

Technická univerzita v Liberci  
**FAKULTA PEDAGOGICKÁ**

---

**Katedra:** fyzika

**Studijní program:** učitelství pro základní školy, učitelství pro střední školy

**Studijní obor  
(kombinace)** matematika – fyzika

UČEBNÍ PODKLADY PRO VÝUKU  
ASTRONOMIE A ASTROFYZIKY  
NA GYMNÁZIU

DIDACTIC SOURCES FOR LESSONS  
OF ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS  
AT HIGH SCHOOL

**Diplomová práce:** 08–PF–KFY– 064

**Autor:**

Aleš Groma

**Podpis:**

---

**Adresa:**

Riegrovo náměstí 64

513 01, Semily

**Vedoucí práce:** RNDr. Zdislav Šíma, CSc.

**Konzultant:** Mgr. Milan Čmelík

**Počet**

| stran | grafů | obrázků | tabulek | pramenů | příloh |
|-------|-------|---------|---------|---------|--------|
| 126   | 0     | 42      | 15      | 34      | 1      |

V Liberci dne:





## **Prohlášení**

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis



## PODĚKOVÁNÍ

Velmi rád bych touto cestou hluboce poděkoval vedoucímu mé diplomové práce RNDr. Zdislavu Šimovi, CSc. za jeho obětavost, nesmírnou ochotu a pomoc při tvorbě tohoto díla. Dále také za podnětná doporučení, potřebnou inspiraci a poskytnutí velkého množství obrazového materiálu a dalších důležitých podkladů pro tvorbu.

Také velmi děkuji RNDr. Václavu Kazdovi, CSc. a Mgr. Milanu Čmelíkovi za ochotu konzultovat, za významná doporučení, rady a poskytnutí podkladů pro psaní diplomové práce.

Poděkování též patří přítelkyni Kateřině Linkové za trpělivost a udržování příjemného zázemí po celou dobu psaní této práce.

Též děkuji vedoucí v zaměstnání Ivaně Frühaufové za vstřícnost a pochopení.

## ANOTACE

Jak uvádí název diplomové práce, jde o vytvoření učebních podkladů pro výuku astronomie a astrofyziky na gymnáziích, jež mohou sloužit jak pedagogům při výuce, tak žákům při samostatném studiu.

Jedná se o vytvoření oddílu, který se skládá z jednotlivých kapitol astronomie a astrofyziky. Obsahem je uvedení základních pojmů a principů astronomie a astrofyziky na gymnaziální úrovni. Vzhledem k velké obsáhlosti těchto oborů se nejedná, a ani nemůže jednat, o celkový přehled, ale i přes tuto skutečnost je obsah nad rámec vzdělávacího programu. Je tedy možnost některé části použít například ve fyzikálním či zeměpisném semináři a podobně.

Práce též obsahuje vzorové příklady, které jsou mnohdy spíše názorné pro obor než náročné pro výpočet.

Součástí diplomové práce je mimo jiné uvedení do problematiky integrace výuky a mezipředmětových vztahů, kde je uvedena možnost využít některá témata i v jiných předmětech a tím ukázat žákům spojitost určitých témat.

Další částí je vytvoření prezentací v programu PowerPoint, které prezentují učivo jednotlivých kapitol v uvedeném oddílu. Prezentace jsou určeny pedagogům k výkladu daných témat.

Poslední součástí učebních podkladů je encyklopedie ve formátu html tvořená prostřednictvím editoru Adobe Dreamweaver. Encyklopedie by měla být k dispozici studentům při samostatném studiu.

Schválně byly voleny ne příliš složité a velmi dobře dostupné programy, prostřednictvím kterých má možnost pedagog uvedené podklady dále upravovat k obrazu svému.

# ANNOTATION

As the name of dissertation says, main point is creation of background papers for classwork in astronomy and astrophysics at high schools, which can help both educators in classwork and students in study hour.

This is about creation of section, which consists of unit sections of astronomy and astrophysics. As a subject is presentation of basic conceptions and principles of astronomy and astrophysics at high school level. Regarding big comprehensiveness of astronomy's and astrophysics's sections it can't be and also couldn't be about all-inclusive view, but also in spite of this matter is view above the scope of the education program. There is then possibility to use some parts for example in physical or geographical seminars etc.

This dissertation also contains samples, that are many times rather illustrational for subject field then difficult for calculations.

A part of dissertation is among others initiating into problems of integration of classwork and intersubject relationships, where is initiated possibility of using some topics also in other subjects and following this fact to show relationship of some topics to students.

Next sections is about creating of presentation in software PowerPoint, that presents subject matter of unit sections in initiating head section. Presentations are designed for educators for definition of initiation topics.

As last part of background papers is encyclopedia in html format made by using of editor Adobe Dreamweaver. Encyclopedia should be at disposal of students.

These not too complicate and very well available softwares were chosen wittingly. Due to these softwares can educator modulate initiated details according to her/his own conception.

# ANNOTATION

Wie es in dem Titel meiner Diplomarbeit steht, handelt es sich um die Bildung der Lehrunterlagen für den Astronomie- und Astrophysikunterricht. Diese Unterlagen dienen sowohl den Gymnasienlehrern beim Unterricht, als auch den Schülern bei ihrem Selbststudium.

Es handelt sich um die Gestaltung eines Teiles, die aus einzelnen Kapiteln der Astronomie und Astrophysik besteht. Den Inhalt bildet eine Aufführung von Grundbegriffen und Grundprinzipien der Astronomie und Astrophysik auf dem Gymnasienniveau. Im Hinblick auf die Vielseitigkeit von beiden Fachrichtungen stellt meine Diplomarbeit keinen gesamten Überblick dar. Aber auch trotz diesen Umstand bleibt der Inhalt meiner Arbeit breiter als der Rahmen des Ausbildungsprogramms. Es ist deswegen möglich, einzelne Teile im Physik- oder Erdkundeseminar auszunutzen.

Diese Diplomarbeit beinhaltet auch Musterbeispiele, die meistens eher bildhaft für das Fach sind als dass sie anspruchsvoll für das Ausrechnen wären.

Ein Teil der Arbeit ist unter anderem eine Einleitung in die Problematik der Ausbildungsintegration und der Zwischenfächerbeziehungen, die den Schülern eine Zusammenverknüpfung von Themen der verschiedenen Fächern anbietet.

Die Bildung von PowerPoint Präsentationen stellt einen weiteren Teil der Diplomarbeit dar, die den Lehrstoff einzelnen Kapiteln präsentieren. Diese PowerPoint Präsentationen sind für die Lehrer bei ihren Stofferklärung bestimmt.

Den letzten Teil des Lehrmaterials stellt eine Enzyklopädie im html Format dar, die der Editor Adobe Dreamweaver vermittelt. Diese Enzyklopädie steht den Schülern beim Selbststudium zur Verfügung.

# OBSAH

|         |                                               |    |
|---------|-----------------------------------------------|----|
| 1       | ÚVOD .....                                    | 12 |
| 2       | SOUČASNÝ STAV .....                           | 13 |
| 2.1     | Dotazník .....                                | 14 |
| 2.2     | Integrace výuky a mezipředmětové vztahy ..... | 16 |
| 3       | SLUNEČNÍ SOUSTAVA .....                       | 19 |
| 3.1     | Životodárné Slunce .....                      | 20 |
| 3.1.1   | Stavba Slunce a vznik sluneční energie .....  | 20 |
| 3.1.2   | Rotace Slunce .....                           | 23 |
| 3.1.3   | Vliv sluneční aktivity na Zemi .....          | 23 |
| 3.1.4   | Jak bude Slunce vypadat v budoucnu? .....     | 24 |
| 3.1.5   | Úkoly a jejich řešení .....                   | 24 |
| 3.2     | Země .....                                    | 25 |
| 3.2.1   | Zemské nitro .....                            | 25 |
| 3.2.1.1 | Zdroj energie Země .....                      | 27 |
| 3.2.1.2 | Zemský magnetismus .....                      | 28 |
| 3.2.1.3 | Litosféra a astenosféra .....                 | 29 |
| 3.2.2   | Zemská atmosféra .....                        | 29 |
| 3.2.2.1 | Složení atmosféry .....                       | 30 |
| 3.2.2.2 | Skleníkový jev .....                          | 33 |
| 3.2.3   | Vesmír nad atmosférou .....                   | 35 |
| 3.2.4   | Kosmonautika .....                            | 35 |
| 3.2.5   | Pozorování oblohy .....                       | 37 |
| 3.2.5.1 | Pozorovací technika .....                     | 40 |
| 3.2.6   | Hvězdný a sluneční den .....                  | 45 |
| 3.2.7   | Dráha Země kolem Slunce .....                 | 46 |
| 3.2.7.1 | Precese a nutace zemské osy .....             | 48 |
| 3.2.8   | Historie vývoje Země .....                    | 49 |
| 3.2.9   | Úkoly a jejich řešení .....                   | 52 |
| 3.3     | Měsíc .....                                   | 54 |
| 3.3.1   | Slapy .....                                   | 55 |
| 3.3.2   | Zatmění Měsíce a Slunce .....                 | 57 |
| 3.3.3   | Fáze Měsíce .....                             | 59 |
| 3.3.4   | Úkoly a jejich řešení .....                   | 61 |
| 3.4     | Další planety sluneční soustavy .....         | 62 |
| 3.4.1   | Rotace a dráhy planet .....                   | 63 |
| 3.4.2   | Merkur .....                                  | 63 |
| 3.4.3   | Venuše .....                                  | 65 |
| 3.4.4   | Mars .....                                    | 66 |
| 3.4.5   | Jupiter .....                                 | 68 |
| 3.4.6   | Saturn .....                                  | 69 |
| 3.4.7   | Uran .....                                    | 71 |
| 3.4.8   | Neptun .....                                  | 72 |
| 3.5     | Ostatní tělesa sluneční soustavy .....        | 73 |
| 3.5.1   | Pluto .....                                   | 73 |
| 3.5.2   | Meteoroidy, meteory a meteority .....         | 75 |
| 3.5.3   | Komety .....                                  | 76 |

|         |                                                    |     |
|---------|----------------------------------------------------|-----|
| 3.5.4   | Planetky .....                                     | 77  |
| 3.5.5   | Hlavní pás asteroidů .....                         | 78  |
| 3.5.6   | Kuiperův pás.....                                  | 79  |
| 3.5.7   | Heliopauza.....                                    | 79  |
| 3.5.8   | Oortův oblak .....                                 | 79  |
| 3.5.9   | Hranice sluneční soustavy .....                    | 80  |
| 3.6     | Vznik a vývoj sluneční soustavy .....              | 80  |
| 3.6.1   | Úkoly a jejich řešení .....                        | 81  |
| 4       | Nebeská mechanika .....                            | 82  |
| 4.1     | Newtonův gravitační zákon .....                    | 82  |
| 4.2     | Keplerovy zákony .....                             | 83  |
| 4.3     | Dráhové elementy .....                             | 85  |
| 4.3.1   | Určení jamního bodu .....                          | 87  |
| 5       | Sférická astronomie .....                          | 87  |
| 5.1     | Obzorníkový systém .....                           | 88  |
| 5.2     | Rovníkové souřadnice 1. druhu .....                | 89  |
| 5.3     | Rovníkové souřadnice 2. druhu .....                | 89  |
| 6       | Hvězdy.....                                        | 89  |
| 6.1     | Charakteristika hvězd .....                        | 90  |
| 6.1.1   | Hvězdná velikost .....                             | 90  |
| 6.1.2   | Absolutní hvězdná velikost .....                   | 91  |
| 6.1.3   | Zářivý výkon .....                                 | 91  |
| 6.1.4   | Paralaxa a vzdálenost.....                         | 92  |
| 6.1.5   | Elektromagnetické spektrum .....                   | 92  |
| 6.1.5.1 | Dopplerův jev a rudý posuv .....                   | 93  |
| 6.1.6   | Další stavové veličiny.....                        | 95  |
| 6.1.7   | Úkoly a jejich řešení .....                        | 95  |
| 6.2     | Klasifikace hvězd.....                             | 96  |
| 6.2.1   | Spektrální klasifikace .....                       | 96  |
| 6.2.2   | Dvojhvězdy a proměnné hvězdy .....                 | 98  |
| 6.3     | Vznik hvězd .....                                  | 99  |
| 6.4     | HR diagram.....                                    | 102 |
| 6.5     | Vývoj hvězd a jejich konečná stádia.....           | 103 |
| 6.5.1   | Úkoly a jejich řešení .....                        | 106 |
| 6.6     | Termonukleární reakce ve hvězdách .....            | 106 |
| 7       | Galaxie.....                                       | 108 |
| 7.1     | Klasifikace galaxií .....                          | 108 |
| 7.1.1   | Spirální galaxie a spirální galaxie s příčkou..... | 109 |
| 7.1.2   | Eliptické galaxie .....                            | 110 |
| 7.2     | Vzdálenosti galaxií .....                          | 110 |
| 7.3     | Hubbleův zákon .....                               | 111 |
| 7.4     | Kvasary a gravitační čočka .....                   | 111 |
| 7.5     | Naše galaxie .....                                 | 112 |
| 7.6     | Hvězdné mlhoviny .....                             | 113 |
| 7.7     | Hvězdokupy .....                                   | 114 |
| 8       | Kosmologie.....                                    | 115 |
| 8.1     | Velký třesk .....                                  | 116 |
| 8.1.1   | Reliktní záření .....                              | 118 |

|     |                                   |     |
|-----|-----------------------------------|-----|
| 8.2 | Budoucnost vesmíru .....          | 118 |
| 9   | Stručná historie astronomie ..... | 119 |
| 10  | ZÁVĚR.....                        | 123 |
| 11  | SEZNAM PRAMENŮ .....              | 125 |
| 12  | PŘÍLOHA .....                     | 126 |

# 1 ÚVOD

Cílem této diplomové práce je navrhnout učební podklady pro výuku astronomie a astrofyziky na gymnáziu. Součástí by měly být ukázky prezentací v programu PowerPoint, které mají sloužit učitelům ve výkladu spolu s navrženým obsahem daného tématu.

Dalším prvkem bude encyklopedie ve formátu html, což může posloužit žákům k samostatnému studiu a získávání informací. Vzhledem ke zvolenému formátu je možné umístění encyklopedie na internetu.

Navržený obsah tématu by měl poskytnout základní informace v oboru astronomie a astrofyziky. Bude již záležet na každém pedagogovi, do jaké míry předložený obsah využije.

Astronomie a astrofyzika jsou velmi obsáhlé vědní obory, a tudíž ani nebude cílem vytvořit úplný přehled.

Jak obsah daného tématu, tak prezentace a encyklopedie nemusí mít pro učitele definitivní podobu, ale bude možné je samovolně upravovat k obrazu svému. Tato diplomová práce může přinejmenším sloužit k inspiraci, jak si pomocí jednoduchých aplikací vytvořit vlastní učební podklady. Proto byly vybrány poměrně jednoduché programy k realizaci, které jsou používány širokou veřejností. Záleží samozřejmě na schopnostech každého uživatele.

Program PowerPoint byl mimo jiné zvolen z důvodu možnosti prezentace velkého množství obrazového materiálu, který by neměl při vyučování astronomie a astrofyziky chybět.

Dalším cílem je poukázat na možnosti využití daného tématu v integrované výuce a s tím souvisí i uvedení do základní problematiky integrované výuky.

První krokem bude zmapování postoje některých učitelů na gymnáziu k vyučování tématu astronomie a astrofyzika a to pomocí dotazníku.



## 2 SOUČASNÝ STAV

V současné době je možné získat nepřehledné množství informací o daném tématu z různých médií, a to jak v knižní podobě, tak v elektronické. Proto se může stát orientace v tomto obrovském množství informací náročnější. Vzhledem k nízkému počtu hodin, který učitelé výuce astronomie a astrofyziky věnují, považují za užitečné předložení návrhu prezentace základních informací jak v knižní, tak v multimediální podobě.

Nejčastěji používanou **učebnicí** na gymnáziu je titul (1), kde za nedostatek může být považováno omezené množství obrázků, což je dáno charakterem těchto forem výukových materiálů. Vkládání a tištění mnoha velkých barevných obrázků by vedlo k vysokému růstu nákladů a školy si bohužel nemohou dovolit nakupovat velmi drahé učebnice.

Obrázky a fotografie jsou jedním z klíčových prostředků při výuce astronomie a astrofyziky. Poskytují pohled do nám vzdálených a neznámých světů, které mohou být pro většinu žáků velmi poutavé a motivující k dalšímu poznání.

Další možností získání informací je elektronická podoba. A to jak v prostřednictvím různých multimédií nabízených na našem trhu, tak díky internetu.

Je nepřehledné množství **webových stránek** věnovaných tématu astronomie a astrofyziky. Některé odkazy jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů. Vzhledem k velkému množství informací poskytovaných na internetu bude nutné jak pro učitele, tak pro žáka, vytrýdit pouze určité poznatky. Pro učitele to může být zdlouhavé a demotivující, ale žák se naučí pracovat s dostupnými zdroji.

Co se týká různých **multimédií** s tématem astronomie či astrofyziky, stojí za zmínku několik nejznámějších titulů.

Jako první je multimediální dvojdielný cd-rom s názvem **Astro 2001** od autorů Zdeňka Pokorného a Jiřího Grygara. Tento cd-rom má dva díly. První díl se jmenuje **Báječný vesmír** a je vhodný pro děti od 12 do 13 let. Druhý díl nese název **Jak vesmír funguje** a je určen pro děti od 14 let. Oba díly nejsou pouhou encyklopedií nebo slovníkem odborných pojmů, ale texty jsou doprovázeny komentářem „laskavého učitele“, který žáka nakonec nenásilnou formou vyzkouší, což je jednou ze zásad při tvorbě dobré multimediální pomůcky.

Dalším titulem je cd-rom s názvem **Gallaxis 2002**. Jedná se o multimediální průvodce světem astronomie a kosmonautiky pro laiky i pokročilé zájemce o astronomii. Zajímavou funkcí, která usnadňuje orientaci mezi 4000 fotografiemi a 200 videoukázkami, je Gallaxis Find, tedy vyhledávač.

**Encyklopedie vesmíru** je průvodce astronomií, dobýváním vesmíru a kosmologií. Cd-rom obsahuje nepřehledné množství dat s jednoduchým ovládáním. Mimo jiné zde nalezneme animace a zvukové a video sekvence.

Multimediální cd-rom **Dobývání vesmíru** pojednává o dobývání kosmického prostoru jako o soutěži mezi dvěma velmocemi, bývalým Sovětským svazem a USA. Tento závod je zpracován téměř jako filmový dokument, který zachycuje čtyři desetiletí dobývání vesmíru.

**Astronomie 1** je titul královéhradecké hvězdárny a planetária. Tento jediný cd-rom je možné stáhnout zdarma, a to z webových stránek [www.astrohk.cz](http://www.astrohk.cz). Obsahem je soubor o více než 1 000 obrázcích a animacích s astronomickou tematikou a podrobným odborným komentářem ve formátu WWW stránek.

Ve většině zmíněných a jiných multimédií je použita audiovizuální technika, popřípadě chybí zvuková stránka. Vzhledem k tomu je velmi zajímavý „pouze“ audio cd-rom s názvem **Vesmírný příběh**. Autorem je opět Jiří Grygar a dále Petr Rezek. Podtitul nese název Velký třesk a na cd-romu je poutavé vyprávění o dějinách vesmíru od počátku do současnosti. Vyprávění Jiřího Grygara je podporováno „kosmickou hudbou“, která dodává dramatictvo.

Výhodou multimédií je možnost větší názornosti prostřednictvím velkého množství obrázků, fotek, animací, audio a video sekvencí.

Jejich nevýhodou může být cena, která není poměrně vysoká, ale mohou odradit žáky nebo dokonce školy od jejich koupě. Cena se pohybuje přibližně od 200 Kč do 500 Kč. Některá multimédia je možné stáhnout z internetu zdarma, jako například již uvedený titul Astronomie 1. V některých případech se to může odrážet na kvalitě zpracování, věcné správnosti či obsahové omezenosti.

## 2.1 Dotazník

Mezi první kroky při zpracování tématu diplomové práce patřilo zmapování situace mezi učiteli na gymnáziu prostřednictvím následujícího dotazníku. Tento dotazník měl za úkol zjistit vztah pedagogů k výuce daného tématu.

### Vážená paní magistro, vážený pane magistře,

do rukou se Vám dostal dotazník, prostřednictvím kterého bych rád získal velmi důležité poznatky pro svoji diplomovou práci z fyziky.

Povolání učitele je náročné a budu Vám velmi vděčný, pokud si uděláte čas a projevíte ochotu spolupracovat na výzkumu, který zpracování diplomové práce předchází.

Tématem mé diplomové práce je vytvoření příručky pro výuku astronomie a astrofyziky na gymnáziu. Rád bych použil moderních prostředků výuky s pomocí internetu. Obsahem by měla být prezentace do výukových hodin v programu PowerPoint a malá encyklopedie v html formátu s možností umístění na web.

Za Vaši spolupráci bych Vám poskytl dílčí výsledky své práce, budete-li mít zájem.

Dotazník je anonymní a Vaše jméno (ani pracoviště) nebude nikde uvedeno.

Prosím Vás, abyste dotazník vyplňoval/a co nejpravdivěji. V případě nejasností mne můžete kontaktovat na tel. č. 731 467 024.

---

V případě nabídek odpovědí označte nejbližší nabídku „x“

1. Potřebujeme znát přibližně Vaše stáří. Do které skupiny let se můžete zařadit?.

- ☐ 20 – 30
- ☐ 31 – 40
- ☐ 41 – 50
- ☐ >50

2. Kolik let učíte na gymnáziu?

- ☐ 0 – 5

- ☐ 6 – 10
- ☐ 11 – 15
- ☐ >16

3. Uveďte laskavě typ gymnázia, na kterém nyní učíte.
4. Napište, jaká je Vaše kombinace? (Stačí zkratky předmětů)
5. Zavzpomínejte na léta svých středoškolských studií a krátce (stačí 2 – 3 věty) napište, jak Vás osobně zaujala výuka astrofyziky vzhledem k ostatním částem fyziky?
6. Napište stručně, jaký máte osobní vztah k astrofyzice?
7. Kolik hodin přibližně věnujete výuce astrofyziky?
8. Kolik hodin byste přitom výuce astrofyziky věnovali?
9. Jaké používáte pomůcky pro výuku astrofyziky?
10. Poskytuje Vaše škola vybavení pro prezentaci v programu PowerPoint?
11. Jaké vidíte výhody výuky za pomoci prezentace v programu PowerPoint?
12. Jaké vidíte nevýhody výuky za pomoci prezentace v programu PowerPoint?
13. Pokud vyučujete volitelný předmět z fyziky, zahrnujete do výuky také astrofyziku? Popřípadě kolik hodin?
14. Byly Vám otázky v tomto dotazníku srozumitelné?
15. Které otázky v tomto dotazníku považujete za zbytečné?
16. Považujete téma této DP za užitečné?
17. Měl/a byste zájem o dílčí výsledky mé práce? O které zejména?

Děkuji Vám za spolupráci a velmi si vážím toho, že jste projevili Vaši ochotu.

V Liberci dne...

Aleš Groma - diplomant

Dotazník byl doručen 32 pedagogům zejména z gymnázií v severočeském regionu. Většinu škol jsem se snažil navštívit osobně ve snaze získat co nejvíce odpovědí. I přesto je počet získaných odpovědí 10, čímž klesá vypovídací hodnota, ale přesto byly získány důležité informace a motivace pro další práci.

Na dotazník odpověděli čtyři učitelé ve věku 20 – 30 let, dva ve věku 31 – 40 let, tři ve věku 41 – 50 let a jeden ve věku nad 50 let.

Co se týká délky praxe, šest učitelů uvedlo 0 – 5 let, dva 11 – 15 let a dva více jak 16 let.

Typ gymnázia byl ve většině odpovědí všeobecné.

Aprobace učitelů byla ve většině odpovědí kombinace fyzika – matematika, v jiných případech fyzika s chemií, základy společenských věd nebo také se základy techniky.

Podle otázek číslo šest byly odpovědi většiny učitelů velmi podobné. Z jejich odpovědí vyplývá, že většina z nich má k astronomii a k astrofyzice kladný vztah, ale bohužel se probírala za doby jejich studií minimálně nebo vůbec.

Na otázku č. 8 odpovídali učitelé od 0 do 10 hodin, které věnují výuce astronomie a astrofyziky, přitom valná většina odpovídajících by ráda tomuto tématu věnovala více hodin a to jak v rámci předmětu fyzika, tak i například ve volitelném fyzikálním semináři, kteří někteří vedou.

Podle dotazu č. 10 učitelé používají nejrůznější pomůcky při výuce astronomie a astrofyziky. Mezi jmenovanými jsou například počítač s diaprojektorem, filmy, mechanické modely, výukové programy, učebnice, časopisy, obrázky z internetu, internet apod.

Jako výhody prezentací v programu PowerPoint považují učitelé především možnosti ukázat mnoho obrazového materiálu, názornost, přehlednost a úspora času, kdy učitel nemusí kreslit obrázky na tabuli.

Naopak někteří považují za nevýhody těchto prezentací jejich dlouhou přípravu a také to, že někdy může selhat technika a výuka je tím dosti narušena. V případě první zmiňované nevýhody by měla vyjít učitelům vstřícná tato diplomová práce.

Osm z deseti učitelů považují dané téma diplomové práce za užitečné a měli by zájem o dílčí výsledky této práce, popřípadě o celé dílo.

## 2.2 Integrace výuky a mezipředmětové vztahy

Ve většině škol dnes stále převažuje slovně názorné transmisivní pojetí výuky, kdy je přeceňován výklad učitele čili verbální předání (transmise) poznatků. Student je zatlačen do pasivity, většinou pouze poslouchá, vštěpuje si dané poznatky do paměti a poté reprodukuje. Za posledních 200 let principy výuky příliš nezměnili. Koncem 18. Století Jan Ignác Felbiger ve svém díle *Kniha metodní* uvedl, že učitel bude vykládat a žáci poslouchat. Poté je z naučeného vyzkouší, procvičí s nimi určité dovednosti, vstoupí jim zásady správné morálky. To přibližně odpovídá tradičnímu pojetí výuky v České republice.

Vystačí však toto pojetí výuky ve 21. století? Studenti v ČR v porovnání s jinými zeměmi jsou na předních místech v množství encyklopedických znalostí. Daní za to je však velká nechuť studentů ke vzdělávání a neschopnost praktického využití získaných poznatků.

Dalším znakem tradiční školy je také uspořádání učiva do předmětů, které prochází složitým vývojem. Rozčleňování výuky do klasických předmětů (matematika, fyzika, český jazyk, zeměpis atd.) často může vést k naprosté izolaci každého předmětu, kdy učitelé nepoukazují na mezipředmětové vztahy a souvislosti s jinými obory, ale dokonce někteří hájí pouze ten svůj předmět, který považují, s trochou nadsázky, za pilř všeho.

Rámcový vzdělávací program se však snaží tuto izolaci předmětů eliminovat. Témata jednotlivých předmětů na gymnáziu jsou členěna do osmi vzdělávacích oblastí, kterými jsou:

- Jazyka a jazyková komunikace
- Matematika a její aplikace
- Člověk a příroda
- Člověk a společnost
- Člověk a svět práce
- Umění a kultura
- Člověk a zdraví
- Informatika a informační a komunikační technologie

Každá škola si na základě rámcového vzdělávacího programu vytváří svůj školní vzdělávací program, kde se rozvádí, jak se jednotlivé oblasti učiva stanou obsahem výuky. Vytvoří se systém předmětů a učební plán, ve kterém se určuje hodinová dotace každého předmětu.

Z výše uvedených odstavců vyplývá, že je důležité zvolit vhodné pojetí výuky založené na moderních poznatcích z psychologie a pedagogiky. Je důležité, aby žák přešel z pasivity do aktivity a učitel nebyl „pouhým“ podavatelem informací.

Řešení výše uvedených problémů může být hned několik. Učitel by se měl především při výkladu vyhnout izolaci daného předmětu. Je určité důležité uvádět souvislosti s jinými předměty či obory, tedy klást důraz na **mezipředmětové vztahy**. Zadávat takové úkoly, při jejichž řešení student uplatní poznatky z jiných předmětů. K tomuto je potřebné, aby měl určitý přehled v ostatních předmětech, se kterými výuka daného tématu souvisí.

Další možností je přímé propojení neboli **integrace** některých předmětů při výuce témat souvisejících s více předměty. Učitelé se mohou buď domluvit například na určitém spojení témat a dokonce i vyučovacích hodin. Lze se dohodnout na zařazení tématu z jiného předmětu do tématu souvisejícího s probíraným tématem našeho předmětu.

K tomu je velmi důležitá kvalitní a častá spolupráce učitelů a společného podílení se na tvorbě studijních plánů, kde bude kladen důraz právě na mezipředmětové vztahy a integrovanou výuku.

V neposlední řadě důležitým prvkem je **projektová výuka**. Její podstatou je předložení určitého úkolu, který má komplexnější charakter a studenti budou schopni daný úkol řešit. Primární motivace může spočívat v samotném zadání úkolu, které vede k zájmu o získání poznatků i dovedností. Učení je v tomto případě potřebou k dosažení řešení daného tématu, a tudíž je intenzita poznání vysoká. V současnosti směřuje k projektové metodě výuky konstruktivní pojetí školní práce.

Při zadávání projektů je důležité pojmout tento proces integrovaně a vyhnout se izolovanosti na jeden předmět. Pokud však dané téma projektu má kořeny především v jednom předmětu, tak je dobré přidat například druh prezentování výsledků projektu, kdy student využívá znalostí a dovedností z jiných předmětů jako nástroj.

Při práci na projektech je úkolem učitele naplnit vyučovací dobu činností s takovým obsahem, aby byla probíraná a procvičovaná témata z jednotlivých oblastí rámcového vzdělávacího programu. Při projektové výuce pracují studenti většinou samostatně nebo ve skupinách a mohlo by se zdát, že učitel tím pádem nemá co dělat. Samozřejmě zůstává i klasická forma vyučování, zpestřena však projektovou výukou, kdy učitel přestává být osobou, která „pouze“ verbálně předává informace. Učitel se po zadání a vysvětlení zadání projektu stává v podstatě nástrojem, který je studentům k dispozici při řešení projektů a získávání informací pro tato řešení. Žák se stává aktivní

jak řešením daného projektu, tak i při přijímání informací od učitele, kdy sám jeho poznatky, doporučení a vysvětlení vyhledává a následně využívá. To znamená, že efektivita předávání učitelových poznatků se výrazně zvyšuje.

Při vytváření projektů je opět velmi důležitá spolupráce učitelů. Učitelský sbor by měl být tým, který hledá společně možnosti využití efektivnějších pojetí výuky a jejich zapojení do celkové organizace vyučování ve škole.

Dále je zapotřebí, aby se i v učebnicích uváděly mezioborové a mezipředmětové vztahy a souvislosti a měly by obsahovat některé úkoly, k jejichž řešení student využívá poznatky i z jiných předmětů.

Zásadní je také změna postoje učitelů k moderním metodám výuky. To je také jeden z problémů zavádění integrované výuky. Někteří učitelé nechtějí dělat změny. Důvodem nemusí být pouze určitá míra pohodlnosti, ale někteří učitelé a odborníci ani neuznávají nové moderní metody vyučování.

Důležitá je také podpora široké veřejnosti. Lidé obecně neradi přijímají změny a tradiční pojetí školní výuky je velmi zažitě. Veřejnost většinou projevuje nedůvěru k nově zaváděným metodám a pojetí výuky.

V rámcově vzdělávacím programu pro gymnázia byla z předmětu fyzika vyškrtána kapitola astrofyzika. To však neznamena, že výuka astronomie a astrofyziky není zahrnuta ve školních vzdělávacích programech jednotlivých škol. Již podle odpovědí v dotazníku lze říci, že učitelé se stále snaží věnovat tomuto tématu alespoň několik hodin.

Vzhledem k nízké časové dotaci věnované tomuto tématu je i vybízející pro učitele hledat alternativní řešení zapojení astronomie a astrofyziky do výuky. To lze uskutečnit právě prostřednictvím metod integrované výuky.

Možnosti využití astronomie a astrofyziky v integrované výuce budou uvedeny v závěru diplomové práce.

### 3 SLUNEČNÍ SOUSTAVA

Slunce je střed celého dění naší sluneční soustavy, ve které mimo **Slunce** nalezneme i další tělesa kolem Slunce obíhající. Jsou to **planety** se svými **měsíci**, **planetky**, **komety**, **meteoroidy**, **mezihvězdný prach**, **zbytky plynů** a **částice slunečního větru**. To vše dohromady tvoří sluneční soustavu.

Planety jsou po Slunci největší tělesa sluneční soustavy. Kolem Slunce obíhají po přibližně kruhových drahách, které leží všechny téměř v jedné rovině. Tato rovina se nazývá **rovina ekliptiky**. Kolem planet může obíhat až několik měsíců nebo také žádný.

Je možné si v odborné literatuře vyhledat údaje o velikostech a vzájemných vzdálenostech planet, jejich měsíců a Slunce. Tato čísla jsou však málo názorná.

Pro lepší představu můžeme použít tzv. „**Mandarinkový**“ **model**, ve kterém jsou veškeré veličiny zmenšeny miliardkrát.

Tabulka č. 1 – mandarinkový model.

| Objekt                                                                                                                                             | Průměr   | Model          | Vzdálenost od Slunce |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------|----------------------|
| Slunce                                                                                                                                             | 1 400 mm |                |                      |
| Merkur                                                                                                                                             | 5 mm     | hrášek         | 60 m                 |
| Venuše                                                                                                                                             | 12 mm    | lískový oříšek | 110 m                |
| Země                                                                                                                                               | 12 mm    | lískový oříšek | 150 m                |
| Mars                                                                                                                                               | 7 mm     | hrášek         | 230 m                |
| Jupiter                                                                                                                                            | 140 mm   | grapefruit     | 800 m                |
| Saturn                                                                                                                                             | 120 mm   | grapefruit     | 1,5 km               |
| Uran                                                                                                                                               | 50 mm    | mandarinka     | 3 km                 |
| Neptun                                                                                                                                             | 50 mm    | mandarinka     | 4,5 km               |
| Pluto                                                                                                                                              | 2 mm     | zrnko pepře    | 6 km                 |
| Nejbližší hvězdy                                                                                                                                   |          |                | 40 000 km            |
| Daleké galaxie by i v tomto miliardkrát zmenšeném modelu byly stále ještě vzdáleny od Slunce přibližně 10 světelných roků, tj. asi 100 bilionů km. |          |                |                      |

Pro zobrazení skutečných velikostí a vzdáleností je problém zvolit vhodné měřítko. V dalších řádcích bude uveden další model, který umožní lepší představu o poměrech velikostí a vzdáleností planet naší sluneční soustavy.

V tomto modelu položíme „Slunce“ představované míčkem o velikosti téměř 10 cm na okraj fotbalového hřiště. Merkur bude sotva viditelným zrníčkem prachu ve vzdálenosti 4 m, Venuše velmi silnou tečkou ve vzdálenosti 7,6 m, Země milimetrovou tečkou ve vzdálenosti 10,5 m od Slunce a Mars bude drobným zrníčkem písku 16 m od okraje hřiště, Jupiter by tvořila centimetrová kulička asi v polovině hřiště (54,5 m). Další planety budou v tomto modelu mimo stadion. Uran a Neptun by vypadaly jako kuličky o průměru skleněné špendlíkové hlavičky ve vzdálenosti 201 m a 315 m. Pluto bychom našli asi 415 m od slunečního míče a mělo by velikost drobného zrníčka jemného prachu. Tento model lze vyzkoušet prakticky se žáky.

Z obou modelů je až do očí bijící především jedna skutečnost. Kosmický prostor je dokonce i v okolí Slunce neuvěřitelně prázdný.

Co se týká rychlosti, nejrychlejším cestovatelem ve vesmíru je světlo. Ze Slunce na Zemi to světlu trvá přibližně 500 vteřin, čili 8 min 20 s. Vzhledem k tomu, že není těžké vyhledat rychlost světla a vzdálenosti jednotlivých planet od Slunce, nebude těžké si spočítat, jakou dobu potřebuje světlo vyzářené ze Slunce k dosažení jednotlivých planet. Je možné tento model prakticky vyzkoušet.

### 3.1 Životodárné Slunce

Před začátkem výkladu této kapitoly by bylo dobré studentům položit otázku. „Co si jako první představíte, pokud se řekne slovo obloha?“. Myslím, že část odpoví „Slunce“.

Otázka, která by mohla následovat „Čím je pro nás Slunce důležité?“

Samozřejmě budou někteří zmiňovat světlo a teplo, které k nám Slunce vyzářuje. A právě vznikem energie ve Slunci a jejím šířením můžeme začít výklad této kapitoly. Také by bylo dobré doplnit odpovědi žáků tím, jak je pro nás důležité, že je Slunce jedna z mnoha hvězd. Nachází se velmi „blízko“ Zemi a díky tomu máme možnost ji „snadno“ pozorovat jako jednu ze zástupců určité kategorie hvězd. O rozdělení hvězd se bude hovořit v kapitole Hvězdy.

Slunce je hvězda, která je nám nejbližší. I přesto, že střední vzdálenost Země – Slunce je přibližně 150 milionů km ( $149\,597\,870\text{ km} = 1\text{ AU}$  „astronomical unit“, „astronomická jednotka“), je Slunce velmi blízko vzhledem k ostatním hvězdám. Další, nám nejbližší hvězda je vzdálena  $4 \cdot 10^{12}$  km – více než 1 parsec (pc - „parsek“).  $1\text{ pc} = 3,0857 \cdot 10^{13}\text{ km}$ . Proto je pro nás daleko snazší pozorovat Slunce a podle toho určovat chování jiných hvězd, Slunci podobných.

Dnes již všichni víme, že Slunce je středem naší sluneční soustavy. Dříve to lidé nevěděli. Pokud se podíváme dále do historie, tak až do 15. století našeho letopočtu byla za střed vesmíru považována Země. V 15. století přišel s revolučním heliocentrismem Mikuláš Koperník. Jako střed sluneční soustavy zvolil Slunce a planety nechal obíhat kolem něho. Přitom věděl, že vesmír jako celek je nekonečný, takže hledání jeho středu, tedy hledání středu něčeho, co nemá kraje, je v podstatě marné.

#### 3.1.1 Stavba Slunce a vznik sluneční energie.

Hmotnost Slunce je přibližně 332 hmotností Země a jeho průměr je 1,39 milionů km. To je více než 100krát víc než průměr Země.

Důležitost tohoto „obra“ je pro nás nejvýznamnější ze všech vesmírných těles. Bez světla a tepla ze Slunce by život na naší planetě brzy zanikl. Co je přesně to světlo a teplo, které naší planetě Slunce dodává?

Je to elektromagnetické vlnění, které vzniká v **jádru** Slunce termonukleárními reakcemi. (**Úkol 1**). *Úkoly jsou vždy na konci tématu a v textu je uvedeno číslo úkolu, který je doporučený v daném momentě výkladu uskutečnit.*

Sluneční látku tvoří převážně vodík (92,1 %), v menší míře helium (7,8 %) a stopová množství dalších prvků.

Každou sekundu se přemění 700 milionů tun vodíku na 695 milionů tun helia a 5 milionů tun hmotnosti se přemění na energii (96 % elektromagnetické záření a 4 % neutrina). O 5 milionů tun je tedy Slunce každou sekundu lehčí.

V tomto dokonalém atomovém reaktoru probíhají desítky reakcí. Nejrozšířenějším typem reakce je tzv. proton – protonový řetězec, kdy se čtyři jádra



vodíku (protony) spojí v jedno jádro helia  ${}^4_2\text{He}$ , obsahující 2 protony a 2 neutrony, se současným uvolňováním energie. Polovina protonů se musí změnit na neutrony. Při přeměně protonu na neutron se musí uvolnit ještě další 2 částice, aby byly splněny některé zákony zachování (např. zákon zachování elektrického náboje).

To vše probíhá při teplotě 15 milionů Kelvinů a hustotě, která je více jak 100 krát větší, než je hustota vody. A i přes takovou hustotu je toto prostředí ve skupenství plynném. Hustota středu Slunce je 146 krát větší než hustota vody.

Energie uvolněná v jádře ve formě gama záření se postupně mění na záření s většími vlnovými délkami, protože se zde fotony mnohonásobně pohltí a opět vyžáří v náhodném směru. Protože fotony se často vyzařují i směrem do centrální oblasti, není tento pohyb přímočarý, a proto trvá fotonům jejich pout' z jádra k povrchu statisíce, až miliony let.

Ve vzdálenosti přibližně 0,8 poloměru Slunce od slunečního středu se prudce mění fyzikální podmínky. Teplota nestačí na úplnou ionizaci plynu a volné elektrony se začínají spojovat s jádry atomů a vytvářejí se tak neutrální atomy. Díky tomu se zvyšuje schopnost plynu pohlcovat energii a roste tak jeho neprůzračnost. To ztěžuje přenos zářivé energie z hlubších vrstev a způsobuje výrazný pokles teploty. V důsledku tohoto poklesu teploty látka nemůže zůstat v klidu a přenos energie se dále děje promícháváním plynu, tzv. **konvekcí**, česky prouděním.

**Konvektivní zóna** má mocnost asi 200 tisíc km a energie je přenášena převážně prouděním – vztlková síla vynáší horké masy plynu z vnitřních vrstev Slunce na povrch této zóny. Tam se vyzařením části energie ve formě světla tato hmota ochlazuje a opět klesá do hlubších vrstev. Konvekce vyvolává některé projevy sluneční činnosti, např. granulaci, protuberance, sluneční skvrny, sluneční vítr atd.

Na horní hranici konvektivní zóny při teplotě 6000 stupňů přestává působit vztlková síla, která způsobuje konvekci. S výškou klesá dále hustota, tím se snižuje vztlak plynů, ale roste neprůzračnost, proto vzrůstá pohlcování záření.

Vrstva rozkládající se nad konvektivní zónou se nazývá **fotosféra** a má tloušťku 300 km. Zde se přenos energie opět děje převážně zářením. Většina slunečního záření, které vidíme, se vyzařuje z fotosféry, přičemž maximum připadá na viditelnou část spektra. Fotosféra je právě ta vrstva, kterou my vidíme. Pozorujeme v ní **granulaci** (zrnění), připomínající při pozorování žhavé uhlíky v dohasínajícím táboráku. (**Úkol 2**) Jsou to vrcholky vzestupných a sestupných proudů z konvektivní zóny, v případě zvýšené sluneční aktivity též **skvrny**. V místech, kde je magnetické pole silné, je zpomalena konvekce, která dopravuje na povrch teplejší plazmu z nitra. To se projevuje tím, že fotosféra je v těchto místech o něco chladnější a tmavší. Z fotosféry jsou vyvrhovány **protuberance** – obrovské „výtrysky“ plazmy, které magnetické pole udržuje po dny i týdny ve výšce nad slunečním povrchem. Poté se vrací zpět. V místech „výstupu“ a „vstupu“ vytrysklé plazmy se vyskytují sluneční skvrny.

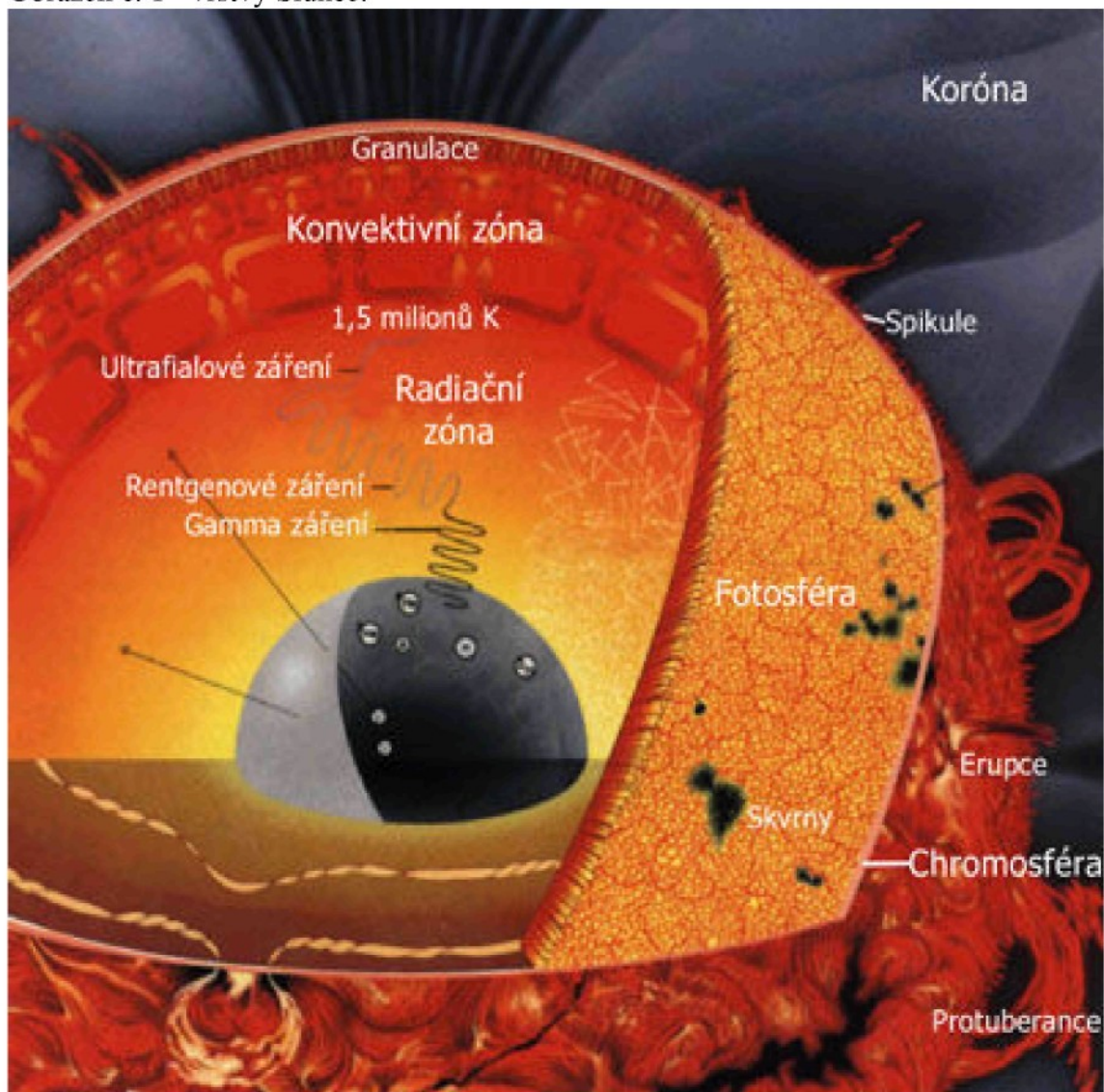
**Chromosféra** o tloušťce 10 až 15 tisíc km je řídká vrstva přiléhající svrchu těsně k fotosféře. Chromosféru normálně nevidíme, protože je tvořena velmi řídkým plynem, který je pro většinu světla průhledný. Jen pro světlo o určitých vlnových délkách se stává neprůhledným.

Nejvyšší vrstva sluneční atmosféry je **koróna**. Nemá ostré hranice a zasahuje hluboko do sluneční soustavy. Je průhledná pro jakékoliv světlo. Velmi slabě září a proto ji můžeme vidět jen při úplném zatmění Slunce, částečně též speciálními přístroji, koronografy. Teplota koróny je v blízkosti Slunce přibližně 1,5 milionu K. Jak

jsme si říkali, teplota ve fotosféře je téměř 6 000 K. Čím je způsoben tento vzestup teploty?

Plazma je ve vyšších vrstvách sluneční atmosféry nesmírně řídká, proto stačí i málo energie k tomu, aby se její teplota hodně zvýšila. Tato energie se do chromosféry a koróny dostává vlnami, které jsou vyvolávány pohyby plazmy při konvekci a magnetickým polem, které ovšem také vzniká díky konvekci.

Obrázek č. 1 - vrstvy Slunce.



Slunce je tvořeno žhavými plyny, přesněji plazmou, která vzniká ionizací plynů, tj. dodáním energie dostatečné k tomu, aby se alespoň od některých atomů oddělily elektrony. Plazma je směs záporně nabitých elektronů, kladně nabitých zbytků atomů (iontů) a neutrálních částic. Díky tomu je plazma elektricky velmi vodivá. V plazmě vzniká tedy elektrický proud a s ním i **magnetické pole**, což je způsobeno pohybem plazmy konvekci, i rotací Slunce. Magnetické siločivky se pohybují spolu s plazmatem a naopak. Tam, kde mohutná magnetická pole vyplouvají na povrch, vznikají aktivní oblasti. Magnetické pole hraje ve slunečním životě významnou roli. Je do něho ponořena celá sluneční soustava daleko za dráhu Pluta a je ovlivněno rotací Slunce,

takže se magnetické siločáry v meziplanetárním prostoru stáčí jako Archimédova spirála.

Sluneční povrch je jako vroucí kotel, z něhož často tryská plazma, doprovázená magnetickými výboji a **erupcemi**, které vznikají při náhlém uvolnění obrovské energie „uskládněné“ v magnetickém poli. Je to obdobný jev, jež nastává při přerušení proudu v cívce – její magnetické pole zaniká a elektromagnetickou indukcí místo něj vzniká na krátkou dobu elektrické pole. To „tlačí“ elektrony vinutím a obvykle způsobí jiskru v místě přerušení obvodu.

Podobně ve sluneční chromosféře někdy náhle zanikne magnetická „smyčka“ a tím vznikne silné elektrické pole, které zrychlí elektrony a protony na vysokou rychlost. Jejich uspořádaný pohyb se při srážkách mění v neuspořádaný tepelný pohyb, teplota v okolí prudce vzroste. Při erupci vzniká intenzivní elektromagnetické záření téměř všech oborů a také proud rychlých částic, elektronů a protonů, které se pohybují meziplanetárním prostorem. Samozřejmě tento proud nabitých částic dorazí za 4 až 5 dnů také na Zem, kde rozkmitá naše zemské magnetické pole. Tomu se říká **geomagnetická bouře**. Do magnetosféry Země vnikne větší počet nabitých částic, které vyvolávají **polární záře**. Dalším důsledkem erupcí je větší ionizace zemské ionosféry a tedy i lepší možnost krátkovlnného rádiového spojení na velké vzdálenosti.

Teplota několika milionu K je tak vysoká, že některé částice (protony, elektrony i jádra helia) neustále unikají z koróny do meziplanetárního prostoru. Proud těchto částic, který dosahuje daleko za dráhu Země, se nazývá **sluneční vítr**. V okolí Země je jeho hustota jen několik částic na  $\text{cm}^3$ , jeho rychlost několik  $\text{km/s}$ . Přesto celkový únik částic ze Slunce je asi milion tun za vteřinu.

Projevem slunečního větru je např. „odfukování“ ohonů komet tak, aby jejich ohony mířily směrem od Slunce. V dobách krátce po vzniku sluneční soustavy tento vítr „vyčistil“ její vnitřní části především od vodíku a helia, potom i od mikroskopického prachu, který zde zůstal a nepotřeboval se na tvorbu větších těles. Sluneční vítr neustále zásobuje naši magnetosféru novými nabitými částicemi a deformuje magnetické pole Země.

### 3.1.2 Rotace Slunce

Při pozorování slunečních skvrn je možné zjistit, že se Slunce otáčí s periodou zhruba 28 dní. Slunce se však neotáčí jako tuhé těleso, vzhledem k tomu, že je celé plynné. Skvrny na rovníku mají kratší dobu oběhu než skvrny vzdálenější od rovníku. Tak se pozná diferenciální rotace Slunce.

### 3.1.3 Vliv sluneční aktivity na Zemi.

Při pozorování Slunce se zjistilo, že sluneční aktivita (tvorba skvrn, protuberance, erupce, atd.) kolísá. Svých maxim dosahuje každých 11 let, ale i s nižší frekvencí. Mezi každými maximy jsou také minima. Historické záznamy ukazují, že v 2. polovině 17. století bylo Slunce asi v rozmezí 70 let téměř beze skvrn, tehdy sluneční aktivita prakticky ustala. V téže době citelně poklesla průměrná teplota v Evropě a nastala chladná léta a dlouhé a studené zimy. Toto období se někdy nazývá **malá doba ledová**. Zdá se, že pokles sluneční aktivity nějak souvisí s poklesem výkonu Slunce. V tom případě by bylo možné i to, že dlouhodobý pokles sluneční aktivity doprovázený poklesem výkonu Slunce způsobilo skutečné doby ledové. (**Úkol 3**)

### 3.1.4 Jak bude Slunce vypadat v budoucnu?

Až zhruba za 5 miliard let spálí Slunce vodík, stane se z něj **červený obr**. Sluneční obal se „rozedme“ a Slunce se bude postupně zvětšovat. Když bude 3x větší než je dnes, pohltí planety Merkur, Venuši i Zemi. Degenerované jádro Slunce skončí jako **bílý trpaslík** (zpočátku modrý s teplotou 100 tisíc K) zatímco se jeho vrstvy rozeprnou jako planetární mlhovina do mezihvězdného prostoru. Po více než 100 miliardách let bílý trpaslík vychladne v **černého trpaslíka**. Co je to bílý a černý trpaslík a červený obr si povíme v kapitole **Hvězdy**.

Vzhledem k tomu, že se Slunce 3x zvětší, tak dříve zanikne život na Zemi než díky „vyhasnutí“ Slunce, ale naopak tím, že Slunce naši Zemi spálí.

Tabulka č. 2 - základní údaje o Slunci.

|                                                                                                              |                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Stáří                                                                                                        | 4,5 miliardy let                                         |
| Poloměr                                                                                                      | $6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$                              |
| Vzdálenost od Země (1 AU)                                                                                    | 149 597 870,61 km                                        |
| Perioda otáčení na rovníku                                                                                   | 25 dnů                                                   |
| Perioda otáčení na pólech                                                                                    | 34 dnů                                                   |
| Hmotnost                                                                                                     | $1,98 \cdot 10^{30} \text{ kg}$                          |
| GM                                                                                                           | $1,327124 \cdot 10^{20} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ |
| Tíhové zrychlení na „povrchu“                                                                                | $273,95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$                   |
| Průměrná hustota                                                                                             | $1410 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$                    |
| Teplota povrchu                                                                                              | 5 777 K                                                  |
| Teplota jádra                                                                                                | 14 milionů K                                             |
| Zářivý výkon                                                                                                 | $3,83 \cdot 10^{26} \text{ W}$                           |
| G je gravitační konstanta. $G = 6,67259 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ |                                                          |

### 3.1.5 Úkoly a jejich řešení

**Úkol 1.** Dokažte, že Slunce nemůže svou energii získávat chemickou reakcí – spalování vodíku.<sup>1</sup>

*Řešení.: Podle MFChT se spálením 1 kg vodíku získá energie přibližně  $10^8 \text{ J}$ . Při výkonu Slunce  $3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}$  by bylo třeba spalovat  $3,8 \cdot 10^{18} \text{ kg}$  vodíku každou sekundu. Pokud by bylo Slunce pouze z vodíku, tak vzhledem k jeho hmotnosti by vystačila zásoba paliva přibližně na  $5 \cdot 10^{11} \text{ s}$ , což je zhruba 17 000 let.*

*(Je třeba si uvědomit nízkou efektivitu získávání energie spalováními jinými chemickými reakcemi).<sup>1</sup>*

**Úkol 2.** Při pohledu ze Země mají granule úhlový průměr okolo 1,3" (úhlové vteřiny). Odhadněte skutečný průměr granule na slunečním povrchu.<sup>1</sup>

*Řešení.: Přibližně 1 000 km.<sup>1</sup>*

**Úkol 3.** Zářivý tok dopadající ze Slunce na plochu o obsahu  $1 \text{ m}^2$  postavenou kolmo ke směru slunečních paprsků ve vzdálenosti 1 AU od Slunce je  $1\,369 \text{ W}$ . (Solární konstanta  $1369 \text{ W/m}^2$ ).

Určete: a) jaký zářivý tok dopadá ze Slunce na plochu o obsahu  $1 \text{ m}^2$  ve vzdálenosti 0,5 AU od Slunce, b) jaký zářivý tok dopadá za Slunce na plochu o obsahu  $0,5 \text{ m}^2$  ve vzdálenosti 1 AU od Slunce.

*Řešení:* Pro zářivý tok  $\Phi$  dopadající ze Slunce kolmo na plochu o obsahu  $S$  ve vzdálenosti  $r$  od Slunce platí vztah  $\phi = \frac{L_{\odot}}{4\pi r^2} S$ .  $L_{\odot}$  je zářivý výkon Slunce. Výsledek:

a)  $5600 \text{ W}$ , b)  $700 \text{ W}$ .

**Úkol 4.** Každou sekundu Slunce ztratí  $5 \cdot 10^6$  tun své hmotnosti. Určete, kolik procent své původní hmotnosti ztratilo za dobu svého života, tedy za  $4,5 \cdot 10^9$  let.

*Řešení:* Výsledek je přibližně  $0,036\%$ .

## 3.2 Země

Na fotonech, které vyžáří Slunce se „svezeme“ na Zemi, která je pro nás nejdůležitější planetou.

Země je jedna z tzv. **vnitřních** planet, mezi které dále patří Merkur a Venuše. Ostatní planety, které obíhají ve větší vzdálenosti než Země od Slunce se nazývají **vnější**.

Postup bude podobný jako u Slunce. Směrem od středu Země a budou popisovány jednotlivé vrstvy až na povrch a dále na okraj naší atmosféry.

### 3.2.1 Zemské nitro

Na začátku této kapitoly doporučuji žákům položit otázku: „Jakým způsobem vědci zkoumají Zemské nitro?“.

V případě, že někteří odpovědí „Vrty“, tak můžeme jednoduše argumentovat. Nejhlubší vrty se provádějí do hloubky řádově deseti kilometrů, což je v porovnání s poloměrem Země ( $6\,378 \text{ km}$ ) jako bychom zkoumali z jablka pouze zlomek jeho slupky.

Zemské nitro je možné zkoumat prostřednictvím **seizmických vln**. Jsou to zvukové až infrazvukové vlny o velmi nízké frekvenci (perioda  $0,1 - 25 \text{ s}$ ), které vznikají při zemětřesení a šíří se Zemí na velké vzdálenosti. Porovnáním časů, kdy dorazily na různé seizmické stanice, můžeme určit rychlost šíření v různých hloubkách pod povrchem Země. Tato rychlost závisí na hustotě prostředí a na jeho pružnosti.

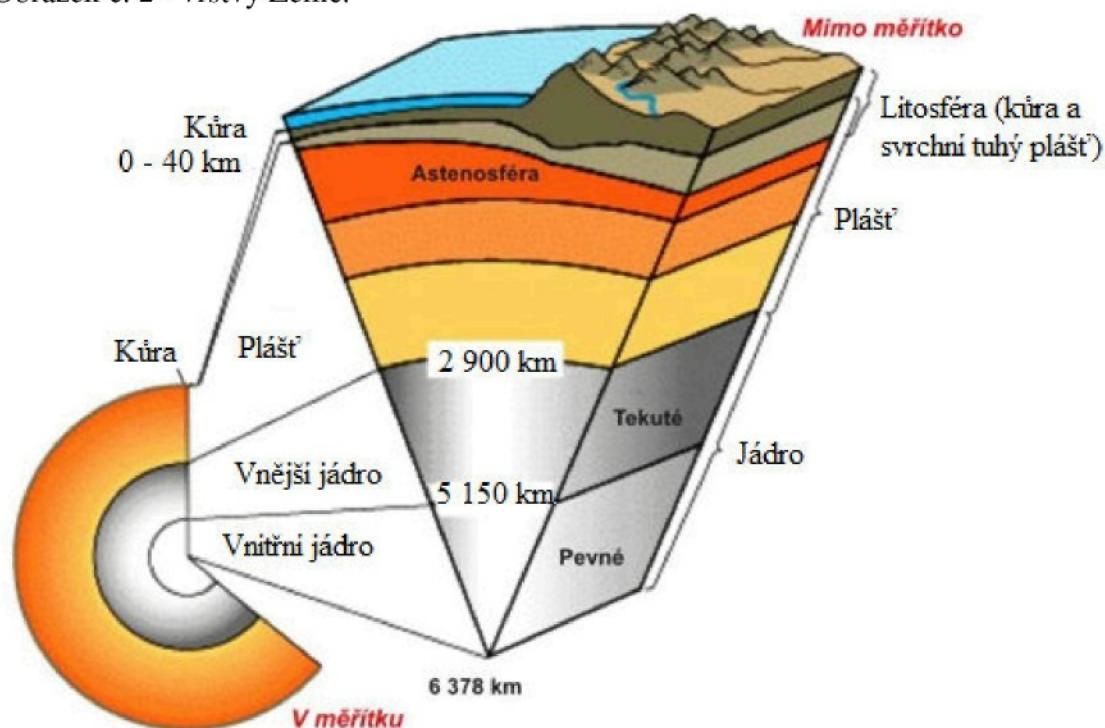
Na jednu stranu je zemětřesení znamením katastrof a na druhou stranu jen díky jeho studiu víme víc o složení naší planety.

Prostřednictvím sopečné činnosti a zemětřesení se povrch Země neustále mění a tak regeneruje. Na rozdíl od jiných planet je Země aktivní a tím je nejspíš unikátem v naší sluneční soustavě.

Analýzou velkého množství seizmických dat se zjistilo, že rychlost seizmických vln se prudce mění v hloubce přibližně  $5 \text{ km}$  (pod oceány) až  $40 \text{ km}$  (pod kontinenty) a dále v hloubkách  $2\,900 \text{ km}$  a  $5\,150 \text{ km}$  pod povrchem. Tyto 3 hranice dělí nitro Země na **zemskou kůru oceánskou a kontinentální, plášť, vnější a vnitřní jádro**.



Obrázek č. 2 - vrstvy Země.



Při vzniku Země migrovaly těžké prvky jako železo a nikl do středu Země a ostatní lehčí hmoty směrem k povrchu. Srdce Země je tvořeno tuhým vnitřním jádrem a tekutým vnějším jádrem. Hustota mezi vnějším a vnitřním jádrem je od  $12\,300\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  do  $13\,300\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Hustota ve středu Země roste až na hodnotu  $13\,600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

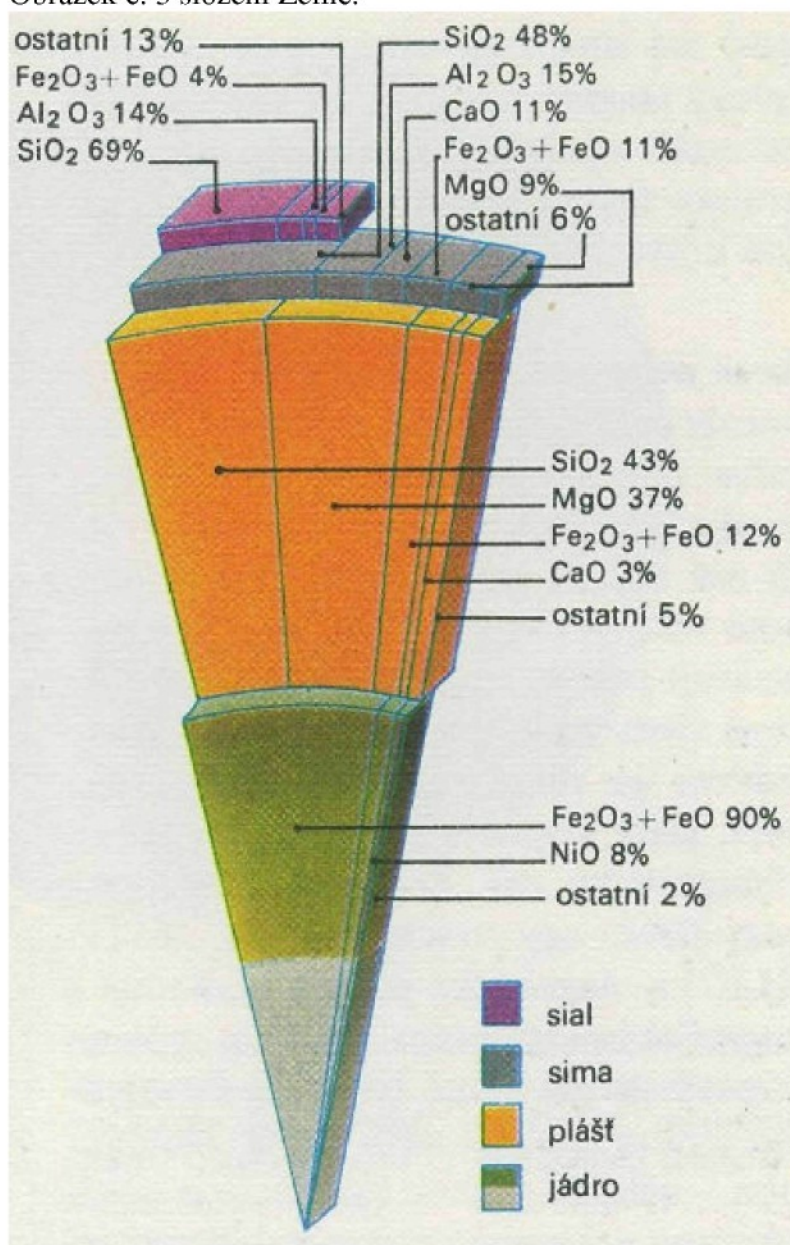
Teplota při sestupu do hlubokých dolů roste asi o  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  na kilometr a rovněž sopky a horké prameny svědčí o vysoké teplotě Země v hloubce. Snad díky tomu naši předkové umisťovali peklo právě sem.

Na hranici kůry a pláště je teplota asi  $375^{\circ}\text{C}$ , přičemž teplota ve svrchní vrstvě pláště je až  $800^{\circ}\text{C}$  a ve hloubce  $1\,000\text{ km}$   $1\,800^{\circ}\text{C}$ . Ve spodní části pláště, v hloubce  $2\,000\text{ km}$ , je teplota odhadována na  $2\,250^{\circ}\text{C}$ . Na hranici pláště a jádra stoupá teplota přibližně na  $2\,500^{\circ}\text{C}$ . Teplota ve středu Země se odhaduje na  $3\,000^{\circ}\text{C}$ .

Jak bylo řečeno, Země je tvořena třemi hlavními vrstvami, a to zemskou kůrou, pláštěm a jádrem. Kůrase se dělí dále na oceánskou a kontinentální. Svrchní kontinentální kůra je tvořena horninami podobnými žule bohaté na křemík a hliník (silicium a aluminium). Proto se této vrstvě říká sial. Oceánská kůra je složena v podstatě z čediče bohatého na křemík a hořčík (silicium a magnesium). Této vrstvě se tedy říká sima. Čedičová vrstva leží také pod kontinentální žulovou vrstvou.

Plášť je složen se skládá z horniny bohaté na silikáty hořčíku a železa. Husté jádro obsahuje pravděpodobně hlavně železo a nikl v tekutém stavu ve vnější vrstvě a v pevném stavu ve vrstvě vnitřní. Ačkoliv jádro tvoří jen 16 % objemu Země, představuje však 32 % její hmoty.

Obrázek č. 3 složení Země.



### 3.2.1.1 Zdroj energie Země

Je možné, že by vysoká teplota zemského nitra byla pozůstatkem z doby, kdy se Země tvořila? Výpočet, který bere v úvahu tepelnou vodivost materiálu Země i jeho měrnou tepelnou kapacitu, ukazuje, že rozžhavené zemské nitro by za dobu existence Země vychladlo na mnohem nižší teplotu, než jakou má dnes. Z toho plyne, že Země je neustále ohřívána.

Zdrojem této energie jsou radioaktivní přeměny látek v nitru Země, především uranu, thoria a draslíku <sup>40</sup>K. Při těchto přeměnách z jader vyletí částice  $\alpha$  (jádra helia) a  $\beta$  (elektrony), které narážejí do okolních částic, rozkmitávají je a tím látku zahřejí.<sup>1</sup>



Radioaktivních jader je ovšem poměrně málo, např. uranu je téměř stamilionkrát méně než železa. Kromě toho se jejich jádra rozpadají nesmírně pomalu, s poločasem přeměny několik miliard let. Například 1 g uranu  $^{238}\text{U}$  vydá za rok teplo jen přibližně 3 J. Jak je tedy možné, že to stačí na zahřátí látky v nitru Země na teplotu několika tisíc Kelvinů? Souvisí to s obrovskými rozměry Země. Z běžného života víme, že malý hrníček horké vody vychladne daleko dříve než velký kotel. Nitro velké planety jako je Země se proto může radioaktivními rozpady zahřát na vysokou teplotu, kdežto menší planety příliš rychle chladnou, než aby se v nich taková teplota vytvořila a udržela. (Úkol 1,2)

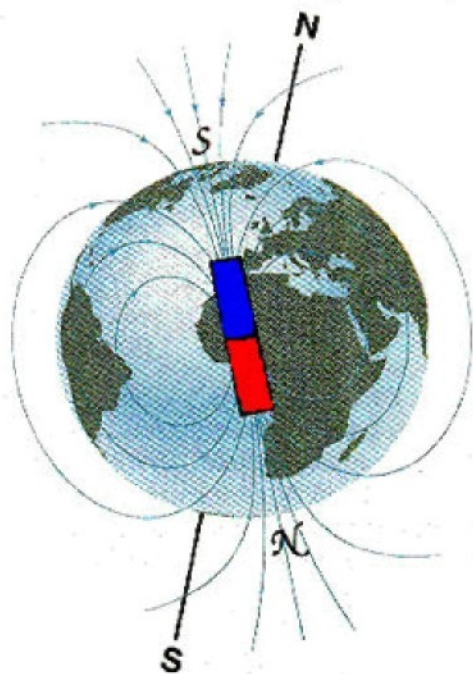
Vysoká teplota uvnitř Země má několik velmi důležitých příčin. Především způsobila nehomogenitu zemského nitra. Jako v obrovské vysoké peci se z taveniny uvnitř Země oddělily těžké kovy, zejména železo, a klesly ke středu. Právě to vysvětluje, proč má jádro jiné chemické složení než plášť a proč je jeho hustota mnohem vyšší než hustota zemské kůry.<sup>1</sup>

### 3.2.1.2 Zemský magnetismus

Důsledkem existence kapalného kovového jádra je zemské magnetické pole.<sup>1</sup> Vzniká kombinací dvou jevů, rychlého otáčení Země a konvekce v jádře. Protože roztavené železo, kterým je tvořeno jádro, je elektricky vodivé, indukuje se v něm při pohybech v slabém magnetickém poli elektrický proud, který obráceně zase způsobuje silnější magnetické pole. Tento proces je podobný tomu, jak vzniká elektrický proud v dynamu, a proto se mu říká dynamový jev. Magnetické pole je pro nás velmi důležité, vzhledem k tomu, že zemskou i nás chrání před rychlými nabitými částicemi ze Slunce.

Vzhledem k tomu, že magnetické pole Země vzniká díky jejímu otáčení, jsou zemské magnetické póly blízko pólům zeměpisným. Polarita je však opačná. V blízkosti zeměpisného severního pólu je jižní magnetický pól. Často se mu nesprávně říká severní.

Obrázek č. 4 - zemské magnetické pole.





### 3.2.1.3 Litosféra a astenosféra

Dalšími důsledky vysoké teploty v nitru Země jsou pohyb kontinentů, tvorba hor, sopečná činnost a zemětřesení. Zemská kůra spolu s nejsvrchnější vrstvičkou pláště se dohromady nazývá **litosféra** (lithos znamená řecky kámen). Materiál litosféry se chová jako pevná látka. Naproti tomu v hloubce více než 100 km je materiál pláště už pod takovým tlakem a teplotou, že se z dlouhodobého hlediska chová jako plastická látka.<sup>1</sup> Tyto vlastnosti můžeme přirovnat např. k asfaltu. Je tak pevný, že se dá zlomit, ale za několik let vyteče z obrácené nádoby, i když je studený. Tato část pláště se nazývá **astenosféra**.

Astenosféra je zdola zahřívána a shora ochlazována. Proto v ní vzniká konvekce, i když rychlost konvektivního proudění je daleko menší, než v kapalném jádru. Při povrchu se svislé konvektivní proudění mění na vodorovné a unáší přitom litosféru, která na astenosféře „plave“.

Litosféra se nepohybuje celá najednou. Konvektivní proudění astenosféry rozdělilo litosféru na přibližně 12 velkých litosférických desek neboli ker. Ty se od sebe v některých místech vzdalují a v jiných na sebe narážejí a podsouvají se jedna pod druhou. Při tomto podsouvání vznikají **hlubokomořské příkopy** (např. Mariánský příkop).

Tam, kde na sebe obě desky tlačí a část jejich materiálu se přitom zvedá do výšky, vznikají dlouhé horské řetězy (Kordillery, řetěz od Pyrenejí přes Alpy a Kavkaz až po Himaláje). Ty jsou typické pro povrch Země a nenajdeme je na žádné z ostatních planet Sluneční soustavy. To znovu podtrhuje unikátnost naší planety. **(Úkol 3)**

Při srážkách desek vzniká v horninách napětí, které se občas uvolní nejničivější přírodní katastrofou, zemětřesením. Proto dochází k zemětřesení především na hranicích litosférických desek, které se k sobě přibližují. Těmi místy jsou západní pobřeží celé Ameriky a linie Aljaška-Kamčatka-Japonsko-Filipíny-Nový Zéland).

Jiné litosférické desky se zase od sebe vzdalují. Tím je způsobeno například vzdalování Ameriky od Evropy rychlostí několika cm za rok. Ve středu Atlantského oceánu přitom z prostoru mezi deskami pomalu a neustále vystupuje nový materiál z astenosféry a tvoří nové mořské dno.

Rychlost, kterou se kontinenty pohybují, se dnes dá přesně měřit například pomocí družic. Díky tomu můžeme snadno vypočítat, že zhruba před 180 miliony let tvořily všechny kontinenty jeden celistvý, zvaný **Pangea**. **(Úkol 4)**

Předpokládá se, že kontinent Pangea neexistoval po celou dobu od vzniku Země před 4 600 miliony lety. Cyklus, při němž se různé pevniny spojily v jednu a opět rozdělily, se pravděpodobně opakoval po 500 milionech roků.

Jiná teorie říká, že Měsíc kdysi rotoval spolu se Zemí takzvanou vázanou rotací ve vzdálenosti jeden až dva průměry Země. To znamená, že Měsíc se držel stále nad stejným místem Země. Zde se díky slapovým silám Měsíce začal hromadit materiál a voda, která s sebou také přinášela další hmotu. Tím vznikl jeden souvislý kontinent. Když se Měsíc vzdálil a jeho rotace již nebyla vázána se Zemí, tento kontinent se začal rozpouštět a dělit na více částí.

### 3.2.2 Zemská atmosféra

Kolem Země se rozkládá atmosféra o hmotnosti pouze miliontiny planety, její přítomnost je však jednou z podmínek existence života. Zadržuje nebezpečné druhy

záření přicházející ze Slunce i z kosmu a zabraňuje vzniku příliš velkých tepelných rozdílů.

78 % objemu zemské atmosféry tvoří dusík  $N_2$ , 21 % kyslík  $O_2$ , 1 % argon Ar a zbytek jsou stopová množství  $CO_2$ , vodních par a jiných plynů.

Toto chemické složení je následkem fotosyntézy. V původní atmosféře Země nebyl žádný čistý kyslík.

V porovnání s poloměrem Země je atmosféra velmi tenké vrstva. 99 % vzduchu je obsaženo ve výšce do 35 km.

Většina  $CO_2$  je na Zemi vázána v uhličitanech, především ve vápenci. Kdyby se všechen tento  $CO_2$  uvolnil ve formě plynu, stala by se pozemská atmosféra velmi podobná atmosféře na Venuši, která je daleko hustší a má asi 100krát větší hmotnost. Díky tomu by na planetě Zemi došlo ke **skleníkovému jevu** (viz. kapitola 1.2.2.2 Skleníkový jev) a teplota by na zemském povrchu rapidně stoupla.

Katastrofa takového rozsahu jistě nehrozí, ale jisté je, že životní podmínky na Zemi jsou velmi citlivé na změny průměrné roční teploty a to např. i o několik stupňů. Například v době ledové byla průměrná teplota na Zemi „pouze“ o  $4^{\circ}C$  nižší než dnes.

Doporučuji položit otázku, jaký důsledek by měl na životní prostředí nárůst průměrné roční teploty na Zemi o  $4^{\circ}C$ .

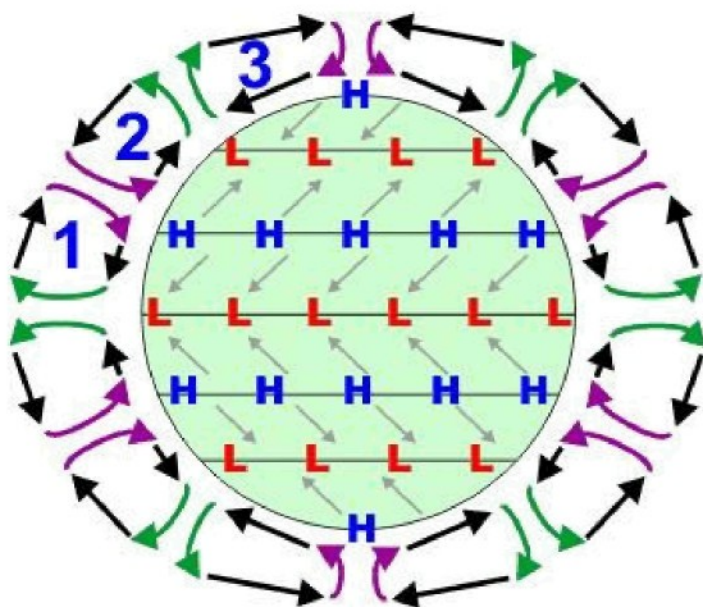
### 3.2.2.1 Složení atmosféry

Asi 90% hmotnosti atmosféry je obsaženo v její nejnižší vrstvě, která se nazývá **troposféra** a sahá až do výšky 11 až 14 km od povrchu Země (má různou výšku v různých zeměpisných šířkách). Položme otázku, která veličina klesá, cestujeme-li na hory. Mimo jiné je to i teplota, která klesá s nadmořskou výškou. Tím je charakteristická troposféra.

Tento jev je způsobován konvekcí. Zemský povrch je ohříván Sluncem a vzduch se ohřeje o zemský povrch. Tím se sníží hustota vzduchu a tento teplejší vzduch v okolí chladnějším a hustším stoupá vzhůru podle Archimédova zákona. Protože se tlak vzduchu s výškou zmenšuje, „bublina“ teplejšího vzduchu se s výškou rozpíná. Tento děj se blíží ději adiabatickému – vzduch je špatným vodičem tepla, takže „bublina“ nedostává téměř žádné teplo zvenčí. Při adiabatickém rozpínání se teplota plynů snižuje, proto se také ochlazuje „bublina“ vzduchu při výstupu vzhůru. Je-li v „bublině“ i vodní pára, může tímto ochlazením dosáhnout rosného bodu. Vzniknou mraky a déšť.

Nejvíce se vzduch ohřívá a stoupá v blízkosti rovníku. Z toho plyne, že na jiných místech musí vzduch klesat. Zobrazíme-li si, ve kterých zeměpisných šířkách vzduch většinou klesá a ve kterých většinou stoupá, získáme typický obrázek **globálního proudění v troposféře**.<sup>1</sup> Toto proudění má velký vliv na podnebí v různých oblastech Země.

Obrázek č. 5 - globální proudění v troposféře.



Vysvětlivky:

H - vysoký tlak

L - nízký tlak

1 - Hadleyova buňka

2 - Ferrelova buňka

3 - Polární buňka

Pod místy, kde je vzduch ohřátý a stoupá, se atmosférický tlak o něco sníží a vznikne **tlaková níže**. Jak již bylo uvedeno, při výstupu se vzduch adiabaticky ochlazuje a vodní pára, kterou vzduch obsahuje, se sráží, a proto je pro tlakovou níže charakteristické deštivé počasí. Vzestupné proudění a tlakové níže jsou typické v oblastech přibližně do 10° na sever a na jih od rovníku a dále pro oblasti přibližně 50° a 70° na obou polokoulích. (**Úkol 5**)

Tam, kde vzduch klesá naopak dolů, vzniká **tlaková výše**. Při sestupu se vzduch adiabaticky zahřívá. Studený vzduch obsahuje málo vodních par. Při zahřátí se jeho relativní vlhkost dále snižuje, a proto nepřináší srážky, ale naopak vysušuje půdu. Sestupné proudění vzduchu je charakteristické pro subtropické oblasti. (**Úkol 6**)

Globální proudění ve velmi hrubých rysech vysvětluje základní charakter rozdělení klimatu na Zemi, ale významnou roli hrají i lokální činitelé. Například je to proudění mezi oceánem a pevninou, **monzuny** (vítr, který mění směr se změnou ročního období). V létě se vzduch nad pevninou ohřívá rychleji než nad oceánem, stoupá vzhůru a vodní pára se v něm sráží. Proto monzuny přinášejí v Indii období dešťů.

Jiným významným činitelem jsou **horská pásma**, která na návětrné straně nutí vzduch k výstupu a tím opět vyvolávají srážky. Díky tomu je dost srážek například na východním pobřeží Austrálie nebo v podhůří Himalájí i přesto, že obě tyto oblasti leží blízko obratníku, tedy v suchých oblastech.

Klima je též ovlivňováno **mořskými proudy**. Například Golský proud otepluje severozápadní Evropu. Jeho vliv postihuje i nás.

Nad troposférou začíná další vrstva atmosféry nazývaná se **stratosféra**. Je charakteristická tím, že pokles teploty s výškou se zde zastavuje a přechází v růst.

Pro Zemi je stratosféra velmi důležitá obsahem **ozonu**  $O_3$ . Ozon vzniká tím, že nejprve fotony slunečního záření rozdělí molekuly  $O_2$ . Vzniklé atomy kyslíku  $O$  se potom slučují s molekulami  $O_2$  na molekuly  $O_3$ . Tato vrstva plynu  $O_3$  se nazývá **ozónová vrstva**. I přes její velmi nízkou hustotu nás chrání pohlcováním slunečního ultrafialového záření, které je pro nás nebezpečné tím, že rozkládá organické molekuly.

Život na Zemi mohl vystoupit na souš až tehdy, když působením zelených rostlin v moři vznikl dostatek kyslíku a z něj se vytvořila ozónová vrstva. Stalo se tak asi před 400 miliony let.

V 60. a 70. letech 20. století lidé začali široce používat freony (chlorofluorokarbyny), které vznikají z lehkých uhlovodíků úplnou substitucí chloru nebo fluoru za vodík (např.  $CCl_4$ ). Tyto velmi stabilní chemické látky, které lze zkapalnit stlačením za pokojové teploty, byly používány jako pracovní látka v chladničkách a mrazicích zařízeních a zejména jako hnací plyn v nejrůznějších sprejích. Každým rokem byly do atmosféry vypouštěny tisíce tun freonů a většina tohoto množství je tam dodnes.

Pokud se molekula freonu dostane atmosférickým prouděním do stratosféry, rozloží ji sluneční záření na atomy. Volný atom  $Cl$  nebo  $F$  se pak může spojit s molekulou ozonu, rozloží ji a pak se z ní opět nezměněný uvolní. Takto může jediný atom  $Cl$  nebo  $F$  rozložit miliony molekul ozonu, než stratosféru za desítky let opustí.

Zásobárnou atomů  $Cl$  a  $F$  ve stratosféře jsou především mraky ledových krystalků nad oběma póly, zvláště nad jižním. Z tohoto důvodu byl zjištěn nejvyšší úbytek stratosférického ozonu – **ozonová díra** – nad Antarktidou.

Pojem „ozonová díra“ se postupně dostal z vědeckých konferencí do sdělovacích prostředků a veřejnost si začala uvědomovat nebezpečí, které způsobovala hromadná výroba freonů. Silnější ultrafialové záření přicházející ze Slunce zvyšuje u člověka i u zvířat výskyt rakoviny kůže a poškozuje oči.

Naštěstí jsou freony celkem jednoduše nahraditelné všude, kde byly používány. V roce 1987 se v kanadském Montrealu sešli představitelé většiny průmyslových států a podepsali dohodu o postupném zrušení výroby freonů.

I přesto, že se dnes dostane do atmosféry mnohem méně freonů než koncem 80. let, bude ještě velmi dlouho pokračovat ztenčování ozonové vrstvy působením chloru a fluoru, které už ve stratosféře jsou. (Úkol 7)

Další vrstva atmosféry je **ionosféra**. Ultrafialové záření ze Slunce může ionizovat atomy a molekuly, tedy odtrhnout od nich elektron. V nižších vrstvách atmosféry je hustota vzduchu tak vysoká, že se kladný iont prakticky okamžitě srazí s elektronem a rekombinuje s ním opět na neutrální atom nebo molekulu.<sup>1</sup>

Ve výškách nad 60 km je hustota vzduchu malá a doba života iontu je tam proto tak dlouhá, že v kterýkoliv okamžik je přibližně jeden atom z milionu ionizován. Ionosféru v podstatě tvoří slabě ionizovaný plyn (plazma), který je významný elektrickou vodivostí v důsledku přítomnosti volných elektronů a iontů. Má velký význam pro šíření radiových vln, které se od ionosféry mohou odrážet a šířit daleko od vysílače.

### 3.2.2.2 Skleníkový jev

Atmosféra Země obsahuje **skleníkové plyny**, jako jsou oxid uhličitý  $\text{CO}_2$ , vodní pára  $\text{H}_2\text{O}$ , metan  $\text{CH}_4$  a další. Tyto plyny pohlcují infračervené záření podobně jako sklo. Proto se jim říká skleníkové plyny.

Každé těleso neustále vyzařuje elektromagnetické záření. Tělesa, jejichž teplota je velmi nízká, vysílají převážně rádiové záření. Při pokojové teplotě tělesa vyzařují infračervené záření a žhavá tělesa i viditelné světlo. Čím vyšší teplota tělesa je, tím kratší je vlnová délka tepelného záření tělesa, ale vyšší frekvence záření. Platí **Wienův posunovací zákon**. Tento fyzikální zákon říká, že v záření absolutně černého tělesa je maximální energie vyzařována na vlnové délce, která se s rostoucí termodynamickou teplotou snižuje. Platí vztah

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} ,$$

kde  $\lambda_{\max}$  je vlnová délka maxima vyzařování,  $T$  je termodynamická teplota tělesa a  $b$  je Wienova konstanta, jejíž hodnota je přibližně  $2,898 \text{ mm}\cdot\text{K}$ .

Slunce, které má povrchovou teplotu téměř  $6\,000 \text{ K}$ , vyzařuje převážně *viditelné světlo*.<sup>1</sup> To dopadá na planety. Část se pohltí a ohřívá povrch planety a část se odrazí. Planeta ovšem vysílá i vlastní tepelné záření. Protože povrch planety je daleko chladnější než povrch Slunce, vyzařuje převážně infračervené záření.

Když planeta vyzařuje méně energie, než kolik jí přijme, pak její střední teplota stoupá a vyzařovaný výkon se zvětšuje.<sup>1</sup> Když naopak vyzařuje víc, než přijme, její teplota klesá a vyzařovaný výkon se zmenšuje. Důsledkem toho je, že planeta dosáhne rovnovážné teploty, při které se přijímaný výkon rovná vyzařovanému. Tato rovnovážná teplota  $T_0$  závisí na vzdálenosti planety od Slunce, na vlastnostech jejího povrchu a na tom, jak planeta rotuje.

Pokud planetu zahálíme atmosférou ze skleníkových plynů, tak skrze tyto plyny projde sluneční záření směrem k povrchu planety, ale pro infračervené záření se stávají tyto plyny částečně neprůhledné. Z toho plyne, že atmosféra ze skleníkových plynů pouští energii „dovnitř“, ale ne už všchnu „ven“. Teplota takové atmosféry se zvýší a tím se zvýší i teplota povrchu planety. S rostoucí teplotou však přeci jen planeta vyzařuje do vesmíru víc a víc energie, až se při vyšší teplotě  $T_1$  ustálí nová rovnováha mezi přijímaným a vysílaným zářením.

Skleníkové jevy jsou v podstatě dvojího druhu.

**Přírodní skleníkový jev** se vyskytuje přirozeně na Zemi téměř od samotného počátku jejího vzniku. Je mylné vnímat jej jako škodlivý, neboť bez výskytu přirozených skleníkových plynů by průměrná teplota při povrchu Země byla  $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ . Účinek přirozeného skleníkového efektu se tak stal nezbytným předpokladem života na Zemi.

**Antropogenní skleníkový jev.** Jeho původ tkví v lidské činnosti (nejčastěji spalování fosilních paliv, kácení lesů a globální změny krajiny, ...). (Úkol 8)

Stále existují různé názory na to, co způsobuje globální oteplování. Jedni tvrdí, že množství skleníkových plynů produkovaných člověkem má za následek globální oteplování. Obzvláště se hovoří o vypouštění  $\text{CO}_2$ . Současně probíhá řada politických i veřejných debat, zabývajících se možnostmi, jak případné oteplování a jeho vlivy omezit nebo jak se vyrovnat s jeho důsledky.

Jiné skupiny vědců mají odlišný názor. Hovoří v podstatě o tom, že zvýšené množství  $\text{CO}_2$  v atmosféře nemá za následek globální oteplování. Je tomu spíše naopak.

CO<sub>2</sub> je produktem globálního oteplování, které je způsobováno zvýšenou sluneční aktivitou v určitých cyklech. Zvýšením teploty se začnou ohřívat oceány a moře, které začnou produkovat více CO<sub>2</sub>. I přesto, že je ohřátí minimální, může trvat několik set let a s tímto zpožděním se vyskytuje zvýšené množství CO<sub>2</sub> v atmosféře.

Navíc CO<sub>2</sub> není zdaleka nejrozšířenější skleníkový plyn. Nejvíce zastoupený skleníkový plyn v atmosféře je vodní pára.

Dále se skleníkovému jevu a globálnímu oteplování přisuzuje tání ledovců. Ledovce se zvětšují a zmenšují v určitých cyklech, a to bez závislosti na tom, kolik CO<sub>2</sub> vypouští člověk do atmosféry.

Určitě nelze podceňovat ani jeden z výše uvedených názorů. Do omezování produkce skleníkových plynů se celosvětově investuje mnoho finančních prostředků, a proto by bylo pravděpodobně dobré vědět, jaká je skutečnost. Zda je investice v této míře nutná nebo jestli je možné ji snížit, popřípadě zda je zapotřebí investovat více.

Tabulka č. 3 - skleníkové plyny.

| <b>Skleníko-<br/>vý plyn</b> | <b>Přírůstek<br/>množství<br/>skleníkového<br/>plynu v atmosféře<br/>mezi roky 1780 –<br/>1995 [%]</b> | <b>Přírozené a antropogenní zdroje</b>                                                                                                                                                                                                                                                   | <b>Ekvivalent<br/>CO<sub>2</sub></b> |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Vodní<br>pára                | -                                                                                                      | Moře, oceány, sladkovodní zdroje -<br>hydrosféra obecně.                                                                                                                                                                                                                                 | >10 000                              |
| CO <sub>2</sub>              | + 29                                                                                                   | Spalování fosilních paliv a biomasy<br>(80 %), odlesňování, aerobní rozklad<br>organických látek, lesní požáry,<br>vulkanická činnost, eroze ...                                                                                                                                         | 1                                    |
| CH <sub>4</sub>              | +143                                                                                                   | Mokřady, močály a tundra (20 %).<br>Anaerobní rozklad organických látek,<br>termity, tlení organismů a skládky<br>odpadů (5 %). Zpracování zemního<br>plynu a ropy, uhelné zdroje, úniky<br>plynu (10 %). Chov dobytka,<br>pěstování rýže (25 %). Tání<br>permafrostů (stálých ledovců). | 20                                   |
| N <sub>2</sub> O             | +11                                                                                                    | Lesy, louky, oceány, půda, zpracování<br>půdy, zemědělská hnojiva, spalování<br>fosilních paliv a biomasy.                                                                                                                                                                               | 200                                  |
| CFC<br>(freony)              | -                                                                                                      | Chladicí zařízení (30 %), aerosoly<br>(30 %), plastické pěny (32 %),<br>rozpouštědla, počítačový průmysl,<br>sterilanty, farmaceutický průmysl<br>(8 %).                                                                                                                                 | 7500                                 |
| O <sub>3</sub> (ozón)        | Globální množství<br>pokleslo ve<br>stratosféře a<br>vzrostlo v blízkosti<br>zemského povrchu.         | Vytváří se přirozeně reakcí<br>fotochemickou reakcí slunečního<br>záření s molekulami kyslíku a uměle<br>jako součást fotochemického smogu                                                                                                                                               | 2000                                 |

### 3.2.3 Vesmír nad atmosférou

Mineme-li ionosféru a vzdalujeme se ještě dále od zemského povrchu, hustota vzduchu stále klesá a atmosféra pozvolna mizí. Ale „sféra vlivu“ Země hranicemi atmosféry nekončí. Zemské magnetické pole totiž působí na nabité částice, elektrony a protony, které do meziplanetárního prostoru vysílá Slunce. Proud těchto částic se nazývá sluneční vítr. Lorenzova síla, která působí na nabité částice, pohybující se v magnetickém poli, způsobuje, že částice mění směr pohybu a pohybují se po šroubovici, jejíž osa sleduje magnetické indukční čáry. Země tak okolo sebe udržuje až do vzdálenosti několika svých poloměrů tzv. Van Allenovy pásy rychle se pohybujících elektronů a protonů.

Oblast, do které zasahuje vliv magnetického pole Země, se nazývá **magnetosféra**. Magnetosféra má pro život na Zemi velký význam, protože zabraňuje rychlým elektronům a protonům ze Slunce, aby dopadly na zemský povrch. Účinky těchto rychlých částic ze Slunce jsou podobné radioaktivnímu záření.

Magnetické indukční čáry, které „vedou“ pohyb částic, se v blízkosti magnetických pólů přibližují zemskému povrchu a vstupují do vysokých vrstev atmosféry. Rychlé částice tam narážejí do molekul a atomů vzduchu a dodávají jim energii. Atomy tuto energii následně vyzařují v podobě viditelného světla. Tomuto jevu se říká **polární záře**. V období sluneční aktivity, kdy Slunce vysílá větší množství nabitých částic, jsou polární záře častější a intenzivnější. Ve výjimečných případech jsou vidět i u nás.<sup>1</sup>

### 3.2.4 Kosmonautika

Za několik stovek let se pravděpodobně bude v učebnicích věnovat dvacátému století jen několik stránek. Velká většina událostí, které nám dnes připadají důležité, bude zapomenuta. Každopádně se však 20. století zapíše do historie jako revoluce v kosmonautice, kdy byly vypuštěny první umělé družice, a člověk poprvé vstoupil do kosmického prostoru.

Nejvýznamnějšími mezníky tohoto vstupu je vypuštění první umělé družice Země Sputnik 1 (bývalý Sovětský svaz, 1957), kterou vynesla raketa Vostok. Roku 1958 byla vypuštěna první americká družice Explorer 1. a byla založena americká společnost pro kosmonautiku NASA.

Další významným momentem bylo vyslání prvního člověka na oběžnou dráhu Země, kterým byl Jurij Gagarin (Sovětský svaz, 1961) a první vstup člověka na Měsíc, jímž se stal Neil Armstrong (11. mise programu Apollo 11 – USA, 1969).

Lety nad zemskou atmosférou se uskutečňují v kosmických lodích, které používají nosné rakety, jejichž částí jsou raketové motory. Tyto motory jsou tepelné, pracující na zákonu akce a reakce a nejsou závislé na atmosférickém kyslíku. Základem jsou tři nádrže. V jedné nádrži je palivo a okysličovadlo. Palivo je s okysličovadlem do spalovací komory vháněno buď pomocí čerpadel, nebo pouze tlakem interního plynu. Další dvě rakety nesou tuhé palivo.

Kosmické lodě, jež lze opětovně použít se nazývají raketoplány. **Raketoplán** byl vyvinut v USA a jeho výhodou je možnost opětovného použití po návratu na Zem. Bývalý Sovětský svaz též vyvinul raketoplán (Buran), ale ten letěl jen jednou.

Dobývání vesmíru si však našlo i své oběti. Jednou z největších tragédií byl výbuch raketoplánu Challenger krátce po startu v roce 1986. Smrt zde našla celá sedmičlenná posádka.



Rakety a raketoplány startují z **kosmodromů**, což jsou startovací základny. Výběr umístění takové základny je velmi důležitý. Kosmodrom by měl být co nejdále od obývaných oblastí a měl by být přístupný těžké dopravní technice. Mezi nejznámější kosmodromy patří ruský Bajkonur, umístěný v Kazachstánu a americký Kennedy na Floridě.

Na oběžné dráze okolo Země byly také vybudovány **orbitální kosmické stanice** pro dlouhodobé pobyty astronautů. V roce 1973 to byl americký **Skylab**, jehož činnost byla ukončena v roce 1979 a ruský **Mir**, který fungoval v letech 1986 až 2001.

V současné době krouží na oběžné dráze ve výšce asi 360 km orbitální stanice s názvem **Mezinárodní vesmírná stanice** (zkratka ISS z anglického International space station). Jedná se o projekt pěti kosmických agentur. Americká NASA, Ruská kosmická agentura, Japonská kosmická agentura, Kanadská kosmická agentura a Evropská kosmická agentura.

Orbitální stanice jsou postupně sestavovány z různých modulů. Dopravu modulů na stanici a veškeré zásobování zajišťují hlavně transportní pilotované kosmické lodě, automatické nákladní kosmické lodě a raketoplány. První modul Mezinárodní vesmírné stanice byl na oběžnou dráhu vynesena roku 1998. V současné době má tato stanice 24 modulů o celkové hmotnosti 250 tun. Posádku tvoří stálá dvoučlenná posádka střídající se po půl roce. Plánuje se rozšíření až na 6 stálých členů. Energie, kterou stanice potřebuje je získávána pomocí fotovoltaických (solárních) panelů.

Pro astronomii jsou také velmi významné **kosmické sondy** s vědeckými přístroji, které jsou vysílány do blízkosti těles sluneční soustavy nebo na jejich povrch a dokonce i ven ze sluneční soustavy. Sondy, které jsou na únikové dráze ze sluneční soustavy a stále fungují, se nazývají **Voyager 1** a **Voyager 2**. První jmenovaná byla vypuštěna roku 1977. Hlavním cílem Voyageru 1 byly planety Jupiter, Saturn, jejich měsíce a prstence. V současnosti sonda studuje helioplášť, měří sluneční vítr a výplň mezihvězdného prostoru. V srpnu roku 2007 se sonda nacházela již ve vzdálenosti přibližně 100 AU od Země, od které se vzdaluje rychlostí přibližně 18 km/s.

Sesterská sonda Voyageru 1 sonda Voyager 2 byla vypuštěna ve stejném roce a byla určena pro průzkum vnějších planet sluneční soustavy, která jako první a jediná sonda prolétla kolem planet Uran a Neptun. 21. února 2008 se sonda nacházela 85,147 AU od Slunce a vzdalovala se rychlostí 15,533 km/s. Obě sondy využily tzv. „**gravitačního praku**“. Průletem v blízkosti planet byly zrychleny k dalším planetám.

Velmi důležitou roli v našem světě hrají **umělé družice** obíhající kolem 200 km nad povrchem Země a poskytují lidstvu nesmírně důležité informace. Jsou to většinou družice dálkového průzkumu Země.

V těchto výškách je sice vzduch asi  $10^{10}$  krát řidší než na zemském povrchu, ale přesto družici brzdí. Družice tím ztrácí energii a sestupuje na nižší dráhy. Hustota vzduchu se zvyšuje a družice se zpomaluje víc a víc. Nakonec se dostane do tak husté atmosféry, že se rozžhaví, zabrzdí, a buď celá shoří při pádu, nebo se rozpadne na malé části, které dopadnou na zemský povrch.

Ve výškách několik tisíc kilometrů nad povrchem Země však může družice obíhat velmi dlouho, i celá staletí.

Rychlost, kterou družice obíhá po kruhové dráze kolem Země v určité výšce, se nazývá **kruhová rychlost**. Kruhová rychlost, kterou by družice měla těsně nad zemským povrchem (kdyby neexistoval odpor vzduchu), se nazývá **první kosmická rychlost** a je rovna přibližně 7,9 km/s.<sup>1</sup> Při kruhové rychlosti se přesně kompenzuje přitažlivá síla Země a odstředivá síla pohybu.



Kruhové rychlosti družic na vyšších drahách jsou sice menší, ale jejich velikosti jsou řádově stále několik kilometrů za sekundu. Přibližně takovou rychlost je nutné udělit družici při jejím vypuštění na oběžnou dráhu kolem Země. (Úkol 9, 10, 11) Umělé družice mají hmotnost několik stovek až tisíc kilogramů. Níže je uvedeno několik základních typů družic a jejich využití.

**Spojové družice** nám umožňují telefonní spojení mezi kontinenty, přenášejí televizní signály a počítačová data. Většina těchto družic oběhne Zemí za stejnou dobu, za jakou se Země sama otočí dokola. Jedná se o druh tzv. **geostacionárních družic**.

**Navigační družice** vysílají údaje, na jejichž základě speciální přijímač vypočítá přesné zeměpisné souřadnice své polohy s přesností až na 10 mm. Slouží hlavně pro určování poloh lodí a letadel.

**Dálkový průzkum** – na základě podrobného snímkování nebo radarového mapování různých oblastí Země z družic je možné například odhadovat budoucí úrodu, sledovat ubývání tropických pralesů nebo růst průmyslových aglomerací a získávat mnoho dalších údajů, které by bylo velmi náročné získat pozemskými metodami.

**Meteorologické družice** slouží k určování předpovědi počasí a díky těmto družicím se doba předpovědi podstatně prodloužila a spolehlivost je také vyšší.

**Vojenské družice**, mezi něž patří i zpravodajské neboli špiónážní družice, jsou mimořádně významné tím, že například znemožňují, aby se nějaký stát nepozorovaně připravoval na válku a z ničeho nic zaútočil. Dále se také díky těmto družicím dá sledovat dodržování mezinárodních smluv, například o likvidaci jaderných zbraní. To vše přineslo do mezinárodních vztahů výrazně vyšší stabilitu.

**Vědecké družice** umožňují astronomům pozorovat vesmír v infračerveném, ultrafialovém, rentgenovém nebo  $\gamma$ -záření, tedy v těch oborech elektromagnetického záření, které atmosféra nepropouští na zemský povrch.<sup>1</sup> Ale i v oblasti viditelného světla lze z družice, jak ukazuje například Hubbleův vesmírný dalekohled, získat snímky s rozlišením, které je na povrchu Země nedosažitelné. Jiné družice slouží i pro biologické, chemické, farmaceutické a další experimenty.

**Znečištění kosmického prostoru** se stává podstatným problémem, kterým je nutné se zabývat. Počet družic, které obíhají Zemí, je dnes již několik tisíc. Takový počet začíná způsobovat určité „dopravní problémy“. S rostoucí hustotou provozu na oběžných drahách roste i pravděpodobnost srážky, která má při vzájemné rychlosti několik km/s katastrofální důsledky. Navíc z některých (především neaktivních) družic se postupně uvolňuje mnoho malých tělísek (matičky, šroubky, odloupené šupinky barvy, atd.) Stopy po srážkách s těmito tělísky už byly na kosmických lodích nalezeny. Nebezpečí tak stále stoupá.

### 3.2.5 Pozorování oblohy

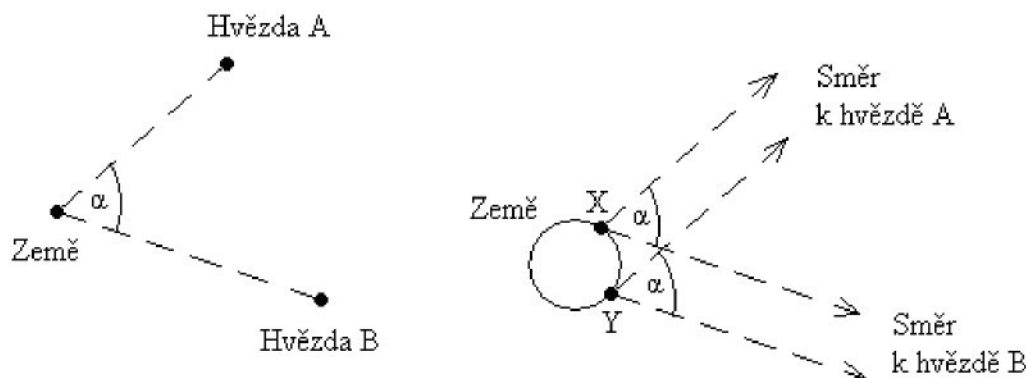
Často lidé zvedají hlavy vzhůru směrem k jasné noční obloze a snaží se hledat různá souhvězdí, jednotlivé hvězdy nebo dokonce planety. Vyhledávání planet je poněkud obtížnější, protože na rozdíl od hvězd se jejich poloha mění.

Zajímavé je také pozorování meteorů, když je maximum meteorických rojů v určitých obdobích, například 12. srpna. V průměru jednou za desetiletí bývá vidět i nápadná kometa.

Planety a ostatní tělesa je tedy možné pozorovat na **hvězdné obloze**, což je myšlená kulová plocha o nesmírně velkém (nekonečném) poloměru, na kterou se nám promítají obrazy vzdálených hvězd. Dvě hvězdy, které leží ve stejném směru od nás, se

promítají do stejného místa hvězdné oblohy. To znamená, že každý „bod“ hvězdné oblohy je ve skutečnosti **směrem**.<sup>1</sup> Vzdálenost téměř všech vesmírných těles, vyjma Měsíce, je od nás nesmírně velká v porovnání s průměrem Země a proto vidí všichni pozorovatelé na Zemi tato tělesa prakticky ve stejném směru, bez ohledu na svou polohu. To znamená, že hvězdná obloha vypadá i pro pozorovatele, kteří se na ni dívají ze vzdálených míst Země, prakticky stejně.

Obrázek č. 6 – úhlová vzdálenost hvězd.



Na obrázku vlevo je naznačeno, že poloměr Země je vůči vzdálenostem hvězd tak malý, že ji můžeme považovat za pouhý bod. Úhlová vzdálenost mezi hvězdami A a B je pak úhel  $\alpha$ .

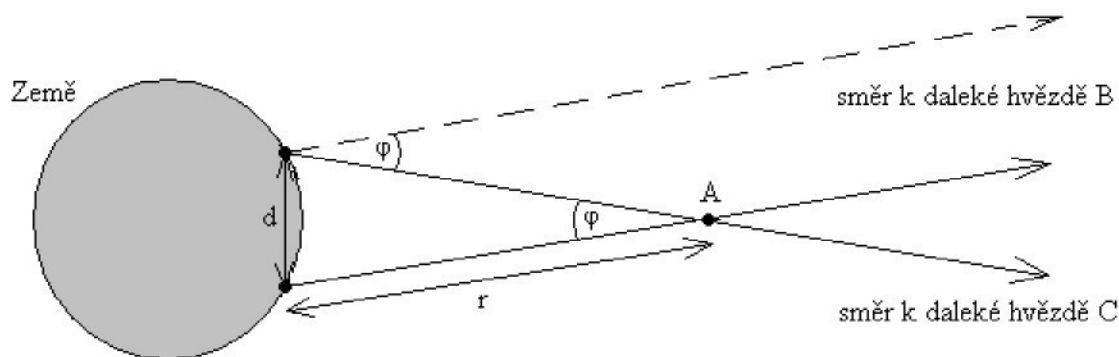
Na pravém obrázku je možné vidět, jak tato situace vypadá, když Zemi zobrazíme s větším poloměrem. Pozorovatelé X a Y, kteří jsou na různých místech Země, vidí stejnou hvězdu ve stejném směru.

Vzdálenosti dvou bodů na hvězdné obloze, například obrazů hvězd A a B, tedy neměříme jako délku, ale jako úhel mezi dvěma směry, například úhel *hvězda A – Země – hvězda B*. V takovém případě se hovoří o **úhlové vzdálenosti** mezi dvěma hvězdami nebo o **úhlovém průměru** kotoučku, který vidíme na obloze. V astronomii se úhly tradičně měří ve stupních, minutách a vteřinách. Říká se proto například, že hvězdy jsou od sebe vzdáleny  $1^{\circ} 45'$  nebo, že úhlový průměr Slunce je přibližně  $30'$ .

Těchto poznatků se využívalo při měření vzdáleností těles ve sluneční soustavě. Měří se **denní paralaxa**, což je úhel, pod kterým je vidět vzdálenost  $d$  (poloměr Země), o kterou se posune **během dne** pozorovatel na Zemi a která je kolmá ke směru pohledu. Proto také denní paralaxa.

Když se pozorovatel na Zemi posune o vzdálenost  $d$ , posune se na obloze planeta A vzhledem k dalekým hvězdám B a C o úhel  $\phi$ . Po změření tohoto úhlu a vypočítání vzdálenosti o kterou se pozorovatel posunul, je snadné spočítat vzdálenost planety. Denní paralaxu Měsíce znal již velmi dobře Tycho Brahe.

Obrázek č. 7 – denní paralaxa.



Na hvězdné obloze můžeme vidět známé obrazce, tvořené hvězdami, tzv. **souhvězdí**. To, že úhlová vzdálenost mezi souhvězdími je velmi malá, ještě neznamená, že tyto hvězdy jsou blízko u sebe i v prostoru. Na obloze se nám zdají některé hvězdy velmi blízko u sebe, ale jedna z nich může být poměrně blízko Země a druhá zase daleko. Souhvězdí tedy není žádným skutečným seskupením hvězd ve vesmíru. Pokud se řekne, že například Mars je v souhvězdí Střelce, znamená to jen, že se nachází přibližně ve stejném směru od Země jako hvězdy tvořící souhvězdí Střelce.

V moderní astronomii je za souhvězdí považována určitá „parcela“ na hvězdné obloze. Podle dohody Mezinárodní astronomické unie z r. 1930 je celá hvězdná obloha rozdělena na 88 souhvězdí s přesně vytyčenými hranicemi.

Každé souhvězdí má svůj latinský název a zkratku. Například jedno z největších souhvězdí Velká medvědice, jejíž součástí je i Velký vůz, má latinský název Ursa maior, zkratku Uma a „plošnou výměru“ 1280 čtverečných stupňů (1 čtverečný stupeň je čtvereček na obloze, jehož sousední vrcholy mají úhlovou vzdálenost 1 stupeň).

Otáčení Země vzhledem ke hvězdám se pozorovateli na Zemi jeví tak, že se celá hvězdná obloha otočí dokola jednou za hvězdný den, který je 23 h a 56 minut.<sup>1</sup> Body, okolo nichž se hvězdná obloha zdánlivě otáčí, se nazývají **světové póly**. Jsou to body, ve kterých hvězdnou oblohu protíná osa zemské rotace. Na severu míří tato osa přibližně k hvězdě Polárce. Proto leží severní světový pól na hvězdné obloze této hvězdě velmi blízko, 42 úhlových minut. Rovníkové souřadnice polárky ke dni 10.5.2008 jsou následující. Rektascenze  $\alpha = 2\text{h } 39\text{ min } 38,7\text{ s}$  a deklinace  $\delta = 89^\circ 18' 3,9''$ . Určování rovníkových souřadnic je uvedeno v kapitole Sférické souřadnice. Souřadnice je možné si vyhledat v aktuální Hvězdářské ročence.

Přes den nejsou hvězdy vidět, protože jsou přezářeny slunečním světlem rozptýleným na molekulách vzduchu. Na Měsíci, kde vzduch není, vidí astronauti i přes den černou oblohu, na které jsou vedle jasně zářícího Slunce vidět i hvězdy. Pokud by i takto byly vidět hvězdy na Zemi, pak by Slunce zářilo vždy v některém ze souhvězdí a v průběhu roku by vždy přecházelo z jednoho souhvězdí do druhého. Jak Země obíhá kolem Slunce, promítá se obraz Slunce do různých míst hvězdné oblohy.

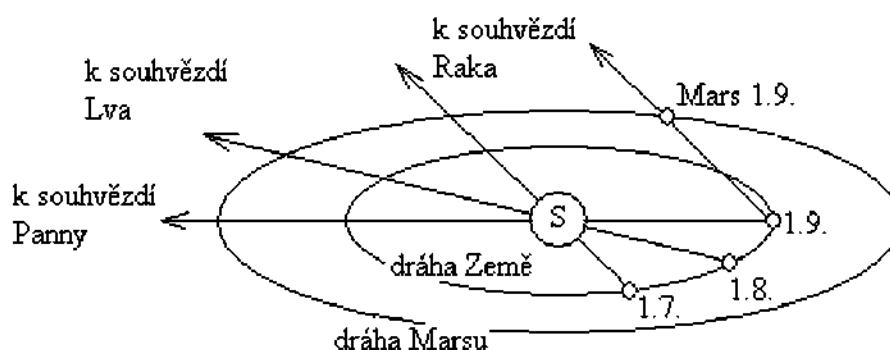
To, ve kterém souhvězdí se Slunce nachází, můžeme zhruba zjistit při jeho východu a západu. Dříve hvězdáři staré Babylonie takto určili dvanáct souhvězdí, kterými Slunce za rok projde. Jsou jimi Beran, Býk, Blíženci, Rak, Lev, Panna, Váhy, Štír, Střelec, Kozoroh, Vodnář a Ryby. Souhrnně se jim říká **zvěrokruh** (také zodiak).

Vzhledem k tomu, že se dráha Země kolem Slunce v důsledku poruch způsobených ostatními planetami (tomuto jevu se říká planetární precese) pomalu mění,

posouvá se i zdánlivá dráha Slunce po hvězdné obloze a dnes tato dráha prochází již třinácti souhvězdími. Tím třináctým je souhvězdí Hadonoše.

Aby se zvěrokruh neměnil, ustanovil se pojem „znamení“ zvěrokruhu nezávisle na tom, v jakém je Slunce souhvězdí. Každé **znamení** je dlouhé přesně  $15^\circ$  ( $1/12$  kruhu). V okamžiku jarní rovnodennosti vstupuje Slunce do znamení Berana.

Obrázek č. 8 – souhvězdí.



Slunce tedy postupuje z jednoho souhvězdí zvěrokruhu do druhého, až za rok obejde celou hvězdnou oblohu a vrátí se na původní místo. Zdánlivá dráha Slunce na hvězdné obloze se nazývá **ekliptika** od řeckého slova ekleipsis, které znamená zatmění. Zatmění Slunce nebo Měsíce může nastat jen, když je Měsíc na ekliptice. Kromě toho se tentýž název ekliptika používá i pro skutečnou dráhu Země okolo Slunce.

Nejen Slunce, ale i planety se na hvězdné obloze nacházejí vždy v pásu souhvězdí zvěrokruhu. To proto, že roviny, ve kterých obíhají Slunce, jsou velmi blízké rovině ekliptiky. Planety, které obíhají dále od Slunce než Země (vnější planety), můžeme na obloze vidět libovolně daleko od Slunce, třeba až  $180^\circ$  (na opačné straně, než je Slunce). Naopak Merkur a Venuše (vnitřní planety) můžeme vidět jen do určité úhlové vzdálenosti od Slunce, a to vždy menší než  $90^\circ$ . Tyto planety buď večer zapadají brzy po Slunci, nebo ráno vycházejí před východem Slunce a pak zmizí v jeho záři.

#### (Úkol 12)

Poměrně snadné je najít na obloze jasnou Venuši, která září po západu Slunce na obloze jako Jitřenka nebo ráno na východě. Další nápadnou planetou je Jupiter. Je viditelný celou noc a má jasnou bělavou barvu o něco málo jasnější než Venuše. Jeho viditelnost se však neomezuje jen na ráno nebo večer, jak je tomu u Venuše. Také červený Mars se hledá poměrně dobře. Merkur se objevuje na večerní nebo ranní obloze na místech, kde Slunce zapadlo, či vyjde a má bledě žlutou barvu.

#### **3.2.5.1 Pozorovací technika**

Nejvíce důležitých informací o vesmíru k nám přichází díky elektromagnetickému záření. Obory astronomického pozorování se dělí podle typu pozorovaných vlnových délek. Tyto obory jsou gama-astronomie, rentgenová astronomie, ultrafialová astronomie, optická astronomie, infračervená astronomie, mikrovlnná astronomie a radioastronomie. Nejstarší a nejrozšířenější je optická astronomie, která využívá vlnových délek viditelného světla. Zde se používají vizuální

dalekohledy, které neslouží jen pro přímé pozorování, ale také jako „sběrače“ světla pro různé přístroje jako fotometry, spektrografy atd.

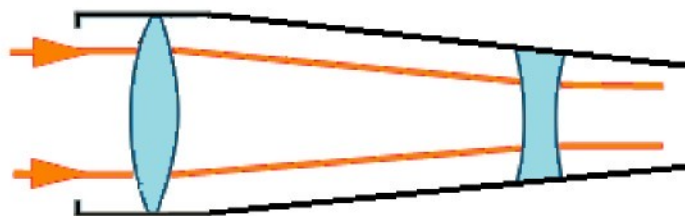
Obecně se dalekohled skládá z optické soustavy, upevněné v trubici (tubusu) nebo jiné tuhé konstrukci, která zajišťuje vzájemné pevné postavení jednotlivých prvků optické soustavy. Optická soustava se skládá z objektivu, kterým může být buď čočka, nebo zrcadlo, dále v některých případech z pomocných zrcadel a poslední součástí je okulár. Další částí dalekohledu je mechanické otočné zařízení, umožňující stabilní uchycení dalekohledu a jeho namíření a pozorovanou část oblohy. Podle použité optiky se dalekohledy dělí na čočkové (refraktory), zrcadlové (reflektory) a meniskové.

Objektivy a okuláry **čočkového dalekohledu** se skládají ze dvou a více čoček (rozptylek nebo spojek). Jedna jediná čočka ukazuje totiž zejména kolem jasných zdrojů rušivé barevné lemy (barevná vada) a znemožňuje tím jejich ostré zobrazení.

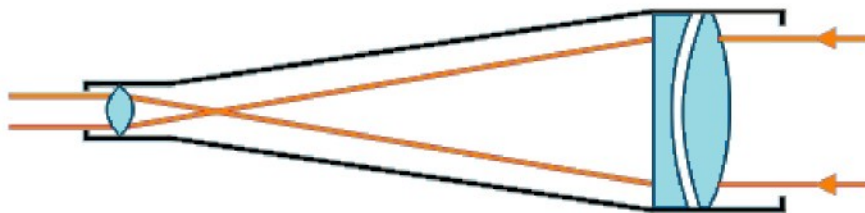
K pozorování oblohy poprvé použil dalekohled roku 1606 Galileo Galilei. Roku 1611 Johannes Kepler zkonstruoval jiný dalekohled, který se používá k pozorování dodnes. V malém provedení se používá nejčastěji zdvojený jako **triedr**. Téměř každý se s tímto dalekohledem setkal. Používají ho například myslivci nebo vojáci. Velký (astronomický) Keplerův dalekohled nikdy zdvojený není.

V následujících obrázcích je oranžovými čarami se šipkami označen směr světla jdoucí do dalekohledu.

Obrázek č. 9 – schéma Galileiho dalekohledu.



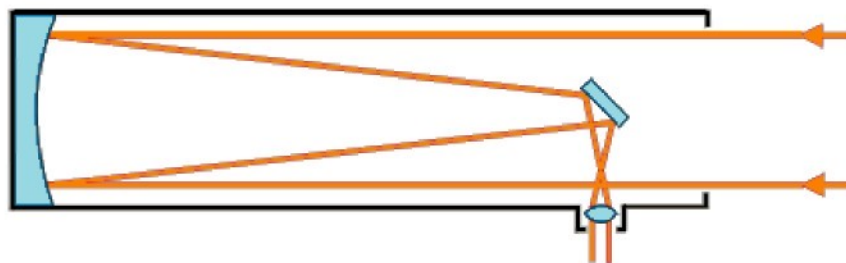
Obrázek č. 10 – schéma Keplerova dalekohledu.



**Zrcadlový dalekohled** poprvé použil v roce 1671 Isaac Newton. Jako objektiv mu posloužila zrcadla. Astronomické zrcadlo ve tvaru paraboloidu má funkci podobnou spojné čočce. Je ze skla nebo keramického materiálu (v prvních dobách dokonce i z bronzu) a povrchově pokovené nejčastěji hliníkem. Světelné paprsky přicházejí ze vzdáleného objektu, v dalekohledu se odrazí dutým zrcadlem do jeho ohniskové roviny, která je na stejné straně jako pozorovaný objekt. Proto se musí odražené paprsky zakřiveného zrcadla malým rovným zrcátkem, kolmým na jejich původní dráhu, odchýlit tak, aby se mohl obraz pozorovat postranním okulárem. Tak to udělal Newton a tento princip se používá u malých dalekohledů dodnes.

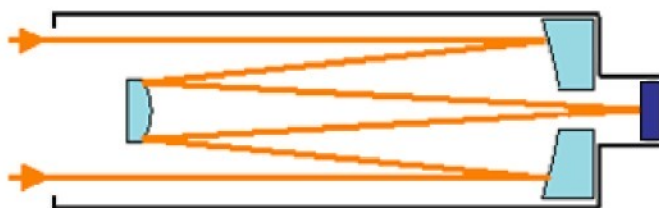


Obrázek č. 11 – schéma Newtonova dalekohledu.

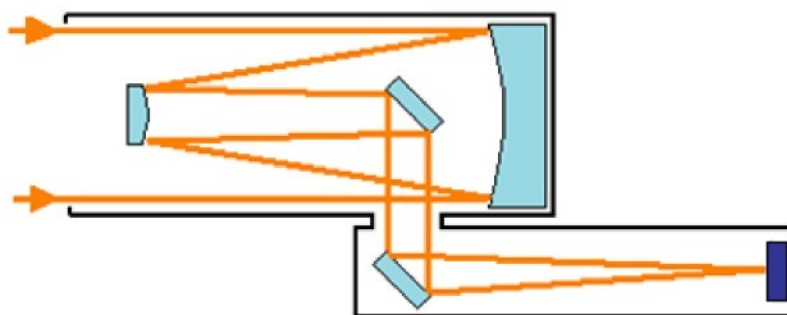


Dalšími zrcadlovými dalekohledy, které se používají, jsou tzv. Cassegrainův dalekohled a dalekohled typu Coudé.

Obrázek č. 12 – schéma Cassegrainova dalekohledu.



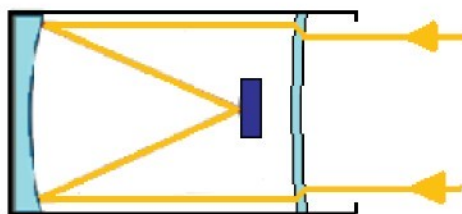
Obrázek č. 13 – schéma dalekohledu Coudé.



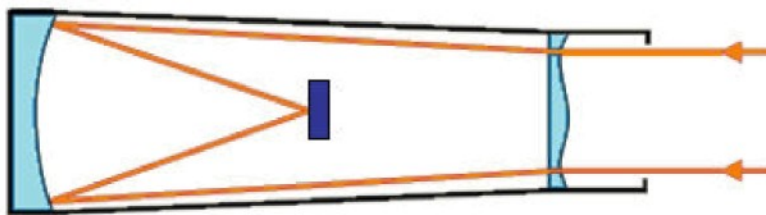
Hlavními **výhodami reflektoru** oproti refraktoru jsou tyto následující. Opticky je opracována jen jedna plocha místo čtyř, šesti i více. Zrcadlo lze podepřít nebo zevnitř vyztužit. Je tedy možné vyrábět větší zrcadla než čočky. Zrcadla lze také spojovat a vytvářet z nich velké plochy. Pomocí pohyblivých podpěr se dá udržovat přesný tvar zrcadla. Reflektor nemá z principu barevnou vadu, protože světlo se jen odráží, a to zcela stejně ve všech vlnových délkách.

**Meniskové dalekohledy** jsou v podstatě zrcadlové dalekohledy, kde se obraz upravuje korekční deskou neboli meniskem. Podle tvaru korekční desky rozlišujeme Maksutovův a Schmidtův dalekohled.

Obrázek č. 14 – schéma Maksutovova dalekohledu



Obrázek č. 15 – schéma Schmidtova dalekohledu



Zatímco u Maksutova je korekční deskou skutečně meniskus, tak u Schmidtova dalekohledu je korekční deskou dost složitá plocha 4. Stupně. Navíc Schmidtův dalekohled je téměř dvakrát delší než Maksutov. Ve skutečnosti je typický meniskový dalekohled Maksutov.

Oba typy slouží pro fotografování (přehlídky oblohy), protože mají velice široká použitelná pole ve skvělé kvalitě.

K běžnému amatérskému pozorování by měl postačovat triedr. Samozřejmě čím méně jasná tělesa chceme pozorovat, tím potřebujeme lepší dalekohled, aby do bodu (obraz hvězdy) soustředil co nejvíce světelné energie. To znamená mít co největší objektiv. Ideální je mít dalekohled se stativem, kdy je snazší zaostření. Ale i bez dalekohledu je možné na obloze pozorovat mnoho těles a souhvězdí. K pozorování je samozřejmě nejlepší jasná noc a pozice mimo město, kdy nehrozí, že městské osvětlení „přesvítí“ hvězdnou oblohu. Další důležitou věcí je mít s sebou astronomický atlas hvězdné oblohy nebo podobnou mapu pro lepší orientaci na obloze.

Je také možné navštívit **hvězdárny a planetária**, kde se odborníci zabývají profesionálním pozorováním vesmírných těles a kde se také snaží široké veřejnosti nabídnout pohled do světa astronomie.

Hvězdárna a planetárium hlavního města Prahy je největší institucí v České republice zaměřenou na popularizaci a výuku v oblasti věd o vesmíru a Zemi. V místním planetáriu je na kopuli o rozloze 843 m<sup>2</sup> promítáno 9135 hvězd, Mléčná dráha, obrazce souhvězdí, Slunce, Měsíc, planety atd.

Další známé jsou Hvězdárna a planetárium Mikuláše Koperníka v Brně, Hvězdárna a planetárium v Českých Budějovicích s pobočkou na Kleti, Hvězdárna a planetárium v Hradci Králové, Hvězdárna a planetárium Johanna Palisy v Ostravě, Hvězdárna a planetárium v Plzni, Severočeská hvězdárna a planetárium v Teplicích, Hvězdárna v Úpici a Hvězdárna Valašské Meziříčí.

Seznam hvězdáren a planetárií v České republice a na Slovensku je možné nalézt na internetové adrese [www.sdruzeni.hvezdarna.cz](http://www.sdruzeni.hvezdarna.cz).

Jak bylo uvedeno, u dalekohledu je nejvýznamnější co největší průměr objektivu. Následuje několik příkladů největších dalekohledů světa.

**Keckův dalekohled** je tvořen dvěma desetimetrovými reflektory. Každý váží 300 tun a „pluje“ v silikonovém oleji. Zrcadla jsou složena z 36 šestiúhelníkových částí. Každý váží půl tuny. Byl postaven v nadmořské výšce 4 000 m na hoře Mauna Kea na Havajských ostrovech. Jsou zde ideální pozorovací podmínky v mnoha směrech. Například v této oblasti je 65 % jasných nocí v roce. První zrcadlo bylo zprovozněno v roce 1993 a druhé roku 1996. Keckův dalekohled umožňuje pozorování v optické a infračervené oblasti spektra.

**VLT** (zkratka z anglického very large telescope) je soustava čtyř dalekohledů v severním Chile na hoře Cerro Paranal ve výšce 2635 m n.m. V provozu je od roku 2005. Tyto čtyři dalekohledy o průměru 8,2 m jsou doplněny dalšími třemi posuvnými teleskopy s průměrem zrcadel 1,8 m. Společně mají zobrazovací schopnost jako dalekohled o průměru 16 m. Mohou ovšem pracovat i samostatně. Vzhledem k jeho velikosti je možné nahlédnout do doby blízké vzniku vesmíru. Umožňuje pozorování v oblasti vlnových délek viditelného světla až po blízký obor UV. V roztaveném stavu vážilo každé zrcadlo tohoto dalekohledu 45 tun. Trvalo rok a půl než se schladilo na běžnou teplotu. Po broušení a leštění, které trvalo další dva roky, zrcadlo vážilo 24 tun.

**HET** (Hobby-Rober E. Eberly Telescope) je dalekohled pracující v optickém oboru. Je umístěn na hoře Mount Fowlkes v Texasu v nadmořské výšce 2 072 m. Do provozu byl uveden v roce 1997. Primární zrcadlo se skládá z 91 vyměnitelných částí poskládaných do šestiúhelníku o velikosti 11x10 metrů.

**Geminy** tvoří dvě observatoře se zrcadly o průměru 8,1 m. Na severní polokouli na Mauna Kea je Gemini N a na jižní polokouli v Cerro Pachón v Chile je pak Gemini S. Oba dalekohledy byly uvedeny do provozu v roce 2000. Projekt Gemini má několik výhod. Umožňuje zkoumat severní i jižní oblohu stejným typem přístrojů. Především se používá k pozorování v infračerveném oboru. Proto musí být jednak odstíněno vlastní záření dalekohledu a hlavní zrcadlo musí být neustále chlazeno na teplotu okolního vzduchu, často ale i na mnohem nižší teplotu.

**HST** (Hubble Space Telescope) je společné dílo NASA a ESA (European Space Agency) a je to momentálně nejdokonalejším prostředkem k pozorování vesmíru. Stavba trvala asi 15 let, na oběžnou dráhu byl vynesena roku 1990 raketoplánem Discovery. Na oběžné dráze je řízen dálkově ze Země.

Výhodou je, že pozorování není zkresleno atmosférou. Toto zkreslení při pozorování ze Země způsobují turbulence neboli proudění v atmosféře a také rozdílné teploty těchto proudů, kde každý proud má jiný index lomu. Navíc se nevyhneme pohlcování světla v atmosféře.

Základem HST je zrcadlový dalekohled podobný těm, jež se používají na Zemi - dvojice zrcadel. Větším z nich (objektivem o průměru 2,4 m) se světlo odráží na sekundární zrcadlo na druhém konci dalekohledu. Odtud se paprsky vedou otvorem uprostřed objektivu, za kterým jsou směřovány na detekční zařízení, kterými jsou citlivá světelná čidla. Samotné fotografie pak pořizují kamery.

Původní záběr HST je černobílý, kombinací několika snímků v různých vlnových délkách je získán barevný obrázek. HST s sebou nese přístroje na pozorování v UV, optickém oboru a blízkém infračerveném oboru. Energie pro jeho provoz je získávána ze solárních panelů. Rádiovým vysílačem dalekohled komunikuje se Zemí.

**MMT** je první z řady přístrojů složených z více částí. Skládal se původně z šesti zrcadlových dalekohledů na společné montáži. Při konstrukci se jeho autor inspiroval



hmyzím okem. Jednotlivá zrcadla jsou vyrobena z disků z taveného křemene. Původních šest zrcadel bylo nahrazeno jediným zrcadlem o průměru 6,5 metru. Proto název Magnum Mirror Telescope. Dalekohled je postaven na vrcholu Mt. Hopkins v Arizoně, 2 606 m n. m.

Vedle šesti optických dalekohledů patřících mezi největší na světě je třeba se zmínit o největších **radioteleskopech**, kterými jsou Arcibo a VLA.

**Arecibo** je radioteleskop postavený na ostrově Portoriko v roce 1963. Anténa o průměru 304 metrů vyplňuje celé údolí. Její povrch tvoří 40 000 hliníkových desek uspořádaných do kulové plochy s poloměrem křivosti 265 metrů. V roce 1999 se dalekohled proslavil projektem SETI na vyhledávání mimozemské civilizace. Data tohoto projektu zpracovávají spořiče obrazovek milionů domácích počítačů. K největším objevům patří nalezení planety u cizí hvězdy.

**VLA** je zkratka z anglického very large array. Tento radioteleskop je tvořen sítí 27 radioteleskopů poskládaných do tvaru Y s délkou ramene 36 km. Od roku 1971 je postaven ve státě Nové Mexiko v nadmořské výšce 2124 m. Celá síť byla uvedena do provozu v roce 1981. Radioteleskopy slouží ke studiu atmosférických jevů, počasí, ke sledování drah družic a k pořizování astronomických snímků ve vysokém rozlišení.

Jak bylo uvedeno v odstavci o dalekohledu VLT, lze díky jeho velikosti nahlédnout do doby blízké vzniku vesmíru. Díky dalekohledům je v podstatě možný jakýsi „**pohled do minulosti**“. Při běžném pozorování objektů si tuto skutečnost neuvědomujeme. Ale například díváme-li se na Slunce, tak v daném momentu pozorujeme světlo, které bylo vyzářeno ze Slunce přibližně před osmi minutami. To je doba, za kterou světlo urazí vzdálenost Slunce-Země a poté je zachyceno naším okem. Rychlost světla  $c$  je přibližně 300 000 km/s.

Podobně je tomu i s ostatními tělesy ve vesmíru. Pokud dnes zachytíme záření, které bylo vyzářeno například před 1 miliardou let, je možné spočítat, v jaké vzdálenosti byl zdroj záření v dané chvíli. Vzdálenost by byla asi  $6,3 \cdot 10^{13}$  AU. Lze tedy pozorovat vesmír v obrovských vzdálenostech od Země, ale s určitým zpožděním. Je v tom i výhoda. Budeme-li pozorovat objekty stejného typu, které vznikly v přibližně stejném období, ale v různých vzdálenostech od Země, je možné sledovat jednotlivá stadia vývoje těchto objektů.

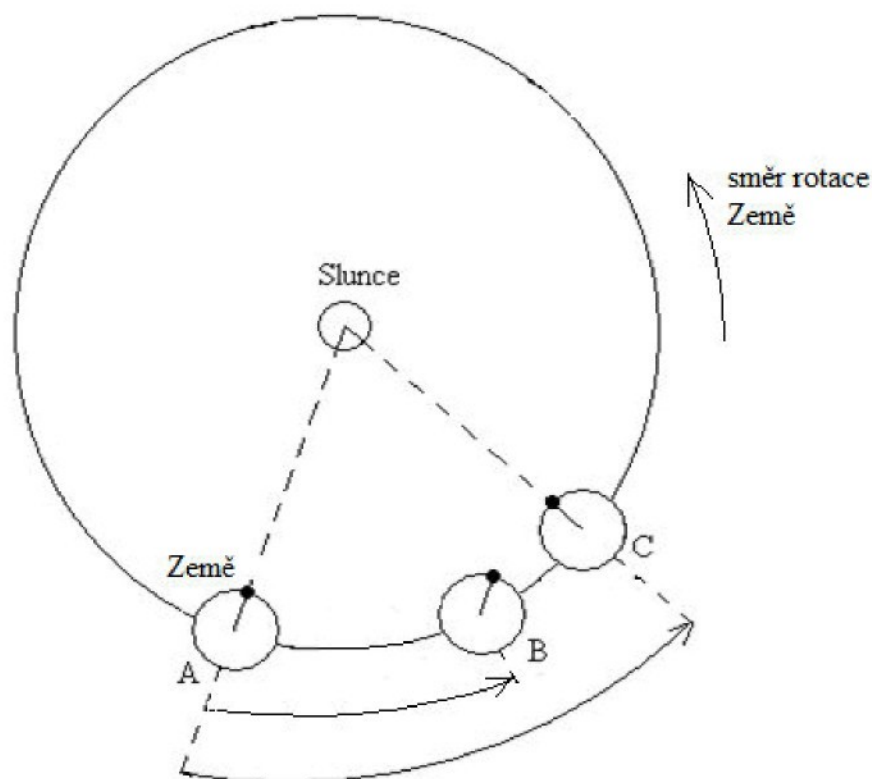
### 3.2.6 Hvězdný a sluneční den

Všechny planety včetně Země se otáčejí kolem své osy, většinou ve stejném smyslu jak obíhají kolem Slunce. Jen Venuše se otáčí opačně a osa rotace Uranu leží téměř v rovině oběžné dráhy.

Doba, za kterou se Země otočí dokola vzhledem ke hvězdám, trvá přibližně 23 hodin a 56 minut a nazývá se **hvězdný den**. Je to otočka o  $360^\circ$  v inerciální soustavě. Pro život člověka je však důležitější doba, za kterou se Země otočí vzhledem ke Slunci. Této době se říká **sluneční den** a trvá přibližně 24 hodin.

Na obrázku 8 je znázorněn rozdíl mezi slunečním a hvězdným dnem. Když je planeta v místě A své dráhy okolo Slunce, má pozorovatel (označen černou tečkou) právě poledne. Hvězdný den je doba, za kterou se planeta otočí o  $360^\circ$  a dostane se při tom do místa B své dráhy. Sluneční den je doba, po které se pozorovateli opět ukazuje poledne. Planeta se dostane do místa C.

Obrázek č. 16 – hvězdný a slunečný den.

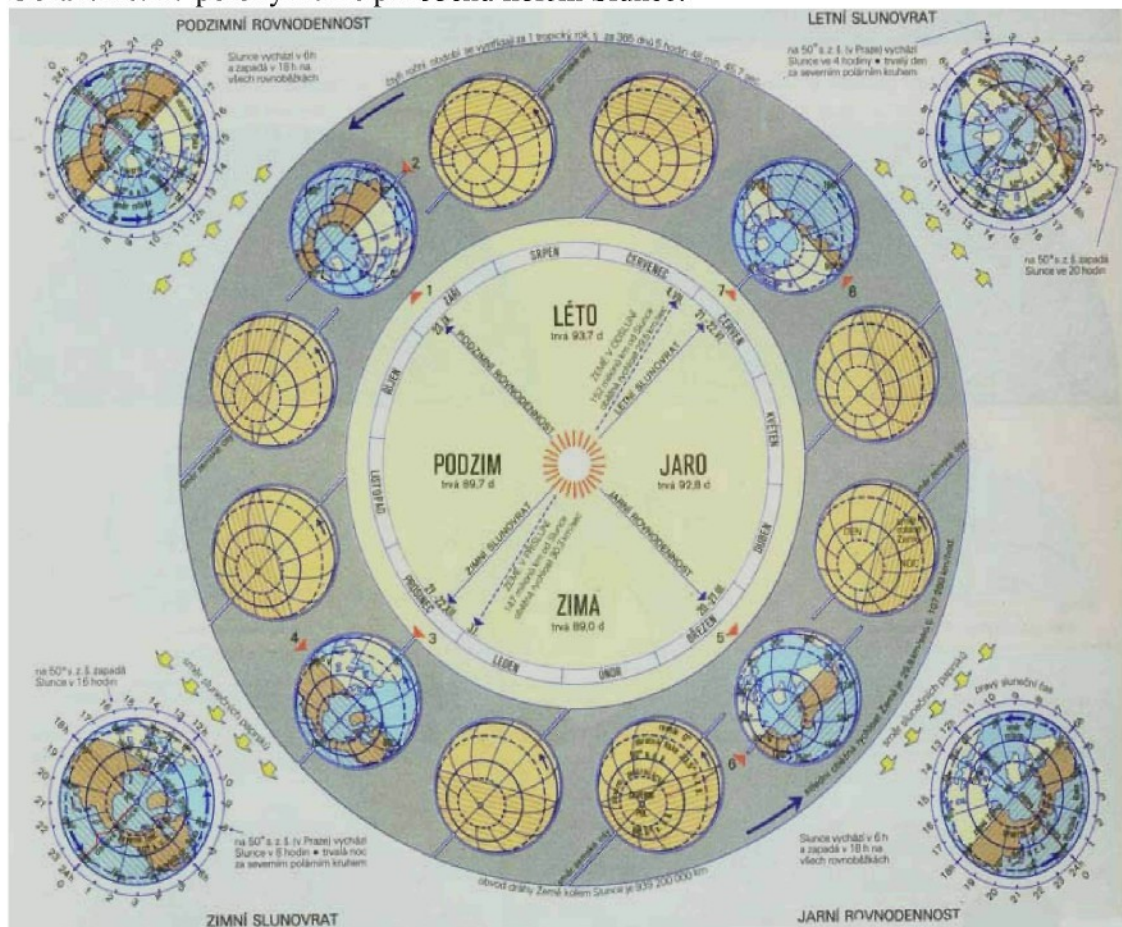


### 3.2.7 Dráha Země kolem Slunce

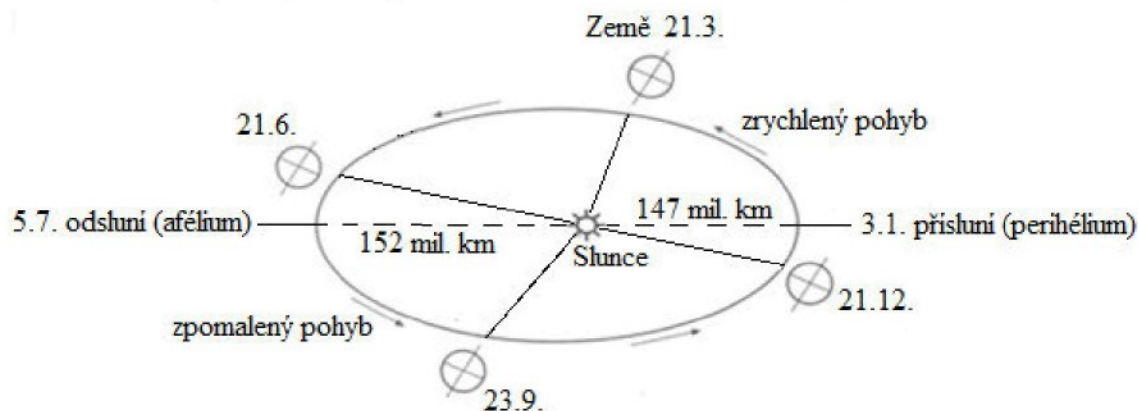
Země se kolem Slunce pohybuje po eliptické dráze s velmi malou výstředností neboli excentricitou. Rovina této dráhy se nazývá rovina ekliptiky. Zemská osa svírá s rovinou ekliptiky úhel  $23,4383^\circ = 23^\circ 26,3'$ . To znamená, že Země je neustále na svojí dráze nakloněna a navíc stále skoro stejným směrem.

V jednom z ohnisek dráhy Země je Slunce. Z toho vyplývá, že se Země bude od Slunce vzdalovat a zase přibližovat. Místo, kdy bude Země Slunci nejbližší, se nazývá **perihélium (přísluní)** a naopak nejvzdálenější bod se nazývá **afélium (odsluní)**. Na obrázcích 17 a 18 jsou znázorněny polohy Země v průběhu roku

Obrázek č. 17 polohy Země při oběhu kolem Slunce.



Obrázek č. 18 - polohy Země při oběhu kolem Slunce.



V periheliu na severní polokouli Země dopadá Sluneční záření nejvíce šikmo, a to díky odklonu rotační osy Země. Z toho plyne, že v periheliu je vrchol zimy na severní polokouli a naopak vrchol léta na jižní polokouli. Proto mají na jižní polokouli větší rozdíly v teplotách mezi zimou a létem.

V horkých letních dnech tedy stojí Slunce vysoko na obloze a jeho paprsky dopadají na Zemi kolměji. V zimě jsou dny krátké, slunce nevystupuje tak vysoko a jeho paprsky ozařují daleko větší oblast, ale s menší intenzitou.

### 3.2.7.1 Precese a nutace zemské osy

Precese zemské osy je krouživý pohyb zemské osy přibližně po plášti dvojkužele. Je to speciální případ obecného fyzikálního jevu pozorovaného u rotujících hmotných těles (setrvačnicků), zvaného precese.

V tomto případě se však jedná o velmi složitý pohyb, skládající se z několika složek. Nejvýznamnějším vlivem, způsobujícím precesi zemské osy, je gravitační působení Měsíce a Slunce na zemské těleso. Protože Země nemá tvar koule, ale v prvním přiblížení tvar rotačního elipsoidu, snaží se Měsíc stočit osu zemského tělesa tak, aby se rovníková výduť Země dostala do roviny oběhu Měsíce kolem Země. Podobně se gravitační síla Slunce snaží stejným způsobem dostat rovníkovou výduť do roviny oběhu Země kolem Slunce (tedy do roviny ekliptiky). Oba tyto vlivy působí na Zemi, kterou si můžeme představit jako obrovský setrvačnick, tak, že její osa vykonává precesní pohyb (vychyluje se ve směru kolmém na okamžitou polohu osy zemské rotace a zároveň kolmou na dvojici gravitačních sil působících na rovníkovou výduť). Tato rozhodující částí precese zemské osy se nazývá **lunisolární precese zemské osy**. Současná hodnota posuvu jarního bodu je přibližně 50,40" za rok, a to proti směru zdánlivého pohybu Slunce po nebeské sféře. Z této hodnoty asi 60 % připadá na gravitační vliv Měsíce a 40 % na vliv Slunce.

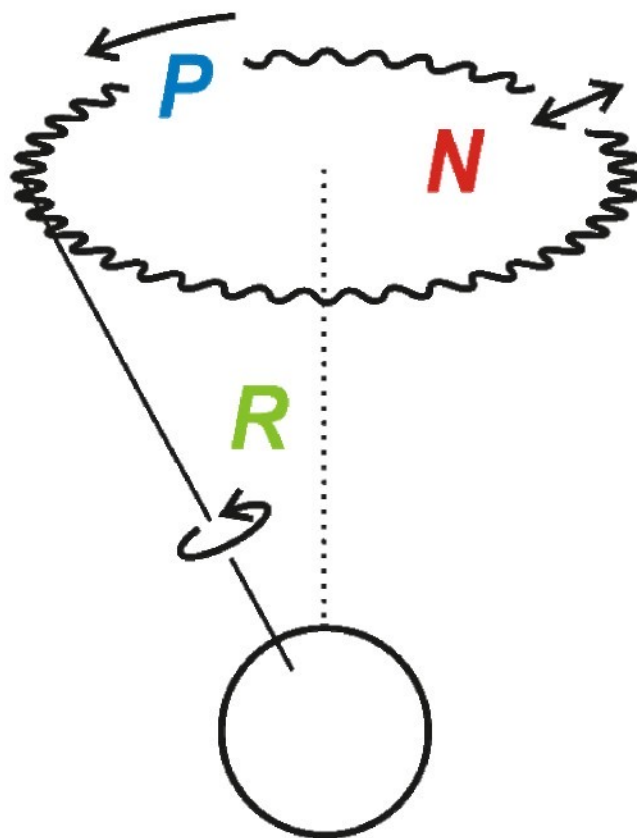
Osa dvojkužele, který přitom zemská osa opisuje, míří k pólu ekliptiky. Pól ekliptiky se nachází v souhvězdí Draka, vzdálen od světového pólu v současnosti o úhel  $23^{\circ}27'$  (tj. o sklon zemského rovníku k rovině ekliptiky). Zemská osa by pouze působením lunisolární precese vykonala plný kruh za dobu 25 725 let.

Na Zemi však působí i ostatní planety. Jejich gravitačním vlivem se mění rovina zemské dráhy v prostoru (orientace kolmice na ní). Díky tomu se sklon zemského rovníku k rovině ekliptiky v současné době zmenšuje o 0,46"/rok. Celkově se úhel mezi ekliptikou a zemským rovníkem mění v rozmezí od  $21,92^{\circ}$  do  $24,30^{\circ}$ , a to s periodou přibližně 40 000 let. V důsledku změny úhlu mezi ekliptikou a rovníkem se posouvá také jarní bod, a to nyní o  $-0,12''/\text{rok}$  (tedy proti smyslu lunisolární precese). Tato část precese zemské osy se nazývá **planetární precese zemské osy**.

Složením obou těchto složek dostaneme **všeobecnou (generální) precesi zemské osy**, při níž současná hodnota posuvu jarního bodu činí 50,26"/rok. Díky tomu se nebeský (světový) pól vrátí přibližně na dnešní místo za 25 800 let. Tuto periodu nazýváme **Platónský rok**.

Precese zemské osy není zcela rovnoměrný pohyb. V důsledku gravitačního působení Slunce na oběh Měsíce kolem Země se pravidelně mění orientace roviny dráhy Měsíce kolem Země s periodou 18,6 roku. Ve stejné periodě vykonává zemská osa jemný krouživý pohyb kolem precesní kružnice. Tento pohyb se nazývá **nutace** a představuje výkyv až o  $\pm 9,2''$ .

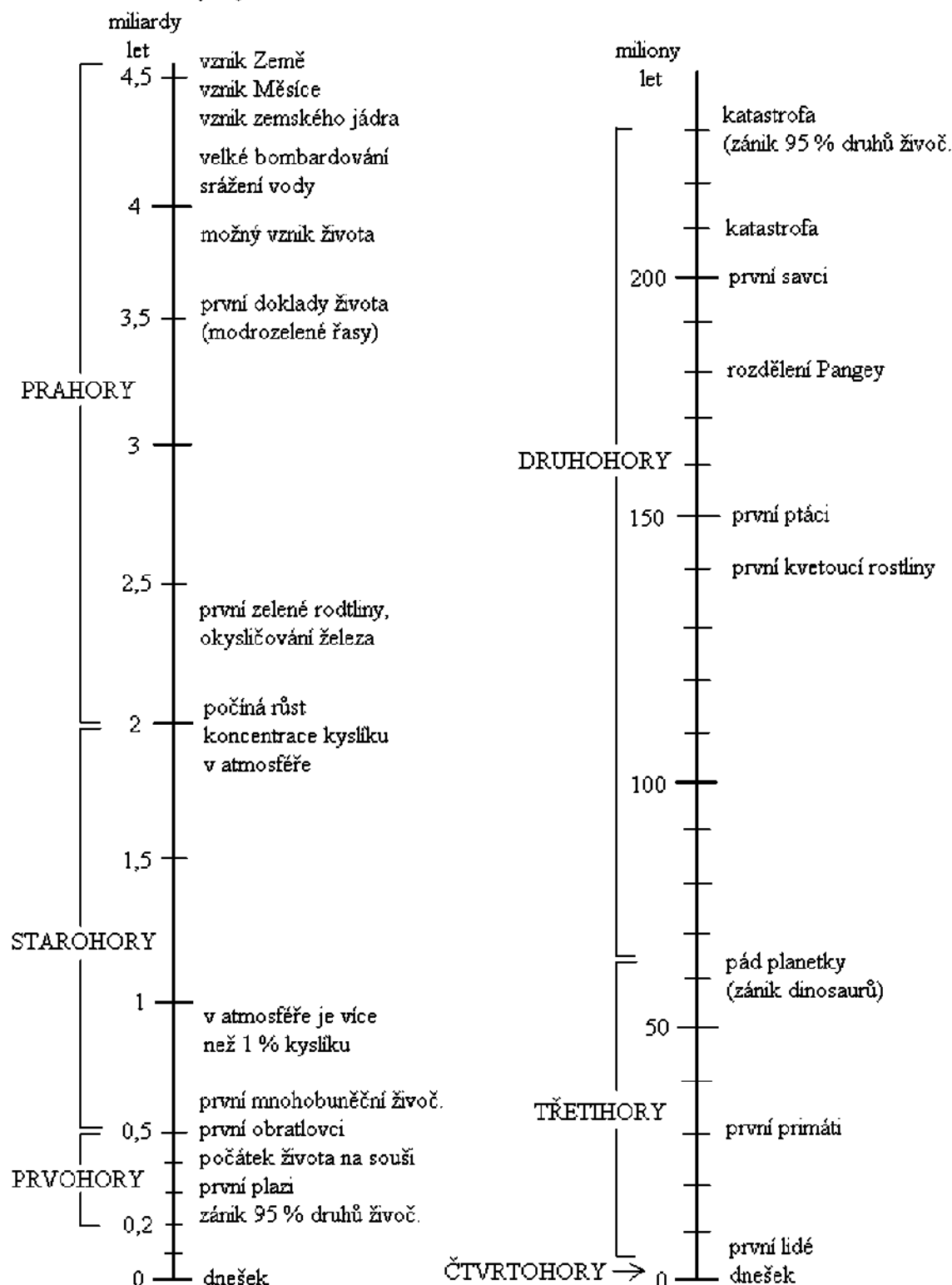
Obrázek č. 19 - pohyby zemské osy, kde  $R$  = rotace Země kolem osy,  $P$  = precese,  $N$  = nutace



### 3.2.8 Historie vývoje Země

Naše Země začala vznikat, stejně jako jiné planety, při vzniku sluneční soustavy před  $4,6 \cdot 10^9$  let. Od té doby prošla několika fázemi změn, které jsou stručně popsány v obrázku 20.

Obrázek č. 20 – vývoj Země.



Během chladnutí zemské kůry se měnila atmosféra Země, kdy zbytky prvotní atmosféry z lehkého vodíku a helia rychle unikly a místo nich se z hornin začaly uvolňovat především sopečnou činností oxid uhličitý, vodní pára a další plyny. Také na Zem dopadalo mnoho malých kometárních jader složených převážně ze sněhu. Tato



jádra, která se převážně vypaří vysoko v atmosféře, přinesla většinu vody, která dnes na Zemi je.

Později teplota na povrchu Země klesala, až se původní pára začala srážet na kapalnou vodu. Při stáří Země přibližně miliardu let vznikaly první usazené horniny, což svědčí o existenci oceánů. Slunce ještě nebylo v té době tak výkonné. Oceány nezamrzly zčásti díky skleníkovému jevu. Tento jev způsoboval  $\text{CO}_2$  v atmosféře.

Na konci první miliardy let života naší planety už existovaly první živé mikroorganismy. V dnešní živé hmotě se syntetizují molekuly bílkovin pomocí jiných molekul bílkovin a také podle genetického „programu“, který je zapsán v molekulách nukleových kyselin. Ale samotné nukleové kyseliny mohou být zase syntetizovány jen pomocí bílkovin. Otázka „Byla dřív slepice nebo vejce?“ se tím zredukuje na otázku „Byly dřív nukleové kyseliny nebo bílkoviny?“. Je velice nepravděpodobné, že by dva druhy tak složitých molekul vznikly náhodně ve stejném místě a ve stejném čase. Více pravděpodobné je, že existovaly nějaké, dnes neznámé nebo neexistující, jednodušší molekuly, které se také dokázaly samy reprodukovat a složitější molekuly bílkovin a nukleových kyselin se z nich vyvinuly postupnými změnami podle Darwinova vývojového mechanismu.<sup>1</sup>

V době, kdy byla Země stará asi 2,5 miliardy let, se objevily první zelené rostliny, které radikálně a poměrně rychle změnily atmosféru Země přeměnou  $\text{CO}_2$  na kyslík. Vznikem kyslíkové atmosféry končí geologické období prahor a začínají **starohory**.

Koráli a další mořští živočichové též odstraňovali z atmosféry  $\text{CO}_2$  a pohřbívali jej ve formě velikých ložisek uhličitánů, především vápence  $\text{CaCO}_3$  a uhličitanu hořečnatého  $\text{MgCO}_3$ . Jen asi 10 % všeho uhlíku na Zemi je uloženo ve formě uhlí a uhlovodíků (ropy a zemního plynu).

Tato třetí a poslední kyslíková atmosféra především umožnila, aby i jiné organismy čerpaly z bohaté zásoby energie, kterou zelené rostliny získaly ze slunečního záření a uložily v organických molekulách.

Dále kyslíková atmosféra umožnila vznik ozonové vrstvy, která chrání zemský povrch před ultrafialovým zářením. Teprve po vzniku ozonové vrstvy mohly živé organismy vyjít na souš, kde je ke kyslíku mnohem lepší přístup.

Přesto, že život vznikl před 3,5 miliardou let, zůstával velmi dlouhou dobu na primitivní úrovni. Až přibližně před 600 miliony let, kdy koncentrace kyslíku ve vzduchu stoupla asi na 1 %, se začali objevovat první mnohobuněční živočichové. Asi před 570 miliony let se během poměrně krátké doby vyvinulo mnoho nových živočišných druhů. Touto vývojovou explozí začalo období zvané **prvohory**. Život se dostal na souš asi před 400 miliony let.

Období prvohor skončili asi před 220 miliony let vyhynutím velkého počtu živočišných druhů, pravděpodobně v důsledku buď dlouhotrvající doby ledové, nebo pádu nějaké planety na Zem.

Během dalšího období, nazvaného **druhhory**, došlo k rozdělení původního uceleného prakontinentu Pangea a nové kontinenty se pomalu dostávaly na místa, kde jsou dnes. V této době se rozšířili především plazi. I druhhory končí katastrofou, jehož příčinou byl pád planety nebo komety. Následovalo dlouhé období chladu.

Každá taková katastrofa měla sice ničivé účinky, ale na druhé straně mocně urychlila vývoj dokonalejších druhů organismů. Tím, že při katastrofě vyhynuli dinosauři, uvolnili místo savcům. Rozvoj savců se odehrával především v období **třetihor**.



Dalším obdobím, které začalo před 2 miliony let, jsou **čtvrtohory** a trvají dodnes. Dominantním druhem, vyvíjejícím se v tomto období, jsou lidé.

Tabulka č. 4 - základní údaje o Zemi.

|                                                                                                                                 |                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Hmotnost                                                                                                                        | $5,94 \cdot 10^{24}$ kg                                 |
| Rovňkový průměr                                                                                                                 | 12 756,270 km                                           |
| Polární průměr                                                                                                                  | 12 713,5 km                                             |
| Střední průměr                                                                                                                  | 12 745,591 km                                           |
| Zploštění                                                                                                                       | 0,003 352 861                                           |
| Průměrná hustota                                                                                                                | $5521 \text{ kg/m}^3$                                   |
| Povrchová teplota                                                                                                               | -70 °C až +55 °C                                        |
| Tíhové zrychlení na povrchu                                                                                                     | $9,80665 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$                   |
| GM                                                                                                                              | $398\,600,441 \cdot 10^9 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-2}$ |
| Doba otočení kolem své osy                                                                                                      | 23 h 56 min                                             |
| Siderický rok*                                                                                                                  | 365,256 365 56 dne                                      |
| Tropický rok*                                                                                                                   | 365,242 198 781 dne                                     |
| Od východu k východu (1 den)                                                                                                    | 24 h                                                    |
| Velká poloosa dráhy kolem Slunce v přísluní                                                                                     | 147 098 074 km                                          |
| Velká poloosa dráhy kolem Slunce v odsluní                                                                                      | 152 097 701 km                                          |
| Průměrná rychlost oběhu kolem Slunce                                                                                            | 29,783 km/s                                             |
| Odklon rotační osy od kolmice k dráze                                                                                           | 23° 26' 21''                                            |
| Výstřednost oběžné dráhy                                                                                                        | 0,016 710 22                                            |
| Počet měsíců                                                                                                                    | 1                                                       |
| *Siderický rok – doba oběhu Země kolem Slunce o 360°.<br>Tropický rok – doba oběhu kolem Slunce od jarního bodu k jarnímu bodu. |                                                         |

Některé zdroje uvádějí, že sklon dráhy k ekliptice je 0,000 05°. Dráha Země kolem Slunce leží téměř v jedné rovině, tedy v rovině ekliptiky. Drobné výkyvy od této roviny může způsobovat vliv ostatních těles (Měsíc, Jupiter atd.).

### 3.2.9 Úkoly a jejich řešení

**Úkol 1.** a) Vysvětlete, proč malé těleso vychladne dříve než velké těleso o stejné počáteční teplotě.<sup>1</sup>

b) Vysvětlete, proč se při stejné koncentraci radioaktivních látek může nitro velké planety zahřát na vysokou teplotu, ale nitro malé planety ne.<sup>1</sup>

*Řešení. a) V případě, že zvětšíme všechny rozměry tělesa např. 2x, zvýší se jeho povrch 4x, tedy za 1 sekundu z něj unikne 4x více tepla. Jeho objem a tím i tepelná kapacita se však zvýší 8x. Proto jeho střední teplota bude klesat 2x pomaleji.<sup>1</sup>*

*b) Když zvětšíme poloměr planety na dvojnásobek, zvětší se její objem, a tím i výkon jejích radioaktivních „kamen“ 8x, ale její povrch, a tím i rychlost chlazení jen 4x.<sup>1</sup>*

**Úkol 2.** Teplo z horkého zemského nitra neustále postupuje na chladnější povrch, a tím uniká do vesmíru. Přesná měření teplot ve vrtech ukazují, že v průměru neustále prochází každým metrem čtverečným zemského povrchu tepelný výkon 0,05 W. Vypočítejte, jaký tepelný výkon uniká z nitra Země celým jejím povrchem.<sup>1</sup>

*Řešení.* Ze Země uniká výkon  $2,5 \cdot 10^{13}$  W.

**Úkol 3.** Zkuste určit hranici litosférických desek podle horských řetězů a mořských příkopů.<sup>1</sup>

*Řešení.* Např. Kordillery nebo řetěz od Pyrenejí přes Alpy a Kavkaz až po Himaláje.<sup>1</sup>

**Úkol 4.** Co je jedním z důkazů, že dříve byly všechny kontinenty spojeny?<sup>1</sup>

*Řešení.* Pohyb kontinentů lze dokázat také tím, jak si odpovídají geologické útvary a nálezy zbytků organismů na západním pobřeží Afriky a na východním pobřeží Jižní Ameriky.<sup>1</sup>

**Úkol 5.** Odhadni pomocí zeměpisného atlasu, pro které Země bude charakteristické velmi deštivé klima?

*Řešení.* Např. Kongo, Brazílie, Indonésie, Velká Británie, Island, Patagonie.

**Úkol 6.** Odhadni pomocí zeměpisného atlasu, pro které Země bude charakteristické velmi suché klima.

*Řešení.* Např. pás pouští v obratníku Raka (Mexiko, Sahara, Arábie, Írán) a v obratníku Kozoroha (Chile, Namibie, Austrálie).

**Úkol 7.** Kdybychom shromáždili veškerý ozon ze stratosféry na povrch Země, dostali bychom vrstvičku asi 3 mm tenkou. Vypočítejte přibližný objem, jaký by stratosférický ozon zaujímal.<sup>1</sup>

Zjistěte, zda je realistický návrh na výrobu ozonu a jeho dopravu do stratosféry.<sup>1</sup>

*Řešení.* Objem stratosférického ozonu by byl řádově  $10^{12}$  m<sup>3</sup>.

Při výrobě 1 m<sup>3</sup> ozonu za sekundu by se ozonová vrstva plnila asi 50 000 let.<sup>1</sup>

**Úkol 8.** Pokuste se vysvětlit, proč spalování dřeva (pokud současně neubývá rozlohy lesů) nemůže zvýšit skleníkový jev.<sup>1</sup>

*Řešení.* Neubývá-li lesů, pak fotosyntézou se z atmosféry odebere na růst stromů právě tolik CO<sub>2</sub>, kolik se ho do ní dostane spálením dřeva.<sup>1</sup>

**Úkol 9.** Vypočítejte, jak závisí doba oběhu T družice pohybující se po kruhové dráze ve výšce h nad povrchem Země na této výšce. Předpokládejme, že Země je koule o poloměru  $r = 6\,378$  km. Zanedbejte odpor atmosféry.<sup>1</sup>

*Řešení.* Do vztahu  $v_k = \sqrt{\frac{G \cdot M}{(r+h)}}$ , který vyjadřuje kruhovou rychlost  $v_k$  v závislosti na gravitační konstantě  $G$  hmotnosti Země  $M$ , jejím poloměru  $r$  a výšce  $h$ , dosadíme

$$v_k = 2\pi(r+h)/T \text{ a dostaneme } T = 2\pi \sqrt{\frac{(r+h)^3}{G \cdot M}}.$$

**Úkol 10.** S využitím výsledků problému 9 vypočítejte dobu oběhu družice na kruhové dráze ve výšce 200 km nad zemským povrchem. Poté vypočítejte dobu, po kterou je

tato družice viditelná nad obzorem pro pozorovatele stojícího na rovníku. Zanedbejte otáčení Země a předpokládejte, že družice obíhá nad rovníkem.

*Řešení. Oběžná doba je 1 h 28 min 15,8 s.*

*Doba  $T$ , po kterou vidí pozorovatel družici ve výšce 200 km nad obzorem, je přibližně 33 s.*

*(Použijeme vztah pro úhlovou rychlost  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ )*

**Úkol 11.** Vypočítejte minimální energii, kterou je třeba dodat tělesu o hmotnosti 1 kg k tomu, aby se dostalo na kruhovou oběžnou dráhu ve výšce 250 km nad zemským povrchem. Zanedbejte změnu gravitačního zrychlení s výškou.<sup>1</sup>

*Řešení. Těleso o hmotnosti 1 kg ležící na rovníku má díky otáčení Země rychlost 465 m/s a kinetickou energii přibližně 0,1 MJ. Totéž těleso na oběžné dráze má kinetickou energii přibližně 30,2 MJ, tedy o 30,1 MJ větší. K tomu je třeba přidat přírůstek potenciální energie  $mgh \approx 2,5$  MJ. Na každý kilogram hmotnosti vyneseno tělesa je tedy třeba energie 32,6 MJ.<sup>1</sup>*

**Úkol 12.** Jak vypočítáme úhel, o který se pro pozorovatele ze Země může nejvíc vzdálit vnitřní planeta (Merkur nebo Venuše) od Slunce (maximální velikost úhlu Slunce-Země-planeta, označme  $\alpha$ . Tomuto úhlu se říká elongace)? Vyjádřete tento úhel pomocí poloměru dráhy planety  $r$  a poloměru dráhy Země  $R$ . Předpokládejte, že obě dráhy jsou kulové.<sup>1</sup>

*Řešení. Pro tento úhel  $\alpha$  platí, že  $\sin \alpha = r/R$ .*

### 3.3 Měsíc

Hmotnosti Měsíce a Země jsou si mnohem blíže, než je ve sluneční soustavě obvyklé. Proto astronomové někdy mluví spíše o „dvojplanetě“ než o planetě s měsícem. Poměr těchto hmotností je totiž 1:81, zatímco ostatní měsíce mají hmotnost alespoň tisíckrát menší než jejich planeta. Zásadní rozdíl oproti planetám je, že Měsíc nemá těžké jádro!

Pokud budeme sledovat povrch Měsíce ze Země, zjistíme, že je Měsíc natočen stále stejnou stranou. Znamená to, že doba jeho rotace okolo osy je přesně stejně dlouhá jako doba jeho oběhu kolem Země. Tento druh rotace se nazývá **vázaná rotace** a u měsíců planet se vyskytuje často. Rovnost doby oběhu a doby rotace není náhodná, ale byla způsobena slapovými silami, které na Měsíc působily od doby jeho tvoření.

Vzhledem k velmi pomalé rotaci jsou na měsíčním povrchu velké rozdíly mezi denní a noční teplotou. V noci až  $-190$  °C a ve dne je to přibližně  $+100$  °C. Měsíc je příliš malý a horký na to, aby si udržel nějakou atmosféru nebo aby dokonce bylo na jeho povrchu nějaké významnější množství vody. (**Úkol 1**)

Už prostým okem vidíme na Měsíci velké tmavší skvrny, kterým se říká **moře** i přesto, že v nich žádná voda není a nikdy nebyla. Pohled dalekohledem ukazuje, že měsíční povrch je hustě pokryt **krátery** nejrůznějších velikostí. Moře a krátery jsou typické útvary pro povrch Měsíce.

**Krátery** byly převážně vytvořeny dopady velkých i malých těles, hlavně v období přibližně před 4 miliardami let. Při dopadu tělesa o hmotnosti milionů tun a rychlosti několika km/s až desítek km/s se uvolní obrovská energie. To stačí na to, aby se všechna hmota tělesa okamžitě vypařila a způsobila obrovský výbuch, po kterém zůstane kruhový kráter. (**Úkol 2**)

Při výbuchu se hmota dopadajícího tělesa prakticky vypaří, ale do okolí kráteru je vyvrženo mnoho hmoty Měsíce samotného. Tato vyvržená látka je světlejší než tenká povrchová vrstva, a proto stopy po ní vidíme jako zvláštní světlé „paprsky“, které nápadně vycházejí z některých velkých kráterů.

**Měsíční moře** nejspíš vznikala ve dvou fázích. Nejprve dopadem velké planety vznikla rozsáhlá pánev a později, po stovkách milionů roků, byla tato pánev zalita tenkou vrstvou lávy, která ztuhla v čedič. Vzhledem k tomu, že moře jsou daleko větší než krátery (typické rozměry moří jsou až 1000 km), tak planety, které je svými dopady vytvořily, musely mít průměr podle výpočtů přibližně 100 km.

Z toho, že moře jsou pánve zalité lávou, je zřejmé, že na Měsíci kdysi existovala i sopečná činnost. Teplo, které bylo třeba k roztavení měsíčního nitra, pocházelo z části z rozpadu radioaktivních jader stejně jako na Zemi. Dalším důvodem je zřejmě vnitřní slapové tření vyvolávané blízkostí Země a v minulosti i teplo uvolňované při dopadech větších planetek. Každopádně sopečná činnost na Měsíci již dávno vyhasla.

### 3.3.1 Slapy

Již od nepaměti měl Měsíc na člověka prakticky tři základní vlivy. V noci měsíc někdy svítil, členil mu čas a způsoboval mořské slapy, příliv a odliv. O posledním vlivu, tedy o slapech, budou následující řádky.

Slapové síly nejsou závislé pouze na přitažlivosti Měsíce, ale také na vzdálenosti od Měsíce. Přitažlivá síla Měsíce závisí tak jako většina polí na druhé mocnině vzdálenosti. Kdyby se Země volně pohybovala („padala“) v homogenním gravitačním poli, „padaly“ by oceány současně s ní a nevznikala by žádná síla, která by se je snažila od Země „odtrhnout“. Avšak gravitační pole Měsíce není homogenní. Tělesa, která jsou Měsíci blíže, k němu „padají“ s větším zrychlením než tělesa, která jsou od něj dál. Kdyby Země své oceány nepřitahovala svou gravitační silou, za nějakou dobu by se přivrácené oceány dostaly k Měsíci daleko blíže než střed Země a střed Země zase daleko blíže než „odvrácené“ oceány. Jsou tedy slapové síly způsobeny nenulovými rozměry Země.<sup>1</sup> Ve skutečnosti samozřejmě Země působí na své oceány daleko větší silou než Měsíc, a proto se slapové působení Měsíce projevuje jen změnou mořské hladiny o méně než jeden metr. Celý děj je v podstatě způsoben tím, že se Země pohybuje jako celek tak, jak se pohybuje její těžiště. (**Úkol 3,4**)

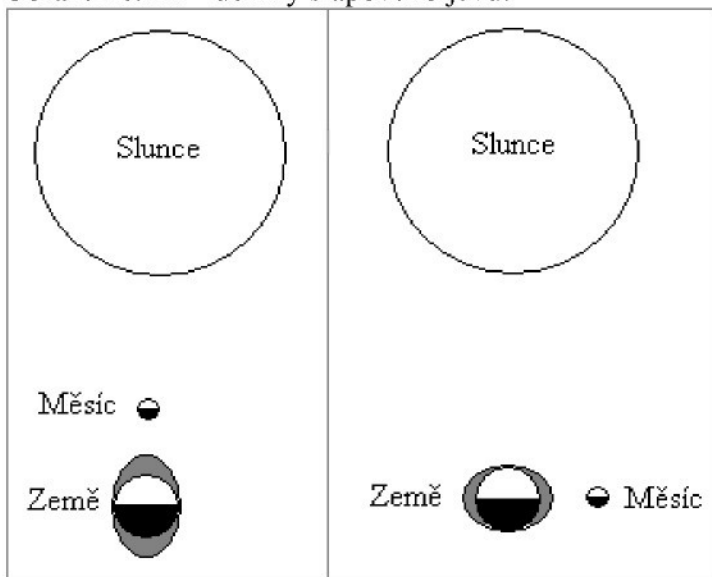
Ze vzorce pro slapové působení zjistíme, že závisí přímo úměrně na hmotě rušícího tělesa a nepřímo úměrně na třetí mocnině vzdálenosti od něho. Tím se toto působení liší od běžných fyzikálních polí. Platí vztah

$$F_{\text{slapové}} \approx M \cdot \frac{r}{R^3},$$

kde  $M$  je hmotnost rušícího tělesa,  $R$  vzdálenost tohoto tělesa a  $r$  je vzdálenost v místě určování slapových sil od těžiště planety.

**Slapové účinky** nemá na oceány pouze Měsíc, ale také **Slunce**. Jeho vliv je zhruba poloviční. Slapy od Měsíce a Slunce se posilují, když obě tato tělesa leží spolu se Zemí na jedné přímce, to znamená, pokud je Měsíc v novu anebo v úplňku. Naopak při měsíčních čtvrtích se zeslabují.

Obrázek č. 21 – účinky slapového jevu.

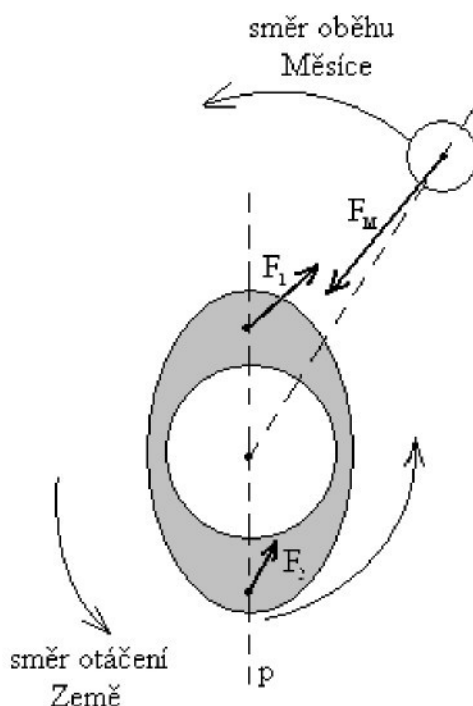


Slapové síly působí také na celý zemský plášť a kůru. Na rozdíl od vody se pevné části Země nepoddávají slapovým silám tak snadno a udržují tvar daleko lépe. Ale vzhledem k tomu, že nejsou ideálně tvrdé, tak se na pevném povrchu také projevuje „příliv a odliv“, řádově však vysoký přibližně 20 cm.

Působením slapových sil Měsíce se hladina oceánů a moří zvedá až o 35,7 cm a působení slapových sil Slunce až o 16,4 cm. Zvednutí hladin oceánů a moří je tedy celkem až o 52,1 cm. Na druhé straně pokles vod o 17,8 cm je způsoben Měsícem a o 8,2 cm Sluncem. Celkový pokles je až 26 cm. Celkový rozdíl výšky hladin oceánů a moří může být až o 78,1 cm.

Jak se Země otáčí, unáší s sebou „vyboulené“ části oceánu i zemské kůry, zatímco slapové síly se je snaží udržovat přesně na spojnici středů Země a Měsíce. Protože oceány ani zemské nitro nejsou ideálně tekuté, daří se tato „snaha“ slapovým silám jen částečně, s jistým zpožděním. S trochou nadsázky to vypadá jako na obrázku 22.

Obrázek č. 22 – slapový jev.



Vzhledem k tomu, že oceány a zemská kůra se slapovým silám přizpůsobují se zpožděním, tak spojnice  $p$  nejvyšších míst přílivu nemíří přímo k Měsíci, ale trochu před něj. Síla  $F_M$ , kterou takto deformovaná Země působí na Měsíc, nemíří přesně do středu Země a má proto složku, která nepatrně zrychluje Měsíc na jeho dráze, což ho oddaluje od Země rychlostí přibližně 3 cm za rok. Měsíc Zemi naopak nepatrně brzdí. Síly  $F_1$  a  $F_2$ , kterými Měsíc působí na bližší a vzdálenější polovinu deformované Země, nejsou stejně velké, a tudíž působí momentem sil proti směru otáčení Země. Z tohoto důvodu se pozemský den prodlužuje o 1,7 ms za každé století. Tento proces by vedl přibližně za  $3,2 \cdot 10^9$  let k tomu, že se doba otočení Země a doba oběhu Měsíce vyrovná. Nastane tak vázaná rotace celé soustavy.

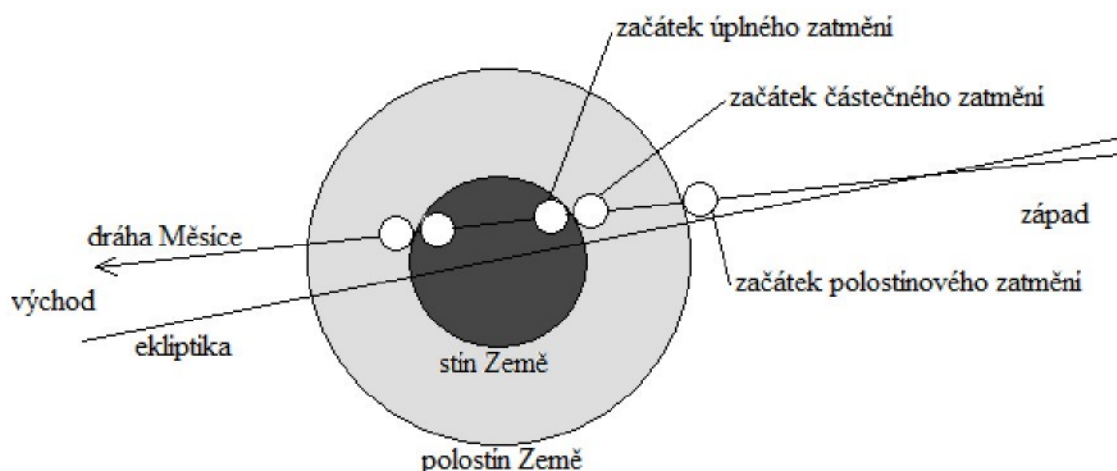
Podobným způsobem způsobily slapové síly Slunce to, že Merkur a Venuše mají mimořádně dlouhou periodu rotace kolem své osy.

### 3.3.2 Zatmění Měsíce a Slunce

K tomu, aby k zatmění Měsíce a Slunce došlo, se musí Slunce, Země i Měsíc nacházet na jedné přímce. Při zatmění Měsíce se Měsíc vnoří do kuželovitého stínu Země a my pozorujeme, jak se postupně ztrácí z oblohy. Na první pohled by mělo k zatmění Měsíce docházet při každém úplňku a zatmění Slunce při každém novu, ale ve skutečnosti je situace jiná. Oběžná rovina Měsíce je totiž vůči oběžné rovině naší planety kolem Slunce (ekliptice) skloněna o úhel zhruba 5,2 obloukového stupně a navíc se pomalu stáčí (o  $19^\circ$  ročně). Měsíc se tedy musí dostat do bodu (říkáme mu uzlu), ve kterém se obě dráhy (roviny jejich drah) protínají. Pokud se Měsíc dostane pouze do polostínu Země, nevšimneme si prakticky ničeho a mluvíme o tzv. **polostínovém zatmění**. Abychom spatřili stopy prvního našedivělého ztemnění levého okraje, musíme si počkat, až se jeho měsíční kotouč vnoří do stínu Země alespoň do

poloviny svého průměru. Potom, co se Měsíc zcela vnoří do plného stínu při **úplném zatmění**, uvidíme ve většině případů cihlově až krvavě zabarvený kotouč zdobící noční oblohu. To, že je Měsíc vidět, je způsobeno refrakcí slunečního světla v horních vrstvách zemské atmosféry. Paprsky ohnuté v atmosféře Země osvětlí Měsíc natolik, že je stále slabě vidět. Protože nejvíce se láme červené světlo, má Měsíc při zatmění narudlou barvu. Dále ještě rozlišujeme **částečné zatmění**, kdy část povrchu Měsíce je zcela zastíněna Zemí.

Obrázek č. 23 – zatmění Měsíce.



Tabulka č. 5 – zatmění Měsíce.

| PŘEHLED ZATMĚNÍ MĚSÍCE VIDITELNÝCH Z ČR V LETECH 2007 AŽ 2015                                   |                  |                                       |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------------------|-----------|
| Datum                                                                                           | Typ zatmění      | Střed zatmění ve středoevropském čase | Velikost* |
| 3.3.2007                                                                                        | úplné zatmění    | 0 h 21 min                            | 1,24      |
| 21.2.2008                                                                                       | úplné zatmění    | 4 h 26 min                            | 1,11      |
| 16.8.2008                                                                                       | částečné zatmění | 22 h 10 min                           | 0,81      |
| 31.12.2009                                                                                      | částečné zatmění | 20 h 23 min                           | 0,08      |
| 21.12.2010                                                                                      | částečné zatmění | 9 h 16 min                            | 0,26      |
| 15.6.2011                                                                                       | úplné zatmění    | 21 h 12 min                           | 1,71      |
| 25.4.2013                                                                                       | částečné zatmění | 21 h 07 min                           | 0,02      |
| 25.9.2015                                                                                       | úplné zatmění    | 3 h 47 min                            | 1,28      |
| * velikost vyjadřuje, jaký násobek průměru měsíčního disku je nejvíce ponořen do zemského stínu |                  |                                       |           |

Zatmění Slunce je častější než zatmění Měsíce a nastane, dostane-li se Měsíc mezi Zemi a Slunce. Samozřejmě za předpokladu leží-li Slunce i Měsíc při pohledu ze Země na jedné přímce. Na části Země, kde je zatmění pozorováno, dochází k výraznému setmění a ochlazení. Kolem černého středu Slunce je vidět výrazná záře sluneční koróny a objeví se hvězdy i některé planety. Známe jsou také neobvyklé reakce zvířat.

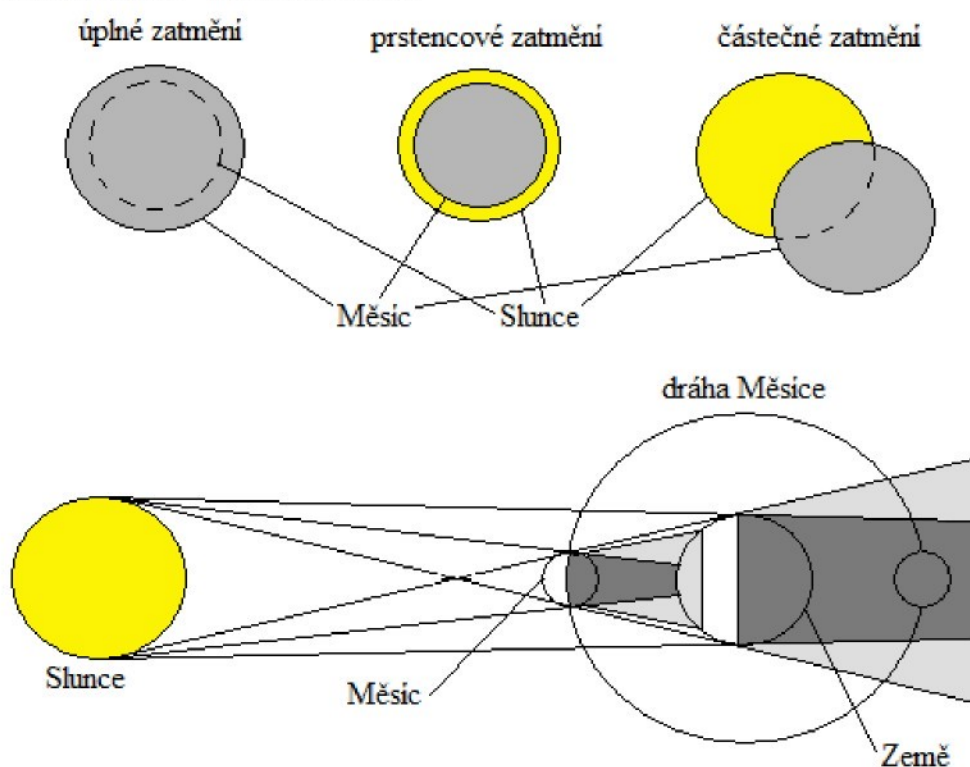


**Úplné zatmění** Slunce je vzácný jev, který je možný díky tomu, že Slunce, které je čtyřikrát větší než Měsíc, je také čtyřikrát dále od Země. Navíc Měsíc i Země obíhají po eliptických drahách. Tyto dráhy všechna tři tělesa občas přivádějí do takového postavení, kdy je zakryt právě celý sluneční kotouč, takže je možno pozorovat korónu. Každý rok dojde ke dvěma až pěti případům zatmění Slunce, které jsou pozorovatelné z povrchu Země. Pro jedno určité místo k tomu však dochází průměrně jen jednou za 360 let. Maximální doba úplného zatmění Slunce je 7 min 31 s. Oblast, podél které je úplné zatmění možno pozorovat, nebývá širší než 270 km; zasažena je přibližně jen jedna setina zemského povrchu. Této oblasti se říká **pás totality**.

**Prstencové zatmění** Slunce můžeme pozorovat, je-li Měsíc a Slunce v jedné přímce, ale zdánliví velikost Měsíce je menší než Slunce.

**Částečné zatmění** nastává, když Měsíc a Slunce nejsou přesně v jedné přímce a Slunce je Měsícem zakryto pouze z části.

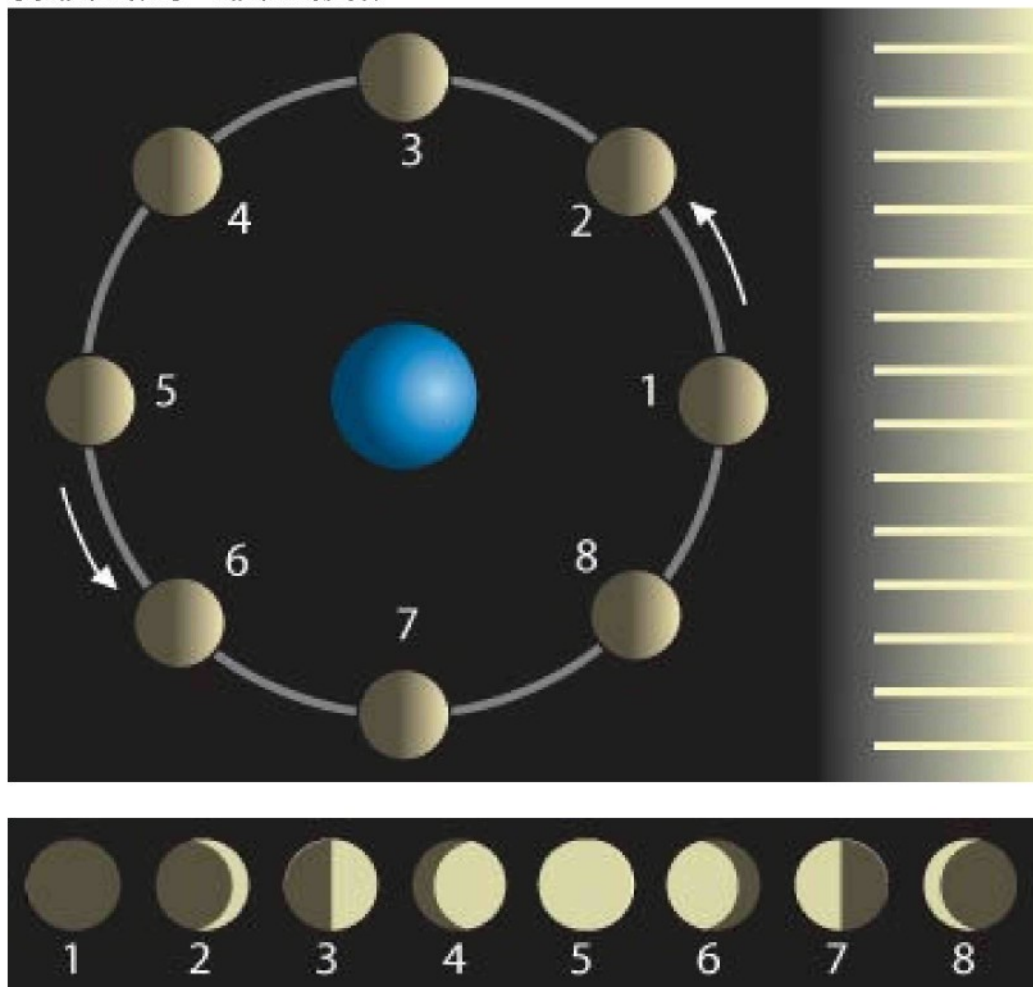
Obrázek č. 24 – zatmění Slunce.



### 3.3.3 Fáze Měsíce

Jedním z prvních astronomických cyklů, kterých si lidé na obloze všimli, bylo vedle střídání dne a noci, střídání měsíčních fází. Měsíc se nám někdy jeví jako úzký srpek, jindy jako různě zaoblený kotouč a občas jej na obloze nevidíme vůbec. Měsíc všechny jednotlivé fáze prostřídá během tzv. **lunace**, která průměrně trvá 29,530 588 dne, což se blíží nápadně dvanáctině našeho kalendářního roku. Odtud také její pojmenování nejen v češtině měsíc, ale i v jiných jazycích (Moon – month, Mond – Monat). Střídání měsíčních fází se také využívalo jako jednotky pro měření času. Muslimové a Židé dokonce používají měsíční kalendář dodnes.

Obrázek č. 25 – fáze Měsíce.



**1. Nov** (stáří 0 dní). Celý cyklus měsíčních fází začíná novem nebo také novoluním, kdy se Měsíc nachází mezi námi a Sluncem. Jeho osvětlená polokoule v té době míří od Země, takže při pohledu z povrchu naší planety je Měsíc neviditelný. Jednak se díváme na jeho temnou neosvětlenou polovinu, a navíc je na denní obloze příliš blízko zářivého Slunce.

**2. Dorůstající srpek** (stáří 0 až 7,4 dní). Díky oběhu kolem Země se Měsíc mezi hvězdami neustále pohybuje od západu k východu, tedy stejným směrem, jakým nás unáší rotace Země. Po novu proto začíná Měsíc „stárnout“. Na obloze se vzdaluje od Slunce a zároveň vidíme stále větší část jeho osvětlené polokoule. Již za pár dní po novu se objevuje večer nad západním obzorem v podobě úzkého srpku.

**3. První čtvrt'** (stáří 7,4 dní). Měsíc má tvar písmene „D“ (říká se také, že Měsíc „dorůstá“). Bude zapadat kolem půlnoci a za večerního soumraku ho najdeme nad jižním obzorem. Období první čtvrti je nejvhodnější pro pozorování Měsíce dalekohledem, neboť v tuto dobu prochází hranice mezi světlem a stínem středem přivrácené strany měsíčního disku, kde všechny útvary vidíme přímo „z nadhledu“.

**4. Dorůstající Měsíc** (stáří 7,4 až 14,8 dní). Po první čtvrti Měsíc vychází stále později, takže ho za večerního soumraku naleznete v jihovýchodní části oblohy. V tuto dobu se Měsíc stává nepřehlédnutelnou dominantou nočního nebe.

**5. Úplněk** (stáří 14,8 dní). Přibližně čtrnáct dní po novu se dostane Měsíc do fáze úplňku. Úplňkový Měsíc zpravidla vychází hned po západu Slunce a zalévá okolní krajinu svým svitem. Říkáme, že Měsíc je v opozici se Sluncem, čili stojí na obloze přímo naproti Slunci. Měsíční cyklus se v této chvíli dostává do své druhé poloviny. Jeho podoba začne mít tvar „C“ (říká se, že Měsíc „couvá“)

**6. Couvající Měsíc** (stáří 14,8 až 22,1 dní). Po úplňku se hranice světla a stínu objeví u pravého okraje měsíčního kotouče a Měsíc začne „ubývat“. Měsíc v této době vychází stále později a je dominantní především v druhé polovině noci.

**7. Poslední čtvrt'** (stáří 22,1 dní). Měsíc vychází až kolem půlnoci a zapadá po východu Slunce. Jakmile získá podobu půlměsíce ve tvaru písmene C, nastane fáze zvaná poslední čtvrt'. Měsíc bude vycházet až kolem půlnoci a k západnímu obzoru se začne sklánět za denního světla, někdy kolem poledne.

**8. Ubývající srpek** (stáří 22,1 až 29,5 dní). Přibližně 25 dní po novu zůstane z půlměsíce jen úzký srpek zdobící před svítáním východní obzor. Den po dni bude vycházet stále později a brzy zmizí v záři vycházejícího Slunce. Nastane nov a cyklus pravidelných proměn měsíčních fází je opět na začátku.

Tabulka č. 5 – základní údaje o Měsíci.

|                                       |                                                         |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Hmotnost                              | $7,349 \cdot 10^{22}$ kg                                |
| Průměr                                | 3 474,8 km                                              |
| Průměrná hustota                      | $3341 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$                   |
| Povrchová teplota                     | -230 až +135 °C                                         |
| Průměrná vzdálenost od Země           | 381 553 km                                              |
| Tíhové zrychlení na povrchu           | $1,62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$                    |
| GM                                    | $4\,902,799 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ |
| Úniková rychlost z Měsíce             | $2,38 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$                   |
| Doba oběhu kolem Země                 | 655,72 hodin                                            |
| Otáčka kolem vlastní osy              | 655,72 hodin                                            |
| Výstřednost oběžné dráhy              | 0,055                                                   |
| Inklinace (sklon) roviny oběžné dráhy | $5,145^\circ$                                           |
| Odklon rotační osy od kolmice k dráze | $1,53^\circ$                                            |

### 3.3.4 Úkoly a jejich řešení

**Úkol 1.** Kdyby na povrchu Měsíce existovala nějaká voda, kde byste ji hledali?<sup>1</sup>

*Řešení.:* V polárních oblastech Měsíce a na dně některých hlubších kráterů, kam nikdy nedopadne sluneční záření. Proto je tam neustále nízká teplota a vody by zde mohla existovat ve formě ledu. Dostat by se mohla na Měsíc při dopadu malých komet.<sup>1</sup>

**Úkol 2.** Při výbuchu 1 kg trinitrotoluenu (TNT) se uvolní energie okolo 4,2 MJ. Vypočítejte, jakou rychlostí musí dopadnout těleso na povrch planety, aby se uvolnila stejná energie jako při výbuchu TNT o stejné hmotnosti.<sup>1</sup>

*Řešení.: Při řešení použijeme rovnici pro výpočet kinetické energie  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ , kde za  $E_k$  dosadíme hodnotu 4,2MJ a vypočítáme rychlost  $v$ , která je přibližně 3 km/s.<sup>1</sup>*

**Úkol 3.** Vypočítejte dobu mezi dvěma přílivy.<sup>1</sup>

*Řešení.: Měsíc obíhá Zemi úhlovou rychlostí  $\omega_M = \frac{360^\circ}{T_M}$ , kde  $T_M = 27,322 d = 2\,361\,000 s$  je jeho oběžná doba vzhledem ke hvězdám. Země se otáčí úhlovou rychlostí  $\omega_Z = \frac{360^\circ}{T_Z}$ , kde  $T_Z = 23 h a 56 min = 86\,160 s$  je hvězdný den. Pro pozorovatele, který se otáčí se Zemí, Měsíc postupuje po obloze úhlovou rychlostí  $\Omega = \omega_Z - \omega_M$  a zdánlivě oběhne Zemi za dobu  $T$  splňující  $\Omega = \frac{360^\circ}{T}$ . Z těchto rovnic dostaneme vztah  $\frac{1}{T} = \frac{1}{T_Z} - \frac{1}{T_M}$ . Po dosazení získáme výsledek, kde  $T = 89\,420 s = 24 h 50 min$ .<sup>1</sup>*

**Úkol 4.** Vypočítejte, jaká je intenzita gravitačního pole (gravitační zrychlení) Měsíce: a) ve středu Země, b) v místě na povrchu Země, které je nejbližší k Měsíci, c) v místě na povrchu Země, které je od Měsíce nejdál. Z těchto hodnot vypočítejte, jaká slapová síla působí na 1 m<sup>3</sup> vody a o kolik procent tato síla zmenšuje sílu přitahující vodu ke středu Země.<sup>1</sup>

*Řešení.: Intenzita gravitačního pole Měsíce ve vzdálenosti  $R+d$  od jeho středu je  $g_M = \frac{\gamma \cdot m_M}{(R+d)^2}$ , kde  $m_M$  je hmotnost Měsíce.  $R$  je průměrná vzdálenost středů Měsíce a Země, což je  $384,4 \cdot 10^6 m$ . Za  $d$  budeme dosazovat poloměr Země,  $d = 6,378 \cdot 10^6 m$ . a) ve středu Země platí, že  $d=0$ , pak  $g_M \approx 3,32 \cdot 10^{-5} m \cdot s^{-2}$ . b) v místě nejbližší Měsíci je  $d = -6,378 \cdot 10^6 m$  a  $g_M \approx 3,43 \cdot 10^{-5} m \cdot s^{-2}$ . c) v místě Měsíci nejvzdálenějším dosadíme  $d = 6,378 \cdot 10^6 m$ . Potom  $g_M \approx 3,21 \cdot 10^{-5} m \cdot s^{-2}$ . V obou posledních případech způsobuje pole Měsíce změnu tíhového zrychlení o  $\Delta g_M \approx 0,11 \cdot 10^{-5} m \cdot s^{-2} \approx 10^{-7} g$  (kde  $g$  je zemské tíhové zrychlení). Na 1000 kg vody působí slapová síla 0,0001 N (desetimiliontina tíhové síly). I takto nízká hodnota však způsobuje značné pohyby mořské hladiny.<sup>1</sup>*

### 3.4 Další planety sluneční soustavy

Planety sluneční soustavy se dají rozdělit do dvou skupin podle vzdálenosti od Slunce. Planety, které jsou méně vzdáleny od Slunce než Země, se nazývají **vnitřní planety** a ty, které mají od Slunce větší vzdálenost, zase **vnější planety**.

Dále lze dělit planety podle jejich složení. Ty, které jsou složeny převážně z křemíku, se nazývají **terestrické planety** a patří k nim Merkur, Venuše, Země a Mars. Mají všechny podobnou strukturu. Centrální kovové jádro převážně ze železa, obklopené křemičitanovým pláštěm, který na povrchu přechází v kůru.

Ostatní planety jsou **plynní obři**, jež nemají pevný povrch a skládají se především z vodíku, helia a vody v různých kombinacích a skupenstvích. Jejich povrch není vidět.

### 3.4.1 Rotace a dráhy planet

Všechny planety se otáčejí kolem své osy. Většinou ve stejném smyslu, v jakém obíhají okolo Slunce. Jen Venuše se otáčí v opačném smyslu a osa rotace Uranu leží téměř v rovině oběžné dráhy.

V našem „mandarinkovém“ modelu byl předpoklad, že dráhy planet okolo Slunce jsou kružnice. To je nejjednodušší přiblížení. Skutečné dráhy jsou tzv. **Keplerovy elipsy**, v jejichž jednom ohnisku je Slunce. Tyto elipsy jsou však dost blízko kružnici. Jejich excentricita je většinou (mimo Merkur) velmi malá a rozdíl mezi vzdáleností od Slunce v nejbližším bodě (říká se mu **přísluní** neboli perihélium) a v nejvzdálenějším bodě (říká se mu **odsluní** neboli afelium) je např. u Země přibližně 4%.

Také Keplerovy elipsy jsou přiblížením ke skutečným drahám planet, i když mnohem přesnějším než kružnice. Z Newtonových zákonů se dá odvodit, že planeta obíhá okolo Slunce po elipse, je-li její hmotnost zanedbatelná oproti hmotnosti Slunce a jsou-li rozměry Slunce i planety zanedbatelné proti vzdálenosti planety od Slunce. Poslední podmínkou je nepřítomnost jiných těles v okolí, která by na planetu působila gravitační silou.

Z těchto tří podmínek je nejhůře splnitelná poslední. Planety na sebe navzájem působí gravitačními silami a způsobují tak poruchy svých drah.<sup>1</sup> Největší poruchy způsobuje nejhmotnější planeta sluneční soustavy, Jupiter. Síla, kterou působí Jupiter na planetu Saturn je až 0,3% síly, kterou na Saturn působí Slunce. V důsledku tohoto působení sebou tyto planety navzájem „cloumají“.

### 3.4.2 Merkur

Tento malý kamenný svět, který je první planetou od Slunce, zná lidstvo od 3. tisíciletí př. n. l., ovšem pro staré Suméry nebyl tělesem, ale bohem. Od Řeků dostal hned dvě jména: Apollo při svém zjevování se jako ranní hvězda a Hermes jako hvězda večerní.

Merkur okolo Slunce obíhá nejrychleji ze všech planet Sluneční soustavy. Má ze všech vnitřních planet nejmenší průměr. Je dokonce menší než Jupiterův měsíc Ganymédes a Saturnův Titan. I přes své malé rozměry je to opravdu planeta. Má totiž velké, těžké jádro.

Vzdálenost od Slunce se pohybuje v rozmezí 46 až 70 milionů kilometrů. Jeho dráha je tedy nejvýstřednější ze všech planet. Vzdálenost mezi Merkurem a Zemí nabývá hodnot od 78 do 218 milionů kilometrů. A během této cesty se fáze planety mění od novu po úplněk. Jasnost během této doby kolísá zhruba mezi jasností hvězd **Sírius** a **Aldebaran**.

Blízkost u Slunce nedovoluje, aby se Merkur na pozemské obloze vzdálil od Slunce na víc než 28,5°. Pokud využijeme všech příznivých období, máme šanci pozorovat Merkur prostým okem asi jednou až dvakrát do roka. Nejlépe ho uvidíme kolem období maximálních **elongací** (úhel planeta-Země-Slunce), kdy je úhlově nejvíce vzdálen od Slunce, a to při západní elongaci za svítání nad východním obzorem jako jitřenku nebo při východní elongaci za večerního soumraku nad západním obzorem jako večernici.

Obojí označení, jitřenka a večernice, se sice používá hlavně pro Venuši, ale správné je i pro Merkur, protože obě planety se řadí k vnitřním planetám a pozemský pozorovatel je vidí vždy jen v blízkosti Slunce.

Ani největšími dalekohledy pozorovatelé neodhalili na Merкуру víc než jen několik neurčitých skvrnek. Až v první polovině 60. let nám přinesla lepší výsledky nová metoda – radarová astronomie.

Na sluneční straně dosahují nejvyšší teploty +500 °C, ostatní místa na rovníku v subpolárním bodě (bod planety, který má Slunce v **zenitu**) nejméně 375 °C. Je překvapující nedávné (1991) zjištění, že v oblasti obou Merkurových pólů by se mohl vyskytovat vodní led. Předpokládá se, že stejně jako v případě našeho Měsíce ho do oblastí věčného stínu a tedy i chladu v minulosti zanesly komety. Noční strana se vyznačuje naopak mrazem asi až -180 °C. Střední sluneční den na Merкуру se rovná 176 dnům pozemského času.

Pokaždé, když Merkur prochází **perihéliem** a planeta je ke Slunci nejbliž, se kromě toho Slunce na Merkurově obloze zastaví a po dobu asi 8 dnů se pohybuje opačným směrem, než se zase začne posouvat směrem k západu. Příčinou tohoto neobvyklého jevu je skutečnost, že v té době úhlová rychlost oběhu převyšuje úhlovou rychlost rotace kolem osy.

Většinu informací získáváme od jediné kosmické sondy – Marinek 10, která v letech 1974 až 1975 třikrát prolétla kolem planety a zmapovala asi polovinu jejího povrchu. Ten je posetý impaktními krátery, planinami různého stáří a zlomy. Snímky z kosmického prostoru už z dálky ukazují, že povrch Merкуру pokrývá mnoho kruhových kráterů, různá pohoří a tektonické brázdy.

Při východu Slunce teplota na povrchu Merкуру rychle stoupá a skály se brzy rozpalují horkem. Slunce je přibližně 2 krát větší než jak ho známe ze Země, ale trvá několik pozemských dnů, než se vyhoupne celé nad obzor. Při tak vysoké teplotě, jaká zde panuje, by se dalo tavit olovo.

Po západu Slunce naopak klesne teplota natolik, že skály praskají a železo by v noci na Merкуру zkřehlo jako sklo.

Tabulka č. 6 – základní údaje Merкуру.

|                                       |                          |
|---------------------------------------|--------------------------|
| Hmotnost                              | $3,302 \cdot 10^{23}$ kg |
| Průměr                                | 4 880 km                 |
| Průměrná hustota                      | 5427 kg/m <sup>3</sup>   |
| Povrchová teplota                     | -180 °C až +500 °C       |
| Tíhové zrychlení na povrchu           | 3,701 m·s <sup>-2</sup>  |
| Doba otočení kolem své osy            | 58,646 dní               |
| Doba oběhu kolem Slunce               | 87,97 dní                |
| Velká poloosa dráhy kolem Slunce      | 57 909 175 km            |
| Odklon rotační osy od kolmice k dráze | 0,01°                    |
| Výstřednost oběžné dráhy              | 0,205 62                 |
| Inklinace (sklon) roviny oběžné dráhy | 7°                       |
| Počet měsíců                          | 0                        |



### 3.4.3 Venuše

Jako třetí nejjasnější objekt pozemské oblohy po Slunci a Měsíci ji znali už staří Babyloňané. Na nebi se objevuje ráno jako jitřenka a večer jako večernice.

Je to další z vnitřních planet sluneční soustavy a naše nejbližší planetární sousedka.

Dnes považujeme za samozřejmé, že u planety, obíhající kolem Slunce blíže, než my, musíme dalekohledem vidět změny osvětlení jejího povrchu jako střídání fází od úplňku do novu. Když to koncem září 1610 zjistil Galileo Galilei, uvědomil si, že je to významný důkaz proti Aristotelovu geocentrismu: planeta obíhající kolem Země by tak nikdy nemohla vypadat.

Dalekohledem na Venuši kromě její podoby (fáze) spatříme jen několik téměř neznatelných skvrn. Venuše je neustále zahalena vrstvou neprůhledné oblačnosti, která nedovolí přímo vidět povrch.

Jedná se o planetu jen o málo menší než Země. Ještě počátkem 60. let 20. století se vědci domnívali, že Venuše bude sestrou Země, ale vzápětí družice a kosmické sondy vysvětlily tento omyl. Samotný skalnatý povrch nejprve „ohmatávaly“ radarové paprsky, vyslané a po odrazu opět přijímané velkými radioteleskopy ze Země. Později byly radarové aparatury vyslány přímo nad planetu.

Charakter povrchu je bližší Zemi než Marsu, ale tekutá voda a tedy hydrosféra na Venuši chybí a povrch je zcela suchý. 60% plochy zaujímají níže položené rovinaté oblasti se zvlněním maximálně do jednoho kilometru, mezi kterými jako ostrovy vystupují vyvýšené bloky. Nižší oblasti jsou analogií oceánských pánví, ovšem bez vody.

Počátkem 90. let zaznamenala sonda Magellan mapovacím radarem na 16 000 sopek, z nichž nejvyšší je Maat Mons s výškou 8,5 km a průměrem základny 450 km. Dále sonda našla téměř 1000 kráterů s průměry do 275 km – z části impaktních, ale především vulkanických s lávovými výlevy a proudy, některé možná stále ještě činné.

Tvar Venuše se ze všech zkoumaných planet nejvíce blíží kouli – střední rovníkové zploštění je 1/96 000 a pólové zploštění je 1/110 000.

Plynný obal planety je velmi hustý a asi stokrát hmotnější než zemské ovzduší. Hmotnost plynného obalu Venuše je řádově desetitisícinou hmotnosti samotné planety, zatímco hmotnost ovzduší Země je řádově miliontina hmotnosti Země. Atmosféra Venuše se skládá převážně z oxidu uhličitého (97 %), 1 až 3 % dusíku a příměsí helia, neonu, argonu, oxidu siřičitého a 0,006 % molekulárního kyslíku. Vodních par je jen stotisícina toho množství, které se vyskytuje v atmosféře Země. Množství SO<sub>2</sub> se občas zvýší, zřejmě jako následek vulkanických erupcí. CO<sub>2</sub> se do atmosféry nepochybně dostal při vulkanické činnosti a na rozdíl od Země, kde je dnes vázán ve vápencích v kůře, zůstal v atmosféře. Vytváří tak výrazný skleníkový efekt, který je příčinou vysoké povrchové teploty blížící se k hodnotě +500 °C.

Oblačnost Venušiny atmosféry tvoří tři na sebe navazující vrstvy. Nejvyšší leží ve výškách 56 – 70 km a má teplotu kolem 13 °C. V ní již ve výšce 63 km přestává být viditelný sluneční kotouč a hlouběji je jen rozptýlené světlo. Nad touto vrstvou leží do 80 km vrstva jemné mlhy z vodní páry a ledových krystalků, obdoba našich **cirru** (obлак, který se v zemské atmosféře objevuje nejvýš). Střední vrstva oblačnosti s výškami 49,5 až 56 km vykazuje dohlednost 1,5 km. Dolní vrstva ve výškách 47,5 – 49,5 km je nejhustší a teplota zde již dosahuje 100 °C – ve dne i v noci.

Ve vrstvách oblaků jsou kapičky síry a kyseliny sírové, které klesají ke spodní hranici oblaků, kde se vysokou teplotou vypařují, stoupají vzhůru, kde zkapalňují a pokračují v koloběhu. Pod oblaky je opět slabá mlha, místy naopak výborná



dohlednost až 80 km, ve výšce 10 km je prostředí červenavě zbarvené, protože světlo ostatních barev je rozptýleno vyššími vrstvami.

Teplota dosahuje 410 °C. Od výšky 7 km jsou vidět útvary povrchu. Na povrchu panuje atmosférický tlak 95krát vyšší než na povrchu Země a teplota bývá přes 450 °C, dohlednost 3 km a osvětlení jako při silně zatažené pozemské obloze. Podmínky připomínají stav páry v parním kotli před vstupem do vysokotlaké turbíny.

Tabulka č. 7 - základní údaje Venuše.

|                                       |                                      |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Hmotnost                              | $4,8685 \cdot 10^{24}$ kg            |
| Průměr                                | 12 104 km                            |
| Průměrná hustota                      | $5243 \text{ kg/m}^3$                |
| Povrchová teplota                     | +460 °C                              |
| Tíhové zrychlení na povrchu           | $8,87 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ |
| Doba otočení kolem své osy            | 243 dní                              |
| Doba oběhu kolem Slunce               | 224,7 dní                            |
| Velká poloosa dráhy kolem Slunce      | 108 208 926 km                       |
| Odklon rotační osy od kolmice k dráze | 177,4°                               |
| Výstřednost oběžné dráhy              | 0,006 81                             |
| Inklinace (sklon) roviny oběžné dráhy | 3,4°                                 |
| Počet měsíců                          | 0                                    |

### 3.4.4 Mars

I když je Mars třetím nejmenším planetárním tělesem sluneční soustavy, má pro lidstvo vysoký význam.

Mars upoutá pozornost již svojí cihlově červenou barvou. Staré národy považovaly Mars za symbol ohně a krve, proto má také planeta jméno Mars – bůh války. Charakteristická barva je ve skutečnosti způsobena výskytem oxidů železa na povrchu, připomínajícím kamenitou poušť. Horniny, půda i obloha mají hnědočervené až okrové zabarvení.

Mars má oproti Zemi přibližně poloviční průměr a je obklopen dynamickou atmosférou. Přes mnoho rozdílů je Zemi nejpodobnější, a to například dobou rotace, sklonem osy, střídáním ročních dob i některými povrchovými útvary. Detailnější pohled a většina poznatků přinesly kosmické sondy, kterých se na Mars vydalo již celkem 50. Díky těmto sondám byla potvrzena teorie, že na Marsu kdysi tekla voda.

Sklon rotační osy Marsu se téměř shoduje se sklonem rotační osy Země, a to je důvodem střídání ročních období. Vzhledem k delší oběžné dráze Marsu kolem Slunce trvá každé období kolem poloviny zemského roku.

Mars se otáčí kolem své osy jen o málo pomaleji než Země, takže sluneční den trvá 24 h 39 min 35 s. Denní pohyb hvězd probíhá stejně jako na pozemské obloze, jen viditelnost souhvězdí je poněkud jiná a průzračnost atmosféry je nižší než u nás. Jako nejjasnější objekt na Marsově obloze září Země.

Současné **poznání nitra Marsu** nasvědčuje tomu, že může být modelován kůrou, tvořenou nejlehčími látkami, pláštěm a jádrem z roztaveného železa a dalších příměsí.

Měření změny gravitačního pole planety byla získána orientační mapa kůry Marsu, složené z hliníku a křemíku. Rozsah tloušťky se mění v rozmezí 30 až 80 km, přičemž jsou prokazatelné rozdíly mezi severní polokoulí, kde je kůra tenčí a jižní polokoulí, kde je silnější.

Tenká kůra podporovala rychlé ochlazování nově vzniklé planety a mohla přispět ke vzniku velkého severního oceánu na nově vzniklém Marsu. Silná kůra může vysvětlit nepřítomnost deskové tektoniky.

Plášť, tvořený především olivínem a FeO, by mohl být silný přibližně 1500 až 2000 km. V nitru Marsu je jádro, o němž máme dosud jen orientační představu mezních hodnot. Zaujímá přibližně 16 % hmotnosti planety a 4 % jejího objemu. Jestliže je jádro pevné podobně jako zemské, potom by měl být jeho minimální poloměr asi 1250 km.

Opět díky sondám je s jistotou známo, že povrchový tlak řídké **atmosféry** je kolem 760 Pa (asi jako ve stratosféře Země ve výšce 30 km). Hodnoty naměřené na povrchu sondami jsou: Viking 1 – 900 Pa, Viking 2 – 1080 Pa a Pathfinder – 680 Pa. Povrchový tlak ovšem lokálně dosahuje hodnot až 1400 Pa v závislosti na reliéfu terénu a sezónních změnách. Pro porovnání průměrný atmosférický tlak na Zemi je 101 325 Pa.

Atmosféra planety Mars je zcela odlišná od ovzduší na Zemi. Je složena zejména z CO<sub>2</sub> (95,32 objemových procent) a z malého množství ostatních plynů, jako je dusík, argon, kyslík, oxid uhelnatý a stopy vodních par.

Pozorované soutěsky, údolí, kaňony, pobřeží i koryta velmi věrohodně napovídají, že jimi tekla voda.

Větrné proudění je poměrně značné a dosahuje až 450 km/h, ovšem vzhledem k hustotě atmosféry je účinek podstatně menší než mají pozemské uragány. Jsou však dobře patrné účinky větrné eroze.

Teploty se na Marsu pohybují v rozmezí –140 °C až –20 °C (133 K až 253 K). Průměrná zaznamenaná teplota byla –63 °C (210 K). Vzhledem k excentricitě dráhy Marsu jsou na severní polokouli během roku podstatně menší teplotní rozdíly než na jižní. Mars má polární čepičky tvořené pevným CO<sub>2</sub>. Jsou dobře pozorovatelné ze Země, stejně tak jako změny jejich velikostí. Pod těmito čepičkami by snad mohl existovat také vodní led.

V počáteční éře života Marsu byl povrch vystaven bombardování i vulkanické činnosti. Na severní polokouli vznikaly mělké oceány, do nichž se vlévaly prudké řeky. Klima na Marsu bylo teplejší a podmínky se podobaly těm, které kdysi panovaly i na Zemi. Dnes je atmosféra tak řídká, že se voda nemůže vyskytovat v kapalném stavu.

I Mars má své měsíce. Jsou jimi Phobos a Deimos. Jsou nepravidelného tvaru a připomínají obří „brambory“ pokryté krátery od srážek s menšími tělesy. Jejich rozměry nepřevyšují 27 km.

Tabulka č. 8 - základní údaje Marsu.

|                                       |                                    |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| Hmotnost                              | $6,4185 \cdot 10^{23}$ kg          |
| Průměr                                | 6 805 km                           |
| Průměrná hustota                      | $3935 \text{ kg/m}^3$              |
| Povrchová teplota                     | -140 °C až 20 °C                   |
| Tíhové zrychlení na povrchu           | $3,69 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ |
| Doba otočení kolem své osy            | 24,631 h                           |
| Doba oběhu kolem Slunce               | 687 dní                            |
| Velká poloosa dráhy kolem Slunce      | 227 963 637 km                     |
| Odklon rotační osy od kolmice k dráze | 25,2°                              |
| Výstřednost oběžné dráhy              | 0,09334                            |
| Inklinace (sklon) roviny oběžné dráhy | 1,85°                              |
| Počet měsíců                          | 2                                  |

### 3.4.5 Jupiter

Jupiter je největší a nehmotnější planetou sluneční soustavy. Je typickým představitelem obřích planet. Má plynokapalný charakter a chemické složení podobné Slunci. Od hvězd se Jupiter liší jen menší hmotností, která nestačila k vytvoření podmínek pro termonukleární reakce probíhající ve hvězdách. Patří sice k tělesům, které vydávají do prostoru více tepelné energie, než přijímají, ale v tomto případě je zdrojem pravděpodobně gravitační smršťování. Přesto se svými 63 měsíci podobá jakési „sluneční soustavě v malém“.

To, co pozorujeme na této planetě jako viditelný povrch, jsou její horní vrstvy atmosféry. Rychlá rotace způsobuje vydouvání rovníkových vrstev a vznik výrazné pásové struktury ve směru rovnoběžek s nejvýraznějšími temnými pásy severně a jižně od rovníku a s řadou užších pásů oddělených jasnými oblastmi – zónami. Plyn ohřátý vnitřním teplem planety stoupá, adiabaticky se ochlazuje a tvoří se světlá oblačnost z krystalů čpavku vznášejících se v plynném vodíku. Také jsou přítomny malé příměsi metanu, dalších uhlovodíků, kyanidů a stopové množství vody.

Jasně zóny vidíme tedy v oblastech výstupných atmosférických proudů – jde o oblačnost. Temné pásy pozorujeme v místech sestupných proudů, kde se oblačnost rozpouští a je možné vidět hlouběji do atmosféry.

Atmosféra v různých místech této planety nerotuje stejně rychle. Nejrychleji rotuje atmosféra v okolí rovníku, pomaleji níže s magnetickým polem a nejpomaleji atmosféra ve středních šířkách. Nejnápadnějším viditelným útvarem atmosféry je velká rudá skvrna, která je větší než naše Země. Kolem skvrny proudí oblačnost, jejíž část je strhávána dovnitř útvaru, kde krouží až v deseti kruzích. Vzhledem k tomu, že útvar leží na jižní polokouli, jedná se o anticyklonální proudění. Je to nejchladnější místo Jupiteru. Hustá oblačnost zde zadržuje vyzařování z nitra planety.

Pod atmosférou se nachází rozsáhlý oceán kapalného vodíku. Jeho vnější část je tvořena stlačeným molekulárním vodíkem a heliem a tvoří vlastní povrch planety. Tato vrstva sahá do hloubky zhruba 16 000 km, kde při tlaku vyšším než 40 GPa a teplotě

přes 13 000 K dochází plynule k přechodu na atomární vodík, který vykazuje kovové vlastnosti. Průběh tlaku a teploty ukazuje, že i tato vrstva je v kapalně fázi.

Uprostřed planety je pevné jádro o poloměru necelých 10 000 km z kovů a silikátů, jehož hmotnost je asi 10x až 15x větší než hmotnost Země. Centrální tlak je okolo 4 000 GPa a teplota je 30 000 K.

Hmotnost molekulární vrstvy a atmosféry je asi 21 %, hmotnost metalického vodíku s heliem přibližně 74 % a hmotnost jádra 5 % hmotnosti celé planety. Je vidět, že zastoupení vodíku a helia je mnohem větší než u terestrických planet.

Konvektivní proudy v elektricky vodivém nitru z metalického vodíku způsobují kolem Jupiteru silné magnetické pole, které je mj. příčinou polárních září. Tyto polární záře, které jsou tisíckrát jasnější než pozemské, jsou způsobeny částicemi vyvrženými z vulkánů měsíce Io. Tento měsíc je s Jupiterem spojen plazmovou trubicí a výkon, který je touto trubicí přenášen, se pohybuje v rozmezí 2 až 100 TW.

Z Jupiterových měsíců jsou největší Io, Europa, Ganymed a Kalysto, kterým se po svém objeviteli říká „Galileovské“.

Mnoho poznatků o Jupiteru nám dodala sonda Galileo, která v letech 1995 – 2003 v soustavě této planety působila.

Kromě největšího počtu měsíců má také Jupiter tři slabé prstence, objevené v roce 1979 sondou Voyager 1. Prstence jsou složeny z velmi malých prachových částic.

Tabulka č. 9 - základní údaje Jupitera.

|                                       |                          |
|---------------------------------------|--------------------------|
| Hmotnost                              | $1,899 \cdot 10^{27}$ kg |
| Průměr                                | 142 984 km               |
| Průměrná hustota                      | 1326 kg/m <sup>3</sup>   |
| Povrchová teplota                     | -150 °C                  |
| Tíhové zrychlení na povrchu           | 23,12 m·s <sup>-2</sup>  |
| Doba otočení kolem své osy            | 9,925 h                  |
| Doba oběhu kolem Slunce               | 11,8565 juliánských let* |
| Velká poloosa dráhy kolem Slunce      | 778 412 000 km           |
| Odklon rotační osy od kolmice k dráze | 3,13°                    |
| Výstřednost oběžné dráhy              | 0,04839                  |
| Inklinace (sklon) roviny oběžné dráhy | 1,3°                     |
| Počet měsíců                          | 63                       |
| *Juliánský rok má 365,25 dne.         |                          |

### 3.4.6 Saturn

Tato druhá největší planeta sluneční soustavy je známa především svými prstenci, které lze pozorovat i malým dalekohledem. Na obloze je Saturn viditelný jako jasný nažloutlý objekt. Jeho kosmický výzkum začal roku 1977 sondou Pioneer 11 a pokračoval v roce 2004 sondou Cassini.

Saturnova osa rotace je značně skloněna. Protože prstence leží v rovině rovníku planety, jejich vzhled se pro pozemského pozorovatele s časem nápadně mění.

Předpokládá se, že velký sklon rotační osy je způsoben srážkou s větším tělesem v době formování planet.

Navzdory odlišnému vzhledu jsou si planety Jupiter a Saturn velmi podobné.

Přibližně stejná diferenciální rotace způsobuje obdobně jako u Jupiteru vznik pásů na povrchu. Saturn má žlutavé zabarvení s pásovitou strukturou a s temnějšími polárními oblastmi. Tuto neprůhlednou oblačnou vrstvu obklopuje do výšky 2000 km řídký průhledný atmosférický zákal, jehož dolní vrstvu tvoří asi stokilometrová vrstva krystalků čpavku. Opět je možné vidět pouze vrchní vrstvu mraků.

Při spektroskopických pozorováních ze Země byl v atmosféře zjištěn molekulární vodík (89%), čpavek a metan. Kosmické sondy potvrdily helium (11%) a uhlovodíky.

Vzhledem k nízké průměrné hustotě Saturnu se předpokládá, že jeho vnitřní stavba bude podobná Jupiteru. Pod neprůhlednou vrstvou oblačnosti je asi 2000 km vysoká vrstva střední a hluboké atmosféry. Pod ní leží zvláště mohutná vrstva kapalného molekulárního vodíku s heliem, což tvoří 87% objemu planety.

Hluběji od poloviny poloměru planety leží rozsáhlá oblast metalického vodíku s heliem, také kapalná. Pod ní se předpokládá vrstva silně stlačeného ledu. Ještě hlouběji musí být jádro z křemičitanů železa. Gravitační diferenciací, při níž helium zvolna klesá vrstvou vodíku, se uvolňuje teplo, takže Saturn vyzařuje více energie, než přijímá od Slunce. Ne však tolik jako Jupiter.

Magnetické pole je slabší než u Jupitera a má výrazněji dipólový charakter s osou téměř rovnoběžnou s osou rotační. Magnetosféra je u Saturnu zvláštní tím, že je souměrná podle roviny rovníku, což zřejmě souvisí s existencí rozsáhlého prstencového systému, z nichž tři hlavní jsou dobře viditelné dalekohledy.

Prstence se rozprostírají kolem planety ve vzdálenosti od „pouhých“ 7 000 km nad viditelným povrchem až do vzdálenosti větší než vzdálenost Země – Měsíc. Přestože jsou široké několik desítek tisíc kilometrů, jejich tloušťka je nepatrná. Každé nové měření dává jen další, opět menší horní mez tloušťky. Dnes jsou to stovky metrů. Každý prstenec obíhá planetu jinou rychlostí.

Prstence tvoří drobné částice, patrně jsou to ledem obalené kousky hornin o velikosti od milimetrů po desítky metrů. Prstence se označují velkými písmeny abecedy v pořadí, v němž byly objeveny. Nejvýraznější část systému tvoří prstence C, B, A (v pořadí od planety). Mezi B a A je mezera, známá jako Cassiniho dělení pojmenované podle jejího objevitele. Prstenec F je složen z několika propletených prstenců gravitačně ovlivňovaných tzv. „pastýřskými“ měsíci.

Předpokládá se, že planetární prstence vznikly roztrháním některých měsíců, dopadem komet a meteoroidů nebo slapovými silami mateřské planety. Čím blíže je měsíc k planetě, tím větší je rozdíl gravitačního působení na přivrácenou a odvrácenou stranu měsíce. Po překročení určité vzdálenosti rozdíl sil běžnou hrominu rozvolní tak, že se rozpadne.

Kromě prstenců obíhá kolem Saturnu 60 zatím oficiálně známých měsíců. Mají nejrůznější velikosti a dráhy. Mnohé mají průměr pouze několik kilometrů. Největší z nich je Titan, který dosahuje „planetární“ velikosti.

Tabulka č. 10 - základní údaje Saturna.

|                                       |                                 |
|---------------------------------------|---------------------------------|
| Hmotnost                              | $5,6846 \cdot 10^{26}$ kg       |
| Průměr                                | 120 536 km                      |
| Průměrná hustota                      | $700 \text{ kg/m}^3$            |
| Povrchová teplota                     | $-175 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| Tíhové zrychlení na povrchu           | $8,96 \text{ m.s}^{-2}$         |
| Doba otočení kolem své osy            | 10,66 h                         |
| Doba oběhu kolem Slunce               | 29,45 juliánských let           |
| Velká poloosa dráhy kolem Slunce      | 1 426 725 413 km                |
| Odklon rotační osy od kolmice k dráze | $26,73^{\circ}$                 |
| Výstřednost oběžné dráhy              | 0,05579                         |
| Inklinace (sklon) roviny oběžné dráhy | $2,48^{\circ}$                  |
| Počet měsíců                          | 31                              |

### 3.4.7 Uran

Uran je na mezi viditelnosti pouhým okem. Z jasné bezměsíční noci bychom ho měli vidět, pokud ovšem budeme vědět kde je. Objeven byl 13.3.1781 W Herschelem pomocí dalekohledu o průměru 16 cm.

Uran je charakteristický svým zelenomodrým zbarvením. Má soustavu prstenců kolem sebe a rozsáhlý systém měsíců podobně jako u ostatních obřích planet. Na rozdíl od nich však nebyla u Uranu zjištěna aktivní tepelná bilance.

Vnitřní stavba je zřejmě blízká Saturnu. Uvnitř je kamenné, železnato-silikátové jádro, které je obaleno vrstvou tekuté směsi vody, čpavku, metanu apod. Tekutá vrstva, představující přes 80 % hmotnosti, je zdrojem magnetického pole.

Nad touto vrstvou se nachází plynná atmosféra. Její složení je podobné složení atmosfér všech velkých planet. Obsahuje zhruba 82 % vodíku a 15,2 % helia s příměsí molekul metanu a stopami vody a čpavku. Vyskytují se v ní také aerosoly, obsahující čpavek, vodu a metan. Teplota v nulové hladině klesá na  $-218 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Způsob rotace Uranu je v naší sluneční soustavě ojedinělý. Uran je znám extrémním sklonem rotační osy – přes  $97^{\circ}$ . To znamená, že jeho osa rotace je skloněna od roviny oběhu kolem Slunce přibližně o  $8^{\circ}$ . Uran jakoby se po své dráze koulel. V důsledku velkého sklonu rotační osy Uran natáčí ke Slunci severní pól, pak rovníkovou oblast, jižní pól, opět rovníkovou oblast a znovu severní pól. Slunce svítí na jeden z pólů Uranu nepřetržitě téměř polovinu oběžné doby kolem Slunce, tj. 42 let. Pak se daný pól na stejnou dobu ponoří do tmy.

Jarní bouře na Uranu vypadají asi takto. Prudké větry, které se zcela vymykají lidským představám, za teploty hluboko pod bodem mrazu. Bouře střídá bouři, která by svojí velikostí prakticky pokryla například celou západní Evropu. Mraky na Uranu jsou tvořeny krystalky metanu, jejichž teplota je větší než v okolní atmosféře a derou se nad ní. Toto souvisí s nástupem jara na severní polokouli, které však trvá 20 let.

Magnetická osa na Uranu svírá s osou rotace úhel  $59^{\circ}$  a je značně excentrická (prochází 8000 km od středu planety). Magnetosféra je výrazná, intenzita magnetického pole je srovnatelná s intenzitou magnetického pole Země. Chvost magnetického pole

Uranu je zkroucen do tvaru šroubovice díky způsobu rotace planety. V polárních oblastech byly pozorovány polární záře.

Kolem Uranu obíhá 5 větších a 22 drobných měsíců. Deset menších měsíců bylo objeveno sondou Voyager 2 v roce 1986, měsíce Kalibán a Sycorax až v roce 1998, další měsíce v roce 1999.

Dnes je také známo, že Uran má kolem sebe 11 prstenců, které jsou velmi úzké, ostře ohraničené a jsou tvořeny velmi tmavým materiálem, který svou odrazivostí odpovídá uhlíkatým chondritům. Šířka prstenců se pohybuje mezi dvěma a deseti kilometry mimo prstenec epsilon, který dosahuje šíře až 100 km. Prstence byly objeveny v roce 1977 fotometrickou metodou a v podstatě náhodou při využití zákrytu hvězdy Uranem.

Tabulka č. 11 - základní údaje Uranu.

|                                       |                                    |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| Hmotnost                              | $8,6832 \cdot 10^{25} \text{ kg}$  |
| Průměr                                | 51 118 km                          |
| Průměrná hustota                      | $1\,270 \text{ kg/m}^3$            |
| Povrchová teplota                     | $-210 \text{ }^{\circ}\text{C}$    |
| Tíhové zrychlení na povrchu           | $8,69 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ |
| Doba otočení kolem své osy            | 17,23 h                            |
| Doba oběhu kolem Slunce               | 84,07 juliánských let              |
| Velká poloosa dráhy kolem Slunce      | 2 287 097 200 km                   |
| Odklon rotační osy od kolmice k dráze | $97,8^{\circ}$                     |
| Výstřednost oběžné dráhy              | 0,04713                            |
| Inklinace (sklon) roviny oběžné dráhy | $0,8^{\circ}$                      |
| Počet měsíců                          | 27                                 |

### 3.4.8 Neptun

Polohu planety Neptun předem vypočítal John Couch Adams, student univerzity v Cambridge, a v říjnu 1845 sdělil své výsledky observatoři v Greenwichi. Oficiálním objevitelem Neptunu je však Francouz Leverrier, který svůj objev publikoval teprve v roce 1846. Oba odvodili polohu Neptunu z poruch dráhy Uranu.

Až do 80. let minulého století se toho o Neptunu příliš nevědělo a podrobný průzkum provedla až sonda Voyager 2 při průletu v roce 1989.

Podobně jako ostatní obří planety má i Neptun prstence, poměrně rozsáhlou soustavu měsíců a pásovitou strukturu atmosféry s obřími víry. Je zhruba stejně velký jako Uran, ale přesto, že je mnohem dále od Slunce, jeho teplota je o něco vyšší. Příčinou je vlastní zdroj energie v nitru, podobně jako u Jupitera nebo Saturnu.

Centrální část nitra planety, přibližně dvě třetiny poloměru, je složena postupně od středu z kamenného jádra, ledu, tekutého čpavku a metanu. Vnější část, zhruba třetina poloměru, je směsí vodíku, helia, vody a metanu.

Atmosféra má pásovitou strukturu, rotace je diferenciální s průměrnou periodou 19 hodin. Vlastní rotační perioda planety je 16 hodin. Atmosféra tedy vzhledem k povrchu rotuje retrográdně. V atmosféře se nacházejí obří anticyklony, například Malá



a Velká temná skvrna o rozměrech Země. V horních vrstvách atmosféry převládá vodík a helium. Charakteristické je zelenomodré zabarvení. Modrá barva je způsobena stopami metanu, podobně jako u Uranu.

Neptun je místem, kde vanou nejsilnější větry a řadí nejsilnější bouře v celé naší sluneční soustavě. Poblíž Velké temné skvrny dosahuje rychlost větru 2 000 km/h. Většina větrů vane západním směrem, tedy proti směru rotace planety.

Neptun má šest tenkých, jen slabě znatelných prstenců, tvořených prachovými částicemi a malými tělísky, která často dopadají na povrch Neptunových měsíců. Ze Země jsou pozorovatelné jen neúplné oblouky z těchto prstenců.

Kolem Neptunu obíhá celkem 13 měsíců. Pojmenováno jich je osm, největší z nich je Triton. Povrch tohoto měsíce je tvořen převážně velmi tvrdým dusíkovým ledem, což je ojedinělé ze všech těles sluneční soustavy, s příměsí metanu a oxidu dusíku. Sonda Voyager 2 naměřila teplotu na povrchu Titanu jen  $-235\text{ }^{\circ}\text{C}$ , což znamená nejchladnější místo ve sluneční soustavě.

Osa dipólového magnetického pole Neptunu je podobně jako u Uranu skloněna o  $47^{\circ}$  k ose rotace a posunuta od středu planety o 0,55 poloměru.

Tabulka č. 12 - základní údaje Neptuna.

|                                       |                                    |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| Hmotnost                              | $1,0243 \cdot 10^{26}\text{ kg}$   |
| Průměr                                | 49 250 km                          |
| Průměrná hustota                      | $1\,640\text{ kg/m}^3$             |
| Povrchová teplota                     | $-215\text{ }^{\circ}\text{C}$     |
| Tíhové zrychlení na povrchu           | $11,15\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ |
| Doba otočení kolem své osy            | 16,11 h                            |
| Doba oběhu kolem Slunce               | 164,89 juliánských let             |
| Velká poloosa dráhy kolem Slunce      | 4 498 252 900 km                   |
| Odklon rotační osy od kolmice k dráze | $28,3^{\circ}$                     |
| Výstřednost oběžné dráhy              | 0,00855                            |
| Inklinace (sklon) roviny oběžné dráhy | $1,77^{\circ}$                     |
| Počet měsíců                          | 13                                 |

### 3.5 Ostatní tělesa sluneční soustavy

Samozřejmě naše sluneční soustava se neskládá pouze ze Slunce, osmi planet a jejich satelitů, ale také z obrovského množství dalších menších těles. Těmito tělesy se bude zabývat několik následujících krátkých kapitol. Začínat budeme trpasličí planetou jménem Pluto, která byla před nedávnem zbavena statusu planeta.

#### 3.5.1 Pluto

Pluto je trpasličí planeta ve sluneční soustavě. Pluto bylo objeveno 18. února 1930 Clydem Tombaughem (objev byl oznámen 2. března 1930) a zařazeno jako devátá planeta sluneční soustavy. Až do počátku 50. let minulého století bylo Pluto považováno svojí velikostí za obří planetu. Poté měla být velikost této planety podobná Marsu. Teprve v 80. letech se zjistilo, že Pluto je mnohem menší. Na konci 20. století se

rozvířila mezi astronomy diskuze, o této malé planetě. Zejména poté, co se začaly objevovat ledové planetky za dráhou Neptunu. Některé z těchto ledových planetek mají větší rozměry než Pluto. Dnes se všechny řadí do kategorie **trpasličích planet**.

Je Pluto planeta nebo planetka? Dne 24. srpna 2006 bylo na astronomickém kongresu v Praze ze seznamu planet vyškrtáno v důsledku přijetí nové definice termínu planeta.

Tato definice říká, že planeta nebo oběžnice ve Sluneční soustavě je (dle definice IAU) takové těleso, které obíhá kolem Slunce, má dostatečnou hmotnost, aby ji gravitační síly zformovaly do přibližně kulového tvaru (tj. nachází se v hydrostatické rovnováze) a je dominantní v zóně své oběžné dráhy. Tato definice se zatím nevztahuje na objekty mimo Sluneční soustavu, kde pod pojmem planeta rozumíme objekty značného objemu, jejichž hmotnost je menší než  $80 M_J$  (hmotností Jupiteru) a které obíhají na oběžné dráze kolem hvězdy a neprodukují žádnou nebo velmi málo energie prostřednictvím termonukleárních reakcí.

Dráha Pluta kolem Slunce se vyznačuje výraznou excentricitou, která je největší ze všech planet. Zpravidla je Pluto nejvzdálenější planetou, ale v některých obdobích se pohybuje uvnitř Neptunovy dráhy. Při oběžné době 249 let se na 20 let dostává do menší vzdálenosti než Neptun.

Další zvláštností oběžné dráhy Pluta je její inklinace, tedy sklon oběžné dráhy kolem Slunce k rovině ekliptiky, kdy v tomto případě je  $17^\circ$ . Obě tyto charakteristiky se zcela vymykají planetárním drahám.

Charon je největší ze tří Plutových měsíců. Pluto je pouze dvakrát větší než Charon, který obíhá Pluto ve vzdálenosti 17 000 km. Poměrně vysoká hmotnost Charonu a vzdálenost jeho oběžné dráhy způsobuje to, že těžiště soustavy Pluto-Charon leží vně vlastního tělesa Pluta. U jiných planet včetně Země jsou těžiště jejich soustav vždy pod jejich povrchem. To je další fakt, jež vyřazuje Pluto z kategorie planet.

Sklon rotační osy této planety od kolmice k oběžné dráze je  $122,45^\circ$ , takže Pluto se podobně jako Uran spíše valí, než rotuje v rovině dráhy kolem Slunce.

Povrch Pluta je svým způsobem ojedinelý. Je to dáno především jeho velikostí, díky které si dokáže udržet řídkou atmosféru. Proto je povrch neustále v kontaktu s těmito plyny, které se z něj vypařují a opět se srážejí.

Pluto má skvrnitý povrch se světlými a tmavými oblastmi a s náznaky polárních čepiček. Povrch je tvořen dusíkovým ledem se stopami metanu. Pravděpodobně je na Plutu i voda,  $\text{CO}_2$  a  $\text{CO}$ .

První spektrální analýza povrchu byla získána až v polovině 70. let s tím, že je zřejmě pokryt metanovým ledem. Fotometrická pozorování o 11 let později naznačují, že povrch není metanem pokryt rovnoměrně. Konečně roku 1993 bylo zjištěno, že povrch je tvořen dusíkovým ledem se stopami metanu a oxidu uhelnatého. Dusík pravděpodobně tvoří i největší část řídké atmosféry, která zvolna zamrzá, jak se Pluto vzdaluje od Slunce a padá na povrch. V plynné podobě se zatím podařilo detekovat pouze metan.

Zatímco v rovníkových oblastech je pokrytí dusíkem menší, v oblasti pólů, kde teploty klesají až k  $-233^\circ\text{C}$ , se vytvářejí polární čepičky z dusíkatého ledu. Toto bylo potvrzeno jak na základě infračervených pozorování z družice ISO, tak pomocí Hubbleova vesmírného dalekohledu (HST).

Měsíc Charon byl objeven 22. června 1978. Na snímcích okolí planety pořízených ve dnech 15. května a 18. května 2005 kamerou ACS (Advanced Camera for Surveys) vesmírného družicového dalekohledu HST (Hubble Space Telescope) nalezl

tým astronomů dva objekty, které jsou dalšími dvěma měsíci Pluta. Dostaly názvy Nix a Hydra.

Tabulka č. 13 - základní údaje Pluta.

|                                       |                                    |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| Hmotnost                              | $1,25 \cdot 10^{22}$ kg            |
| Průměr                                | 2 390 km                           |
| Průměrná hustota                      | $1\,750 \text{ kg/m}^3$            |
| Povrchová teplota                     | $-229 \text{ }^\circ\text{C}$      |
| Tíhové zrychlení na povrchu           | $0,59 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ |
| Doba otočení kolem své osy            | 6,39 d                             |
| Doba oběhu kolem Slunce               | 248,09 juliánských let             |
| Velká poloosa dráhy kolem Slunce      | 5 906 376 272 km                   |
| Odklon rotační osy od kolmice k dráze | $122,45^\circ$                     |
| Výstřednost oběžné dráhy              | 0,24864                            |
| Inklinace (sklon) roviny oběžné dráhy | $17,14^\circ$                      |
| Počet měsíců                          | 3                                  |

### 3.5.2 Meteoroidy, meteory a meteority.

Velikosti těles v sluneční soustavě kolísají od statisíců kilometrů po mikrometry. Tělesa velikosti milimetrů až několik desítek metrů nazýváme **meteoroidy**. Ve sluneční soustavě se jich kolem Slunce pohybuje obrovské množství. Samotný meteoroid není možné díky jeho malým rozměrům ve vesmíru pozorovat. S meteoroidy o průměru 1 metru a více se Země střetává poměrně zřídka, přibližně jednou za den. Oproti tomu objektů o průměru řádově milimetr do Země narazí denně až miliony. Celková hmotnost meteorického materiálu dopadajícího na Zem je denně v průměru asi 470 tun. Celkovou hodnotu  $1,7 \cdot 10^8$  kg/rok platnou dnes pro Zeměkouli, odvodil RNDr. Zdeňek Ceplecha, člen Astronomického ústavu akademie věd v Ondřejově, a má tím i jedno z celosvětových prvenství.

Jestliže se meteoroid střetne se Zemí, vletí do její atmosféry, kde z důvodu vysoké rychlosti a tím pádem vysokého tření o vzduch začne hořet a vidíme světelný úkaz – **meteor**.

Pokud meteor neshoří v atmosféře a dopadne na Zem, pak se nazývá **meteorit**. Aby se z meteoru stal meteorit, musí mít jistou minimální velikost a hmotnost a velice malou rychlost. Malou rychlostí se rozumí rychlost kolem 10 až 20 kilometrů za sekundu. Je-li před vstupem do atmosféry hmotnost meteoroidu 1 kg a jeho rychlost 15 km/s, pak z něho po dopadu na Zem zbude 220 g. Při stejné hmotnosti, ale při počáteční rychlosti 30 km/s zůstanou po průletu atmosférou 2 g hmoty. Meteory můžou dosahovat rychlostí od 10 do 70 kilometrů za sekundu. Z celého tělesa dopadne na zemský povrch jenom několik dekagramů až desítek kilogramů materiálu.

Meteority se dělí na dva základní typy – chondrity a siderity. Podle složení lze meteority dělit na železné, kamenoželezné a kamenné, přičemž kamenné jsou nejhojnější. Nutno podotknout, že meteority pocházející z komet neexistují. Kometární materiál je příliš křehký, aby přežil let atmosférou.

**Chondrit** je meteorit složený především z křemičitanů. Na průřezu jsou patrné kulové granule, které se jmenují chondrule. Tyto útvary daly tomuto typu meteoritů jeho jméno. Jsou složeny především z olivínu a pyroxenu. V pozemských podmínkách jsou velmi reaktivní a rychle se erodují.

**Siderit** je složen především ze železa a niklu. Na rozdíl od chondritů, které po celé trvání Sluneční soustavy neprošly chemickým ani horotvorným procesem, pocházejí pravděpodobně z jader rozbitých planetek.

Astronomové z Ondřejova mají světové prvenství v nalezení meteoritu „Příbram“ a určení jeho dráhy ve sluneční soustavě před vstupem do atmosféry.

### 3.5.3 Komety

Kometa, zastarale vlasatice, je malý astronomický objekt podobný planetce složený především z ledu a prachu a obíhající většinou po velice výstředné (excentrické) eliptické trajektorii kolem Slunce. Komety jsou známé pro své nápadné ohony. Většina komet se po většinu času zdržuje za oběžnou dráhou Pluta, odkud občas nějaká přiletne do vnitřních částí sluneční soustavy. Gravitačními poruchami pak mění dráhu a stávají se krátkoperiodickými. Všeobecně se předpokládá, že komety vznikají v Oortově mračnu ve velké vzdálenosti od Slunce spojováním zbytků po kondenzaci sluneční mlhoviny. Okraje takovýchto mlhovin jsou dostatečně chladné na to, aby zde mohla existovat voda v pevném a nikoli plynném skupenství. Planetky vznikají jiným procesem, ale velmi staré komety, které ztratily všechnu svoji těkavou hmotu, se jim mohou podobat.<sup>2</sup>

Velmi často jsou komety popisované jako „špinavé sněhové koule“ a z velké části je tvoří zmrzlý oxid uhličitý, metan a voda smíchaná s prachem a různými nerostnými látkami.

V závislosti na gravitační interakci komety s planetami se dráha komet může změnit na hyperbolickou (a definitivně opustit sluneční soustavu) nebo na méně výstřednou. Například Jupiter je známý tím, že mění dráhy komet a zachycuje je na krátkých oběžných drahách. Proto existují i komety, které se ke Slunci vrací pravidelně a často. Mezi ně patří například Halleyova, Hale-Bopp nebo Kohoutkova kometa. Často v tomto smyslu znamená jednou za několik let až tisíciletí.

Kometa se skládá ze tří částí: jádro, koma a ohon.

**Jádro** je v podstatě vlastní těleso komety. Má většinou značně nepravidelný tvar a v průměru měří až několik kilometrů (cca 800 m až 50 km).

Skládá se převážně z vodního ledu, tuhého oxidu uhličitýho, oxidu uhelnatého, dalších zmrzlých plynů a prachu. To, že obsahuje organické látky, způsobuje jeho mimořádnou tmavost. Jádro je velmi křehké a není přímo pozorovatelné, protože je obklopeno komou.

Při přiblížení komety ke Slunci začnou sublimovat látky z jádra. Z těch vznikne **koma**, jejíž průměr je cca  $10^5$  až  $10^6$  km. Koma obsahuje různé nedisociované i disociované molekuly, radikály a ionty, např. OH, NH<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, CN aj. Říká se, že kometární materiál si můžete udělat i doma. Stačí vzít trochu vody, smíchat s tonerem z tiskárny a ještě přidat trochu organických látek z vlastních slin. Tuto směs promíchat s pevným oxidem uhličitým (suchým ledem) a nechat zmrznout.

Koma společně s jádrem komety tvoří hlavu komety.

**Ohon** vzniká působením tlaku slunečního záření na částice, které se již neudrží v komě. Skládá se ze dvou částí, z prachového a plazmového chvostu. Plazmový je složen z plynů, je úzký, přímý, mívá namodralou barvu. Září převážně ionizací.



Prachový chvost je tvořen drobnými částicemi, které se pohybují nejen pod tlakem slunečního záření, ale i podle zákonů nebeské mechaniky. A proto při pohybu komety jakoby zůstává za ní, je zahnutý a míří vždy směrem od Slunce. Délka ohonu je až  $10^8$  km. U komet, které neuvolňují dostatečné množství materiálu, se ohon vůbec nemusí vytvořit.

Ohon komety je velice řídký. Jeho zdánlivý jas je způsoben tím, že se promítá na tmavou oblohu. Isaac Newton při svých pokusech zjistil, že stejné množství světla by odrazil pruh vzduchu široký 1 – 2 palce.

Kometa ohon vždy odvrací směrem od Slunce proto, že na částice ohonu působí kromě gravitační síly Slunce také odpudivá síla jeho záření. Pro většinu částic je rozhodující právě působení odpudivé síly.

Občas dojde k poměrně vzácné situaci, kdy hmotnější částice vytvoří protichvost (ohon mířící ke Slunci).

### 3.5.4 Planetky

Planetka je malé těleso obíhající kolem Slunce nebo jiné hvězdy (tam se zatím tato tělesa jen předpokládají, dosud nebyla objevena žádná planetka u jiné hvězdy). Vzhledem k malé hmotnosti mají většinou nepravidelný tvar. Ve sluneční soustavě se taková tělesa nacházejí zejména v prostoru mezi Marsem a Jupiterem, je to tzv. hlavní pás asteroidů. Řada z nich se však nachází i za dráhou Neptuna, kdežto jiné mohou křížit dráhu Země a dostávat se blíže ke Slunci než naše planeta.<sup>2</sup>

První planetka byla objevena 1. ledna 1801 na palermské hvězdárně Giuseppem Piazzim a dostala jméno Ceres. Ke 13. září 2006 bylo známo 136 563 katalogizovaných planetek s dobře určenou dráhou (a dalších 166 232 planetek pouze s předběžným označením), jejich počet však neustále rychle roste.<sup>2</sup>

Kdysi byla tato tělesa považována za planety. Když se zjistilo, že se jedná o tělesa ve srovnání se známými planetami velmi malá, začaly být nazývány v angličtině minor planets, česky malé planety, z čehož vzniklo jejich dnešní české označení planetky. Lze se setkat též s původně zavedeným pojmenováním asteroid nebo i se staršími českými, dnes již zastaralými a prakticky nepoužívanými názvy planetoida nebo planetoid. Tato pojmenování měla svůj původ ve vzhledu těchto těles (asteroid - hvězdě podobné, planetoid - podobné planetě).<sup>2</sup>

V srpnu 2006 byl na XXVI. Generálním zasedání Mezinárodní astronomické unie (IAU) definován pojem planeta a v souvislosti s tím i nový pojem trpasličí planeta. Do této nové kategorie byla přesunuta i jedna z planetek, a to Ceres, jedno transneptunické těleso Eris a bývalá planeta Pluto. Kategorie planetek je však něco jiného. Mezi planetky patří například Sedna, Quaoar, Titius a tisíce dalších.

Podle nejstarší teorie planetky vznikly rozpadem nějaké velké planety, která podle Boodeovy řady měla existovat mezi Marsem a Jupiterem. Celková hmotnost všech planetek (objevených i dosud neobjevených) však není taková, že by to vystačilo na pořádnou planetu. Podle současné teorie se jedná o planetisimály, jejichž vývoj na planetu byl předčasně ukončen zřejmě gravitačním vlivem Jupitera.

Planetesimála je jedno z mnoha malých kamenných nebo ledových těles, které se zformovaly ze zárodečné sluneční mlhoviny, z níž vznikla sluneční soustava. Tato tělesa měla rozměry zhruba do 10 km a předpokládá se, že se z nich vytvořila ostatní větší tělesa vzájemnými přiblíženími, srážkami a „slepeními“.

V poslední době se objevuje čím dál tím víc blízkozemních planetek a hovoří se o možné srážce naší planety s nějakou takovou planetkou. V současné době sice není známá žádná planetka, která by do nás měla s jistotou narazit, nicméně existuje již seznam blížící se tisícovce objektů, u nichž toto v dlouhodobé perspektivě nelze vyloučit. Nedávno objevená planetka Apophis má malou, ale nenulovou pravděpodobnost srážky se Zemí 13. dubna 2036.

Planetka 2006 BV39 prolétla 28. ledna 2006 v minimální vzdálenosti 330 tisíc kilometrů od středu Země.

V minulosti se však takové srážky vyskytly častěji. Na Zemi bylo nalezeno několik impaktních kráterů, stop po dávných dopadech velkých těles. Z blízkých kráterů to jsou Ries a Steinheim v Německu (část přetavené hmoty byla vyvržena až do Čech, z toho vznikly vltaviny) či Morasko v Polsku u Poznaně. Předpokládá se, že těleso o průměru 10 km spadlo před 65 miliony let do oblasti dnešního poloostrova Yucatán (kráter Chicxulub) a že tento dopad měl na svědomí též vyhynutí dinosaurů. To, že k dopadům v dávné minulosti docházelo, svědčí nejen impaktními krátery rozbrázděný povrch Měsíce, ale také jiných těles ve Sluneční soustavě. Četnost takovýchto katastrofických srážek se odhaduje na jednu za 60 až 100 milionů let. Tím pádem v historii Země jich bylo už mnoho.<sup>2</sup>

Hovoří se také o možnosti využití planetek k našemu prospěchu. Bude to znít trochu jako z nějakého sci-fi, ale zde je hned několik možností. Jedna z možností, jak využívat tato nebeská tělesa ku prospěchu je ta, že se na nich bude provádět průmyslová těžba vzácných kovů, které budeme potřebovat pro kolonizaci vesmíru. Dalším možným způsobem využití je přesunutí nebezpečných zařízení na asteroidy, na kterých při selhání nemůže vzniknout velká škoda jako na zemské přírodě. Například by zde mohla být výzkumná střediska jaderné energie, fúzní reaktory nebo by zde mohly probíhat pokusy s reakcemi hmoty s antihmotou. Dále jsou asteroidy ceněny pro svoji vlastnost, že se na nich nevyskytuje téměř žádná gravitace, která by bránila, tak jako na Zemi, vzniku supersilných materiálů, správnému růstu monokrystalických kultur či třeba k vývoji účinnějších léků na stále nebezpečnější nemoci.

Některé z planetek jsou tvořeny kovy, které by v případě možnosti těžby způsobily prudký pád cen na světových burzách (již dnes se odhaduje cena jedné střední planetky na několik miliard dolarů). Dala by se zde těžit platina, železo, zlato, olovo, nikl či wolfram a další. Látky, které jednoho dne budou potřebné pro stavbu obrovských lodí určených pro cestu po vesmíru. V okolí pásu asteroidů by mohly vzniknout obrovské loděnice pro tvorbu mezihvězdných lodí.

### 3.5.5 Hlavní pás asteroidů

Hlavní pás asteroidů je soustava planetek, které obíhají v prostoru mezi drahami Marsu a Jupiteru, přibližně ve vzdálenostech od 2 AU do 4 AU. Z větší části se vytvořily z protoplanetárního disku v oblasti, kde se v důsledku gravitačního vlivu Jupiteru nemohlo vytvořit jediné velké těleso. Mnohé vznikly dodatečně rozpadem původních těles při jejich vzájemných srážkách.

Rezonanční vliv Jupiteru způsobuje, že některé dráhy jsou „zakázané“. To vede ke vzniku mezer v hlavním pásu, nazývaných Kirkwoodovy mezery na počest jejich objevitele D. Kirkwooda, který je popsal v roce 1874. Tyto mezery dělí planetky hlavního pásu do několika dynamických skupin.

V roce 2006 bylo známo přes 300 000 těles v této oblasti.

### 3.5.6 Kuiperův pás

Kuiperův pás (zřídka také Edgeworthův-Kuiperův pás) je oblast ve sluneční soustavě, která se nachází za dráhou Neptuna ve vzdálenosti 30 až 50 AU od Slunce.

Je pojmenován po astronomovi Gerardu Kuiperovi, který v roce 1951 navrhl teorii o původu některých komet v bližší oblasti než Oortův oblak. Tato oblast byla na jeho počest nazvaná Kuiperův pás. Protože však podobnou teorii vyslovil o více než deset let dříve irský astronom Kenneth Edgeworth (1940), bývá někdy do názvu přidáváno i jeho jméno.

Objekty Kuiperova pásu tvoří větší část všech dosud známých transneptunických těles. V současnosti je známo více než 1000 těles patřících do Kuiperova pásu. Bývají obvykle označovány zkratkou KBO (z angl. Kuiper Belt Objects). Objekty mají většinou velikost jen několik desítek kilometrů, ale vyskytují se zde i tělesa o průměru několika tisíc kilometrů. Z Kuiperova pásu pocházejí také některé komety, většina jich však přilétá ze vzdálenějšího Oortova oblaku.

Většina těles tohoto pásu leží poměrně blízko roviny ekliptiky a tvoří tak víceméně plochý disk, který je zaplněn planetkami a kometami. Relativně menší množství zdejších těles má svou dráhu výrazněji skloněnou k ekliptice. Jde však o ta největší dosud známá tělesa Kuiperova pásu. Proto astronomové nazývají tento útvar někdy koblíhou.

Na základě optických pozorování se předpokládá, že se v Kuiperově pásu nachází kolem 50 tisíc objektů větších než 100 km. Počet objektů o průměru od 1 km výše se v této části sluneční soustavy odhaduje řádově na miliardu.

### 3.5.7 Heliopauza

Heliopauza je oblast (rozhraní), kde přestává působit sluneční vítr. Podle současných poznatků vane sluneční vítr neztenčenou intenzitou asi do vzdálenosti 95 AU. Pak se ve větší míře střetává s mezihvězdným médiem, zpomaluje se a mění se v chuchvalce, které vypadají a chovají se spíše jako ohony komet. Tyto chuchvalce mohou zasahovat do vzdálenosti dalších přibližně 40 AU, pokud sluneční vítr vane proti směru proudění mezihvězdného média. V opačném směru to může být několikrát více.<sup>3</sup>

### 3.5.8 Oortův oblak

Oortův oblak se nachází na okraji naší sluneční soustavy za Kuiperovým pásem, přibližně 50 000 až 100 000 AU od Slunce. Jedná se o kulovitou skořápku kolem naší Sluneční soustavy, pozůstatek prapůvodní planetární mlhoviny.

Svůj název nese po dánském astronomovi Janu Oortovi, který hypotézu o jeho existenci poprvé zveřejnil v roce 1950.

Oortův oblak je zdrojem kometárních jader, které díky gravitaci okolních hvězd, či bližších setkání mezi sebou, občas změni svou dráhu směrem ke Slunci. Tyto komety jsou většinou dlouhoperiodické a jejich úhel k ekliptice je náhodný, nebo proletí kolem Slunce pouze jednou.

První a zatím jediná známá planetka pocházející z Oortova oblaku je pravděpodobně Sedna. Její dráha je menší než vnitřní poloměr Oortova oblaku, ale je to



pravděpodobně důsledek gravitačního působení hvězdy, která kdysi prolétla v blízkosti našeho Slunce.

### 3.5.9 Hranice sluneční soustavy

Není známo, že by se v oblasti za Oortovým oblakem nacházela další tělesa patřící do naší sluneční soustavy. To však neznamená, že zde nemohou být, protože dominantní gravitační působení Slunce sahá až do vzdálenosti asi 2 světelných let (125 000 AU), což je výrazně více, než odhadovaný průměr Oortova oblaku. Lidstvo však zatím nemá nástroje pro podrobnější průzkum této oblasti.<sup>3</sup>

Po celou dobu existence sluneční soustavy se do této oblasti nepřiblížila žádná jiná hvězda. Ta by svým gravitačním působením všechna tělesa z této oblasti „vymetla“.

## 3.6 Vznik a vývoj sluneční soustavy

Před přibližně 4,8 miliardami let, kdy ještě neexistovalo ani Slunce ani planety, se v odlehlém koutu naší galaxie, v jednom jejím spirálním rameni, nahromadil obrovský **oblak** mezihvězdného plynu a prachu. Plyn se skládal především z molekul vodíku, z menšího množství atomů helia a z velmi malého množství atomů jiných prvků a molekul z nich složených. V tomto oblaku se vytvořilo neprůhledné místo s vyšší hustotou. Podle stínící teorie ve stínu tohoto neprůhledného místa nepůsobil tlak fotonů z okolí a tak částice kolem tohoto neprůhledného místa začaly být tlačeny zářením z vnějších oblastí do tohoto oblaku. Částice padaly s postupně se zvětšující rychlostí do středu této zhuštěniny (jádra), narážely na sebe a tím se zahřívala na velmi vysokou teplotu několika milionů stupňů. Současně se díky zákonu zachování momentu hybnosti začalo toto jádro roztáčet.

„Praslunce“ tedy začalo zářit díky gravitační potenciální energii své látky. Vysoká teplota a tlak ve středu vznikající sluneční soustavy způsobily, že se zde zažehly termonukleární reakce. Jádra vodíku se začala spojovat na jádra helia. Vysoká teplota způsobila další nárůst tlaku, a tím se zastavil další pád látky ke středu. **Slunce** se pomalu stávalo takovým, jakým je dnes.

Okolo vznikajícího Slunce, v prostoru, kde dnes obíhají planety, mezitím **kondenzovaly molekuly** těžších prvků. Z některých molekul jako např.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeS}$ , atd., vznikal „prach“, tj. pevná zrnka minerálů. Z jiných molekul, např.  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ , atd., vznikaly „ledy“ – krystalky zmrzlých plynů. Prachová zrna se mohou tvořit i při vyšší teplotě, proto vznikaly blíže ke Slunci. Oproti tomu „led“ zmrzlých plynů vznikal až v chladnější oblasti, za dnešní dráhou Marsu, tedy tam, kde jsou dnes obří planety. Vodík a helium zůstaly v plynném skupenství, ale tlakem záření byly vyháněny spíše na okraj vznikající soustavy.

Prachové částice na sebe narážely, vázaly se k sobě molekulárními silami a tvořily větší tělíška. I tato tělíška se mezi sebou srážela, přitom z nich vznikaly kamínky, z kamínků kameny a z kamenů kusy skal. Postupně vznikala tělesa dost hmotná na to, aby mohla při srážkách na sebe vázat další hmotu svojí gravitační silou. Takovými srážkami některá větší tělesa rostla, až se z nich staly dnešní **planety**. Současně tím ubývalo menších těles a frekvence srážek tím klesala.

Planety, které vznikaly ze zmrzlých ledů, byly větší, a proto k sobě mohly přitahovat i původní plyn, ze kterého se oblak skládal, především vodík a částečně helium. Tak na zárodcích z ledů vznikaly dnešní obří planety, které díky tomu jsou schopné vyzařovat více energie, než přijmou.

Některá tělesa z ledů se s jiným tělesem nikdy nesrazila, proto nerostla a dodnes zůstávají jako kometární jádra.

Planety zemského typu, které vznikaly spojováním prachu, nedosáhly takové velikosti, aby svou gravitací mohly přitáhnout větší množství plynu. Proto obsahují poměrně málo vodíku a helia a jsou tvořeny převážně těžšími materiály, které byly v původní mlhovině ve formě prachu. To vysvětluje, proč mají tyto planety jiné chemické složení než obří planety.

V okolí dnešního hlavního pásu planetek působilo silné gravitační pole vznikajícího Jupiteru a „rozhánělo“ shluky těles ještě dřív, než se mohly spojit ve větší planetu.

Při srážkách, kterými se planety a planetky zvětšovaly, se uvolňovalo hodně tepla, takže nitra větších těles se roztavila. Další teplo vznikalo při rozpadu radioaktivních látek. V roztavených nitrech planet se oddělil kov, především železo, od lehčích hornin. Kov klesl ke středu a vytvořil tam **jádro planety**. To se stalo i v některých větších planetkách.

Když se rozpadla většina atomových jader s kratším poločasem rozpadu (stamiliony roků), zůstal uvnitř planet a planetek jen méně vydatný zdroj tepla, totiž atomová jádra o dlouhém poločasu rozpadu (několik miliard let), především jádra uranu a thoria. Tyto zdroje stačí udržovat vysokou teplotu uvnitř větších planet, jako je Země, ale ne uvnitř menších těles, které chladnou rychleji. Z tohoto důvodu dnes mají planetky pevné nitro, a proto také na Měsíci, Merkuru a Marsu již dávno ustala sopečná činnost.

Některé **měsíce** planet vznikly pravděpodobně shlukováním materiálu obíhajícího okolo zárodečné planety. Jiné měsíce, např. Marsův Phobos a Deimos jsou možná zachycené planetky. To znamená, že tyto měsíce vznikly daleko od planety a až později, kdy kolem planety prolétaly, se v množství tělísek obíhajících tuto planetu zbrzdily natolik, že už se od planety nemohly vzdálit. (**Úkol 1**)

Náš Měsíc pravděpodobně vznikl krátce po vzniku planet, kdy se Země srazila s tělesem o přibližné velikosti dnešního Marsu. Při srážce bylo vyvrženo velké množství látky na oběžnou dráhu okolo Země, a postupným shlukováním této látky v jedno těleso vznikl Měsíc. Jeho hustota odpovídá hustotě zemského pláště.

Srážka, která vyvrhla ze Země materiál, z něhož se stal Měsíc, nebyla první ani poslední. V mladé sluneční soustavě obíhalo daleko víc těles než dnes. Proto také byly srážky daleko častější. Při těchto srážkách se tělesa někdy rozštěpila, ale častěji se spojovala. Vzhledem k tomu menší tělesa ubývala a větší tělesa rostla.

Prvních 500 miliónů let po vzniku sluneční soustavy bylo obdobím „**velkého bombardování**“. V té době se tvořila většina kráterů na Měsíci. Starší krátery byly někdy překryty mladšími, takže je dnes již nevidíme. Krátery vznikaly i na jiných planetách, planetkách a měsících, někde však byly zahlazeny sopečnou činností i atmosférickou erozí.

Jak postupně ubývalo srážek, některé planety, planetky a měsíce zůstaly od období „velkého bombardování“ bez výrazné změny a zachovaly si tehdejší, hodně zjizvenou podobu.

### 3.6.1 Úkoly a jejich řešení

**Úkol 1.** K tomu, aby planeta zachytila okolo letící těleso a udělala z něj svůj měsíc je zapotřebí nějakým způsobem toto těleso zbrzdit. Vysvětlete, proč sama přitažlivost planety k tomu nestačí.<sup>1</sup>

*Řešení.: Jestliže těleso přilétá k planetě z velké dálky, má dostatečnou celkovou energii (kinetickou a potenciální) k tomu, aby od ní mohlo zase do stejné dálky odletět. Jen když svoji energii předá, např. srážkou či přiblížením, nějakému jinému tělesu, nebude jí mít dost na to, aby se mohlo znovu libovolně vzdálit, a zůstane na oběžné dráze planety.<sup>1</sup>*

## 4 NEBESKÁ MECHANIKA

Nebeská mechanika je vědní obor ležící na rozhraní mezi astronomií a teoretickou mechanikou. Zabývá se popisem pohybu kosmických těles vesmírem a určováním jejich drah. Metody klasické nebeské mechaniky jsou založeny na využití Newtonova zákona všeobecné gravitace a jeho tří pohybových zákonů, s jejichž pomocí lze odvodit téměř všechny pohyby planet ve Sluneční soustavě.

Hlavním úkolem nebeské mechaniky je výpočet poloh nebeských těles v budoucnosti na základě stanovených elementů dráhy z minulého pozorování.

Nejjednodušším úkolem, který nebeská mechanika řeší, je tzv. problém dvou těles, který popisují 3 Keplerovy zákony. Má analytické řešení, vedoucí ke zjištění, že pohyb těles kolem hmotného středu (těžiště) soustavy probíhá po kuželosečce. Tento problém, omezující se pouze na dvě kulově symetrická hmotná tělesa, která lze nahradit z kinematického hlediska hmotnými body, je ve skutečnosti abstrakcí a nikde ve vesmíru neexistuje.

Problém  $n$  těles, který je reálný, nemá s výjimkou některých speciálních případů analytické řešení a musí být řešen metodami numerické matematiky.

### 4.1 Newtonův gravitační zákon

Tento zákon odvodil na základě pozorování pohybu Měsíce kolem Země a planet kolem Slunce již v 17. století Isaac Newton. Příčinou jejich pohybu je gravitační síla. Newtonův gravitační zákon zní:

**Každá dvě tělesa se navzájem přitahují stejně velkými gravitačními silami  $F_g$ ,  $-F_g$  opačného směru. Velikost gravitační síly  $F_g$  pro dvě stejnorodá tělesa tvaru koule je přímo úměrná součinu jejich hmotností  $m_1$ ,  $m_2$  a nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti  $r$  jejich středů.**

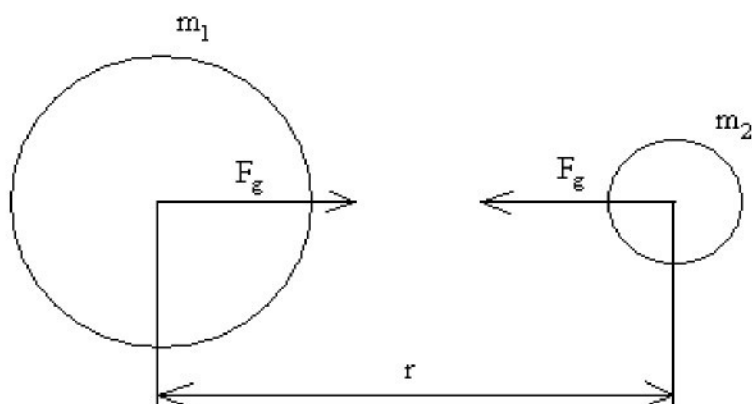
Platí vztah

$$F_g = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2},$$

kde  $G$  je gravitační konstanta a má hodnotu  $6,67259 \cdot 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ .

Vztah je možné použít i pro jiná než kulová tělesa jen tehdy, pokud je možné zanedbat jejich rozměry vzhledem k jejich vzdálenosti.

Obrázek č. 26 – Newtonův gravitační zákon.



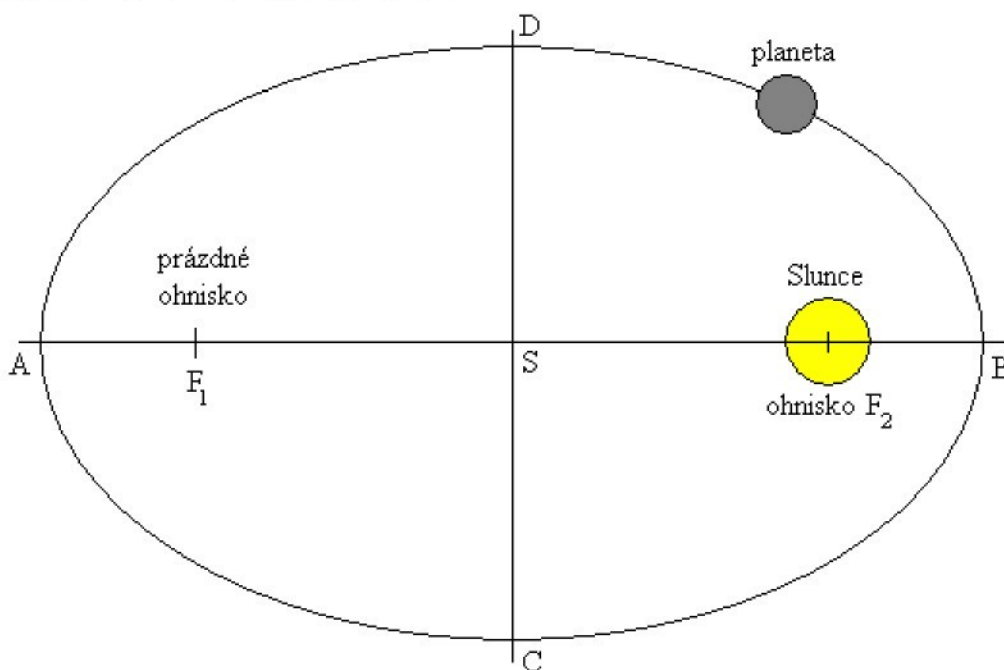
## 4.2 Keplerovy zákony

Na základě četných pozorování sluneční soustavy, které uskutečnil Tycho Brahe a svých vlastních výpočtů odvodil a formuloval Johannes Kepler tři zákony. Učinil tak dlouho před objevením pohybových zákonů Izáka Newtona. Keplerovy zákony popisují pohyby planet ve sluneční soustavě. Výsledky jsou však jen prvním přiblížením, vzhledem k tomu, že je nezanedbatelné gravitační působení všech těles sluneční soustavy navzájem.

První Keplerův zákon popisuje trajektorii planet kolem Slunce a znění je následující.

**1.KZ. Planety se pohybují kolem Slunce po elipsách málo odlišných od kružnic, v jejichž společném ohnisku je Slunce.**

Obrázek č. 27 – 1. Keplerův zákon.



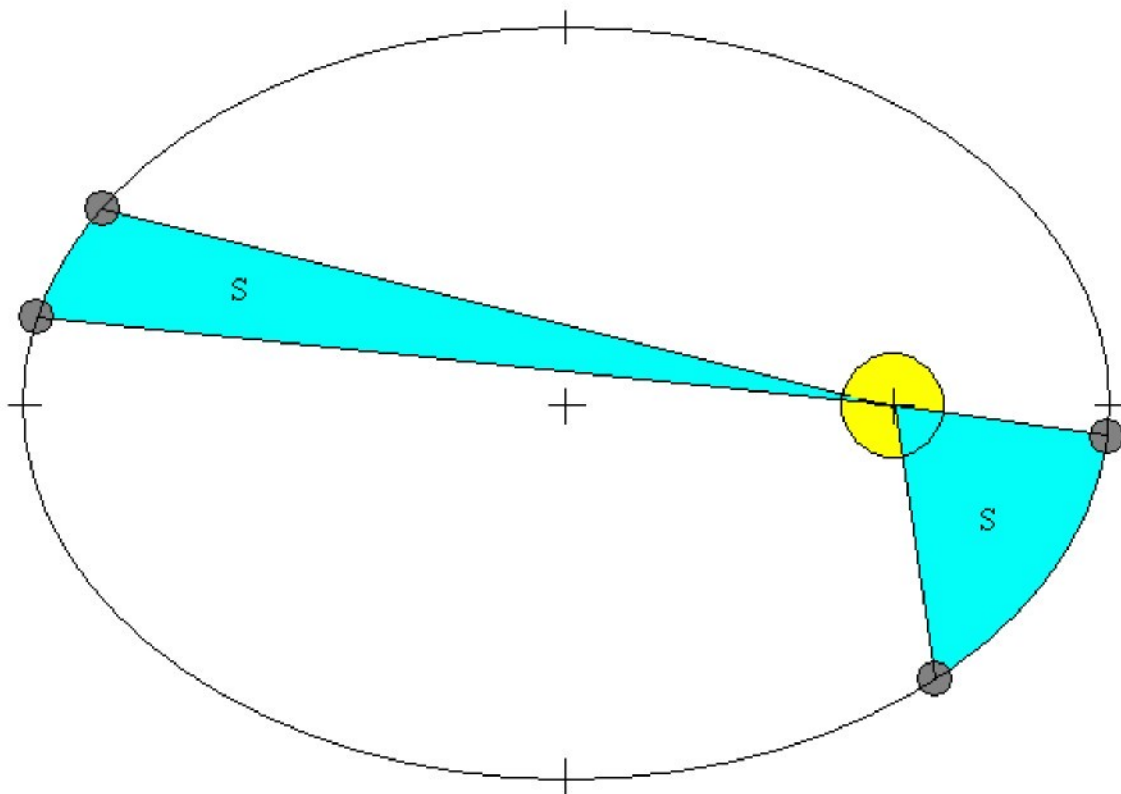
Vrchol elipsy B, v němž je planeta Slunci nejbližší, se nazývá perihélium, jinak také přísluní. Vrchol A, v němž je planeta od Slunce nejdále, se nazývá afélium neboli odsluní. Důsledkem je, že planety se pohybují v rovinách.

Planety ale nemají příliš výstřednou dráhu, takže v prvním přiblížení lze uvažovat, že se pohybují po kružnici, kde Slunce je mimo její střed. Tento zákon však platí i pro komety, které se pohybují po značně výstředných drahách. Pravděpodobnost, že by se nějaké těleso (dlouhodobě) pohybovalo okolo Slunce přesně po kružnici, je nulová, protože kružnice je ideální případ, ke kterému se lze v praxi pouze přiblížit, ale nelze ho dosáhnout.

Druhý Keplerův zákon popisuje, jak rychle se planety pohybují. Formulace je takováto:

**2.KZ. Obsahy ploch opsaných průvodičem planety (spojnice planety a Slunce) za stejný čas jsou stejně velké.**

Obrázek č. 28 – 2. Keplerův zákon.



Vzhledem k druhému Keplerovu zákonu můžeme říci, že planety se v přísluní pohybují nejrychleji a v odsluní zase nejpomaleji.

Třetí Keplerův zákon uvádí vztah mezi oběžnými dobami a poloosami jejich trajektorií. A takové je jeho znění:

**3.KZ. Poměr druhých mocnin oběžných dob dvou planet je stejný jako poměr třetích mocnin jejich velkých poloos (středních vzdáleností těchto planet od Slunce).**

Jestliže označíme  $T_1$  a  $T_2$  oběžné doby dvou planet a  $a_1$  a  $a_2$  délky jejich hlavních poloos, pak lze tento zákon vyjádřit ve tvaru

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}.$$

Tento zákon platí v tomto tvaru jen tehdy, jsou-li hmotnosti planet zanedbatelně malé ve srovnání s hmotností Slunce nebo navzájem stejné, což je u planet Sluneční soustavy splněno.

Z tohoto Keplerova zákona plyne, že planety s kratší střední vzdáleností od Slunce oběhnou Slunce rychleji, než planety vzdálenější.

Třetí Keplerův zákon lze odvodit pomocí Newtonových zákonů. **Přesné znění 3. KZ má tvar**

$$\frac{T^2 \cdot (m_1 + m_2)}{a^3} = \frac{4 \cdot \pi}{G},$$

kde  $a = a_1 + a_2$ , tedy součet délky hlavních poloos těles o hmotnostech  $m_1$  a  $m_2$ . Tato tělesa obíhají kolem společného těžiště.

Odchylka od původního znění je nepatrná a za doby Keplera zcela nezjistitelná. Keplerovy zákony popisují pohyb tělesa z hlediska kinematiky, ale Newtonovy zákony z hlediska dynamiky.

### 4.3 Dráhové elementy

Jestliže chceme jednoznačně definovat dráhu vesmírného tělesa, potřebujeme znát dráhové elementy tělesa nebo-li parametry oběžné dráhy. Je jimi soubor šesti základních veličin, které lze rozdělit do čtyř skupin.

**1. Elementy určující polohu roviny dráhy v prostoru.** V tomto případě je určující veličinou sklon roviny oběžné dráhy k rovině ekliptiky. Označuje se  $i$  a může nabývat hodnot od  $0^\circ$  do  $180^\circ$ . Zdánlivě by stačily hodnoty od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ , ale sklon nad  $90^\circ$  se používá jen pro dráhy retrográdní (čili pohyb proti směru pohybu všech planet).

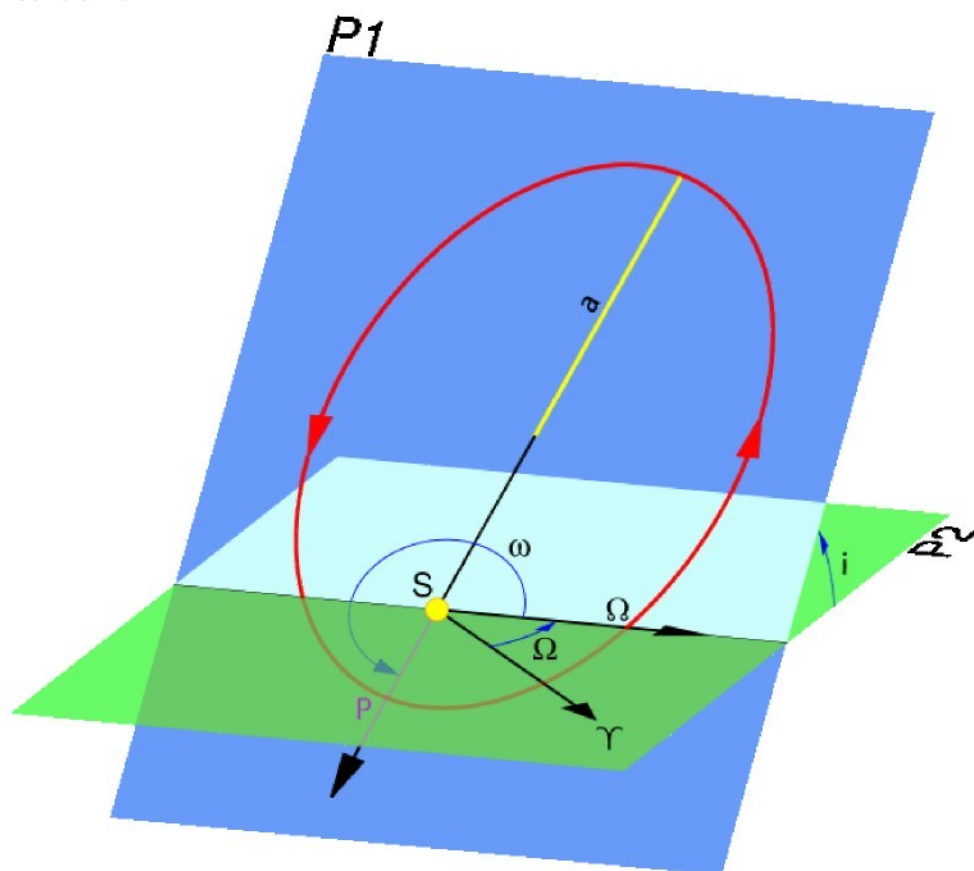
Dále je to délka výstupního uzlu  $\Omega$ . Je to úhel mezi směrem k jarnímu bodu (bod, ve kterém se nachází Slunce v okamžiku jarní rovnodennosti) a vzestupným uzlem dráhy (bod, ve kterém dráha protíná základní rovinu směrem z jihu na sever). Může nabývat hodnot od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ .

**2. Element určující polohu dráhy v rovině oběhu (pericentra v rovině).** V případě oběhu tělesa kolem Slunce je to perihélium a pokud těleso obíhá kolem Země, nazývá se tento bod Perigeum. Veličina se nazývá argument šířky pericentra a značí se  $\omega$ . Je to úhel, který svírá průvodič pericentra s průvodičem vzestupného uzlu. Hodnota této veličiny může být od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ .

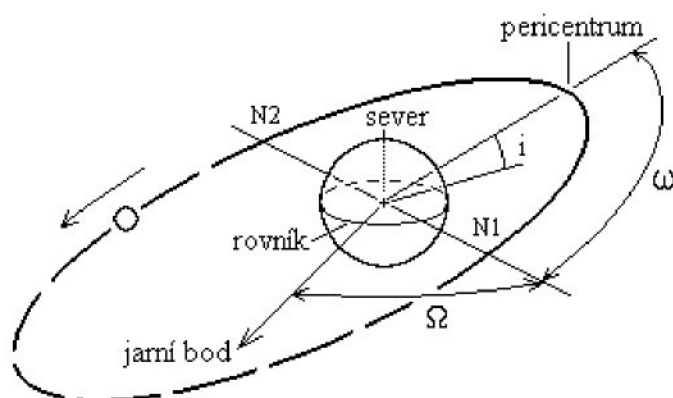
**3. Elementy určující tvar oběžné dráhy tělesa.** Jak již bylo uvedeno, tělesa obíhají Slunce po eliptických drahách. V tomto případě nás budou zajímat parametry elipsy. Délka hlavní poloosy, která se značí  $a$  a výstřednost neboli excentricita značí se  $e$ . Excentricita je poměr vzdálenosti ohniska od středu elipsy, jinak lineární excentricity, k délce hlavní poloosy.

**4 Element určující umístění v čase.** Tento poslední parametr je časový údaj o průchodu tělesa pericentrem své dráhy. Značí se  $T_0$  a jednotkou je juliánský den. Lepší představě pomohou následující obrázky č. 29 a 30.

Obrázek č. 29 – dráhové elementy.  $P_1$  – rovina ekliptiky.  $P_2$  – rovina oběžné dráhy. P – pericentrum.



Obrázek č. 30 – parametry oběžné dráhy okolo Země.



- $i$  = sklon dráhy
- $\omega$  = argument pericentra
- $\Omega$  = délka vzestupného uzlu
- N1 = vzestupný uzel
- N2 = sestupný uzel



Mimo tyto základní parametry stojí za zmínku doplňující, parametr, kterým je **doba oběhu**. Oběžné periody lze rozdělit do následujících skupin.

Siderická – oběh tělesa o  $360^\circ$ .

Synodická – oběh ke stejnému postavení, například u Měsíce od novu k novu.

Tropická – od jarního bodu k jarnímu bodu.

Anomalistická – od pericentra k pericentru.

Drakonická – od výstupního uzlu k výstupnímu uzlu.

#### 4.3.1 Určení jarního bodu

Bod, ve kterém se nachází na nebeské sféře Slunce v okamžiku jarní rovnodennosti (většinou 20. března). Určuje ho průsečík nebeského rovníku a ekliptiky.

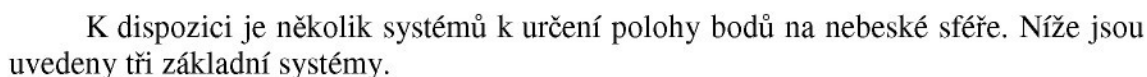
## 5 SFÉRICKÁ ASTRONOMIE

Objekty ve vesmíru leží v různých místech prostoru a různých vzdálenostech od pozorovatele. Z hlediska samotného pozorování je však velmi často možné tyto vzdálenosti nebrat v úvahu a uvažovat jen průměty objektů na nekonečně vzdálenou nebeskou sféru. **Nebeská sféra** je v podstatě koule o neomezeném poloměru a místo pozorovatele můžeme považovat za její střed.

K přesnému určení polohy bodu na obloze stačí 2 souřadnice. Zavedením souřadnic a popisem různých významných bodů a křivek se zabývá sférická astronomie. Vychází hlavně z geometrie a ze sférické trigonometrie.

V systému sférických souřadnic Země je základní rovinou rovina zemského rovníku, která je kolmá k ose rotace Země. Tato rovina protíná nebeskou sféru (pomyslnou kouli o nekonečném poloměru) v hlavní kružnici, zvané **nebeský rovník**. Každá kružnice na nebeské sféře rovnoběžná s rovníkem se nazývá **paralela** (obdoba zemských rovnoběžek). Přímka, jež je prodloužením zemské osy, protíná nebeskou sféru ve dvou **nebeských pólech**, severním a jižním. Každá hlavní kružnice procházející oběma póly se nazývá **deklinální kružnice** (obdoba zemských poledníků). Z nich deklinální kružnice procházející na obloze **zenitem** (nadhlavníkem) a současně bodem na obzoru, směřujícím k jihu, je **meridián**. Počátkem souřadnic je **jarní bod** (značka  $\Upsilon$ ).

|                                          |
|------------------------------------------|
| T - těleso                               |
| $\alpha$ - rektascenze                   |
| $\delta$ - deklinace                     |
| t - hodinový úhel                        |
| A - azimut                               |
| h - výška nad obzorem                    |
| $\Theta$ - hvězdný čas                   |
| AL - almukantarát                        |
| PL - paralela                            |
| VK - vertikál                            |
| DK - deklinační kružnice                 |
| NR - nebeský rovník                      |
| NSP - nebeský severní pól                |
| ZSP, ZJP - zemský severní<br>a jižní pól |



U obzorníkového systému je základní rovinou rovina vodorovná v místě pozorovatele Ta protíná nebeskou sféru v hlavní kružnici zvané obzorník neboli horizont. Na obzorníku ve směru příslušných světových stran leží jižní, severní, západní a východní bod. Ze zemského povrchu je vidět obvykle nanejvýš polovinu nebeské sféry. Tu polovinu, která leží nad obzorníkem. Výraz "obzor" označuje rozhraní nebe a pozemské krajiny. Obzor sleduje obrysy kopců, budov, stromů, vodní hladiny atd.

88

Poloha tělesa na obloze je určena dvěma souřadnicemi, které nazýváme **azimut  $A$**  a **výška nad obzorem** (úhlová)  **$h$** .

$A$  je úhel, který svírá vertikál procházející tělesem s meridiánem. Azimut měříme kladně od jihu (jižní bod) k západu od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ .

Druhá souřadnice  $h$  se měří ve svislém směru po výškové kružnici od obzorníku kladně nahoru, záporně dolů,  $h = 0^\circ$  na obzorníku,  $h = 90^\circ$  na zenitu.

Obě souřadnice jsou zakresleny na obrázku 31.

## 5.2 Rovníkové souřadnice 1. druhu

V případě rovníkových souřadnic 1. druhu jsou pro polohu bodu určující takzvaná **deklinace  $\delta$**  a **hodinový úhel  $t$** .

Tělesem, jehož polohu zjišťujeme, vedeme deklinační kružnici, která protíná nebeský severní pól. Deklinace se měří v úhlových stupních po deklinační kružnici od nebeského rovníku kladně na sever, záporně na jih. Jinak řečeno je to úhlová vzdálenost paralely, na níž těleso leží, od rovníku. Paralela je kružnice na nebeské sféře rovnoběžná s nebeským rovníkem, procházející pozorovaným nebeským tělesem.

Hodinový úhel je úhel, který svírá deklinační kružnice tělesa s meridiánem, v němž je také počátek. Hodinový úhel vyjadřujeme v časové míře (hodinách), ve směru denního pohybu oblohy (tedy ve směru východ  $\rightarrow$  jih  $\rightarrow$  západ  $\rightarrow$  sever). Hodinový úhel se měří na nebeském rovníku. Je to tedy oblouk měřený od meridiánu směrem na západ až k nebeskému tělesu. V případě, že je  $t = 0$  h, pak se těleso nachází v horní kulminaci na meridiánu. Jinak řečeno, těleso je nejvýše nad obzorem. Při spodní kulminaci, kdy je těleso na obzoru, je hodinový úhel roven 12 h.

## 5.3 Rovníkové souřadnice 2. druhu

Rovníkové souřadnice 2. druhu se od 1. druhu liší tím, že hodinový úhel je nahrazen souřadnicí, která se nazývá **rektascenze** a značka je  $\alpha$ . Souřadnice  $\alpha$  je definována jako úhel, který svírá deklinační kružnice tělesa s deklinační kružnicí procházející jarním bodem. Rektascenzi měříme v hodinách, minutách a sekundách kladně proti směru denního pohybu oblohy (tedy ve směru západ  $\rightarrow$  jih  $\rightarrow$  východ  $\rightarrow$  sever). Je-li  $\alpha = 1$  hodina, pak je to velikost rovnající se úhlu, o který se pootočí hvězdná obloha za jednu hodinu ( $1 \text{ h} = 15^\circ$ ).

Deklinace a rektascenze nejsou souřadnice závislé na denním pohybu oblohy, u planet se mění za den nejvýše řádově o desítky úhlových minut, u hvězd jsou to řádově desítky úhlových sekund za rok. Udávají v podstatě polohu tělesa na pomyslném hvězdném glóbu.

**Hvězdný čas  $\theta$**  je hodinový úhle jarního bodu. Platí vztah  $\theta = \alpha + t$ , kde  $\alpha$  je rektascenze a  $t$  hodinový úhel. Tyto souřadnice jsou obdobou zemských souřadnic promítnutých na nebeskou sféru. Umožňují nám orientaci na nebi.

# 6 HVĚZDY

Hvězda je kosmický objekt takové hmotnosti, že v něm vzplanula termonukleární reakce. Hvězdy mají kulovitý tvar, ve kterém je udržuje gravitace. Představují dominantní složku svítící hmoty ve vesmíru. Gravitačně jsou vázány v galaxiích. Jedna galaxie jich čítá kolem 100 miliard.

Většina hvězd má svoji typickou strukturu. Uvnitř je **jádro**, ve kterém probíhají termonukleární reakce, kde se mění většinou vodík na helium.

Jádro obklopuje **vrstva v zářivé rovnováze**, která tvoří velkou část hvězdy. Energie fotonů produkovaných jádrem se touto vrstvou šíří rekombinačními procesy, kdy foton je zachycen a znovu vyzářen v náhodném směru.

Další vrstvou bývá **konvektivní vrstva** (vrstva proudění), která se nachází pod povrchem hvězdy a tvoří asi jednu třetinu jejího objemu. V této vrstvě se energie přenáší prouděním pomocí vzestupných a sestupných proudů.

**Hvězdná atmosféra** se skládá z několika vrstev. **Fotosféra** je viditelný povrch hvězdy. Jsou zde viditelné vrcholky místních vzestupných a sestupných proudů.

Dalšími vrstvami atmosféry hvězd je **chromosféra** a nad ní **koróna**, což je vnější vrstva hvězdy.

Nám nejbližší hvězdu, Slunce, je relativně snadné pozorovat. Můžeme vidět mnoho detailů, lze studovat sluneční skvrny, protuberance a tak dále. Ostatní hvězdy však vidíme jen jako body a nelze na nich rozlišit při pozorování žádný detail.

U většiny hvězd můžeme ze Země určit několik dalších vlastností jako například zářivý výkon, hmotnost, barvu, teplotu, poloměr, hustotu, chemické složení, dobu rotace, magnetické pole apod. Tyto vlastnosti popisujeme nějakými čísly, a proto se nazývají **stavové veličiny**.

Hvězdná astronomie se snaží určit stavové veličiny a dále jak mezi sebou tyto stavové veličiny souvisí. Také se snaží určit stavbu hvězd a jejich časový vývoj od vzniku až po zánik.

Většinu informací o hvězdách je možné získat z elektromagnetického záření, které k nám od nich přichází. Zemskou atmosférou projdou v největší míře radiové vlny a viditelné světlo. Další spektra elektromagnetického záření, jako je infračervené, ultrafialové, rentgenové a gama záření můžeme v plné míře sledovat jen z družic.

Stavové veličiny je možné určovat přímo z pozorování, ale vnitřní stavbu ani časový vývoj hvězd nelze určit z elektromagnetického záření, které k nám přichází.

Proto se z modelů vypočítává, jaká by mohla být vnitřní stavba hvězdy, aby byla v souladu s fyzikálními zákony a se známými stavovými veličinami a určí se model hvězdy. Poté se vypočítá, jaké záření by vydával daný model a porovná se to se zářením hvězdy, ke které se model vypočítal. Pokud je třeba, model se upraví, aby co nejlépe odpovídal skutečné hvězdě.

Výhodou hvězdné astronomie je, že lze sledovat velký počet hvězd v různých stádiích jejich života. Je tedy možné sledovat stejný druh hvězdy v různých fázích vývoje a podle toho upravovat k co největší přesnosti jejich vývojové modely.

## 6.1 Charakteristika hvězd

### 6.1.1 Hvězdná velikost

Starověký astronom Ptolemaios v 1. století našeho letopočtu sestavil jako první katalog hvězd a v něm každé hvězdě přiřadil hvězdnou velikost od jedné do šesti, kde hvězda o hvězdné velikosti 1 byla ta nejjasnější na obloze. Jak text napovídá, nejedná se o rozměry hvězdy, ale o to jak je hvězda na obloze jasná.

Ptolemaiova veličina – hvězdná velikost – se užívá stále, jen je dnes přesně definovaná pomocí množství zářivé energie, které k nám od hvězdy dopadá. Značkou hvězdné velikosti je *m* a jednotkou je magnituda, zkratka *mag*.

Vzhledem k tomu, že hvězdnou velikostí se vyjadřuje, jak jasná je hvězda při pohledu ze Země, říká se takové hvězdné velikosti **pozorovaná**.

Hvězdná velikost může nabývat různých reálných hodnot, to znamená kladných i záporných. Ne pouze 6 celočíselných hodnot jako u Ptolemaia.

Například Slunce má hvězdnou velikost  $-26,74$  mag a Měsíc  $-12,7$  mag. Nej slabší hvězdy viditelné pouhým okem mají hvězdnou velikost přibližně 6 mag a nej slabší hvězdy viditelné třídrem zhruba 9-10 mag.

Rozdíl hvězdných velikostí dvou hvězd  $m_1 - m_2$  je definován pomocí tzv. Pogsonovy rovnice, která je:

$$m_1 - m_2 = -2,5 \cdot \log_{10} \frac{\Phi_1}{\Phi_2} = -2,5 \cdot (\log \Phi_1 - \log \Phi_2),$$

kde  $\Phi_1$  a  $\Phi_2$  jsou hustoty světelného toku dopadajících na lidské oko nebo na čidlo přístroje ze dvou srovnávaných hvězd. Jinak také množství světla dopadajícího na jednotku plochy za jednotku času. Veličina je i nazývána jasnost. Pokud je rozdíl magnitud 5, svítí jedno z těles 100 krát více než druhé. **(Úkol 1, 2)**

### 6.1.2 Absolutní hvězdná velikost

Hvězdná velikost nám říká, jak je hvězda jasná ze Země. Chceme-li znát skutečné zářivé výkony hvězd, je zapotřebí tuto veličinu oprostit od vlivu vzdálenosti hvězdy od Země. Zavádí se tedy absolutní hvězdná velikost, kterou by hvězda měla při pozorování ze vzdálenosti 10 pc od Země. Pro absolutní hvězdnou velikost, která se značí  $M$ , platí vztah

$$M = m + 5 + 5 \cdot \log \pi = m + 5 - 5 \cdot \log r .$$

Opět se jedná o dekadický logaritmus.  $\pi$  je paralaxa a  $r$  je vzdálenost v parsecích.

Pro vztah mezi hvězdnou velikostí  $m$  a absolutní hvězdnou velikostí  $M$  platí vzorec:

$$m - M = 5 \cdot \log r - 5 . \text{ (Úkol 3)}$$

### 6.1.3 Zářivý výkon

Celková energie, kterou hvězda vyzáří za sekundu, se nazývá zářivý výkon hvězdy, značí se  $L$  a jednotka je Watt (W). Zářivý výkon Slunce  $L_S = 3,83 \cdot 10^{26}$  W.

Celý zářivý výkon hvězdy prochází kulovou plochou o poloměru  $r$  a obsahu  $4\pi \cdot r^2$  a rovnoměrně se na tuto kulovou plochu rozkládá. To znamená, že jasnost hvězdy, vzdálené od nás  $r$ , je výkon procházející v této vzdálenosti od hvězdy plochou o obsahu  $1\text{m}^2$  natočenou kolmo na směr k hvězdě. Platí vztah:

$$\Phi = \frac{L}{4\pi \cdot r^2} .$$

**(Úkol 4)**

### 6.1.4 Paralaxa a vzdálenost

Jedním z nejobtížnějších a zároveň nejdůležitějších problémů astronomie je určování vzdálenosti hvězd a jiných objektů.

Při pozorování oblohy máme pocit, že více jasný bod je těleso, které je k nám blíže než bod méně jasný. Ve skutečnosti tomu může být i naopak. Nesmírně vzdálené těleso může mít výkon miliónů galaxií, a proto září na obloze jasněji než těleso, které je ve skutečnosti blíže, ale s daleko nižším výkonem. Skutečná povaha některých vesmírných těles byla poznána až po určení jejich vzdáleností.

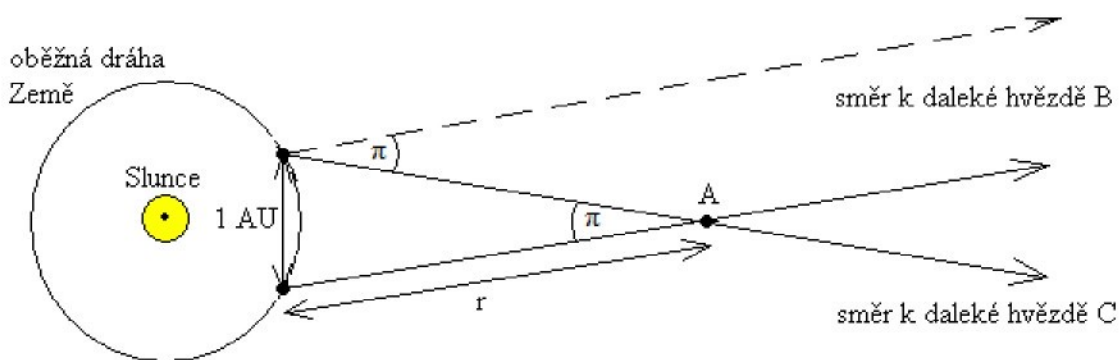
Určování vzdáleností ve sluneční soustavě je možné radarem anebo měřením denní paralaxy. Vzhledem k obrovským vzdálenostem hvězd odpadá měření radarem. V tomto případě se využije měření paralaxy, ale ne denní, nýbrž **roční paralaxy**.

Při měření roční paralaxy se využívá znalostí vzdáleností ve sluneční soustavě. Roční paralaxa je úhel, pod kterým by z pozorované hvězdy byla vidět úsečka o délce 1 AU kolmá ke směru pohledu. (Nebo také obráceně) Je to úhel, pod kterým bychom ze Země viděli úsečku 1 AU ve vzdálenosti pozorované hvězdy.

Narozdíl od denní paralaxy se počítá s větší základnou vzhledem k daleko větší vzdálenosti těles, u kterých vzdálenost určujeme. Pokud bychom počítali se základnou o poloměru Země, jako u denní paralaxy, úhel by nebylo možné změřit.

Na obrázku 32 je  $\pi$  roční paralaxa.

Obrázek č. 32 – roční paralaxa.



Vzdálenost hvězdy 1 parsek odpovídá roční paralaxe  $\pi = 1''$ . Jindy je také vzdálenost hvězd a galaxií udávána v jednotkách, které se nazývají **světelné roky**. Je to vzdálenost, kterou urazí světlo za jeden rok. Značka světelného roku je *ly*, z anglického „light year“. (**Úkol 5**)

Roční paralaxa se dá měřit tím, že danou oblast pozorujeme během jednoho roku, kdy Země mění své místo v prostoru.

### 6.1.5 Elektromagnetické spektrum

Velmi důležité informace o stavu i pohybu hvězd pochází z elektromagnetického spektra jejich záření. Dále jen spektrum. Ze spektra je možné určit, které atomy, ionty a molekuly jsou v atmosféře hvězdy přítomny a v jakém poměru. Je možné určovat také teplotu, magnetické pole a další údaje.



Barva hvězdy vypovídá o její teplotě. Čím vyšší je teplota hvězdy, tím vyšší je frekvence záření a maximum intenzity se posouvá ke kratším vlnovým délkám od červené barvy, přes žlutou, bílou až k modré barvě. Toto spektrum je spojitě.

Platí **Wienův posunovací zákon**. Tento fyzikální zákon říká, že v záření absolutně černého tělesa je maximální energie vyzařována na vlnové délce, která se s rostoucí termodynamickou teplotou snižuje. Platí vztah

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

kde  $\lambda_{\max}$  je vlnová délka maxima vyzařování,  $T$  je termodynamická teplota tělesa a  $b$  je Wienova konstanta, jejíž hodnota je přibližně 2,898 mm·K.

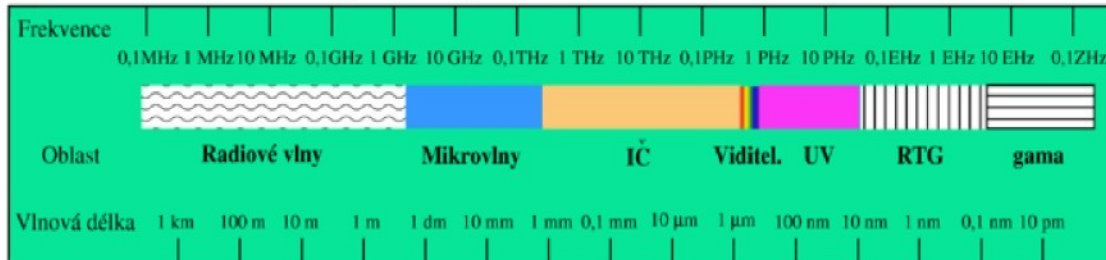
Průběh tohoto spojitěho spektra, a tím i barva hvězdy, tedy ukazuje, jaká je teplota v nejnižších vrstvách hvězdné atmosféry.

Chladnější hvězdy o teplotě okolo 4 000 K mají barvu dočervena, teplejší hvězdy jsou žluté a velmi horké hvězdy mají při teplotě přes 15 000 K barvu bílou až modrou.

Tuto barvu je možné u jasných hvězd někdy rozlišit i okem, ale ne příliš spolehlivě. Astronomové barvu hvězdy určují tak, že hvězdu pozorují přes barevné filtry a porovnávají množství světla, které těmito filtry prochází. Teplotě hvězdy určené takto podle její barvy se říká **barevná teplota**.

Záření hvězd je podobné záření absolutně černého tělesa. Pak je možné říci, že hvězda má takovou teplotu, jakou by mělo stejně velké černé těleso, které by mělo stejný zářivý výkon. Takto určené teplotě se říká **efektivní teplota**, která bývá blízká barevné teplotě, ale nemusí být stejná.

Obrázek č. 33 – elektromagnetické spektrum.



#### 6.1.5.1 Dopplerův jev a rudý posuv

Pomocí Dopplerova jevu lze určovat rychlost vzdalování a přibližování hvězd a prakticky jakéhokoliv tělesa, které k nám vysílá elektromagnetické záření.

Na úvod je možné uvést příklad pro představu Dopplerova jevu. V okamžiku, kdy nás míjí houkající lokomotiva nebo troubící automobil, slyšíme, jak výška jejich tónu o něco klesne. Toto je speciální případ Dopplerova jevu. Pozorovaná frekvence vlnění, v tomto případě frekvence zvuku, který slyšíme, závisí nejenom na frekvenci, kterou má zdroj vlnění, ale i na rychlosti, jakou se k nám zdroj přibližuje nebo vzdaluje. Když se zdroj přibližuje, zdá se nám frekvence čím dál vyšší. Při vzdalování frekvence zase klesá.

Když se zdroj vlnění přibližuje, vzdálenost mezi dvěma sousedními vrcholy vln (vlnová délka) klesá a když se zdroj od nás vzdaluje, pak je vlnová délka naopak větší.



Kratší vlnová délka  $\lambda$  znamená vyšší frekvenci  $f$ , neboť platí, že  $\lambda = \frac{c}{f}$ , kde  $c$  je rychlost vlnění (v případě hvězd rychlost světla).

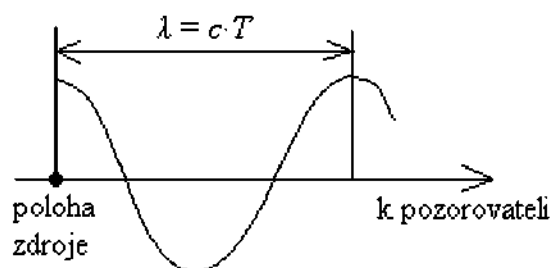
Nebo také jinak, je-li zdroj v klidu vzhledem k pozorovateli, je vzdálenost mezi sousedními vrcholy vln  $\lambda = c \cdot T$ , kde  $T$  je perioda vlnění.

Pokud se zdroj vzdaluje od pozorovatele rychlostí  $v$ , pak za čas  $T$  se vzdálí o  $\Delta\lambda = v \cdot T$  a o tuto vzdálenost se prodlouží vlnová délka. Podílem předchozích dvou rovnic získáme vztah  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$ , ze kterého lze určit rychlost zdroje  $v$ .

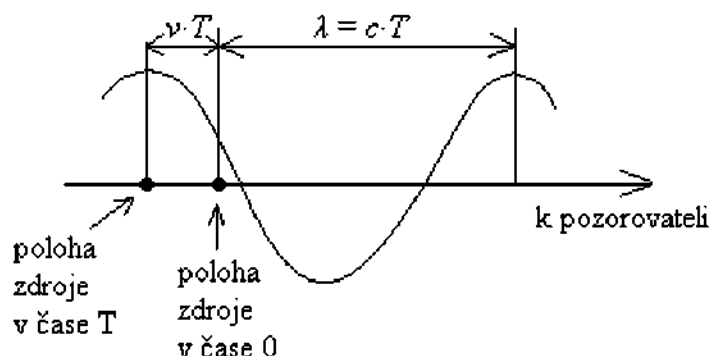
Poměr  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$  se nazývá **rudý posuv**. Rudý proto, že pokud se hvězda vzdaluje, tak vlnová délka se protahuje a frekvence záření klesá k frekvenci červeného světla.

Obrázek č. 34 – rudý posuv.

#### ZDROJ V KLIDU



#### ZDROJ V POHYBU



Atomy každého tělesa vyzařují nebo pohlcují záření jen určitých vlnových délek. Tyto vlnové délky  $\lambda$ , kterým patří ve spektru určité spektrální čáry, dobře známe a lze je velice přesně měřit v laboratoři. Pak stačí rozložit světlo přicházející od nějakého vesmírného tělesa na spektrum, najít v něm spektrální čáry známých prvků, zjistit  $\Delta\lambda$  a je možné jednoduše určit radiální rychlost, s níž se zářící atom pohybuje nebo přesněji pohyboval, když světlo vyzářil.

### 6.1.6 Další stavové veličiny

Jednou z dalších veličin, které se o hvězdách zjišťují, je jejich **poloměr**. Hvězdy jsou však příliš vzdálené, abychom mohli vidět jejich kotouček v dalekohledu a tak přímo určit jejich poloměr. Je zapotřebí použít nepřímých metod.

Například můžeme předpokládat, že barevná teplota je stejná jako efektivní. Barevnou teplotu lze určit snadno podle barvy světla, kterým hvězda září na obloze. Zářivý výkon je možné určit z pozorované hvězdné velikosti, když známe vzdálenost hvězdy. Poté stačí spočítat, jaký poloměr by musela mít absolutně černá koule, aby při stejné teplotě měla stejný zářivý výkon. Samozřejmě rovností efektivní a barevné teploty vznikne chyba, není však příliš velká, aby to zásadním způsobem ovlivnilo náš výsledek.

**Hmotnost** hvězd lze určit v případě, obíhá-li kolem dané hvězdy jiné těleso. Můžeme tedy určit pouze hmotnosti složek dvojhvězdy, neboli dvou těles, které obíhají kolem společného těžiště. Více viz kapitola Dvojhvězdy a proměnné hvězdy.

### 6.1.7 Úkoly a jejich řešení

**Úkol 1.** Vypočítejte, kolikrát je jasnost Slunce ( $m_1 \approx -26$  mag) větší než jasnost hvězdy o hvězdné velikosti  $m_2 = 24$  mag (hranice 24 mag je mez viditelnosti hvězd optickými dalekohledy bez elektronických zesilovačů světla).

*Řešení:* Použijeme vzorec  $m_1 - m_2 = -2,5 \cdot \log_{10} \frac{\Phi_1}{\Phi_2}$  a po dosazení a úpravě získáme

logaritmickou rovnici  $20 = \log_{10} \frac{\Phi_1}{\Phi_2}$ , z čehož podle vztahu

$y = \log_a x \Rightarrow x = a^y$  získáme výsledný poměr  $\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = 10^{20}$ . To znamená, že slunce je při pozorování ze Země  $10^{20}$  jasnější než pozorovaná hvězda.

**Úkol 2:** Vyjádřete poměr jasností dvou hvězd  $\frac{\Phi_1}{\Phi_2}$  jako funkci rozdílu jejich hvězdných velikostí.

*Řešení:* Znovu použijeme vzorec  $m_1 - m_2 = -2,5 \cdot \log_{10} \frac{\Phi_1}{\Phi_2}$  a bez dosazení podobným způsobem upravíme rovnicemi, jako v předchozí úloze, ze které potom získáme vztah,

kde  $\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = 10^{\frac{m_2 - m_1}{2,5}}$ . Z tohoto vztahu vyplývá, že pokud je rozdíl hvězdných velikostí

například 5 mag, tak hvězda s větší jasností září na obloze 100krát jasněji. Tak byl systém nastaven N. R. Pogsonem v roce 1856.

**Úkol 3.** Vyjádřete vzdálenost hvězdy  $r$  jako funkci rozdílu její hvězdné velikosti a absolutní hvězdné velikosti. Dále vytvořte tabulku, kde bude uvedena vzdálenost  $r$  pro hodnoty rozdílu hvězdné velikosti a absolutní hvězdné velikosti -5, 0, 5, 10, 15, 20, 40.

Řešení: Použijeme vzorec  $m - M = 5 \cdot \log r - 5$ , z něhož úpravou logaritmické rovnice

získáme výsledný vztah, kde  $r = 10^{\frac{m-M}{5}+1}$ . Výsledná tabulka vypadá takto:

|          |    |    |        |        |        |        |        |
|----------|----|----|--------|--------|--------|--------|--------|
| $m-M$    | -5 | 0  | 5      | 10     | 15     | 20     | 40     |
| $r [pc]$ | 1  | 10 | $10^2$ | $10^3$ | $10^4$ | $10^5$ | $10^9$ |

V tabulce vidíme, že pro vzdálenost 10 pc je rozdíl  $m - M = 0$ . To znamená, že v této vzdálenosti je hvězdná velikost rovna absolutní hvězdné velikosti.

**Úkol 4:** Hvězda o absolutní hvězdné velikosti  $M_0 = 0 \text{ mag}$  má zářivý výkon  $L_0 = 2,97 \cdot 10^{28} \text{ W}$ . Vypočítejte zářivý výkon  $L$  hvězdy o absolutní hvězdné velikosti  $M$  a vyjádřete tento výkon v jednotkách  $L_S$ .<sup>1</sup>

Řešení: Ve stejné vzdálenosti hvězd, která je 10 pc nám ze vztorce  $\Phi = \frac{L}{4\pi \cdot r^2}$  vyjde, že

poměr  $\frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{L}{L_0}$ . V této vzdálenosti je také rozdíl  $m - M$  roven nule, z čehož plyne, že  $m = M$  a můžeme  $M$  dosadit do Pogsonovy rovnice.

Ze vztahu  $M - M_0 = -2,5 \cdot \log_{10} \frac{\Phi}{\Phi_0}$  získáme dosazením výsledný vztah

$L = L_0 \cdot 10^{-0,4M}$ , do kterého ještě dosadíme za  $L_0$ . Výsledek je  $L = 2,97 \cdot 10^{28} \cdot 10^{-0,4M} \approx 78 \cdot L_S \cdot 10^{-0,4M}$ .

**Úkol 5.** Určete, jakou vzdálenost v km urazí světlo za 1 rok, a tuto vzdálenost vyjádřete v AU.

Řešení: Víme, že rychlost světla je  $3 \cdot 10^5 \text{ km/s}$ . Vypočítáme, kolik s má 1 rok a toto číslo vynásobíme číslem 300 000. Výsledek je, že 1 ly je vzdálenost  $9,4608 \cdot 10^{12} \text{ km}$ .

Dále víme, že 1 AU je vzdálenost Země – Slunce, což je přibližně  $1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$ . Z toho vypočítáme, že  $1 \text{ ly} = 63\,072 \text{ AU}$ .

## 6.2 Klasifikace hvězd

V následujících podkapitolách bude uvedena základní klasifikace hvězd.

### 6.2.1 Spektrální klasifikace

Spektrální klasifikace hvězd rozděluje hvězdy do různých kategorií podle teploty jejich fotosféry a jí příslušných spektrálních charakteristik.

**Morganova-Keenanova spektrální klasifikace** je nejpoužívanější spektrální klasifikace hvězd.

Tabulka č. 14 – Morgan-Keenanova spektrální klasifikace hvězd.

| Třída    | Povrchová teplota [ $\cdot 10^3 \text{K}$ ] | Barva hvězdy | Typ hvězdy                                             | Příklady hvězd                                                                   | Hmotnost [ $M_S$ ] | Poloměr [ $R_S$ ] | Zářivý výkon [ $L_S$ ] |
|----------|---------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------|------------------------|
| <b>O</b> | 50 - 30                                     | modrá        | modří nadobři                                          | $\zeta$ Pup, $\delta$ Pup, $\zeta$ Ori                                           | 20 - 50            | 15                | $1,4 \cdot 10^6$       |
| <b>B</b> | 30 - 11                                     | modrobílá    | nadobři, bílí trpaslíci                                | Regulus, Rigel, Spica, Sirius B                                                  | 3,2 - 17           | 7                 | $2 \cdot 10^4$         |
| <b>A</b> | 11 - 7,5                                    | bílomodrá    | nadobři, bílí trpaslíci, hvězdy hl. posloupnosti       | Deneb, Castor, Vega, Altair, Sirius A, Prokyon B                                 | 1,8 - 3,2          | 2,5               | 80                     |
| <b>F</b> | 7,5 - 6                                     | žlutobílá    | nadobři, hvězdy hl. posloupnosti                       | Canopus, Polárka, Procyon                                                        | 1,2 - 1,7          | 1,3               | 6                      |
| <b>G</b> | 6 - 5                                       | žlutá        | nadobři, hvězdy hl. posloupnosti                       | Slunce, Capella                                                                  | 0,8 - 1,1          | 1,1               | 1,2                    |
| <b>K</b> | 5 - 3,5                                     | oranžová     | červení nadobři, červení obři, hvězdy hl. posloupnosti | Pollux, Arktur, Dubhe ( $\alpha$ UMa)                                            | 0,6 - 0,8          | 0,9               | 0,4                    |
| <b>M</b> | 3,5 - 3                                     | červená      | červení nadobři, červení obři, červení trpaslíci       | Mira Ceti, Betelgeuse, Antares, Barnardova hvězda, Proxima Centauri, VV Cephei A | 0,008 - 0,05       | 0,4               | 0,04                   |

Třídy jsou obvykle řazeny podle teploty od nejteplejší po nejchladnější. Hmotnost, zářivý výkon a poloměr jsou veličiny vztažené ke Slunci.  
 $M_S = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ ,  $R_S = 695\,997 \text{ km}$ ,  $L_S = 3,8268 \cdot 10^{26} \text{ W}$ .

Podtřídy se vyjadřují číslicemi 0 až 9 (např. G5). 0 označuje nejteplejší hvězdu ve třídě, 9 nejchladnější. Například hvězda třídy O6 je teplejší než hvězda třídy O9 a obě jsou teplejší než hvězda třídy B0. Slunce je třídy G2.

**Systém UB**V je další možností klasifikace hvězd. Systém je také známý pod názvem Johnsonův systém. Je to fotometrický systém klasifikace hvězd podle jejich hvězdné velikosti. Písmena U, B a V znamenají ultrafialovou, modrou (blue) a vizuální hvězdnou velikost. Tuto metodu zavedli v 50. letech dvacátého století američtí astronomové Harold Lester Johnson a William Wilson Morgan.

## 6.2.2 Dvojhvězdy a proměnné hvězdy

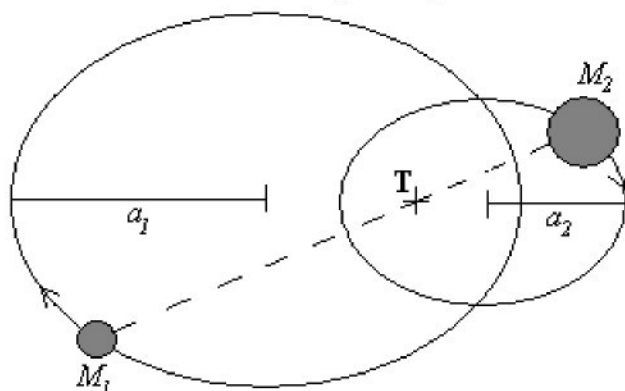
Na obloze můžeme vidět dalekohledem některé hvězdy blízko u sebe. To však ještě nemusí znamenat, že tomu tak opravdu je. Jejich vzdálenost od Země může být velmi odlišná. Ale v některých případech se může jednat o dvě hvězdy, které obíhají blízko sebe a navíc kolem společného těžiště. Takové hvězdné páry se nazývají dvojhvězdy a každá hvězda z tohoto páru se nazývá složka dvojhvězdy.

Hvězdy se nemusí vyskytovat pouze v párech, ale existují takto i vícenásobné soustavy hvězd například trojhvězdy, čtyřhvězdy, atd. Pouze asi sedmina všech hvězd je osamocená jako například naše Slunce. Zbytek hvězd jsou dvojhvězdy nebo vícenásobné hvězdy.

Jednotlivé složky dvojhvězd tedy obíhají kolem společného těžiště po eliptických drahách, které jsou podobné. Tyto elipsy mají stejnou výstřednost a leží v jedné rovině. Pro délky jejich hlavních poloos a hmotnosti obou složek dvojhvězdy platí vztah

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{M_2}{M_1}.$$

Obrázek č. 35 – model dvojhvězdy.



Oběžná perioda dvojhvězdy  $P$  vyhovuje 3. Keplerovu zákonu ve tvaru

$$P^2 = \frac{4 \cdot \pi^2 a^3}{G \cdot (M_1 + M_2)},$$

kde  $a = a_1 + a_2$ .

Pro periodu, která se vyjadřuje v letech, pak platí

$$P = \left( \frac{a}{1 \text{ AU}} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( \frac{M_s}{M_1 + M_2} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Jestliže složky dvojhvězdy obíhají relativně těsně kolem sebe, tak se navzájem ovlivňují gravitačním působením, zářením, magnetickým polem a někdy i vzájemným přenosem hmoty. U těsných dvojhvězd může hmota z jedné složky přetékat na složku druhou. To má podstatný vliv na vývoj dvojhvězdy. Jestliže je jedna ze složek hmotnější, její vývoj je rychlejší a začne se rozpínat. Jak se rozpíná, tak menší složka jí „ukrádá“ hmotu. Toto předávání hmoty trvá tak dlouho, až se poměr jejich hmotností obrátí. Ale opět platí, že hmotnější hvězda se vyvíjí rychleji, a tak se druhá složka začne

rozpínat a koloběh se opakuje. Při takovém přesunu hmoty může dojít k explozi a vzniku tzv. Novy či Supernovy.<sup>4</sup>

Jednotlivé složky dvojhvězdy je možné v dalekohledu rozlišit jen tehdy, je-li dvojhvězda úhlově dostatečně daleko. Dvojhvězdám rozeznatelných pozorováním dalekohledem se říká **vizuální**. Existují však další způsoby, jak poznáme, zda se jedná o dvojhvězdu.

Pokud se obě složky při svém oběhu okolo společného těžiště pro pozorovatele na Zemi střídavě zakrývají, pak se světlo, které k nám vyzařují, v pravidelných intervalech zeslabuje a zesiluje. Dvojhvězdy, které lze takto identifikovat, se nazývají **zákrytové dvojhvězdy**.

U jiných hvězd při pozorování jejich spektra je možné pozorovat posun spektrálních čar k červenému a poté zase k modrému spektru nebo pravidelné rozdojovávání a zase spojování čar. To znamená, že se zdroj od nás pravidelně vzdaluje a následně přibližuje. Posuv čar ve spektru je způsoben Dopplerovým jevem. Je možné takto vidět jednu nebo dokonce obě složky dvojhvězdy, které se v tomto případě říká **spektroskopická dvojhvězda**.

Některé hvězdy svou jasnost pravidelně či nepravidelně mění. Těm se pak říká **proměnné hvězdy**. Proměnné hvězdy mohou mít periodu proměny několik hodin až let. Proměnnost je většinou způsobena tím, že hvězda pulzuje, mění svůj tvar i poloměr.

**Novy** jsou zvláštním druhem proměnných hvězd.<sup>1</sup> Jejich název pochází z latinského „nova“, což znamená „nová hvězda“. Lidé mohou občas na obloze vidět hvězdu, která tam předtím nebyla. Ve skutečnosti je to náhlé zvětšení jasnosti „staré“ hvězdy, která byla slabá. Nova sice rychle zazáří, ale po několika desítkách dnů pohasne a její jasnost se může ještě zmenšit oproti stavu před vzplanutím. Některé novy tento proces několikrát opakují. Říkáme jim **rekurentní novy**.

Daleko nápadnější než novy jsou **supernovy**. Ty zvýší svoji jasnost daleko víc než novy, ale jejich výskyt je daleko vzácnější. Hvězda, jejíž hmotnost po celém vývoji, čili v době kdy přechází do bílého trpaslíka, je alespoň 1,4 násobek hmotnosti Slunce, vzplane jako supernova, kdy prodělá termonukleární explozi. Při této obrovské explozi se většina nebo část hmoty hvězdy rozmetá a do okolního prostoru se šíří rázová vlna. V supernovách se vytvářejí těžší atomová jádra.

## 6.3 Vznik hvězd

Hvězdy vznikají při stlačování mezihvězdného oblaku. Přítomnost mladých hvězd v blízkosti těchto oblaků ukazuje na tuto teorii. Tato oblaka jsou složena převážně z vodíku, menšího množství helia a 1 % – 10 % prachových částic. Oblaky mají hmotnosti řádově stovek hmotností Slunce a rozměry několika desítek parseků. Teploty v těchto mračnecích jsou také velmi různé, od teploty oblastí s neionizovaným atomárním vodíkem, tzv. oblastí HI, kde je teplota okolo 100 K, až po teploty okolo 10 000 K v oblastech svítícího ionizovaného vodíku HII.

**První podmínkou** pro vznik hvězd je tedy stlačování mezihvězdného oblaku, kdy se zvyšuje teplota a po dlouhém procesu dochází k „zažehnutí“ termonukleárních reakcí. Při vysoké teplotě několika milionů K mají jádra vodíku takovou rychlost, že se mohou vzájemně spojovat a vznikají tak jádra helia.

Nejdůležitější silou pro stlačování oblaku je gravitace. Ta bez pomoci dalších sil může vést k vytvoření hvězdy jen v případě, že hmotnost oblaku je vyšší než hmotnost kritická, udaná Jeansovým kritériem:

$$M_k = k \cdot \left( \frac{R_m \cdot T}{m \cdot G} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\rho}},$$

kde konstanta  $k$  nabývá hodnot od 1 do 10 podle hustoty uvnitř oblaku,  $\rho$  je střední hustota,  $T$  teplota,  $m$  hmotnost průměrné částice v oblaku,  $R_m$  molární plynová konstanta a  $G$  gravitační konstanta.<sup>4</sup>

Pokud hmotnost oblaku není vyšší, než hmotnost kritická, musí gravitační kontrakci pomoci další síla. Může jich být hned několik:

a) Tlak horkého plynu, kdy horký plyn z oblastí HII expanduje do studené oblasti HI a stlačuje oblak za vzniku tzv. sloních chobotů.

b) Exploze blízké supernovy. Rázová vlna od explodující supernovy způsobí nárůst hustoty v oblaku

c) Rázová vlna spirální galaxie. Ramena spirální galaxie rotují a na jejich vnitřní straně se udržuje stálá rázová vlna. Projde-li tato vlna oblakem, nastává stejný efekt jako při výbuchu supernovy.

Kontrakce mezihvězdného oblaku nemusí vždy vést ke vzniku hvězd. Častěji se oblak rozplyne. V opačném případě vznikají v oblaku regiony, kde probíhá gravitační smršťování rychleji než v okolí. V těchto centrech vznikají **globule** neboli **protohvězdy**, což jsou rotující jádra budoucích hvězd.

**Druhou podmínkou** pro vznik hvězd je, že oblak musí ztratit nadbytečnou tepelnou energii. Mezihvězdná oblaka jsou složena také z prachových částic, ty na sebe berou úlohu chladiče. Atomy, které se díky stlačování zahřívají, narážejí na prachové částice, kterým předají svou kinetickou energii. Prachové částice se zahřívají a tepelnou energii rychle vyzáří v infračerveném oboru. Tomuto stádiu hvězdného vývoje říkáme protohvězda. Tato teorie byla potvrzena pozorováním asi 30 zdrojů infračerveného záření v oblastech formování hvězd.

**Třetí podmínkou** je snížení rychlosti rotace oblaku. Aby mohla vznikající hvězda nabývat na hmotnosti, musí snížit svou rotaci. Jakým způsobem se toto ovšem děje, není zcela přesně známo. V současnosti se vědci domnívají, že příčinou snížení rotace by mohly být mezihvězdné větry a magnetický tok částic. Část momentu hybnosti jde do vznikajících planet nebo do dalších složek (dvojhvězd, trojhvězd, atd.)

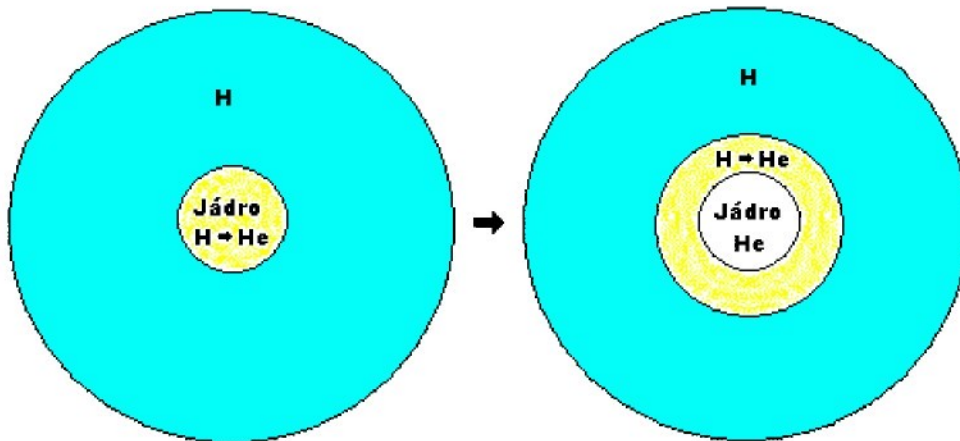
V nitru **protohvězdy** vzrůstá hustota, teplota a tlak (adiabatickým dějem) a tím se brzdí rychlost padání částic do jádra. Kontrakce pak probíhá pomaleji. Tento stav zůstává několik desítek milionů let (záleží na velikosti protohvězdy). V důsledku zvyšování teploty se při dosažení teploty okolo 2 000 K vypaří prachové částice. Protohvězda vyzáří energii ve formě tepelného záření, a tím ztrácí tepelnou a posléze i gravitační energii. Po několika milionech let dochází k prudkému ohřátí hvězdy a smrštění. Hvězda se přesouvá na hlavní posloupnost. Její teplota je okolo 10<sup>7</sup> K. Zapalují se termonukleární reakce.

Hvězda na počátku termonukleárními reakcemi mění v jádře H na He. Jádro se plní héliem až je jádro celé z hélia a vodíkové hoření probíhá ve vrstvě okolo jádra, zásoby vodíku se snižují. Produkce energie se zvyšuje. V oblasti hélia roste molární



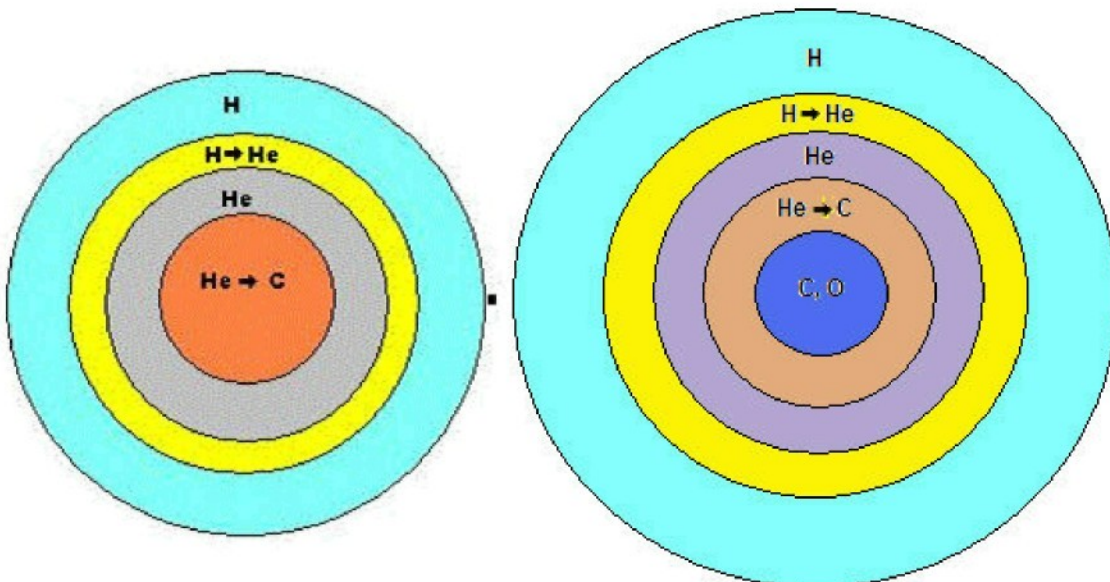
hmotnost, a tím dochází k poklesu tlaku a růstu teploty. S klesajícím tlakem se zvyšuje přísun hmoty z okolí.

Obrázek č. 36 – stádia vývoje hvězd.



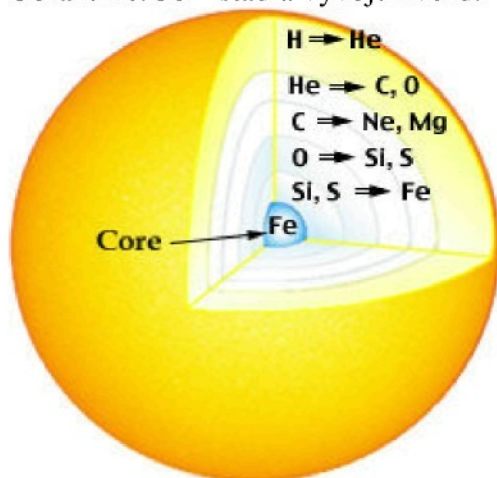
V héliovém jádře se zapálí  $3\alpha$  cyklus ( $\text{He} \rightarrow \text{C}$ ). Dochází k mohutnému zvětšení obálky a z hvězdy se stává obr.

Obrázek č. 37 – stádia vývoje hvězd.



Tato "cibulová struktura" nekončí u uhlíku a kyslíku v jádře, ale dále pokračuje. Zastaví se až u železa. Čím je jádro hvězdy těžší a menší, tím je její atmosféra větší, rozsáhlejší a řidší. Vzniká rudý obr nebo i veleobr.

Obrázek č. 38 – stádia vývoje hvězd.<sup>4</sup>

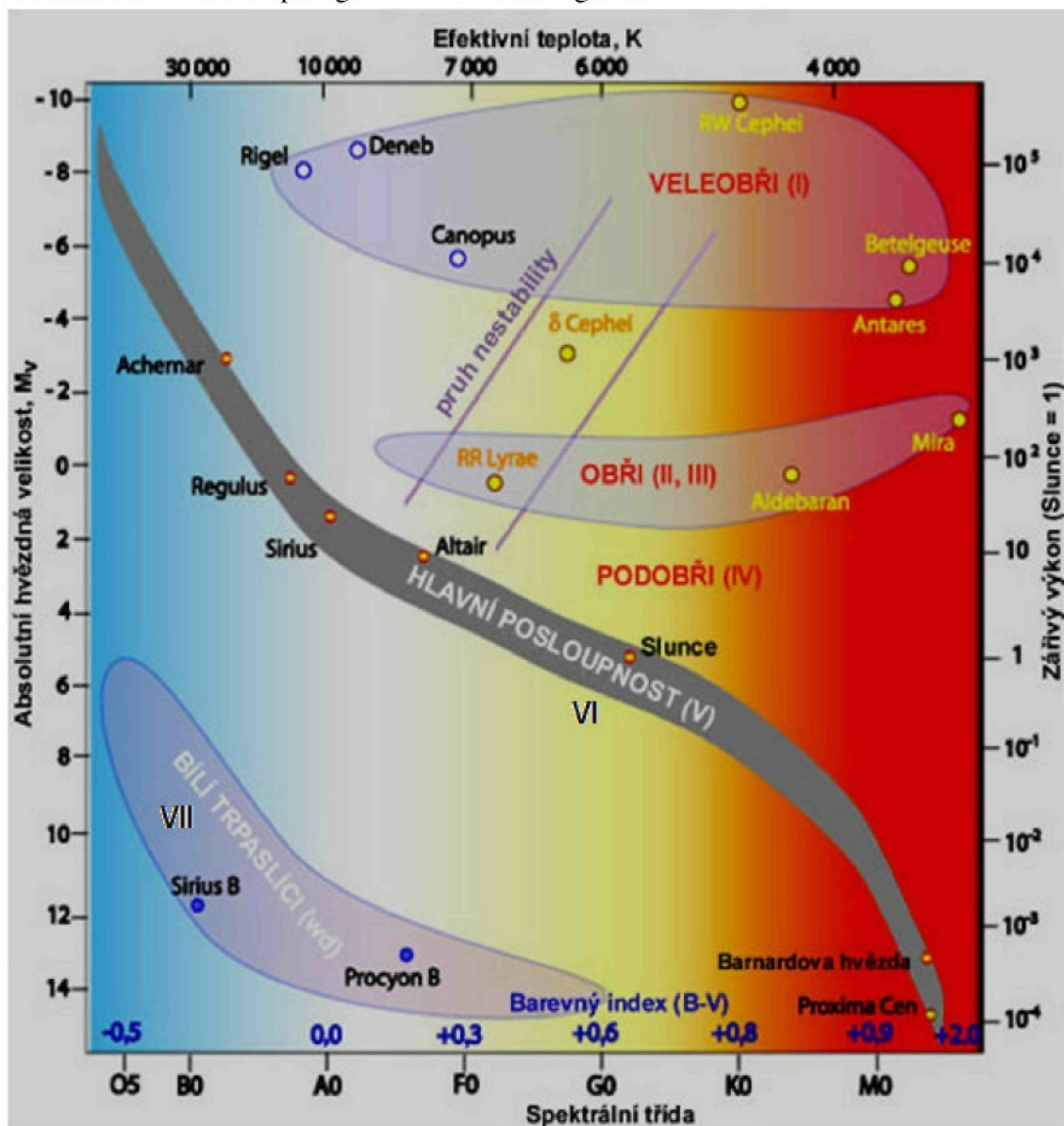


## 6.4 HR diagram

Výhodou astronomie je, že hvězd je velký počet, ze kterého je možné dělat statistické závěry. K tomu je však nutné znát i skutečné vlastnosti hvězd. Nevystačíme si s tím, jak se nám jeví ze Země. Až v prvních desetiletích dvacátého století se objevovaly první práce využívající statistiku většího počtu hvězd. Tehdy byly známy vzdálenosti několika prvních stovek hvězd a bylo možné určit jejich absolutní hvězdné velikosti.

Nejvýznamnějším výsledkem této doby je **Hertzsprungův-Russellův** diagram neboli HR diagram. Nazývá se podle astronomů, kteří ho v r. 1913 nakreslili. Zobrazuje hvězdy v závislosti na jejich absolutní hvězdné velikosti (tedy i zářivém výkonu) a na spektrálním typu (tedy teplotě).

Obrázek č. 39 – Hertzsprungův – Russellův diagram.



Římské číslice od I do VII jsou luminositní třídy podle Morgan-Keenan-Kellmanovy klasifikace. Jak je vidět v HR diagramu, každé třídě náleží určité stádium hvězdy.

## 6.5 Vývoj hvězd a jejich konečná stádia

Celý vývoj hvězdy velmi citelně závisí na její hmotnosti. Hmotnost hvězdy určuje, jakou silou tlačí vnější vrstvy na její nitro. Hvězda může být v rovnováze, když je v nitru přesně takový tlak, aby mohla být vyrovnána silá působící na toto nitro. V případě, že by nebyl v nitru hvězdy dostatečný tlak, hvězda by se začala smršťovat. S rostoucí hmotností je tedy potřebný vyšší tlak uvnitř hvězdy než u méně hmotné hvězdy.

Vysoký tlak uvnitř hvězdy je udržován vysokou teplotou, která vyplývá z termonukleárních reakcí. Jestliže tyto reakce ustanou, tlak ve hvězdě se sníží, hvězda se začne vlastní gravitační silou smršťovat a tím se znovu zahřívá. Při tomto gravitačním smršťování se zvyšuje teplota a mohou se znovu „zažehnout“ jaderné reakce a smršťování ustane. V jiném případě v určité fázi smrštění začne mít látka uvnitř hvězdy takovou hustotu, že je schopna odolat obrovským tlakům vyšších vrstev.

Z tohoto důvodu velmi lehké hvězdy ani nezačnou spalovat vodík, Má-li hvězda hmotnost **menší než** přibližně **0,1  $M_{\odot}$** , potom se při svém vzniku z původního oblaku sice nejprve smršťuje a zahřívá, ale dříve než by její teplota vzrostla natolik, aby mohly být „zažehnuty“ termonukleární reakce, vznikne v jejím nitru pevná látka, která další smršťování zastaví. Taková hvězda pak už pouze chladne a tuhne. Těmto hvězdám se říká **hnědý trpaslík**. Lze si hnědé trpaslíky představit jako hodně velké a horké planety.

Hnědý trpaslík časem vychladne a stane se z něho **černý trpaslík**. Vzhledem k tomu, že hnědí a černí trpaslíci jsou mnohem chladnější a menší než hvězdy, je téměř nemožné je pozorovat. Proto také ani není znám jejich počet ve vesmíru a je možné, že tvoří významnou část celkové hmotnosti.

Jestliže je hmotnost hvězdy **větší než** přibližně **0,1  $M_{\odot}$** , pak vznikne při smršťování dostatečná teplota k tomu, aby se „zažehly“ reakce, kdy se spojují vodíková jádra na helium. Tím nastane nejdelší období „aktivního“ života **hvězdy**, kdy se hvězda nachází na **hlavní posloupnosti** HR diagramu. Hvězda na této hlavní posloupnosti setrvává až 80 % svého života.

Po přeměně podstatné části vodíku na helium začne výkon hvězdy slábnout, její teplota poklesne a hmota opět začne padat směrem ke středu. Vzhledem k dostatečně vysoké hmotnosti hvězdy se smrštěním teplota v nitru opět zvýší natolik, aby byly „zažehnuty“ nové termonukleární reakce, při kterých se spojují jádra helia na uhlík. Hvězda se tedy nestává hnědým trpaslíkem. Záření v nitru hvězdy „nafoukne“ vnější vrstvy a hvězda podstatně zvýší svůj poloměr, přičemž je však teplota povrchových vrstev poměrně nízká. Z hvězdy se stává tzv. **červený obr**.

Naše **Slunce** se nyní nachází na hlavní posloupnosti, ale přibližně za 5 miliard let se také stane červeným obrem a jeho poloměr se asi 1 000krát zvětší a bude sahát až někam k dráze Venuše. Za 1,2 miliardy let bude Slunce o 10 % svítivější, teplota na Zemi stoupne a voda se vsákne. Za 3 Gy (giga years) by měla teplota na povrchu Země dosáhnout 400°C. Za 6,4 Gy bude na Marsu stejná teplota jako dnes na zemi. Po 7,7 Gy zmizí ze Země atmosféra a zemská kůra se začne tavit. Slunce se dostane až k Zemi. K tomu, aby Země přežila rozpínání Slunce je zapotřebí, aby malinká planetka o průměru 200 km proletěla těsně kolem Země každých 10 000 let. Tím by se postupně Země vzdalovala od Slunce do potřebné vzdálenosti k přežití.

Samozřejmě časem dojde červenému obru palivo, kterým bylo helium. Jestliže je hmotnost hvězdy **nižší než** **1,4  $M_{\odot}$** , tak jejím dalším smršťováním se vytvoří v nitru velmi stlačená látka a smršťování se zastaví. Tato stlačená látka není však některá z pevných látek, které známe za Země. Atomy se vysokým tlakem natěsnały k sobě takovým způsobem, že jejich elektronové obaly úplně splývají a elektrony volně přecházejí od jednoho jádra k druhému. Tyto elektrony tvoří tzv. degenerovaný plyn. Hustota této látky je asi milionkrát větší než hustota vody. Hvězda, která vznikne tímto způsobem, je svojí hmotností srovnatelná s hmotností Slunce, ale přitom je velká asi jako Země. Této hvězdě se říká **bílý trpaslík** a přesto, že její teplota je vysoká, tak vzhledem k malým rozměrům je její zářivý výkon poměrně malý. Bílí trpaslíci nemají

prakticky žádný zdroj energie, a tak postupně chladnou a za velmi dlouhou dobu se změň v **černé trpaslíky**.

Pokud je však hmotnost hvězdy **větší jak  $1,4 M_{\odot}$** , je tlak vnějších vrstev na nitro hvězdy tak velký, že ani degenerovaný plyn nezabrání dalšímu smršťování, které začne po „vyhoření“ helia. Vzhledem k tomu teplota v nitru dále roste, až jsou „zažehnuty“ další termonukleární reakce, při nichž se tvoří stále těžší jádra od uhlíku až po železo. Tyto reakce však probíhají pouze několik roků nebo pouze měsíců, protože se těmito reakcemi dá získat už jen poměrně málo energie. Až je všechno jaderné palivo vyčerpáno, hvězda se začne znovu velikou rychlostí smršťovat. Gravitační energie, která se při tom náhle uvolní, způsobí obrovskou explozi, přičemž jsou vnější části hvězdy vyvrženy do okolního prostoru a záření hvězdy se během několika hodin zvýší milionkrát i více. Takovému jevu se říká, že vybuchla **supernova**. Je to dosti ojedinělý jev. V naší Galaxii bylo zaznamenáno pouze několik výbuchů supernov, poslední v r. 1604. Statistika říká, že v naší Galaxii vybuchne supernova přibližně jednou za tři sta let. V každé galaxii je výbuch supernovy méně častý jev (zhruba jednou za třicet let), ale vzhledem k vysokému počtu galaxií je možné pozorovat několik desítek explozí za rok. Nelze je však pozorovat prostým okem.

Supernovy mají mimo jiné důležitou funkci, kterou je tvoření těžších jader než jsou jádra železa. V případě tvorby lehčích jader než je železo se při termonukleárních reakcích energie uvolňuje. Jestliže se však tvoří těžší jádra, energie se naopak spotřebovává. V „normálních“ hvězdách tedy nemohou vznikat těžší jádra než jádra železa.

Při výbuchu supernovy dosahuje tlak a teplota obrovských hodnot, díky kterým do sebe narážejí lehčí jádra velkými rychlostmi. Energie, která se tak vytvoří, je k dispozici mnoho pro tvorbu těžších jader. Z těchto těžších jader, které vznikají při explozi supernov, je zčásti tvořena například naše Země. Přesněji řečeno, všechny atomy těžší než železo na Zemi vznikly při výbuchu supernovy. Z jejího popela je naše sluneční soustava.

Jak bylo uvedeno, při výbuchu supernovy se odmrští vnější vrstvy hvězdy do okolí, ale nitro hvězdy zůstává spojené. Zde se při obrovském tlaku spojují elektrony s protony a z tohoto spojení vznikají neutrony, které zabírají mnohem méně místa než protony a elektrony. Látka tvořená z neutronů je nesmírně hustá, stejně hustá jako atomové jádro, které tvoří daleko menší část atomu než obal. Vzhledem k vysoké hustotě dokáže tato neutronová látka odolat velmi vysokému tlaku. Pokud je hmotnost hvězdy po všech ztrátách **menší než asi  $2M_{\odot}$** , pak se její další smršťování zastaví. Tomu, co z hvězdy zbude, se říká **neutronová hvězda**. Hmotnost neutronové hvězdy může být větší než hmotnost Slunce, ale její průměr je díky vysoké hustotě jen několik kilometrů. Přibližně je to 20 km. (Úkol 1)

V roce 1967 byl zachycen zdroj radiového i světelného záření, který vysílal velmi pravidelné a krátké pulsy vzdálené od sebe přibližně 1 sekundu. Pulzy byly milisekundové i kratší. Nejprve se toto vysílání považovalo za vysílání nějaké vzdálené civilizace. Pokud nějaký zdroj světla náhle zjasní a opět potmění za dobu jedné milisekundy, znamená to, že jeho rozměry musí být nejvýš tak velké, aby jím světlo prošlo za tuto milisekundu. Z toho plyne, že tyto pulzy vysílal zdroj o průměru jen několik kilometrů. Tehdy se zdálo nemožné, aby tak malý zdroj měl takový obrovský výkon.



Zdrojem však nebylo vysílání jiné mimozemské civilizace, ale byla to jedna z neutronových hvězd, kterým se začalo říkat **pulsary**. Objev pulsarů potvrdil teorii existence těchto superhustých hvězd. Perioda mezi pulzy je daná dobou rotace neutronové hvězdy.

Ještě zbývá osvětlit další variantu, kdy má hvězda po vyčerpání veškerého jaderného paliva a po všech ztrátách stále hmotnost **větší než  $2M_{\odot}$** . Taková hvězda se začne dále hroutit, kdy její látka prakticky padá volným pádem do sebe a dosahuje tak neomezených hustot. Takovému objektu se říká **černá díra**. Obrovské gravitační pole na jejím povrchu znemožňuje únik světla, a proto není možné černou díru pozorovat přímo. Vlivem silné gravitace jsou přitahována i tělesa z jejího okolí, která pak končí nenávratně v černé díře.

Je-li černá díra naprosto osamocená, není možné ji objevit. Nabízí se tak možnost, že nemalá část vesmíru je tvořena černými dírami.

O některých černých dírách získáváme nepřímé informace. Například je známá dvojhvězda, kdy jedna její složka je neviditelná, ale je příliš hmotná, než aby to mohla být neutronová hvězda. Předpokládá se tedy, že se jedná o černou díru. Od této dvojhvězdy k nám přichází rentgenové záření, které pravděpodobně vzniká tím, že proudy plynu padající k černé díře na sebe ve velké rychlosti narážejí. Jiná místa, kde se předpokládá existence černých děr, jsou střed galaxií včetně té naší.

Po shrnutí této kapitoly lze opravdu říci, že významným prvkem ve vývoji hvězdy je především její počáteční hmotnost. Většina hvězd končí svoji etapu života jako černí trpaslíci, menší počet končí jako neutronové hvězdy a nejmenší počet z nich jako černé díry. Protože však velmi hmotné hvězdy končící jako černé díry mají poměrně krátkou dobu života, lze předpokládat, že dříve vznikalo černých děr daleko více než dnes.

### 6.5.1 Úkoly a jejich řešení

**Úkol 1:** Poloměr jádra železa  ${}^{56}_{26}\text{Fe}$  je  $r_{\text{Fe}} = 5,6 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ . Předpokládejte, že neutronová hvězda má hmotnost stejnou jako je hmotnost Slunce a průměrnou hustotu stejnou jako jádro železa. Vypočítejte poloměr  $R_h$  této hvězdy.<sup>1</sup>

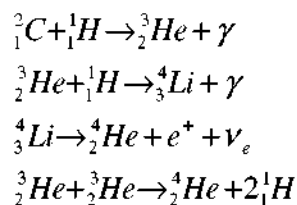
*Řešení:* Víme, že hustota neutronové hvězdy  $\rho_h$  je stejná jako hustota jádra železa  $\rho_{\text{Fe}}$ .

Pak platí vztah, že  $\frac{M_h}{R_h^3} = \frac{m_{\text{Fe}}}{r_{\text{Fe}}^3}$ , ze kterého vypočítáme, že  $R_h \cong 15 \text{ km}$ .<sup>1</sup>

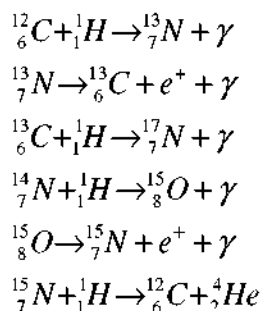
## 6.6 Termonukleární reakce ve hvězdách

V nitru hvězd probíhají termonukleární reakce, později případně i ve slupce, která jádro obklopuje. Účastní se jich jen asi 1 % hmoty hvězdy. Vyjmenujme nejdůležitější termonukleární reakce.

**Proton-protonový řetězec** (p-p řetězec) je zdrojem sluneční zářivé energie. Probíhá při teplotách  $4 \cdot 10^6$  až  $20 \cdot 10^6 \text{ K}$ . Roku 1938 jej objevil fyzik Bethe.<sup>3</sup>



Další je tzv. **CNO cyklus**. Uplatňuje se při teplotách  $20 \cdot 10^6$  až  $60 \cdot 10^6$  K. Při této reakci se mění opět vodík na helium. Roku 1939 ho objevil také fyzik Bethe.<sup>3</sup>



**Žalfa proces** nastupuje u hvězd, které opustily hlavní posloupnost, a v jejich nitru vzrostla teplota. Helium se zde mění na uhlík. Produkce energie této reakce velmi prudce roste s teplotou. Probíhá při teplotě  $10^8$  K i více. Z uhlíku dále vzniká neon a draslík a u nehmotnějších hvězd potom i těžší prvky až po železo.

Energie uvolněná při termonukleárních reakcích se k povrchu šíří třemi způsoby a to **zářením**, prouděním nebo-li **konvekcí** a **vedením**.

Zářením se energie šíří vrstvou v zářivé rovnováze. Toto šíření je tím snazší, čím průzračnější je látka hvězdy.

Při proudění v konvektivní vrstvě ohřátá látka stoupá, předává energii horním vrstvám, přičemž se ochladí a zase klesá. U méně hmotných hvězd se energie šíří v hlubších oblastech zářením a blíže k povrchu prouděním, u hmotnějších naopak.

Vedením se energie šíří v bílých trpaslících a neutronových hvězdách, tedy na tělesech, kde už termonukleární reakce ustaly. Částice přitom předává energii částici sousední.

Během svého vývoje hvězda vytváří atomy stále těžších prvků z atomů lehčích. Rychlost vývoje a jeho průběh závisí na počáteční hmotnosti a chemickém složení hvězdy. Vývoj je také ovlivněn přítomností blízké hvězdy v případě těsných dvojhvězd.



## 7 GALAXIE

Při pozorování vesmíru dalekohledem, lze mimo hvězd a planet vidět také mnoho malých mlhovinových obláčků. Některé z nich jsou pouze jasná oblaka mezihvězdného plynu a prachu, ale většina z nich jsou seskupení, kterým se říká galaxie. Galaxie je obrovský systém hvězd, mezihvězdného prachu, mezihvězdného plynu a nezářivé hmoty. Tyto složky obíhají kolem galaktického jádra, v jehož centru je černá díra. Systém je vázaný vzájemnou gravitací složek. I naše sluneční soustava je součástí jedné galaxie.

Od starověku se lidé domnívali, že středem vesmíru je Země. Tento názor popravil Mikuláš Koperník, který za střed sluneční soustavy označil Slunce, Země obíhala kolem něho. V 18. století přišli astronomové s hypotézou, která říkala, že Slunce je středem mnohem většího systému hvězd a tímto systémem je galaxie. V roce 1917 odhadl Harlow Shapley vzdálenost Slunce od středu Galaxie na 50 000 světelných let (asi 15 000 pc). Později byla tato hodnota zpřesněna na 30 000 světelných let (přibližně 9 000 pc). V roce 1924 zjistil Edwin Hubble, že naše Galaxie je jen jednou z mnoha.

Naše Galaxie je na obloze viditelná jako mlhavě svítící pruh, který se nazývá **Mléčná dráha**. Je to jedna z galaxií, pouze ji vidíme z jejího vnitřku od Slunce.

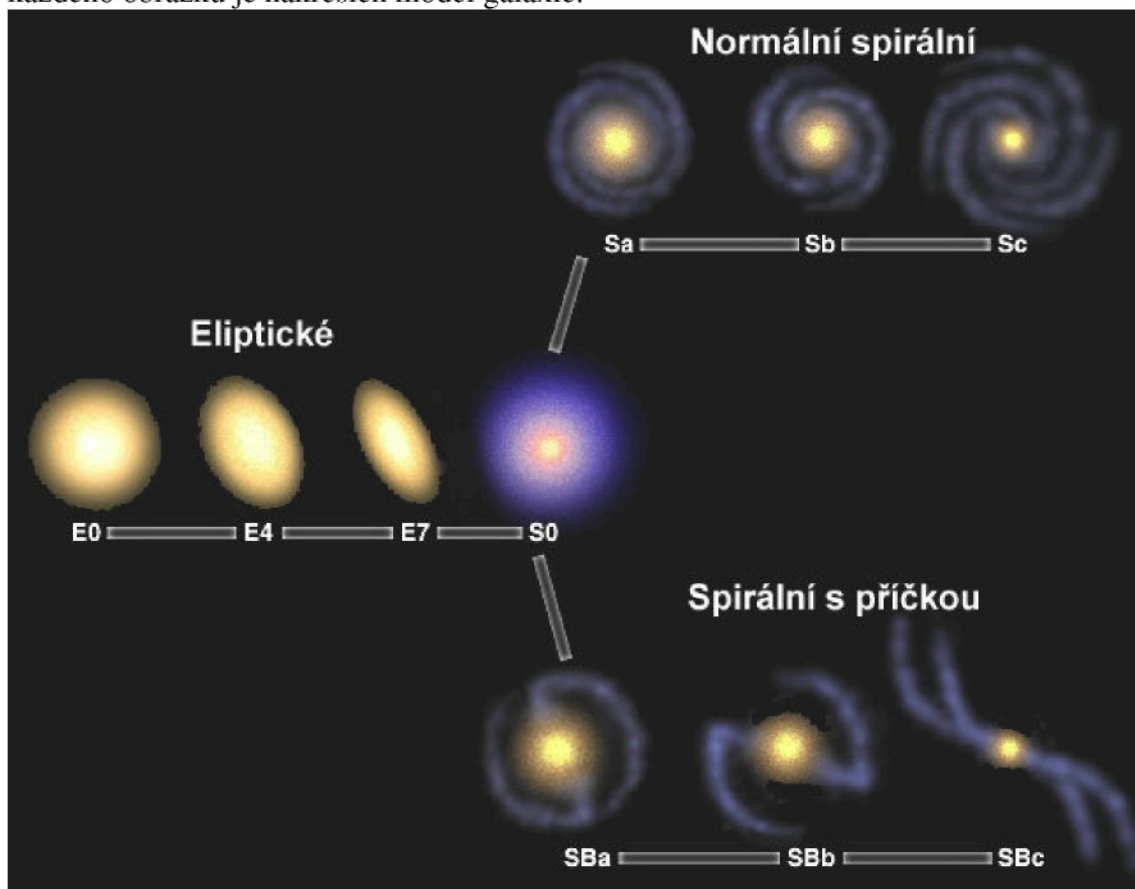
Vzhledem k tomu, že se ostatní galaxie jeví na obloze jako mlhavé obláčky, byly dlouho považovány za mlhoviny (ještě Hubble svou monografii o galaxiích nazval Říše mlhovin – The Realm of Nebulae). Hrubý odhad ukazuje, že se v pozorovaném vesmíru (do vzdálenosti 10 miliard světelných let) vyskytuje až 120 miliard galaxií.

Ted' když víme, že jiné galaxie existují, vyvstává otázka, jaké síly tyto galaxie vytvořily, jak galaxie žijí, jak umírají. S odpovědí na tyto a další otázky nám pomáhá technika, jako například Hubbleův vesmírný dalekohled HST (Hubble Space Telescope), pojmenovaný po Edwinu Hubbleovi. HST patří k nejvýznamnějším pomůckám při objevování hlubin vesmíru.

### 7.1 Klasifikace galaxií

Galaxií existuje hned několik typů, které se od sebe liší tvarem a velikostí. Klasifikační diagram typů galaxií sestavil Edwin Hubble a nazývá se Hubbleovo schéma nebo ladičkový diagram. Má tvar ladičky a v angličtině se odpovídajícím způsobem nazývá „tuning fork“. „Rukojeť“ ladičky odpovídá eliptickým galaxiím (E), očíslovaným podle stupně zploštění. Obě ramena ladičky odpovídají spirálními galaxiím (S) a spirálními galaxiím s příčkou (SB), označených písmeny a, b nebo c podle velikosti spirálních ramen nebo disku vzhledem k centrální výduti.

Obrázek č. 40 – Hubbleovo schéma. Na obrázku jsou zobrazeny typy galaxií a u každého obrázku je nakreslen model galaxie.



### 7.1.1 Spirální galaxie a spirální galaxie s příčkou

Spirální galaxie mohou dosahovat velikosti od 9 000 až do 60 000 parseků. Množství jejich členů ve vesmíru se pak pohybuje řádově kolem miliard až stamiliard.

Pro spirální galaxie je typická středová oblast čočkovitého tvaru, z které vycházejí jednotlivá ramena. Středová oblast obsahuje hvězdy starší, především červené obry a veleobry, podobně jako u galaxií eliptických. Spirální ramena naopak obsahují hvězdy mladé, vznikající, množství mezihvězdného prachu, plynu, otevřených hvězdokup a mlhovin.

Spirální galaxie typu Sa má mohutnou středovou oblast a ramena jsou k ní těsně přivínuta. Galaxie typu Sc mají středovou oblast poměrně malou a ramena jsou široce rozevřená. Galaxie typu Sb jsou jakýmsi přechodovým typem mezi Sa a Sc.

Zvláštním typem spirálních galaxií jsou spirální galaxie s příčkou. Tyto galaxie mají jen dvě ramena (na rozdíl od spirálních galaxií bez příčky, které mohou obsahovat ramen několik), která jsou přes střed galaxie spojena příčkou.

Většina pozorovaných spirálních galaxií má více než dvě ramena. Tato ramena se vyskytují spíše ve vnější části galaxie, to jest po obvodu, kdežto v blízkosti středu galaxie jsou viditelná ramena pouze dvě. U některých galaxií nemusí být spirální struktura ramen zřetelně čitelná.

Kromě tohoto plochého podsystemu existuje ještě kulový. Je složen ze starých hvězd řídce se vyskytujících v prostoru. Patří k němu ale i kulové hvězdokupy.

### 7.1.2 Eliptické galaxie

Eliptické galaxie jsou hvězdné systémy, kde hvězdy jsou symetricky rozloženy a jejich hustota rovnoměrně ubývá od středu k okraji. Hvězdy v eliptických galaxiích patří do skupiny starších hvězd (červení obři a veleobři), které již pohltily veškerý okolní mezihvězdný prach a plyn a proto v eliptických galaxiích nemohou vznikat nové hvězdy. Díky tomu se okrajové části eliptických galaxií stávají částečně průhledné a v některých případech lze pozorovat objekty v jejich pozadí.

Obří eliptické galaxie patří mezi největší galaxie, které známe. Skupina těchto galaxií není však příliš početná. Obří eliptické galaxie obsahují až několik biliónů hvězd a jejich průměr může být až 75 000 parseků.

Protějškem obřích galaxií jsou trpasličí eliptické galaxie. Jejich průměr je jen něco málo přes 1 500 parseků a počet členů (hvězd) čítá „pouze“ několik miliónů.

## 7.2 Vzdálenosti galaxií

Edwin Hubble potvrdil existenci galaxií tím, že v tehdy uvedených „mlhovinách“ rozlišil jednotlivé hvězdy. Mezi těmito hvězdami byly i tzv. cefeidy známé z naší galaxie. Tento druh hvězd je významnou pomůckou pro určování vzdáleností. Perioda jejich zjasňování a pohasínání je závislá na jejich zářivém výkonu. Hvězda má větší zářivý výkon pokud má větší poloměr a tím pádem i povrch. U větších hvězd jsou pak pulsy delší. Vzhledem k tomu, že periodu mezi pulsy je možné velmi snadno měřit, pak lze určit i zářivý výkon a absolutní hvězdnou velikost cefeidy. Ze známé absolutní hvězdné velikosti  $M$  a pozorované hvězdné velikosti  $m$  lze vypočítat vzdálenost hvězdy  $r$  v parsecích podle vztahu  $M - m = 5 - 5 \cdot \log r$ .

Určování vzdáleností pomocí cefeid je možné do vzdálenosti několika megaparseků. Ve vzdálenějších galaxiích je už těžké tyto cefeidy rozlišit.

Pokud je známá vzdálenost galaxií, lze si udělat představu o jejich uspořádání ve vesmírném prostoru. Jestliže si vytvoříme model, ve kterém zmenšíme galaxie na velikost mincí, byly by střední vzdálenosti mezi sousedními galaxiemi necelý metr, ale rozmístění nebude zcela pravidelné. Mezi některými galaxiemi by byla vzdálenost několik decimetrů a jinde by vznikala prázdná místa o průměru stovek metrů.

Stejně jako hvězdy mohou existovat ve hvězdokupách, tak i galaxie se srocuji do gravitačně vázaných systémů, které se nazývají **skupiny**, **kupy galaxií** a **nadkupy galaxií**. Naše Galaxie se řadí do skupiny, která čítá ještě asi dalších 30 galaxií. Nejbližšími galaxiemi jsou Velký a Malý Magellanův oblak. Jejich vzdálenosti od nás jsou přibližně 55 kpc, průměry 6 kpc a 3 kpc. Jsou jakýmsi satelity Galaxie.

Skupiny obsahují „pouze“ několik desítek galaxií, kupy galaxií jich obsahují tisíce a nadkupy statisíce.

Ani nadkupy o velikosti kolem 50 Mpc však nejsou rozmístěny v celém vesmíru rovnoměrně. Ukazuje se, že vesmír se skládá z jakýchsi obrovských prázdných buněk, jejichž stěny jsou tvořeny nadkupami. Odhaduje se, že nadkupy zabírají pouze asi 10 % objemu vesmíru a zbytek jsou obrovská prázdná místa o průměru stovek Mpc.

Přesto se zdá, že na škále tisíců Mpc je vesmír přibližně homogenní. To znamená, že každá krychle o hraně 1 000 Mpc obsahuje zhruba stejné množství látky.

### 7.3 Hubbleův zákon

Edwin Hubble jako první určil skutečné vzdálenosti galaxií a mimo to také jejich rychlosti pohybu pomocí Dopplerova jevu. Zjistil, že čím jsou galaxie vzdálenější, tím se pohybují od nás rychleji. V jejich spektru se to projevuje tím, že všechny spektrální čáry jsou posunuty směrem ke spektru červené barvy. Jedná se tedy o rudý posuv.

Hubble zjistil, že rychlost vzdalování galaxií  $v$  je zhruba přímo úměrná jejich vzdálenosti  $r$ . Platí tedy vztah, který se nazývá Hubbleův zákon a zapisuje se ve tvaru

$$v = H \cdot r ,$$

kde  $H$  je **Hubbleova konstanta**. Jednotka je  $\text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ . K určení této konstanty je zapotřebí znát vzdálenosti galaxií a rychlosti, kterými se od nás vzdalují. Obtížným se stává určování vzdáleností, které je málo spolehlivé. Od Hubbleova objevu se odhad vzdáleností galaxií několikrát opravoval a tak se opravovala i tato konstanta. Vzhledem k různým metodám odhadování vzdáleností se hodnoty Hubbleovy konstanty pohybují v rozmezí od  $50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$  do  $100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ . Dnes se zdá  $H \approx 70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ .

Z Hubbleova zákona tedy vyplývá, že ve vzdálenosti 1 Mpc se galaxie od nás vzdalují průměrnou rychlostí  $50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Podle jiných způsobů odhadu vzdáleností to může být rychlost až  $100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Přesněji se dá Hubbleův zákon uvést ve tvaru  $z = H \cdot r$ , kde  $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ .

### 7.4 Kvasary a gravitační čočka

Roku 1960 byla pozorována ve vesmíru slabá namodralá hvězdička, která byla zdrojem rádiových vln. Její viditelné spektrum nejdříve bylo považováno za zvláštní a nepochopitelné. Později se ukázalo, že se jedná o normální spektrum s velkým rudým posuvem, ze kterého se dalo spočítat, že rychlost vzdalování této „hvězdy“ je  $0,15 c$ , kde  $c$  je rychlost světla. Pro srovnání, blízké kupy galaxií se vzdalují přibližně 50krát pomaleji.

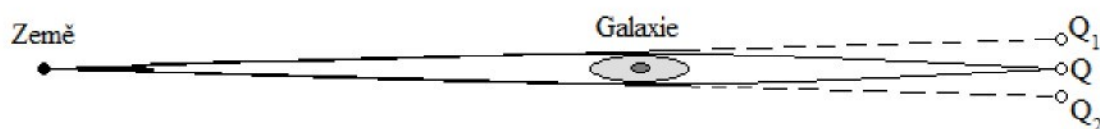
Tento objekt dostal název **kvasar** a je to zkratka z anglického „quasi-stellar source“, což v překladu znamená „hvězdě podobný zdroj“. Kvasarů bylo časem objeveno více.

Podle Hubbleova zákona by to musely být nejvzdálenější známé objekty ve vesmíru. Vzhledem k jejich vzdálenosti mají kvasary neuvěřitelný zářivý výkon a absolutní hvězdnou velikost. Kvasar je daleko menší než galaxie, ale dosahuje výkonu jako tisíce galaxií. Zatímco galaxie se jeví na obloze jako malé mlhoviny, kvasar vypadá jako bod.

Také se ukázalo, že většina kvasarů tvoří jádra galaxií, to znamená, že okolo nich byla objevena slabá galaxie se stejným rudým posuvem. Mimo to se obraz některých kvasarů jevil zdvojený „**gravitační čočkou**“.

Obrázek č. 41 - gravitační čočka.





Na obrázku 41 je vidět gravitační ohyb světla, kdy gravitační pole galaxie zakřivuje dráhu světla, které k nám přichází od vzdáleného kvasaru Q. Proto vidíme obraz kvasaru na obloze dvakrát, obraz  $Q_1$  a  $Q_2$ . Obrazů může být i více. Podstatné je, že je gravitační čočkou zesílena jasnost (svít) a lze tak vidět i velmi slabý zdroj.

Nesmírná energie, která vzniká v kvazarech, je pravděpodobně způsobena tím, že kvazar obsahuje černou díru o hmotnosti stamilionů až miliard hmotností Slunce. Do této černé díry padá velké množství hmoty a před tím, než je hmota pohlcena, vyžáří část energie, která se při pádu do černé díry uvolňuje.

## 7.5 Naše galaxie

Jak už bylo řečeno, naši Galaxii můžeme pozorovat na obloze jako stříbřitě mlhavý pás na obloze, který se nazývá Mléčná dráha. Tento pás obepíná celou oblohu. Klene se od souhvězdí Štíra nahoru přes Orla, Labuť, Kassiopei až do zimního souhvězdí Jednorozce. Potom klesá pod obzor, prochází Plachtami, Jižním křížem, Kentaurem, Střelcem až do Štíra. V rovníkových oblastech, odkud je vidět téměř celá obloha, ji lidé nazývají *Nebeský pás*, *Zářící pás* či *Mléčný kruh*, jinde dostala jméno *Nebeská řeka* či *Stříbrná řeka*. Nikdo ale neznal její podstatu. Teprve výzkumy ve 20. století ukázaly, že Mléčná dráha je naše Galaxie (dále jen Galaxie) viděná od jedné z jejích hvězd. Naše sluneční soustava se nachází blízko roviny souměrnosti disku Galaxie, takže Mléčná dráha rozděluje oblohu na dvě stejné poloviny.

Galaxie je domovem naší sluneční soustavy, stejně jako více než 200 miliard dalších hvězd a jejich planet, tisíců hvězdokup a mlhovin. Jedná se o spirální galaxii s centrální příčkou a radiálními rameny, které začínají ve středu a vytváří spirálovitý tvar. Slunce a tím i naše sluneční soustava se otáčí kolem středu Galaxie (galaktického středu) rychlostí 220 km/s, přičemž jeden oběh trvá přibližně 200 milionů let. Pravděpodobně Slunce a sluneční soustava obíhá kolem středu Galaxie konstantní rychlostí. Za svoji existenci tak vykonalo zhruba 25 oběhů kolem středu Galaxie.

Naše Galaxie je obrovská. Její hmotnost včetně korony je  $6 \cdot 10^{12}$  hmotností Slunce a její průměr včetně galaktické korony je téměř 200 kpc. Rozměr galaktického disku je asi 25 kpc. Radioastronomové zkoumali rozložení vodíkových mračen a na základě tohoto měření usuzují, že se jedná o spirální galaxii s příčkou Hubbleova typu SBc. Stoupající počet výzkumů podává důkazy, které svědčí o tom, že Galaxie vypadá podobně jako galaxie M61 nebo M83.

Pozorování Galaxie ve viditelném světle není možné zjistit mnoho detailů o uspořádání látky v galaktickém disku. Galaxie mimo jiné obsahuje dost mezihvězdného prachu, který znemožňuje průchod viditelnému světlu. Pro pozorování Galaxie jsou vhodnější radiové vlny, pro které je mezihvězdný prach „průhledný“. Délky radiových vln jsou totiž větší než velikosti zrníček mezihvězdného prachu.

**Spirální ramena** naší Galaxie obsahují mezihvězdnou hmotu, difúzní mlhoviny, mladé hvězdy a otevřené hvězdokupy, které byly vytvořeny z tohoto materiálu. Ve spirálních ramenech je větší hustota hmoty než mezi nimi a v důsledku toho zde stále vznikají nové hvězdy. Velice jasné a hmotné hvězdy, které zde vzniknou, mají krátkou

dobu života, řádově miliony let, a proto nestačí opustit spirální rameno, ve kterém vzniknou. Naopak hvězdy, jako je naše Slunce, které žijí několik miliard let, se mohou při oběhu kolem galaktického jádra přemístit mimo spirální rameno.

Naproti tomu **výdut' v jejím středu** a obecně kulový podsystém obsahují staré hvězdy a kulové hvězdokupy.

Naše **sluneční soustava** se nachází ve vnějších oblastech Galaxie, zhruba 15 pc (50,5 ly) nad rovinou galaktického disku, ale 8,5 kpc (26 400 ly) od galaktického středu. Slunce leží v jednom menším spirálním ramenu zvaného Orion, asi ve dvou třetinách od středu. Toto rameno se nachází mezi ramenem Střelce a Persea. V místě, kde se nachází Slunce, je tloušťka diskové části Galaxie „pouze“ asi 3 000 světelných let. Poměrem tloušťky a průměru se podobá hudebnímu CD.

**Středová oblast** naší Galaxie je intenzivním zdrojem radiových vln, infračerveného a rentgenového záření. V srdci Galaxie je temný zdroj nesmírné energie. Zář jako sto milionů Sluncí, ale svou velikostí by se vešel do oběžné dráhy Jupitera. Jeho celková hmotnost je přibližně milion hmotností Slunce. Tato hmota je černá díra „pohlcující“ mezihvězdný plyn a prach, který si přitahuje z prstence kupícího se kolem ní. Tato hmota, než je pohlcena, vyzáří část energie, která se pádem do černé díry uvolňuje.

Jak bylo řečeno, Galaxie obsahuje mimo jiné také hvězdokupy, které jsou rozloženy nejen přímo v Galaktickém disku a ve výduti, ale také v pomyslné kouli, ve které je celá Galaxie. Tato pomyslná koule se nazývá **galaktické halo** a její průměr je přibližně 30 kpc. Do tohoto hala patří také některé hvězdy a oblaka velmi řídkého, ale přitom horkého plynu. Všechny tyto objekty obíhají střed galaxie velkou rychlostí po eliptických drahách s velkou excentricitou, které mají velký sklon ke galaktickému disku. Naproti tomu objekty, které leží přímo v disku, se pohybují pomaleji kolem středu Galaxie po téměř kruhových drahách.

Jak již bylo uvedeno nejbližšími galaxiemi jsou Velký a Malý Magellanův oblak. Jejich vzdálenosti od nás jsou přibližně 55 kpc, průměry 6 kpc a 3 kpc. Tvoří jakési satelity Galaxie.

## 7.6 Hvězdné mlhoviny

V prostoru mezi hvězdami se nachází množství mezihvězdné látky, která se skládá z prachu a plynu. Největší hustota mezihvězdné látky je v rovině galaktického disku, kde není látka rozložena rovnoměrně. Zde se mezihvězdná látka shlukuje do oblaků, které se nazývají hvězdné mlhoviny. Označují se takto mlhavé objekty, které září vlastním světlem, a objekty, které samy nezáří a jsou vidět díky jasnému pozadí nebo rozptylu záření z jiného zdroje. Jako mlhoviny jsou také označovány objekty, které mají charakter mlhoviny nejen ve viditelném světle, ale i v jiných částech spektra. Do 19. stol. byly za mlhoviny považovány například i galaxie a další objekty, které nebylo možno přesně odlišit od hvězd. Tyto omyly odhalilo až použití prvních spektroskopů, které pomohly objevit zprvu záhadné nebulární spektrální čáry. Následně byly nalezeny i mlhoviny vně naší Galaxie.

Poměr prachu a plynu v mlhovinách není vždy stejný a podle toho se mlhoviny také mnohdy rozdělují. Hmotnost oblaků je asi jedna desetina hmotnosti zářících hvězd v galaxii. Prachovou složku tvoří prachové částice a plynnou molekuly, atomy a elementární částice. Prachová složka je kombinací uhlíku a křemičitanů, které mohou

být obaleny ledem nebo nečistotami. Prachové částice vznikají převážně v atmosférách obřích hvězd, které jsou bohaté na páry uhlíku, a z nich vznikají amorfni uhlíkové částice, které jsou velké asi jako saze z cigaretového kouře. Do prostoru se z atmosféry hvězdy dostávají tlakem záření hvězdy, které je může dostat z atmosféry hvězdy díky jejich malým rozměrům. Plynová složka je tvořena tak, že na 1 000 atomů vodíku připadá 80 atomů hélia a 1 atom těžšího prvku, což přibližně odpovídá složení průměrných hvězd. Mlhoviny se často nacházejí v blízkosti horkých hvězd a díky tomu, že je jejich plynná složka tvořena převážně vodíkem, tak tato horká hvězda vodík ionizuje. To způsobuje záření mlhovin.

Mlhoviny je možné rozlišovat podle nejrůznějších hledisek. Následující dělení patří mezi nejpoužívanější a dělí mlhoviny podle typu pozorovaného spektra na jasné a temné mlhoviny.

**Jasné mlhoviny** se dále dělí na:

- **mlhoviny emisní** (plynné). Jejich záření způsobuje zahřátý plyn. Tyto mlhoviny pak dále rozdělujeme na **planetární mlhoviny** (mlhoviny s bílým trpaslíkem v centru, který tuto mlhovinu ionizuje), **zbytky supernov** (zbytky po výbuchu supernovy) a **oblasti HII** (oblasti, které jsou z velké části tvořeny ionizovaným vodíkem).
- **mlhoviny reflexní** (prachové), kde záření je způsobené rozptylem světla blízké hvězdy na prachových částicích mlhoviny.

**Temné mlhoviny** jsou oblaky nesvítícího prachu a plynu a jsou vidět jen díky zářícímu pozadí, kterým může být například jiná mlhovina či hvězda.<sup>4</sup>

## 7.7 Hvězdokupy

Hvězdokupy jsou soustavy hvězd, které spolu fyzikálně souvisí. Mají společný původ a řadu vlastností, např. původní chemické složení, společný pohyb prostorem atd. Rozlišují se dva druhy hvězdokup.

**Kulové hvězdokupy** obsahují mimořádně vysoký počet hvězd (statisíce až miliony), které jsou ve větší blízkosti a zabírají přibližně kulový prostor, jehož průměr je obvykle 15 pc až 46 pc. Hvězdy jsou silně nahuštěny poblíž středu tohoto útvaru. Kulové hvězdokupy obsahují velmi staré hvězdy. Nacházejí se v halu naší Galaxie i jiných galaxií. Kompaktnost a velká celková hmotnost kulových hvězdokup je důvodem jejich značné stability trvající miliardy let. Existuje ovšem určitý pomalý a ustálený úbytek hvězd, zvláště těch s menšími hmotnostmi. Jestliže získají únikovou rychlost při vzájemných přiblíženích s jinými hvězdami, vyletí z hvězdokupy a odnesou s sebou část její energie. Jev úbytku hvězd se nazývá **vypařování hvězdokupy**. V naší Galaxii víme asi o 140 kulových hvězdokupách.

**Otevřené hvězdokupy** neobsahují takové množství hvězd jako kulové. Otevřená hvězdokupa může obsahovat několik desítek až několik tisíc hvězd. Jsou tvořeny mladými hvězdami a jejich střed není tak hustě zaplněn. Nacházejí se ve spirálních ramenech naší Galaxie v její centrální rovině nebo v blízkosti této roviny. Mají sklon k rozpadu nejen pouze v důsledku vypařování, ale také působením slapových interakcí s Galaxií jako celkem nebo v důsledku srážek s mezihvězdnými mračny. Jen ty nejbohatší otevřené hvězdokupy dosahují věku staršího než miliardu let, zatímco menší a nejmenší, k sobě těsně vázané, nepřežívají déle než miliony let.



## 8 KOSMOLOGIE

Kosmologie (z řeckého „kosmología“ - nauka o světě) je odvětvím, které se zabývá vesmírem jako celkem. Předmětem studia kosmologie je vznik, vývoj a budoucí osud vesmíru. Věnuje se jí astronomie, filozofie a teologie.<sup>2</sup>

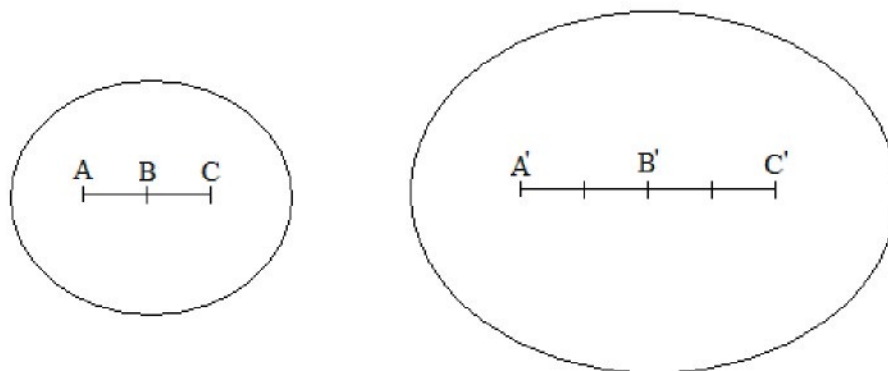
Významnou roli ve vzniku a vývoji vesmíru hraje **gravitační působení těles**. Newtonův gravitační zákon udává s velkou přesností velikost gravitačních sil působících mezi tělesy na Zemi, ve sluneční soustavě, v Galaxii i mezi blízkými galaxiemi. V kosmologii, tedy v té části astronomie, která se zabývá vznikem a vývojem vesmíru, se popisuje gravitační působení ještě přesněji pomocí **obecné teorie relativity**. Tuto teorii zformuloval Albert Einstein r. 1915. Při ne příliš velkých gravitačních polích dává tato teorie prakticky stejné výsledky jako Newtonova teorie. Ale při silném gravitačním působení, jaké je například v blízkosti neutronových hvězd nebo černých děr, dává výsledky jiné. Obecná teorie relativity je dnes všeobecně přijímána jako správná teorie gravitace.

Při řešení rovnic obecné teorie relativity pro celý vesmír se ukazuje, že vesmír nemůže být statický, ale že se musí buď rozpínat, nebo smršťovat. Až do Einsteinovy teorie byl vesmír považován za neměnný a věčný. Einsteinovu teorii potvrdil Hubble, kdy objevil vzdalování galaxií. Vesmír se tedy rozpíná.

Když se řekne, že se vesmír rozpíná směrem od naší Galaxie, někomu se naskytne myšlenka, že by naše Galaxie mohla být středem vesmíru. Tuto myšlenku lze snadno vyvrátit. Ve skutečnosti se tento efekt jeví stejně při pohledu z každé galaxie.

**Rozpínání vesmíru** je možné si představit na nafukovacím balonku, na jehož povrchu si uděláme tři tečky v jedné přímce a stejně od sebe vzdálené. Nafukuje-li se balonek, je možné vidět, jak se jednotlivé tečky od sebe navzájem vzdalují podle Hubbleova zákona. Čím větší vzdálenost, tím větší rychlost vzdalování.

Obrázek č. 42 – modelová situace rozpínání vesmíru při nafukování balonku.



Na obrázku 42 je vidět, jak se body na balonku při nafukování od sebe vzdalují. Vzdálenost  $|AB| = 1 \text{ cm}$  se za sekundu zvětší na  $|A'B'| = 2 \text{ cm}$ . Body A, B se tedy od sebe vzdalují rychlostí  $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Vzdálenost bodů  $|AC| = 2 \text{ cm}$  se ale zvětší na  $|A'C'| = 4 \text{ cm}$ . Body A, C se od sebe vzdalují rychlostí  $2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Každý bod se vzdaluje od všech ostatních. Pozorovatel umístěný v libovolném z těchto bodů by viděl, že všechny body se pohybují směrem od něj.<sup>1</sup>

## 8.1 Velký třesk

Pokud se galaxie od sebe vzdalují podle Hubbleova zákona, znamená to, že v minulosti byly blíže u sebe, než je tomu dnes. Dokonce musel existovat okamžik, kdy veškerá hmota vesmíru byla „namačkaná“ těsně u sebe. Okamžiku, kdy rozpínání vesmírné hmoty začalo, se říká velký třesk (anglicky big bang).

Velký třesk horké zkoncentrované hmoty nastal přibližně před 13,7 miliardami let. Všechny výpočty, teorie a fakta tomu alespoň svědčí a většina vědců považuje tuto teorii za prokázanou.

Teoreticky byla v okamžiku velkého třesku veškerá hmota vesmíru soustředěna v nulovém objemu, tzn., že hustota hmoty byla nekonečně velká. Tento stav se nazývá singularita. Velký třesk se skládá z několika fází, které následují rychle za sebou. Začíná singularitou s obrovitou hustotou a teplotou, v okamžiku, od kterého je definován čas ( $t = 0$ ). Podmínky byly tak výjimečné, že je není možné vystihnout žádnou fyzikální teorií. Tato éra skončila uplynutím elementárního časového úseku, Planckova času  $t = 10^{-43}$  s. Hovořit o čase před  $t = 0$  je bezpředmětné.

Tabulka č. 15 – éry vývoje vesmíru.

| Čas                  | Éra       | Vzniká                                        | Teplota [K] | Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^3$ ] |
|----------------------|-----------|-----------------------------------------------|-------------|----------------------------------------|
| $10^{-44}$ s         | kvantová  |                                               | $10^{33}$   | $10^{97}$                              |
| $10^{-23}$ s         |           |                                               |             |                                        |
|                      | hadronová | protony, neutrony                             | $10^{12}$   | $10^{17}$                              |
| $10^{-4}$ s          | leptonová | elektrony, neutrina                           |             |                                        |
| 10 s                 | záření    | reliktní záření                               | $10^{10}$   | $10^7$                                 |
| $10^5$ let           |           |                                               | 3 000       | $10^{-18}$                             |
| $10^6$ let           |           |                                               |             |                                        |
| $10^8$ let           | látky     | protogalaxie, galaxie a kvasary, naše Galaxie |             |                                        |
| $10^9$ let           |           |                                               | 30          | $10^{-23}$                             |
| $9\cdot 10^9$ let    |           | sluneční soustava                             |             |                                        |
| $10\cdot 10^9$ let   |           | život na Zemi                                 |             |                                        |
| $13\cdot 10^9$ let   |           | vícebuněčné organismy                         | 3           | $10^{-27}$                             |
| $13,5\cdot 10^9$ let |           | savci                                         |             |                                        |
| $13,7\cdot 10^9$ let |           | člověk                                        |             |                                        |

**Kvantová éra** je pravděpodobně charakteristická hromadným vznikem elementárních částic v silném gravitačním poli. Prostorčas je však velmi zakřivený, poloměr křivosti prostoročasu je menší než průměr hadronů, což jsou částice zprostředkovávající silnou interakci. Patří mezi ně například protony a neutrony. Také rozpínání prostoročasu je obrovské. Rychlostí větší než  $c$  se rozpínají oblasti srovnatelné s průměrem hadronů a vzdálenost k horizontu událostí má tedy nepatrné měřítko. Běžný fyzikální popis takové situace je nepoužitelný. Poměry se změní až při  $t = 10^{-23}$  s, kdy tato éra končí a začíná další éra.

V **hadronové éře** se uplatňuje především silná síla a vznikají hadrony. Spolu s hadrony hmoty vznikají i hadrony antihmoty a v hustém prostředí probíhá jejich anihilace, kdy částice hmoty a antihmoty se se stoprocentní účinností (podle Einsteinova vztahu  $E = m \cdot c^2$ ) mění v záření a jen asi desetimiliardtina zůstává jako zbytek, který nemohl anihilovat. Tímto zbytkem je hmota, z níž později vznikají galaxie, protogalaxie, hvězdy i všechny hmotné objekty budoucího vesmíru včetně lidí. Během hadronové éry klesá teplota z  $10^{33}$  na  $10^{12}$  K, hustota vesmíru z  $10^{97}$  na  $10^{17}$  kg.m<sup>-3</sup> a éra končí v čase  $t = 10^{-4}$  s.

Další, **leptonová éra** je typická vznikem a převahou leptonů. Jsou to částice interagující slabou silou, například neutrína, elektrony a pozitrony. Elektrony a pozitrony jakožto částice hmoty a antihmoty na konci této éry většinou anihilují, zatímco neutrína tehdy vzniklá přestávají reagovat s dalšími elementárními částicemi a nastupují cestu vesmírem, který dosud vyplňují až do dnešní doby tzv. reliktní neutrína. V této éře jsou početné i fotony, zatímco protony, neutrony a jim příbuzné částice, které přežily z hadronové éry, představují asi miliardtinu počtu leptonů a fotonů.

V této éře začínají vznikat z protonů a neutronů jádra těžkého vodíku <sup>2</sup>H, z vodíku jádra helia a možná i dalších těžších prvků. Jde o nukleární syntézu podobnou té, která dnes probíhá v nitru hvězd. V tehdejší vesmíru byly teploty a tlaky srovnatelné s poměry v jádrech hvězd. Tento proces vzniku jader těžších prvků pokračuje ještě v následující éře. Díky tomu obsahují nejstarší hvězdy a mezihvězdná látka 25 - 30 procent hmotnosti helia. V průběhu leptonové éry klesla teplota z  $10^{12}$  K na  $10^{10}$  K a hustota z  $10^{17}$  na  $10^7$  kg.m<sup>-3</sup>. Éra končí v čase  $t = 10$  s.

**Éra záření** je obdobím, kdy hustota hmoty ve formě záření převažuje nad hustotou látky. Dobíhá vznik jader helia, dosahuje dokonce svého maxima. Na konci éry záření za teplot kolem  $10^4$  K se spojují elektrony s protony a vytváří se neutrální vodík. Teplota v této éře klesá z  $10^{10}$  K na 3 000 K a hustota z  $10^7$  na  $10^{-17}$  kg.m<sup>-3</sup>. Rychleji však klesá hustota hmoty ve formě záření než hustota látky.

V **éře látky** se v čase  $t = 300\,000$  let (až 600 000 let, neví se přesně) obě hustoty vyrovnají a záření se odděluje od látky. Tím končí éra záření a začíná éra látky, která trvá dodnes. Záření, které se tehdy od látky oddělilo, mělo tepelný charakter a rozdělení energie ve spektru se zachovalo dodnes. Vlnová délka tohoto záření však rostla spolu s rozpínáním vesmíru. To znamená, že zároveň klesala jeho teplota. Dnes toto záření prolíná celý vesmír a pozorujeme ho, jako reliktní záření o teplotě 2,7 K. Éru látky charakterizuje vývoj stále složitějších struktur a objektů.

Když průměrná hustota látky ve vesmíru klesla na  $10^{-22}$  kg.m<sup>-3</sup>, počaly se jednotlivé shluky hmoty dále dělit na menší „kapičky“, zárodky galaxií. Průměrná hmotnost takovýchto „kapiček“ byla 500 miliard Sluncí. Zárodek se začal smršťovat, to vedlo k jeho zrychlené rotaci a následná odstředivá síla způsobila, že se kapka změnila ve

zploštělý disk. Uprostřed rotujícího disku se vytvořilo mohutné těleso o hmotnosti mnoha milionů Sluncí, jež se ovšem v důsledku vlastní gravitace zhroutilo v obří černou díru. Toto by mohlo být scénářem vzniku galaxií. V galaxiích se prakticky hned začaly tvořit hvězdy první generace, které obsahovaly pouze lehké prvky. Z výpočtů plyne, že byly velmi hmotné, a proto se vyvíjely rychle a brzo výbuchem supernovy dodaly materiál pro vznik další generace hvězd.

Nabízí se také otázka, co bylo před vznikem vesmíru? Před velkým třeskem neexistoval čas a neexistovala ani hmota. Proto tato otázka nemá smysl. Stejně vznikl i prostor. V dnes pozorovaném vesmíru nenajdeme bod, ze kterého se vesmír rozpíná, to znamená, že neexistuje střed vesmíru.

### 8.1.1 Reliktní záření

Existence reliktního záření byla předpovězena již v roce 1948 G. Gamowem, R. A. Alpherem a R. Hermannem. Podle jejich teorie byl vesmír krátce po svém vzniku velice hustý a horký a to znamená, že celý zářil. Teplota vesmíru se postupem času měnila. Vesmír se prudce rozpínal a v důsledku toho řídil a současně chladnul. Při rozpínání vesmíru v důsledku rudého posuvu se vlnové délky fotonů původního záření postupně prodlužovaly a také jejich hustota v prostoru klesla, takže dnes je toto záření pozorováno jako rádiové. Poprvé bylo zachyceno roku 1965 a jeho objevitelé Penzias a Wilson byli odměněni Nobelovou cenou.

Po zchladnutí vesmíru již žádné další reliktní záření nevznikalo a ani vznikat nebude. Při postupném rozpínání vesmíru hustota jednotlivých fotonů reliktního záření nezadržitelně klesá. Reliktní záření má hustotu asi  $500 \text{ fotonů/cm}^3$ , je to záření absolutně černého tělesa o teplotě  $2,7 \text{ K}$  a přichází k nám ze všech směrů se skoro stejnou intenzitou.

## 8.2 Budoucnost vesmíru

Co se týká otázky budoucnosti vesmíru, zněla by asi následovně. „Bude se vesmír neustále rozpínat dál?“ Další rozpínání vesmíru závisí na obsahu hmoty v něm a na rychlosti jeho rozpínání. Pokud je průměrná hustota hmoty ve vesmíru menší než určitá **kritická hustota**  $\rho_{krit.}$ , pak gravitační působení nestačí zastavit rozlétávající se galaxie a vesmír se bude rozpínat do nekonečna. Naopak, je-li průměrná hustota vyšší než tato kritická hustota, pak se rozpínání zastaví a začne smršťování vesmíru, které skončí velkým kolapsem. Tuto úvahu podporují jak Newtonovy teorie, tak i Einsteinova obecná teorie relativity.

Kritická hustota je závislá na tom, jaká je Hubbleova konstanta a lze ji vyjádřit vztahem

$$\rho_{krit.} = \frac{3 \cdot H^2}{8\pi \cdot G}.$$

Při hodnotě této konstanty  $H = 50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$  je  $\rho_{krit.} = 5 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Vezme-li se v úvahu veškerá hmota vesmíru, která je nám známá, pak dostaneme výsledek, že hustota současného vesmíru je 10krát menší než  $\rho_{krit.}$ . Nicméně víme, že většina hmoty je neviditelná. Zářící hmota je jen zlomek celkové hmoty vesmíru. Vzhledem k neprobádanosti vesmíru může tedy být jeho hustota podstatně větší. Proto zatím nelze

spolehlivě říci, zda se rozpínání vesmíru zastaví či ne. Spíš se zdá, že skutečná hustota bude právě na hraně, bude kritické hustotě velice blízko.

## 9 STRUČNÁ HISTORIE ASTRONOMIE

Odjakživa lidé pozorovali oblohu, z čehož pak vytvářeli různé teorie či výpočty. Dnes se například nikdo při pohledu na Slunce neptá, zda je tento zářící kotouč větší než Země a v jaké je vzdálenosti. Také každý ví, že Země je kulatá a není středem vesmíru. Tato a další fakta však nebyla vždy známa a tak se stávala cílem různých bádání a teorií, kvůli kterým se dokonce zavíralo do vězení či popravovalo. Důvodem byla většinou protichůdnost názorů s církevními teoriemi v době, kdy církev měla dominantní postavení. Některých významnými okamžiky historie astronomie a slavnými jmény v tomto oboru se zabývají následující řádky.

V 17. století před naším letopočtem (dále jen st. př. n. l.) si babylonští astronomové při dlouhodobých pozorováních souhvězdí, planet a Měsíce všimli některých pravidelností, které umožňovaly předpovídat zatmění Měsíce.

V 6. st. př. n. l. **Pýthagorás** tvrdil, že Země je koule a pravděpodobně znal i příčinu klimatických pásem Země. Je možné, že vycházel z pozorování řeckých námořníků, kteří si při svých cestách na sever a na jih všimli změn noční oblohy i rozdílnosti klimatu.

V 5. st. př. n. l. vysvětlil **Anaxagorás** měsíční fáze a zatmění. Dále tvrdil, že nebeská tělesa jsou stejné povahy jako Země a že mohou být obývány lidmi. Díky těmto tvrzením byl v Aténách obžalován z bezbožnosti a uvězněn.

**Aristarchos ze Samu** se ve 3. st. př. n. l. pokusil určit vzdálenost Slunce od Země. Odhadl, že v momentě první čtvrti Měsíce je úhel Slunce-Země-Měsíc přibližně  $87^\circ$  a úhel Země-Měsíc-Slunce přesně  $90^\circ$ . Z toho pak vypočítal, že Slunce je zhruba 19krát dál než Měsíc. Vzhledem k tomu, že Slunce a Měsíc vidíme přibližně stejně velké, pak průměr Slunce by byl 19krát větší než skutečný průměr Měsíce. Podle velikosti zemského stínu při zatmění Měsíce dále Aristarchos odhadl, že Země je asi dvakrát větší než Měsíc. Z toho určil, že Slunce je větší než Země. V této době panoval názor, že Slunce obíhá kolem Země. Vzhledem ke své teorii, že Slunce je mnohem větší než Země, Aristarchos usoudil, že Země obíhá kolem Slunce a navíc se otáčí kolem vlastní osy. Také předpokládal, že ostatní hvězdy jsou o mnoho dále než Slunce, což soudil z neměnnosti polohy hvězd na obloze. I přesto, že se jeho číselné hodnoty lišily, byl prvním člověkem, který měl správnou představu o vesmíru. Tato představa byla ale zapomenuta a objevila se až v 18. století našeho letopočtu (dále jen st. n. l.) u Koperníkových teorií.

Ve 2. st. př. n. l. se stal **Hipparchos z Níkaie** předchůdcem moderních astronomů a to svým pečlivým pozorováním a měřením. Velmi důležité byly také jeho objevy v trigonometrii. Sestavil jako první tabulku sinů. Rozdíl mezi ním a ostatními starověkými astronomy byl ten, že Hipparchos nevymýšlel spekulativní teorie, ale snažil se co nejlépe vysvětlit pozorované polohy planet. Byl zakladatelem teorie epicyklů, která toto do značné míry umožňovala. Také objevil precesi.

**Klaudios Ptolemaios** ve 2. st. n. l. završil období starověké astronomie svým dílem **Almagest**, které zůstalo na následujících čtrnáct století základní příručkou oboru. V mnohém toto dílo vychází z Hipparchosovi teorie epicyklů, o kterých je také nejvýznamnější část Almagestu. Je to první systematický popis pohybu planet umožňující výpočet jejich polohy na obloze na dlouhou dobu dopředu a zpět v čase.

Ptolemaiova teorie pohybu planet byla vysvětlována pomocí složité soustavy kružnic, podle které se měly pohyby planet řídit. Dále Almagest obsahoval katalog 1022 hvězd, tabulku tětív a pojednání o trigonometrii. Ptolemaios také studoval lom světla a vynalezl nové astronomické přístroje. Po něm následuje dlouhé období stagnace bez významných přínosů na poli astronomie.

Až v roce 1543 publikoval polský astronom **Mikuláš Koperník** své celoživotní dílo s názvem **O oběhu nebeských sfér**. V tomto díle Koperník prosazoval teorii o tom, že Slunce je středem sluneční soustavy a Země obíhá okolo něj, otáčí se kolem své osy a ta má precesi. Aristarchos předložil svůj heliocentrický systém jen kvalitativně. Koperník již musel vysvětlit polohy Slunce a planet s přesností 10', jinak by se jeho teorie rozcházel s pozorováním. V astronomii bylo obvyklé popisovat dráhy planet kružnicemi. Toto předpokládal i Koperník a tím se dostal do potíží. Při vynechání epicyklů jeho teorie nepopisovala pohyb planet lépe než ptolemaiova.

V letech 1546 – 1601 žil nejlepší astronomický pozorovatel své doby, dánský šlechtic **Tycho Brahe**. Díky velmi přesným přístrojům (v podstatě úhloměřům), které navrhl, zkonstruoval a používal na své observatoři v Dánsku a později v Čechách, měřil polohy planet na obloze a dosahoval výsledků s vynikající přesností okolo 0,5'. V té době ještě neznal dalekohled a své přístroje zaměřoval pouhým okem. Během svého života shromáždil veliké množství přesných údajů o polohách planet, Měsíce a Slunce. Na základě těchto údajů pak Johannes Kepler objevil své tři zákony. Brahe nepřijal Koperníkovu teorii, protože nepozoroval roční paralaxu, která z ní vyplývala. Brahe měl teorii, kde Slunce obíhá kolem Země, ale ostatní planety obíhají kolem Slunce. Vzájemné polohy těles byly ale stejné jako u Koperníka.

Další významnou osobností v oblasti astronomie byl **Giordano Bruno**, původně dominikánský mnich a poté učitel na různých univerzitách. Žil v letech 1547 – 1600 a dovedl Koperníkovu teorii ještě dále. Podle jeho názorů, které byly spíše spekulací bez důkazů, nebylo ani Slunce středem vesmíru. Považoval vesmír za nekonečný, kde existovalo nekonečně mnoho Sluncí se svými planetami, a každá taková planeta byl světem, jaký je ten náš. Za tyto názory, ale hlavně za své názory filosofické, byl v roce 1593 v Itálii vězněn a souzen za kacířství. Po sedmi letech věznění byl v Římě upálen.

**Galileo Galilei** byl italský matematik, fyzik a astronom, který se stal jedním ze zakladatelů moderní mechaniky. Jako první pozoroval oblohu dalekohledem a učinil řadu významných objevů, mezi které patří Jupiterovy měsíce, fáze Venuše, krátery a stíny Měsíce. Pozorováním fází Venuše definitivně určil, že obíhá kolem Slunce. Do doby Galileia byl Měsíc považován za dokonalou křišťálovou kouli. Dále zjistil, že Mléčná dráha se skládá z množství slabých hvězd.

Díky Galileovým objevům se během poměrně krátké doby radikálně změnil všeobecně přijímaný model vesmíru. Galileo se stal zastáncem Koperníkova heliocentrického systému. Kvůli těmto názorům byl vyšetřován inkvizicí a pod hrozbou přísných trestů donucen odvolat svůj heliocentrický názor.

V roce 1609 bylo **Johannesem Keplerem** publikováno dílo **Astronomia nova**, ve kterém popisoval své první dva zákony o pohybu planet. První Keplerův zákon vyvrátil teorii, že pohyb planet je zapotřebí popisovat pomocí kružnic. V roce 1619 Kepler publikoval svůj třetí zákon. Byl také vynálezcem dalekohledu, který byl vhodnější pro astronomická pozorování než Galileův.

Kepler byl objevitel slunečních skvrn, prostudoval a perfektně zjistil jak funguje lidské oko a také prozkoumal krystalickou strukturu sněhové vločky.

Rok 1665 byl významný tím, že **Isaac Newton** uskutečnil řadu objevů, které znamenaly revoluci na půdě matematiky, fyziky a astronomie. Mezi tyto objevy patří především diferenciální a integrální počet, matematický aparát, který je mimo jiné nezbytný pro výpočet pohybu planet. Dále přišel Newton na to, že gravitace působící na těleso na povrchu Země, působí i na Měsíc a stejně tak působí i Slunce na planety. Newton zobecnil zákony mechanického pohybu, na které přišel při svých pokusech Galileo, a formuloval své tři pohybové zákony. Také odvodil z 3. Keplerova zákona, že gravitační síla klesá s druhou mocninou vzdálenosti. Podle toho formuloval svůj zákon gravitace. Díky Newtonovým objevům lze spočítat pohyby libovolných těles v gravitačním poli a to od pozemských těles přes planety a hvězdy až ke galaxiím.

Dánský astronom **Olaf Römer** si roku 1676 všiml, že Jupiterovy měsíce zdánlivě obíhají rychleji, když se Jupiter přibližuje k Zemi a naopak pomaleji, pokud se vzdaluje. Tento jev vysvětlil konečnou rychlostí světla, kterou také přibližně určil.

V 18. a 19. st. se neuskutečnily žádné dramatické převraty v astronomii. Matematici Laplace, Lagrange, Hamilton, Gauss, Bessel a další vypracovali důmyslné matematické metody, díky kterým bylo možné přesně vypočítat dráhy planet podle Newtonových zákonů.

Astronomové, kteří se zabývali pozorováním, proměřovali polohy tisíců hvězd. Byly objeveny planety Uran a Neptun a také první planetky. Neustále se zpřesňovaly a zdokonalovaly pozorovací přístroje a metody. Docházelo také k zpřesňování měření vzdáleností ve sluneční soustavě.

V roce 1814 pozoroval **Joseph Fraunhofer** spektrální čáry ve spektru Slunce a hvězd. Zavedl tak do astronomického výzkumu spektroskopii, která je dnes jednou z nejdůležitějších astronomických metod.

Roku 1838 změřil **Friedrich Wilhelm Bessel** první paralaxu hvězdy. Tím byl získán první spolehlivý údaj o vzdálenosti hvězd a teprve tehdy byl definitivně potvrzen **heliocentrismus**.

20. století bylo další velkou revolucí ve fyzice. V letech 1900 – 1925 vznikala **kvantová mechanika**, na jejímž vypracování mají velký podíl **Albert Einstein**, **Max Planck**, **Niels Bohr**, **Werner Heisenberg**, **Ervin Schrödinger**, **P. A. M. Dirac** a další.

V letech 1905 – 1915 vznikla **speciální a obecná teorie relativity**, která je z největší části dílem Alberta Einsteina. Obě tyto teorie mají mimořádný význam pro astronomii.

V roce 1924 **Edvin Hubble** rozlišil hvězdy v blízké galaxii, určil tím její vzdálenost a dokázal, že jde o galaxii podobnou té naší. Zanedlouho objevil přímou úměrnost mezi vzdáleností galaxií a rychlostí jejich vzdalování, což formuloval v Hubbleově zákonu.

Roku 1990 byl vypuštěn na oběžnou dráhu Země **Hubbleův vesmírný dalekohled** (anglicky Hubble Space Telescope, zkratka HST). Tento dalekohled má hmotnost 11,6 tuny, délku 13,2 metru a maximální průměr 4,2 metru, zrcadlo teleskopu pak má průměr 2,4 metru. Hubbleův teleskop je vybaven kamerami a spektrometry, umožňujícími pozorování ve viditelném světle a také v infračervené a ultrafialové oblasti elektromagnetického spektra. Pro vesmírná pozorování má veliký význam.

Budoucnost HST je však v současnosti nejistá. Poslední servisní mise k němu byla zrušena. Na nátlak vědecké komunity, zejména astronomů, NASA počátkem roku 2006 předběžně znovu zařadila další servisní misi do plánu letů raketoplánů, a to na počátek roku 2008. V současnosti (duben 2008) je start mise STS-125 předběžně naplánován na 28. srpna tohoto roku.



Pokud k servisní misi nedojde, postupně by selhaly stabilizační setrvačníky a fotovoltaické články a do konce desetiletí by dalekohled přestal pracovat. Ve vzdálenější budoucnosti by pak zanikl v hustých vrstvách zemské atmosféry.

Dalším velkým kosmickým dalekohledem, určeným pro zkoumání vesmíru „pouze“ v infračervené oblasti spektra, je **Vesmírný dalekohled Jamese Webba** (anglicky James Webb Space Telescope, zkratka JWST). Má být vypuštěn po roce 2013.

## 10 ZÁVĚR

Jak bylo uvedeno v úvodu do obecné problematiky integrované výuky, zbývá uveřejnit možnosti využití tématu astronomie a astrofyziky v integrované výuce.

Výuka astrofyziky byla vyškrtána v rámcovém vzdělávacím programu pro gymnázia (dále jen RVPG) z předmětu fyzika. Samozřejmě každá škola vytváří svůj školní vzdělávací program, který může být širší obsahem než RVPG a může se tím pádem nabízet i více možností využití astronomie a astrofyziky v integrované výuce.

I při omezení na témata RVPG lze nalézt poměrně dost oblastí, která souvisí s astronomií či astrofyzikou.

Astronomii a astrofyziku lze prezentovat a uvádět souvislosti při výuce jednotlivých částí oborů fyziky, jako je mechanika, elektřina a magnetismus, optika, jaderná fyzika atd.

V geografii lze uplatnit poznatky z astronomie a astrofyziky v tématu „země jako vesmírné těleso“, kde se popisuje celá sluneční soustava a její místo ve vesmíru. Dále také v tématu „životní prostředí“.

Geologie obsahuje témata „zemské sféry“ a „geologická historie Země“.

Předmět biologie nabízí využití v tématech „vznik a vývoj Země a živých soustav na Zemi“ a také uvedení skleníkového jevu v tématu „biosféra člověka“.

Při řešení některých příkladů z astronomie a astrofyziky se používají matematické obory, především geometrie. Proto lze v předmětu matematika uvádět příklady z astronomie a astrofyziky, při kterých student používá jako nástroj matematiku.

Též s předmětem chemie lze integrovat dané téma. Například při výuce chemických prvků, periodické tabulky nebo vzniku jednotlivých prvků ve vesmíru, ve hvězdách. Dále při výuce organických sloučenin, které jsou základem života a jsou obsaženy ve vesmíru a to ne jen na Zemi.

V občanském a společenském základu lze uplatnit opět poznatky například o skleníkovém jevu v tématu „globální problémy“ nebo poznatky z kosmologie při výuce filosofie.

Též historie astronomie a astrofyziky nalezne své uplatnění například v předmětu dějepis i filosofie.

Další možností integrované výuky je projektové vyučování, kde vhodně zvolenými projekty lze využít oblasti astronomie a astrofyziky ve spojení s poznatkami z jiného předmětu či předmětů. Navíc lze studentům může být zadáno do projektu využití některých metod či dovedností nespojujících s oborem astronomie a astrofyziky. Jedná se právě například prezentace výsledků pomocí programu PowerPoint, kdy student používá dovednosti a poznatky získané v předmětu informatika. Při sestavování prezentace a při samotné prezentaci využívá komunikační a mluvnické dovednosti získané v předmětu český jazyk.

Popřípadě lze zadat vytvoření internetových stránek s tematikou určitou tematikou astronomie a astrofyziky.

Další možností je překládání článku z cizích jazyků s astronomickou tematikou.

Témata pro projektovou výuku mohou být například:

- Předpověď počasí podle sluneční aktivity
- Určování času pomocí polohy a stínu tyče (sluneční hodiny)
- Organické sloučeniny ve vesmíru aneb možnost života mimo naši planetu
- Tání ledovců a globální oteplování

- Pozorování fází Měsíce
- Pozorování zatmění Slunce a Měsíce

Možnost využití astronomie a astrofyziky je poměrně široké. Záleží už „pouze“ na snaze jednotlivých učitelů učitelských sbor vystoupit alespoň částečně z tradičního pojetí výuky a společně hledat cesty k metodám jakými je integrovaná výuka.

Závěrem lze říci, že cíle diplomky považuji za splněné. Podařil se vytvořit základní navrhovaný obsah učiva s tématem astronomie a astrofyzika, kde jsou uvedeny některé základní pojmy a principy na gymnaziální úrovni. Práce též obsahuje vzorové příklady, které jsou mnohdy spíše názorné pro obor než náročné pro výpočet. Tento podklad je návrh vybraných kapitol, které lze zařadit do výuky astronomie a astrofyziky, popřípadě do témat s těmito obory souvisejícími. Samozřejmě to nelze považovat za úplný přehled astronomie a astrofyziky, ale daný obsah je nad rámec časové dotace věnované těmto oborům. Je možné tedy využít některé kapitoly například ve fyzikálních či zeměpisných seminářích.

K výkladu a lepší názornosti daného obsahu ve výuce mohou sloužit prezentace vytvořené v programu PowerPoint, jež mají stejný sled kapitol. Doplněno bylo větší množstvím obrazového materiálu a také několik názorných animací.

Poslední částí je encyklopedie v html formátu, která má sloužit studentům při samostatném studiu. Obsah je podobný danému podkladu pro výklad. Navíc je doplněno více obrazového materiálu. Encyklopedie byla vytvořena pomocí editoru Adobe Dreamweaver a je možné umístění na internet. Obrazový materiál do encyklopedie a prezentací byl čerpán především z internetových stránek NASA a Hubblesite, ale i z ostatních pramenů uvedených v seznamu.

Obě aplikace umožňují učitelům poměrně rychlou a ve většině případů snadnou úpravu vytvořených učebních podkladů podle svých potřeb.

Věřím, že tyto vytvořené podklady pro výuku astronomie a astrofyziky mohou být užitečné pedagogům při jejich výuce.

## 11 SEZNAM PRAMENŮ

- 1) MACHÁČEK, M.: *Fyzika pro gymnázia: Astrofyzika*. Praha: Prométheus, 1998.
- 2) <http://www.wikipedia.org>
- 3) <http://mfweb.wz.cz/index.htm>
- 4) <http://www.astro.pef.zcu.cz>
- 5) GRYGAR, J.: *Vesmírná zastavení*. Praha: Panorama, 1990.
- 6) GRYGAR, J.: *Vesmír jaký je*. Praha: Panorama, 1997.
- 7) WOLF, M. a kol.: *Astronomická příručka*. Praha: Academia 1992.
- 8) KIPPENHAHN, R.: *Odhalená tajemství Slunce*. Praha: Mladá fronta, 1999.
- 9) HACAR, B.: *Metodika vyučování astronomii*. Praha: SPN, 1955.
- 10) ŠOLC, M. a kol.: *Fyzika hvězd a vesmíru*. Praha: SPN, 1983.
- 11) ŠOLC, M. – ZAHRADNÍK, J.: *Astronomie, astrofyzika a geofyzika I*. Praha: MFF UK, 1987.
- 12) VANÝSEK, V.: *Základy astronomie a astrofyziky*. Praha: Academia, 1980.
- 13) ŠIROKÝ, J. – ŠIROKÁ, M.: *Základy astronomie v příkladech*. Praha: SPN, 1966.
- 14) LEPIL, O. a kol.: *Fyzika: Sbírka úloh pro SŠ*. Praha: Prométheus, 1995.
- 15) Kolektiv autorů: *Rámcový vzdělávací program pro gymnázia*. Praha: Výzkumný ústav pedagogický, 2007.
- 16) Jednota českých matematiků a fyziků: *50 let didaktiky fyziky v ČR*. Olomouc: 2007.
- 17) GUTH, VI. – LINK, F. – MOHR, J. M. – ŠTERNBERK, B.: *Astronomie II*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1954.
- 18) BURŠA, M. – PĚČ, K.: *Gravity Field and Dynamics of the Earth*. Springer, 1993.
- 19) PŘÍHODA, P. a kol. – *Hvězdářská ročenka 2007*. Praha: Academia, 2006.
- 20) PŘÍHODA, P. a kol. – *Hvězdářská ročenka 2008*. Praha: Academia, 2007.
- 21) RNDr. Zdislav ŠÍMA, CSc. – *přednášky předmětu astronomie*
- 22) <http://www.hubblesite.org>
- 23) <http://www.nasa.gov>
- 24) <http://www.astro.cz>
- 25) <http://www.21stoleti.cz>
- 26) <http://www.observatory.cz>
- 27) <http://www.vesmir.info>
- 28) <http://astrosvet.com>
- 29) <http://nebmech.astronomy.cz>
- 30) <http://planetky.cz>
- 31) <http://komety.cz>
- 32) <http://www.osel.cz/index.php?clanek=1495>
- 33) <http://www.onera.fr/conferences-en/naos/images/photo-vlt.jpg>
- 34) <http://www.nsf.gov>

Použité internetové zdroje jsou aktuální ke květnu 2008.

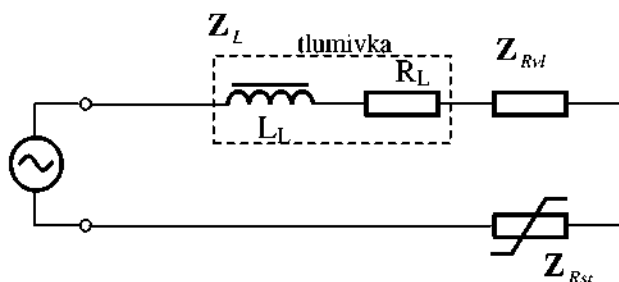
## **12 PŘÍLOHA**

Přílohu tvoří cd-rom, jehož obsahem je text diplomové práce v elektronické podobě, dále 14 prezentací do výuky astronomie a astrofyziky a také encyklopedie v html formátu.

### 3 Výpočet parametrů provozních stavů zářivkového svítidla se sériovou (DUO) kompenzací účinníku

#### 3.1 Komplexní impedance pro větev obvodu nekompenzované zářivky

##### 3.1.1 Komplexní impedance pro stav - ohřev startéru



Obr. 3.1 Náhradní obvod

#### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_{Rvl} = R_{vl} = 8,7 \, \Omega$$

$$Z_{Rst} = R_{st} = 16,1 \, k\Omega$$

$$Z_L = R_L + j\omega L_L \, \Omega = 103 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2,33 \, \Omega = 103 + j732 \, \Omega$$

#### Výpočty

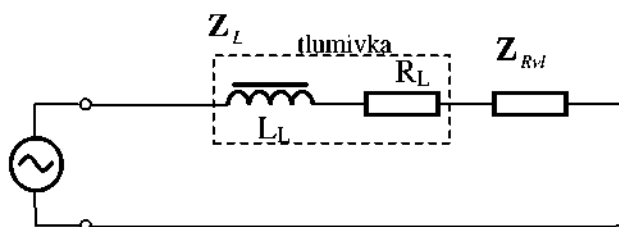
$$Z_A = Z_L + Z_{Rvl} + Z_{Rst} = 103 + j732 + 8,7 + 16,1 \cdot 10^3 \, \Omega = 16211,7 + j732 \, \Omega$$

$$|Z_A| = \sqrt{\text{Re}(Z_A)^2 + \text{Im}(Z_A)^2} = \sqrt{(16211,7)^2 + (732)^2} \, \Omega = 16228,2 \, \Omega$$

$$\varphi_A = \arctg \frac{\text{Im}(Z_A)}{\text{Re}(Z_A)} = \arctg \frac{732}{16211,7} = \arctg (0,045) = 2,6^\circ$$

$$|I_A| = \frac{|U_A|}{|Z_A|} = \frac{230}{16228,2} \, A = 14,2 \, mA$$

### 3.1.2 Komplexní impedance pro stav - žhavení



Obr. 3.2 Náhradní obvod

#### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_{RvI} = R_{vI} = 15,2 \, \Omega$$

$$Z_L = R_L + j\omega L_L \, \Omega = 54,13 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,227 \, \Omega = 54,13 + j385,5 \, \Omega$$

#### Výpočty

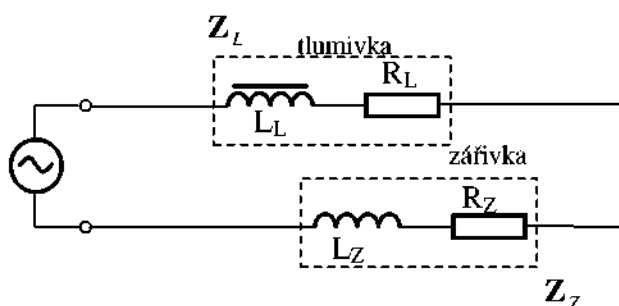
$$Z_A = Z_L + Z_{RvI} = 54,13 + j385,5 + 15,2 \, \Omega = 69,33 + j385,5 \, \Omega$$

$$|Z_A| = \sqrt{\text{Re}(Z_A)^2 + \text{Im}(Z_A)^2} = \sqrt{(69,33)^2 + (385,5)^2} \, \Omega = 391,7 \, \Omega$$

$$\varphi_A = \arctg \frac{\text{Im}(Z_A)}{\text{Re}(Z_A)} = \arctg \frac{385,5}{69,33} = \arctg (5,56) = 79,8^\circ$$

$$|I_A| = \frac{|U_A|}{|Z_A|} = \frac{230}{391,7} \, A = 0,59 \, A$$

### 3.1.3 Komplexní impedance pro stav - svícení



Obr. 3.3 Náhradní obvod



### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_L = R_L + j\omega L_L \Omega = 57,06 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,342 \Omega = 57,06 + j421,6 \Omega$$

$$Z_Z = R_Z + j\omega L_Z \Omega = 132 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,352 \Omega = 132 + j110,6 \Omega$$

### Výpočty

$$Z_A = Z_L + Z_Z = 57,06 + j421,6 + 132 + j110,6 \Omega = 189,1 + j532,2 \Omega$$

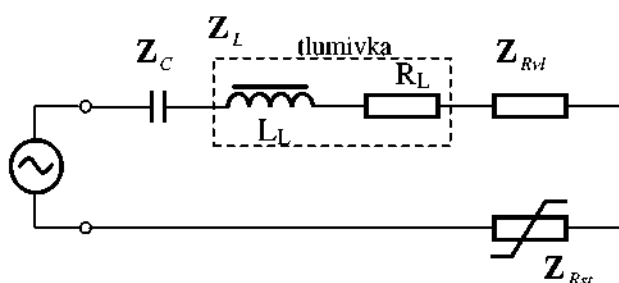
$$|Z_A| = \sqrt{\text{Re}(Z_A)^2 + \text{Im}(Z_A)^2} = \sqrt{(189,1)^2 + (532,2)^2} \Omega = 564,8 \Omega$$

$$\varphi_A = \arctg \frac{\text{Im}(Z_A)}{\text{Re}(Z_A)} = \arctg \frac{532,2}{189,1} = \arctg (2,81) = 70,4^\circ$$

$$|I_A| = \frac{|U_A|}{|Z_A|} = \frac{230}{564,8} A = 0,41 A$$

## 3.2 Komplexní impedance pro větev obvodu sériové kompenzace

### 3.2.1 Komplexní impedance pro stav - ohřev startéru



Obr. 3.4 Náhradní obvod

### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_{Rvl} = R_{vl} = 8,7 \Omega$$

$$Z_{Rst} = R_{st} = 16,1 k\Omega$$

$$Z_L = R_L + j\omega L_L \Omega = 103 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2,33 \Omega = 103 + j732 \Omega$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 3,478 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \Omega = -j915,2 \Omega$$

### Výpočty

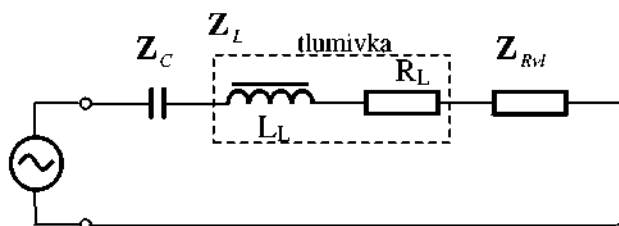
$$\mathbf{Z}_B = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_{Rvl} + \mathbf{Z}_{Rst} + \mathbf{Z}_C = 103 + j732 + 8,7 + 16,1 \cdot 10^3 - j915,2 \, \Omega = 16211,7 - j183,2 \, \Omega$$

$$|\mathbf{Z}_B| = \sqrt{\text{Re}(\mathbf{Z}_B)^2 + \text{Im}(\mathbf{Z}_B)^2} = \sqrt{(16211,7)^2 + (-183,2)^2} \, \Omega = 16212,7 \, \Omega$$

$$\varphi_B = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z}_B)}{\text{Re}(\mathbf{Z}_B)} = \arctg \frac{-183,2}{16211,7} = \arctg (-0,011) = -0,6^\circ$$

$$|\mathbf{I}_B| = \frac{|\mathbf{U}_B|}{|\mathbf{Z}_B|} = \frac{230}{16212,7} \, A = 14,2 \, mA$$

### 3.2.2 Komplexní impedance pro stav - žhavení



Obr.3.5 Náhradní obvod

### Hodnoty impedancí v obvodu

$$\mathbf{Z}_{Rvl} = R_{vl} = 15,2 \, \Omega$$

$$\mathbf{Z}_L = R_L + j\omega L_L \, \Omega = 54,13 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,227 \, \Omega = 54,13 + j385,5 \, \Omega$$

$$\mathbf{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} \, \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 3,478 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \, \Omega = -j915,2 \, \Omega$$

### Výpočty

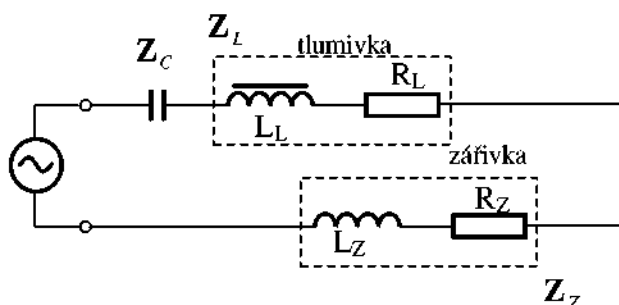
$$\mathbf{Z}_B = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_{Rvl} + \mathbf{Z}_C = 54,13 + j385,5 + 15,2 - j915,2 \, \Omega = 69,33 - j529,7 \, \Omega$$

$$|\mathbf{Z}_B| = \sqrt{\text{Re}(\mathbf{Z}_B)^2 + \text{Im}(\mathbf{Z}_B)^2} = \sqrt{(69,33)^2 + (-529,7)^2} \, \Omega = 534,2 \, \Omega$$

$$\varphi_B = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z}_B)}{\text{Re}(\mathbf{Z}_B)} = \arctg \frac{-529,7}{69,33} = \arctg (-7,64) = -82,5^\circ$$

$$|\mathbf{I}_B| = \frac{|\mathbf{U}_B|}{|\mathbf{Z}_B|} = \frac{230}{534,2} \, A = 0,43 \, A$$

### 3.2.3 Komplexní impedance pro stav - svícení



Obr. 3.6 Náhradní obvod

#### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_L = R_L + j\omega L_L \, \Omega = 57,06 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,342 \, \Omega = 57,06 + j421,6 \, \Omega$$

$$Z_Z = R_Z + j\omega L_Z \, \Omega = 132 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,352 \, \Omega = 132 + j110,6 \, \Omega$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \, \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 3,478 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \, \Omega = -j915,2 \, \Omega$$

#### Výpočty

$$Z_B = Z_L + Z_Z + Z_C = 57,06 + j421,6 + 132 + j110,6 - j915,2 \, \Omega = 189,1 - j383 \, \Omega$$

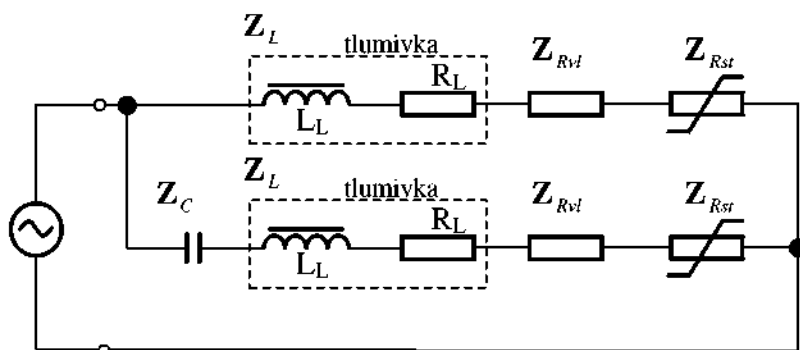
$$|Z_B| = \sqrt{\text{Re}(Z_B)^2 + \text{Im}(Z_B)^2} = \sqrt{(189,1)^2 + (-383)^2} \, \Omega = 427,1 \, \Omega$$

$$\varphi_B = \arctg \frac{\text{Im}(Z_B)}{\text{Re}(Z_B)} = \arctg \frac{-383}{189,1} = \arctg (-2,03) = -63,8^\circ$$

$$|I_B| = \frac{|U_B|}{|Z_B|} = \frac{230}{427,1} \, A = 0,54 \, A$$

## 3.3 Komplexní impedance DUO zapojení

### 3.3.1 Komplexní impedance pro stav - ohřev startéru



Obr. 3.7 Náhradní obvod

### Hodnoty impedancí v obvodu

$$\mathbf{Z}_A = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_{Rvl} + \mathbf{Z}_{Rst} = 103 + j732 + 8,7 + 16,1 \cdot 10^3 \, \Omega = 16211,7 + j732 \, \Omega$$

$$\mathbf{Z}_B = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_{Rvl} + \mathbf{Z}_{Rst} + \mathbf{Z}_C = 103 + j732 + 8,7 + 16,1 \cdot 10^3 - j915,2 \, \Omega = 16211,7 - j183,2 \, \Omega$$

### Výpočty

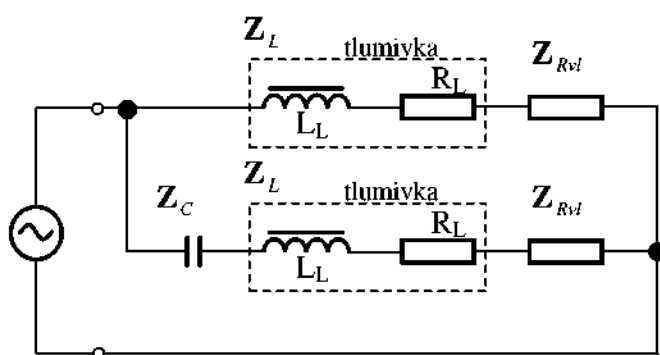
$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{Z}_A \cdot \mathbf{Z}_B}{\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_B} = \frac{(16211,7 + j732) \cdot (16211,7 - j183,2)}{(16211,7 + j732) + (16211,7 - j183,2)} \, \Omega = 8112,3 + j137,1 \, \Omega$$

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{\text{Re}(\mathbf{Z})^2 + \text{Im}(\mathbf{Z})^2} = \sqrt{(8112,3)^2 + (137,1)^2} \, \Omega = 8113,5 \, \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z})}{\text{Re}(\mathbf{Z})} = \arctg \frac{137,1}{8112,3} = \arctg (0,017) = 0,97^\circ$$

$$|\mathbf{I}| = \frac{|\mathbf{U}|}{|\mathbf{Z}|} = \frac{230}{8113,5} \, A = 28,3 \, mA$$

### 3.3.2 Komplexní impedance pro stav - žhavení



Obr. 3.8 Náhradní obvod

### Hodnoty impedancí v obvodu

$$\mathbf{Z}_A = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_{Rvl} = 54,13 + j385,5 + 15,2 \, \Omega = 69,33 + j385,5 \, \Omega$$

$$\mathbf{Z}_B = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_{Rvl} + \mathbf{Z}_C = 54,13 + j385,5 + 15,2 - j915,2 \, \Omega = 69,33 - j529,7 \, \Omega$$

### Výpočty

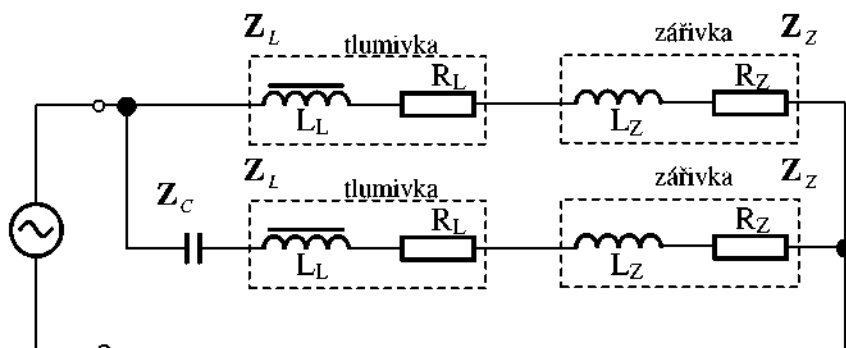
$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{Z}_A \cdot \mathbf{Z}_B}{\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_B} = \frac{(69,33 + j385,5) \cdot (69,33 - j529,7)}{(69,33 + j385,5) + (69,33 - j529,7)} \, \Omega = 760,2 + j718,4 \, \Omega$$

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{\text{Re}(\mathbf{Z})^2 + \text{Im}(\mathbf{Z})^2} = \sqrt{(760,2)^2 + (718,4)^2} \, \Omega = 1045,9 \, \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z})}{\text{Re}(\mathbf{Z})} = \arctg \frac{718,4}{760,2} = \arctg (0,95) = 43,5^\circ$$

$$|I| = \frac{|U|}{|Z|} = \frac{230}{1045,9} A = 0,22 A$$

### 3.3.3 Komplexní impedance pro stav - svícení



Obr. 3.9 Náhradní obvod

#### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_A = Z_L + Z_Z = 57,06 + j421,6 + 132 + j110,6 \Omega = 189,1 + j532,2 \Omega$$

$$Z_B = Z_L + Z_Z + Z_C = 57,06 + j421,6 + 132 + j110,6 - j915,2 \Omega = 189,1 - j383 \Omega$$

#### Výpočty

$$Z = \frac{Z_A \cdot Z_B}{Z_A + Z_B} = \frac{(189,1 + j532,2) \cdot (189,1 - j383)}{(189,1 + j532,2) + (189,1 - j383)} \Omega = 573,7 - j151,7 \Omega$$

$$|Z| = \sqrt{\text{Re}(Z)^2 + \text{Im}(Z)^2} = \sqrt{(573,7)^2 + (-151,7)^2} \Omega = 593,4 \Omega$$

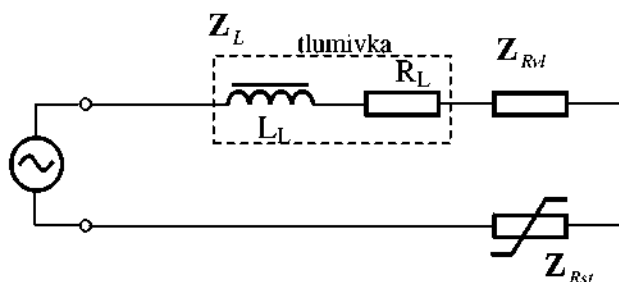
$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(Z)}{\text{Re}(Z)} = \arctg \frac{-151,7}{573,7} = \arctg (-0,26) = -14,6^\circ$$

$$|I| = \frac{|U|}{|Z|} = \frac{230}{593,4} A = 0,39 A$$

### 3 Výpočet parametrů provozních stavů zářivkového svítidla se sériovou (DUO) kompenzací účinníku

#### 3.1 Komplexní impedance pro větev obvodu nekompenzované zářivky

##### 3.1.1 Komplexní impedance pro stav - ohřev startéru



Obr. 3.1 Náhradní obvod

#### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_{Rvl} = R_{vl} = 20 \, \Omega$$

$$Z_{Rst} = R_{st} = 17 \, k\Omega$$

$$Z_L = R_L + j\omega L_L \, \Omega = 63 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2,33 \, \Omega = 63 + j732 \, \Omega$$

#### Výpočty

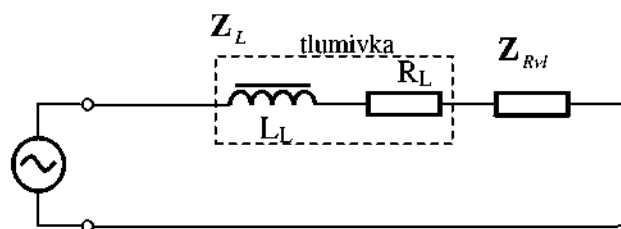
$$Z_A = Z_L + Z_{Rvl} + Z_{Rst} = 63 + j732 + 20 + 17 \cdot 10^3 \, \Omega = 17083 + j732 \, \Omega$$

$$|Z_A| = \sqrt{\text{Re}(Z_A)^2 + \text{Im}(Z_A)^2} = \sqrt{(17083)^2 + (732)^2} \, \Omega = 17098,7 \, \Omega$$

$$\varphi_A = \arctg \frac{\text{Im}(Z_A)}{\text{Re}(Z_A)} = \arctg \frac{732}{17083} = \arctg (0,043) = 2,5^\circ$$

$$|I_A| = \frac{|U_A|}{|Z_A|} = \frac{230}{17098,7} \, A = 13,5 \, mA$$

### 3.1.2 Komplexní impedance pro stav - žhavení



Obr. 3.2 Náhradní obvod

#### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_{Rv} = R_{vI} = 15,4 \, \Omega$$

$$Z_L = R_L + j\omega L_L \, \Omega = 44,35 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,222 \, \Omega = 44,35 + j383,9 \, \Omega$$

#### Výpočty

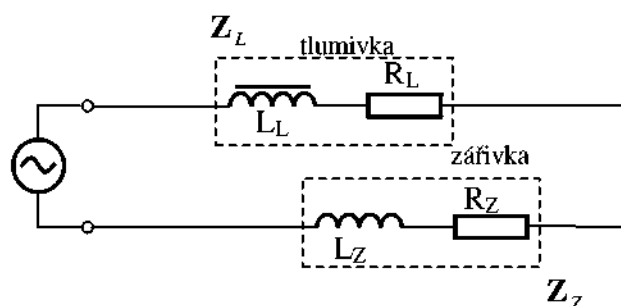
$$Z_A = Z_L + Z_{Rv} = 44,35 + j383,9 + 15,4 \, \Omega = 59,75 + j383,9 \, \Omega$$

$$|Z_A| = \sqrt{\text{Re}(Z_A)^2 + \text{Im}(Z_A)^2} = \sqrt{(59,75)^2 + (383,9)^2} \, \Omega = 388,5 \, \Omega$$

$$\varphi_A = \arctg \frac{\text{Im}(Z_A)}{\text{Re}(Z_A)} = \arctg \frac{383,9}{59,75} = \arctg (6,43) = 81,2^\circ$$

$$|I_A| = \frac{|U_A|}{|Z_A|} = \frac{230}{388,5} \, A = 0,59 \, A$$

### 3.1.3 Komplexní impedance pro stav - svícení



Obr. 3.3 Náhradní obvod



### Hodnoty impedancí v obvodu

$$\mathbf{Z}_L = R_L + j\omega L_L \text{ } \Omega = 45,97 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,338 \text{ } \Omega = 45,97 + j420,3 \text{ } \Omega$$

$$\mathbf{Z}_Z = R_Z + j\omega L_Z \text{ } \Omega = 128,4 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,342 \text{ } \Omega = 128,4 + j107,4 \text{ } \Omega$$

### Výpočty

$$\mathbf{Z}_A = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_Z = 45,97 + j420,3 + 128,4 + j107,4 \text{ } \Omega = 174,4 + j527,7 \text{ } \Omega$$

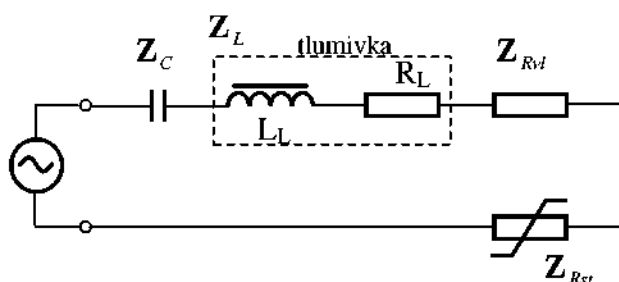
$$|\mathbf{Z}_A| = \sqrt{\text{Re}(\mathbf{Z}_A)^2 + \text{Im}(\mathbf{Z}_A)^2} = \sqrt{(174,4)^2 + (527,7)^2} \text{ } \Omega = 555,8 \text{ } \Omega$$

$$\varphi_A = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z}_A)}{\text{Re}(\mathbf{Z}_A)} = \arctg \frac{527,7}{174,4} = \arctg (3,03) = 71,7^\circ$$

$$|\mathbf{I}_A| = \frac{|\mathbf{U}_A|}{|\mathbf{Z}_A|} = \frac{230}{555,8} \text{ A} = 0,41 \text{ A}$$

## 3.2 Komplexní impedance pro větev obvodu sériové kompenzace

### 3.2.1 Komplexní impedance pro stav - ohřev startéru



Obr. 3.4 Náhradní obvod

### Hodnoty impedancí v obvodu

$$\mathbf{Z}_{Rvl} = R_{vl} = 20 \text{ } \Omega$$

$$\mathbf{Z}_{Rst} = R_{st} = 17 \text{ k}\Omega$$

$$\mathbf{Z}_L = R_L + j\omega L_L \text{ } \Omega = 63 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2,33 \text{ } \Omega = 63 + j732 \text{ } \Omega$$

$$\mathbf{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} \text{ } \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 3,478 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \text{ } \Omega = -j915,2 \text{ } \Omega$$

### Výpočty

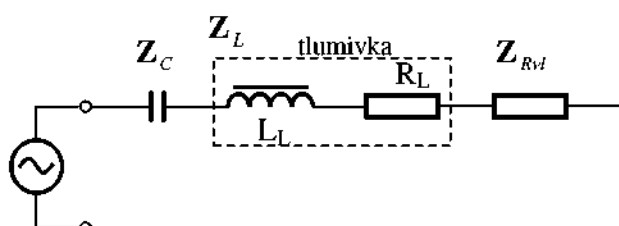
$$\mathbf{Z}_B = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_{Rvl} + \mathbf{Z}_{Rst} + \mathbf{Z}_C = 63 + j732 + 20 + 17 \cdot 10^3 - j915,2 \, \Omega = 17083 - j183,2 \, \Omega$$

$$|\mathbf{Z}_B| = \sqrt{\text{Re}(\mathbf{Z}_B)^2 + \text{Im}(\mathbf{Z}_B)^2} = \sqrt{(17083)^2 + (-183,2)^2} \, \Omega = 17084 \, \Omega$$

$$\varphi_B = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z}_B)}{\text{Re}(\mathbf{Z}_B)} = \arctg \frac{-183,2}{17083} = \arctg (-0,01) = -0,57^\circ$$

$$|\mathbf{I}_B| = \frac{|\mathbf{U}_B|}{|\mathbf{Z}_B|} = \frac{230}{17084} \, A = 13,5 \, mA$$

### 3.2.2 Komplexní impedance pro stav - žhavení



Obr.3.5 Náhradní obvod

### Hodnoty impedancí v obvodu

$$\mathbf{Z}_{Rvl} = R_{vl} = 15,4 \, \Omega$$

$$\mathbf{Z}_L = R_L + j\omega L_L \, \Omega = 44,35 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,222 \, \Omega = 44,35 + j383,9 \, \Omega$$

$$\mathbf{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} \, \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 3,478 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \, \Omega = -j915,2 \, \Omega$$

### Výpočty

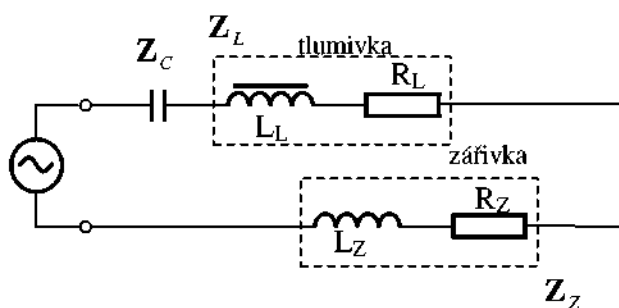
$$\mathbf{Z}_B = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_{Rvl} + \mathbf{Z}_C = 44,35 + j383,9 + 15,4 - j915,2 \, \Omega = 59,75 - j531,3 \, \Omega$$

$$|\mathbf{Z}_B| = \sqrt{\text{Re}(\mathbf{Z}_B)^2 + \text{Im}(\mathbf{Z}_B)^2} = \sqrt{(59,75)^2 + (-531,3)^2} \, \Omega = 534,6 \, \Omega$$

$$\varphi_B = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z}_B)}{\text{Re}(\mathbf{Z}_B)} = \arctg \frac{-531,3}{59,75} = \arctg (-8,89) = -83,6^\circ$$

$$|\mathbf{I}_B| = \frac{|\mathbf{U}_B|}{|\mathbf{Z}_B|} = \frac{230}{534,6} \, A = 0,43 \, A$$

### 3.2.3 Komplexní impedance pro stav - svícení



Obr. 3.6 Náhradní obvod

#### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_L = R_L + j\omega L_L \Omega = 45,97 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,338 \Omega = 45,97 + j420,3 \Omega$$

$$Z_Z = R_Z + j\omega L_Z \Omega = 128,4 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,342 \Omega = 128,4 + j107,4 \Omega$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 3,478 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \Omega = -j915,2 \Omega$$

#### Výpočty

$$Z_B = Z_L + Z_Z + Z_C = 45,97 + j420,3 + 128,4 + j107,4 - j915,2 \Omega = 174,4 - j387,5 \Omega$$

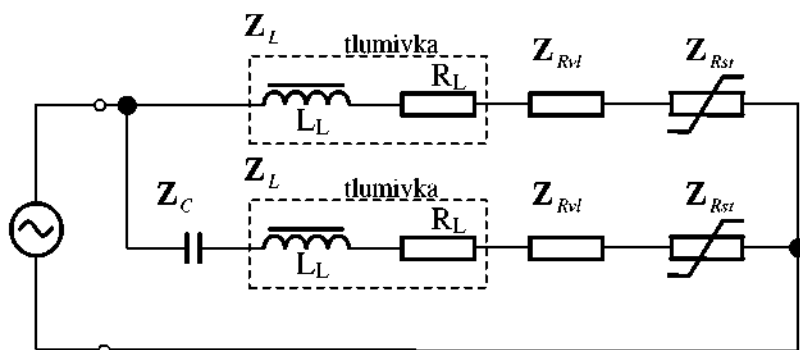
$$|Z_B| = \sqrt{\text{Re}(Z_B)^2 + \text{Im}(Z_B)^2} = \sqrt{(174,4)^2 + (-387,5)^2} \Omega = 424,9 \Omega$$

$$\varphi_B = \arctg \frac{\text{Im}(Z_B)}{\text{Re}(Z_B)} = \arctg \frac{-387,5}{174,4} = \arctg (-2,22) = -65,8^\circ$$

$$|I_B| = \frac{|U_B|}{|Z_B|} = \frac{230}{424,9} A = 0,54 A$$

## 3.3 Komplexní impedance DUO zapojení

### 3.3.1 Komplexní impedance pro stav - ohřev startéru



Obr. 3.7 Náhradní obvod

### Hodnoty impedancí v obvodu

$$\mathbf{Z}_A = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_{Rvl} + \mathbf{Z}_{Rst} = 63 + j732 + 20 + 17 \cdot 10^3 \Omega = 17083 + j732 \Omega$$

$$\mathbf{Z}_B = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_{Rvl} + \mathbf{Z}_{Rst} + \mathbf{Z}_C = 63 + j732 + 20 + 17 \cdot 10^3 - j915,2 \Omega = 17083 - j183,2 \Omega$$

### Výpočty

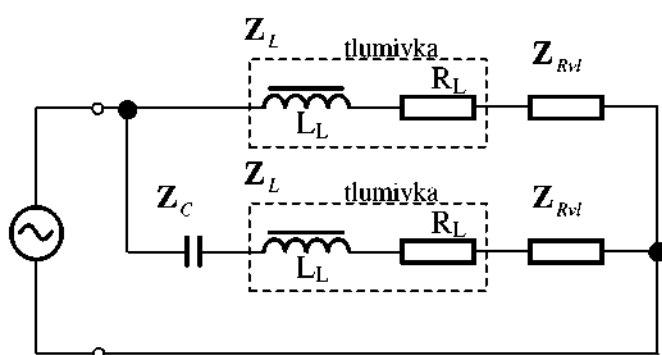
$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{Z}_A \cdot \mathbf{Z}_B}{\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_B} = \frac{(17083 + j732) \cdot (17083 - j183,2)}{(17083 + j732) + (17083 - j183,2)} \Omega = 8547,6 + j137,1 \Omega$$

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{\text{Re}(\mathbf{Z})^2 + \text{Im}(\mathbf{Z})^2} = \sqrt{(8547,6)^2 + (137,1)^2} \Omega = 8548,7 \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z})}{\text{Re}(\mathbf{Z})} = \arctg \frac{137,1}{8547,6} = \arctg (0,016) = 0,92^\circ$$

$$|\mathbf{I}| = \frac{|\mathbf{U}|}{|\mathbf{Z}|} = \frac{230}{8548,7} \text{ A} = 26,9 \text{ mA}$$

### 3.3.2 Komplexní impedance pro stav - žhavení



Obr. 3.8 Náhradní obvod

### Hodnoty impedancí v obvodu

$$\mathbf{Z}_A = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_{Rvl} = 44,35 + j383,9 + 15,4 \Omega = 59,75 + j383,9 \Omega$$

$$\mathbf{Z}_B = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_{Rvl} + \mathbf{Z}_C = 44,35 + j383,9 + 15,4 - j915,2 \Omega = 59,75 - j531,3 \Omega$$

### Výpočty

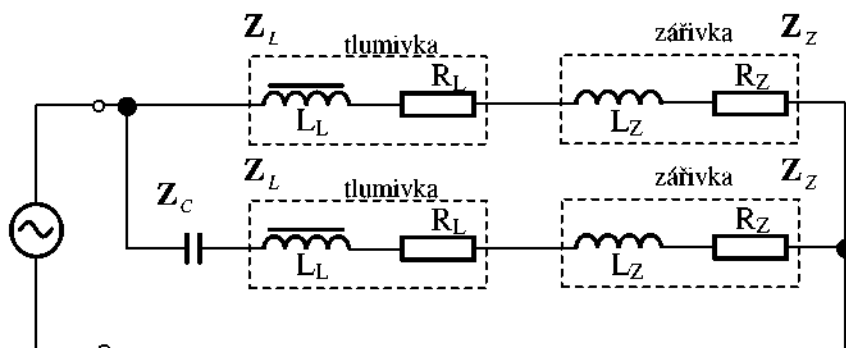
$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{Z}_A \cdot \mathbf{Z}_B}{\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_B} = \frac{(59,75 + j383,9) \cdot (59,75 - j531,3)}{(59,75 + j383,9) + (59,75 - j531,3)} \Omega = 724,8 + j820,4 \Omega$$

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{\text{Re}(\mathbf{Z})^2 + \text{Im}(\mathbf{Z})^2} = \sqrt{(724,8)^2 + (820,4)^2} \Omega = 1094,7 \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z})}{\text{Re}(\mathbf{Z})} = \arctg \frac{820,4}{727,8} = \arctg (1,13) = 48,5^\circ$$

$$|I| = \frac{|U|}{|Z|} = \frac{230}{1094,7} \text{ A} = 0,21 \text{ A}$$

### 3.3.3 Komplexní impedance pro stav - svícení



Obr. 3.9 Náhradní obvod

#### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_A = Z_L + Z_Z = 45,97 + j420,3 + 128,4 + j107,4 \, \Omega = 174,4 + j527,7 \, \Omega$$

$$Z_B = Z_L + Z_Z + Z_C = 45,97 + j420,3 + 128,4 + j107,4 - j915,2 \, \Omega = 174,4 - j387,5 \, \Omega$$

#### Výpočty

$$Z = \frac{Z_A \cdot Z_B}{Z_A + Z_B} = \frac{(174,4 + j527,7) \cdot (174,4 - j387,5)}{(174,4 + j527,7) + (174,4 - j387,5)} \, \Omega = 604 - j172,7 \, \Omega$$

$$|Z| = \sqrt{\text{Re}(Z)^2 + \text{Im}(Z)^2} = \sqrt{(604)^2 + (-172,7)^2} \, \Omega = 628,2 \, \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(Z)}{\text{Re}(Z)} = \arctg \frac{-172,7}{604} = \arctg (-0,29) = -16,2^\circ$$

$$|I| = \frac{|U|}{|Z|} = \frac{230}{628,2} \text{ A} = 0,37 \text{ A}$$

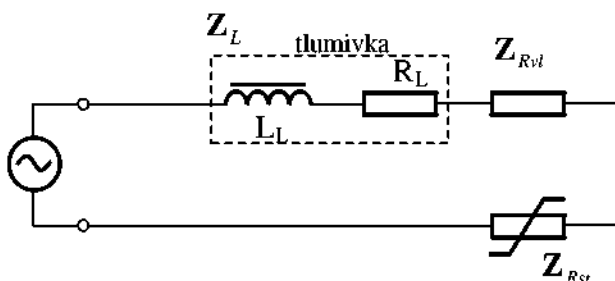
## 5 Komplexní impedance provozních stavů zářivkového svítidla se sériovou (DUO) kompenzací účinníku

### 5.1 Parametry prvků pro výpočet komplexních impedancí náhradních obvodů základních stavů rozsvěcování zářivky

Komplexní impedance náhradních obvodů jednotlivých stavů jsou vypočteny z průměru naměřených a vypočtených hodnot kondenzátoru uvedených v kapitole 3.2.1 a hodnot tlumivky, vláken, startéru a zářivky z kapitoly 3.2.2. Postup výpočtu v této kapitole je znázorněn z průměru hodnot dvou zářivek a následně v tabulkách 5.1, 5.2, 5.3 jsou uvedené pro porovnání výsledné parametry provozních stavů počítány i pro dvě zářivky zvlášť.

### 5.2 Komplexní impedance pro větev obvodu nekompenzované zářivky

#### 5.2.1 Komplexní impedance pro stav - ohřev startéru



Obr. 5.1 Náhradního obvod pro stav – ohřev startéru obvodu nekompenzované zářivky

#### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_{Rvl} = R_{vl} = 14 \, \Omega \text{ (pro 2 vlákna)}$$

$$Z_{Rst} = R_{st} = 16,6 \, k\Omega$$

$$Z_L = R_L + j\omega L_L \, \Omega = 83 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2,33 \, \Omega = 83 + j732 \, \Omega$$

#### Výpočty

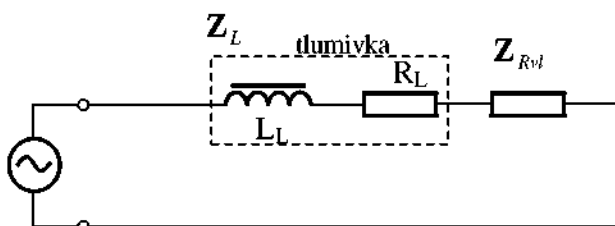
$$Z_A = Z_L + Z_{Rvl} + Z_{Rst} = 83 + j732 + 14 + 16,6 \cdot 10^3 \, \Omega = 16697 + j732 \, \Omega$$

$$|Z_A| = \sqrt{\text{Re}(Z_A)^2 + \text{Im}(Z_A)^2} = \sqrt{(16697)^2 + (732)^2} \, \Omega = 16713 \, \Omega$$

$$\varphi_A = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z}_A)}{\text{Re}(\mathbf{Z}_A)} = \arctg \frac{732}{16697} = \arctg (0,044) = 2,5^\circ$$

$$|\mathbf{I}_A| = \frac{|\mathbf{U}_A|}{|\mathbf{Z}_A|} = \frac{230}{16713} \text{ A} = 13,8 \text{ mA}$$

### 5.2.2 Komplexní impedance pro stav - žhavení



Obr. 5.2 Náhradního obvodu pro stav – žhavení obvodu nekompenzované zářivky

#### Hodnoty impedancí v obvodu

$$\mathbf{Z}_{R_{vl}} = R_{vl} = 15,3 \, \Omega \text{ (pro 2 vlákna)}$$

$$\mathbf{Z}_L = R_L + j\omega L_L \, \Omega = 49 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,225 \, \Omega = 49 + j384,8 \, \Omega$$

#### Výpočty

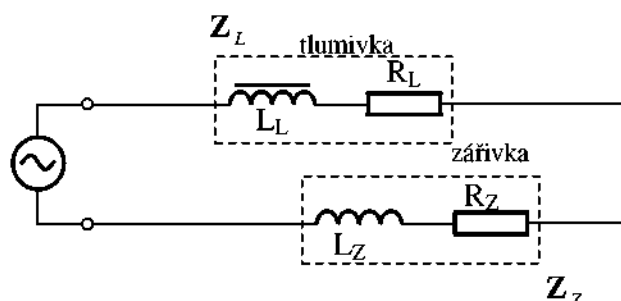
$$\mathbf{Z}_A = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_{R_{vl}} = 49 + j384,8 + 15,3 \, \Omega = 64,3 + j384,8 \, \Omega$$

$$|\mathbf{Z}_A| = \sqrt{\text{Re}(\mathbf{Z}_A)^2 + \text{Im}(\mathbf{Z}_A)^2} = \sqrt{(64,3)^2 + (384,8)^2} \, \Omega = 390,1 \, \Omega$$

$$\varphi_A = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z}_A)}{\text{Re}(\mathbf{Z}_A)} = \arctg \frac{384,8}{64,3} = \arctg (5,98) = 80,5^\circ$$

$$|\mathbf{I}_A| = \frac{|\mathbf{U}_A|}{|\mathbf{Z}_A|} = \frac{230}{384,8} \text{ A} = 0,6 \text{ A}$$

### 5.2.3 Komplexní impedance pro stav - svícení



Obr. 5.3 Náhradního obvodu pro stav – svícení obvodu nekompenzované zářivky



### Hodnoty impedancí v obvodu

$$\mathbf{Z}_L = R_L + j\omega L_L \quad \Omega = 52 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,34 \Omega = 52 + j421 \Omega$$

$$\mathbf{Z}_Z = R_Z + j\omega L_Z \quad \Omega = 130,3 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,347 \Omega = 130,3 + j109 \Omega$$

### Výpočty

$$\mathbf{Z}_A = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_Z = 52 + j421 + 130,3 + j109 \Omega = 182,3 + j530 \Omega$$

$$|\mathbf{Z}_A| = \sqrt{\text{Re}(\mathbf{Z}_A)^2 + \text{Im}(\mathbf{Z}_A)^2} = \sqrt{(182,3)^2 + (530)^2} \Omega = 560,5 \Omega$$

$$\varphi_A = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z}_A)}{\text{Re}(\mathbf{Z}_A)} = \arctg \frac{530}{182,3} = \arctg (2,91) = 71^\circ$$

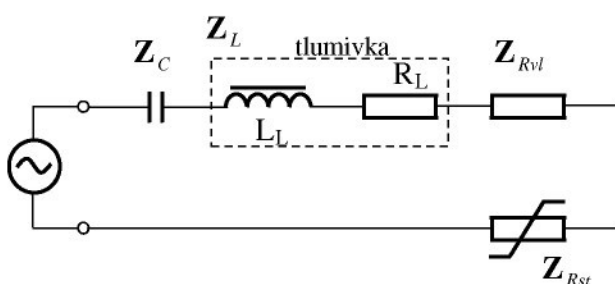
$$|\mathbf{I}_A| = \frac{|\mathbf{U}_A|}{|\mathbf{Z}_A|} = \frac{230}{560,5} \text{ A} = 0,41 \text{ A}$$

Tab. 5.1 Parametry provozních stavů zářivkového svítidla obvodu nekompenzované zářivky

|                 | Zářivky 12. a 11.                |                             |                         | Zářivka 11.                      |                             |                         | Zářivka 12.                      |                             |                         |
|-----------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Provozní stav:  | $ \mathbf{Z}_A $<br>( $\Omega$ ) | $\varphi_A$<br>( $^\circ$ ) | $ \mathbf{I}_A $<br>(A) | $ \mathbf{Z}_A $<br>( $\Omega$ ) | $\varphi_A$<br>( $^\circ$ ) | $ \mathbf{I}_A $<br>(A) | $ \mathbf{Z}_A $<br>( $\Omega$ ) | $\varphi_A$<br>( $^\circ$ ) | $ \mathbf{I}_A $<br>(A) |
| Ohřev startéru  | 16720                            | 2,5                         | $13,8 \cdot 10^{-3}$    | 16230                            | 2,6                         | $14,2 \cdot 10^{-3}$    | 17100                            | 2,5                         | $13,5 \cdot 10^{-3}$    |
| Žhavení         | 390,1                            | 80,5                        | 0,6                     | 391,7                            | 79,8                        | 0,59                    | 388,5                            | 81,2                        | 0,59                    |
| Odskok startéru | -                                | -                           | -                       | -                                | -                           | -                       | -                                | -                           | -                       |
| Svícení         | 560,5                            | 71                          | 0,41                    | 564,8                            | 70,4                        | 0,41                    | 555,8                            | 71,7                        | 0,41                    |
| Vypnutí         | $\infty$                         | -                           | 0                       | $\infty$                         | -                           | 0                       | $\infty$                         | -                           | 0                       |

## 5.3 Komplexní impedance pro větev obvodu sériové kompenzace

### 5.3.1 Komplexní impedance pro stav - ohřev startéru



Obr. 5.4 Náhradního obvod pro stav – ohřev startéru obvodu sériové kompenzace účinníku

### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_{Rvl} = R_{vl} = 14 \, \Omega \text{ (pro 2 vlákna)}$$

$$Z_{Rst} = R_{st} = 16,6 \, k\Omega$$

$$Z_L = R_L + j\omega L_L \, \Omega = 83 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2,33 \, \Omega = 83 + j732 \, \Omega$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \, \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 3,478 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \, \Omega = -j915,2 \, \Omega$$

### Výpočty

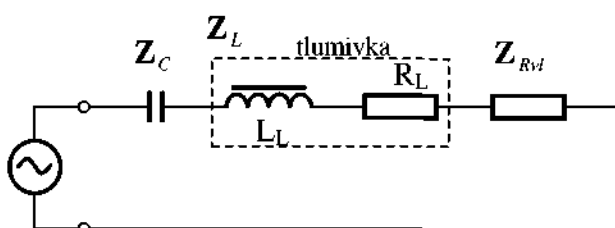
$$Z_B = Z_L + Z_{Rvl} + Z_{Rst} + Z_C = 83 + j732 + 14 + 16,6 \cdot 10^3 - j915,2 \, \Omega = 16697 - j183,2 \, \Omega$$

$$|Z_B| = \sqrt{\operatorname{Re}(Z_B)^2 + \operatorname{Im}(Z_B)^2} = \sqrt{(16697)^2 + (-183,2)^2} \, \Omega = 16698 \, \Omega$$

$$\varphi_B = \arctg \frac{\operatorname{Im}(Z_B)}{\operatorname{Re}(Z_B)} = \arctg \frac{-183,2}{16697} = \arctg (-0,011) = -0,63^\circ$$

$$|I_B| = \frac{|U_B|}{|Z_B|} = \frac{230}{16698} \, A = 13,8 \, mA$$

### 5.3.2 Komplexní impedance pro stav - žhavení



Obr. 5.5 Náhradního obvod pro stav – žhavení obvodu sériové kompenzace účinníku

### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_{Rvl} = R_{vl} = 15,3 \, \Omega \text{ (pro 2 vlákna)}$$

$$Z_L = R_L + j\omega L_L \, \Omega = 49 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,225 \, \Omega = 49 + j384,8 \, \Omega$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \, \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 3,478 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \, \Omega = -j915,2 \, \Omega$$

### Výpočty

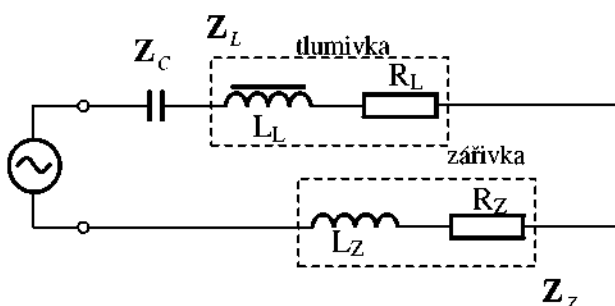
$$Z_B = Z_L + Z_{Rvl} + Z_C = 49 + j384,8 + 15,3 - j915,2 \, \Omega = 64,3 - j530,4 \, \Omega$$

$$|Z_B| = \sqrt{\operatorname{Re}(Z_B)^2 + \operatorname{Im}(Z_B)^2} = \sqrt{(64,3)^2 + (-530,4)^2} \, \Omega = 534,3 \, \Omega$$

$$\varphi_B = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z}_B)}{\text{Re}(\mathbf{Z}_B)} = \arctg \frac{-530,4}{64,3} = \arctg (-8,25) = -83,1^\circ$$

$$|\mathbf{I}_B| = \frac{|\mathbf{U}_B|}{|\mathbf{Z}_B|} = \frac{230}{534,3} \text{ A} = 0,43 \text{ A}$$

### 5.3.3 Komplexní impedance pro stav - svícení



Obr. 5.6 Náhradního obvod pro stav – svícení obvodu sériové kompenzace účinníku

#### Hodnoty impedancí v obvodu

$$\mathbf{Z}_L = R_L + j\omega L_L \text{ } \Omega = 52 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,34 \text{ } \Omega = 52 + j421 \text{ } \Omega$$

$$\mathbf{Z}_Z = R_Z + j\omega L_Z \text{ } \Omega = 130,3 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,347 \text{ } \Omega = 130,3 + j109 \text{ } \Omega$$

$$\mathbf{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} \text{ } \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 3,478 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \text{ } \Omega = -j915,2 \text{ } \Omega$$

#### Výpočty

$$\mathbf{Z}_B = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_Z + \mathbf{Z}_C = 52 + j421 + 130,3 + j109 - j915,2 \text{ } \Omega = 182,3 - j385,2 \text{ } \Omega$$

$$|\mathbf{Z}_B| = \sqrt{\text{Re}(\mathbf{Z}_B)^2 + \text{Im}(\mathbf{Z}_B)^2} = \sqrt{(182,3)^2 + (-385,2)^2} \text{ } \Omega = 426,2 \text{ } \Omega$$

$$\varphi_B = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z}_B)}{\text{Re}(\mathbf{Z}_B)} = \arctg \frac{-385,2}{182,3} = \arctg (-2,11) = -64,6^\circ$$

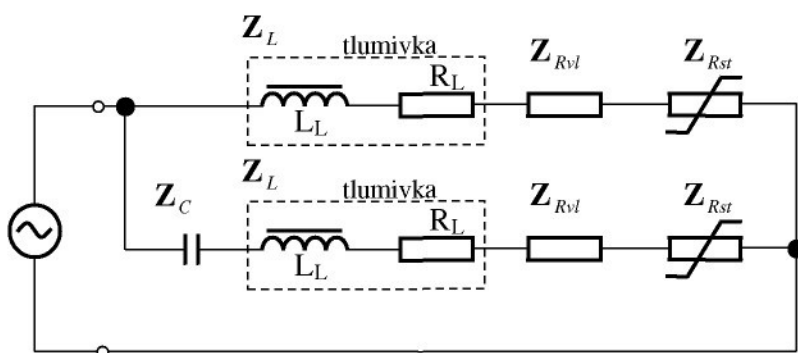
$$|\mathbf{I}_B| = \frac{|\mathbf{U}_B|}{|\mathbf{Z}_B|} = \frac{230}{426,2} \text{ A} = 0,54 \text{ A}$$

Tab. 5.2 Parametry provozních stavů zářivkového svítidla obvodu sériové kompenzace účinníku

|                 | Zářivky 12. a 11.       |                             |                      | Zářivka 11.             |                             |                      | Zářivka 12.             |                             |                      |
|-----------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------|
| Provozní stav:  | $ Z_B $<br>( $\Omega$ ) | $\varphi_B$<br>( $^\circ$ ) | $ I_B $<br>(A)       | $ Z_B $<br>( $\Omega$ ) | $\varphi_B$<br>( $^\circ$ ) | $ I_B $<br>(A)       | $ Z_B $<br>( $\Omega$ ) | $\varphi_B$<br>( $^\circ$ ) | $ I_B $<br>(A)       |
| Ohřev startéru  | 16700                   | -0,63                       | $13,8 \cdot 10^{-3}$ | 16220                   | -0,6                        | $14,2 \cdot 10^{-3}$ | 17090                   | -0,57                       | $13,5 \cdot 10^{-3}$ |
| Žhavení         | 534,3                   | -83,1                       | 0,43                 | 534,2                   | -82,5                       | 0,43                 | 534,6                   | -83,6                       | 0,43                 |
| Odskok startéru | -                       | -                           | -                    | -                       | -                           | -                    | -                       | -                           | -                    |
| Svícení         | 426,2                   | -64,6                       | 0,54                 | 427,1                   | -63,8                       | 0,54                 | 424,9                   | -65,8                       | 0,54                 |
| Vypnutí         | $\infty$                | -                           | 0                    | $\infty$                | -                           | 0                    | $\infty$                | -                           | 0                    |

## 5.4 Komplexní impedance DUO zapojení

### 5.4.1 Komplexní impedance pro stav - ohřev startéru



Obr. 5.7 Náhradního obvodu pro stav – ohřev startéru zapojení se sériovou (DUO) kompenzací účinníku

#### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_A = Z_L + Z_{Rvl} + Z_{Rst} = 83 + j732 + 14 + 16,6 \cdot 10^3 \Omega = 16697 + j732 \Omega$$

$$Z_B = Z_L + Z_{Rvl} + Z_{Rst} + Z_C = 83 + j732 + 14 + 16,6 \cdot 10^3 - j915,2 \Omega = 16697 - j183,2 \Omega$$

#### Výpočty

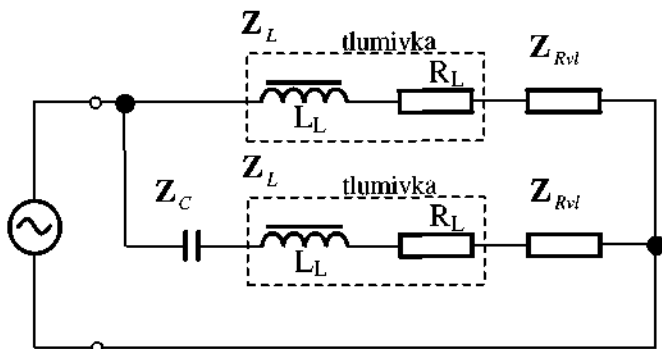
$$Z = \frac{Z_A \cdot Z_B}{Z_A + Z_B} = \frac{(16697 + j732) \cdot (16697 - j183,2)}{(16697 + j732) + (16697 - j183,2)} \Omega = 8354,8 + j137,1 \Omega$$

$$|Z| = \sqrt{\text{Re}(Z)^2 + \text{Im}(Z)^2} = \sqrt{(8354,8)^2 + (137,1)^2} \Omega = 8355,9 \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z})}{\text{Re}(\mathbf{Z})} = \arctg \frac{137,1}{8354,8} = \arctg (-0,016) = 0,92^\circ$$

$$|\mathbf{I}| = \frac{|\mathbf{U}|}{|\mathbf{Z}|} = \frac{230}{8355,9} \text{ A} = 27,5 \text{ mA}$$

#### 5.4.2 Komplexní impedance pro stav - žhavení



Obr. 5.8 Náhradního obvod pro stav - žhavení zapojení se sériovou (DUO) kompenzací účinníku

#### Hodnoty impedancí v obvodu

$$\mathbf{Z}_A = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_{Rvl} = 49 + j384,8 + 15,3 \Omega = 64,3 + j384,8 \Omega$$

$$\mathbf{Z}_B = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_{Rvl} + \mathbf{Z}_C = 49 + j384,8 + 15,3 - j915,2 \Omega = 64,3 - j530,4 \Omega$$

#### Výpočty

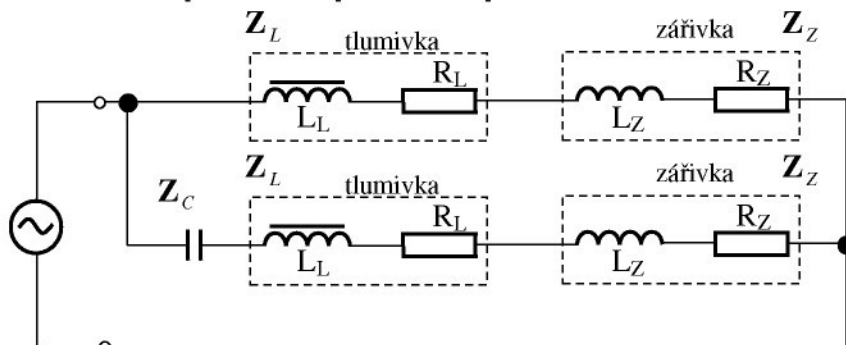
$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{Z}_A \cdot \mathbf{Z}_B}{\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_B} = \frac{(64,3 + j384,8) \cdot (64,3 - j530,4)}{(64,3 + j384,8) + (64,3 - j530,4)} \Omega = 745,7 + j771,5 \Omega$$

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{\text{Re}(\mathbf{Z})^2 + \text{Im}(\mathbf{Z})^2} = \sqrt{(745,7)^2 + (771,5)^2} \Omega = 1073 \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z})}{\text{Re}(\mathbf{Z})} = \arctg \frac{771,5}{745,7} = \arctg (1,03) = 45,8^\circ$$

$$|\mathbf{I}| = \frac{|\mathbf{U}|}{|\mathbf{Z}|} = \frac{230}{1073} \text{ A} = 0,21 \text{ A}$$

### 5.4.3 Komplexní impedance pro stav - svícení



Obr. 5.9 Náhradního obvodu pro stav – svícení zapojení se sériovou (DUO) kompenzací účinníku

#### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_A = Z_L + Z_Z = 52 + j421 + 130,3 + j109 \, \Omega = 182,3 + j530 \, \Omega$$

$$Z_B = Z_L + Z_Z + Z_C = 52 + j421 + 130,3 + j109 - j915,2 \, \Omega = 182,3 - j385,2 \, \Omega$$

#### Výpočty

$$Z = \frac{Z_A \cdot Z_B}{Z_A + Z_B} = \frac{(182,3 + j530) \cdot (182,3 - j385,2)}{(182,3 + j530) + (182,3 - j385,2)} \, \Omega = 587,2 - j160,8 \, \Omega$$

$$|Z| = \sqrt{\text{Re}(Z)^2 + \text{Im}(Z)^2} = \sqrt{(587,2)^2 + (-160,8)^2} \, \Omega = 608,8 \, \Omega$$

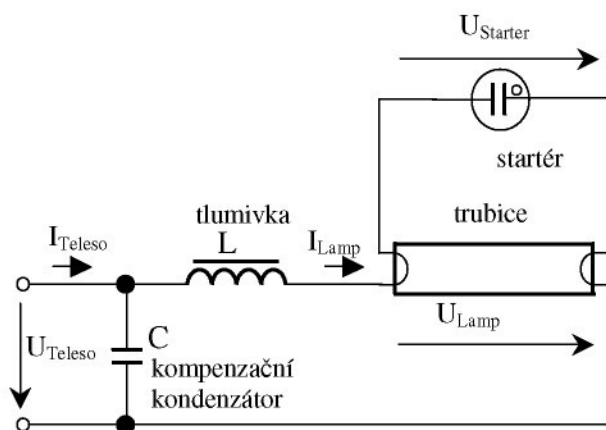
$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(Z)}{\text{Re}(Z)} = \arctg \frac{-160,8}{587,2} = \arctg (-0,27) = -15,1^\circ$$

$$|I| = \frac{|U|}{|Z|} = \frac{230}{608,8} \, A = 0,38 \, A$$

Tab. 5.3 Parametry provozních stavů zářivkového svítidla zapojení se sériovou (DUO) kompenzací účinníku

| Provozní stav:  | Zářivky 12. a 11.     |                           |                      | Zářivka 11.           |                           |                      | Zářivka 12.           |                           |                      |
|-----------------|-----------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------|
|                 | $ Z $<br>( $\Omega$ ) | $\varphi$<br>( $^\circ$ ) | $ I $<br>(A)         | $ Z $<br>( $\Omega$ ) | $\varphi$<br>( $^\circ$ ) | $ I $<br>(A)         | $ Z $<br>( $\Omega$ ) | $\varphi$<br>( $^\circ$ ) | $ I $<br>(A)         |
| Ohřev startéru  | 8356                  | 0,92                      | $27,5 \cdot 10^{-3}$ | 8114                  | 0,97                      | $28,3 \cdot 10^{-3}$ | 8549                  | 0,92                      | $26,9 \cdot 10^{-3}$ |
| Žhavení         | 1073                  | 45,8                      | 0,21                 | 1046                  | 43,5                      | 0,22                 | 1095                  | 48,5                      | 0,21                 |
| Odskok startéru | -                     | -                         | -                    | -                     | -                         | -                    | -                     | -                         | -                    |
| Svícení         | 608,8                 | -15,1                     | 0,38                 | 593,4                 | -14,6                     | 0,39                 | 628,2                 | -16,2                     | 0,37                 |
| Vypnutí         | $\infty$              | -                         | 0                    | $\infty$              | -                         | 0                    | $\infty$              | -                         | 0                    |

## 2 Výpočet parametrů provozních stavů zářivkového svítidla s paralelní kompenzací



Obr. 2.1 Zapojení osvětlovacího tělesa

### Jednotlivé prvky obvodu:

C Kondenzátor: DNA LCP 0045015 4,5  $\mu\text{F} \pm 10 \%$

L Tlumivka: DFT 5336 kategorie C

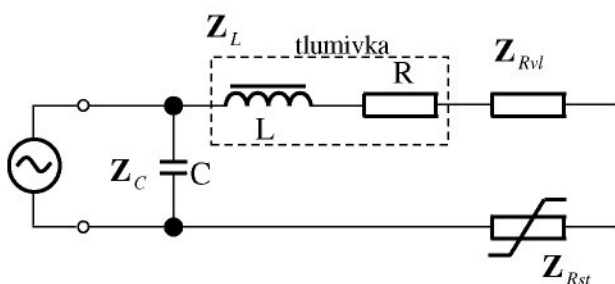
Trubice: Philips Master TL-D 36W/840  $P = 36 \text{ W}$ ;  $U = 103 \text{ V}$ ;  $I = 0,44 \text{ A}$

Startér: Philips S10

| Naměřené hodnoty: |                   |                   |                   |                | Vypočtené hodnoty:  |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|---------------------|
| Zářivka:          | U [V]             | I [A]             | P [W]             | Q [Var]        | C [ $\mu\text{F}$ ] |
| 12.               | 229,4             | 0,3376            | 0,13              | 77,32          | 4,69                |
| 11.               | 229,4             | 0,3345            | 0,11              | 76,75          | 4,64                |
| 10.               | 229,5             | 0,3273            | 0,12              | 75,04          | 4,54                |
| 9.                | 229,4             | 0,3087            | 0,13              | 70,68          | 4,29                |
| 8.                | 229,5             | 0,3099            | 0,15              | 70,91          | 4,31                |
| 7.                | 229,5             | 0,3084            | 0,14              | 70,68          | 4,28                |
| 6.                | 229,4             | 0,3099            | 0,16              | 70,91          | 4,31                |
| 5.                | 229,5             | 0,3124            | 0,13              | 71,60          | 4,34                |
| 4.                | 229,6             | 0,3122            | 0,12              | 71,39          | 4,35                |
| 3.                | 229,5             | 0,3091            | 0,13              | 70,70          | 4,30                |
| 2.                | 229,5             | 0,3101            | 0,17              | 71,17          | 4,30                |
| 1.                | 229,4             | 0,3102            | 0,14              | 71,15          | 4,30                |
| Ø                 | $229,47 \pm 0,02$ | $0,316 \pm 0,004$ | $0,316 \pm 0,006$ | $72,4 \pm 0,8$ | $4,39 \pm 0,05$     |

Tab. 2.1 Naměřené hodnoty kondenzátoru

## 2.1 Komplexní impedance pro stav - ohřev startéru



Obr. 2.2 Náhradní obvod

| Číslo měření:         | $L_T$ [H]     | $R_T$ [ $\Omega$ ] | $R_V$ [ $\Omega$ ] | $R_S$ [k $\Omega$ ] |
|-----------------------|---------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| 1. zářivka 12 (253 V) | 2,45          | 76,97              | 12,39              | 16,46               |
| 2. zářivka 12 (241 V) | 2,28          | 81,88              | 11,34              | 16,15               |
| 3. zářivka 12 (230 V) | 2,27          | 78,69              | 15,20              | 17,87               |
| 4. zářivka 12 (218 V) | 2,82          | 28,09              | 39,93              | 17,78               |
| 5. zářivka 12 (207 V) | 2,60          | 87,24              | 13,66              | 21,47               |
| 1. zářivka 11 (253 V) | 2,33          | 103,19             | 11,55              | 14,85               |
| 2. zářivka 11 (241 V) | 2,18          | 101,55             | 8,85               | 14,70               |
| 3. zářivka 11 (230 V) | 1,90          | 85,48              | 5,63               | 14,96               |
| 4. zářivka 11 (218 V) | 2,15          | 84,36              | 11,42              | 16,63               |
| 5. zářivka 11 (207 V) | 1,82          | 61,28              | 9,08               | 14,57               |
| $\emptyset$           | $2,3 \pm 0,1$ | $79 \pm 7$         | $14 \pm 4$         | $16,5 \pm 0,7$      |

Tab. 2.2 Parametry náhradního obvodu

### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_{Rvl} = 14 \, \Omega$$

$$Z_{Rstart} = 16,5 \, k\Omega$$

$$Z_L = 79 + j723 \, \Omega$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \, \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 4,39 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \, \Omega = -j725,1 \, \Omega$$

### Výpočty

$$Z_1 = Z_L + Z_{Rvl} + Z_{Rstart} = 79 + j723 + 14 + 16,5 \cdot 10^3 \, \Omega = 16593 + j723 \, \Omega$$

$$Z = \frac{Z_1 \cdot Z_C}{Z_1 + Z_C} = \frac{(16593 + j723) \cdot (-j725,1)}{(16593 + j723) + (-j725,1)} \, \Omega = 31,7 - j725,1 \, \Omega$$

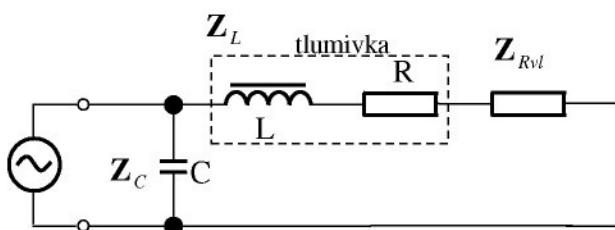


$$|Z| = \sqrt{\operatorname{Re}(Z)^2 + \operatorname{Im}(Z)^2} = \sqrt{(31,7)^2 + (-725,1)^2} \Omega = 725,8 \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{\operatorname{Im}(Z)}{\operatorname{Re}(Z)} = \arctg \frac{-725,1}{31,7} = \arctg (-22,87) = -87,5^\circ$$

$$|I| = \frac{|U|}{|Z|} = \frac{230}{725,8} A = 0,32 A$$

## 2.2 Komplexní impedance pro stav - žhavení



Obr. 2.3 Náhradní obvod

| Číslo měření:         | $L_T$ [H]       | $R_T$ [ $\Omega$ ] | $R_V$ [ $\Omega$ ] |
|-----------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| 1. zářivka 12 (253 V) | 1,14            | 45,01              | 12,49              |
| 2. zářivka 12 (241 V) | 1,18            | 43,90              | 20,11              |
| 3. zářivka 12 (230 V) | 1,22            | 44,05              | 14,80              |
| 4. zářivka 12 (218 V) | 1,27            | 45,19              | 16,17              |
| 5. zářivka 12 (207 V) | 1,30            | 45,61              | 13,01              |
| 1. zářivka 11 (253 V) | 1,08            | 51,19              | 16,95              |
| 2. zářivka 11 (241 V) | 1,17            | 52,81              | 14,55              |
| 3. zářivka 11 (230 V) | 1,23            | 53,93              | 14,21              |
| 4. zářivka 11 (218 V) | 1,27            | 55,00              | 12,26              |
| 5. zářivka 11 (207 V) | 1,30            | 55,95              | 16,14              |
| $\emptyset$           | $1,22 \pm 0,03$ | $49 \pm 2$         | $15,1 \pm 0,8$     |

Tab. 2.3 Parametry náhradního obvodu

### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_{Rvl} = 15,1 \Omega$$

$$Z_L = 49 + j383,3 \Omega$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 4,39 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \Omega = -j725,1 \Omega$$

### Výpočty

$$\mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_{Rv} = 49 + j383,3 + 15,1 \Omega = 64,1 + j383,3 \Omega$$

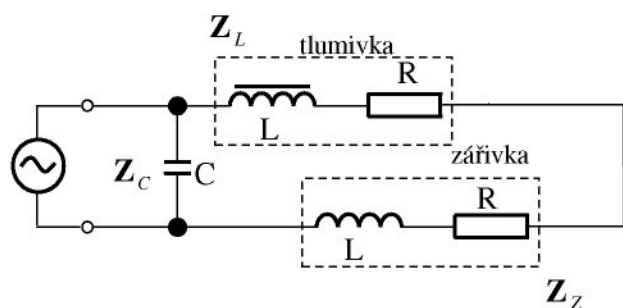
$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{Z}_1 \cdot \mathbf{Z}_C}{\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_C} = \frac{(64,1 + j383,3) \cdot (-j725,1)}{(64,1 + j383,3) + (-j725,1)} \Omega = 278,7 + j760,9 \Omega$$

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{\text{Re}(\mathbf{Z})^2 + \text{Im}(\mathbf{Z})^2} = \sqrt{(278,7)^2 + (760,9)^2} \Omega = 810,3 \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z})}{\text{Re}(\mathbf{Z})} = \arctg \frac{760,9}{278,7} = \arctg (2,73) = 69,9^\circ$$

$$|\mathbf{I}| = \frac{|\mathbf{U}|}{|\mathbf{Z}|} = \frac{230}{810,3} A = 0,28 A$$

### 2.3 Komplexní impedance pro stav - svícení



Obr. 2.4 Náhradní obvod

| Číslo měření:         | $L_T$ [H]       | $R_T$ [ $\Omega$ ] | $L_Z$ [H]       | $R_Z$ [ $\Omega$ ] |
|-----------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| 1. zářivka 12 (253 V) | 1,34            | 47,88              | 0,28            | 102,82             |
| 2. zářivka 12 (241 V) | 1,30            | 45,52              | 0,29            | 106,66             |
| 3. zářivka 12 (230 V) | 1,33            | 45,64              | 0,33            | 125,98             |
| 4. zářivka 12 (218 V) | 1,37            | 46,52              | 0,37            | 140,11             |
| 5. zářivka 12 (207 V) | 1,40            | 48,29              | 0,46            | 172,62             |
| 1. zářivka 11 (253 V) | 1,26            | 54,84              | 0,26            | 97,01              |
| 2. zářivka 11 (241 V) | 1,31            | 55,92              | 0,30            | 112,22             |
| 3. zářivka 11 (230 V) | 1,34            | 56,80              | 0,34            | 127,97             |
| 4. zářivka 11 (218 V) | 1,37            | 57,69              | 0,39            | 148,23             |
| 5. zářivka 11 (207 V) | 1,41            | 61,61              | 0,50            | 191,56             |
| Ø                     | $1,34 \pm 0,02$ | $52 \pm 2$         | $0,35 \pm 0,03$ | $130 \pm 10$       |

Tab. 2.4 Parametry náhradního obvodu

### Hodnoty impedancí v obvodu

$$\mathbf{Z}_L = 52 + j421 \, \Omega$$

$$\mathbf{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} \, \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 4,39 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \, \Omega = -j725,1 \, \Omega$$

$$\mathbf{Z}_Z = 130 + j110 \, \Omega$$

### Výpočty

$$\mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_Z = 52 + j421 + 130 + j110 \, \Omega = 182 + j531 \, \Omega$$

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{Z}_1 \cdot \mathbf{Z}_C}{\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_C} = \frac{(182 + j531) \cdot (-j725,1)}{(182 + j531) + (-j725,1)} \, \Omega = 1351,6 + j716,3 \, \Omega$$

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{\text{Re}(\mathbf{Z})^2 + \text{Im}(\mathbf{Z})^2} = \sqrt{(1351,6)^2 + (716,3)^2} \, \Omega = 1529,7 \, \Omega$$

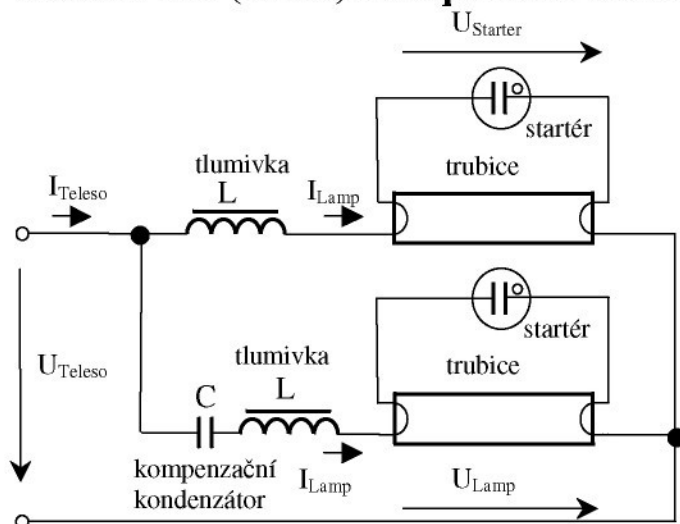
$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z})}{\text{Re}(\mathbf{Z})} = \arctg \frac{716,3}{1351,6} = \arctg (0,53) = 27,9^\circ$$

$$|\mathbf{I}| = \frac{|\mathbf{U}|}{|\mathbf{Z}|} = \frac{230}{1529,7} \, \text{A} = 0,15 \, \text{A}$$

| Provozní stav:  | $ \mathbf{Z}  \, (\Omega)$ | $\varphi \, (^\circ)$ | $ \mathbf{I}  \, (\text{A})$ |
|-----------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------|
| Ohřev startéru  | 725,8                      | -87,5                 | 0,32                         |
| Žhavení         | 810,3                      | 69,9                  | 0,28                         |
| Odskok startéru | -                          | -                     | -                            |
| Svícení         | 1529,7                     | 27,9                  | 0,15                         |
| Vypnutí         | $\infty$                   | -                     | 0                            |

Tab. 2.5 Parametry provozních stavů

### 3 Výpočet parametrů provozních stavů zářivkového svítidla se sériovou (DUO) kompenzací účinníku



Obr. 3.1 Zapojení osvětlovacího tělesa

#### Jednotlivé prvky obvodu

C Kondenzátor: CA 440 3,4  $\mu\text{F} \pm 5\%$

L Tlumivka: DFT 5336 kategorie C

Trubice: Philips Master TL-D 36W/840  $P = 36\text{ W}$ ;  $U = 103\text{ V}$ ;  $I = 0,44\text{ A}$

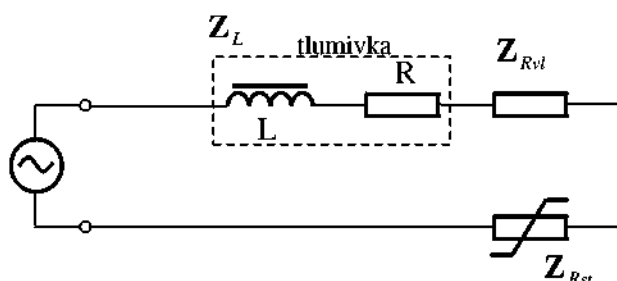
Startér: Philips S10

| Naměřené hodnoty: |                   |                     |                   |                | Vypočtené hodnoty:  |
|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------|----------------|---------------------|
| Zářivka:          | U [V]             | I [A]               | P [W]             | Q [Var]        | $C_K [\mu\text{F}]$ |
| 12.               | 229,1             | 0,2486              | 0,14              | 56,82          | 3,46                |
| 11.               | 229,2             | 0,2506              | 0,12              | 57,32          | 3,49                |
| 10.               | 229,2             | 0,2517              | 0,13              | 57,54          | 3,51                |
| 9.                | 229,2             | 0,2473              | 0,12              | 56,64          | 3,44                |
| 8.                | 229,3             | 0,2521              | 0,10              | 57,79          | 3,50                |
| 7.                | 229,3             | 0,2526              | 0,11              | 57,79          | 3,52                |
| 6.                | 229,2             | 0,2490              | 0,12              | 57,10          | 3,46                |
| 5.                | 229,3             | 0,2482              | 0,13              | 56,88          | 3,45                |
| 4.                | 229,3             | 0,2496              | 0,12              | 57,90          | 3,43                |
| 3.                | 229,3             | 0,2522              | 0,13              | 57,80          | 3,50                |
| 2.                | 229,3             | 0,2524              | 0,12              | 57,78          | 3,51                |
| 1.                | 229,3             | 0,2510              | 0,11              | 57,57          | 3,48                |
| Ø                 | $229,25 \pm 0,02$ | $0,2504 \pm 0,0006$ | $0,121 \pm 0,004$ | $57,4 \pm 0,2$ | $3,479 \pm 0,009$   |

Tab. 3.1 Naměřené hodnoty kondenzátoru

### 3.1 Komplexní impedance pro větev obvodu nekompenzované zářivky

#### 3.1.1 Komplexní impedance pro stav - ohřev startéru



Obr. 3.2 Náhradní obvod

#### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_{Rvl} = 14 \, \Omega$$

$$Z_{Rstart} = 16,5 \, k\Omega$$

$$Z_L = 79 + j723 \, \Omega$$

#### Výpočty

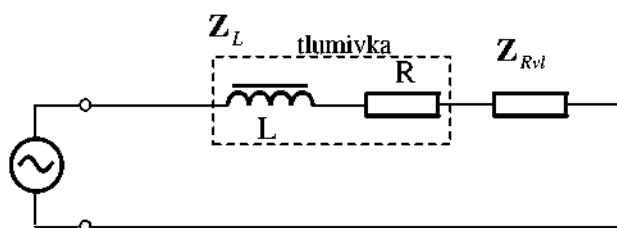
$$Z_A = Z_L + Z_{Rvl} + Z_{Rstart} = 79 + j723 + 14 + 16,5 \cdot 10^3 \, \Omega = 16593 + j723 \, \Omega$$

$$|Z_A| = \sqrt{\text{Re}(Z_A)^2 + \text{Im}(Z_A)^2} = \sqrt{(16593)^2 + (723)^2} \, \Omega = 16608,7 \, \Omega$$

$$\varphi_A = \arctg \frac{\text{Im}(Z_A)}{\text{Re}(Z_A)} = \arctg \frac{723}{16593} = \arctg (0,044) = 2,5^\circ$$

$$|I_A| = \frac{|U_A|}{|Z_A|} = \frac{230}{16608,7} \, A = 13,8 \, mA$$

#### 3.1.2 Komplexní impedance pro stav - žhavení



Obr. 3.3 Náhradní obvod

### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_{Rvl} = 15,1 \, \Omega$$

$$Z_L = 49 + j383,3 \, \Omega$$

### Výpočty

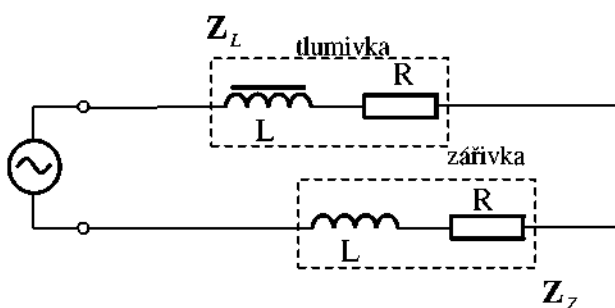
$$Z_A = Z_L + Z_{Rvl} = 49 + j383,3 + 15,1 \, \Omega = 64,1 + j383,3 \, \Omega$$

$$|Z_A| = \sqrt{\text{Re}(Z_A)^2 + \text{Im}(Z_A)^2} = \sqrt{(64,1)^2 + (383,3)^2} \, \Omega = 388,6 \, \Omega$$

$$\varphi_A = \arctg \frac{\text{Im}(Z_A)}{\text{Re}(Z_A)} = \arctg \frac{383,3}{64,1} = \arctg (5,98) = 80,5^\circ$$

$$|I_A| = \frac{|U_A|}{|Z_A|} = \frac{230}{388,6} \, A = 0,59 \, A$$

### 3.1.3 Komplexní impedance pro stav - svícení



Obr. 3.4 Náhradní obvod

### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_L = 52 + j421 \, \Omega$$

$$Z_Z = 130 + j110 \, \Omega$$

### Výpočty

$$Z_A = Z_L + Z_Z = 52 + j421 + 130 + j110 \, \Omega = 182 + j531 \, \Omega$$

$$|Z_A| = \sqrt{\text{Re}(Z_A)^2 + \text{Im}(Z_A)^2} = \sqrt{(182)^2 + (531)^2} \, \Omega = 561,3 \, \Omega$$

$$\varphi_A = \arctg \frac{\text{Im}(Z_A)}{\text{Re}(Z_A)} = \arctg \frac{531}{182} = \arctg (2,92) = 71,1^\circ$$

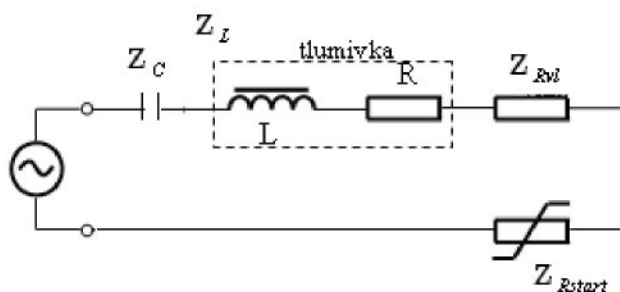
$$|I_A| = \frac{|U_A|}{|Z_A|} = \frac{230}{561,3} \, A = 0,41 \, A$$

| Provozní stav:  | $ Z_A  (\Omega)$ | $\varphi_A (^\circ)$ | $ I_A  (A)$          |
|-----------------|------------------|----------------------|----------------------|
| Ohřev startéru  | 16608,7          | 2,5                  | $13,8 \cdot 10^{-3}$ |
| Žhavení         | 388,6            | 80,5                 | 0,59                 |
| Odskok startéru | -                | -                    | -                    |
| Svícení         | 561,3            | 71,1                 | 0,41                 |
| Vypnutí         | $\infty$         | -                    | 0                    |

Tab. 3.2 Parametry provozních stavů

## 3.2 Komplexní impedance pro větev obvodu sériové kompenzace

### 3.2.1 Komplexní impedance pro stav - ohřev startéru



Obr. 3.5 Náhradní obvod

#### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_{Rvl} = 14 \Omega$$

$$Z_{Rstart} = 16,5 \text{ k}\Omega$$

$$Z_L = 79 + j723 \Omega$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 3,479 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \Omega = -j914,9 \Omega$$

#### Výpočty

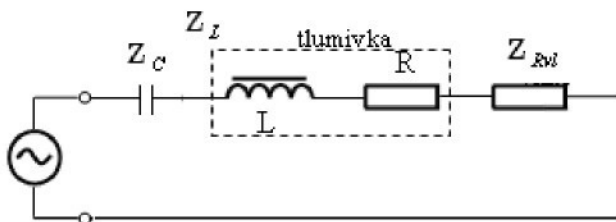
$$Z_B = Z_L + Z_{Rvl} + Z_{Rstart} + Z_C = 79 + j723 + 14 + 16,5 \cdot 10^3 - j914,9 \Omega = 16593 - j191,9 \Omega$$

$$|Z_B| = \sqrt{\text{Re}(Z_B)^2 + \text{Im}(Z_B)^2} = \sqrt{(16593)^2 + (-191,9)^2} \Omega = 16594,1 \Omega$$

$$\varphi_B = \arctg \frac{\text{Im}(Z_B)}{\text{Re}(Z_B)} = \arctg \frac{-191,9}{16593} = \arctg (-0,012) = -0,69^\circ$$

$$|I_B| = \frac{|U_B|}{|Z_B|} = \frac{230}{16594,1} A = 13,9 mA$$

### 3.2.2 Komplexní impedance pro stav - žhavení



Obr.3.6 Náhradní obvod

#### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_{Rvl} = 15,1 \Omega$$

$$Z_L = 49 + j383,3 \Omega$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 3,479 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \Omega = -j914,9 \Omega$$

#### Výpočty

$$Z_B = Z_L + Z_{Rvl} + Z_C = 49 + j383,3 + 15,1 - j914,9 \Omega = 64,1 - j531,6 \Omega$$

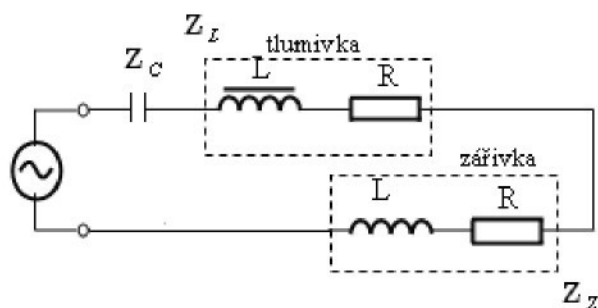
$$|Z_B| = \sqrt{\text{Re}(Z_B)^2 + \text{Im}(Z_B)^2} = \sqrt{(64,1)^2 + (-531,6)^2} \Omega = 535,5 \Omega$$

$$\varphi_B = \arctg \frac{\text{Im}(Z_B)}{\text{Re}(Z_B)} = \arctg \frac{-531,6}{64,1} = \arctg (-8,29) = -83,1^\circ$$

$$|I_B| = \frac{|U_B|}{|Z_B|} = \frac{230}{535,5} A = 0,43 A$$

### 3.2.3 Komplexní impedance pro stav - svícení





Obr. 3.7 Náhradní obvod

### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_L = 52 + j421 \, \Omega$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \, \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 3,479 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \, \Omega = -j914,9 \, \Omega$$

$$Z_Z = 130 + j110 \, \Omega$$

### Výpočty

$$Z_B = Z_L + Z_Z + Z_C = 52 + j421 + 130 + j110 - j914,9 \, \Omega = 182 - j383,9 \, \Omega$$

$$|Z_B| = \sqrt{\text{Re}(Z_B)^2 + \text{Im}(Z_B)^2} = \sqrt{(182)^2 + (-383,9)^2} \, \Omega = 424,9 \, \Omega$$

$$\varphi_B = \arctg \frac{\text{Im}(Z_B)}{\text{Re}(Z_B)} = \arctg \frac{-383,9}{182} = \arctg (-2,11) = -64,6^\circ$$

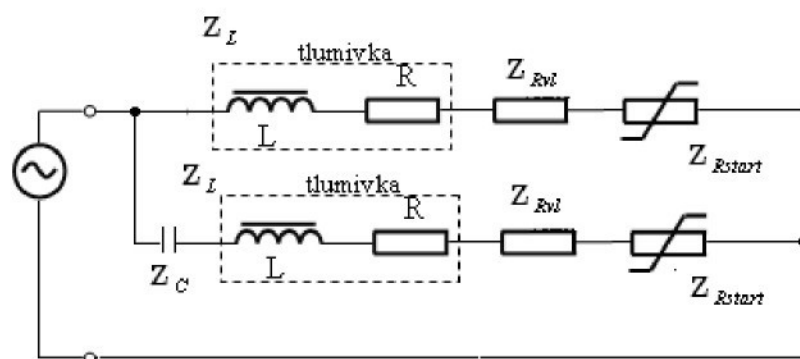
$$|I_B| = \frac{|U_B|}{|Z_B|} = \frac{230}{424,9} \, A = 0,54 \, A$$

| Provozní stav:  | $ Z_B  \, (\Omega)$ | $\varphi_B \, (^\circ)$ | $ I_B  \, (A)$       |
|-----------------|---------------------|-------------------------|----------------------|
| Ohřev startéru  | 16594,1             | -0,69                   | $13,9 \cdot 10^{-3}$ |
| Žhavení         | 535,5               | -83,1                   | 0,43                 |
| Odskok startéru | -                   | -                       | -                    |
| Svícení         | 424,9               | -64,6                   | 0,54                 |
| Vypnutí         | $\infty$            | -                       | 0                    |

Tab. 3.3 Parametry provozních stavů

## 3.3 Komplexní impedance DUO zapojení

### 3.3.1 Komplexní impedance pro stav - ohřev startéru



Obr. 3.8 Náhradní obvod

### Výpočty

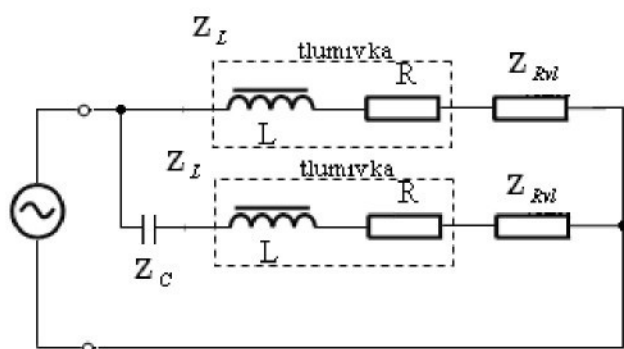
$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{Z}_A \cdot \mathbf{Z}_B}{\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_B} = \frac{(16593 + j723) \cdot (16593 - j191,9)}{(16593 + j723) + (16593 - j191,9)} \Omega = 8302,8 - j132,7 \Omega$$

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{\text{Re}(\mathbf{Z})^2 + \text{Im}(\mathbf{Z})^2} = \sqrt{(8302,8)^2 + (-132,7)^2} \Omega = 8303,9 \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z})}{\text{Re}(\mathbf{Z})} = \arctg \frac{-132,7}{8302,8} = \arctg (-0,016) = -0,92^\circ$$

$$|\mathbf{I}| = \frac{|\mathbf{U}|}{|\mathbf{Z}|} = \frac{230}{8303,9} \text{ A} = 27,7 \text{ mA}$$

### 3.3.2 Komplexní impedance pro stav - žhavení



Obr. 3.9 Náhradní obvod

### Výpočty

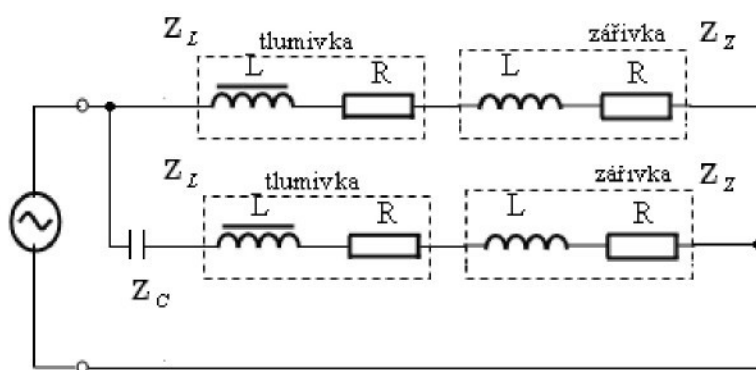
$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{Z}_A \cdot \mathbf{Z}_B}{\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_B} = \frac{(64,1 + j383,3) \cdot (64,1 - j531,6)}{(64,1 + j383,3) + (64,1 - j531,6)} \Omega = 730,2 + j770,5 \Omega$$

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{\text{Re}(\mathbf{Z})^2 + \text{Im}(\mathbf{Z})^2} = \sqrt{(730,2)^2 + (770,5)^2} \Omega = 1061,5 \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z})}{\text{Re}(\mathbf{Z})} = \arctg \frac{770,5}{730,2} = \arctg (1,06) = 46,7^\circ$$

$$|\mathbf{I}| = \frac{|\mathbf{U}|}{|\mathbf{Z}|} = \frac{230}{1061,5} \text{ A} = 0,22 \text{ A}$$

### 3.3.3 Komplexní impedance pro stav - svícení



Obr. 3.10 Náhradní obvod

#### Výpočty

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{Z}_A \cdot \mathbf{Z}_B}{\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_B} = \frac{(182 + j531) \cdot (182 - j383,9)}{(182 + j531) + (182 - j383,9)} \Omega = 585,2 - j162,9 \Omega$$

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{\text{Re}(\mathbf{Z})^2 + \text{Im}(\mathbf{Z})^2} = \sqrt{(585,2)^2 + (-162,9)^2} \Omega = 607,4 \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z})}{\text{Re}(\mathbf{Z})} = \arctg \frac{-162,9}{585,2} = \arctg (-0,28) = -15,6^\circ$$

$$|\mathbf{I}| = \frac{|\mathbf{U}|}{|\mathbf{Z}|} = \frac{230}{607,4} \text{ A} = 0,38 \text{ A}$$

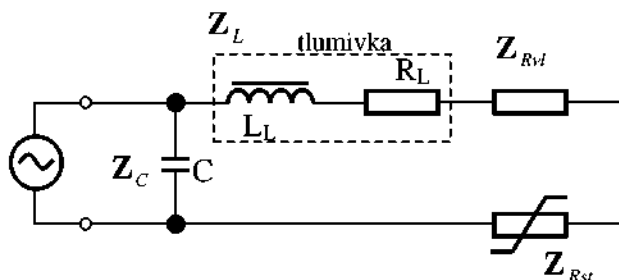
|                |                         |                    |                           |
|----------------|-------------------------|--------------------|---------------------------|
| Provozní stav: | $ \mathbf{Z}  (\Omega)$ | $\varphi (^\circ)$ | $ \mathbf{I}  (\text{A})$ |
|----------------|-------------------------|--------------------|---------------------------|

|                 |          |       |                      |
|-----------------|----------|-------|----------------------|
| Ohřev startéru  | 8303,9   | -0,92 | $27,7 \cdot 10^{-3}$ |
| Žhavení         | 1061,5   | 46,7  | 0,22                 |
| Odskok startéru | -        | -     | -                    |
| Svícení         | 607,4    | -15,6 | 0,38                 |
| Vypnutí         | $\infty$ | -     | 0                    |

*Tab. 3.4 Parametry provozních stavů*

## 2 Výpočet parametrů provozních stavů zářivkového svítidla s paralelní kompenzací

### 2.1 Komplexní impedance pro stav - ohřev startéru



Tab. 2.1 Náhradní obvod

#### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_{Rvl} = R_{vl} = 8,7 \, \Omega$$

$$Z_{Rst} = R_{st} = 16,1 \, k\Omega$$

$$Z_L = R_L + j\omega L_L \, \Omega = 103 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2,33 \, \Omega = 103 + j732 \, \Omega$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \, \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 4,39 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \, \Omega = -j725,1 \, \Omega$$

#### Výpočty

$$Z_1 = Z_L + Z_{Rvl} + Z_{Rst} = 103 + j732 + 8,7 + 16,1 \cdot 10^3 \, \Omega = 16211,7 + j732 \, \Omega$$

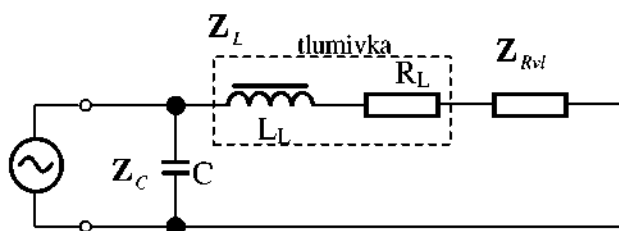
$$Z = \frac{Z_1 \cdot Z_C}{Z_1 + Z_C} = \frac{(16211,7 + j732) \cdot (-j725,1)}{(16211,7 + j732) + (-j725,1)} \, \Omega = 32,4 - j725,1 \, \Omega$$

$$|Z| = \sqrt{\text{Re}(Z)^2 + \text{Im}(Z)^2} = \sqrt{(32,4)^2 + (-725,1)^2} \, \Omega = 725,8 \, \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(Z)}{\text{Re}(Z)} = \arctg \frac{-725,1}{32,4} = \arctg (-22,38) = -87,4^\circ$$

$$|I| = \frac{|U|}{|Z|} = \frac{230}{725,8} \, A = 0,32 \, A$$

## 2.2 Komplexní impedance pro stav - žhavení



Obr. 2.2 Náhradní obvod

### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_{Rvl} = R_{vl} = 15,2 \, \Omega$$

$$Z_L = R_L + j\omega L_L \, \Omega = 54,13 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,227 \, \Omega = 54,13 + j385,5 \, \Omega$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \, \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 4,39 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \, \Omega = -j725,1 \, \Omega$$

### Výpočty

$$Z_1 = Z_L + Z_{Rvl} = 54,13 + j385,5 + 15,2 \, \Omega = 69,3 + j385,5 \, \Omega$$

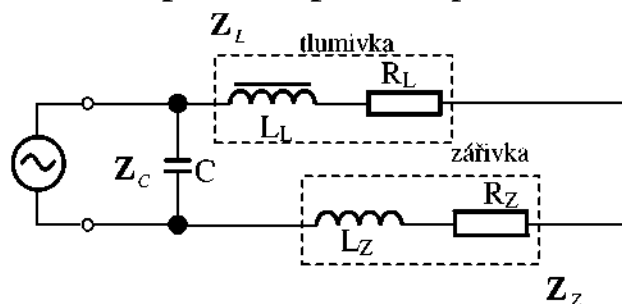
$$Z = \frac{Z_1 \cdot Z_C}{Z_1 + Z_C} = \frac{(69,3 + j385,5) \cdot (-j725,1)}{(69,3 + j385,5) + (-j725,1)} \, \Omega = 303,3 + j761,2 \, \Omega$$

$$|Z| = \sqrt{\text{Re}(Z)^2 + \text{Im}(Z)^2} = \sqrt{(303,3)^2 + (761,2)^2} \, \Omega = 819,4 \, \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(Z)}{\text{Re}(Z)} = \arctg \frac{761,2}{303,3} = \arctg (2,51) = 68,3^\circ$$

$$|I| = \frac{|U|}{|Z|} = \frac{230}{819,4} \, A = 0,28 \, A$$

## 2.3 Komplexní impedance pro stav - svícení



Obr. 2.3 Náhradní obvod

### Hodnoty impedancí v obvodu

$$\mathbf{Z}_L = R_L + j\omega L_L \quad \Omega = 57,06 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,342 \quad \Omega = 57,06 + j421,6 \quad \Omega$$

$$\mathbf{Z}_Z = R_Z + j\omega L_Z \quad \Omega = 132 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,352 \quad \Omega = 132 + j110,6 \quad \Omega$$

$$\mathbf{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} \quad \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 4,39 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \quad \Omega = -j725,1 \quad \Omega$$

### Výpočty

$$\mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_Z = 57,06 + j421,6 + 132 + j110,6 \quad \Omega = 189,1 + j532,2 \quad \Omega$$

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{Z}_1 \cdot \mathbf{Z}_C}{\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_C} = \frac{(189,1 + j532,2) \cdot (-j725,1)}{(189,1 + j532,2) + (-j725,1)} \quad \Omega = 1362,5 + j664,8 \quad \Omega$$

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{\text{Re}(\mathbf{Z})^2 + \text{Im}(\mathbf{Z})^2} = \sqrt{(1362,5)^2 + (664,8)^2} \quad \Omega = 1516 \quad \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z})}{\text{Re}(\mathbf{Z})} = \arctg \frac{664,8}{1362,5} = \arctg (0,49) = 26,1^\circ$$

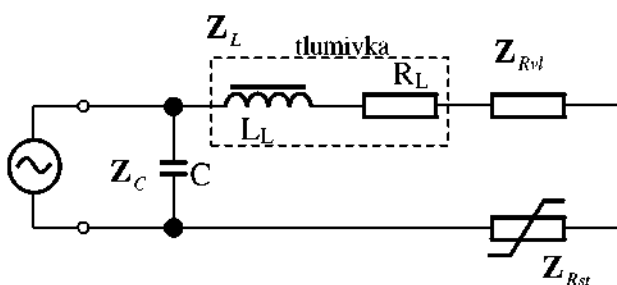
$$|\mathbf{I}| = \frac{|\mathbf{U}|}{|\mathbf{Z}|} = \frac{230}{1516} \quad A = 0,15 \quad A$$

## 4 Komplexní impedance provozních stavů zářivkového svítidla s paralelní kompenzací

### 4.1 Parametry prvků pro výpočet komplexních impedancí náhradních obvodů základních stavů rozsvěcování zářivky

Komplexní impedance náhradních obvodů jednotlivých stavů jsou počítány z průměru naměřených a vypočtených hodnot kondenzátoru uvedených v kapitole 3.1.1 a hodnot tlumivky, vláken, startéru a zářivky z kapitoly 3.1.2. Postup výpočtu v této kapitole je znázorněn z průměru hodnot dvou zářivek a následně v tabulce 4.1 jsou uvedené pro porovnání výsledné parametry provozních stavů vypočteny i pro dvě zářivky zvlášť.

### 4.2 Komplexní impedance pro stav - ohřev startéru



Obr. 4.1 Náhradního obvod pro stav – ohřev startéru pro paralelní kompenzací účinníku zářivky

#### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_{Rvl} = R_{vl} = 14 \, \Omega \text{ (pro 2 vlákna)}$$

$$Z_{Rst} = R_{st} = 16,6 \, k\Omega$$

$$Z_L = R_L + j\omega L_L \, \Omega = 83 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2,33 \, \Omega = 83 + j732 \, \Omega$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \, \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 4,39 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \, \Omega = -j725,1 \, \Omega$$

#### Výpočty

$$Z_1 = Z_L + Z_{Rvl} + Z_{Rst} = 83 + j732 + 14 + 16,6 \cdot 10^3 \, \Omega = 16697 + j732 \, \Omega$$

$$Z = \frac{Z_1 \cdot Z_C}{Z_1 + Z_C} = \frac{(16697 + j732) \cdot (-j725,1)}{(16697 + j732) + (-j725,1)} \, \Omega = 31,5 - j725,1 \, \Omega$$

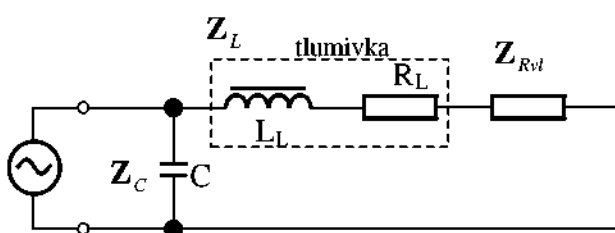


$$|Z| = \sqrt{\operatorname{Re}(Z)^2 + \operatorname{Im}(Z)^2} = \sqrt{(31,5)^2 + (-725,1)^2} \Omega = 725,8 \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{\operatorname{Im}(Z)}{\operatorname{Re}(Z)} = \arctg \frac{-725,1}{31,5} = \arctg (-23,02) = -87,5^\circ$$

$$|I| = \frac{|U|}{|Z|} = \frac{230}{725,8} A = 0,32 A$$

### 4.3 Komplexní impedance pro stav - žhavení



Obr. 4.2 Náhradního obvod pro stav – žhavení pro paralelní kompenzací účinníku zářivky

#### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_{Rvl} = R_{vl} = 15,3 \Omega \text{ (pro 2 vlákna)}$$

$$Z_L = R_L + j\omega L_L \Omega = 49 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,225 \Omega = 49 + j384,8 \Omega$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 4,39 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \Omega = -j725,1 \Omega$$

#### Výpočty

$$Z_1 = Z_L + Z_{Rvl} = 49 + j384,8 + 15,3 \Omega = 64,3 + j384,8 \Omega$$

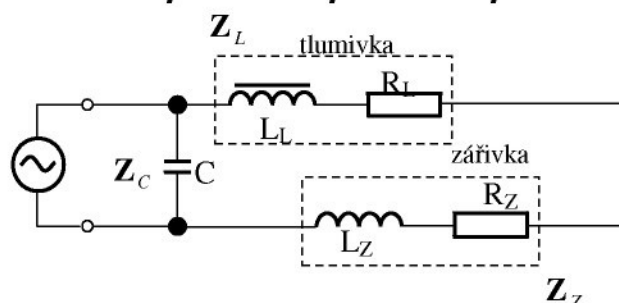
$$Z = \frac{Z_1 \cdot Z_C}{Z_1 + Z_C} = \frac{(64,3 + j384,8) \cdot (-j725,1)}{(64,3 + j384,8) + (-j725,1)} \Omega = 281,9 + j766,7 \Omega$$

$$|Z| = \sqrt{\operatorname{Re}(Z)^2 + \operatorname{Im}(Z)^2} = \sqrt{(281,9)^2 + (766,7)^2} \Omega = 816,9 \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{\operatorname{Im}(Z)}{\operatorname{Re}(Z)} = \arctg \frac{766,7}{281,9} = \arctg (2,72) = 69,8^\circ$$

$$|I| = \frac{|U|}{|Z|} = \frac{230}{816,9} A = 0,28 A$$

#### 4.4 Komplexní impedance pro stav - svícení



Obr. 4.3 Náhradního obvodu pro stav – svícení pro paralelní kompenzací účinníku zářivky

##### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_L = R_L + j\omega L_L \quad \Omega = 52 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,34 \quad \Omega = 52 + j421 \quad \Omega$$

$$Z_Z = R_Z + j\omega L_Z \quad \Omega = 130,3 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,347 \quad \Omega = 130,3 + j109 \quad \Omega$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \quad \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 4,39 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \quad \Omega = -j725,1 \quad \Omega$$

##### Výpočty

$$Z_1 = Z_L + Z_Z = 52 + j421 + 130,3 + j109 \quad \Omega = 182,3 + j530 \quad \Omega$$

$$Z = \frac{Z_1 \cdot Z_C}{Z_1 + Z_C} = \frac{(182,3 + j530) \cdot (-j725,1)}{(182,3 + j530) + (-j725,1)} \quad \Omega = 1344,3 + j713,6 \quad \Omega$$

$$|Z| = \sqrt{\text{Re}(Z)^2 + \text{Im}(Z)^2} = \sqrt{(1344,3)^2 + (713,6)^2} \quad \Omega = 1522 \quad \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(Z)}{\text{Re}(Z)} = \arctg \frac{713,6}{1344,3} = \arctg (0,53) = 27,9^\circ$$

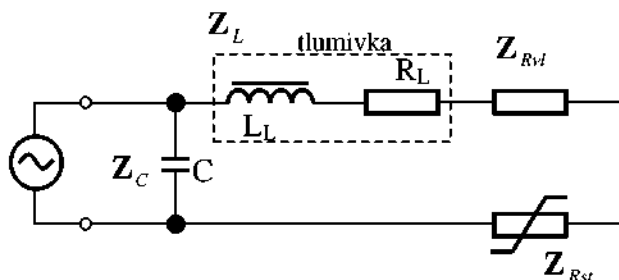
$$|I| = \frac{|U|}{|Z|} = \frac{230}{1522} \quad A = 0,15 \quad A$$

Tab. 4.1 Parametry provozních stavů zářivkového svítidla s paralelní kompenzací účinníku

| Provozní stav:  | Zářivky 12. a 11.     |                           |              | Zářivka 11.           |                           |              | Zářivka 12.           |                           |              |
|-----------------|-----------------------|---------------------------|--------------|-----------------------|---------------------------|--------------|-----------------------|---------------------------|--------------|
|                 | $ Z $<br>( $\Omega$ ) | $\varphi$<br>( $^\circ$ ) | $ I $<br>(A) | $ Z $<br>( $\Omega$ ) | $\varphi$<br>( $^\circ$ ) | $ I $<br>(A) | $ Z $<br>( $\Omega$ ) | $\varphi$<br>( $^\circ$ ) | $ I $<br>(A) |
| Ohřev startéru  | 725,8                 | -87,5                     | 0,32         | 725,8                 | -87,4                     | 0,32         | 725,8                 | -87,6                     | 0,32         |
| Žhavení         | 816,9                 | 69,8                      | 0,28         | 819,4                 | 68,3                      | 0,28         | 813,3                 | 71,2                      | 0,28         |
| Odskok startéru | -                     | -                         | -            | -                     | -                         | -            | -                     | -                         | -            |
| Svícení         | 1522                  | 27,9                      | 0,15         | 1516                  | 26,1                      | 0,15         | 1796                  | 30,1                      | 0,13         |
| Vypnutí         | $\infty$              | -                         | 0            | $\infty$              | -                         | 0            | $\infty$              | -                         | 0            |

## 2 Výpočet parametrů provozních stavů zářivkového svítidla s paralelní kompenzací

### 2.1 Komplexní impedance pro stav - ohřev startéru



Tab. 2.1 Parametry náhradního obvodu

#### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_{Rvl} = R_{vl} = 20 \, \Omega$$

$$Z_{Rst} = R_{st} = 17 \, k\Omega$$

$$Z_L = R_L + j\omega L_L \, \Omega = 63 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2,33 \, \Omega = 63 + j732 \, \Omega$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \, \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 4,39 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \, \Omega = -j725,1 \, \Omega$$

#### Výpočty

$$Z_1 = Z_L + Z_{Rvl} + Z_{Rst} = 63 + j732 + 20 + 17 \cdot 10^3 \, \Omega = 17083 + j732 \, \Omega$$

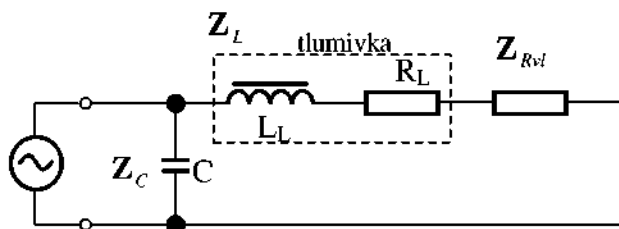
$$Z = \frac{Z_1 \cdot Z_C}{Z_1 + Z_C} = \frac{(17083 + j732) \cdot (-j725,1)}{(17083 + j732) + (-j725,1)} \, \Omega = 30,8 - j725,1 \, \Omega$$

$$|Z| = \sqrt{\text{Re}(Z)^2 + \text{Im}(Z)^2} = \sqrt{(30,8)^2 + (-725,1)^2} \, \Omega = 725,8 \, \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(Z)}{\text{Re}(Z)} = \arctg \frac{-725,1}{30,8} = \arctg(-23,5) = -87,6^\circ$$

$$|I| = \frac{|U|}{|Z|} = \frac{230}{725,8} \, A = 0,32 \, A$$

## 2.2 Komplexní impedance pro stav - žhavení



Obr. 2.2 Náhradní obvod

### Hodnoty impedancí v obvodu

$$Z_{Rvl} = R_{vl} = 15,4 \, \Omega$$

$$Z_L = R_L + j\omega L_L \, \Omega = 44,35 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,222 \, \Omega = 44,35 + j383,9 \, \Omega$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \, \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 4,39 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \, \Omega = -j725,1 \, \Omega$$

### Výpočty

$$Z_1 = Z_L + Z_{Rvl} = 44,35 + j383,9 + 15,4 \, \Omega = 59,8 + j383,9 \, \Omega$$

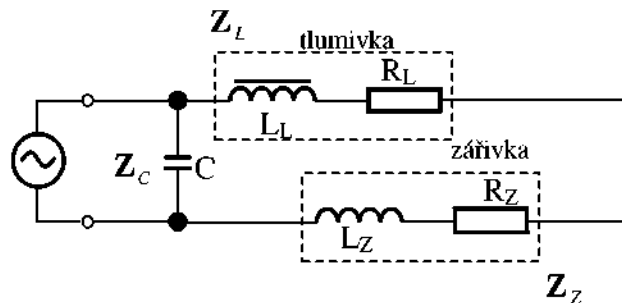
$$Z = \frac{Z_1 \cdot Z_C}{Z_1 + Z_C} = \frac{(59,8 + j383,9) \cdot (-j725,1)}{(59,8 + j383,9) + (-j725,1)} \, \Omega = 262 + j769,9 \, \Omega$$

$$|Z| = \sqrt{\text{Re}(Z)^2 + \text{Im}(Z)^2} = \sqrt{(262)^2 + (769,9)^2} \, \Omega = 813,3 \, \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(Z)}{\text{Re}(Z)} = \arctg \frac{769,9}{262} = \arctg (2,94) = 71,2^\circ$$

$$|I| = \frac{|U|}{|Z|} = \frac{230}{813,3} \, A = 0,28 \, A$$

## 2.3 Komplexní impedance pro stav - svícení



Obr. 2.3 Náhradní obvod

### Hodnoty impedancí v obvodu

$$\mathbf{Z}_L = R_L + j\omega L_L \text{ } \Omega = 45,97 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,338 \text{ } \Omega = 45,97 + j420,3 \text{ } \Omega$$

$$\mathbf{Z}_Z = R_Z + j\omega L_Z \text{ } \Omega = 128,4 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,342 \text{ } \Omega = 128,4 + j107,4 \text{ } \Omega$$

$$\mathbf{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} \text{ } \Omega = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 4,39 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \text{ } \Omega = -j725,1 \text{ } \Omega$$

### Výpočty

$$\mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_Z = 45,97 + j420,3 + 128,4 + j107,4 \text{ } \Omega = 174,4 + j527,7 \text{ } \Omega$$

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{Z}_1 \cdot \mathbf{Z}_C}{\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_C} = \frac{(174,4 + j527,7) \cdot (-j725,1)}{(174,4 + j527,7) + (-j725,1)} \text{ } \Omega = 1321,6 + j770,8 \text{ } \Omega$$

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{\text{Re}(\mathbf{Z})^2 + \text{Im}(\mathbf{Z})^2} = \sqrt{(1321,6)^2 + (770,8)^2} \text{ } \Omega = 1795,5 \text{ } \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(\mathbf{Z})}{\text{Re}(\mathbf{Z})} = \arctg \frac{770,8}{1321,6} = \arctg (0,58) = 30,1^\circ$$

$$|\mathbf{I}| = \frac{|\mathbf{U}|}{|\mathbf{Z}|} = \frac{230}{1795,5} \text{ A} = 0,13 \text{ A}$$