

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyziky

Popularizace vybraných astrofyzikálních jevů

Diplomová práce

Autor: Bc. Jan Češík
Studijní program: N1701 - Fyzika
Studijní obor: Učitelství fyziky pro střední školy
Učitelství matematiky pro střední školy
Vedoucí práce: RNDr. Jan Šlégr, Ph.D.

Hradec Králové

červenec 2017

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyziky

Zadání diplomové práce

Autor:	Bc. Jan Češík
Studijní program:	N1701 - Fyzika
Studijní obor:	Učitelství fyziky pro střední školy Učitelství matematiky pro střední školy
Název práce:	Popularizace vybraných astrofyzikálních jevů
Název práce v AJ:	Popularization of Selected Astrophysical Effects
Cíl a metody práce:	Prozkoumat úroveň vědomostí z astrofyziky na středních školách a vypracovat plakáty na tři zvolené astrofyzikální jevy.
Garantující pracoviště:	Katedra fyziky Přírodovědecké fakulty UHK
Vedoucí práce:	RNDr. Jan Šlégr, Ph.D.
Oponent:	prof. Ing. Bohumil Vybíral, CSc.
Datum zadání práce:	31. 08. 2015
Datum odevzdání práce:	11. 07. 2017

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu.

V Hradci Králové, dne 11. 07. 2017.

Jan Češík

Poděkování

Rád bych poděkoval RNDr. Janu Šlégrovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Anotace

ČEŠÍK, Jan. *Popularizace vybraných astrofyzikálních jevů*. Hradec Králové: Univerzita Hradec Králové, 2017. 77 s.

Diplomová práce pojednává o kvalitě výuky astrofyziky na středních školách v České republice a o jejím možném zlepšení. Za tímto účelem byla provedena recenze jedné z nejpoužívanějších učebnic astrofyziky a dále pak dotazníkové šetření, do něhož se zapojilo 229 absolventů vyššího sekundárního vzdělání. V návaznosti na výsledky šetření byla blíže rozebrána tři fyzikální témata (slapové jevy, Hertzsprungův-Russellův diagram, Dopplerův jev) a vyhotoveny plakáty, jež mají potenciál výuku astrofyziky podpořit.

Klíčová slova:

astrofyzika, slapové jevy, Hertzsprungův-Russellův diagram, Dopplerův jev

Annotation

ČEŠÍK, Jan. *Popularization of Selected Astrophysical Effects*. Hradec Králové: University of Hradec Králové, 2017. 77 p.

This diploma thesis deals with the quality of the education process of astrophysics at high schools in the Czech Republic and with possibilities of making the process better. For this purpose, there has been made a review of one of the most used textbooks of astrophysics and next a survey with 229 graduates of upper secondary education taking part in it. Following the results of the survey, three physical topics have been discussed (tidal phenomena, Hertzsprung-Russell diagram, Doppler effect) and posters which have a potential to support the education process of astrophysics have been created.

Keywords:

astrophysics, tidal phenomena, Hertzsprung-Russell diagram, Doppler effect

Obsah

Úvod	7
1 Analýza výuky astrofyziky na středních školách	9
1.1 Recenze Macháčkovy učebnice astrofyziky	9
1.2 Dotazníkové šetření	11
2 Slapové jevy	20
2.1 Vznik slapových sil	20
2.2 Dmutí mořské hladiny	23
2.3 Vzdalování Měsíce a vázaná rotace	26
2.4 Ostatní důsledky slapových sil	30
2.5 Slapové jevy – plakát	31
3 Hertzsprungův-Russellův diagram	32
3.1 Zářivý výkon	32
3.2 Zdánlivá a absolutní magnituda	33
3.3 Wienův posunovací zákon	35
3.4 Hertzsprungův-Russellův diagram	36
3.5 Vývoj hvězd	38
3.6 Hertzsprungův-Russellův diagram – plakát	42
4 Dopplerův jev	43
4.1 Vznik Dopplerova jevu	43
4.2 Základy spektroskopie	49
4.3 Astrofyzika a Dopplerův jev	51
4.4 Aplikace Dopplerova jevu v astrofyzice	53
4.5 Dopplerův jev – plakát	56
5 Tvorba plakátů	57
Závěr	58
Seznam použité literatury	59
Přílohy	63

Úvod

Výuka fyziky zažívá v posledních letech hořké období. Nahlédneme-li do Rámcového vzdělávacího programu (dále jen RVP) pro gymnázia, shledáme, že studium fyziky je povinné pouze v prvním a druhém ročníku. [1] Registrujeme tak 33 % pokles výuky fyziky v porovnání se stavem platným před zavedením RVP. [2] V rámci čtyřletého studia garantuje RVP na vzdělávací oblast Člověk a příroda, kam fyzika spadá, a oblast Člověk a společnost celkem 36 hodin. Uvážíme-li, že v těchto kategoriích nalezneme dohromady sedm vzdělávacích oborů (fyzika, chemie, biologie, geografie, geologie, občanský a společenskovední základ, dějepis), je uvedená časová dotace přinejmenším skromná. [1]

Výše zmíněné spolu s běžně praktikovaným procesem vyučování astrofyziky na středních školách, tj. v závěru fyzikálního kurzu, je pro výuku astrofyziky fatální. Učitelé jsou často nuceni v důsledku časové tísně výklad problematiky neadekvátně zkrátit či úplně vynechat. Přitom právě v astrofyzice dostává řada dříve nabytých vědomostí praktický význam, jenž je pro smysluplnost vzdělávacího procesu zvláště v současné době stěžejní.

Pochybnou kvalitu astrofyzikálních znalostí potvrzuje například citovaný výzkum, který poukazuje mimo jiné na neschopnost studentů uspokojivě vysvětlit příčinu dmutí mořské hladiny. [2]

Autor se dále domnívá, že vědní obory související s vesmírnou tematikou mají nemalý a hlavně zřetelný potenciál rozšiřovat obzory lidského poznání. Přesvědčili jsme se o tom v roce 2016 prostřednictvím detekce gravitačních vln a kontinuálně to dokazuje společnost SpaceX a jejich recyklovatelné raketové nosiče. [3] Literatura hovoří o 21. století jako o století, kdy „*vzrušení z poznávání vesmíru nebylo nikdy intenzivnější*“. [4] Přirozeně by zde tedy měla být snaha zkvalitnit výuku astrofyziky a dotovat tak společnost patřičně vzdělanými absolventy, jež jsou s to diskutovaný pokrok urychlit.

Krom osobního zájmu autora o astronomii jsou výše uvedená fakta silným stimulem ke zpracování diplomové práce na téma Popularizace vybraných astrofyzikálních jevů. Zjevně se totiž nabízí prostor nejen pro rozbor situace panující na středních školách, ale i možnost tamější status quo změnit.

V první části diplomové práce je provedena analýza výuky astrofyziky na středních školách. Za tímto účelem byla kriticky zhodnocena jedna z nejpoužívanějších astrofyzikálních učebnic a realizováno dotazníkové šetření. Jak již autor předeslal, je zde několik důvodů se domnívat, že kvalita výuky astrofyziky není adekvátní. Primárním cílem úvodní kapitoly je tuto hypotézu ověřit.

V druhé, obsáhlejší části jsou detailně rozebrána tři astrofyzikální témata – vždy však s důrazem na středoškolské znalosti, neboť prezentovaný text posloužil jako východisko pro tvorbu podpůrných studijních materiálů, tj. plakátů. Vznikly tak pasivní didaktické prostředky, jež částečně vyplňují zmíněnou mezeru ve vzdělávacím procesu fyziky a jež mohou díky své formě vzbudit v očích studentů hlubší zájem o astrofyzikální problematiku jako takovou.

1 Analýza výuky astrofyziky na středních školách

Úvodní kapitola si klade za cíl prostudovat okolnosti související s výukou astrofyziky na středních školách.

Prvně se zaměříme na učebnici astrofyziky z notoricky známé sady učebnic pro gymnázia z nakladatelství Prometheus a provedeme její analýzu. Prostřednictvím dotazníků dále vyšetříme vztah „student – výuka astrofyziky“, a to na dvou úrovních: subjektivně formou škálových otázek hodnotících kvalitu vyučování z perspektivy studenta a objektivně skrze otázky vědomostní. Ze získaných dat vyvodíme patřičné závěry a obhájíme smysluplnost druhé části této práce, totiž tvorby materiálů pro podporu výuky astrofyziky.

1.1 Recenze Macháčkovy učebnice astrofyziky

Učebnice astrofyziky pro gymnázia z nakladatelství Prometheus je jednou z nejrozšířenějších učebnic používaných nejen na gymnáziích. Plyne to v prvé řadě z faktu, že neexistuje jiný, kompaktní studijní materiál, jenž by učitel fyziky mohl zvolit.

S výše jmenovanou učebnicí se čtenář může setkat ve třech vydáních. První z nich vyšlo v roce 1998, druhé o šest let později a poslední v roce 2008. [5] [6] [7] Přepřacované vydání z roku 2004 je reakcí na poměrně ostrou kritiku, kterou publikace několik let po uvedení do škol sklídila. [8] Jinak vynikající série učebnic pro gymnázia tak nešťastným debutem trochu ztratila na kvalitě a je nasnadě konstatovat, že ani první přepracované vydání tuto situaci výrazně nezměnilo. [9] Doplňme, že autor diplomové práce nahlédl pouze do publikací z roku 1998 a 2004, následnou analýzu však zaměřil především na novější z těchto vydání.

Učebnice je tematicky koncipována do dvou celků: „Sluneční soustava“ a „Hvězdy a galaxie“. V dodatku jsou pak studentovi předloženy další poznatky, z nichž vhodnost přítomnosti některých z nich v učebnici fyziky je diskutabilní (viz níže). Jednotlivé podkapitoly bývají obvykle zakončeny sérií zajímavých problematických úloh vztahujících se k právě vyloženému učivu, jejichž řešení napomáhá nabyté vědomosti fixovat.

V první části se čtenář seznamuje poměrně zevrubně se Sluneční soustavou, převážně s fakty o terestrických planetách. Více jak deset stran publikace je věnováno planetě Zemi, nicméně skutečné astrofyzikální poznatky nalezneme pouze v několika odstavcích. Autor totiž v této pasáži předkládá studentovi materiál, jehož výklad dle RVP pro gymnázia spadá do jiných vzdělávacích oborů, jako jsou geografie a geologie. [1] To pak ostře a nepříjemně kontrastuje s pouhými několika odstavci o planetách joviálních. Podobně je na tom předposlední podkapitola této části nesoucí název „Dějiny Sluneční soustavy“, kdy se autor vrací opět k Zemi a obsírně mapuje její historický vývoj.

Náplní druhé části učebnice je zejména problematika týkající se hvězd. Čtenář poznává veličiny související s charakteristikou hvězd a blíže se seznamuje s jejich praktickým měřením. Výklad poté plynule přechází k Hertzsprungově-Russellově diagramu. Jeho konstrukce je však z didaktického hlediska nešťastně pojata. Na vertikální ose diagramu najdeme absolutní hvězdnou velikost, jejíž smysl může být pro studenta těžce uchopitelný. Za vhodnou alternativou lze považovat zářivý výkon, s kterým se studenti setkali již dříve a jehož fyzikální podstatu, na rozdíl od absolutní magnitudy, alespoň do jisté míry přirozeně chápou. Dodejme, že porozumění problematice Hertzsprungova-Russellova diagramu je stěžejním východiskem k následné kategorizaci hvězd a je tak na místě jej prezentovat co možná nejčitelněji.

V dodatku, kterým je výklad astrofyziky uzavřen, nalezneme pasáže zabývající se mimozemským životem, historií astronomie apod. Pomineme-li nesouvislost těchto témat s astrofyzikou, nabízí se dále otázka, zdali navzdory atraktivnosti nepatří informace podobné povahy spíše do popularizačního časopisu, nežli do gymnaziální učebnice fyziky.

Učebnice je zakončena barevnou přílohou, kde jsou prezentovány skutečné snímky planet, hvězd, mlhovin, galaxií a dalších vesmírných objektů. Díky nešťastné typografické práci, která pramení z umístění fotografií na samotný konec publikace, ztrácí ilustrace bohužel svůj přirozený potenciál vzbudit hlubší zájem, jenž by se mohl plně rozvinout v případě jejich začlenění do textu jako takového. To by nepochybně přispělo k ztraktivnějšímu výkladu.

Výstavba učebnice může být do jisté míry ospravedlněna subjektivním pohledem autora na vzdělávací proces. To ovšem neplatí o překlepech a faktických chybách, které se v textu objevují. Podívejme se nyní na některé z nich.

Hned na přebalu si pozorný čtenář povšimne absence znaménka „-“ v exponentu gravitační konstanty. [5] V úvodu na str. 9 se dozvídáme, že Galileo Galilei pozoroval dalekohledem fázi Venuše již v 16. století: „*Když však Galilei v 16. století pozoroval dalekohledem Venuši, zjistil, že její srpek míří jinam, než kam by podle Ptolemaiova modelu měl.*“ [6] Různé zdroje se však shodují, že Galileo Galilei disponoval dalekohledem až počátkem 17. století. [10] [11] Zásadní chybou je dále na str. 16 ztotožnění souhvězdí Velké medvědice s Velkým vozem: „*Každé souhvězdí má svůj latinský název a zkratku; např. jedno z největších souhvězdí Velký vůz neboli Velká medvědice má latinský název Ursa Major, zkratku UMa a „plošnou výměru“ 1280 čtverečných stupňů.*“ [6] V neposlední řadě se pak v podkapitole o planetkách na str. 50 mluví o planetce Ceres jako o planetě: „*Astronomové proto nebyli překvapeni, když v r. 1801 byla objevena malá planeta Ceres právě v té vzdálenosti od Slunce, kde se nějaká planeta očekávala.*“ [6]

Řada dalších, méně či více závažných nesrovnalostí je popsána ve zmiňované literatuře. [9] Mimo jiné zde recenzent oprávněně nesouhlasí s nadměrným užíváním subjektivně vnímatelných termínů typu „několik, mnoho, velký, malý“ apod. Do jisté míry lze podobné vyjadřování tolerovat u podpůrných studijních materiálů, jejichž záměrem je například popularizace. Učebnice jakožto primární studijní materiál by však měla být zdrojem exaktních informací.

Učebnice přistupuje k astrofyzikální problematice laxně. Jak bylo nastíněno, jisté partie jsou zbytečně obsáhlé, jiné by naopak zasloužily pozornost větší. Některé kapitoly navíc vůbec nesouvisí s astrofyzikou. Publikace má popularizační charakter, což se projevuje především nepřesným vyjadřováním. Celkově je slohová výstavba textu spíše informační, nežli výkladová. Vyzdvihnout lze širokou barevnou fotografickou přílohu vztahující se k jednotlivým tématům a zajímavé problematice úlohy.

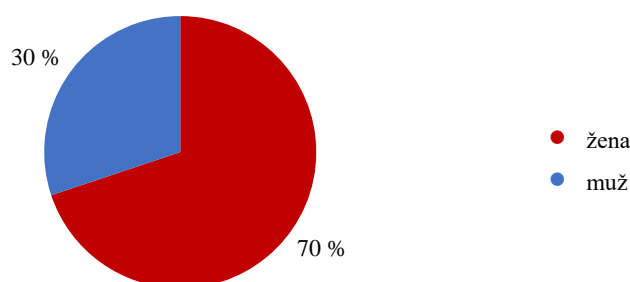
1.2 Dotazníkové šetření

Podívejme se nyní na kvalitu astrofyzikálních znalostí středoškolských studentů a na vztah studentů k výuce této fyzikální disciplíny.

Za účelem analýzy bylo provedeno dotazníkové šetření o 10 uzavřených otázkách. První polovina dotazníku vyšetřuje subjektivní postoj studentů k výuce astrofyziky, druhá si pak klade za cíl ověřit získané vědomosti s astrofyzikou související. Diferenciace respondentů byla provedena na základě pohlaví, věku a dosaženého vyššího sekundárního vzdělání. Celý dotazník je k nahlédnutí v příloze 1. Vyhodnocená data spolu s četnostmi a procentuálním zastoupením odpovědí nalezneme v příloze 2.

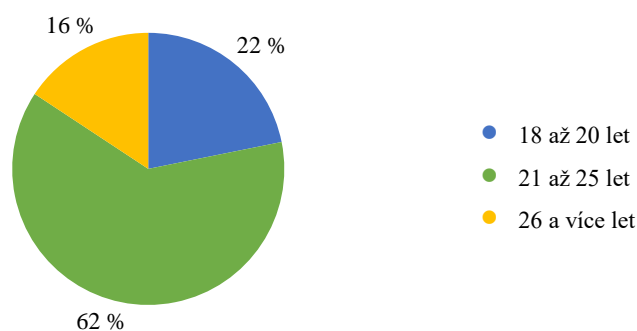
Dotazníkového šetření se zúčastnilo 229 respondentů, v 70 % se jednalo o ženy. Převážná část dotazovaných spadala do věkového intervalu 21 až 25 let (62 %). Naprostá většina respondentů absolvovala gymnázium (72 %), naopak střední odborná učiliště jsou zastoupeno pouze 1 %. V rámci šetření tak není možné vyvozovat relevantní závěry pro studenty učilišť. Kompletní procentuální charakteristika dotazovaného vzorku je ilustrována grafy 1.1.1, 1.1.2 a 1.1.3.

Pohlaví:



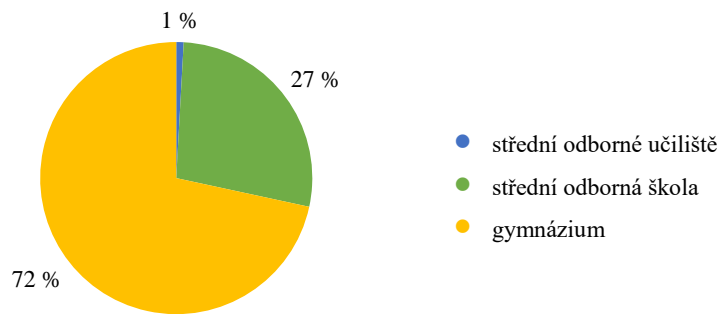
Graf 1.1.1

Věk:



Graf 1.1.2

Střední škola:

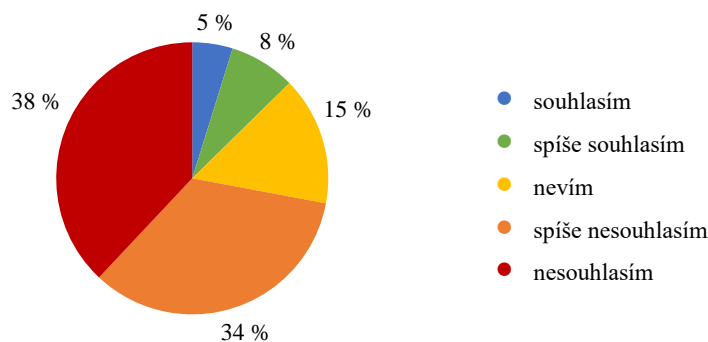


Graf 1.1.3

Pokračujme dále kritickou interpretaci výsledků u každé z položených otázek s přihlédnutím k povaze dotazovaných (pohlaví, věk, vzdělání). Pokusme se také na základě odpovědí obhájit smysluplnost tvorby plakátů.

Dle grafu 1.1.4 se 72 % dotazovaných domnívá, že astrofyzice nebylo na střední škole věnováno dostatečné množství času. Tento názor převládá především u starších respondentů a absolventů středních odborných škol. V rámci pohlaví nepozorujeme markantní procentuální rozdíl. Můžeme konstatovat, že časová dotace věnovaná výuce astrofyziky není v očích studentů dostačující. Plakáty jakožto pasivní zdroj informací jsou sto do jisté míry tento nedostatek odstranit formou samostudia o přestávkách apod.

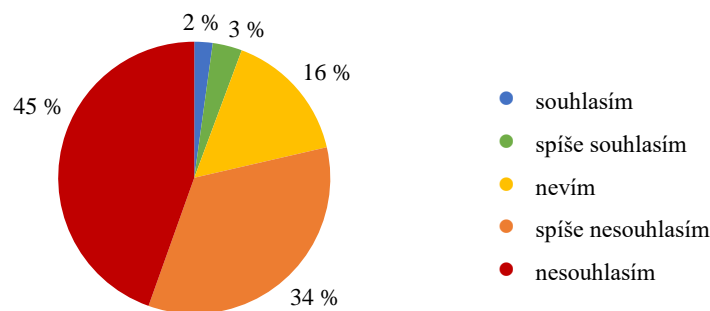
S odstupem času se domnívám, že astrofyzice bylo na střední škole věnováno dostatečné množství času:



Graf 1.1.4

Téměř 80 % respondentů postrádalo během výuky astrofyziky alternativní studijní materiály (viz graf 1.1.5). Ani jeden absolvent střední odborné školy výše zmíněné tvrzení nevyvrátil. Mezi ženami a muži není patrná výrazná diference. Absenci rozličných studijních materiálů vykazují všechny věkové skupiny, nejméně však respondenti ve věku 18 až 20 let (64 %). Lze se tedy domnívat, že se situace zlepšuje. Plakáty, které jsou bezesporu alternativním studijním materiálem, mají potenciál tento trend urychlit.

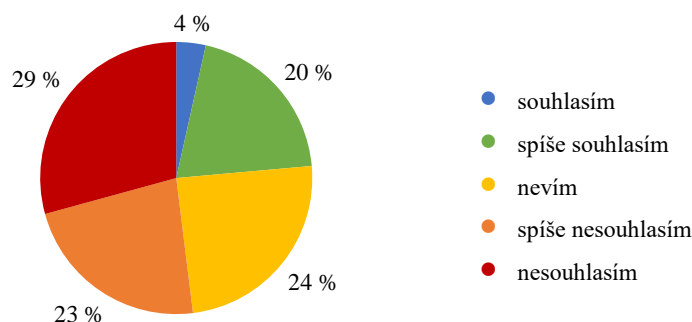
Během výuky astrofyziky jsme pracovali s rozličnými studijními materiály:



Graf 1.1.5

Pouze 24 % dotazovaných tvrdí, že studijní materiály související s astrofyzikou byly přehledná a názorná (viz graf 1.1.6). Tento výrok je typický pro věkovou skupinu 18 až 20 let, kde jeho pravdivost deklaruje 40 % respondentů. S rostoucím věkem dotazovaných ovšem spokojenost se studijními materiály rapidně klesá. V rámci pohlaví pozorujeme pesimističtější hodnocení u žen, a to o 14 procentních bodů. Co se týče škol, jsou to především absolventi středních odborných škol, kteří nebyli s didaktickou kvalitou studijních materiálů spokojeni (75 %). Vhodně konstruované plakáty by mohly názornost výuky podpořit.

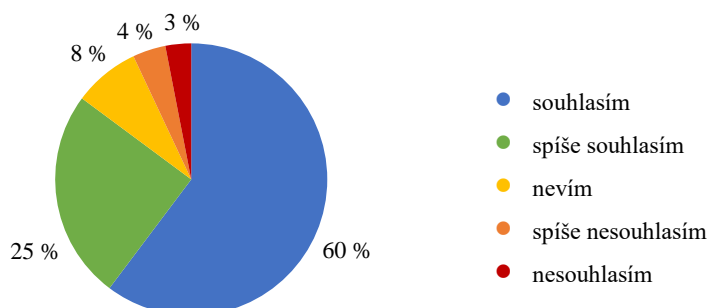
Materiály, z kterých jsme při výuce astrofyziky čerpali, byly přehledné a názorné:



Graf 1.1.6

Dle grafu 1.1.7 naprostá většina respondentů (85 %) souhlasí s názorem, že forma, kterou je učivo studentům předáváno, je stejně důležitá jako jeho obsah. Prim v této otázce sehráli absolventi gymnázií, kteří s výrokem souhlasí v 90 %. V ostatních dotazovaných kategoriích nepozorujeme výraznější fluktuace odpovědí. Smysluplnost tvorby plakátů v této otázce je zřejmá, neboť studium plakátů lze jistě považovat za nenásilnou a neatřelou formu výkladu.

Souhlasím s názorem, že forma, kterou je učivo studentům předáváno, je stejně důležitá jako jeho obsah:

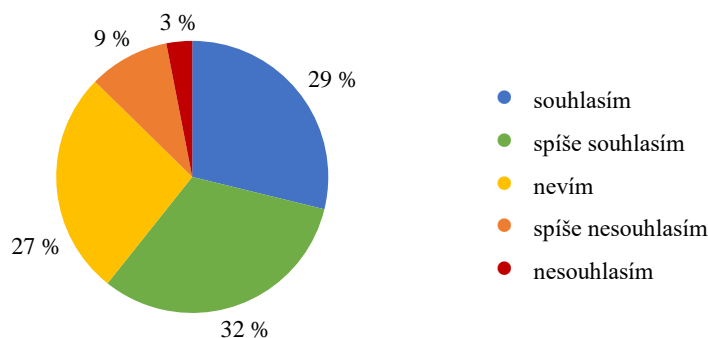


Graf 1.1.7

O významnosti astrofyziky mezi ostatními fyzikálními disciplínami je přesvědčeno 61 % dotazovaných, vyhraněný názor však v této otázce nemá více jak čtvrtina respondentů (viz graf 1.1.8). Krom poměrně vysokého procentuálního zastoupení nesouhlasu s uvedeným tvrzením na gymnáziích (33 %), neregistrujeme v rámci dotazovaných

kategorií žádný charakteristický rys. Popularizačně realizované plakáty by mohly významnost astrofyziky zdůraznit.

Domnívám se, že výuka astrofyziky je stejně důležitá jako výuka ostatních fyzikálních disciplín:



Graf 1.1.8

Korektní odpověď na otázku „Co jsou to slapové jevy?“ uvedlo 60 % dotázaných. Výraznou diferencí odpovědí vykazuje kategorie pohlaví, kde pozorujeme rozdíl 24 procentních bodů ve prospěch mužů. Nejlepších výsledků dosáhli gymnazisté (69 %) spolu s absolventy ve věku 21 až 25 let (63 %). Celkově odpovídali správně spíše starší respondenti. Data shrnuje graf 1.1.9.

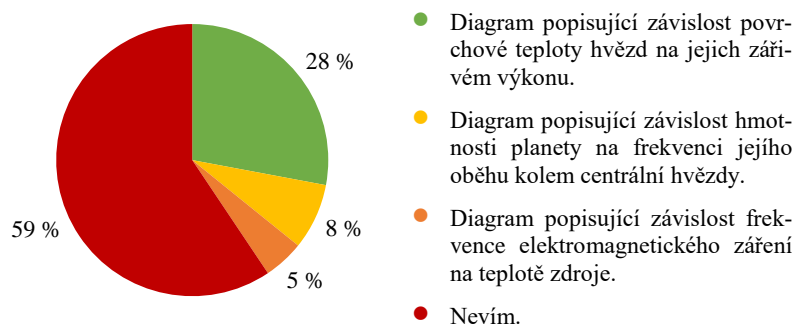
Slapové jevy jsou:



Graf 1.1.9

Podstatu Hertzsprungova-Russellova diagramu chápe pouze 28 % respondentů (viz graf 1.1.10). Jsou to především muži (diference 24 procentních bodů), absolventi ve věku 18 až 20 let (48 %) a gymnazisté (32 %).

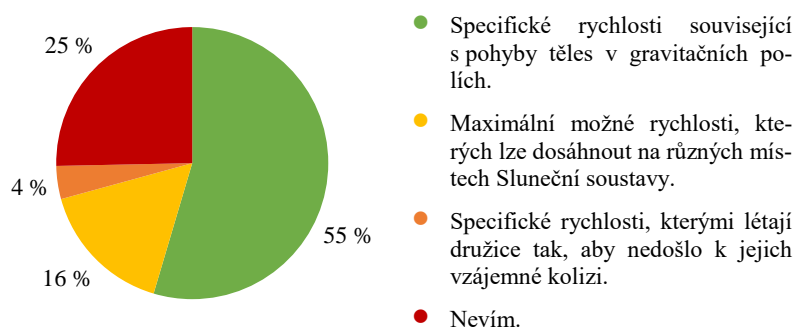
Hertzsprungův-Russellův diagram je:



Graf 1.1.10

Z grafu 1.1.11 je patrné, že odpověď na otázku „Co jsou to kosmické rychlosti?“ zná 55 % dotazovaných. I zde skórovali lépe muži (rozdíl 25 procentních bodů). Otázka dělala největší problém absolventům ve věku 21 až 25 let – správně odpovědělo 47 % respondentů. V rámci škol nepozorujeme žádný významný rys.

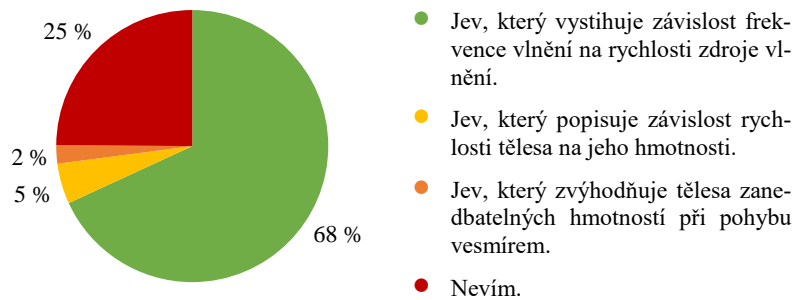
Kosmické rychlosti jsou:



Graf 1.1.11

Otázka týkající se podstaty Dopplerova jevu, byla dle zaznamenaných odpovědí pro absolventy nejjednodušší, neboť na ni korektně odpovědělo 68 % dotazovaných (viz graf 1.1.12). Úspěšní byli hlavně muži (86 %) a gymnazisté (73 %). Co se týče věkových skupin, jsou výsledky srovnatelné. Vzhledem k tomu, že se studenti s problematikou Dopplerova jevu setkávají již během výkladu kmitů a vln, není vysoká úspěšnost překvapující.

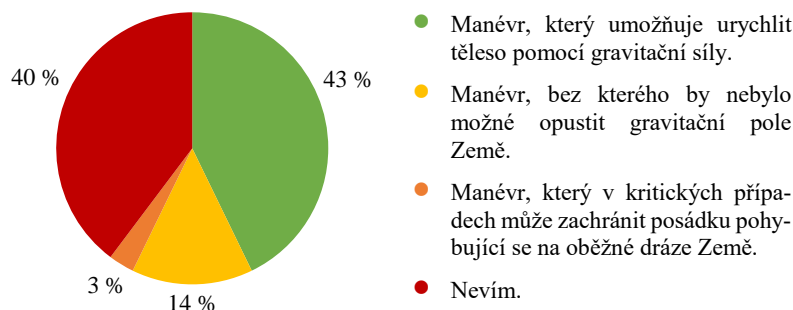
Dopplerův jev je:



Graf 1.1.12

Dle grafu 1.1.13 je význam gravitačního manévru znám 43 % dotazovaných. Také v této otázce pozorujeme silnou nevyváženost správných odpovědí v rámci pohlaví (diference 34 procentních bodů ve prospěch mužů). Korektně odpovídali především respondenti ve věku 26 a více let (58 %). Gymnázia a střední odborné školy vykazují totožné procentuální hodnocení.

Gravitační manévr je:



Graf 1.1.13

Ze získaných dat v kontextu s citovaným výzkumem plyne překvapivý závěr. [12] Ženy dle něj shledávají astrofyziku jako nejatraktivnější fyzikální obor. Srovnáme-li ovšem tento fakt s výsledky dotazníkového šetření, zjistíme, že astrofyzikálními vědomostmi disponují po středoškolském kurzu především muži.

Citovaná studie dále uvádí, že astrofyzika spolu s optikou patří mezi nejzajímavější fyzikální disciplíny na střední škole vůbec. Jak jsme se ale přesvědčili výše, vyučování

není dle studentů uspokojivě realizováno. Studenti pociťují během výuky astrofyzikální problematiky časovou tíseň a chybí jim alternativní studijní materiály. Vyučovací proces není v jejich očích přehledný a názorný. Pozitivní informací je skutečnost, že mladší respondenti nejsou v tomto ohledu toliko kritičtí – pravděpodobně se tedy situace zlepšuje. Zmíněné závěry jsou však stále silnou motivací k tvorbě podpůrných studijních materiálů, tj. plakátů.

2 Slapové jevy

Fyzikální zákonitosti, které v astrofyzice zkoumáme, jsou specifické tím, že jsou v naprosté většině případů běžnému lidskému životu velmi vzdálené. Právě teď ve výšce 400 km nad Zemí relativně bezpečně létá skupina astronautů rychlostí $7,9 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. [13] Museli bychom dlouho hledat, abychom podobnou rychlostní analogii našli v našem každodenním životě.

Jinak tomu je ale se slapovými jevy. Slapové síly, jak se dozvíme, stojí za vznikem přílivu a odlivu a souvisí s dalšími úkazy. Tento fakt nás opravňuje přikládat této kapitole astrofyziky poměrně vysokou důležitost a autor je přesvědčen, že každý středoškolský student by měl vědět, jak dmutí mořské hladiny vzniká. Stojí-li tedy za zmínku některá astrofyzikální zákonitost více než kterákoliv jiná, pak jsou to zřejmě slapové jevy.

2.1 Vznik slapových sil

Během studia citovaných materiálů se autor seznámil s několika metodami, které se zabývají popisem vzniku slapových sil. [2] [14] [15] Na následujících řádcích seznámíme čtenáře s vysvětlením, které se jeví jako nejnázornější a je tedy nejen pro středoškolského studenta pravděpodobně nejpochoptelnější. Pro větší přehlednost je celá problematika demonstrována na soustavě Země – Měsíc, přestože slapové síly nalezneme ve větší či menší míře v každé soustavě dvou rotujících těles.

Země a Měsíc tvoří soustavu dvou rotujících těles, které obíhají kolem společného bodu, tzv. barycentra. Tento bod je hmotným středem soustavy a pro výpočet jeho polohy vyjdeme ze vztahu

$$\mathbf{r} = \frac{1}{m_c} \sum m_i \mathbf{r}_i, \quad (2.1.1)$$

kde m_c je hmotnost celé soustavy, m_i jsou hmotnosti příslušných komponent soustavy a \mathbf{r}_i jsou jejich polohy od zvoleného vztažného bodu, vůči kterému polohu \mathbf{r} určujeme. V našem případě, kdy budeme počítat vzdálenost barycentra r_B od středu Země, přejde

předpis (2.1.1) ve vztah

$$r_B = \frac{m_Z r_Z + m_M r_M}{m_Z + m_M} = \frac{m_Z \cdot 0 + m_M r_M}{m_Z + m_M} = \frac{m_M r_M}{m_Z + m_M}, \quad (2.1.2)$$

kde r_Z a r_M jsou vzdálenosti těles, tj. Země a Měsíce, od středu Země a m_Z a m_M jsou jejich hmotnosti. Pokud do vztahu (2.1.2) dosadíme příslušné hodnoty, zjistíme, že barycentrum námi zkoumané soustavy leží na spojnici oněch těles, asi 4 660 km od středu Země. Nachází se tedy pod zemským povrchem.

Nyní přejděme k samotnému objasnění slapových sil. Studujme nejprve gravitační sílu Měsíce, resp. jeho gravitační zrychlení, v některých místech Země. Střed Země S (a Země celá, jak se později dozvíme) je urychlován gravitačním zrychlením, jehož velikost lze vyjádřit pomocí Newtonova gravitačního zákona následovně:

$$a_g(S) = \kappa \frac{m_M}{r_M^2(S)}, \quad (2.1.3)$$

κ je Newtonova gravitační konstanta. Dále se podívejme na gravitační zrychlení v bodě P , který se nachází na přivrácené straně Země vzhledem k Měsíci. Gravitační zrychlení, jež urychluje předměty v tomto místě má velikost

$$a_g(P) = \kappa \frac{m_M}{r_M^2(P)} \quad (2.1.4)$$

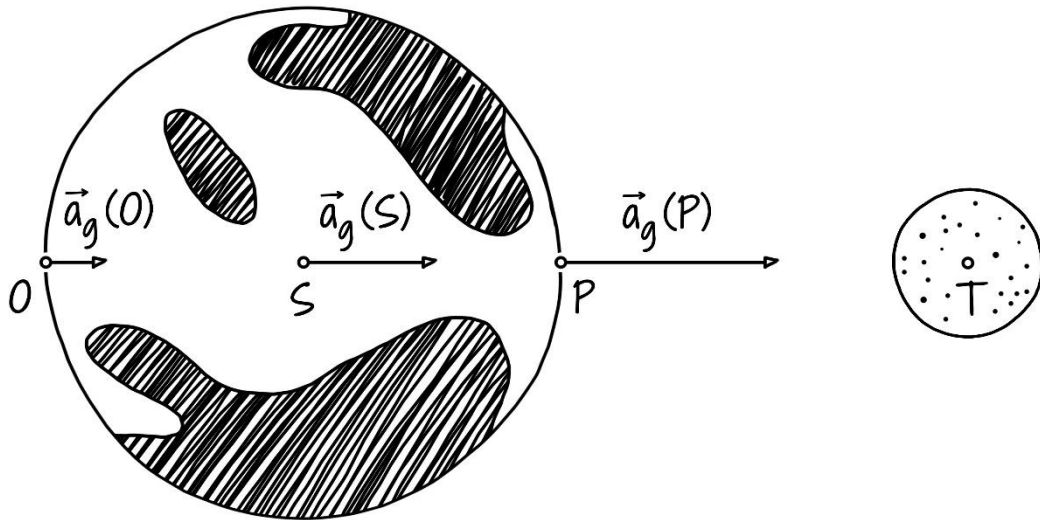
a je větší než v předešlém případě, jelikož vzdálenost tohoto bodu od Měsíce je menší. Analogicky pak bude vypadat situace na odvrácené straně Země, kde budeme zkoumat situaci v místě bodu O . Zde však bude gravitační zrychlení co do velikosti menší:

$$a_g(O) = \kappa \frac{m_M}{r_M^2(O)}. \quad (2.1.5)$$

Došli jsme tedy k nerovnostem

$$a_g(O) < a_g(S) < a_g(P). \quad (2.1.6)$$

Jelikož velikosti jednotlivých gravitačních zrychlení klesají s rostoucí vzdáleností od Měsíce kvadraticky a jelikož jsou rozdíly těchto vzdáleností nemalé, musí být také



Obrázek 2.1.1

rozdíly samotných gravitačních zrychlení značné. Takové gravitační pole, kde gravitační zrychlení nemá konstantní hodnotu, nazýváme nehomogenní. Země se tedy nachází v nehomogenním gravitačním poli Měsíce. Celou tuto skutečnost zachycuje obrázek 2.1.1.

Nyní na jednotlivá zrychlení nahlížejme ze středu Země, tj. z bodu S a pro jednoduchost vůbec neuvažujme gravitační pole Země. Pozorovatel, který by se v onom bodě nacházel, by shledal, že předměty v místě bodu P se vůči němu vzdalují se zrychlením

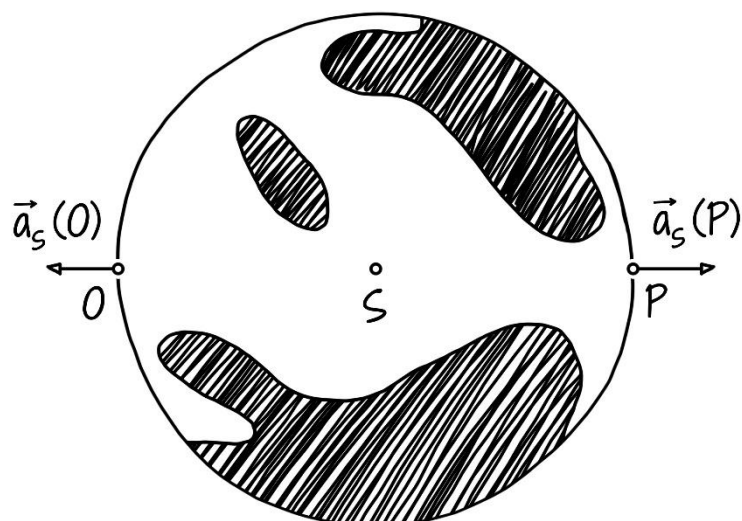
$$a_s(P) = a_g(P) - a_g(S), \quad (2.1.7)$$

keré nazveme slapovým zrychlením. Předměty umístěné v bodě O se sice k pozorovateli pohybují se zrychlením $a_g(O)$, nicméně pozorovatele nikdy „nedostihnou“, jelikož samotný pozorovatel disponuje větším zrychlením totožného směru. Pozorovatel registruje, že předměty v bodě O se od něho vzdalují se slapovým zrychlením

$$a_s(O) = a_g(S) - a_g(O). \quad (2.1.8)$$

Obě tyto situace jsou znázorněny na obrázku 2.1.2 níže.

Země tvoří pevný, kompaktní celek a lze tedy všem jejím bodům včetně povrchu přiřadit prakticky totožné zrychlení $a_g(S)$, s kterým se pohybují okolo barycentra. Tento fakt je zřejmý, neboť kdyby tomu tak nebylo, Země by nedržela pohromadě. Při-



Obrázek 2.1.2

jmeme-li toto tvrzení a vezmeme-li v potaz vztahy (2.1.7) a (2.1.8), můžeme konstatovat, že předměty o hmotnosti m , které jsou umístěny na povrchu Země v bodech P a O , jsou nadlehčovány silami o velikostech

$$F_s(P) = ma_s(P), \quad (2.1.9)$$

$$F_s(O) = ma_s(O), \quad (2.1.10)$$

kterým říkáme síly slapové.

Slapové síly pochopitelně nepůsobí pouze v bodech P a O . Obecně lze vektor slapové síly vyjádřit následovně:

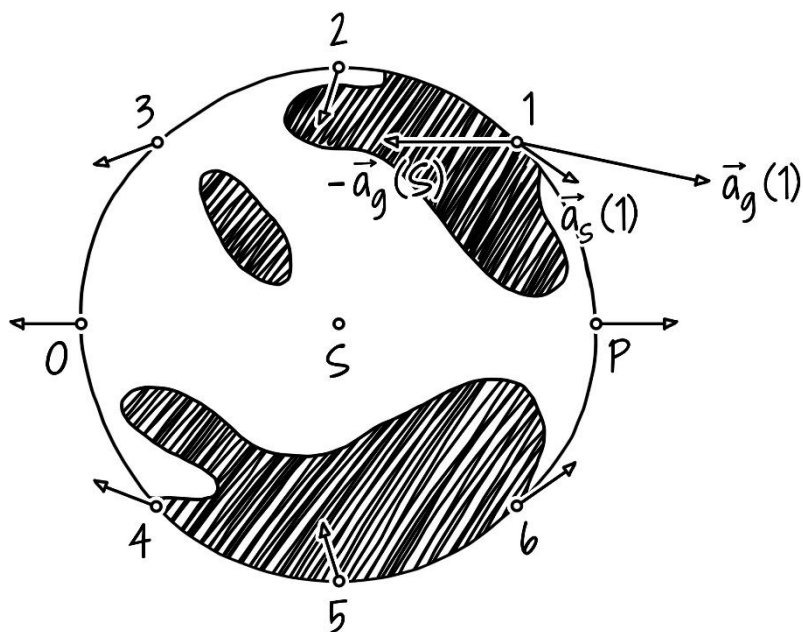
$$\mathbf{F}_s(X) = m\mathbf{a}_s(X), \quad (2.1.11)$$

kde X odkazuje na libovolný bod Země. V další podkapitole ukážeme, že slapové síly mimo body P a O hrají důležitou roli v otázce přílivu a odlivu.

2.2 Dmutí mořské hladiny

Jak již bylo předesláno, podívejme se nyní na slapové síly na různých místech zemského povrchu.

Vektor slapového zrychlení $\mathbf{a}_s(X)$, který figuruje ve vztahu (2.1.11), lze pro libovolný



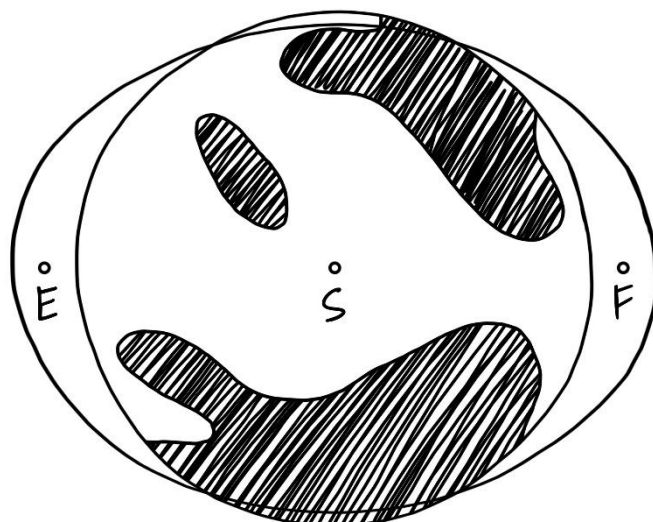
Obrázek 2.2.1

bod Země rozepsat následovně:

$$\mathbf{a}_s(X) = \mathbf{a}_g(X) - \mathbf{a}_g(S), \quad (2.2.1)$$

kde $\mathbf{a}_g(X)$ je gravitační zrychlení urychlující předměty v bodě X a $\mathbf{a}_g(S)$ je gravitační zrychlení urychlující střed Země S . To vše vyplývá z úvah shrnutých v předešlé podkapitole. Na tuto operaci můžeme nahlížet jako na sčítání vektorů $\mathbf{a}_g(X)$ a $-\mathbf{a}_g(S)$, což lze názorně graficky ilustrovat. Provedme tak v některých zajímavých bodech zemského povrchu (viz obrázek 2.2.1).

Autor se domnívá, že tento obrázek je stěžejní a zcela jistě by měl doprovázet výklad nejen na střední škole. Z obrázku 2.2.1 je patrná již dříve odvozená skutečnost, totiž že předměty v bodech P a O jsou nadlehčovány slapovými silami, jejichž příčinou jsou výslednice příslušných zrychlení. V bodech 2 a 5 nastává opačná situace. Zde každá z výslednic směřuje prakticky do středu Země a předměty v těchto místech „těžknou“. Konečně v bodech 1, 3, 4 a 6 pozorujeme, že výsledná slapová zrychlení směřují k bodům P a O a předměty jsou tak v tomto směru nepatrně urychlovány. Pro objasnění dmutí mořské hladiny jsou právě tato zrychlení důležitá.



Obrázek 2.2.2

Na jistých místech Země lze registrovat během přílivu a odlivu až několikametrové změny výšky mořské hladiny. [2] To souvisí se slapovými silami mimo body P , O , 2 a 5. Tyto síly způsobují odtok vody z okolí bodů 2 a 5 a přítok vody k bodům P a O . Voda nikde nevzniká, ani se neztrácí, a tak v blízkosti bodů 2 a 5 nastává odliv a v okolí bodů P a O pozorujeme příliv. Tento myšlenkový pochod opět vhodně ilustruje obrázek 2.2.1.

Pokud bychom přijmuli model, v němž je povrch Země bez výjimky pokryt jedním velkým oceánem, získala by Země spolu s touto vodní masou díky slapovým silám tvar elipsoidu. Půdorys je znázorněn na obrázku 2.2.2.

Slapové síly se nepodílí pouze na změně výšky mořské hladiny. Každý, kdo trávil dovolenou u moře, shledal, že vlny v době přílivu mají značnou „sílu“. Vyčíslíme-li ovšem velikosti slapových sil vztahované k jednomu kilogramu vody, zjistíme, že tyto síly řádově nepřesahují stovky mikronewtonů. [2] Popíšeme-li však celou záležitost pomocí impulsu síly

$$\Delta p = F_s \Delta t, \quad (2.2.2)$$

který nám poskytuje lepší informaci o pohybovém stavu vody, situaci snadno objasníme. Slapová síla F_s je sice zanedbatelně malá, nicméně změna času Δt , během níž se jeden kilogram vody dostane z jednoho konce oceánu na druhý, je vzhledem k rozměrům oceánů velká. Vlny tak získávají během svého pohybu oceánem značnou hybnost, která se pak projevuje vlnobitím.

Z obrázku 2.2.2 je patrné, že příliv, resp. odliv, vzniká na dvou místech Země současně. Jelikož se Země během jednoho dne otočí právě jednou kolem své osy, pozorujeme v průběhu dne na jednom místě Země dva přílivy a dva odlivy s odstupem 12 hodin.

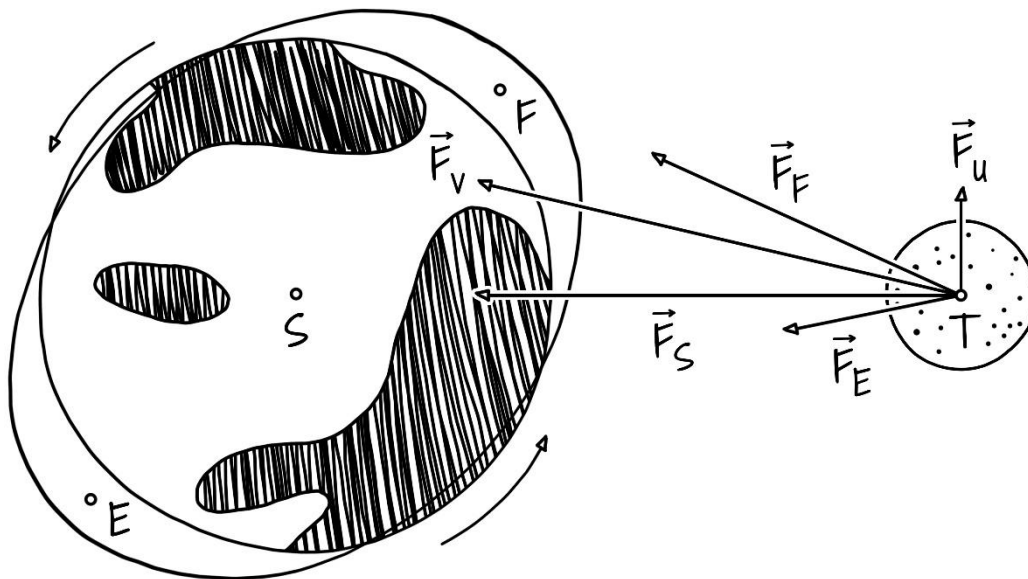
Doposud jsme řešili pouze slapové účinky Měsíce na Zemi. Slunce, které má mnohonásobně větší hmotnost než Měsíc, sehrává ovšem v této problematice také svoji roli. Jeho vzdálenost od Země je však daleko větší, a tak prim hraje Měsíc. Zajímavá situace ale nastává, pokud Měsíc a Slunce leží v jedné přímce, tj. během úplňku a novu. Gravitační účinky obou těles se pak sčítají a slapy jsou výraznější. Během první a poslední měsíční čtvrti svírají ramena Slunce – Země a Země – Měsíc pravý úhel a dochází zcela pochopitelně k opačnému jevu.

2.3 Vzdalování Měsíce a vázaná rotace

Na následujících řádcích se seznámíme s některými dalšími zajímavými okolnostmi, které souvisejí se slapovými silami na Zemi a na Měsíci.

Zabývejme se nejprve první částí titulku, tedy vzdalováním Měsíce od Země. Na obrázku 2.2.2 jsme ukázali, že slapové síly formují Zemi do tvaru elipsoidu. Pro snazší pochopení problematiky budeme však bez újmy na obecnosti dále pracovat pouze s půdorysem takto deformované Země, tj. s elipsou. Z ilustrace 2.2.2 je patrné, že hlavní poloosa této elipsy směřuje vždy k Měsíci a její orientace se mění s pohybem Země kolem své osy v reálném čase. Skutečnost je ovšem jiná, sledujme obrázek 2.3.1 níže.

Oceány, jež pokrývají Zemi, nejsou dokonale tekuté a natáčení deformované vodní masy se děje s jistým zpožděním. Důsledek je takový, že výsledná síla F_v , kterou výdutě přitahují Měsíc, nesměruje přímo do středu Země. Rozložíme-li sílu F_v tak, aby jedna její složka do zemského středu směřovala, zjistíme, že existuje jistá urychlující síla F_u , která má tečný směr k orbitě Měsíce. Autor se domnívá, že pro středoškolského studenta by zde úvaha mohla končit, neboť z obrázku 2.3.1 je intuitivně zřejmé, jak se bude Měsíc od Země vlivem této síly vzdalovat. Pro hlubší pochopení tohoto jevu však sledujme několik dalších odstavců, kde je celá situace rozebrána podrobněji.



Obrázek 2.3.1

Velikost síly F_u je nepatrná, nicméně relativně konstantní. Ve vesmíru, kde připadá na jeden krychlový metr jen několik atomů hmoty, prakticky neexistují odporové síly, a tak i takto malá síla F_u v důsledku druhého Newtonova pohybového zákona urychluje Měsíc na jeho oběžné dráze. [16] Vlivem zrychlení roste zcela pochopitelně orbitální rychlost Měsíce a s ní i kinetická energie, kterou lze vypočítat pomocí notoricky známého vztahu

$$E_k = \frac{1}{2} m_M v_k^2, \quad (2.3.1)$$

kde m_M je hmotnost Měsíce a v_k je jeho kruhová rychlost.

Určeme nyní také potenciální energii Měsíce. S klasickým výpočtem zde ovšem již nevystačíme, jelikož Měsíc se nachází v nehomogenním gravitačním poli Země (viz podkapitola 2.1). Je nutné použít vztah

$$E_p = -\kappa \frac{m_M m_Z}{r}, \quad (2.3.2)$$

jehož odvození bylo demonstrováno v bakalářské práci. [17] Pro úplnost ještě uvedme, že κ je Newtonova gravitační konstanta, m_Z je hmotnost Země a r je vzdá-

lenost Měsíce od Země. Měsíc tedy na své oběžné dráze disponuje celkovou energií

$$E = E_k + E_p = -\kappa \frac{m_M m_Z}{2r}, \quad (2.3.3)$$

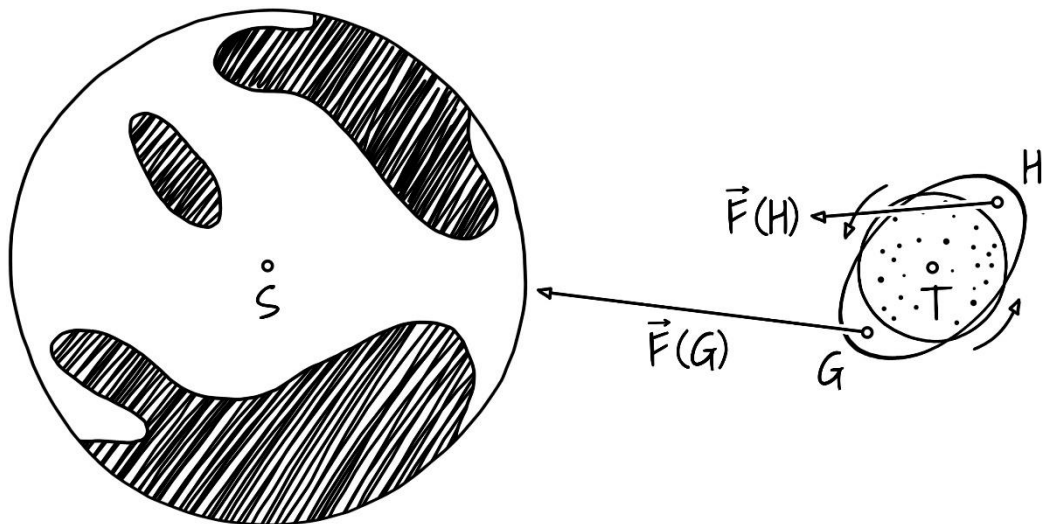
kde jsme při úpravě využili vzorec pro výpočet kruhové rychlosti. Nyní máme připravené vše, co k výkladu vzdalování Měsíce od Země potřebujeme. S rostoucí kinetickou energií Měsíce (viz síla F_u) se zvětšuje také celková energie Měsíce a její velikost se řídí vztahem (2.3.3). Pokud má být zachována rovnost, musí spolu s levou stranou rovnice růst strana pravá. Vzhledem k zápornému znaménku a vzhledem ke konstantnosti κ a veličin m_M a m_Z lze tento požadavek splnit pouze jediným způsobem, totiž zvětšováním vzdálenosti Země – Měsíc.

Díky této skutečnosti se vzdálí Měsíc od Země každý rok o cca 3,84 cm. [2] Podobnou rychlostí rostou lidské nehty. [18]

Přejdeme dále k druhé části této podkapitoly a objasníme tzv. vázanou rotaci. Pozorujeme-li Měsíc ze Země, rychle shledáme, že struktura měsíčního disku se v čase nikterak nemění. Autor se domnívá, že na základě tohoto tvrzení by řada studentů snadno přisoudila Měsíci nulovou rotaci kolem své osy. Aby k tomuto nedorozumění nedošlo, uveďme modelovou situaci, kterou můžeme se studenty v hodině fyziky sehrát a která tento fiktivní předpoklad úspěšně vyvrací.

K prezentaci zmíněné situace vyzveme jednoho ze studentů (Měsíc), aby „obíhal“ kolem jiného studenta (Země) tak, aby jeho pohled směřoval stále stejným směrem, tj. přijmeme předpoklad, že Měsíc nerotuje kolem své osy. Druhý ze studentů (Země) by měl shledat, že obíhající student (Měsíc) se k němu natáčí každou chvílí jinou částí těla, což je v rozporu s tím, že ze Země pozorujeme stále stejnou stranu Měsíce. Očividně je tedy předpoklad o nulové rotaci Měsíce chybný a má smysl pokračovat v hledání korektního řešení.

Pokud bude obíhající student (Měsíc) respektovat požadavek, aby student (Země) viděl stále stejnou část jeho těla, vykoná student (Měsíc) během jednoho oběhu právě jednou rotaci kolem své osy, tj. doba rotace Měsíce kolem své osy bude rovna oběžné době Měsíce kolem Země. Popsali jsme tzv. vázanou rotaci, která je charakteristická nejen pro našeho souputníka.



Obrázek 2.3.2

Na první pohled by se mohlo zdát, že shoda oběžné doby Měsíce s dobou rotace kolem jeho osy je pouhou náhodou. Podívejme se však na vázanou rotaci detailněji a ukažme, že i tento jev má fyzikální podtext.

Veškeré výše uvedené úvahy týkající se slapů vyházely z existence eliptického profilu Země, jenž vzniká v důsledku gravitační síly Měsíce. Uvědomme si ovšem, že stejně jako se Země nachází v nehomogenním gravitačním poli Měsíce, nachází se i Měsíc v nehomogenním gravitačním poli Země. Gravitační pole, které vytváří Země, je daleko „silnější“, neboť disponuje větší gravitační intenzitou, jejíž výpočet, podobně jako ve vztahu (2.1.3), lineárně souvisí s hmotností centrálního tělesa. Měsíc byl a je formován do tvaru elipsoidu analogických procesem jako Země.

Chceme-li vázanou rotaci spolehlivě objasnit, musíme nejprve přijmout fakt, že slapové síly mohou elipticky deformovat i pevný materiál. Jedině tak mohl Měsíc v minulosti získat zmíněný elipsoidní tvar, jenž je klíčový k vysvětlení této problematiky. Měsíční horniny mají do dokonalé tekutiny opravdu daleko, tudíž i zde docházelo k opožděnému natáčení eliptického půdorysu Měsíce. Gravitační síly, kterými působila Země na výdutě, měly rozdílné velikosti i směr (viz obrázek 2.3.2).

Rozložíme-li tyto síly tak, aby vždy jedna ze složek byla kolmá na hlavní poloosu půdorysu, zjistíme, že Měsíc lze ztotožnit s dvojnásobnou pákou, jejíž celkový moment síly je nenulový. Tento moment síly brzdil v důsledku své orientace přirozenou měsíční rotaci, která má opačný směr. Měsíční rotace byla zpomalována tak dlouho, až

došlo k její synchronizaci s oběžnou dobou Měsíce. Vznikla vázaná rotace, jejíž důsledky jsou patrné i dnes, jak jsme se přesvědčili v úvodu této podkapitoly.

2.4 Ostatní důsledky slapových sil

Již jsme ukázali, že slapové síly zdaleka nesouvisí pouze s dmutím mořské hladiny. Tato podkapitola si klade za cíl prezentovat některé další astrofyzikální situace vztahující se ke slapům.

Pozastavme se ještě na chvíli u předešlé podkapitoly, kde jsme zkoumali vázanou rotaci Měsíce. Ujistili jsme se, že rozdílné gravitační síly, kterými Země přitahovala slapové výdutě Měsíce, souvisely se zpomalováním doby rotace Měsíce kolem své osy. Planetu Zemi čeká z analogických důvodů obdobný osud. Slapové výdutě Země jsou přitahovány k Měsíci rozdílnými gravitačními silami, a tak i zde vzniká moment síly, jenž zpomaluje dobu rotace Země. Vhodnou ilustraci této problematiky získáme, pokud na obrázku 2.3.2, zaměníme Měsíc a Zemi. Hmotnost Měsíce je asi 100krát menší než hmotnost Země a je zřejmé, že příslušné gravitační síly budou v tomto případě menší a celé zpomalování bude ve výsledku zanedbatelně malé. [19] Literatura uvádí, že v rámci jednoho století dochází k diferenci 1,7 ms. [2] To ovšem nemění nic na faktu, že za mnoho let bude i z Měsíce pozorovatelná pouze jedna zemská polokoule. Země tedy také spěje do stavu vázané rotace.

Vázaná rotace je ve Sluneční soustavě poměrně běžná. Mars a jeho měsíce Phobos a Deimos rotují vázaně. Stejně tak všechny Galileovy měsíce, tj. Io, Europa, Ganymed a Callisto, mají vázanou rotaci vzhledem k Jupiteru. Ve Sluneční soustavě najdeme desítky dalších těles, které disponují vázanou rotací. [2] [20] [21] Všechny tyto příklady nás vedou k závěru, že každý systém dvou a více těles dospěje dříve nebo později do stavu vázané rotace. [2]

Zaměřme se krátce na jeden z Galileových měsíců, totiž na měsíc Io. Io obíhá kolem Jupiteru v podobné vzdálenosti jako náš Měsíc, nicméně hmotnost Jupiteru je více jak 300krát větší než hmotnost Země. [22] Slapy, kterým je Io vystaven, jsou tak mnohem silnější. Podpovrchové vrstvy měsíce jsou slapovými silami uváděny do pohybu a vlivem tření dochází k jejich zahřívání a tavení. To vede k bohaté vulkanické činnosti, kterou na fotografiích zachytila i sonda Voyager 1 v roce 1978. [23]

Minulý odstavec nás přesvědčil, jak moc souvisí velikost slapových sil s hmotností tělesa, v jehož blízkosti se slapově „atakovaný“ objekt nachází. Debatujme nyní o slapových silách v blízkosti těles, kde intenzita gravitačního pole dosahuje enormních velikostí.

Příkladem takového tělesa je černá díra, jejíž hmotnost generuje gravitační pole s obrovskou intenzitou. Objekty, které se do jejího gravitačního pole dostanou, jsou vlivem slapových sil formovány do již dobře známého elipsoidu. Pokud však velikost slapových sil dosáhne jisté meze, objekt se roztrhne.

Autor se domnívá, že výše zmíněný poznatek by mohl posloužit jako vhodná motivace k podrobnějšímu výkladu slapových jevů, neboť poskytuje prostor pro představivost a lze díky němu barvitě vylicít několik katastrofických událostí.

2.5 Slapové jevy – plakát

Plakát Slapové jevy je rozdělen do pěti tematických celků: „Jak vznikají slapové síly, Příliv a odliv, Vzdalování Měsíce, Vázaná rotace Měsíce, Ostatní důsledky slapových sil“. Jednotlivé části plakátu jsou koncipovány podobně jako výše uvedené podkapitoly. Každá z nich, s výjimkou poslední, je doplněna alespoň jedním obrázkem.

Ilustrace jsou pojaty hravě a výklad do přijatelné míry odlehčují. Vytváří tak prostor pro hlubší pochopení obsahu plakátu. Autor je přesvědčen, že i přesto obrázky působí přehledně a nepostrádají žádné důležité prvky. Některé části obrázků (vektory, slapové výdutě apod.) jsou patřičně zvětšeny z důvodu přehlednosti. Proporce Země a Měsíce jsou ve vhodném měřítku zachovány. Pozornému divákovi neujde jistá geografická podobnost ilustrace Země se skutečným půdorysem naší planety.

Textový doprovod k jednotlivým pasážím je stručný, stále však dostatečně obsáhlý na to, aby poskytl divákovi ucelený pohled na studovaný jev. V textu nalezneme minimum slov, která by mohla být pro středoškolského studenta obtížně uchopitelná a mohla by tak znemožňovat pochopení předkládané problematiky. Za tímto účelem jsou volena vhodná synonyma.

3 Hertzsprungův-Russellův diagram

Noční obloha může nezaujatému pozorovateli připadat do jisté míry stereotypní. Krom Měsíce, který nebeské klenbě vizuálně dominuje, spatří laické oko pouze spoustu zářících bodů – hvězd.

Na první pohled se hvězdy nikterak neliší. Podíváme-li se ovšem pozorněji, zjistíme, že stálice lze barevně diferencovat. Například hvězda Aldebaran v souhvězdí Býka září zřetelně „načervenalé“. Má tedy smysl mluvit o barvě hvězd, resp. o jejich povrchové teplotě, která s barvou hvězd nutně souvisí.

O něco snadněji si pozorovatel povšimne, že některé hvězdy září na nebi více a jiné méně. To plyne jednak ze vzdáleností, jež nás od stálic dělí, ale také ze samotného zářivého výkonu hvězd.

Hertzsprungův-Russellův diagram rozděluje stálice na základě teploty a zářivého výkonu do několika kategorií a vytváří tak přehledné schéma mapující hvězdy a jejich vývoj v čase.

Tato kapitola si klade za cíl problematiku vhodně rozebrat.

3.1 Zářivý výkon

Chceme-li studovat Hertzsprungův-Russellův diagram (dále jen H-R diagram), je nutné se seznámit s několika veličinami, které hrají v H-R diagramu stěžejní roli. Podívejme se nyní na jednu z nich.

Každé těleso o nenulové termodynamické teplotě vyzařuje do prostoru jisté množství elektromagnetického záření. Tento fakt vystihuje dobře známý Stefanův-Boltzmannův zákon popisující vyzařování absolutně černého tělesa. Připomeňme jeho tvar:

$$I = \sigma T^4, \quad (3.1.1)$$

kde I je intenzita vyzařování, σ Stefanova-Boltzmannova konstanta a T termodynamická teplota. Intenzitu vyzařování, jejíž jednotkou je $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, lze chápat také jako zářivý výkon, kterým disponuje 1 m^2 povrchu zkoumaného tělesa. Celkový zářivý vý-

kon L , s kterým těleso vyzařuje, pak bude roven následujícímu součinu:

$$L = SI = S\sigma T^4, \quad (3.1.2)$$

kde S je povrch tělesa, kterým se elektromagnetické záření šíří do okolí.

Hvězdy, jež díky jejich fyzikálním parametrům můžeme považovat za absolutně černá tělesa a které mají kulový tvar, září tedy se zářivým výkonem

$$L = 4\pi r^2 \sigma T^4, \quad (3.1.3)$$

kde r je poloměr hvězdy.

Měření zářivého výkonu hvězd lze v praxi realizovat skrze tzv. magnitudy. Jejich fyzikální podstatu objasníme v další podkapitole.

3.2 Zdánlivá a absolutní magnituda

Již v úvodu bylo naznačeno, že výraznost stálic na obloze souvisí nejen se samotným zářivým výkonem hvězd, ale také se vzdálenostmi, jež nás od nich dělí. Přibližme dále čtenáři význam dvou fotometrických veličin, které nahlíží na tuto problematiku různě.

V astronomii se míra jasnosti objektu na obloze často popisuje tzv. zdánlivou magnitudou m (někdy také zdánlivá hvězdná velikost). Přívlastek zdánlivá odkazuje na fakt, že výraznost objektu je posuzována pouze na základě toho, jak ho vidíme ze Země, ale nevypovídá nic o tom, jak objekt skutečně září. Svíčka na Měsíci bude mít jinou zdánlivou magnitudu než svíčka na Plutu, přestože oba zdroje světla disponují stejným zářivým výkonem. Zdánlivá magnituda tedy nezohledňuje vzdálenost mezi pozorovatelem a zdrojem záření.

Zdánlivou magnitudu zavedl v 2. století př. n. l. Hipparchos, který rozdělil stálice do šesti skupin podle toho, jak moc jasné se mu na obloze jevily. Nejjasnějším hvězdám přiřadil zdánlivou magnitudu $m = 1$ mag, těm nejméně jasným $m = 6$ mag. [24]

Astronomové 19. století Hipparchův přístup ke kategorizaci hvězd přijali, nicméně bylo nutné zdánlivé magnitudě udělit poněkud ostřejší fyzikální smysl. Za tímto účelem byla zavedena jasnost j , jež je přímo úměrná zářivému výkonu hvězdy L a nepřímo

úměrná kulové ploše, kterou hvězda ve vzdálenosti d osvětluje:

$$j = \frac{L}{4\pi d^2}. \quad (3.2.1)$$

Vztah, jenž zdánlivé magnitudě dává skrze jasnost fyzikální podstatu, nazýváme Pogsonova rovnice a její tvar je následující:

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log \frac{j_1}{j_2}, \quad (3.2.2)$$

kde m_1 a m_2 jsou zdánlivé magnitudy dvou různých hvězd a j_1 a j_2 jejich jasností. Hipparchos kategorizoval hvězdy na základě svého zraku, který spolu s dalšími lidskými smysly podléhá Weber-Fechnerovu zákonu. [24] Logaritmus v Pogsonově rovnici je tak korekcí na subjektivnost vnímání lidského oka. Záporná konstanta před logaritmem pak zajišťuje, aby byl zachován princip Hipparchovy diferenciacce hvězd.

Chceme-li vyzářování objektu zkoumat hlouběji, je nutné zdánlivou magnitudu normovat na jednotnou vzdálenost. Astronomové z tohoto důvodu zavádí tzv. absolutní magnitudu M (též absolutní hvězdná velikost), která popisuje míru jasnosti hvězd pozorovaných z jednotné vzdálenosti 10 pc. [25] Známe-li zdánlivou magnitudu hvězdy a její vzdálenost, řídí se normování vztahem

$$M = m + 5(1 - \log d), \quad (3.2.3)$$

jehož odvození je na základě vztahů (3.2.1) a (3.2.2) zřejmé. Doplňme jen, že vzdálenost hvězdy d je nutné dosazovat v parsecích.

Nyní již lze konstatovat, že hvězdy s vysokou absolutní magnitudou mají vysoký zářivý výkon. Absolutní magnituda tedy zohledňuje vzdálenost mezi pozorovatelem a zdrojem záření a je tak vhodná ke kalkulaci zářivého výkonu hvězdy.

Výpočet zářivého výkonu hvězdy na základě absolutní magnitudy realizujeme tak, že studovanou stálici porovnáváme opět s využitím vztahů (3.2.1) a (3.2.2) s jistou referenční hvězdou, u které již absolutní magnitudu a zářivý výkon známe. Za tímto účelem je vhodné ke komparaci použít hvězdu o absolutní magnitudě $M_0 = 0$ mag. Taková hvězda disponuje zářivým výkonem $L_0 = 2,97 \cdot 10^{28}$ W. [5] Zářivý výkon L libovolné

hvězdy tudíž vypočítáme následovně:

$$L = L_0 \cdot 10^{-0,4M}, \quad (3.2.4)$$

kde M je absolutní magnituda zkoumané hvězdy. Na závěr doplníme, že vědecká praxe při určování zářivého výkonu vychází však především ze vztahu (3.2.1) neboť citlivé senzory kamer měří přímo jasnost j , nikoliv magnitudy. [26]

3.3 Wienův posunovací zákon

V úvodu této kapitoly jsme také nastínili souvislost mezi barvou hvězd a jejich teplotou. Vzpomeňme tedy na Wienův posunovací zákon, který onu souvislost kvantitativně popisuje.

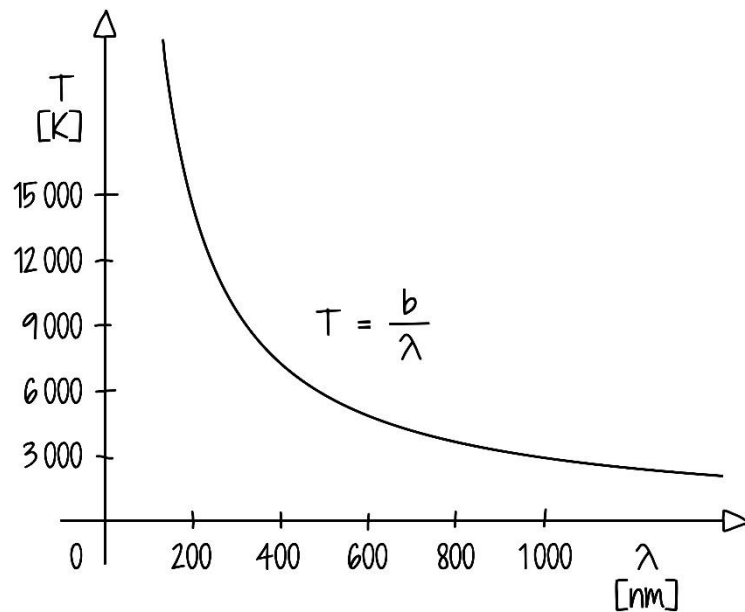
Wienův posunovací zákon

$$T = \frac{b}{\lambda}, \quad (3.3.1)$$

kde T je termodynamická teplota, b Wienova konstanta a λ vlnová délka, je přímým důsledkem Planckova vyzařovacího zákona a blíže specifikuje vyzařování absolutně černého tělesa, v našem případě hvězdy.

Každá hvězda disponuje jistým zářivým výkonem, kterému odpovídá celkové množství energie vyzařené v čase ve formě elektromagnetického záření. Na elektromagnetické záření lze nahlížet jako na vlnění, jemuž můžeme přiřadit určitou vlnovou délku. Zjistíme-li, na jaké vlnové délce vyzařuje hvězda nejvíce, dokážeme na základě Wienova posunovacího zákona vypočítat i povrchovou teplotu studované stálice. To lze v praxi provést pozorováním dané hvězdy přes barevné filtry a porovnáním množství světla, které těmito filtry prošlo. [27]

Vztah (3.3.1) můžeme chápat také jako hyperbolickou funkci $T = f(\lambda)$, jejíž graf vhodně dokresluje výklad Wienova zákona posunu. Z níže přiloženého grafu 3.3.1 je patrné, že chladnější hvězdy (o teplotě řádově 4 000 K) mají načervenalou barvu, teplejší hvězdy jsou žluté a velmi horké hvězdy (s teplotou přes 4 000 K) mají barvu bílou až modrou. [27]



Graf 3.3.1

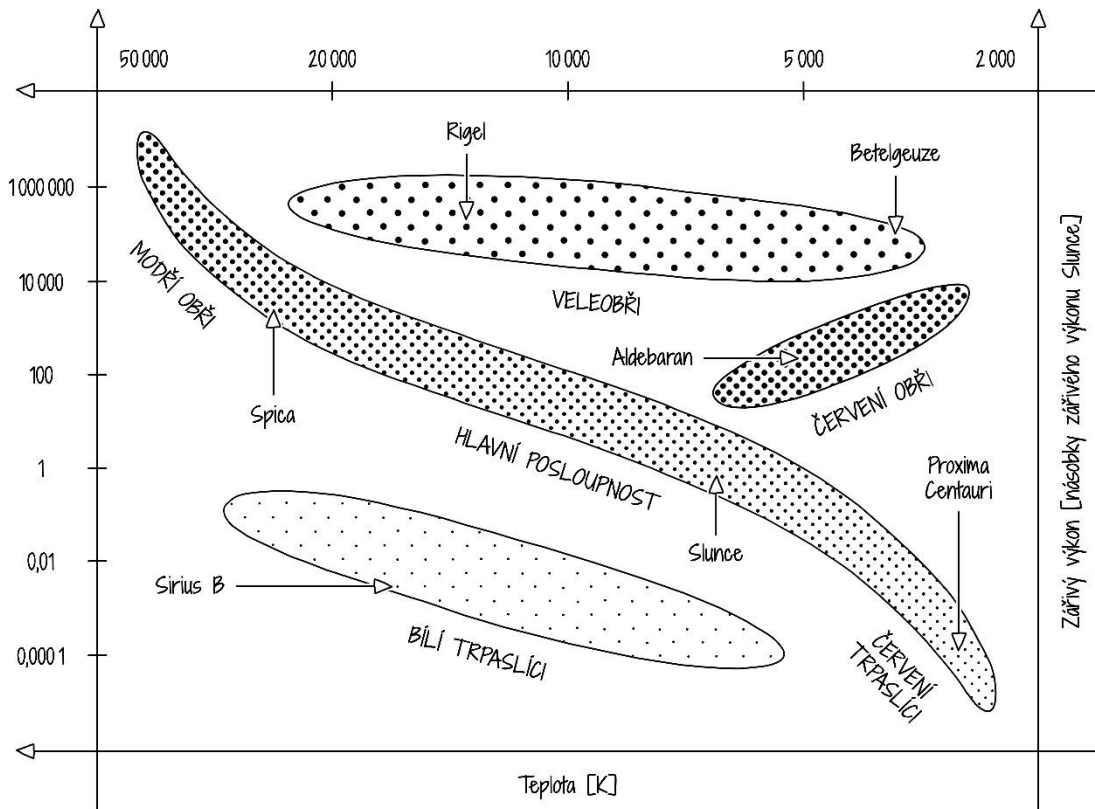
Autor se domnívá, že je při výkladu stěžejší, aby pedagog vyvrátil mylnou představu, že „chladné věci jsou modré a teplé červené“. Jak jsme ukázali, takové tvrzení je v přímém rozporu s Wienovým posunovacím zákonem.

3.4 Hertzsprungův-Russellův diagram

V předešlých podkapitolách jsme se seznámili s problematikou týkající se měření zářivého výkonu a povrchové teploty hvězd. Odvodili jsme patřičné vztahy pro určování těchto veličin a nyní můžeme konečně objasnit význam tolikrát zmiňovaného H-R diagramu.

H-R diagram (viz obrázek 3.4.1 níže) znázorňuje rozdělení hvězd na základě jejich zářivého výkonu a teploty. Na vodorovné ose sledujeme teplotu hvězd, která zleva doprava klesá, na svislé pak jejich zářivý výkon, jenž roste směrem vzhůru. Zakreslíme-li do H-R diagramu dostatečně velké množství stálic, můžeme z takto sestaveného grafu statisticky vyvodit závěry pro hvězdy jako takové.

Jak plyne čas, hvězdy se v rámci H-R diagramu „pohybují“. To je způsobeno fyzikálními jevy, které doprovází život stálice. Hvězdy tedy fakticky nalezneme i mimo oblasti zakreslené v diagramu. V takových místech však stálice tráví jen nepatrnou část



Obrázek 3.4.1

svého života, tudíž se ve statisticky konstruovaném diagramu tato skutečnost neprojeví.

Více než 90 % hvězd leží na tzv. hlavní posloupnosti. [25] Jedná se o diagonální oblast ve středu diagramu. Pro hvězdy ležící v této části diagramu je charakteristická přímá úměra zářivého výkonu a teploty – s rostoucí teplotou roste i zářivý výkon hvězdy. Právě zde se stálice zdržují po většinu svého života.

Nad hlavní posloupností nalezneme oblast obrů a veleobrů. Jde o hvězdy, které navzdory relativně nízké teplotě mají vysoký zářivý výkon. Životní etapa těchto hvězd je poměrně krátká, proto v této oblasti najdeme menší množství stálic než v předešlém případě. Objasníme, proč takové stálice nazýváme tak majestátně.

Zářivý výkon hvězdy ovlivňují na základě vztahu (3.1.3) dva parametry: teplota T a poloměr hvězdy r . Má-li mít hvězda vysoký zářivý výkon a zároveň si zachovat nízkou teplotu, musí zákonitě disponovat velkým povrchem, tj. i poloměrem. Stálice nad hlavní posloupností jsou tedy opravdu obrovské a po právu je nazýváme „obry“.

Pod hlavní posloupnosti nalezneme hvězdy malých rozměrů, tzv. bílé trpaslíky. Jejich zářivý výkon nedosahuje vysokých hodnot, nicméně teplota ano. Analogicky jako u obrů i zde se můžeme na základě vztahu (3.1.3) přesvědčit o skutečně „trpasličích“ rozměrech těchto hvězd.

3.5 Vývoj hvězd

Podívejme se dále na život hvězdy v průběhu času a seznámme se tak blíže s kategorizací stálic.

Matkou všech hvězd jsou mlhoviny, které se skládají z velké části z chladného vodíku. Mezi částicemi v mlhovině působí kromě slabých gravitačních sil také síly elektrické. Jejich příčinou je všudypřítomné kosmické záření, jež částice silně ionizuje. Vlivem těchto sil dochází k zahušťování mlhoviny a vznikají kompaktní celky, tzv. protohvězdy. Především elektrická síla hraje v počátcích kontrakce mezihvězdného plynu prim, neboť je silnější interakcí než interakce gravitační.

S rostoucí hmotností protohvězd začíná celému procesu dominovat gravitační síla. Ta nadále zahušťuje budoucí hvězdu a zahřívá ji. V případě hmotnosti větší než 0,08 hmotnosti Slunce dochází uvnitř stálice k nastartování termojaderné fúze, tj. k přeměně vodíku na helium. [22] V této fázi je zastaveno gravitační smršťování, neboť tlak záření uvnitř stálice je v rovnováze s tlakem způsobeným gravitační silou. Hvězda je stabilní a nalezneme ji na hlavní posloupnosti H-R diagramu.

Pro úplnost doplníme, že protohvězdy s příliš malou hmotností na zažehnutí jaderné reakce nazýváme hnědými trpaslíky a tvoří jakousi hranici mezi planetami a hvězdami. Řada takových trpaslíků byla nalezena v otevřené hvězdokupě Plejády. [28]

Jak již bylo zmíněno výše, hvězda pobývá na hlavní posloupnosti po většinu svého života. To, jak se bude vyvíjet její osud dál, závisí především na hmotnosti, s kterou na hlavní posloupnost vstoupila. Již nyní můžeme ovšem předeslat, že život stálice je tím bouřlivější a kratší, čím větší hmotností hvězda disponuje. [22]

Hvězdy s hmotností podobnou Slunci

Hvězdy s hmotností podobnou Slunci se začnou po přeměně veškerého vodíku na helium znovu smršťovat. Teplota následně vzroste natolik, že dojde k novému typu termojaderné fúze – k přeměně helia na uhlík. Tento děj je doprovázen vysokým tlakem záření, v jehož důsledku stálice několikanásobně zvětší svůj poloměr a ochladí se. Z hvězdy se stává červený obr. [25] Dodejme, že během rozpínání jsou odhozeny svrchní části hvězdy, které mohou vytvořit tzv. planetární mlhovinu. Typickým příkladem planetární mlhoviny je Prstencová mlhovina v souhvězdí Lyry.

Hvězda se poté, co přemění veškeré helium na uhlík, opět stáhne a zahřeje. Gravitační síla již ovšem tentokrát nestačí na spuštění další jaderné syntézy, a tak vzniká tzv. bílý trpaslík – horký objekt s malým poloměrem a velkou hustotou. Gravitační síla v této fázi vzdoruje tlaku, jehož podstata tkví v Pauliho vylučovacím principu. [29] Bílý trpaslík není aktivním zdrojem energie, chladne a spěje do finálního stadia tzv. černého trpaslíka. [22]

Hvězdy o hmotnosti menší než polovina hmotnosti Slunce

Hvězdy s malou hmotností, jež však byla dostatečně velká na spuštění primární fúze, nazýváme červenými trpaslíky. Jedná se o nejpočetnější typ hvězd v naší Galaxii (až 75 %) a v H-R diagramu je nalezneme vpravo dole na hlavní posloupnosti. [30] Díky své malé hmotnosti probíhají reakce uvnitř takové hvězdy velmi pomalu a stálice tohoto typu se na hlavní posloupnosti zdržují velice dlouhou dobu. Literatura uvádí, že vesmír je natolik mladý, že žádný z červených trpaslíků ještě nestačil opustit hlavní posloupnost. [31] [32] I tak jsme ovšem schopni dobře odhadnout jejich následný vývoj. Jakmile červený trpaslík přemění veškerý vodík, začne se gravitačně hroutit. Gravitační síla je ale v důsledku malé hmotnosti příliš slabá na start syntézy helia, tudíž hvězda spěje rovnou do stádia bílého a černého trpaslíka. [22]

Zástupcem červených trpaslíků je například často popularizovaná hvězda Proxima Centauri. [25]

Hvězdy o hmotnosti větší než osm hmotností Slunce

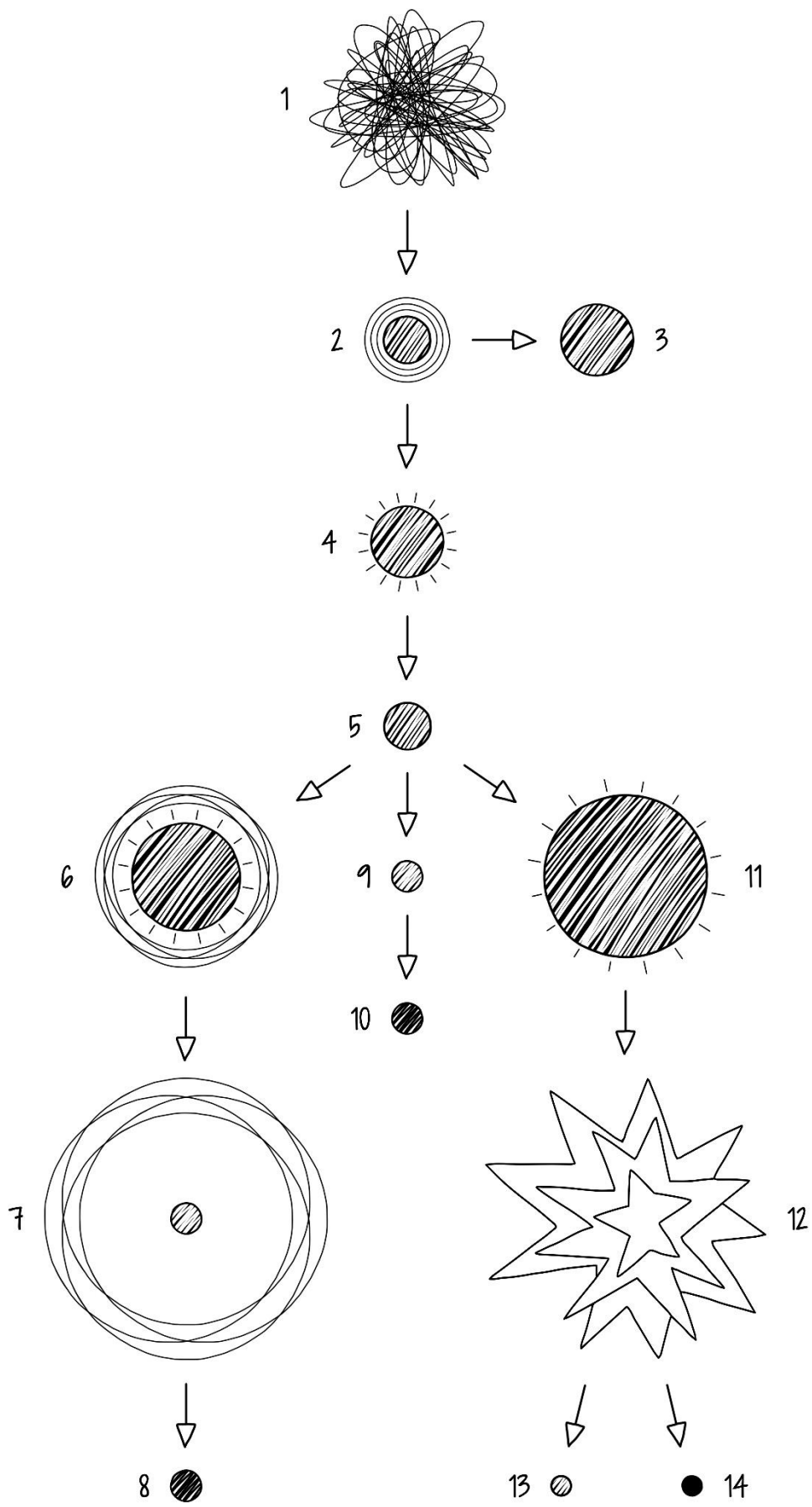
Vývoj nejhmotnějších hvězd je v počátcích totožný s vývojem hvězd o hmotnosti Slunce. Celý děj ovšem probíhá mnohem rychleji a nekončí syntézou helia. Gravitační síla je zde natolik silná, že jsou postupně spušteny i fúze těžších prvků. Dochází tak k periodickým kontrakcím a expanzím hvězdy. Jaderný proces končí až u železa, které již nelze v jádru stálice dále přeměňovat, neboť syntéza železa musí být energeticky dotována. Dominantní gravitační síla tedy vyhořelou hvězdu prudce smrští a vzniklé rázové vlny rozmetají hvězdnou hmotu do mezihvězdného prostoru. Říkáme, že vybuchla supernova. [22] V 11. století se tak stalo v souhvězdí Býka a tuto událost nám dodnes připomíná objekt nazvaný Krabí mlhovina. [33]

Exploze je zdrojem velkého množství energie, jež je stěžejní pro vznik nových prvků, které by v jádru hvězdy nemohly nikdy vzniknout. [34] Na výbuch supernovy lze také nahlížet jako na jistý recyklační děj, neboť vrací do oběhu materiál pro vznik nových stálic.

Jádro hvězdy, které po explozi zbyde, podléhá dalšímu gravitačnímu smršťování. Kontrakce je nyní natolik silná, že se elektrony a protony v rámci atomu slučují v neutrony, jež mohou lépe vzdorovat gravitaci. [29] Vzniká objekt s jen obtížně představitelnou hustotou až $10^{18} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, tzv. neutronová hvězda. [25]

Nejhmotnější z hvězd nicméně svůj bouřlivý život v tomto stádiu nekončí. Je-li pozůstatek hvězdy dostatečně hmotný, hroutí se i navzdory tlaku vyvolaného Pauliho vylučovacím principem a vzniká černá díra. [29] Bližší deskripce takového objektu však přesahuje rámec tohoto textu a nebudeme se jí dále zabývat.

Celý život hvězdy (se všemi možnými variacemi) je zaznamenán na níže uvedeném obrázku 3.5.1: mlhovina (1), protohvězda (2), hnědý trpaslík (3), hvězda hlavní posloupnosti (4), kontrakce hvězdy (5), červený obr (6), bílý trpaslík s planetární mlhovinou (7), černý trpaslík (8), (10), bílý trpaslík (9), veleobr (11), výbuch supernovy (12), neutronová hvězda (13), černá díra (14).



Obrázek 3.5.1

3.6 Hertzsprungův-Russellův diagram – plakát

Plakát tvoří dvě části: „Není hvězda jako hvězda!“ a „Život hvězdy“. Oba celky spolu úzce souvisí a navzájem na sebe odkazují. Každá kapitola je pak doplněna jedním obrázkem.

V první části plakátu se divák seznamuje s H-R diagramem a jeho významem. Při konstrukci diagramu nebyla na vertikální ose použita těžce uchopitelná magnituda, nýbrž zářivý výkon. Autor je přesvědčen, že tato fyzikální veličina je pro důsledné pochopení problematiky vhodnější, neboť by o ní, na rozdíl od hvězdné velikosti, měli mít studenti alespoň nějaké povědomí. Zářivý výkon je uveden v násobcích zářivého výkonu Slunce – opět za účelem větší názornosti. Na horizontální ose nalezneme teplotu hvězd v kelvinech, jelikož písmenná spektrální klasifikace by mohla být matoucí. U všech jednotek není záměrně použit zápis ve formě mocnin o základu deset, neboť jeho význam bohužel studentům často uniká. V ilustraci je dále kvalitativně zachována rozměrová a hustotní diference hvězd: velikost teček, které vyplňují jednotlivé oblasti diagramu, odkazuje na skutečné rozměry stálic a obdobně hustota tečekování vypovídá o množství hvězd v těchto oblastech. V každé části diagramu je uveden alespoň jeden hvězdný zástupce, aby bylo zachováno propojení s praktickým využitím.

Jako předloha pro ilustraci H-R diagramu posloužila autorovi skripta z astronomického kurzu. [25]

V pravé polovině plakátu nalezneme informace vztahující se k životu hvězdy. Rozebrány jsou všechny významné možnosti vývoje od hnědého trpaslíka až po černou díru. Výklad je strukturován do tří částí na základě hmotnosti, kterou stálice na počátku svého života má. Autor se domnívá, že v rámci plakátu není nutné znát hmotnostní intervaly přesně, a tak byla klasifikace provedena následovně: „Hvězda s hmotností podobnou Slunci, Hvězda s hmotností menší než Slunce, Hvězda s hmotností mnohokrát větší než Slunce“.

V textovém doprovodu plakátu najdeme několik zajímavostí souvisejících se studovaným tématem. Student například zjistí, jak daleko se nachází Proxima Centauri, jak moc se zvětší Slunce ve stádiu červeného obra nebo proč není možné vidět černou díru. Všechny tyto informace problematiku odlehčují a ztraktivňují.

4 Dopplerův jev

Podobně jako slapové jevy je také Dopplerův jev součástí našeho každodenního života. I fyzikální laik může důsledky tohoto úkazu snadno odpozorovat, zaposlouchá-li se do sirény projíždějící sanitky nebo policejního vozu. Po didaktické stránce se tedy jedná o jednu ze „šťastných“ astrofyzikálních kapitol, neboť postrádá hlubokou abstraktnost a její problematiku, jak jsme předeslali, lze snadno demonstrovat.

Silným argumentem pro důsledný výklad Dopplerova jevu na střední škole je jeho široké praktické využití. Setkáváme se s ním napříč nejrůznějšími vědními odvětvími. V medicíně pomáhá lékařům diagnostikovat komplikace v cirkulaci krve v krevním řečišti. [35] V biologii na Dopplerův jev narážíme u Vrápence velkého, který díky němu dokáže efektivně lokalizovat svou kořist. [36] V neposlední řadě je Dopplerův jev nástroj, s jehož pomocí Edwin Hubble v roce 1929 dokázal, že se časoprostor rozpíná. [37] Právě v astrofyzice sklízí tato fyzikální zákonitost v posledních dvou stáletích nevídaný úspěch. I to je důvod, proč je jí věnována závěrečná teoretická kapitola této diplomové práce.

4.1 Vznik Dopplerova jevu

Dopplerův jev popisuje změnu frekvence vlnění vnímanou pozorovatelem v závislosti na kinetickém stavu mezi pozorovatelem a zdrojem vlnění. Jinými slovy, pohybuje-li se zdroj vůči pozorovateli a naopak, registruje pozorovatel rozdílnou frekvenci vlnění, než s jakou je vlnění ve skutečnosti vysíláno.

Jev objevil a popsal v roce 1842 Christian Doppler a jeho pravdivost kuriózně dokázal o něco později Buys Ballot, když provedl experiment s lokomotivou plnou trumpetistů. [34] Dnes se však s Dopplerovým jevem vědomě setkáváme za mnohem běžnějších okolností, například při průjezdu policejního vozu. Oprostíme-li se od změny hlasitosti sirény v důsledku přibližování a vzdalování vozu, zřetelně registrujeme také změnu frekvence v „melodii“ sirény. Vzdalující se policejní auto houká „loudavěji“ než blížící se. Podívejme se nyní na tento konkrétní případ podrobněji.

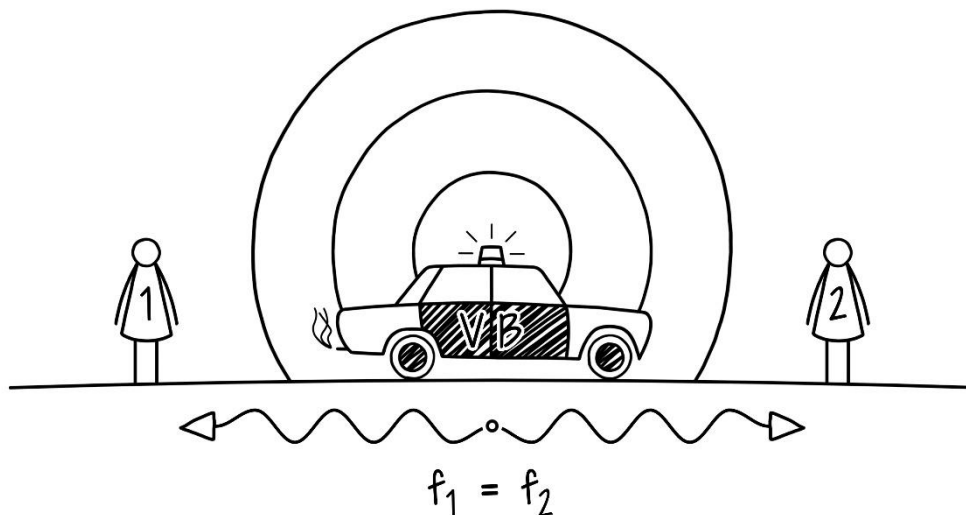
Dopplerův jev a pohybující se zdroj vlnění

Nejprve nahlížejme na celou situaci kvalitativně a snažme se pochopit pouze příčinu jevu, tj. příčinu rozdílnosti frekvencí.

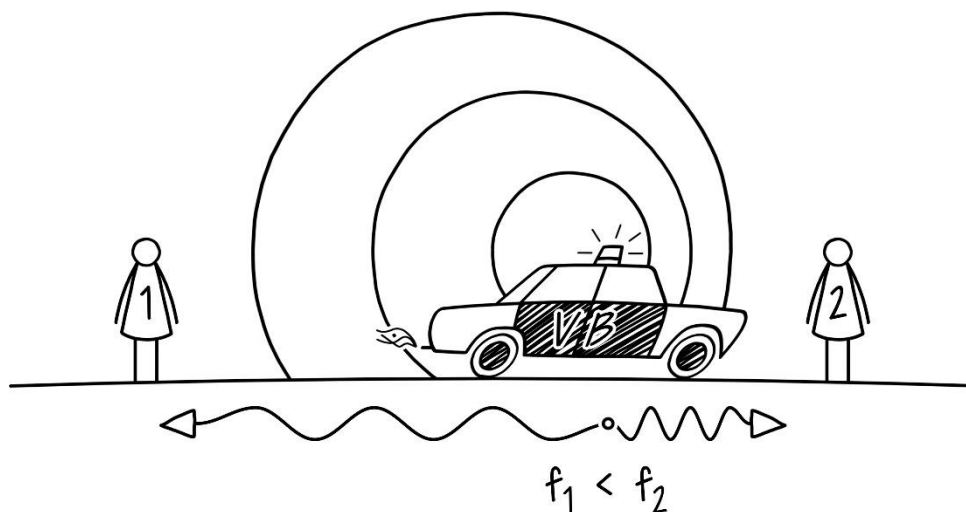
Na obrázku 4.1.1 figuruje policejní vůz se spuštěnou sirénou jakožto zdrojem vlnění a pozorovatelé 1 a 2. Policejní vůz je vzhledem k oběma pozorovatelům v klidu. Siréna houká s jistou frekvencí a totožnou frekvencí pochopitelně registruje jak pozorovatel 1, tak pozorovatel 2. K Dopplerovu jevu nedochází.

Přejdeme k případu, kdy uvedeme zdroj vlnění do pohybu, jak demonstruje obrázek 4.1.2 níže. Vlnění, které se šíří ze sirény do okolního prostoru má samo o sobě rychlost zvuku. Jistou rychlostí však také disponuje zdroj vlnění, neboť vůz se pohybuje. Zdroj vlnění, tj. siréna, tedy „dohání“ pravou část dříve emitovaných vlnoploch a od levé se vzdaluje. Z tohoto důvodu dochází ke změně vlnové délky, potažmo frekvence, což je na obrázku 4.1.2 znázorněno.

Pozorovatel 1, od kterého se zdroj vlnění vzdaluje rychlostí vozidla, registruje nižší frekvenci sirény, než se kterou siréna ve skutečnosti houká. V opačné situaci je pozorovatel 2, k němuž se zdroj vlnění přibližuje – ten vnímá frekvenci vyšší. Povšimněme si také, že vlnění již nemá tvar soustředných kulových vlnoploch jako ve statickém případě, neboť během každé periody dochází k posunu zdroje vlnění o vzdálenost, kterou vůz během této periody urazil.



Obrázek 4.1.1



Obrázek 4.1.2

Dále se zabývejme diskutovaným případem kvantitativně a odvodíme fyzikální vztahy s Dopplerovým jevem související.

Studujme nejprve změnu frekvence z hlediska pozorovatele 1. Zdroj vlnění se od něho vzdaluje rychlostí v a samotné vlnění se šíří prostředím konstantní rychlostí c , pro kterou platí vztah

$$c = f\lambda = \frac{\lambda}{T}, \quad (4.1.1)$$

kde f je frekvence vlnění, λ jeho vlnová délka a T perioda, s kterou se vlnění opakuje. Během jedné periody T se zdroj vlnění vzdálí od pozorovatele 1 o vzdálenost vT . Z perspektivy pozorovatele 1 se tak vlnová délka zákonitě prodlouží o tuto vzdálenost a bude popsána vztahem

$$\lambda' = \lambda + vT, \quad (4.1.2)$$

kde λ' je vlnová délka, jak ji vnímá pozorovatel 1. Spojením rovností (4.1.1) a (4.1.2) dostáváme rovnost

$$\lambda' = \lambda \frac{c + v}{c}, \quad (4.1.3)$$

kteřá charakterizuje změnu vlnové délky pro vzdalující se zdroj vlnění. Frekvence se

řídí předpisem

$$f' = f \frac{c}{c + v}. \quad (4.1.4)$$

Zcela analogicky vyvodíme závěr pro pozorovatele 2, ke kterému se zdroj vlnění přibližuje. Během jedné periody T se k němu zdroj vlnění posune o vzdálenost vT a vlnová délka vnímaná pozorovatelem 2 se zkrátí:

$$\lambda' = \lambda - vT. \quad (4.1.5)$$

Využijeme-li opět rovnost (4.1.1) dostáváme vztahy pro změnu vlnové délky a frekvence pro přibližující se zdroj vlnění:

$$\lambda' = \lambda \frac{c - v}{c}, \quad (4.1.6)$$

$$f' = f \frac{c}{c - v}. \quad (4.1.7)$$

Celou výše vyloženou problematiku můžeme shrnout do rovností (4.1.8) a (4.1.9), kde znaménko „+“ odpovídá vzdalujícímu se zdroji vlnění a „-“ zdroji přibližujícímu se:

$$\lambda' = \lambda \frac{c \pm v}{c}, \quad (4.1.8)$$

$$f' = f \frac{c}{c \pm v}. \quad (4.1.9)$$

Dopplerův jev a pohybující se pozorovatel

Vztahy pro Dopplerův jev s pohybujícím se pozorovatelem lze odvodit na základě tožných úvah jako v předchozím případě.

Mějme statický zdroj, který generuje vlnění o vlnové délce λ a frekvenci f . Vlnění se šíří prostředím konstantní rychlostí c . Dále uvažujme pozorovatele, jenž se pohybuje směrem od zdroje rychlostí u . Zdroj vlnění pracuje s periodou T , pozorovatel ovšem přijme dvě po sobě jdoucí vlny s časovým odstupem T' , neboť mění-li Dopplerův jev frekvenci, mění zákonitě také periodu. Během této doby se vzdálí pozorovatel od

zdroje vlnění o vzdálenost uT' . Vlnová délka z jeho perspektivy λ' se tak bude řídit vztahem

$$\lambda' = \lambda + uT', \quad (4.1.10)$$

který s využitím rovnosti (4.1.1) můžeme upravit na tvar popisující změnu vlnové délky pro vzdalujícího se pozorovatele:

$$\lambda' = \lambda \frac{c}{c - u}. \quad (4.1.11)$$

Frekvence je pak charakterizována předpisem

$$f' = f \frac{c - u}{c}. \quad (4.1.12)$$

Obdobným, blíže již nekomentovaným postupem vyvodíme vztahy (4.1.13) a (4.1.14), které popisují změnu vlnové délky a frekvence pro přibližujícího se pozorovatele:

$$\lambda' = \lambda \frac{c}{c + u}, \quad (4.1.13)$$

$$f' = f \frac{c + u}{c}. \quad (4.1.14)$$

Získané výsledky lze sumarizovat do rovností (4.1.15) a (4.1.16). Na rozdíl od předešlého závěru zde však má případ vzdalujícího se pozorovatele znaménko „-“ a přibližujícího se „+“:

$$\lambda' = \lambda \frac{c}{c \mp u}, \quad (4.1.15)$$

$$f' = f \frac{c \mp u}{c}. \quad (4.1.16)$$

Dopplerův jev a pohybující se pozorovatel i zdroj vlnění

Věnujme se v krátkosti situaci, kdy se pohybuje jak pozorovatel, tak zdroj vlnění.

Analogickými úvahami jako v předešlých částech této podkapitoly můžeme provádět korekce vlnové délky pomocí členů vT a uT' . S využitím vztahu (4.1.1) jsme pak vždy

schopni vyjádřit vlnovou délku a frekvenci registrovanou pozorovatelem. Prakticky rozlišujeme čtyři případy, ke kterým může během pohybu pozorovatele i zdroje vlnění dojít. Výsledky pro tyto případy jsou uvedeny v tabulce 4.1.1, kde λ je skutečná vlnová délka, f skutečná frekvence, c rychlost vlnění, u rychlost pozorovatele a v rychlost zdroje vlnění.

pohybový stav	vlnová délka vnímaná pozorovatelem	frekvence vnímaná pozorovatelem
vzdalující se zdroj vlnění, vzdalující se pozorovatel	$\lambda' = \lambda \frac{c + v}{c - u}$	$f' = f \frac{c - u}{c + v}$
vzdalující se zdroj vlnění, přibližující se pozorovatel	$\lambda' = \lambda \frac{c + v}{c + u}$	$f' = f \frac{c + u}{c + v}$
přibližující se zdroj vlnění, vzdalující se pozorovatel	$\lambda' = \lambda \frac{c - v}{c - u}$	$f' = f \frac{c - u}{c - v}$
přibližující se zdroj vlnění, přibližující se pozorovatel	$\lambda' = \lambda \frac{c - v}{c + u}$	$f' = f \frac{c + u}{c - v}$

Tabulka 4.1.1

Všechny možnosti obsažené v tabulce 4.1.1 lze podobně jako v předchozích případech sjednotit do vztahů

$$\lambda' = \lambda \frac{c \pm v}{c \mp u}, \quad (4.1.17)$$

$$f' = f \frac{c \mp u}{c \pm v}. \quad (4.1.18)$$

Příslušná znaménka určíme dle pravidel, jež byla uvedena výše. Všimněme si, že při fixaci pozorovatele či zdroje vlnění, tj. při dosažení příslušné nulové rychlosti, přechází rovnosti (4.1.17) a (4.1.18) ve vztahy (4.1.8), (4.1.9), (4.1.15) a (4.1.16).

4.2 Základy spektroskopie

Pro pochopení funkce Dopplerova jevu v astronomii je nutné se nejprve seznámit s některými poznatky ze spektroskopie. V této podkapitole tak bude v krátkosti učiněno.

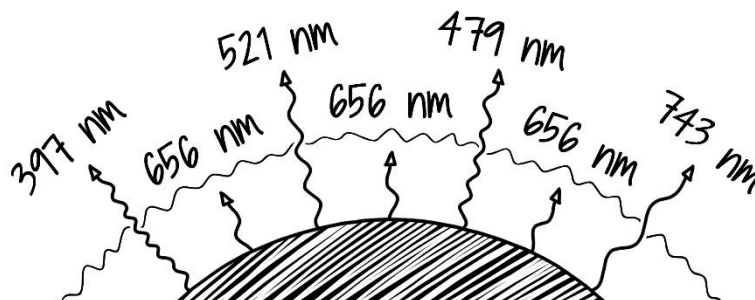
Naprostá většina světla emitovaná Sluncem a jinými hvězdami pochází z tzv. fotosféry. V případě Slunce vychází z této části hvězdy až 99 % veškerého světla. [38] Spektrum fotosféry je spojitě. Rozložíme-li ovšem hvězdou vyzářené světlo, shledáme, že spektrum je přerušeno několika temnými čarami, které nazýváme čarami absorpčními. [25] Studujme nyní blíže absorpční čaru H α o vlnové délce 656 nm (viz obrázek 4.2.1) a vyvodíme tak příčinu vzniku absorpčních čar jako takových ve spektrech hvězd. [39]

Světlo vyzářené fotosférou prochází na své cestě k pozorovateli mimo jiné ještě další, chladnější a méně hustou částí hvězdy, kterou nazýváme chromosféra. Fotony jisté vlnové délky přicházející do této oblasti jsou pohlceny atomy vodíku a jejich energie je spotřebována na přeskok elektronu na vyšší energetickou hladinu. Ostatní, vodíkovými atomy nedotčené fotony, úspěšně opouštějí hvězdu. [25] Tuto situaci ilustruje obrázek 4.2.2.

Z tohoto důvodu nalezneme ve spektrech hvězd temná místa, která odpovídají fotům, jež pohltila chromosféra hvězdy.



Obrázek 4.2.1



Obrázek 4.2.2

Excitované stavy, do kterých se atomy vodíku díky fotonům z fotosféry dostávají, jsou dlouhodobě nestabilní. Literatura deklaruje, že jejich životnost se pohybuje okolo hodnoty 10 ns. [40] Elektrony tedy rychle přeskakují zpět na základní energetickou hladinu a při této příležitosti uvolňují nové fotony, jež mají totožnou vlnovou délku jako fotony předtím pohlcené. Nabízí se otázka, proč tyto fotony nevyplní temné oblasti ve spektru hvězdy. Odpovědí je fakt, že pozorovatel přijímá pouze poloviční množství takto vyzářených fotonů, neboť existuje 50% pravděpodobnost, že foton bude emitován do opačného poloprostoru, než v kterém se nachází pozorovatel. [25] Absorpční čára tedy zcela nezanikne a lze ji ve spektru hvězdy spatřit.

V hvězdném spektru nalezneme řadu absorpčních čar. Čára H α je však pro pozemské pozorování nejvhodnější. Na závěr této podkapitoly vysvětlíme, proč tomu tak je.

Připomeňme nejprve Bohrovův vztah, který popisuje kvantum energie nutné k migraci elektronu v atomu vodíku z n -té energetické hladiny na vyšší m -tou:

$$E_{n \rightarrow m} = E_m - E_n = 13,6 \text{ eV} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (4.2.1)$$

kde E_m je energie elektronu na m -té energetické hladině a E_n energie elektronu na n -té energetické hladině. Má-li elektron přeskočit na vyšší energetickou hladinu, je nutné, aby atom vodíku přijmul foton disponující touto energií. Pro energii takového fotonu platí Einsteinův vztah

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}, \quad (4.2.2)$$

kde h je Planckova konstanta, f frekvence fotonu, λ jeho vlnová délka a c rychlost světla ve vakuu. Vyjádříme-li z rovnosti vztahů (4.2.1) a (4.2.2) vlnovou délku, dostáváme předpis charakterizující vlnovou délku fotonu, který zajišťuje přeskok elektronu z n -té energetické hladiny na vyšší m -tou:

$$\lambda_{n \rightarrow m} = \frac{hc}{13,6 \text{ eV}} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)^{-1}. \quad (4.2.3)$$

Doplňme jen, že pro korektní kalkulaci vlnové délky je nutné provést převod elektronvoltů na jouly.

Vzhledem ke krátkým životnostem excitovaných stavů atomu vodíku je nejpravděpodobnějším stavem stav základní. [40] Z tohoto důvodu bychom očekávali, že nejsnáze pozorovatelné budou absorpční čáry vznikající při migraci elektronu ze základního stavu ($n = 1$). Přesvědčme se však, že takové absorpční spektrum není pro pozemskou spektroskopii vhodné:

$$\lambda_{1 \rightarrow 2} = \frac{hc}{13,6 \text{ eV}} \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right)^{-1} \doteq 122 \text{ nm}, \quad (4.2.4)$$

$$\lambda_{1 \rightarrow \infty} = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{hc}{13,6 \text{ eV}} \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{m^2} \right)^{-1} \doteq 91 \text{ nm}. \quad (4.2.5)$$

Vlnové délky $\lambda_{1 \rightarrow 2}$ a $\lambda_{1 \rightarrow \infty}$ charakterizují hraniční čáry spektra. Všechny ostatní absorpční čáry leží v intervalu vymezeném těmito hodnotami. Jelikož je ozonová vrstva pro ultrafialové záření, do jehož oboru spadají i tyto vlnové délky, neprůhledná, není možné takto vzniklé absorpční čáry ze Země pozorovat. [41]

Mnohem lepších výsledku docílíme, analyzujeme-li absorpční čáry vznikající během přeskoků elektronu z druhé energetické hladiny ($n = 2$) na hladiny vyšší:

$$\lambda_{2 \rightarrow 3} = \frac{hc}{13,6 \text{ eV}} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right)^{-1} \doteq 656 \text{ nm}, \quad (4.2.6)$$

$$\lambda_{2 \rightarrow \infty} = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{hc}{13,6 \text{ eV}} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right)^{-1} \doteq 365 \text{ nm}. \quad (4.2.7)$$

Hraniční čáru o vlnové délce 656 nm nazýváme $H\alpha$ a z hlediska pozemské spektroskopie se jedná o nejlépe pozorovatelnou absorpční čáru hvězdného spektra vůbec. Ostatní čáry intervalu přísluší modré nebo ultrafialové části spektra. Zemská atmosféra velice dobře rozptyluje světlo modré barvy, což do jisté míry znemožňuje jejich registraci.

4.3 Astrofyzika a Dopplerův jev

V následující podkapitole bude čtenáři vysvětlen modus operandi Dopplerova jevu v astrofyzice. Vyložíme především problematiku modrého a červeného posuvu, která je stěžejní pro astronomickou praxi využívající Dopplerův jev.



Obrázek 4.3.1

Výše jsme na příkladu policejního vozu osvětlili princip vzniku Dopplerova jevu pro vlnění ve formě zvuku. Ke změně frekvence vlnění v souvislosti s pohybem zdroje či pozorovatele ovšem dochází u všech druhů vlnění. Tohoto faktu využívají astronomové a analyzují elektromagnetické záření různých objektů vesmíru. Na základě Dopplerova jevu jsou pak s to určit řadu vlastností týkajících se těchto těles.

Laboratorní analýzou lze vyčíslit přesné hodnoty vlnových délek absorpčních čar způsobených přítomností daného prvku v okolí zdroje záření. Astronomové tedy mají k dispozici jakési „klidové“ vlnové délky takto vznikajících absorpčních čar. Spektra vesmírných objektů však vykazují čáry, jejichž vlnové délky neodpovídají laboratorně naměřeným hodnotám. Na vině je Dopplerův jev, který způsobuje translaci vlnových délek. Velikost posuvu z můžeme kvantifikovat výrazem

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda}, \quad (4.3.1)$$

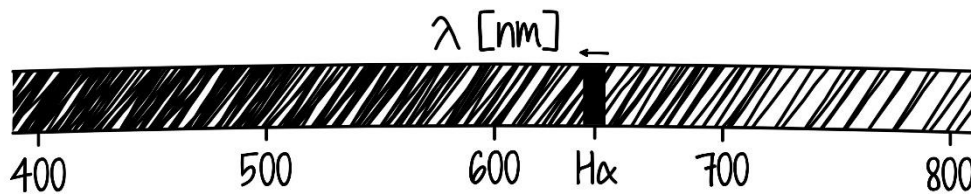
kde λ je laboratorně naměřená vlnová délka zvolené absorpční čáry a λ' vlnová délka skutečně pozorovaná. [42]

U vzdalujícího se objektu registrujeme tzv. červený posuv (viz obrázek 4.3.1). Jedná se o situaci, kdy Dopplerův jev zvětšil vlnovou délku absorpční čáry a posunul ji blíže k červené části spektra. Posuv z , definovaný předpisem (4.3.1), v tomto případě nabývá kladných hodnot. Chceme-li zjistit velikost rychlosti v , s jakou se studovaný objekt vzdaluje, upravíme rovnici (4.1.3) s využitím vztahu (4.3.1) na tvar

$$v = cz, \quad (4.3.2)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu.

Přibližující se objekt je charakterizován absorpční čarou, která je posunuta blíže k modré části spektra, jak ukazuje obrázek 4.3.2 níže. Hovoříme o tzv. modrém posuvu



Obrázek 4.3.2

se zápornou hodnotou z . Podobně jako v předešlém případě i zde lze s využitím patřičných vztahů odvodit předpis vedoucí k výpočtu velikosti rychlosti, s níž se zkoumaný objekt přibližuje:

$$v = -cz. \quad (4.3.3)$$

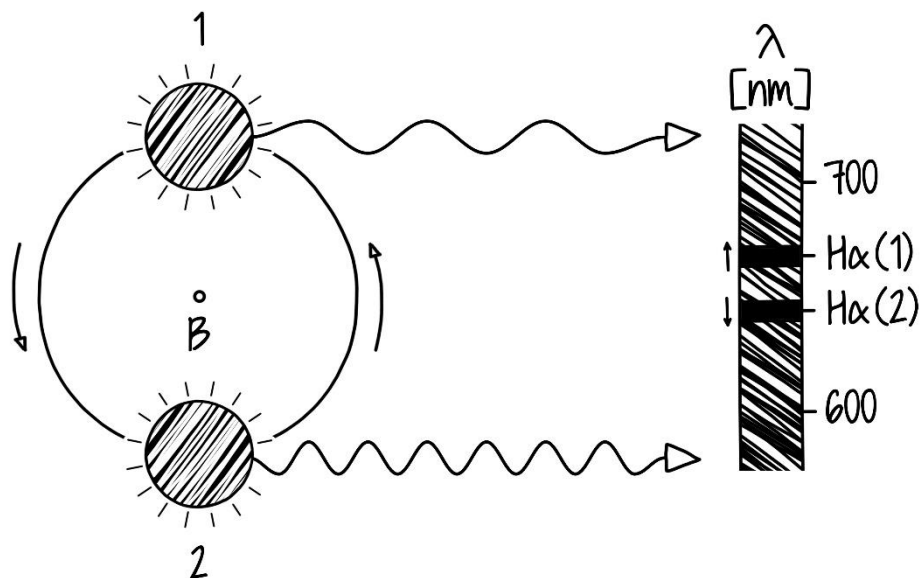
Pro výše uvedené kalkulace je nutné mít na paměti, že na základě Dopplerova jevu určíme pouze radiální složku rychlosti objektu (vektor rychlosti leží na spojnici pozorovatel – objekt). Provádíme-li výpočty z dat získaných na Zemi, je nutné brát také v potaz pohyb Země vůči zemské ose a Slunci a provést náležité korekce. [42] Na závěr dodejme, že vztahy (4.3.2) a (4.3.3) nezohledňují důsledky speciální teorie relativity a hodí se tak pouze ke stanovení rychlostí zanedbatelných vůči rychlosti světla.

4.4 Aplikace Dopplerova jevu v astrofyzice

Přejdeme nyní k aplikaci Dopplerova jevu na poli astrofyziky a seznáme v krátkosti čtenáře s konkrétními případy, v nichž hraje Dopplerův jev významnou roli.

Některé hvězdy spolu gravitačně interagují a obíhají kolem společného bodu – barycentra. Fyzikální podstata barycentra byla popsána vztahem (2.1.1). Tvoří-li rotující systém pouze dvě stálice, nazýváme toto seskupení dvojhvězdou. Jen malý počet dvojhvězd jsme s to odhalit vizuálně, neboť většina z nich se i v nejsilnějších dalekohledech jeví jako jediný zářící bod. [43] Dopplerův jev však umožňuje nepřímo detekovat i tyto opticky drobné dvojhvězdné systémy.

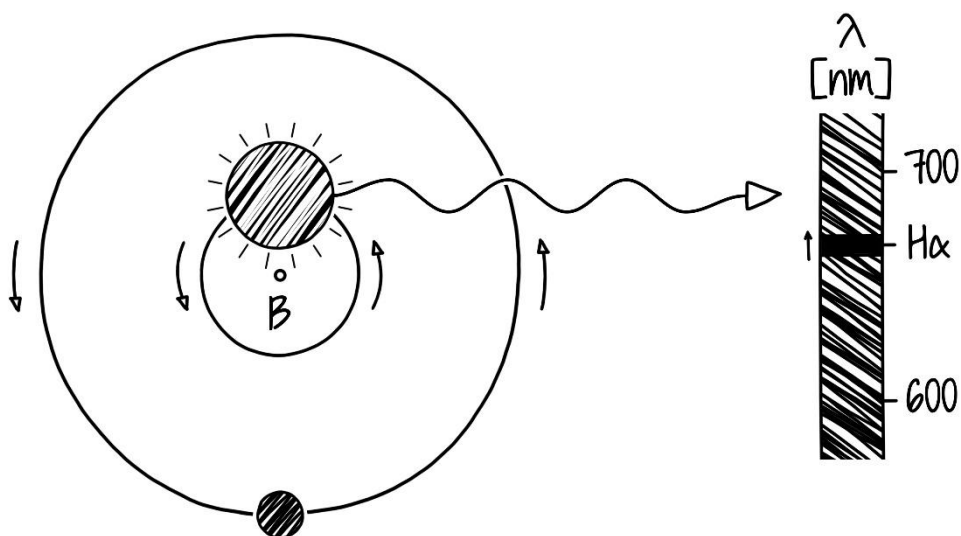
Na obrázku 4.4.1 níže figuruje dvojhvězda, jejíž komponenty 1 a 2 obíhají proti směru hodinových ručiček kolem společného barycentra. Hvězda 1 se od pozorovatele, který sleduje spektrum tohoto dvojhvězdného systému, vzdaluje. Její absorpční čára $H\alpha$ je



Obrázek 4.4.1

tak v důsledku Dopplerova jevu posunuta k červené části spektra. Oproti tomu hvězda 2 se k pozorovateli přibližuje, což souvisí s modrým posuvem její $H\alpha$ čáry. Detekujeme-li tedy ve spektru „hvězdy“ rozdvojené absorpční čáry, máme silný důvod se domnívat, že ve skutečnosti pozorujeme dvě gravitačně vázané hvězdy – spektroskopické dvojhvězdy.

Dopplerův jev lze také využít k hledání planet mimo Sluneční soustavu. Takovým planetám říkáme exoplanety. Necelých 20 % všech nalezených exoplanet bylo ke květnu 2017 objeveno touto metodou. [44]

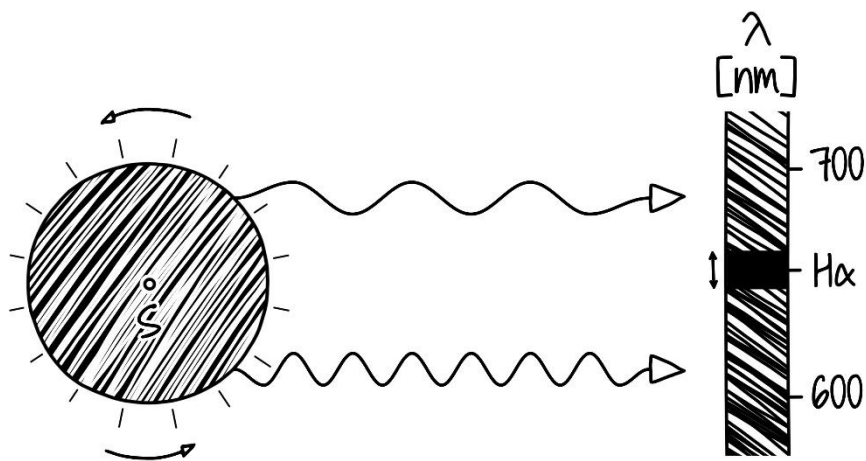


Obrázek 4.4.2

Podobně jako v předešlém případě i hvězda, jež gravitačně váže planetu, koná otáčivý pohyb okolo barycentra (viz obrázek 4.4.2 výše). Hmotu takového systému je ovšem rozmístěna značně nerovnoměrně, a tak se barycentrum nachází v blízkosti hvězdy, nebo dokonce uvnitř hvězdy samotné. V obou případech však planeta narušuje lokální statický stav stálice a s hvězdou v průběhu svého oběhu „cloumá“. To se projevuje periodickým posuvem absorpčních čar ve spektru hvězdy, jak naznačuje obrázek 4.4.2.

V neposlední řadě se Dopplerův jev využívá ke stanovení rychlosti rotace hvězdy kolem své osy. Z obrázku 4.4.3 je patrné, že část povrchu hvězdy se během rotace vůči pozorovateli přibližuje a část vzdaluje. Ve spektru stálice tak nalezneme stopy červeného a modrého posuvu, který způsobuje charakteristické rozšíření absorpčních čar. Vypočítáme-li následně na základě takto získaných dat rychlost rotace hvězdy, je nutné ji brát pouze jako dolní mez skutečné hodnoty, neboť neznáme orientaci osy rotace v prostoru.

Na závěr osvětlíme již v úvodu kapitoly předeslaný fakt, že prostřednictvím Dopplerova jevu byla potvrzena expanze vesmíru. Naprostá většina objektů hlubokého vesmíru totiž vykazuje červený posuv. Výjimku tvoří pouze některé hvězdy a velmi blízké galaxie, jež gravitačně interagují s galaxií naší. [42]



Obrázek 4.4.3

4.5 Dopplerův jev – plakát

Plakát věnující se tématice Dopplerova jevu tvoří šest částí. Jedná se tak o nejstrukturovanější plakát. Dílčí pasáže si však zachovávají přirozenou logickou posloupnost. Divák se nejprve seznamuje s principem Dopplerova jevu obecně a následně plynule přechází k jeho aplikaci v astronomii. Celá prezentace problematiky je tedy komplexní a srozumitelná.

Většina názvů jednotlivých kapitol postrádá strohý informativní charakter. Studenta střední školy by takto koncipované titulky měly upoutat a vzbudit v něm zájem o bližší studium předkládaného materiálu.

Výklad vzniku Dopplerova jevu je zasazen do běžné, všem známé situace – průjezdu policejního vozu se spuštěnou sirénou. Je tak zachována názornost a srozumitelnost. Postavy figurující na obrázcích mají jména, bylo upuštěno od číselných označení. To umožňuje do tématu snadněji proniknout a uchopit ho.

Plakát záměrně nevysvětluje příčinu neprůhlednosti chromosféry pro záření některých vlnových délek. Problematika Dopplerova jevu je natolik komplikovaná, že výklad zabývající se přeskoky elektronů v atomu vodíku by mohl narušit plynulost sdělení, kterou autor považuje za stěžejní.

Ve spektrech je z důvodu přehlednosti znázorněna vždy pouze absorpční čára $H\alpha$. Diferenciaci vlnových délek naznačuje hustota šrafování.

Všechny tři části zabývající se konkrétními případy využití Dopplerova jevu v astronomii jsou doplněny obrázky se spektry, které danou situaci charakterizují. Ty poskytují studentovi značně zjednodušený, nicméně klíčový pohled na astronomickou praxi.

Závěrečná kapitola seznamuje diváka s některými fakty, jež se k Dopplerovu jevu vztahují. Informace o kolizi Mléčné dráhy s Galaxií v Andromedě by měla v očích studentů významnost Dopplerova jevu na poli astronomie zdůraznit a vybízí k hlubšímu zamyšlení.

5 Tvorba plakátů

Na následujících řádcích autor obeznámí čtenáře s okolnostmi souvisejícími se vznikem plakátů. V krátkosti tak bude nastíněn především proces jejich tvorby a hlavní rysy, jimiž se plakáty vyznačují.

Jednotlivé ilustrace vznikly v programu Adobe Photoshop CS6, jenž je v rámci Univerzity Hradec Králové volně k dispozici na univerzitních počítačích. Naprostá většina obrázků byla nakreslena ručně s využitím grafického tabletu. Autor se tak pokusil vyvarovat stereotypnosti, kterou „strojově“ konstruované ilustrace často vykazují.

Textový doprovod je sázen fontem Shadows Into Light Two. Velikost písma 12 bodů zajišťuje uspokojivou čitelnost a zároveň poskytuje prostor pro dostatečně detailní vyložení problematiky. Neobvyklý řez písma do jisté míry opět bourá zmíněnou jednotvárnost běžných studijních materiálů. Dodejme, že díky licenci Open Font License je font volně přístupný a nekomerčně dále distribuovatelný.

Závěrečná kompozice obrázků spolu s textem probíhala v témže, výše uvedeném programu, a to ve formátu A2 s rozlišením 300 dpi. Autor zvolil černé pozadí symbolizující vesmírnou tematiku. Bílé ilustrace a text jsou tak dobře čitelné. Výsledná barevná jednoduchost maximalizuje divákovu soustředěnost na obsah plakátu.

Plakáty mají kvalitativní, popularizační povahu. Každý z nich byl konstruován s důrazem na názornost a atraktivitu. Text tvoří věty či krátká souvětí, jež absentují výrazy, které by mohly být pro studenta těžce uchopitelné. Za tímto účelem jsou volena vhodná synonyma. V plakátech vždy nalezneme přímé důsledky vyloženého jevu nebo jeho praktické využití. Student je tak přesvědčen o smysluplnosti předkládaného učiva. Atraktivitu, která spočívá především v neobvyklém pojetí studijního materiálu, dále posilují zajímavé rozšiřující informace, jež text obsahuje.

Čtivost textu lze verifikovat nejrůznějšími metodami. Pro slovenskou, potažmo českou literaturu, vznikl z tohoto důvodu tzv. Mistríkův vzorec. [45] Textový doprovod plakátů byl s využitím zmíněného vztahu analyzován. Na pětistupňové škále skóroval každý z plakátů minimálně na druhém nejlepším místě, které je definováno jako „*texty průměrně obtížné, lehce srozumitelné, dají se číst plynně*“. [45]

Závěr

Mezi primární cíle diplomové práce patřil detailní rozbor výuky astrofyziky na středních školách a tvorba podpůrných studijních materiálů. Za tímto účelem byla provedena recenze gymnaziální učebnice astrofyziky z nakladatelství Prometheus a dotazníkové šetření o 229 respondentech. Vyhotovená analýza pak měla poskytnout pádné argumenty k tvorbě popularizačně koncipovaných plakátů.

Hlubší studium výše uvedené učebnice i výsledky šetření potvrdily autorovu domněnku, že situace související s výukou astrofyziky na středních školách není vyhovující. První i druhé vydání učebnice obsahuje chyby, absentuje důsledné vyjadřování a je tematicky nevyvážené. Přestože studenti projevují o astrofyziku větší zájem než o jiné fyzikální disciplíny, není vyučovací proces dle jejich názoru vhodně realizován. Studenti se nechávají slyšet, že během výuky pocítují časovou tíseň a postrádají alternativní studijní materiály. Výklad absentuje názornost a přehlednost. Cíl práce byl v tomto ohledu splněn a hypotéza ověřena. Poznamenejme ovšem, že odpovědi mladších respondentů jsou nejméně kritické, a tak máme důvod se domnívat, že se situace zlepšuje.

Autor zpracoval formou plakátů tři astrofyzikální témata, jež zvolil dle vlastního uvážení. Jednalo se o slapové jevy, Hertzsprungův-Russellův diagram a Dopplerův jev. Během tvorby byl kladen důraz na názornost plakátů a jejich potenciál zaujmout mladého diváka. Detailní pohled na zpracovanou problematiku skrze středoškolské znalosti nabídla druhá, obsáhlejší část diplomové práce. I z tohoto hlediska se podařilo dosáhnout stanoveného cíle, totiž vytvořit vhodné, popularizačně stylizované, alternativní studijní materiály. O jejich kvalitě však mnoho konstatovat nemůžeme, neboť nebyly doposud začleněny do výuky. Připomeňme jen výše uvedený fakt, že textový doprovod plakátů skóroval v Mistríkově analýze minimálně chvalitebně.

V rámci hlubšího průzkumu by bylo vhodné lépe prostudovat výuku astrofyziky na středních odborných učilištích. Vzhledem k tomu, že se nepodařilo oslovit dostatečný počet absolventů učilišť, postrádá diplomová práce relevantní závěr pro tuto skupinu. Za účelem ověření didaktické vybavenosti plakátů by bylo dále na místě realizovat podobné dotazníkové šetření po začlenění plakátů do vyučovacího procesu.

Seznam použité literatury

- [1] *Rámcový vzdělávací program pro gymnázia*. In: Národní ústav pro vzdělávání [online]. [cit. 29-06-2017]. Dostupné z: http://www.nuv.cz/file/159_1_1/
- [2] FRANC, Tomáš. *Vybrané gravitační jevy ve vesmíru a jejich přiblížení středoškolským*. Praha: Univerzita Karlova v Praze. 2014.
- [3] *Gravitační vlny byly konečně polapeny*. In: Aldebaran [online]. [cit. 29-06-2017]. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2016_06_gra.php
- [4] REES, Martin. *Náš neobyčejný vesmír*. Praha: Dokořán. 2002. ISBN 80-86569-17-9.
- [5] MACHÁČEK, Martin. *Fyzika pro gymnázia - Astrofyzika*. Praha: Prometheus. 1998. ISBN 80-7196-091-8.
- [6] MACHÁČEK, Martin. *Fyzika pro gymnázia - Astrofyzika*. Praha: Prometheus. 2004. ISBN 80-7196-277-5.
- [7] MACHÁČEK, Martin. *Fyzika pro gymnázia - Astrofyzika*. Praha: Prometheus. 2008. ISBN 978-80-7196-376-9.
- [8] ŠTEFL, Vladimír. *Postrecenze učebnice „Fyzika pro gymnázia – Astrofyzika“*. Plzeň: PF ZÚ Plzeň. 2000. ISSN 1211-1511.
- [9] ŠTEFL, Vladimír. *Komentář k přepracovanému vydání učebnice astrofyziky pro gymnázia*. In: Masarykova univerzita [online]. [cit. 29-06-2017]. Dostupné z: <https://educoland.muni.cz/down-91/>
- [10] COX, Lauren. *Who Invented the Telescope?* In: Space [online]. [cit. 29-06-2017]. Dostupné z: <https://www.space.com/21950-who-invented-the-telescope.html>
- [11] *Galileo's Telescope*. In: Univerzita Rice [online]. [cit. 29-06-2017]. Dostupné z: http://galileo.rice.edu/bio/narrative_6.html
- [12] KEKULE, Martina a Vojtěch ŽÁK. *Mají dívky a chlapci rozdílné postoje k fyzice a zájem o ni? Co s tím?* In: Masarykova univerzita [online]. [cit. 29-06-2017]. Dostupné z: http://www.ped.muni.cz/pedor/archiv/2009/pedor09_3_majidivkyachlapci-rozdilnepostoje_kekulezak.pdf

- [13] REICHL, Jaroslav. *První a druhá kosmická rychlost*. In: Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 14-03-2016]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/70-prvni-a-druha-kosmicka-rychlost>
- [14] PLAIT, Phil. *Tides: Crash Course Astronomy #8*. In: YouTube [online]. [cit. 14-03-2016]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=KIWpFLfLFBI>
- [15] REICHL, Jaroslav. *Slapové síly*. In: Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 14-03-2016]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/56-slapove-sily>
- [16] TADOKORO, Masaru. *A Study of the Local Group by Use of the Virial Theorem*. In: Kjótská univerzita [online]. [cit. 16-05-2017]. Dostupné z: <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1968PASJ...20..230T>
- [17] ČEŠÍK, Jan. *Cesta ze Země na planetu Mars*. Hradec Králové: Univerzita Hradec Králové. 2014.
- [18] VYSKOČIL, František. *Jak roste nehet*. In: Přírodovědci [online]. [cit. 14-03-2016]. Dostupné z: <https://www.prirodovedci.cz/zeptejte-se-prirodovedcu/452>
- [19] RŮKL, Antonín. *Atlas Měsíce*. Praha: Aventinum. 2012. ISBN 978-80-7151-269-1.
- [20] *Jupiter: Moons*. In: Solar System Exploration [online]. [cit. 14-03-2016]. Dostupné z: <http://solarsystem.nasa.gov/planets/jupiter/moons>
- [21] *Saturn: Moons*. In: Solar System Exploration [online]. [cit. 14-03-2016]. Dostupné z: <http://solarsystem.nasa.gov/planets/saturn/moons>
- [22] *Vesmír*. Londýn: Dorling Kindersley. 2005. ISBN 80-242-1668-X.
- [23] Voyager. In: NASA [online]. [cit. 14-03-2016]. Dostupné z: <http://voyager.jpl.nasa.gov/gallery/images/jupiter/io.gif>
- [24] HONZÍK, Lumír. *Minislovníček: Magnituda*. In: Hvězdárna Plzeň [online]. [cit. 08-02-2017]. Dostupné z: <http://www.hvezdarnaplzen.cz/2011/06/13/minislovnicek-magnituda/>
- [25] ROZEHNAL, Jakub. *Hvězdy*. In: Astronomický kurz [online]. [cit. 07-02-2017]. Dostupné z: http://www.observatory.cz/download/ak1/AK_skripta.pdf

- [26] SOPER, Davison. *Luminosity and how far away things are*. In: Univerzita Oregon [online]. [cit. 07-02-2017]. Dostupné z: <http://pages.uoregon.edu/soper/Light/luminosity.html>
- [27] REICHL, Jaroslav. *Spektrum hvězd a barva hvězd*. In: Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 07-02-2017]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1073-spektrum-hvezd-a-barva-hvezd>
- [28] *Hnědí trpaslíci*. In: Aldebaran [online]. [cit. 07-02-2017]. Dostupné z: http://aldebaran.cz/astrofyzika/hvezdy/stars_dwa.html
- [29] NAVE, Rod. *Neutron Degeneracy*. In: Univerzita v Georgii [online]. [cit. 07-02-2017]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Astro/pulsar.html>
- [30] KUBALA, Petr. *Jak náš časopis ke svému jménu přišel*. In: Gliese [online]. [cit. 07-02-2017]. Dostupné z: http://www.astro.cz/_data/files/2008/03/11/Gliese_1_2008.pdf
- [31] REDD, Nola. *How Old is the Universe?* In: Space [online]. [cit. 07-02-2017]. Dostupné z: <http://www.space.com/24054-how-old-is-the-universe.html>
- [32] REDD, Nola. *Red Dwarfs: The Most Common and Longest-Lived Stars*. In: Space [online]. [cit. 07-02-2017]. Dostupné z: <http://www.space.com/23772-red-dwarf-stars.html>
- [33] *Crab Nebula exploded in 1054*. In: Astronomy Magazine [online]. [cit. 07-02-2017]. Dostupné z: <http://www.astronomy.com/news/2007/06/crab-nebula-exploded-in-1054>
- [34] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: Vutium. 2000. ISBN 80-214-1868-0.
- [35] *Dopplerův jev a jeho využití v medicíně*. In: Masarykova univerzita [online]. [cit. 05-05-2017]. Dostupné z: http://www.med.muni.cz/patfyz/practic/prezentace/doppler_MM.pdf
- [36] MORAVCOVÁ, Petra. *Ultrazvuk v orientaci a komunikaci zvířat*. In: Masarykova univerzita [online]. [cit. 05-05-2017]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/184414/prif_b/Bakalarska_prace.pdf

- [37] *Redshift and Hubble's Law*. In: StarChild [online]. [cit. 05-05-2017]. Dostupné z: <https://starchild.gsfc.nasa.gov/docs/StarChild/questions/redshift.html>
- [38] SWAMY, Krishna. *Astrophysics: A Modern Perspective*. Nové Dillí: New Age International (P) Limited, Publishers. 2003. ISBN 81-224-0660-2.
- [39] *SOHO Glossary*. In: NASA [online]. [cit. 22-05-2017]. Dostupné z: <https://soho.nascom.nasa.gov/classroom/glossary.html>
- [40] BOBASHEV, Sergey. *Measurement of Lifetimes of Excited States of the Hydrogen Atom*. In: Soviet Physics JETP [online]. [cit. 22-05-2017]. Dostupné z: http://jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/e_021_01_0026.pdf
- [41] MIMS, Forrest. *Tracking the Ozone Layer*. In: Science Probe 2 [online]. [cit. 22-05-2017]. Dostupné z: <http://www.leaderu.com/science/ozone.html>
- [42] GRYGAR, Jiří. *Rudý posuv v astronomii*. In: Pokroky matematiky, fyziky a astronomie 18 [online]. [cit. 22-05-2017]. Dostupné z: http://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/138297/PokrokyMFA_18-1973-1_4.pdf
- [43] HARMANEC, Petr. *Dvojhvězdy*. In: Astronomický ústav Univerzity Karlovy [online]. [cit. 22-05-2017]. Dostupné z: <http://astro.mff.cuni.cz/vyuka/AST019/ast019.pdf>
- [44] *NASA Exoplanet Archive*. In: NASA [online]. [cit. 22-05-2017]. Dostupné z: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/TblView/nph-tblView?app=ExoTbls&config=planets>
- [45] PRCHALOVÁ, Dana. *Zkoumání čtivosti – srovnání způsobů měření obtížnosti textu*. In: Univerzita Karlova v Praze [online]. [cit. 30-06-2017]. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/download/130114061>

Přílohy

Příloha 1

Popularizace vybraných astrofyzikálních jevů

Zdar!

Jmenuju se Jan a mým velkým koníčkem je astronomie. Krom toho, že aktivně pozoruju dění na obloze a píšu o tom krátké reporty na blog (zednajena.blogspot.cz), dávám letos do kupy taky diplomku. A to je důvod, proč se na Vás obracím s tímhle dotazníkem.

Můj cíl je prošetřit, jak na tom jsou absolventi středních škol s astrofyzikou a jaký k ní mají vztah. Na základě výsledků budu pak zpracovávat plakáty, které by měly výuku astrofyziky podpořit.

Díky za Váš čas a pomoc.

Jan

1. Pohlaví:

- a) *muž*
- b) *žena*

2. Věk:

- a) *18 až 20 let*
- b) *21 až 25 let*
- c) *26 a více let*

3. Střední škola:

- a) *střední odborné učiliště*
- b) *střední odborná škola*
- c) *gymnázium*

- 4. S odstupem času se domnívám, že astrofyzice bylo na střední škole věnováno dostatečné množství času.**

souhlasím – spíše souhlasím – nevím – spíše nesouhlasím – nesouhlasím

- 5. Během výuky astrofyziky jsme pracovali s rozličnými studijními materiály.**

souhlasím – spíše souhlasím – nevím – spíše nesouhlasím – nesouhlasím

- 6. Materiály (učebnice, prezentace, animace, internetové zdroje apod.), z kterých jsme při výuce astrofyziky čerpali, byly přehledné a názorné.**

souhlasím – spíše souhlasím – nevím – spíše nesouhlasím – nesouhlasím

- 7. Souhlasím s názorem, že forma, kterou je učivo studentům předáváno, je stejně důležitá jako jeho obsah.**

souhlasím – spíše souhlasím – nevím – spíše nesouhlasím – nesouhlasím

- 8. Domnívám se, že výuka astrofyziky je stejně důležitá jako výuka ostatních fyzikálních disciplín.**

souhlasím – spíše souhlasím – nevím – spíše nesouhlasím – nesouhlasím

- 9. Slapové jevy jsou:**

- a) *Jevy způsobené gravitačním působením mezi dvěma tělesy.*
- b) *Jevy, které lze přímo pozorovat na Slunci a jiných hvězdách.*
- c) *Jevy, které formují vesmírný materiál do větších celků, tj. měsíců, planet apod.*
- d) *Nevím.*

- 10. Hertzsprungův-Russellův diagram je:**

- a) *Diagram popisující závislost frekvence elektromagnetického záření na teplotě zdroje.*
- b) *Diagram popisující závislost povrchové teploty hvězd na jejich zářivém výkonu.*
- c) *Diagram popisující závislost hmotnosti planety na frekvenci jejího oběhu kolem centrální hvězdy.*
- d) *Nevím.*

11. Kosmické rychlosti jsou:

- a) *Specifické rychlosti související s pohyby těles v gravitačních polích.*
- b) *Specifické rychlosti, kterými létají družice tak, aby nedošlo k jejich vzájemné kolizi.*
- c) *Maximální možné rychlosti, kterých lze dosáhnout na různých místech Sluneční soustavy.*
- d) *Nevím.*

12. Dopplerův jev je:

- a) *Jev, který vystihuje závislost frekvence vlnění na rychlosti zdroje vlnění.*
- b) *Jev, který zvyhodňuje tělesa zanedbatelných hmotností při pohybu vesmírem.*
- c) *Jev, který popisuje závislost rychlosti tělesa na jeho hmotnosti.*
- d) *Nevím.*

13. Gravitační manévr je:

- a) *Manévr, bez kterého by nebylo možné opustit gravitační pole Země.*
- b) *Manévr, který v kritických případech může zachránit posádku pohybující se na oběžné dráze Země.*
- c) *Manévr, který umožňuje urychlit těleso pomocí gravitační síly.*
- d) *Nevím.*

Pohlaví:

pohlaví	četnost
žena	160 70 %
muž	69 30 %

Tabulka P.2.1

Věk:

věk	četnost
18 až 20 let	50 22 %
21 až 25 let	143 62 %
26 a více let	36 16 %

Tabulka P.2.2

Střední škola:

střední škola	četnost
střední odborné učiliště	2 1 %
střední odborná škola	63 27 %
gymnázium	164 72 %

Tabulka P.2.3

**S odstupem času se domnívám, že astrofyzice bylo na střední škole
věnováno dostatečné množství času:**

odpověď	n	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7	n_8
A	11	8	3	4	5	2	0	1	10
	5 %	5 %	4 %	8 %	3 %	6 %	0 %	2 %	6 %
B	18	10	8	12	5	1	0	0	18
	8 %	6 %	12 %	24 %	3 %	3 %	0 %	0 %	11 %
C	35	25	10	10	19	6	0	8	27
	15 %	16 %	14 %	20 %	13 %	17 %	0 %	13 %	16 %
D	78	53	25	13	55	10	0	11	67
	34 %	33 %	36 %	26 %	38 %	28 %	0 %	17 %	41 %
E	87	64	23	11	59	17	2	43	42
	38 %	40 %	33 %	22 %	41 %	47 %	100 %	68 %	26 %

Tabulka P.2.4

- A souhlasím
- B spíše souhlasím
- C nevím
- D spíše nesouhlasím
- E nesouhlasím
- n absolutní četnost
- n_1 četnost žen
- n_2 četnost mužů
- n_3 četnost studentů ve věku 18 až 20 let
- n_4 četnost studentů ve věku 21 až 25 let
- n_5 četnost studentů ve věku 26 a více let
- n_6 četnost studentů středních odborných učilišť
- n_7 četnost studentů středních odborných škol
- n_8 četnost studentů gymnázií

**Během výuky astrofyziky jsme pracovali s rozličnými studijními
materiály:**

odpověď	n	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7	n_8
A	5 2 %	2 1 %	3 4 %	1 2 %	4 3 %	0 0 %	0 0 %	0 0 %	5 3 %
B	8 3 %	3 2 %	5 7 %	4 8 %	3 2 %	1 3 %	0 0 %	0 0 %	8 5 %
C	36 16 %	26 16 %	10 14 %	13 26 %	18 13 %	5 14 %	0 0 %	4 6 %	32 20 %
D	78 34 %	54 34 %	24 35 %	17 34 %	52 36 %	9 25 %	0 0 %	14 22 %	64 39 %
E	102 45 %	75 47 %	27 39 %	15 30 %	66 46 %	21 58 %	2 100 %	45 71 %	55 34 %

Tabulka P.2.5

- A souhlasím
- B spíše souhlasím
- C nevím
- D spíše nesouhlasím
- E nesouhlasím
- n absolutní četnost
- n_1 četnost žen
- n_2 četnost mužů
- n_3 četnost studentů ve věku 18 až 20 let
- n_4 četnost studentů ve věku 21 až 25 let
- n_5 četnost studentů ve věku 26 a více let
- n_6 četnost studentů středních odborných učilišť
- n_7 četnost studentů středních odborných škol
- n_8 četnost studentů gymnázií

**Materiály, z kterých jsme při výuce astrofyziky čerpali, byly
přehledné a názorné:**

odpověď	n	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7	n_8
A	8 4 %	4 3 %	4 6 %	3 6 %	4 3 %	1 3 %	0 0 %	3 5 %	5 3 %
B	46 20 %	29 18 %	17 25 %	17 34 %	25 17 %	4 11 %	0 0 %	8 13 %	38 23 %
C	56 24 %	37 23 %	19 28 %	12 24 %	38 27 %	6 17 %	0 0 %	5 8 %	51 31 %
D	52 23 %	41 26 %	11 16 %	6 12 %	37 26 %	9 25 %	0 0 %	17 27 %	35 21 %
E	67 29 %	49 31 %	18 26 %	12 24 %	39 27 %	16 44 %	2 100 %	30 48 %	35 21 %

Tabulka P.2.6

- A souhlasím
- B spíše souhlasím
- C nevím
- D spíše nesouhlasím
- E nesouhlasím
- n absolutní četnost
- n_1 četnost žen
- n_2 četnost mužů
- n_3 četnost studentů ve věku 18 až 20 let
- n_4 četnost studentů ve věku 21 až 25 let
- n_5 četnost studentů ve věku 26 a více let
- n_6 četnost studentů středních odborných učilišť
- n_7 četnost studentů středních odborných škol
- n_8 četnost studentů gymnázií

**Souhlasím s názorem, že forma, kterou je učivo studentům
předáváno, je stejně důležitá jako jeho obsah:**

odpověď	n	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7	n_8
A	138 60 %	101 63 %	37 54 %	32 64 %	87 61 %	19 53 %	0 0 %	31 49 %	107 65 %
B	57 25 %	38 24 %	19 28 %	12 24 %	34 24 %	11 31 %	1 50 %	15 24 %	41 25 %
C	18 8 %	10 6 %	8 12 %	3 6 %	11 8 %	4 11 %	0 0 %	7 11 %	11 7 %
D	9 4 %	6 4 %	3 4 %	1 2 %	7 5 %	1 3 %	0 0 %	4 6 %	5 3 %
E	7 3 %	5 3 %	2 3 %	2 4 %	4 3 %	1 3 %	1 50 %	6 10 %	0 0 %

Tabulka P.2.7

- A souhlasím
- B spíše souhlasím
- C nevím
- D spíše nesouhlasím
- E nesouhlasím
- n absolutní četnost
- n_1 četnost žen
- n_2 četnost mužů
- n_3 četnost studentů ve věku 18 až 20 let
- n_4 četnost studentů ve věku 21 až 25 let
- n_5 četnost studentů ve věku 26 a více let
- n_6 četnost studentů středních odborných učilišť
- n_7 četnost studentů středních odborných škol
- n_8 četnost studentů gymnázií

**Domnívám se, že výuka astrofyziky je stejně důležitá jako výuka
ostatních fyzikálních disciplín:**

odpověď	n	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7	n_8
A	66 29 %	42 21 %	24 28 %	18 32 %	37 20 %	11 27 %	0 0 %	16 24 %	50 23 %
B	73 32 %	51 26 %	22 26 %	12 21 %	51 27 %	10 24 %	1 50 %	19 28 %	53 25 %
C	61 27 %	47 24 %	14 16 %	14 25 %	39 21 %	8 20 %	1 50 %	19 28 %	41 19 %
D	22 9 %	53 27 %	25 29 %	13 23 %	55 29 %	10 24 %	0 0 %	11 16 %	67 31 %
E	7 3 %	6 3 %	1 1 %	0 0 %	5 3 %	2 5 %	0 0 %	3 4 %	4 2 %

Tabulka P.2.8

- A souhlasím
- B spíše souhlasím
- C nevím
- D spíše nesouhlasím
- E nesouhlasím
- n absolutní četnost
- n_1 četnost žen
- n_2 četnost mužů
- n_3 četnost studentů ve věku 18 až 20 let
- n_4 četnost studentů ve věku 21 až 25 let
- n_5 četnost studentů ve věku 26 a více let
- n_6 četnost studentů středních odborných učilišť
- n_7 četnost studentů středních odborných škol
- n_8 četnost studentů gymnázií

Slapové jevy jsou:

odpověď	n	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7	n_8
A	137	84	53	25	90	22	0	24	113
	60 %	53 %	77 %	50 %	63 %	61 %	0 %	38 %	69 %
B	12	10	2	3	9	0	0	3	9
	5 %	6 %	3 %	6 %	6 %	0 %	0 %	5 %	5 %
C	9	7	2	5	1	3	0	2	7
	4 %	4 %	3 %	10 %	1 %	8 %	0 %	3 %	4 %
D	71	59	12	17	43	11	2	34	35
	31 %	37 %	17 %	34 %	30 %	31 %	100 %	54 %	21 %

Tabulka P.2.9

- A Jevy způsobené gravitačním působením mezi dvěma tělesy.
- B Jevy, které lze přímo pozorovat na Slunci a jiných hvězdách.
- C Jevy, které formují vesmírný materiál do větších celků, tj. měsíců, planet apod.
- D Nevím.
- n absolutní četnost
- n_1 četnost žen
- n_2 četnost mužů
- n_3 četnost studentů ve věku 18 až 20 let
- n_4 četnost studentů ve věku 21 až 25 let
- n_5 četnost studentů ve věku 26 a více let
- n_6 četnost studentů středních odborných učilišť
- n_7 četnost studentů středních odborných škol
- n_8 četnost studentů gymnázií

Hertzsprungův-Russellův diagram je:

odpověď	n	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7	n_8
A	64	33	31	24	31	9	0	12	52
	28 %	21 %	45 %	48 %	22 %	25 %	0 %	19 %	32 %
B	18	11	7	4	11	3	0	6	12
	8 %	7 %	10 %	8 %	8 %	8 %	0 %	10 %	7 %
C	11	4	7	5	4	2	0	2	9
	5 %	3 %	10 %	10 %	3 %	6 %	0 %	3 %	5 %
D	136	112	24	17	97	22	2	43	91
	59 %	70 %	35 %	34 %	68 %	61 %	100 %	68 %	55 %

Tabulka P.2.10

- A Diagram popisující závislost povrchové teploty hvězd na jejich zářivém výkonu.
- B Diagram popisující závislost hmotnosti planety na frekvenci jejího oběhu kolem centrální hvězdy.
- C Diagram popisující závislost frekvence elektromagnetického záření na teplotě zdroje.
- D Nevím.
- n absolutní četnost
- n_1 četnost žen
- n_2 četnost mužů
- n_3 četnost studentů ve věku 18 až 20 let
- n_4 četnost studentů ve věku 21 až 25 let
- n_5 četnost studentů ve věku 26 a více let
- n_6 četnost studentů středních odborných učilišť
- n_7 četnost studentů středních odborných škol
- n_8 četnost studentů gymnázií

Kosmické rychlosti jsou:

odpověď	n	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7	n_8
A	125	75	50	32	67	26	1	33	91
	55 %	47 %	72 %	64 %	47 %	72 %	50 %	52 %	55 %
B	37	31	6	7	27	3	0	7	30
	16 %	19 %	9 %	14 %	19 %	8 %	0 %	11 %	18 %
C	9	5	4	2	7	0	0	0	9
	4 %	3 %	6 %	4 %	5 %	0 %	0 %	0 %	5 %
D	58	49	9	9	42	7	1	23	34
	25 %	31 %	13 %	18 %	29 %	19 %	50 %	37 %	21 %

Tabulka P.2.11

- A Specifické rychlosti související s pohyby těles v gravitačních polích.
- B Maximální možné rychlosti, kterých lze dosáhnout na různých místech Sluneční soustavy.
- C Specifické rychlosti, kterými létají družice tak, aby nedošlo k jejich vzájemné kolizi.
- D Nevím.
- n absolutní četnost
- n_1 četnost žen
- n_2 četnost mužů
- n_3 četnost studentů ve věku 18 až 20 let
- n_4 četnost studentů ve věku 21 až 25 let
- n_5 četnost studentů ve věku 26 a více let
- n_6 četnost studentů středních odborných učilišť
- n_7 četnost studentů středních odborných škol
- n_8 četnost studentů gymnázií

Dopplerův jev je:

odpověď	n	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7	n_8
A	156	97	59	37	93	26	1	36	119
	68 %	61 %	86 %	74 %	65 %	72 %	50 %	57 %	73 %
B	11	9	2	1	8	2	0	4	7
	5 %	6 %	3 %	2 %	6 %	6 %	0 %	6 %	4 %
C	5	5	0	1	4	0	0	0	5
	2 %	3 %	0 %	2 %	3 %	0 %	0 %	0 %	3 %
D	57	49	8	11	38	8	1	23	33
	25 %	31 %	12 %	22 %	27 %	22 %	50 %	37 %	20 %

Tabulka P.2.12

- A Jev, který vystihuje závislost frekvence vlnění na rychlosti zdroje vlnění.
- B Jev, který popisuje závislost rychlosti tělesa na jeho hmotnosti.
- C Jev, který zvyhodňuje tělesa zanedbatelných hmotností při pohybu vesmírem.
- D Nevím.
- n absolutní četnost
- n_1 četnost žen
- n_2 četnost mužů
- n_3 četnost studentů ve věku 18 až 20 let
- n_4 četnost studentů ve věku 21 až 25 let
- n_5 četnost studentů ve věku 26 a více let
- n_6 četnost studentů středních odborných učilišť
- n_7 četnost studentů středních odborných škol
- n_8 četnost studentů gymnázií

Gravitační manévr je:

odpověď	n	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7	n_8
A	98	52	46	21	56	21	0	27	71
	43 %	33 %	67 %	42 %	39 %	58 %	0 %	43 %	43 %
B	33	27	6	5	25	3	0	5	28
	14 %	17 %	9 %	10 %	17 %	8 %	0 %	8 %	17 %
C	7	4	3	1	5	1	0	2	5
	3 %	3 %	4 %	2 %	3 %	3 %	0 %	3 %	3 %
D	91	77	14	23	57	11	2	29	60
	40 %	48 %	20 %	46 %	40 %	31 %	100 %	46 %	37 %

Tabulka P.2.13

- A Manévr, který umožňuje urychlit těleso pomocí gravitační síly.
- B Manévr, bez kterého by nebylo možné opustit gravitační pole Země.
- C Manévr, který v kritických případech může zachránit posádku pohybující se na oběžné dráze Země.
- D Nevím.
- n absolutní četnost
- n_1 četnost žen
- n_2 četnost mužů
- n_3 četnost studentů ve věku 18 až 20 let
- n_4 četnost studentů ve věku 21 až 25 let
- n_5 četnost studentů ve věku 26 a více let
- n_6 četnost studentů středních odborných učilišť
- n_7 četnost studentů středních odborných škol
- n_8 četnost studentů gymnázií