didaktickým prostředkem je interaktivní tabule. Je to tabule, která slouží učiteli k pestrému využití s možností aktivního zapojení žáků. Díky ní lze žákům zpříjemnit a zpestřit výklad a efektivně procvičit probrané téma.

Výhody a pozitiva, která interaktivní tabule přináší, převažují nad některými problémy. Klady tvoří především atraktivita a možnost se aktivně podílet na průběhu i tvorbě hodiny ze strany žáků. Pro učitele to znamená, hlavně v počátcích, především vyšší časovou náročnost na přípravu. Vložená časová investice je však později zúročena možností inovace původní práce, její doplňování, rozšiřování, zdokonalování a obohacování, nalézáním dalších a nových možností využití tabule i výukového materiálu. V některých případech může být dokonce odměnou za vynaloženou práci zaujetí žáků pro výuku.

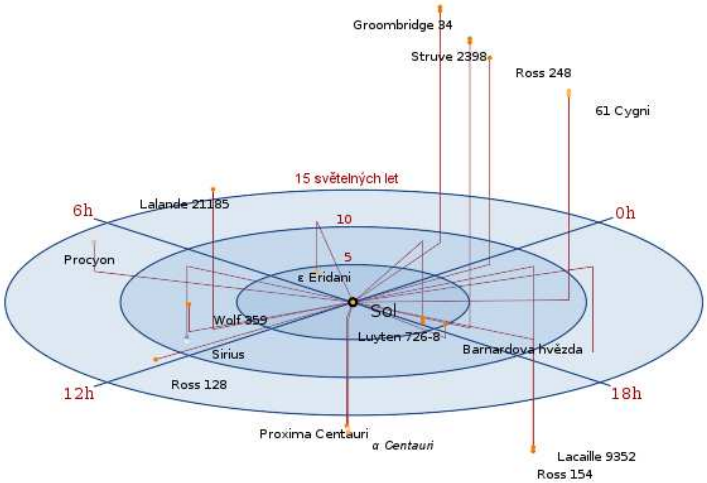
4.2 Konkrétní příklady využití multimédií

V této kapitole uvedu několik příkladů využití prezentací a interaktivních tabulí ve výuce tématu „Hvězdy“. Při výuce astrofyziky nelze učivo názorně demonstrovat pomocí experimentů. Informace o hvězdách získáváme pomocí pozorování, která nelze provádět přímo ve výuce. Proto je přínosné přiblížit studentům tato pozorování a jejich výsledky pomocí různých prezentací

(obrázky, diagramy). Nejrozšířenějším nástrojem pro tvorbu multimediálních prezentací je program Microsoft Powerpoint. Pokud učitel, popřípadě škola, nevlastní licenci tohoto programu, lze pro vytváření prezentací použít nějaký volně šiřitelný program (například OpenOffice.org Impress, který je součástí balíku OpenOffice.org a je zdarma stažitelný na internetu). Po vytvoření prezentace ji lze buď promítat pomocí dataprojektoru, nebo pokud škola vlastní interaktivní tabuli, použít prezentaci jako základ interaktivní výuky. Lze do prezentace dopisovat poznámky elektronickým perem, zapojit studenty při doplňování různých tabulek či při řešení úloh.

4.2.1 Vzdálenosti hvězd

Při výkladu učiva o vzdálenostech hvězd lze využít prezentaci obsahující obrázky 2.4, 2.5. Do těchto obrázků můžeme doplňovat různé poznámky. Na závěr kapitoly o vzdálenostech je vhodné ukázat studentům prostorové rozložení nejbližších hvězd kolem našeho Slunce (viz. obr. 4.1).

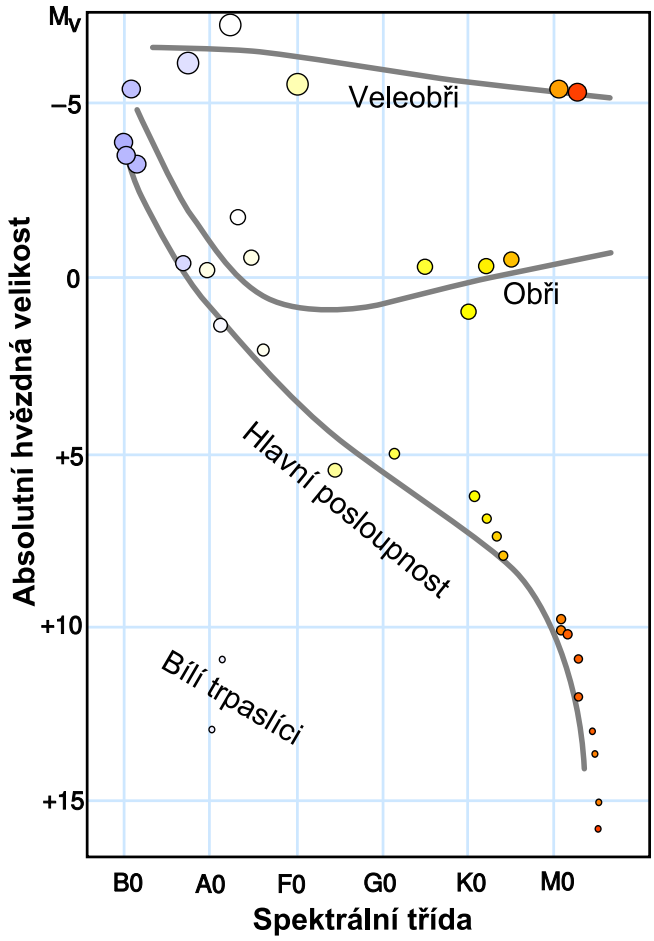


Obrázek 4.1: Nejbližší hvězdy a jejich rozložení v prostoru

4.2.2 Hvězdná velikost

Interaktivní tabuli můžeme použít při řešení různých úloh, například promítnout zadání úlohy 4 z podkapitoly 2.4 a nechat studenty doplňovat jednotlivé

buňky této tabulky. Poté ukázat přichystané řešení a diskutovat rozdíly ve výsledných hodnotách.



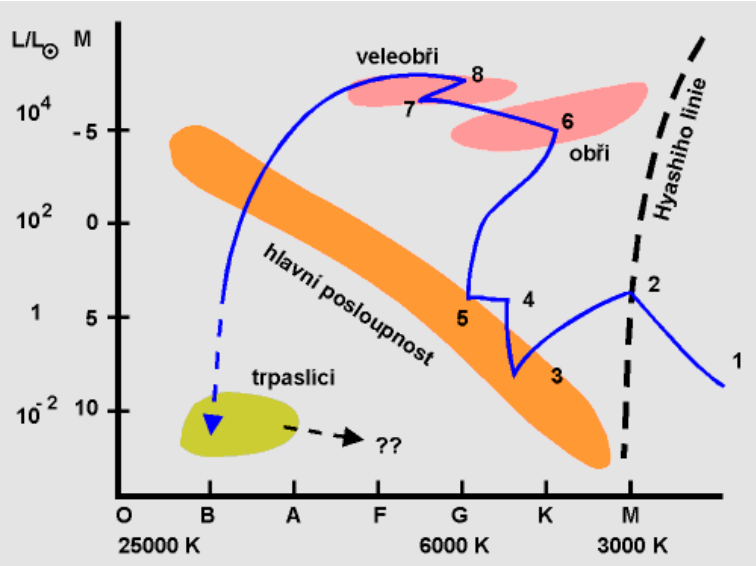
Obrázek 4.2: H-R diagram – řešení úlohy

4.2.3 H-R diagram

Interaktivní tabuli lze použít při tvorbě různých H-R diagramů. Na tabuli promítneme prázdný H-R diagram a postupně zakreslujeme hvězdy např. z úlohy 2 odstavce 2.10.1. Poté zvýrazníme hlavní posloupnost, větev obrů, veleobrů a bílých trpaslíků. U tohoto diagramu je vidět uplatnění výběrových efektů. Nejjasnější hvězdy pozorujeme na velké vzdálenosti, proto je jich v tomto diagramu podstatně více, než odpovídá jejich skutečnému zastoupení mezi všemi hvězdami. Výsledný H-R diagram je na obr. 4.2.

4.2.4 Vývoj hvězd

Pomocí prezentace můžeme vést přímo výklad učiva, například vývoj hvězdy a její posun po H-R diagramu. Do předchystaného diagramu zakreslíme přibližnou „životní dráhu“ hvězdy (viz. obr. 4.3). Pro srovnání můžeme také naznačit vývoj hvězdy s jinou počáteční hmotností.



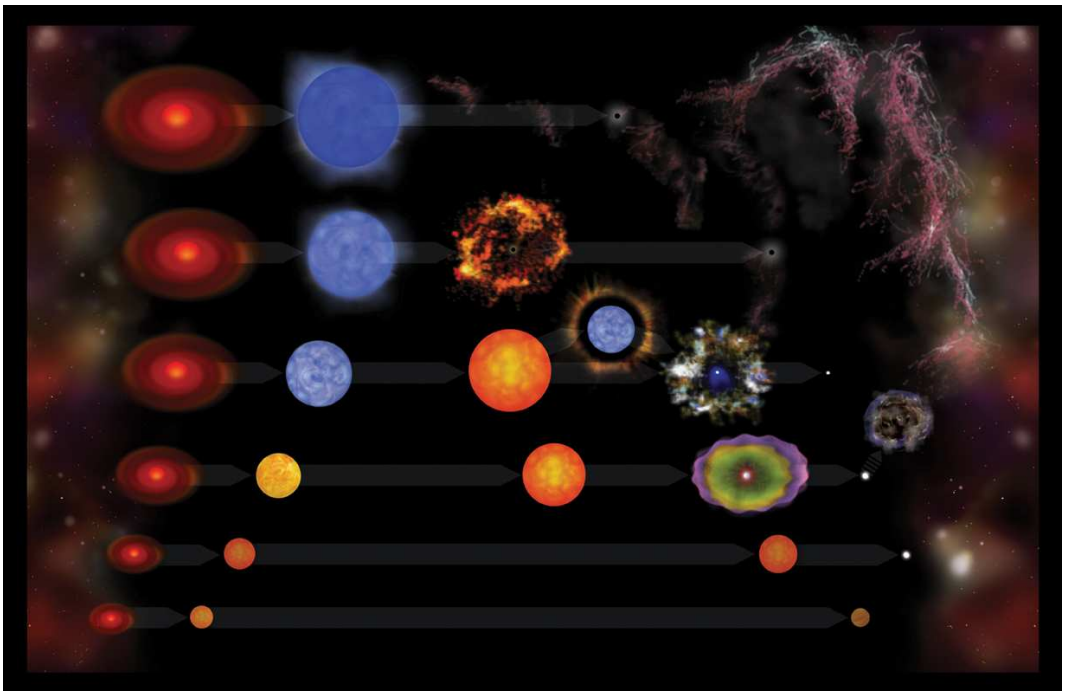
Obrázek 4.3: Zakreslení vývoje hvězdy do H-R diagramu

4.2.5 Závislost vývoje hvězdy na hmotnosti

Do připraveného obrázku 4.4 mohou studenti, popř. učitel, doplňovat názvy jednotlivých stádií hvězd. Poté s pomocí tohoto obrázku vysvětlit, jak závisí vývoj hvězdy na její hmotnosti. Tímto si studenti vyzkouší použití nabytých vědomostí z předchozích hodin.

4.2.6 Srovnání poloměrů hvězd

V kapitole týkající se poloměrů hvězd je nejdůležitější vytvořit u studentů představu o velikostech kosmických těles. Jako nejlepší se nabízí použití číselných o obrazových srovnání, která usnadňují pochopení rozmanitosti rozměrů hvězd v jednotlivých stadiích jejich vývoje (hlavní posloupnost, obři, bílí trpaslíci). Na obr. 4.5 je ukázka obrazového srovnání poloměrů, v tab. 4.1

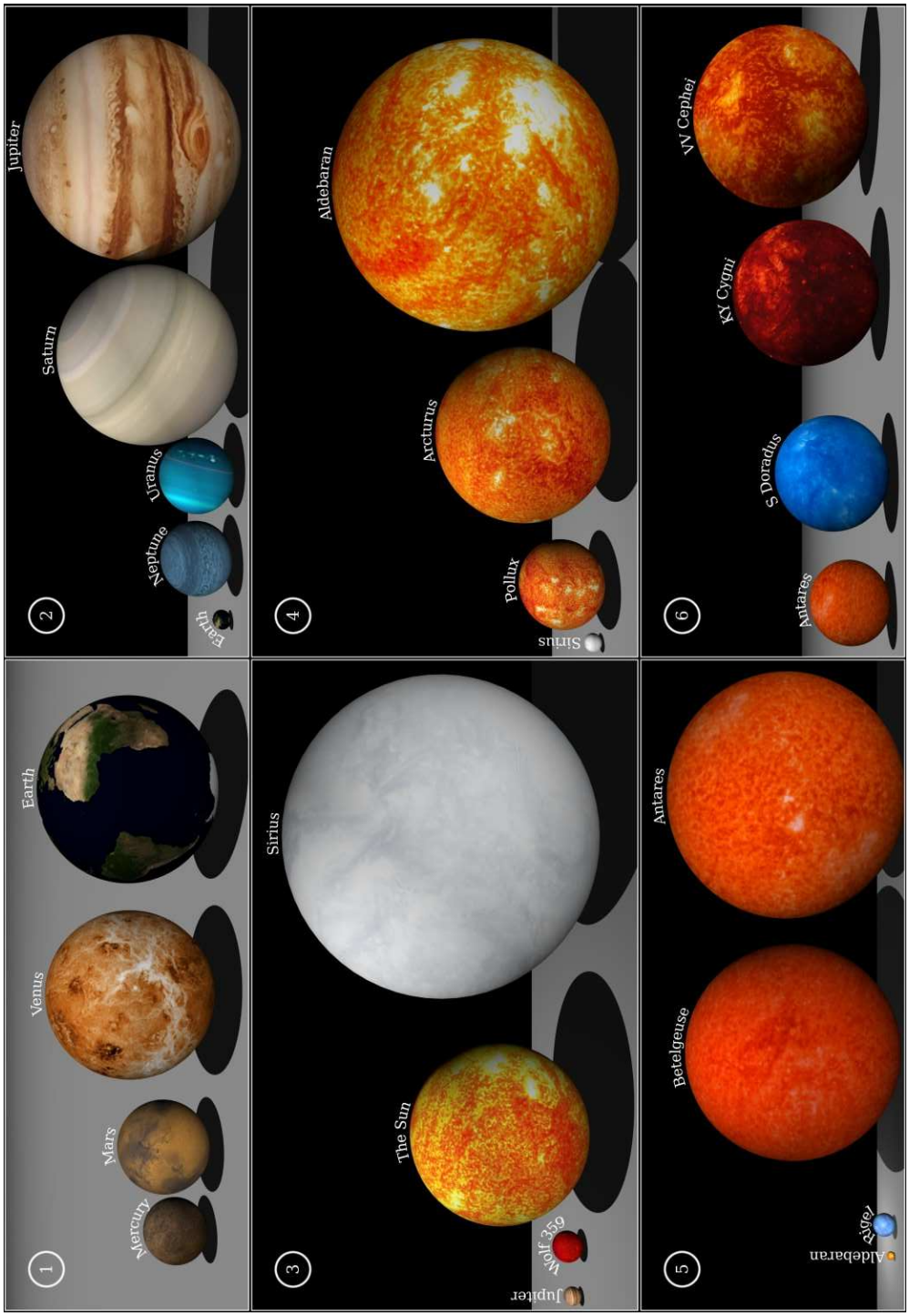


Obrázek 4.4: Obrázek vývoje hvězd bez popisků

ukázka srovnání poloměrů hvězd v relativních jednotkách poloměru Slunce a modelového srovnání, kde poloměr Slunce je dán velikostí úsečky 10 cm.

Hvězda	Skutečný poloměr		Modelový poloměr	
Slunce	1	R_S	10	cm
Sírius A	1,7	R_S	17	cm
Pollux	8	R_S	80	cm
Arktur	26	R_S	260	cm
Aldebaran	44	R_S	440	cm
Rigel	62	R_S	620	cm
Betelgeuze	950	R_S	95	m

Tabulka 4.1: Srovnání poloměrů hvězd



Obrázek 4.5: Srovnání poloměrů různých planet a hvězd

Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo vytvoření učebního textu pro výuku tématu „Hvězdy“ na gymnáziích, sestavení testu znalostí a ukázka konkrétních příkladů využití multimediální prezentace a interaktivní tabule při výuce fyziky hvězd.

Rozdělení učebního textu na jednotlivé kapitoly jsem zvolil podobně jako autoři učebnic [2] a [4]. Text obsahuje celkem 13 úloh, které jsou vloženy za jednotlivé tématické celky. Za učebním textem následuje test znalostí obsahující 20 otázek, které jsou seřazeny ve stejné posloupnosti jako výklad učiva. V poslední kapitole se zabývám naznačením využití moderních didaktických prostředků ve výuce fyziky obecně a na závěr uvádím konkrétní možnosti využití multimediální prezentace a interaktivní tabule při výuce tématu „Hvězdy“.

Učební text je psán stručně, pro studenty srozumitelně, a obsahuje všechny základní poznatky fyziky hvězd. Náměty na využití multimédií považuji za přínosné pro zefektivnění výuky a zpřístupnění na první pohled složitého astrofyzikálního celku studentům.

Přínosem pro mě samého bylo vyzkoušení si procesu vzniku učebního textu. Dále jsem si vyzkoušel tvorbu sady testových otázek včetně ověřování správnosti a jednoznačnosti řešení. Zamyslel jsem se také nad využitím moderních multimediálních prostředků při doplnění a zpestření výuky fyziky jako celku.

Byl bych rád, kdyby moje diplomová práce byla přínosná nejen pro mou nadcházející praxi, ale i pro všechny učitele, kteří chtějí i nadále vyučovat na gymnáziích astrofyziku a stejně tak i pro studenty, kteří mají o astrofyzikální problematiku zájem.

Literatura

[1] Pišút J. a kol.: *Fyzika pro IV. ročník gymnázií.* Státní pedagogické nakladatelství, Praha 1987.

[2] Macháček M.: *Fyzika pro gymnázia - Astrofyzika.* Prometheus, Praha 2004.

[3] Sexl, Raab, Streeruwitz: *Physik 3.* Verlag Carl Ueberreuter, Wien 1983.

[4] Vilks I.: *Astronomija vidusskolai.* Riga 1996.

[5] Grambal J.: *Analýza gymnaziální učebnice astrofyziky.* Diplomová práce. Přírodovědecká fakulta MU, Brno 2002.

[6] Vanýsek V.: *Základy astronomie a astrofyziky.* Academia, Praha 1980.

[7] Štefl V., Krtička J.: *Didaktika astrofyziky* <`http://www.physics.muni.cz/astrodidaktika/`>

[8] Štefl V., Domański J.: *Jak daleko je Měsíc aneb od Hipparcha k sondě Hipparcos.* MFI **17**, č. 8 (2008), str. 469.

[9] Štefl V., Domański J.: *Slunce a jiné hvězdy.* MFI **18**, č. 8 (2009), s. 472.

[10] Nowak-Stępniowska A.: *Evolucja gwiazd.* Fizyka w Szkole **54**, č. 5 (2008), s. 4.

[11] Randa M.: *Neutrinová astronomie.* Školská fyzika **VIII**, č. 1 (2004), s. 5.

[12] Randa M.: *Rentgenová astrofyzika.* Školská fyzika **VIII**, č. 2 (2004), s. 3.

[13] Pudivítr P.: *Jak vyučovat astronomii.* MFI **13**, č. 6 (2004), s. 352.

[14] Štefl V.: *Proč vyučovat astrofyziku na gymnáziích?* MFI **16**, č. 9 (2007), s. 538.

[15] <http://astronomia.zcu.cz/> *Astronomia - astronomický server Fakulty pedagogické ZČU v Plzni.*

[16] <http://puda.chytrak.cz/> *Výukový astroweb.*

[17] <http://mfweb.wz.cz/> *Matematicko-fyzikální web.*

[18] Skalková J.: *Obecná didaktika.* Grada Publishing, Praha 2007.

[19] Kalhous Z., Obst O.: *Školní didaktika.* Portál, Praha 2002.

[20] Svoboda E., Kolářová R.: *Didaktika fyziky základní a střední školy.* Univerzita Karlova, Karolinum, Praha 2006.

[21] Grausová E.: *Využití multimediálních prezentací ve výuce poznatků o planetách sluneční soustavy na střední škole.* Rigorózní práce. Fakulta pedagogická ZČU v Plzni, Plzeň 2007.

[22] <http://commons.wikimedia.org/> *Wikimedia Commons.*