



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

Pedagogická fakulta fakulta

Katedra aplikované fyziky a techniky

Bakalářská práce

Tvorba elektronického kurzu – Astronomie

Vypracoval: Tomáš Luksch

Vedoucí práce: Doc. RNDr. Josef Blažek, CSc

České Budějovice 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 27. dubna 2016

Tomáš Luksch

Anotace

Cílem bakalářské práce je tvorba výukových materiálů k předmětu Astronomie vyučovanému na pedagogických fakultách. Tyto výukové materiály zahrnují prezentace, použitelné v průběhu výuky, zároveň zahrnují i podrobnější texty určené k individuální výuce. Součástí práce je i vyhledání dalších zdrojů zaměřených na téma astronomie.

Klíčová slova

astronomie, výuka astronomie, elektronické zdroje, prezentace

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to create learning materials for Astronomy taught at the faculties of education. Created materials will have form of presentations usable during lessons and more detailed texts designed for individual studies. Another element of the thesis is searching for additional resources also specialized in astronomy field.

Keywords

Astronomy, education, materials, electronical resources, presentations

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Doc. RNDr. Josefu Blažkovi, CSc za rady při psaní a tvorbě této práce a hlavně za poskytnutí vlastních studijních materiálů, které jsem mohl použít. Dále bych chtěl poděkovat rodině za zajištění jak materiálního, tak psychického zázemí, bez kterého bych se k psaní bakalářské práce ani nedostal. Nakonec můj dík patří i kruhu přátel, a to nejen za technickou podporu, ale i rady týkající se psaní práce.

Obsah

Úvod	8
1 Vybrané kapitoly z historie astronomie	9
1.1 Počátky astronomie	9
1.2 Antika	11
1.2.1 Tháles z Milétu	11
1.2.2 Pýthagorejci	11
1.2.3 Aristotelés ze Stageiry	12
1.2.4 Aristarchos ze Samu	12
1.2.5 Apollónios z Pergy	13
1.2.6 Hipparchos z Nikaie	13
1.2.7 Claudius Ptolemaios	14
1.3 Novověk	15
1.3.1 Mikoláš Koperník	15
1.3.2 Tycho Brahe	15
1.3.3 Galileo Galilei	16
1.3.4 Johannes Kepler	17
2 Astronomické souřadnice	18
2.1 Obzorníkové souřadnice	18
2.2 Rovníkové souřadnice prvního a druhého druhu	19
2.3 Další druhy souřadnic	19
3 Nebeská mechanika	21
3.1 Keplerovy zákony	21
3.1.1 První Keplerův zákon (Nová astronomie, 1609)	21
3.1.2 Druhý Keplerův zákon (Nová astronomie, 1609)	24
3.1.3 Třetí Keplerův zákon (Harmonie světa, 1619)	26
3.2 Newtonův gravitační zákon (Matematické základy přírodní filozofie, 1687)	26
3.2.1 Pohyb v radiálním poli	27
3.2.2 Třetí Keplerův zákon odvozený pro pohyb po kružnici z Newtonova gravitačního zákona	28
4 Sluneční soustava	29
4.1 Uspořádání	29
4.2 Slunce	30
4.3 Kamenné planety	31
4.3.1 Merkur	31

4.3.2	Venuše	32
4.3.3	Mars	32
4.4	Hlavní pás asteroidů (planetek)	34
4.4.1	Titius-Bodeovo pravidlo	34
4.5	Vnější planety	35
4.5.1	Jupiter	35
4.5.2	Saturn	37
4.5.3	Uran	38
4.5.4	Neptun	40
4.6	Kuiperův pás	41
4.6.1	Pluto	41
4.6.2	Trpasličí planety Eris a Makemake	41
4.7	Rozptýlený disk	42
4.8	Oortův oblak	42
5	Klasifikace hvězd	43
5.1	Hvězdná spektra	43
5.1.1	Diskrétní spektrum	43
5.1.2	Spojité spektrum	43
5.1.3	Absorpční a emisní čáry	44
5.2	Hvězdná velikost (magnituda)	44
5.2.1	Zdánlivá hvězdná velikost	44
5.2.2	Absolutní hvězdná velikost	45
5.3	Hertzsprungův-Russellův diagram (HR diagram)	45
5.3.1	Oblasti HR diagramu	46
6	Vývoj hvězd	47
6.1	Vznik hvězdy	47
6.2	Hvězda na hlavní posloupnosti	47
6.2.1	pp - cyklus	48
6.2.2	CNO cyklus	48
6.3	Hvězda po opuštění HP	48
6.3.1	Málo hmotné hvězdy ($0,08M_S \lesssim M \lesssim 0,5M_S$)	48
6.3.2	Středně hmotné hvězdy ($0,5M_S \lesssim M \lesssim 8M_S$)	49
6.3.3	Těžké hvězdy ($M > 8M_S$)	49
6.4	Kompaktní hvězdy	50
6.4.1	Bílí trpaslíci (BT)	50
6.4.2	Neutronové hvězdy (NH)	51
6.4.3	Černé díry (CD)	52

7 Kosmologie	54
7.1 EPOCHY PO VELKÉM TŘESKU	57
7.2 PERIODA INFLACE	59
8 Galaxie	60
8.1 Cefeidy	61
8.2 Klasifikace galaxií	61
8.3 Mléčná dráha	63
8.4 Distribuce galaxií do větších skupin	63
8.5 Místní skupina galaxií	64
8.6 Kupy galaxií	65
8.7 Aktivní galaxie	65
Závěr	68
Použitá literatura a zdroje	69
Seznam obrázků	73
Seznam tabulek	74
Přílohy	75

Úvod

Astronomie je věda zabývající se převážně jevy za hranicemi zemské atmosféry. Zabývá se tedy vesmírnými tělesy, vesmírnými jevy, galaxiemi atd. V poslední letech zájem o astronomii stoupá jak v odborných, tak ve veřejných kruzích, a to nejen díky literatuře a filmové produkci využívající stále častěji vědecké poznatky z této oblasti (ač se většina těchto děl řadí stále do odvětví vědecké fikce), ale i díky stále rostoucí mediální propagaci vědeckých úspěchů a rozvoji na poli astronomie a dalších vesmírných věd. Z poslední doby jmenujme např. vývoj znovupoužitelných nosných raket, vesmírnou turistiku, plány pro těžbu vesmírných těles, průzkum Marsu,...

Cílem této práce je vytvořit studijní materiály pro předmět Astronomie vyučovaný na pedagogických fakultách, a to jak ve formě podrobnějších materiálů určených k samostudiu, tak i ve formě prezentací, které by vyučující mohl použít při svých přednáškách.

Práce zahrnuje stručný pohled do počátků starověké astronomie a postupně přes antiku, středověk a novověk přechází až k moderním astronomickým poznatkům zahrnujícím astronomické souřadnice, Keplerovy zákony, pohled na sluneční soustavu, dále klasifikaci a vývoj hvězd a vývoj vesmíru. Zakončená je kapitolou týkající se galaxií.

Ohled byl brán i na obsah jednotlivých kapitol, který by měl být dostatečně srozumitelný a zároveň by měl jít do hloubky v míře odpovídající přípravě budoucích učitelů fyziky pro 2. stupeň ZŠ.

1 Vybrané kapitoly z historie astronomie

1.1 Počátky astronomie

V prvním období vývoje astronomie se nejednalo o vědu v dnešním slova smyslu. Astronomické znalosti byly získávány dílčím pozorováním oblohy a uvědomováním si zákonitostí, podle kterých se nebeská tělesa řídí. Samotné pozorování oblohy a určování času na jejím základě bylo zpočátku důležité hlavně z hlediska zemědělství.

Časem lidé dospěli ke zjištění, že Slunce i Měsíc se oproti hvězdám pohybují rozdílně a mění svou polohu. Strídání dne a noci pak vedlo ke vzniku první časové jednotky. Dle změn fází Měsíce byla zavedena delší časová jednotka trvající od úplňku k úplňku – měsíc.

Později lidstvo přešlo k ročnímu kalendáři, ačkoli přesný pohyb Slunce a trvání samotného roku byly upřesňovány postupně, pravděpodobně i v návaznosti na rozvoji zemědělství.

Velmi dobré zemědělské podmínky byly hlavně v okolí velkých řek, kde vznikaly první větší civilizace – v okolí Nilu, Žluté řeky, Jang-c-tiangu, Eufratu a Tigridu. Po skončení malé doby ledové se astronomie začala rozvíjet taktéž na americkém kontinentu a v západní Evropě.

V té se zemědělství začalo rozvíjet s ústupem malé doby ledové a tehdy začalo docházet k výstavbě kamenných pozorovaten. Ty byly stavěny kolem roku dva tisíce př. n. l. převážně v Anglii, Francii, Německu, Skotsku a Španělsku. Nejznámější takovouto pozorovatelnou je nepochybně anglický Stonehenge (Obr. 1), kde jsou pomocí kamenných kvádrů zachyceny základní směry východů a západů Slunce a Měsíce, čímž byly nalezeny body obratu ročního cyklu a pomocí toho mohl být uspořádán kalendář určený pro zemědělské potřeby. Během dalších let pak byl Stonehenge ještě zdokonalován[1].



Obrázek 1: Stonehenge

Převzato z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Stonehenge>

V Mezopotámii v okolí posledních dvou jmenovaných řek vznikla kolem roku 700 př. n. l. chaldejská civilizace, která ve svých městech stavěla rozlehlé observatoře či věže zvané zikkuraty. Tamější astronomové využívali pozorování Měsíce, Slunce, hvězd a později i planet k rozvoji astrologie a také k chronologii. Pozorování Měsíce vedlo k tvorbě měsíčního kalendáře, pomocí něhož se dalo vypočítat trvání roku, který zde měl 354 dnů. Další metodou výpočtu trvání roku bylo pozorování heliaktických (heliakický, heliakální či heliaktický východ je u dané hvězdy či planety určen dnem, kdy ji poprvé po delší době lze spatřit nad východním obzorem, těsně před východem Slunce) východů hvězd, které se opakují přibližně po tři sta šedesáti pěti dnech. Časový rozdíl tohoto tropického roku a měsíčního roku byl vyřešen vložением přestupních měsíců.

Chaldejští výsledky pozorování zapisovali pomocí klínového písma na hliněných tabulkách, z nichž se některé dochovaly dodnes. Pomocí výpočtů z těchto záznamů pak bylo možno předpovídat polohy Měsíce a Slunce či doby oběhů nejjasnějších planet. Tato pozorování byla také zpracovávána do tabulek pomocí úhlové míry.

Egyptská astronomie se váže na sledování záplav Nilu, které se Egypt'ané snažili předpovídat. K pozorování oblohy používali budovy, které zároveň sloužily k náboženským účelům. Orientace samotných staveb (pro příklad pyramid v Gíze) také ukazuje na vysokou míru důležitosti přisuzované nebeským tělesům.

Egypt'ané hvězdy rozdělovali do třiceti šesti souhvězdí, která pro ně v podstatě tvořila velký roční kalendář. Egyptské astronomické poznatky se dochovaly hlavně v podobě hieroglyfů a nástěnných nápisů.

Počátky čínské astronomie sahají do třetího tisíciletí př. n. l.. Z této doby jsou dochované záznamy o slunečním zatmění a o pozorování komet. Čínská astronomie se zaměřovala hlavně na pozorování a tvorbu kalendáře. Nejprve byl používán měsíční kalendář o tři sta padesáti čtyřech dnech rozdělených na dvanáct měsíců po dvaceti devíti a půl dnech. Po čase však z pozorování Slunce určili délku roku na tři sta šedesát pět a čtvrt dne[1].

Na americkém kontinentě mají hlavní zásluhu na rozvoji astronomie Mayové a Inkové. První jmenovaní budovali rozsáhlé observatoře, s jejichž pomocí byli schopni sestavit roční kalendář[1]. Mayové zachycovali průběh času pomocí čísel a cyklů. Cykly byly dva – oddělené, jeden čítal dvě stě šedesát dnů, druhý tři sta šedesát pět. Mayové byli schopni předpovídat zatmění Slunce i Měsíce.

Inkové měli středisko Machu Picchu, ve kterém se nacházel gnomón, podle jehož polohy a délky stínu se dalo určit roční období a čas[1].

1.2 Antika

1.2.1 Tháles z Milétu

Thalés se narodil asi v roce 640 před naším letopočtem. Procestoval celý Egypt a seznámil se se státnickými a přírodovědeckými poznatky té doby, jakožto i s astronomií východu. Vymyslel řadu matematických pouček (např. Thalétova věta) a je považován za praotce antické a moderní filosofie.

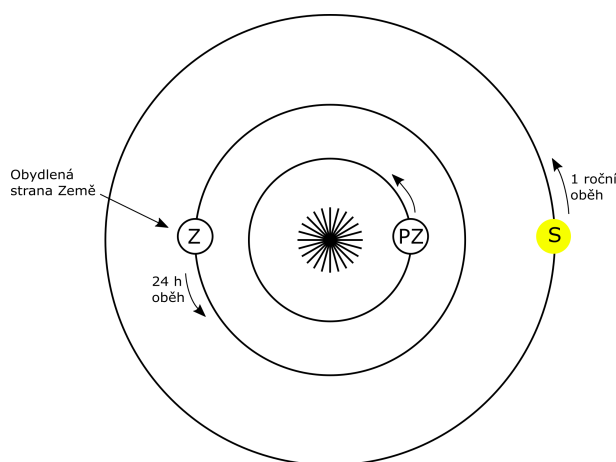
Tehdejší filosofie se do značné míry zabývala hledáním pralátky. Thalés touto pralátkou označil vodu, kterýžto úsudek pravděpodobně pocházel z myšlenky, že vše se vodou živí a že voda jako taková nemá ustálenou podobu, neboť se vyskytuje ve formě ledu, sněhu, páry, deště, atd.

Thalés se také domníval, že svět má podobu ploché země, která plave v oceánu. Vlnobití pak mají za následek zemětřesení. Dokonce soudil, že Slunce a hvězdy jsou ohnivé a dle některých zdrojů i pravil, že Měsíc svítí pouze odraženým světlem[2, 3].

1.2.2 Pýthagorejci

Jde o žáky a následovníky, či spíše členy společenství a školy, kterou vedl Pýthagorás až do své smrti. Škola pak vydržela ještě dalších čtyřicet generací a celkový počet pythagorejců mohl být kolem sedmi set[37]. Pýthagorejci stojí za mnoha matematickými a fyzikálními objevy, je jim přisuzován důkaz Pythagorovy věty, vztahy mezi délkami strun a výškou tónu, studie světla nebo teorie čísel.

Taktéž přišli s myšlenkou, že Země má tvar koule a obíhá kolem centrálního ohně (Obr. 2). Tento centrální oheň však ze Země vidět není, protože je k němu natočená vždy druhou stranou. Vidět je pouze jeho světlo, kterým ozařuje Slunce a Měsíc. Dále zavedli myšlenku Protizemě, která je, jak název napovídá, na druhé straně od centrálního ohně. S Protizemí pak pýthagorejský systém tvořil deset těles – centrální oheň, Slunce, Země, Měsíc, Protizemě, Merkur, Venuše, Mars, Jupiter a Saturn.



Obrázek 2: Centrální oheň

Kulový tvar Země hájili tím, že koule je symetrickým tělesem a také tím, že během zatmění Měsíce je stín vrhaný na Měsíc kruhový ve všech polohách.

Zřejmě nejznámějším Pýthagorovým žákem byl Filoláos, který ve spise „O přírodě“ popsal i Pýthagorovy kosmologické představy[4].

1.2.3 Aristotelés ze Stageiry

Aristotelés se narodil roku 384 před naším letopočtem v Makedonii. V sedmnácti letech vstoupil do Platónovy Akademie, kde zůstal až do Platónovy smrti. Na přelomu let 343 a 342 před naším letopočtem si Aristotela vyžádal král Filip II., aby vychovával jeho syna Alexandra. Po dokonání tohoto úkolu odešel do Athén, kde založil filosofickou školu Lykeion, která se zároveň stala i vědeckým střediskem.

Aristotelés prosazoval názor svého předchůdce Empedoklea, že svět a vesmír je tvořen čtyřmi elementy – zemí, vodou, vzduchem a ohněm. Každý z těchto elementů je charakterizován různými vlastnostmi, jako je vlhkost, teplota, chladnost a suchost. Země byla suchá a studená, voda studená a mokrá, vzduch teplý a vlhký, a oheň horký a suchý. Každý z těchto elementů pak měl přirozené místo ve vesmíru a také vrozenou tendenci pohybovat se k tomuto přirozenému místu. Pevné látky (čili země) tedy padaly dolů, zatímco oheň stoupal vzhůru.

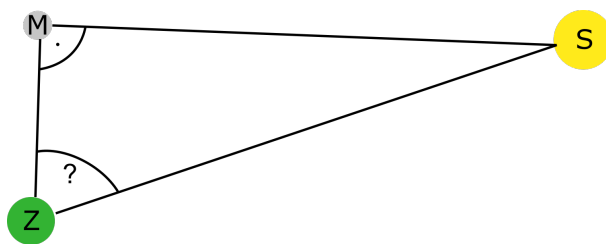
Co se týče Aristotelovy vize vesmíru, za základ lze považovat Platónův dialog Timaios. Země je středem vesmíru (geocentrismus) a Měsíc, Slunce a další planety ji obíhají ve sledu soustředných průhledných sfér. Nebeská tělesa nejsou tvořena čtyřmi základními elementy, ale jsou stvořena z nadřazeného pátého elementu či kvintesence nebo éteru – zkrátka látky nebeské a božské podstaty, pro kterou neplatí ona vrozená tendence pohybu, jež je charakteristická pro pozemské elementy.

Zavedl také pojem sublunární a superlunární sféry. Sublunární sféra byla právě tvořena prvními čtyřmi elementy a nacházela se pod Měsícem. Superlunární sféra pak byla tvořena pátým elementem a nacházela se nad drahou Měsíce[5, 6].

1.2.4 Aristarchos ze Samu

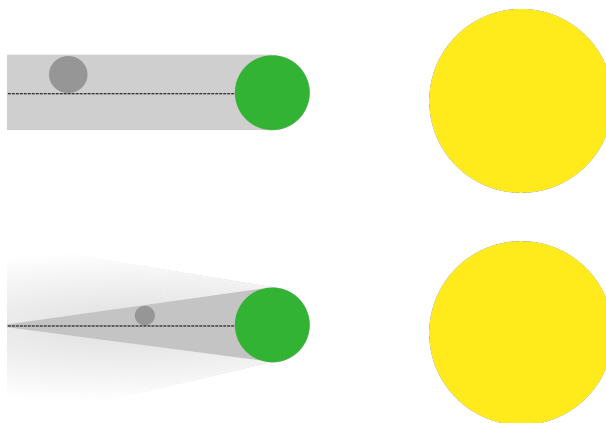
Aristarchos se narodil roku 310 před naším letopočtem. Jeho práce týkající se zemského pohybu však nepřechaly do dnešních dní a tak jsou jeho myšlenky známy hlavně z děl ostatních řeckých autorů. Aristarchos zastával názor, že Země rotuje kolem vlastní osy a obíhá kolem Slunce. Odhadl, že vzdálenost Slunce od Země je 19 krát větší, než je vzdálenost Měsíce od Země (skutečný poměr je přibližně 390).

Aristarchos vycházel z nápadu, že v momentě, kdy je Sluncem osvětlena přesně polovina Měsíce, Země, Slunce a Měsíc tvoří vrcholy trojúhelníku tak, jak je zobrazeno na obrázku 3. Úhel ZMS je pak roven 90° . Při následném změření úhlu MZS byl poté Aristarchos schopen vypočítat i poměr vzdáleností ZM a ZS.



Obrázek 3: Určení vzdálenosti Země, Měsíce a Slunce

Pokusil se také určit velikost Měsíce vzhledem k velikosti Země a to tak, že během jeho zatmění měřil dobu mezi tím, kdy okraj Měsíce poprvé vstoupí do stínu a kdy je Měsíc kompletně ve stínu. Dále určil čas, kdy byl Měsíc kompletně ve stínu. Protože tyto dva časy byly stejné, usoudil, že šířka zemského stínu v místě, kde jím Měsíc prochází, musí být dvojnásobkem průměru Měsíce, a tudíž musí být průměr Měsíce poloviční průměru Země. Ve skutečnosti je však průměr Měsíce oproti zemskému přibližně čtvrtinový, jak můžeme vidět na obrázku 4.



Obrázek 4: Určení vzdálenosti Země, Měsíce a Slunce

Aristarchos dále usuzoval, že když se Slunce a Měsíc na obloze jeví stejně veliké, přičemž Slunce je devatenáctkrát dále, pak musí být i devatenáctkrát větší[7, 8].

1.2.5 Apollónios z Pergy

O životě Apollónia z Pergy, známého jako „Velký geometr“, je známo velmi málo, nicméně jeho práce měly velký vliv na vývoj matematiky. Byl to on, kdo dal elipse, parabole a hyperbole své názvy. Také přišel s hypotézou excentrických orbitů, které by vysvětlovaly zdánlivé pohyby planet a měnící se rychlost Měsíce. Na jeho počest byl pojmenován jeden z kráterů na Měsíci[9, 10].

1.2.6 Hipparchos z Nikaie

Hipparchos je obecně považován za jednoho z nejvýznamnějších astronomů antiky, přesto se nezachovalo téměř nic z jeho prací. Jmenujme například astronomický

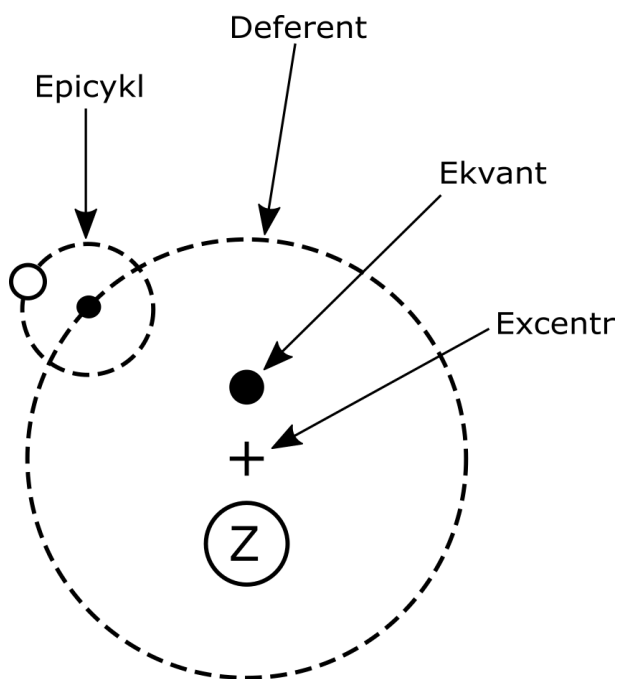
kalendář, knihy o optice a aritmetice a geografické a astrologické zápisky. Největším zdrojem informací o něm je spis „Almagest“ od Ptolemaia, který Hipparchovy práce používal jako základ pro své vlastní.

Hipparchos sám pak byl pokračovatelem Apollonia a využíval jeho myšlenky. Dle Ptolemaia vynalezl astroláb, prováděl rozsáhlá pozorování hvězd a pravděpodobně vytvořil první známý katalog hvězd. Jeho zřejmě nejvýznamnějším úspěchem je diskuse, týkající se pohybu bodů slunovratu a rovnodennosti z východu na západ na pozadí nehybných hvězd[11, 12].

1.2.7 Claudius Ptolemaios

Ptolemaios prováděl astronomická pozorování z egyptské Alexandrie a byl ve skutečnosti prvním astronomem, který provedl pozorování oblohy, jež můžeme přesně datovat.

Zřejmě nejdůležitější Ptolemaiovou prací je Almagest, který do detailů popisuje matematickou teorii pohybu Slunce, Měsíce a planet. Ptolemaios v Almagestu nejprve ospravedlňuje svůj popis vesmíru, založený na Aristotelově geocentrickém systému. Ptolemaios k předvídání pozic Slunce, Měsíce a planet využil předpoklad, že pohyb nebeských těles kolem Země je určen pohybem bodu po deferentu (kruhová kružnice kolem Země - obrázek 5), přičemž tento bod byl středem další kružnice, zvané epicyklus. Z Hipparchových poznatků si pak vzal například pojem excentr, což je kružnice se středem mimo Zemi, po které putuje Slunce a která tak měla vysvětlovat jeho nerovnoměrný pohyb[13, 14, 15].



Obrázek 5: Epicykl, deferent, ekvant a excentr

Ptolemaiovi se však ani toto řešení nezdálo úplně přesné a tak zavedl bod zvaný ekvant, jenž ležel na spojnici Země a středu excentru, ve stejné vzdálenosti od něj jako Země, jen na opačné straně. Vůči ekvantu se střed epicyklu pohyboval konstantní úhlovou rychlostí[36]. Tím dosáhl toho, že pohyb Slunce pozorovaný ze Země pak odpovídal mnohem více jeho pozorováním[16].

1.3 Novověk

1.3.1 Mikoláš Koperník

Mikoláš Koperník vystudoval právo, matematiku a medicínu na univerzitách v Krakově, Bologni, Římě, Padue a Ferrare. Záhy se však začal zajímat o astronomii a tak roku 1512 publikoval svůj raný popis heliocentrického modelu sluneční soustavy ve spisu *Commentariolus*.

V tomto modelu Slunce nebylo přímo středem soustavy, ale bylo lehce posunuto od centra za pomoci Ptolemaiova ekvantu. S myšlenkou Slunce jakožto středu soustavy už si pohrával Aristarchos, nicméně Koperník tuto myšlenku dokázal následně matematicky rozpracovat. Koperník při výpočtech uvažoval rotaci Země, její obíhání kolem Slunce a náklon zemské osy, díky čemuž byl schopen vysvětlit pohyb nebes. Nicméně, protože při výpočtech uvažoval kruhové orbity, jeho systém potřeboval zahrnutí epicyklů.

Naneštěstí však strach z toho, že by ho jeho myšlenky mohly dostat do problémů s církví, pozdržel publikaci těchto rozvinutých teorií. Až v roce 1540 byla jeho teorie popsána Koperníkovým studentem, který jej poté také přesvědčil, aby vydal i svůj originální spis *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (O obězích nebeských sfér)[18].

Spis se však dle předchozích obav nesetkal u církve s pochopením. Kněz Andreas Osiander prohlásil, že Koperník je hlupák, který se snaží převrátit celou astronomii naruby. Poté ještě do Koperníkovy knihy přidal předmluvu říkající, že heliocentrický systém je pouze teorie, která nemusí být pravdivá, ale že jde o užitečný model usnadňující výpočty. Přitom forma předmluvy vedla k tomu, že si čtenář myslel, že jí napsal sám Koperník. Ten už byl v té době velmi churav a neschopen svou práci bránit.

Ironií pak bylo, že Koperník svou práci věnoval papeži Pavlu III. Církev však spis později zakázala a nechala jej na seznamu zakázaného čtení po téměř další tři století[17, 19].

1.3.2 Tycho Brahe

Tycho Brahe pocházel ze šlechtického rodu s kořeny v Dánsku. Astronomie ho zaujala už v dětství a tak byl už ve čtrnácti schopen bez pomoci pozorovat zatmění Slunce. V období 1559 – 1562 studoval rétoriku a filosofii v Kodani a následně

práva a astronomii v Lipsku. Během těchto studií při konjunkci Jupiteru a Saturnu poznal, že Alfonsovy astronomické tabulky, vycházející z Ptolemaiovy geocentrické soustavy, jsou chybné, kdežto Reinholdovy tabulky, založené na Koperníkově teorii, jsou přesné.

Po smrti svého otce v roce 1571 se vrátil do Dánska, kde vybudoval vlastní observatoř na ostrově Hven (ostrov v současnosti náleží Švédsku). O rok později pak zaznamenal výbuch supernovy v souhvězdí Kasiopea a popsal jej ve svém díle *De nova stella* (O nové hvězdě).

Po nástupu nového dánského krále přijal Tycho Brahe pozvání od císaře Rudolfa II. do Prahy, kde pak nechal postavit novou observatoř a za asistenta přijal Jana Keplera.

Tycho také vytvořil vlastní teorii o postavení a pohybu nebeských těles, kde je Země středem vesmíru, ale obíhá ji pouze Slunce a Měsíc. Ostatní planety pak měly obíhat kolem Slunce. Také určil, že komety prolétají ve vzdálenosti až za drahou Měsíce.

Tycho Brahe byl pohřben v Praze[20].

1.3.3 Galileo Galilei

Italský astronom, jehož otec donutil začít studovat lékařství. Galileo však studium nedokončil a přesunul se ke studiu matematiky. V roce 1589 byl jmenován do čela katedry matematiky v Pise a v roce 1592 se pak stal profesorem matematiky na univerzitě v Padově, kde setrval dalších osmnáct let.

Na základě holandských dalekohledů sestrojil svůj vylepšený dalekohled s osminásobným zvětšením. Roku 1610 pak vytvořil dalekohled s třicetinasobným zvětšením, s jehož pomocí objevil například čtyři Jupiterovy měsíce, Saturnovy prstence, fáze Venuše nebo krátery na Měsíci. Rok na to objevil skvrny na Slunci.

Galileo byl zastáncem Koperníkova pohledu na uspořádání vesmíru – to však vedlo k prvním problémům s církví, neboť jej následně roku 1613 dva dominikánští kazatelé obvinili z toho, že heliocentrická teorie odporuje Bibli. Roku 1616 jsou pak jeho tvrzení při obhajobě v Římě smetena ze stolu a zakázána. Přesto však díky přátelství s Maffeem Barberinim, který se stal papežem, dokázal vydat *Dialogy*, které pojednávaly o Ptolemaiově a Koperníkově pohledu na uspořádání vesmíru. Dílo mělo být prezentováno spíše z pohledu církve, přesto však heliocentrické názory dominovaly. Proto byl roku 1633 předvolán před inkviziční tribunál, kde byl během několika týdnů donucen své teorie odvolat. I tak byl však odsouzen k doživotnímu domácímu vězení. Zemřel slepý roku 1642. Je mu přisuzován i známý citát: „A přece se točil“, který měl přednést před soudem po odvolání svých tvrzení, nicméně se dá téměř s jistotou říci, že to neřekl.

1.3.4 Johannes Kepler

Johannes Kepler byl německý matematik, astrolog a astronom. Od pěti let žil pouze s matkou, jeho otec zemřel ve válce jako žoldněř. Studoval na univerzitě v Tübingenu u tehdy významného astronoma Michaela Maestlina. Zde mu byly představeny Koperníkovy myšlenky. Jako učitel matematiky pak roku 1596 vydává *Mysterium Cosmographicum* (Kosmografické mystérium), ve kterém obhajuje Koperníkovu představu vesmíru a odvozuje relativní vzdálenosti šesti tehdy známých planet ze systému pěti platónských těles[21].

Roku 1600 přichází do Prahy, aby se stal asistentem Tycha Brahe. Roku 1601 zaujal pozici císařského matematika a astrologa na dvoře císaře Rudolfa II. v Praze[22].

Z dat získaných Tychem Brahe se mu podařilo určit elipsovitou dráhu planety Mars. Roku 1609 vydal spis *Astronomia Nova* (Nová astronomie), kde uvedl své první dva zákony týkající se pohybu planety. Roku 1615 vydal dílo *Nova Stereometria Doliorum Vinariorum* o určování objemů těles vzniklých rotací kuželoseček. Dalším dílem důležitým pro vývoj astronomie byl spis *Harmonices Mundi* (Harmonie světa), kde předložil svůj třetí zákon.

Roku 1621 vydává sedmisvazkové dílo *Epitome Astronomiae* pojednávající o heliocentrické astronomii.

Keplerovy zákony[23] budou podrobněji popsány v pozdějších kapitolách.

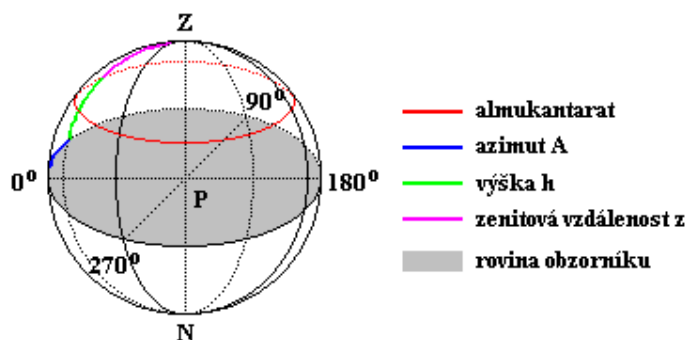
2 Astronomické souřadnice

Astronomické souřadnice slouží především pro určení polohy vesmírného objektu pro pozorovatele ze Země. Týkají se pouze úhlové polohy, nezahrnují tedy vzdálenosti daného objektu, neboť si můžeme představit všechny vesmírné objekty, jakoby byly promítnuty na povrch obrovské koule (s nekonečným poloměrem) se Zemí (nebo pozorovatelem) v jejím středu. Povrchu této koule se říká Gaussova sféra nebo také nebeská sféra[31]. Na ní určujeme polohu objektu pomocí dvou úhlových souřadnic.

Rozlišujeme různé typy astronomických souřadnic.

2.1 Obzorníkové souřadnice

Jako základní rovina pro určování obzorníkových souřadnic slouží obzorník (horizont). Obzorník je tedy kružnice, která vznikne průnikem vodorovné roviny a nebeské sféry (Obr. 6)[32]. Je nutno říct, že tato rovina by měla být kolmá na svislou přímku vzniklou spojením místa na povrchu Země, kde je pozorovatel, a středu Země.



Obrázek 6: Obzorníkové souřadnice

Převzato z:

<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/931-obzornikova-soustava-souradnic>

Na obrázku vidíme nadhlavník (zenit) Z a podnožník (nadir) N , které protíná zmíněná svislá přímka směřující do středu Země skrze stanoviště pozorovatele P . Almukaranty jsou vedlejší kružnice, které vznikají v místě protnutí nebeské sféry a roviny rovnoběžné s rovinou obzorníku. Vertikály jsou výškové kružnice, které procházejí zenitem a jsou určeny rovinami kolnými na rovinu obzorníku. Vertikála, jež prochází severním a jižním bodem (0° a 180°), se nazývá meridián (místní nebeský poledník). Vertikála procházející východním a západním bodem (90° a 270°) se nazývá první vertikál[32].

Souřadnice se tedy měří pomocí azimutu A a výšky h . Azimut se měří ve stupních vodorovně na horizontu nebo almukantaraktu od severu (0°) ve směru hodinových ručiček. Výška se měří taktéž ve stupních, svisle po vertikále od obzorníku k zenitu (kladný úhel) nebo k nadiru (záporný úhel).

Takto určená soustava se otáčí spolu s pozorovatelem, tudíž se souřadnice objektů na obloze mění s časem.

2.2 Rovníkové souřadnice prvního a druhého druhu

Rovníkové souřadnice máme dvojího druhu, které se liší určením hlavního směru v rovině rovníku. Souřadnice prvního druhu využívají průsečíku meridiánu a roviny rovníku, zatímco souřadnice druhého druhu využívají jarní bod, což je průsečík roviny ekliptiky a roviny rovníku, tedy bod, ve kterém se Slunce nachází při jarní rovnodennosti.

Vzhledem k tomu, že poloha jarního bodu je mezi hvězdami téměř neměnná, tak se ani jeho poloha s časem nemění. Meridián naopak prochází zenitem, který se pohybuje spolu se Zemí a tudíž jsou souřadnice prvního druhu závislé na čase.

Rovníkové souřadnice prvního druhu jsou určeny hodinovým úhlem a deklinací. Hodinový úhel se měří ve stupních či hodinách v rovině rovníku od meridiánu, přičemž se měří směrem k západu[33]. Deklinací rozumíme úhel měřený na deklinačních kružnicích, které jsou kolmé k nebeskému rovníku, což je projekce zemského rovníku na nebeskou sféru. Měření probíhá v kladných úhlech k severnímu nebeskému pólu a v záporných úhlech k jižnímu nebeskému pólu.

Rovníkové souřadnice druhého druhu jsou určeny rektascenzí a deklinací. Deklinace je stejná veličina jako v prvním případě. Rektascenze je úhel v rovině rovníku měřený od jarního bodu směrem na východ.

2.3 Další druhy souřadnic

Mezi dalšími druhy astronomických souřadnic můžeme zmínit například souřadnice ekliptické, které jsou vhodné především pro pozorování drah těles sluneční soustavy[34]. Ekliptické souřadnice jsou určeny ekliptikální délkou, která se měří od jarního bodu směrem k východu, a ekliptikální šířkou, což je úhlová vzdálenost tělesa na nebi od roviny ekliptiky[31].

Dalším druhem souřadnic je galaktická soustava souřadnic, která se používá převážně při určování poloh galaxií a kup mimo Mléčnou dráhu. V této soustavě bylo snahou, aby hlavní rovinou byla rovina Galaxie. Ta by však hlavní rovinu neurčovala jednoznačně a tak bylo dohodnuto, že severní galaktický pól bude mít v druhých rovníkových souřadnicích umístění $27^{\circ}45'$ a jižní galaktický pól bude mít přirozeně souřadnice opačné, tedy $-27^{\circ}45'$. Rovina kolmá na spojnici těchto dvou bodů se nazývá rovina galaktického rovníku. Galaktický rovník vznikne tam, kde tato rovina protíná nebeskou sféru.

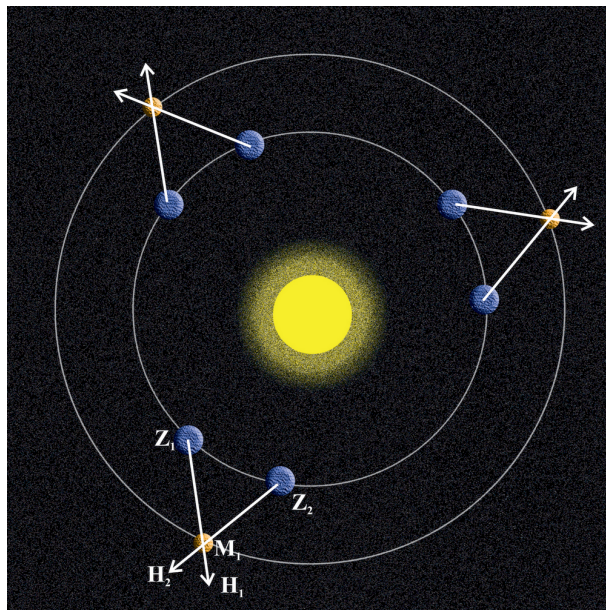
3 Nebeská mechanika

3.1 Keplerovy zákony

3.1.1 První Keplerův zákon (Nová astronomie, 1609)

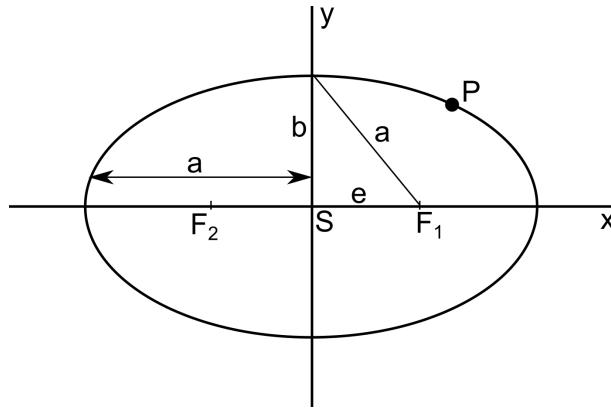
Planety obíhají kolem Slunce po elipsových drahách, v jejichž společném ohnisku je Slunce.

Kepler při zjišťování tvaru původně vycházel z měření Tycha Brahe, který poměrně přesně zaznamenal polohy Marsu, a z vědomí toho, že Země oběhne Slunce za 365 dní, kdežto Mars za 687[24].



Obrázek 7: Sledování polohy Marsu

Postupoval takto (Obr. 7): když se Země nacházela v poloze Z_1 , poloha Marsu se promítla do směru H_1 . Po 687 dnech se Mars vrátil do původní polohy, ale Země již byla v poloze Z_2 a Mars se tudíž promítl do směru H_2 . V průsečíku těchto dvou směrů tak nutně musela být skutečná poloha planety Mars. Kepler tímto způsobem bod po bodu určil dráhu Marsu a zjistil, že je elipsovitá – odtud jeho první zákon[24].



Obrázek 8: Parametry elipsy

V souvislosti s 1. Keplerovým zákonem si připomeňme některé vlastnosti elipsy. Na obr. 8 jsou vyznačeny:

F_1, F_2 ... ohniska

S ... střed elipsy

a ... hlavní poloosa

b ... vedlejší poloosa

e ... excentricita

$\varepsilon = \frac{e}{a}$... numerická excentricita

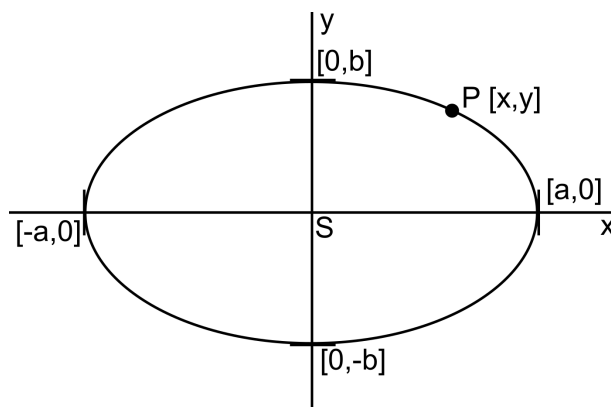
$a^2 - b^2 = e^2$ (kružnice pro $a = b \equiv r, e = 0$)

Vlastnost elipsy: součet vzdáleností libovolného bodu P elipsy od ohnisek F_1 a F_2 je roven konstantě $2a$: $|PF_1| + |PF_2| = 2a$.

Připomeňme si ještě rovnici elipsy:

(a) Středová rovnice v kartézských souřadnicích (v počátku souřadnic leží střed S elipsy - Obr. 9):

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$



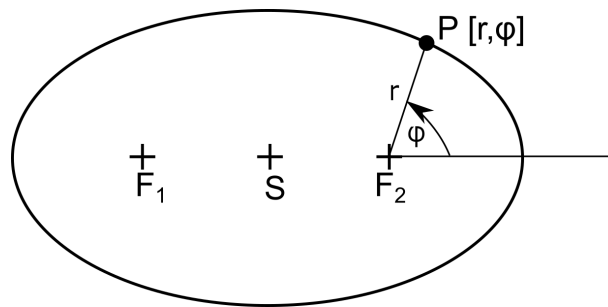
Obrázek 9: Elipsa pro kartézské souřadnice

- (b) Ohnisková rovnice v polárních souřadnicích, přičemž v počátku souřadnic leží ohnisko, například F_1 (Obr. 10):

$$r(\varphi) = \frac{p}{1 + \varepsilon \cdot \cos \varphi}$$

$$\varepsilon \equiv \frac{e}{a} \dots \text{(numerická excentricita)}$$

$$p \equiv \frac{b^2}{a} \dots \text{(parametr elipsy)}$$

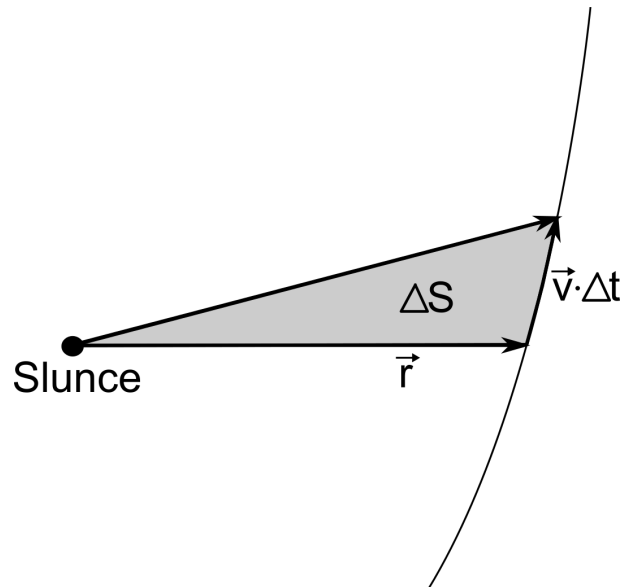


Obrázek 10: Polární souřadnice elipsy

3.1.2 Druhý Keplerův zákon (Nová astronomie, 1609)

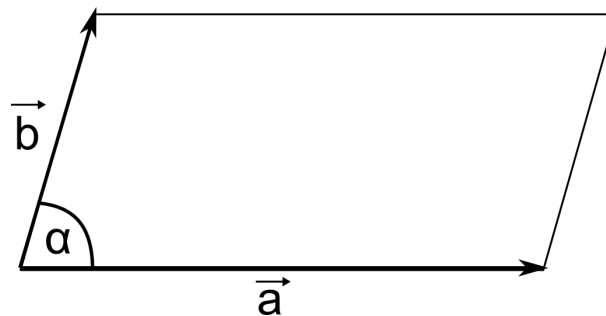
Obsahy ploch ΔS , opsaných průvodičem planety za stejný čas Δt , jsou stejné (průvodič = spojnice Slunce – Země).

Ekvivalentní formulace pro jednotkový čas: plošná rychlost $\sigma \equiv \frac{\Delta S}{\Delta t}$ je během pohybu konstantní (Obr. 11).



Obrázek 11: Plošná rychlost

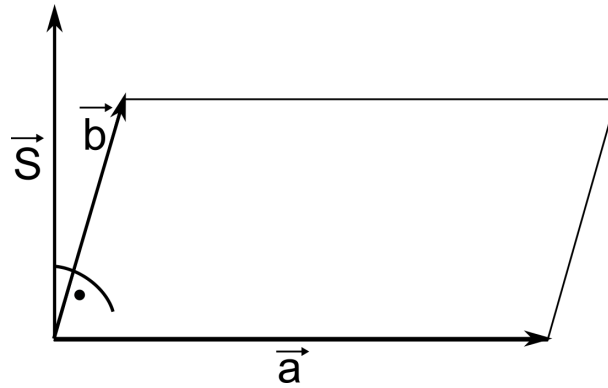
Připomeňme si v souvislosti s plošnou rychlostí, jak se vyjadřuje velikost ploch pomocí vektorového součinu (Obr. 12):



Obrázek 12: Plocha rovnoběžníku

Obsah rovnoběžníku $S = \text{základna} \times \text{výška} = a \cdot b \cdot \sin \alpha$ je stejný jako velikost vektorového součinu $|\vec{a} \times \vec{b}| = a \cdot b \cdot \sin \alpha = S$

Plocha rovnoběžníku vektorově (Obr. 13): $\vec{S} = \vec{a} \times \vec{b}$

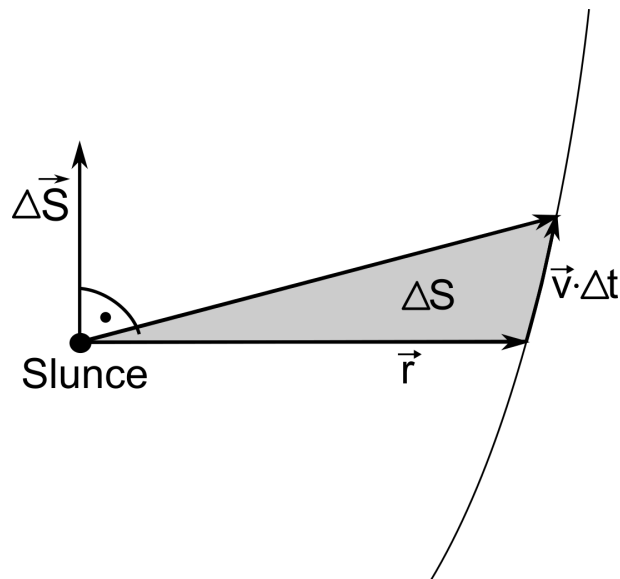


Obrázek 13: Plocha rovnoběžníku vektorově

Odvození plošné rychlosti průvodiče planety ve vektorovém tvaru (Obr. 14):

$$\Delta \vec{S} = \frac{1}{2} \vec{r} \times \vec{v} \Delta t$$

$$\vec{\sigma} = \frac{\Delta \vec{S}}{\Delta t} = \frac{1}{2} \vec{r} \times \vec{v}$$



Obrázek 14: Plošná rychlost vektorově

Druhý Keplerův zákon ve vektorovém tvaru: plošná rychlost planety $\vec{\sigma} = \frac{1}{2} \vec{r} \times \vec{v}$ je v čase konstantní (průvodič $\vec{r}(t)$ i rychlost $\vec{v}(t)$ se přitom obecně mění s časem)[24].

3.1.3 Třetí Keplerův zákon (Harmonie světa, 1619)

Poměr druhých mocnin oběžných drah dvou planet je stejný jako poměr třetích mocnin jejich hlavních poloos:

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

jinak zapsáno:

$$\frac{T_1^2}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{a_2^3} \Rightarrow \frac{r^2}{a^3} = C$$

Konstanta C je stejná pro všechny planety. Z Newtonových zákonů lze pro ni odvodit vyjádření:

$$C \equiv \frac{4\pi^2}{GM_S}$$

V jednotkách vztahených k Zemi je číselná konstanta C rovna jedné:

$$T_Z = 3,16 \cdot 10^7 \text{s} \equiv 1 \text{ rok}$$

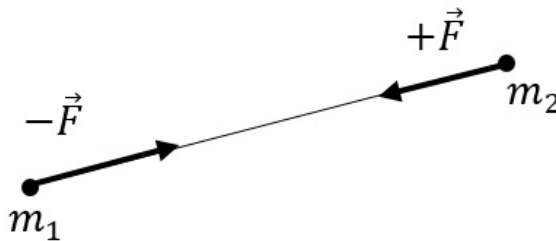
$$a_z = 1,50 \cdot 10^{11} \text{m} \equiv 1 \text{ au (astronomická jednotka)}$$

$$C = \frac{T_Z^2}{a_z^3} = 1 \frac{\text{rok}^2}{\text{au}^3}$$

Pro všechny planety, jejichž oběžná doba se určuje v rocích a vzdálenost od Slunce v astronomických jednotkách, je tedy:

$$\frac{T^2}{a^3} = 1$$

3.2 Newtonův gravitační zákon (Matematické základy přírodní filozofie, 1687)



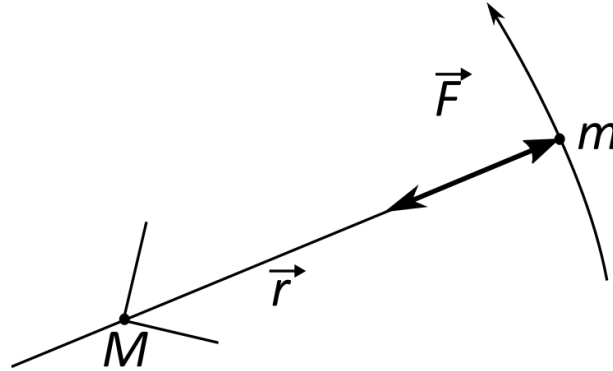
Obrázek 15: Gravitační zákon

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

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{Nm}^2\text{kg}^{-2}$$

3.2.1 Pohyb v radiálním poli

$$m_1 \equiv M, m_2 \equiv m, M \gg m$$



Obrázek 16: Pohyb v radiálním poli

$$\vec{F} = F \cdot \left(\frac{-\vec{r}'}{r} \right) = G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} \cdot \frac{-\vec{r}'}{r}$$

Potenciální energie E_p :

$$F(r) = -G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} \Rightarrow E_p(r) = -G \frac{M \cdot m}{r}$$

Pohybová rovnice:

$$m \vec{a} = \vec{F}$$

$$m \cdot \frac{d^2 \vec{r}'}{dt^2} = -\frac{GMm}{r^3} \cdot \vec{r}' \Rightarrow \vec{r}''(t)$$

Z pohybové rovnice lze odvodit zákon zachování mechanické energie E a momentu hybnosti \vec{L} :

$$E = E_k + E_p = \frac{mv^2}{2} - G \cdot \frac{Mm}{r} = \text{konst.}$$

$$\vec{L} = \vec{r}' \times \vec{p} = \text{konst.}$$

Poznámka: moment hybnosti a plošná rychlost jsou si úměrné:

$$\vec{L} = \vec{r}' \times m \vec{v} = m(\vec{r}' \times \vec{v})$$

$$\vec{\sigma} = 1/2 \vec{r}' \times \vec{v}$$

Ze srovnání obou výrazů dostáváme $\vec{L} = 2m\vec{\sigma}$. Tedy zákon zachování plošné rychlosti je ekvivalentní zákonu zachování momentu hybnosti.

3.2.2 Třetí Keplerův zákon odvozený pro pohyb po kružnici z Newtonova gravitačního zákona

Pohyb po kružnici o poloměru r :

$$a = \frac{v^2}{r} \text{ (dostředivé zrychlení)}$$

$$F = G \cdot \frac{Mm}{r^2} \text{ (dostředivá síla)}$$

$$ma = F \Rightarrow m \cdot \frac{v^2}{r} = G \cdot \frac{Mm}{r^2} \Rightarrow v^2 r = GM$$

$$v = \frac{2\pi r}{T} \text{ (} T \text{ ... doba oběhu)} \Rightarrow \left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2 \cdot r = GM \Rightarrow \frac{r^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$$

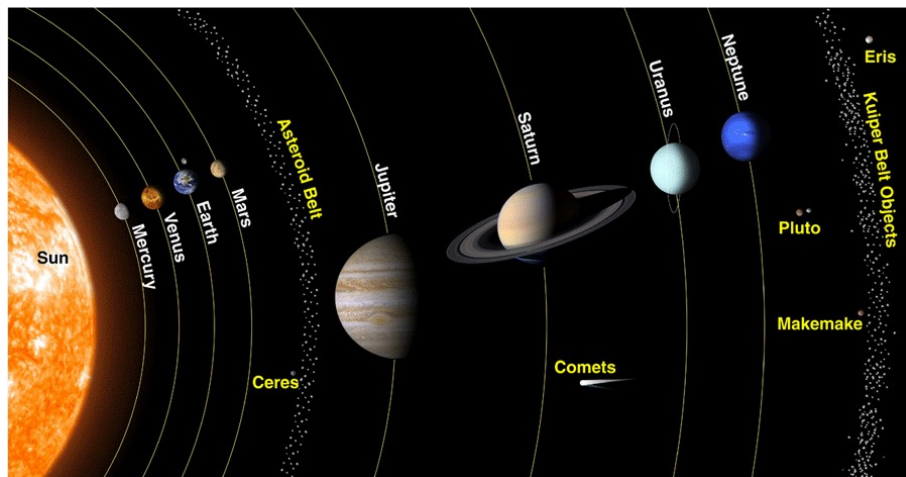
Zobecnění i pro eliptický pohyb:

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$$

4 Sluneční soustava

4.1 Uspořádání

Sluneční soustava vznikla před 4,6 miliardami let gravitačním kolapsem molekulárního mračka obsahujícího převážně H_2 . V centru mračka se utvořila protohvězda. Vlivem dalšího smršťování, zhušťování a zvyšování teploty nakonec Slunce zažehlo fúzní reakci a stalo se hvězdou, jak je s trochou nadsázky známe teď. Kolem Slunce se utvořil rotující protoplanetární disk, který sloužil jako základ pro vznikající tělesa sluneční soustavy[35]. Srážkami částic v protoplanetárním disku vznikla nejprve malá tělesa o velikosti jednotek kilometrů – planetesimály, které pak na sebe nabalovaly další hmotu a daly vznik protoplanetám a nakonec i planetám a jejich měsícům (Obr. 17).

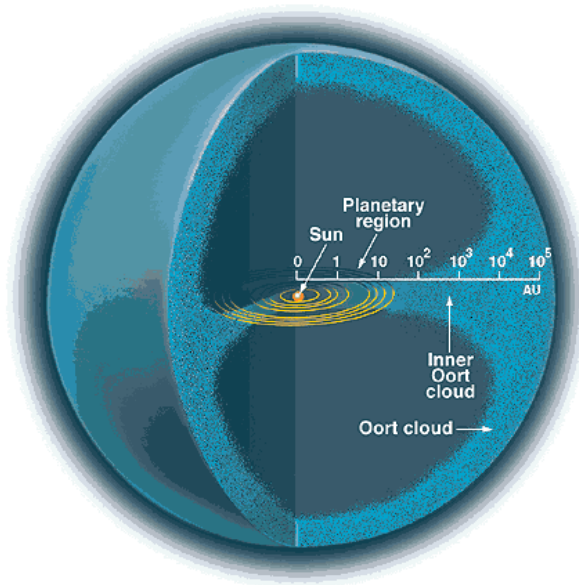


Obrázek 17: Sluneční soustava

Převzato z:

<http://www.crystalinks.com/asteroidbelt>

Jak již bylo řečeno, středem soustavy je Slunce. Následují kamenné nebo také terestrické planety - Merkur, Venuše, Země a Mars. Za Marsem je Hlavní pás asteroidů, po němž následují vnější planety – plynní obři. Do těch spadá Jupiter, Saturn, Uran a Neptun. Za nimi je Kuiperův pás, Rozptýlený disk a Oddělený disk. Celá soustava je pak obalena hypotetickým Oortovým oblakem (Obr. 18).



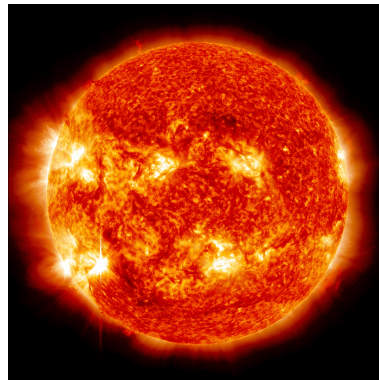
Obrázek 18: Oortův oblak

Převzato z:

<http://www.mundos-fantasticos.com/en/>

4.2 Slunce

Poloměr Slunce $R_S = 6,96 \cdot 10^5$ km. Můžeme tedy říct, že $R_S = 109R_Z$. Hmotnost Slunce $M_S = 2 \cdot 10^{30}$ kg, tedy $M_S = 333\,000M_Z$.



Obrázek 19: Slunce

Převzato z:

https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/News111312-m6flare.html

Jádro Slunce má hustotu stokrát větší než voda. Dochází v něm k přeměně vodíku na helium, přičemž dochází k uvolňování energie v podobě fotonů. Jádro je obklopeno vrstvou v zářivé rovnováze, přes kterou vyzářené fotony putují i stovky tisíc let. To je dáno tím, že jsou při své cestě pohlcovány hmotou a následně opět vyzářeny v jiném směru.

Kolem této vrstvy je konvektivní zóna. Povrch Slunce se pak nazývá fotosféra, na které mimo jiné můžeme pozorovat sluneční skvrny. K fotosféře přiléhá relativně tenká a řídká vrstva zvaná chromosféra. Nad ní je koróna, která by se dala popsat jako řídká horní atmosféra zasahující až daleko do sluneční soustavy[25].

4.3 Kamenné planety

Oblast kamenných planet sahá od Merkuru, který je od Slunce vzdálen 0,4 au, po Mars ve vzdálenosti 1,6 au.

4.3.1 Merkur

Střední oběhová vzdálenost Merkuru (Obr. 20) \bar{r} je 0,4 au. Merkur oběhne Slunce za 88 dní ($T_{\text{Sl}} = 88$ dní) a kolem vlastní osy se otočí za 58,6 dne ($T_{\text{osa}} = 58,6$ dne).

U Merkuru můžeme mluvit o takzvaném spin-orbitálním spřažení: $2 \cdot T_{\text{Sl}} = 3 \cdot T_{\text{osa}}$.



Obrázek 20: Merkur

Převzato z:

http://science.nasa.gov/media/medialibrary/2008/10/01/01oct_mercuryflyby2_resources/murchie05_lg.jpg

Poloměr Merkuru je 2440 km, což jej činí menším než je Jupiterův měsíc Ganymed a Saturnův měsíc Titan. Zároveň má největší výstřednost ze všech planet sluneční soustavy $\epsilon = 0,21$. Pro srovnání, výstřednost Země je 0,017.

U oběžné dráhy Merkuru také dochází ke značnému stáčení perihélia (perihélium – místo na oběžné dráze nejbližší ke Slunci) o 574' za rok. 531' je dáno vlivem ostatních planet a 43' je dáno zakřivením časoprostoru v okolí Slunce.

K Merkuru bylo vysláno několik sond, včetně Marineru 10 a Messengeru. Mariner 10 provedl tři přiblížení v letech 1974 – 1975 a byl první sondou v historii, která využila gravitačního praku jednoho vesmírného tělesa k dosažení tělesa jiného[26].

Sonda Messenger pak byla na oběžné dráze Merkuru od roku 2011, přičemž její mise byla ukončena v dubnu 2015 pádem na povrch planety.

4.3.2 Venuše

Na obloze ji můžeme spatřovat jako Jitřenku či Večernici.

Její střední oběhová vzdálenost \bar{r} je 0,7 au, přičemž Slunce oběhne jednou za 225 dní, a to po dráze téměř kruhové ($\epsilon = 0,007$) a navíc retrográdní – sklon Venušiny osy je 177° .

Hustota její atmosféry je největší ze všech vnitřních planet, tlak na povrchu je 92 atmosfér. Z devadesáti sedmi procent ji tvoří CO_2 a ze tří procent N_2 . Teplota se v průměru pohybuje kolem 460°C .



Obrázek 21: Venuše

Převzato z:

http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery/photogallery-venus.html

Za zmínku také stojí horský masiv Maxwell Montes, který dosahuje výšky 11 kilometrů.

V roce 1975 dosáhly Venuše sondy Veněra 9 a Veněra 10, obsahující i přistávací moduly, které lidstvu poskytly první snímky povrchu Venuše. V letech 1990 – 1994 pak kolem planety kroužila sonda Magellan, která získávala radarové snímky povrchu planety a nakonec zanikla v její atmosféře.

4.3.3 Mars

Mars (Obr. 22) obíhá Slunce ve vzdálenosti 1,5 au po relativně eliptické dráze s výstředností 0,093. Doba oběhu je 1,9 roku a doba otočení kolem vlastní osy je 24 hodin a 37 minut. Průměr Marsu je přibližně poloviční ve srovnání s průměrem Země a jeho hmotnost je desetinová. Průměrná hustota planety je $3,98 \text{ g/m}^3$ (hustota Země je $5,5 \text{ g/m}^3$).

Načervenalá barva povrchu Marsu je způsobena oxidy železa. Od načervenalé barvy připomínající krev pak planeta také dostala své jméno podle boha války Marta.

Koncem devatenáctého století byly na povrchu pozorovány kanály, které byly připisovány mart'anské civilizaci. Ukázalo se však, že šlo o optický klam. Na Marsu se nachází nejvyšší hora Sluneční soustavy – Olympus Mons – jejíž výška je přibližně 22 km (dle jiných 27 km v závislosti na určené nulové výškové hladině, od které se měří) a jež je sopečného původu.



Obrázek 22: Mars

Převzato z:

<http://mars.nasa.gov/multimedia/images/>

Na povrchu se nachází vyschlá řečiště, jimiž v dávné minulosti protékala voda. V současnosti však kvůli nízkému tlaku nemůže voda v kapalném stavu na planetě existovat. Část vody se v zamrzlém stavu zachovala pod povrchem. Velkou zásobu vody představuje severní polární čepička, kde tloušťka vodního ledu dosahuje přibližně jednoho kilometru. Jižní polární čepička je v horních vrstvách tvořena suchým ledem (CO_2), spodní vrstvy jsou pak opět z vodního ledu[37].

Tlak na povrchu je menší než 0,01 atm. Sama atmosféra je pak z 95% tvořena CO_2 , ze 3% N_2 , a ze 2% Ar. Teplota se pohybuje kolem -60°C . Za zmínku stojí i fakt, že Mars z neznámého důvodu v minulosti přišel o své magnetické pole.

Má dva měsíce – Phobos, který má průměr zhruba 20 km, a Deimos, který má průměr 15 km. V letech 2004 - 2010 brázdilo povrch Marsu vozítko Spirit. Od roku 2004 a 2012 pak povrch zkoumají vozítka Opportunity, respektive Curiosity.

4.4 Hlavní pás asteroidů (planetek)

Nachází se ve vzdálenosti 2 – 4 astronomických jednotek a je složen z miliard planetek a meteoroidů. Za planetku neboli asteroid (= hvězdě podobný) je považováno těleso větší než stovky metrů. Tělesa menší než stovky metrů jsou označována jako meteoroidy.



Obrázek 23: Hlavní pás asteroidů

Převzato z:

<http://www.forbes.com/sites/brucedorminey/2013/01/31/why-our-main-asteroid-belt-is-hardly-the-remnant-of-an-exploded-planet/>

Původně se předpokládalo, že Hlavní pás asteroidů (Obr. 23) vznikl zničením a rozpadem planety, která v těch místech obíhala. Nynější teorie pak říkají, že se jedná o zbytek protoplanetárního disku, který se nespojil v jedno těleso kvůli gravitačnímu vlivu Jupitera.

4.4.1 Titius-Bodeovo pravidlo

Titius si v roce 1766 všiml určité pravidelnosti ve vzdálenostech jednotlivých planet, Bode poté o několik let později jeho objev publikoval. Nutno však dodat, že se jedná spíše o náhodné pravidlo, které není nijak založené na fyzikálních zákonech.

Zjednodušeně by se dalo říci, že toto pravidlo popisuje průměrné vzdálenosti jednotlivých planet v astronomických jednotkách pomocí posloupnosti:

$a = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n, n = -\infty, 0, 1, 2, \dots$ (Tab 1):

Tabulka 1: Titusovo-Bodeovo pravidlo

n	a	objekt (změřené a)
$-\infty$	0.4	Merkur (0,39)
0	0.7	Venuše (0,72)
1	1	Země (1,00)
2	1.6	Mars (1,52)
3	2.8	?
4	5.2	Jupiter (5,20)
5	10	Saturn (9,54)
6	19.6	Uran (19,2)
-	-	Neptun (30,1) – mimo pravidlo
7	38.8	Pluto (39,4) – trpasličí planeta

Objev Uranu roku 1781 toto pravidlo zdánlivě potvrzoval pro $n = 6$. Kde se však nacházela planeta pro $n = 3$? Roku 1801 Giuseppe Piazzi objevil „planetu“ Ceres právě ve vzdálenosti pro $n = 3$. Po ní však v těchto prostorech následovaly další „planety“ – Pallas (1802), Vesta (1807), Hygiea (1849). Největší z nich však zůstala Ceres s poloměrem přibližně 470 km. Ta byla později označena za trpasličí planetu. Ostatní zmíněná tělesa byla označena jako planety neboli asteroidy, které se vyznačovaly menšími rozměry a nepravidelným tvarem.

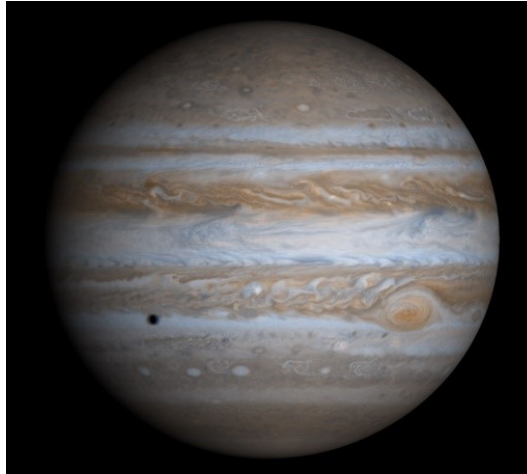
Roku 2011 k planetce Vesta dorazila americká sonda Dawn, kde shromažďovala data až do roku 2012, kdy se vypravila k Ceres, kam dorazila roku 2015.

4.5 Vnější planety

4.5.1 Jupiter

Oběhová vzdálenost Jupitera (Obr. 24) je 5,2 au, přičemž Slunce oběhne jednou za 12 pozemských roků. Okolo vlastní osy se otočí přibližně za 10 hodin, což znamená, že má nejrychlejší rotaci ze všech planet. Sklon jeho rotační osy je velmi malý — pouhé 3° – a tak nedochází k sezónním změnám počasí[37].

Jupiter je s poloměrem 70 000 km jedenáctkrát větší než Země. Hmotnostně je pak tři sta osmnáctkrát těžší než Země, tisíckrát lehčí než Slunce a dva a půlkrát těžší než všechny ostatní planety dohromady, neboť má $2 \cdot 10^{27}$ kg. Dalo by se i mluvit o dvojsystému Slunce-Jupiter, protože Jupiter můžeme považovat za „nepovedenou“ hvězdu.



Obrázek 24: Jupiter

Převzato z:

<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/jupiterfact.html/>

Atmosféru tvoří 75% H₂, 24% He a 1% ostatních prvků. Jednotlivé její pásy rotují různou rychlostí, čemuž se říká diferenciální rotace. Objevil ji Cassini roku 1690. Na Jupiteru je možno pozorovat Velkou rudou skvrnu, což je anticyklóna tvořená klesajícími a rotujícími chladnými plyny. Ta byla pozorována nejspíše již od roku 1665.

Jupiter má kamenné jádro obklopené vrstvou tekutého kovového vodíku (což je ale stav předpovězený pouze teoreticky), která sahá do vzdálenosti 78% poloměru od středu. Díky elektrickým proudům v centru má Jupiter obrovskou magnetosféru.

Roku 1979 sonda Voyager 1 zjistila u Jupiteru velmi slabé prstence. Kromě sond Voyager 1 a Voyager 2 planetu zkoumala ještě například sonda Pioneer (1973), což spolu s Voyagery byly sondy směřující mimo Sluneční soustavu. Další sondou, zabývající se Jupiterem, byla sonda Galileo (1995 – 2003), která zkoumala jak planetu, tak její měsíce[35].

Prozatím bylo objeveno 67 Jupiterových měsíců. Největší z nich jsou čtyři takzvané Galileovy měsíce objevené v lednu 1610 – Io, Europa, Ganymed a Callisto:

- **Io** - Na Io panuje v současnosti silná vulkanická aktivita – v tomto ohledu se jedná o neaktivnější těleso ve sluneční soustavě. Příčinou jsou slapové síly způsobené gravitací Jupiteru, které způsobují vnitřní tření a zahřívání jádra. Poloměr Io je 1820 km, což je 0,29 poloměru Země. Pro srovnání, Měsíc má 1740 km, což je 0,27 poloměru Země.
- **Europa** - Europa je s poloměrem 1560 km menší než Měsíc. Její povrch je tvořen ledovou krustou, pod níž je předpokládán oceán z kapalné vody, ve kterém by se mohly nacházet primitivní formy života.
- **Ganymed** - Někdy psán i jako Ganymedes či Ganymede. Má poloměr 2630 km,

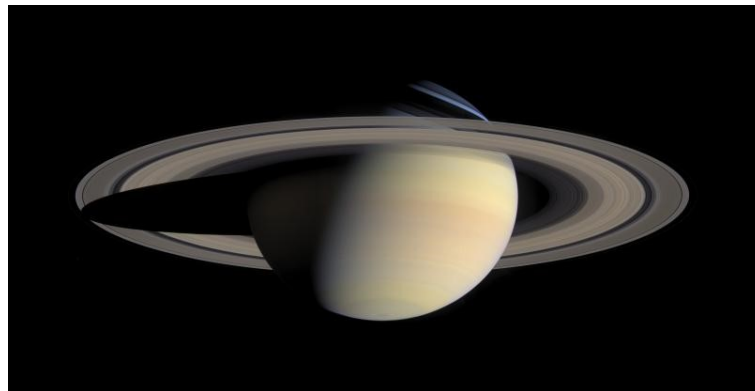
což je 0,41 poloměru Země a může se tak pyšnit prvenstvím ve velikosti měsíců ve sluneční soustavě. Zajímavé je i srovnání s planetou Merkur, jejíž poloměr je pouze 2440 km, čili 0,38 zemského poloměru[37].

- **Callisto** - Třetí největší měsíc ve sluneční soustavě, před ním je pouze již zmíněný Ganymed a poté Saturnův Titan.

Mnohé z Jupiterových měsíců jsou zachycené asteroidy, což se projevuje například na velkém sklonu dráhy vůči rovině rovníku, velké excentricitě a častém retrográdním oběhu.

4.5.2 Saturn

Saturn (Obr. 25) oběhne Slunce jednou za 29,5 roku a okolo své osy se otočí jednou za 10,6 hodiny. S poloměrem 58 200 km je druhou největší planetou sluneční soustavy, kdežto naopak s hustotou 0,7 g/m³ má nejmenší hustotu ze všech planet. Přesto je 95 krát hmotnější než Země. Je také nejvíce zploštělou planetou.



Obrázek 25: Saturn

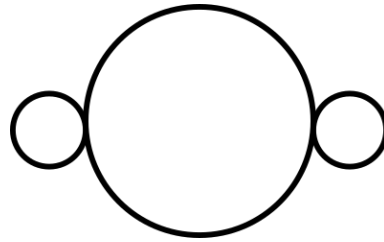
Převzato z:

<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA06193>

Atmosféru tvoří 96% H₂, 3% He a zbytek je tvořen CH₄ a dalšími prvky. Množství He je zde poloviční než u Jupiteru, takže dochází k uvolňování tepla v důsledku klesání He do nižších vrstev – diferenciace: $L_{\text{out}} = 1,8L_{\text{in}}$ – Saturn vyzáří téměř dvakrát více energie, než kolik přijme od Slunce. V atmosféře Saturnu vanou velmi silné větry, které jsou pětikrát rychlejší než u Jupiteru. Oproti němu má Saturn daleko méně výrazné atmosférické pásy. Na jižním pólu se nachází takzvaný polární vír, který je, na rozdíl od polárních vírů na jiných planetách, teplejší než jeho okolí. Na severním pólu je pak možno pozorovat vír tvaru pravidelného šestiúhelníku, který je dle provedených pokusů takto vytvořen určitou interakcí mezi proudy[37].

Saturn má nejslabší magnetické pole ze všech plyných obrů, jen o málo silnější než má Země.

Je znám pro své výrazné prstence. Už roku 1610 je pozoroval Galileo Galilei, nicméně o nich neuvažoval jako o prstencích, ale jako o „trojplanetě“, viz obrázek 26. Roku 1655 pak Huygens objevil měsíc Titan a roku 1659 zjistil, že ony záhadné „ušičky“ u Saturnu jsou ve skutečnosti prstence. Cassini roku 1675 zjistil, že se jedná o soustavu vzájemně oddělených prstenců a Maxwell roku 1859 teoreticky ukázal, že prstence musí být tvořeny menšími úlomky a tělesy, což bylo přímo pozorováno až roku 1979. Prstence byly označeny: D, C, B, A, F, G, E.



Obrázek 26: Saturn jako trojplaneta

Saturn navštívilo množství sond. Roku 1979 kolem něj proletěla sonda Pioneer 11, která pokračuje dále mimo sluneční soustavu. V letech 1980 a 1981 to byly sondy Voyager 1 a Voyager 2. Od roku 2004 kolem Saturnu obíhá sonda Cassini, která provádí jeho výzkum i výzkum jeho měsíců. Nesla také modul Huygens, který přistál na Titanu.

Saturn má přes 62 měsíců, přičemž nejznámější jsou Titan, Enceladus, Rhea (druhý největší Saturnův měsíc), Iapetus a Mimas:

- **Titan** - Má hustou atmosféru z 98% tvořenou N_2 . Na jeho povrchu jsou jezera kapalného metanu CH_4 . Roku 2005 na Titanu přistál modul Huygens nesený sondou Cassini.
- **Enceladus** - Objeven Herschelem roku 1788. Je tvořen převážně ledem a poset mnoha kryovulkány, které do okolí chrlí směs ledu a vody. Jeho povrch je extrémně bílý (odrazivost - albedo $A = 0,99$).

4.5.3 Uran

Oběhová vzdálenost Uranu (Obr. 27) je 19 au, přičemž Slunce oběhne jednou za 84 let. Den na Uranu trvá 17 hodin. Jeho poloměr je roven přibližně čtyřnásobku poloměru Země a jeho hmotnost je patnáctkrát větší.



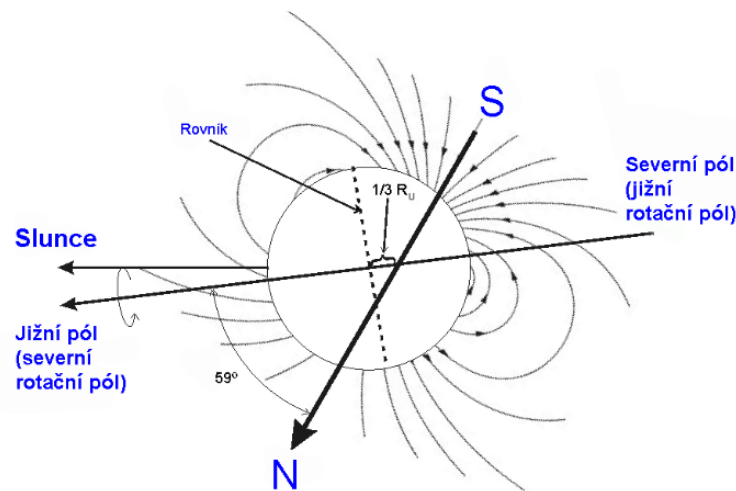
Obrázek 27: Uran

Převzato z:

http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/image/uranus_voy2.jpg

Uran je první novou planetou objevenou od starověku – byl objeven až roku 1781 W. Herschelem. Sklon jeho osy rotace k normále dráhy je 98° . Jedná se tedy o retrográdní (zpětnou) rotaci. Díky sklonu osy svítí Slunce střídavě na severní a jižní pól planety[35].

Oproti tomu sklon magnetické osy k ose rotační je 60° (Obr. 28), což je velmi extrémní sklon. Podobný jev lze sledovat i u Neptunu, kde se jedná o rozdíl 50° .



Obrázek 28: Sklon Uranových os

Převzato z:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/17/Uranian_Magnetic_field_cs.png

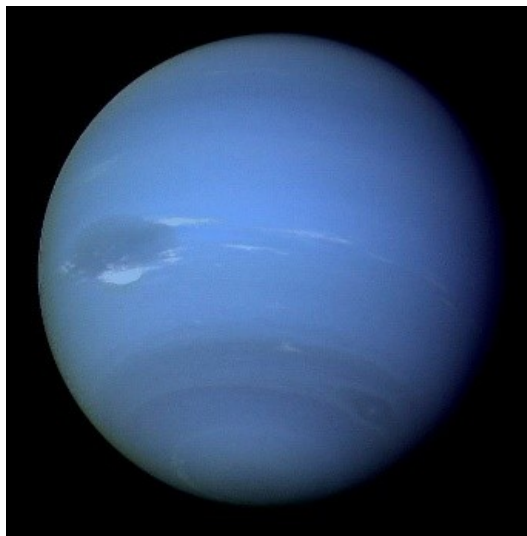
V roce 1977 bylo zjištěno, že Uran má slabé prstence. Do dnešních dnů (březen 2016) bylo zatím objeveno 27 měsíců, za všechny jmenujme alespoň Mirandu a Uriel.

Uran je s teplotou atmosféry kolem 50 K nejchladnější planetou sluneční soustavy. Jeho modrozelená barva je způsobena přítomností metanu v atmosféře, který pohlcuje červenou část spektra.

4.5.4 Neptun

Neptun (Obr. 29) obíhá Slunce ve vzdálenosti 30 au a oběhne ho jednou za 165 roků. Den trvá přibližně 16 pozemských hodin. Poloměr Neptunu je zhruba čtyřikrát větší než poloměr Země, hmotnost má sedmnáctkrát větší.

Objeven byl roku 1846 na základě pozorování poruch dráhy Uranu. Teoreticky jeho polohu vypočetl Pařížan Le Verrier, planetu pak našel Berlíňan Johann Galle.



Obrázek 29: Neptun

Převzato z:

http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/image/uranus_voy2.jpg

Jak již bylo dříve zmíněno, sklon magnetické osy Neptunu vzhledem k ose rotační je 50°.

V souvislosti s Neptunem se hovoří o tzv. Teorii migrace, kdy se předpokládá, že Neptun vznikl původně blíže Slunci, ale později se přesunul na dráhu vzdálenější.

V roce 1989 byly okolo Neptunu objeveny slabé prstence.

Doposud bylo objeveno 14 měsíců, přičemž největším z nich je Triton, který planetu obíhá v opačném směru. Triton pravděpodobně pochází z Kuiperova pásu a byl Neptunem zachycen až dodatečně. Na Tritonu se nachází kryovulkány, které chrlí tekutý dusík[37].

Tělesa za Neptunem se nazývají transneptunická tělesa.

4.6 Kuiperův pás

Hypotéza o existenci disku z malých těles za Neptunem vznikla v roce 1951. Roku 1992 pak byl Kuiperův pás skutečně objeven.

Nachází se v oblasti od 30 au po asi 55 au. Je podobný Hlavnímu pásu asteroidů mezi Marsem a Jupiterem, nicméně je mnohem rozlehlejší a hmotnější. V Kuiperově pásu byly objeveny trpasličí planety – například Pluto, Haumea, Eris a Makemake.

4.6.1 Pluto

Objeveno bylo roku 1930 Clydem Tombaughem. Původně bylo Pluto (Obr. 30) pokládáno za devátou planetu Sluneční soustavy, ale roku 2006 bylo na konferenci v Praze přerazeno mezi trpasličí planety.



Obrázek 30: Pluto

Převzato z:

<http://www.nasa.gov/feature/looking-back-at-the-year-of-pluto>

Obíhá v průměrné vzdálenosti 40 au, přičemž díky velké excentricitě se oběhová vzdálenost pohybuje mezi 30 a 50 au. Rok na Plutu trvá 248 pozemských roků.

Pluto má 5 měsíců. Největší z nich – Charon – byl objeven roku 1978. Těžiště soustavy Pluto – Charon pak leží mimo Pluto. Jedná se tedy o binární systém „trpasličí dvojplanety“.

Výzkum Pluta provádí sonda New Horizons, která se k němu nejbližší přiblížila 14. 7. 2015.

4.6.2 Trpasličí planety Eris a Makemake

Eris byla objevena roku 2003. Obíhá ve vzdálenostech od 38 au po 98 au a její průměrná oběhová vzdálenost je 68 au. Slunce oběhne jednou za 557 let. Je o něco menší než Pluto (průměr 2330 km oproti 2370 km), je však hmotnější. Má měsíc Dysnomia.

Makemake byla objevena roku 2005. Jedná se o třetí největší trpasličí planetu.

4.7 Rozptýlený disk

Sahá od vzdálenosti 35 au do 100 au a prolíná se tak s Kuiperovým pásem. Obsahuje tělesa s velkou výstředností. Předpokládá se, že vznikl rozptýlením těles z Kuiperova pásu gravitačním vlivem Neptunu v době, kdy se Neptun přesunul na vzdálenější dráhu[36].

Také se předpokládá, že rozptýlený disk je místem původu periodických komet, než je plynní obří svým gravitačním působením vyšlou do vnitřních oblastí sluneční soustavy.

4.8 Oortův oblak

Teoreticky předpokládaný kulový útvar okolo Sluneční soustavy tvořený malými kamennými a ledovými tělesy. Měl by se nacházet ve vzdálenosti 2000 – 100 000 au, přičemž maximum hmoty by se mělo nacházet v oblasti kolem 50 000 au.

Oortův oblak je pravděpodobným zdrojem dlouhoperiodických komet přicházejících ke Slunci ze všech směrů.

5 Klasifikace hvězd

5.1 Hvězdná spektra

V roce 1814 J. Fraunhofer ve spektru Slunce objevil přes 500 temných čar (absorpční spektrum). V roce 1859 pak G. Kirchhoff a R. Bunsen zformovali základy spektroskopie, založené na faktu, že každý prvek má své charakteristické spektrum.

Hvězdná spektra poskytují téměř veškerou informaci o hvězdách: efektivní teplotu a tlak atmosféry, její chemické složení, magnetické pole, rychlost pohybu hvězdy atd. Chladnější hvězdy mají načervenalou barvu, se zvyšující se teplotou se pak barva mění přes žlutou a bílou barvu až k modré.

Spektra dělíme na diskrétní, spojitá, absorpční a emisní.

5.1.1 Diskrétní spektrum

Diskrétní spektrum se vyznačuje skokovými změnami energie, což je důsledkem kvantování této veličiny[29].

Změna energie atomu z hodnoty E_n na hodnotu E_k je doprovázena emisí (resp. absorpcí) fotonu o frekvenci f_{nk} , resp. o vlnové délce λ_{nk} :

$$E_n - E_k = h \cdot f_{nk} = h \cdot \frac{c}{\lambda_{nk}}$$

Hladiny energie atomu vodíku (v Bohrově modelu) jsou konkrétně:

$$E_n = -hcR \cdot \frac{1}{n^2} \Rightarrow \frac{1}{\lambda_{nk}} = R \cdot \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

kde R je Rydbergova konstanta:

$$R = \frac{me^4}{8\epsilon_0 h^3 c} \doteq 1,1 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

5.1.2 Spojité spektrum

Zdrojem spojitého spektra je například plazma nebo kapalná či pevná tělesa. Planckův zákon vyjadřuje spektrální hustotu rovnovážného tepelného záření (tj. elektromagnetickou energii, připadající na jednotkový objem a jednotkový interval vlnových délek kolem vlnové délky λ):

$$u(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

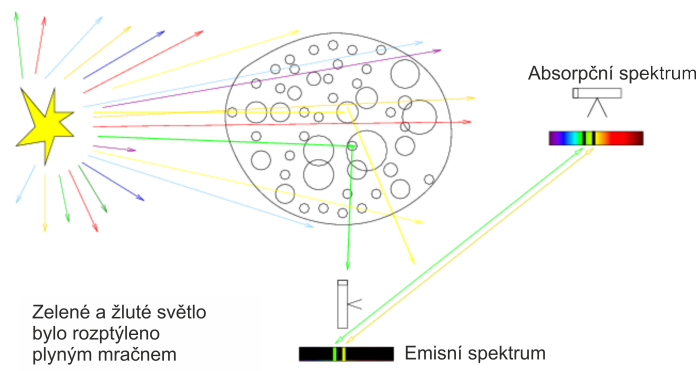
Celková hustota elektromagnetické energie záření o teplotě T je pak:

$$w(T) = \int dw = \int_{\lambda=0}^{\infty} u(\lambda, T) d\lambda = \frac{4\sigma}{c} \cdot T^4$$

Stefanova-Boltzmannova konstanta: $\sigma \doteq 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$

5.1.3 Absorpční a emisní čáry

Absorpční čáry jsou tmavé čáry na světlém pozadí, které vznikají pohlcením (absorpcí) fotonu procházejícího atmosférou hvězdy, ionty, atomy nebo molekulami, které se v ní nacházejí. Ty však mohou pohltit jen fotony o určitých frekvencích v závislosti na rozložení jejich diskretních energetických hladin.



Obrázek 31: Absorpční a emisní čáry

Převzato a upraveno z:

<http://astronomy.nmsu.edu/geas/lectures/lecture19/slide02.html>

Emisní čáry jsou naopak světlé čáry na tmavším pozadí, které jsou způsobeny vyzářením (emisí) fotonu během změny energetické hladiny elektronu v excitovaném atomu. Tyto čáry bývají vidět například v rozsáhlých obálkách hvězd. Absorpční a emisní spektra jsou nespojitá[30].

5.2 Hvězdná velikost (magnituda)

5.2.1 Zdánlivá hvězdná velikost

I prostým okem je vidět rozdíl mezi jasností hvězd na obloze, což si uvědomil už Ptolemaios, který sestavil katalog hvězd, ve kterém každé hvězdě přiřadil její hvězdnou velikost (hvězdné velikosti zavedl již Hipparchos). Nejjasnější hvězdy byly hvězdy první velikosti, nejméně jasné hvězdy měly velikost šest.

Takto zavedená hvězdná velikost se v podstatě používá dodnes (dnes se určuje objektivně definovanými metodami a nikoli subjektivně jako v případě Hipparcha[36]). Moderně ji lze definovat pomocí logaritmu zářivé energie (resp. zářivého výkonu),

která na Zemi od hvězdy přichází[27]. Obvykle se značí m a jednotkou je magnituda (mag).

Se zdokonalováním pozorovacích přístrojů byly objevovány stále slabší hvězdy, proto bylo Ptolemaiovo resp. Hipparchovo třídění rozšířeno o další třídy, které nabývají libovolných reálných hodnot. Nejslabší okem viditelné hvězdy mají m kolem 6 mag. Nejslabší hvězdy pozorovatelné dalekohledem pak mají m až 30 mag. Slunce má -26,74 mag, Měsíc v úplňku -12,7 mag.

5.2.2 Absolutní hvězdná velikost

Zdánlivá hvězdná velikost vyjadřuje, jak se pozorovaná hvězda jeví ze Země, proto je nazvána zdánlivá (či pozorovaná) hvězdná velikost. Bude-li však hvězda méně jasná jen proto, že je dále od Země, její vlastnosti se fyzicky nemění[28].

Proto je zavedena ještě skutečná (absolutní) hvězdná velikost. Ta se značí M a udává hvězdnou velikost (magnitudu) hvězdy, jak by se jevila ze vzdálenosti 10 parseců (1 pc = 3,262 ly). Jinými slovy lze říct, že si pozorovatel hvězdu myšleně posune do této vzdálenosti a poté určí její magnitudu.

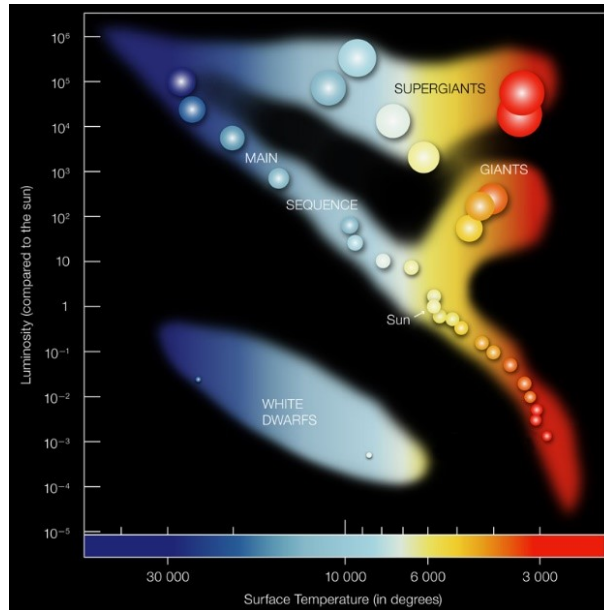
5.3 Hertzsprungův-Russellův diagram (HR diagram)

Harvardská klasifikace spektra hvězd (zařazení do spektrální třídy) vytvořená na přelomu 19. a 20. století po úpravách a přerovnání podle klesající teploty vypadá dnes takto:

- O ... $T \sim 35\,000$ K, barva modrá či namodralá, silné čáry He^+ .
- B ... $T \sim 20\,000$ K, barva modrobílá, čáry He.
- A ... $T \sim 10\,000$ K, barva bílá, Balmerova série atomu H.
- F ... $T \sim 7\,500$ K, barva bílá až nažloutlá.
- G ... $T \sim 6\,000$ K, barva žlutá, silné čáry Ca^+ a Fe (Slunce je třídy G2).
- K ... $T \sim 4\,500$ K, barva naoranžovělá, silné čáry kovů.
- M ... $T \sim 3\,500$ K, červené hvězdy, silné pásy molekul (např. Ti_2O_3).
- L ... $T \sim 2\,000$ K, chladní trpaslíci, barva tmavě červená.

Samotný diagram (Obr. 32) byl vytvořen kolem roku 1910 nezávisle E. Hertzsprungem a H. Russellem. Poloha hvězd v diagramu je určena dvěma souřadnicemi: teplotou T (respektive spektrální třídou, viz výše) a svítivostí L (respektive absolutní magnitudou). Osa x udává spektrální třídu (O, B, A,...) nebo efektivní

teplotu povrchu hvězdy T (pozor, teplota ve směru osy x klesá). Osa y pak udává svítivost (luminositu) L , případně absolutní magnitudu M . Ta s rostoucí svítivostí klesá z kladných do záporných hodnot.



Obrázek 32: HR diagram

Převzato z:

http://chandra.harvard.edu/graphics/edu/formal/variable_stars/major_branches.jpg

5.3.1 Oblasti HR diagramu

V HR diagramu lze rozlišit několik skupin. V hlavní posloupnosti (HP) hvězdy ve svém jádru „spalují“ vodík na hélium (zjednodušeně $4\text{H} \rightarrow \text{He}$). Dalšími vývojovými fázemi hvězdy v závislosti na její hmotnosti mohou být obři, veleobři, podobři, bílí trpaslíci, neutronové hvězdy, černé díry, atd. (viz dále). Jednotlivé skupiny v HR diagramu lze určit z šířky jednotlivých spektrálních čar – s rostoucí hustotou ve fotosféře hvězdy roste i šířka jejích čar. Největší hustotu atmosféry a tedy i největší šířku čar mají hvězdy na HP a bílí trpaslíci.

6 Vývoj hvězd

6.1 Vznik hvězdy

- 1) Molekulární hvězdný oblak (především H_2), počáteční teplota $T \sim 10$ K, počáteční velikost $R \sim 1014$ km.
- 2) Vytváření shluků hmoty (např. v důsledku rázové vlny od blízké supernovy), gravitační kolaps, zahřívání. Z jednoho oblaku se zpravidla formují celé soustavy hvězd (hvězdokupy).
- 3) V centru shluku růst hustoty a teploty a s ní disociace molekul ($H_2 \rightarrow H + H$) a později ionizace ($H \rightarrow H^+ + e^-$).
- 4) Rostoucí teplota a tlak v jádře gravitační kolaps významně zpomalí, protohvězda dosáhne (téměř) hydrostatické rovnováhy (Hayashiho linie v HR diagramu).
- 5) Následuje pozvolná další kontrakce. Další vývoj je závislý na hmotnosti:
 - (a) Pro hmotnosti $M \gtrsim 0,08M_S = 80M_J$ ($M_S \dots$ hmotnost Slunce, $M_J \dots$ hmotnost Jupiteru) dosáhne teplota v jádře hodnoty $T \sim 7$ mil. K dojde ke spuštění termonukleární reakce, slučování vodíku na hélium (schematicky $4H \rightarrow He + \text{energie}$), hvězda „dosedne“ na HP.
 - (b) Pro hmotnosti $12 M_J \lesssim M \lesssim 80M_J$ nedojde k zapálení termojaderné reakce \Rightarrow hnědý trpaslík.
 - (c) Pro hmotnosti $M \lesssim 12M_J$ vznikne obří planeta.

6.2 Hvězda na hlavní posloupnosti

Poloha hvězd na HP je dána (poněkud „rozmazanou“) křivkou $L = L(T)$. Teplota T povrchu hvězdy se stanovuje z jejího spektra. Známe-li teplotu hvězdy na HP, známe o ní vše (se zmíněným „rozmazáváním“): na ose y odečteme svítivost a určeny jsou i další charakteristiky (poloměr, hmotnost, ...).

Hvězdy se na HP vyvíjejí jen málo – jde o cestovní zastávku, na níž dochází k „hoření“ vodíku na hélium. Během této fáze vývoje se hvězda posouvá k poněkud vyšším hodnotám teploty, svítivosti a poloměru. Např. původní svítivost a poloměr Slunce po dosednutí na HP byly $L \approx \frac{3}{4}L_S$, $R \approx 0,9R_S$.

Hoření vodíku na hélium probíhá dvěma mechanismy:

- 1) Lehké hvězdy ($M \leq 1,5M_S$, $T \leq 18$ mil. K) \Rightarrow převažuje pp-řetězec.
- 2) Těžké hvězdy ($M \geq 1,5M_S$, $T \geq 18$ mil. K) \Rightarrow převažuje CNO cyklus.

6.2.1 pp - cyklus

1) ${}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^2_1\text{H} + e^+ + \nu_e$ (pomalý průběh), $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$ (anihilace)

2) ${}^2_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + \gamma$

3) Další reakce mohou probíhat ve více větvích. U hvězd hmotnosti Slunce probíhá 86 % reakcí v cyklu pp I: ${}^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2{}^1_1\text{H}$

Zápis reakcí 1 - 3 souhrnně: $4{}^1_1\text{H} + 2e^- \rightarrow {}^4_2\text{He} + 6\gamma + 2\nu_e$

Celková produkce energie na 1 řetězec je 26,7 MeV, z toho asi 0,5 MeV odnášejí neutrina ven z hvězdy.

6.2.2 CNO cyklus

Jádra mladších generací hvězd obsahují ve svém nitru malé množství uhlíku, ten působí jako katalyzátor reakce.

1) ${}^{12}_6\text{C} + {}^1_1\text{H} \longrightarrow {}^{13}_7\text{N} + \gamma$

2) ${}^{13}_7\text{N} \longrightarrow {}^{13}_6\text{C} + e^+ + \nu_e$ (β^+ rozpad),

$e^+ + e^- \longrightarrow 2\gamma$ (anihilace elektron – pozitron)

3) ${}^{13}_6\text{C} + {}^1_1\text{H} \longrightarrow {}^{14}_7\text{N} + \gamma$

4) ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_1\text{H} \longrightarrow {}^{15}_8\text{O} + \gamma$

(nuklid ${}^{14}_7\text{N}$ je velmi stabilní \Rightarrow reakce probíhá velmi pomalu)

5) ${}^{15}_8\text{O} \longrightarrow {}^{15}_7\text{N} + e^+ + \nu_e$ (β^+ rozpad), $e^+ + e^- \longrightarrow 2\gamma$

6) ${}^{15}_7\text{N} + {}^1_1\text{H} \longrightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^4_2\text{He}$ (návrat k výchozímu elementu ${}^{12}_6\text{C}$)

Celková uvolněná energie na 1 cyklus je přibližně 25 MeV. V rovnováze musí všechny fáze 1 – 6 cyklu probíhat se stejnou vydatností. Protože reakce (4) probíhá nejpomaleji, převládá v jádru hvězdy koncentrace ${}^{14}_7\text{N}$ nad ostatními nuklidy (C, O a zbývající dva nuklidy N).

6.3 Hvězda po opuštění HP

6.3.1 Málo hmotné hvězdy ($0,08M_S \lesssim M \lesssim 0,5M_S$)

U málo hmotných hvězd probíhá konvekce (promíchávání materiálu) v celém objemu hvězdy, což umožňuje spotřebování veškerého jejího vodíku. Další nukleární reakce již nenastanou, hvězda se pomalu gravitačně smršťuje a ochlazuje – vzniká heliový bílý trpaslík.

Tyto úvahy jsou však pouze teoretické, protože málo hmotné hvězdy budou setrvávat na HP po velice dlouhou dobu přesahující stáří vesmíru.

6.3.2 Středně hmotné hvězdy ($0,5M_S \lesssim M \lesssim 8M_S$)

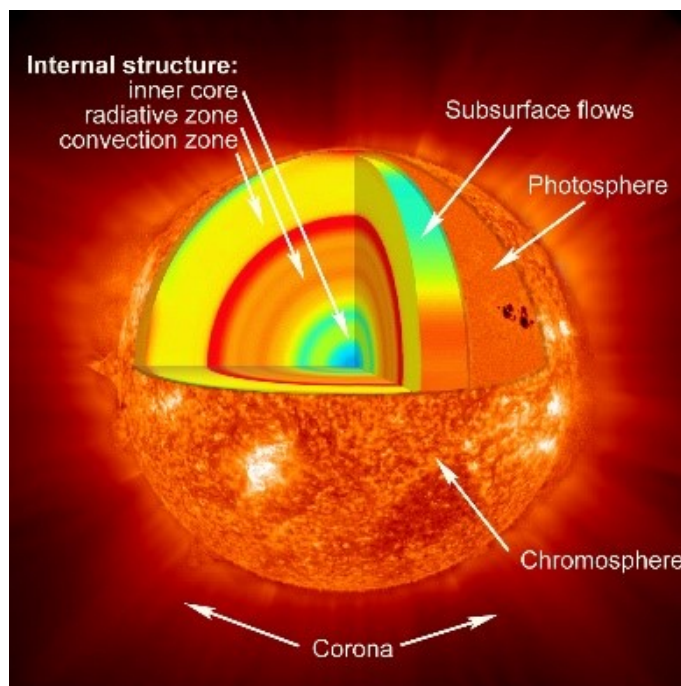
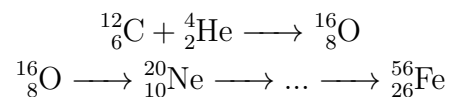
Po vyhoření H se He-jádro gravitačně smršťuje a tím se i zahřívá. Po dosažení teploty T kolem 100 mil. K dojde k „hoření“ helia – tzv. 3α proces. Schematicky: $3\ ^4_2\text{He} \longrightarrow\ ^{12}_6\text{C}$. Případně pro vyšší teploty probíhá i reakce $\ ^{12}_6\text{C} +\ ^4_2\text{He} \longrightarrow\ ^{16}_8\text{O}$.

Od horkého jádra se zapálí přilehlé vodíkové vrstvy a to vyvolává expanzi horních vrstev. Celková svítivost se mnohonásobně zvýší, zároveň se ale mnohonásobně zvýší i poloměr hvězdy a její povrch se tím ochladí na teplotu přibližně 3000 K – červený obr[37].

Dochází k pulzacím hvězdy, přitom dojde k odtržení vnějších vrstev – planetární mlhovina (historický název, s planetami nemá nic společného). Zbude bílý trpaslík, tvořený uhlíkem a kyslíkem [37].

6.3.3 Těžké hvězdy ($M > 8M_S$)

Teplota v nitru hvězd může dosahovat hodnot, při kterých dochází k dalším α -záchytům:



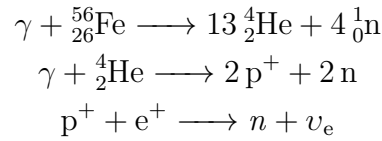
Obrázek 33: Struktura hvězdy (Slunce)

Převzato z:

http://www.nasa.gov/images/content/171926main_heliolayers_label_lg.jpg

Železo je nejstabilnější prvek, takže další tvorba tepla nukleárními reakcemi již není možná. Železné jádro se gravitačně hroutí a tím i zahřívá. Při teplotě několika

miliard kelvinů mají γ -fotony v jádře již takovou energii, že začnou rozbíjet nuklidy železa – dochází k fotodisintegraci. Schematicky:



Při fotodisintegraci dochází k intenzivní tvorbě neutrin, která okamžitě opouští hvězdu a odnášejí většinu energie. V jádře se vytvoří degenerovaný neutronový plyn, který gravitační kolaps prudce zbrzdí. Vytvoří se rázová vlna směrem ven z hvězdy, která se projeví jako výbuch supernovy II. typu (SN II). Po výbuchu zbude neutronová hvězda či pulsar (pro $M \leq 12M_{\text{S}}$), respektive černá díra (pro $M \geq 12M_{\text{S}}$).

6.4 Kompaktní hvězdy

Jako kompaktní hvězdy se označují bílí trpaslíci, neutronové hvězdy, černé díry a další exotické hvězdy představující závěrečná stádia vývoje hvězd.

6.4.1 Bílí trpaslíci (BT)

Jako bílí trpaslíci končí hvězdy o středních hmotnostech ($0,5M_{\text{S}} \lesssim M \lesssim 8M_{\text{S}}$)[37]. Na hlavní posloupnosti „spalují“ vodík ($4\text{H} \longrightarrow \text{He}$). Ve fázi červeného obra po dosažení teplot kolem 10^8 K vzniká v jádře uhlík a kyslík ($3 {}^4_2\text{He} \longrightarrow {}^{12}_6\text{C}$, ${}^{12}_6\text{C} + {}^4_2\text{He} \longrightarrow {}^{16}_8\text{O}$). Nemá-li hvězda dostatečnou hmotnost, aby docházelo k dalším fúzím, zůstane po odhození vnějších vrstev hvězdy (tzv. planetární mlhovina) žhavé jádro, složené z uhlíku a kyslíku – bílý trpaslík[37].

Jeho stabilitu zajišťuje tlak elektronů, vyvolaný kvantovými efekty – degenerovaný elektronový plyn.

Hmotnost BT nesmí překročit hodnotu $1,4M_{\text{S}}$ (Chandrasekharova mez), jinak by došlo k dalšímu zhroucení jádra (neutronová hvězda, černá díra).

Nejčastější hmotnost BT je kolem $0,6M_{\text{S}}$, nejčastější poloměr kolem 7000 km (velikost BT je tedy srovnatelná se Zemí).

Bílý trpaslík se postupně ochlazuje, za dobu překračující stávající dobu existence vesmíru (13,8 mld. let) by se proměnil v černého trpaslíka.

Hmotnější hvězdy končí výbuchem jako supernovy II. typu. Po výbuchu zůstává neutronová hvězda nebo černá díra.

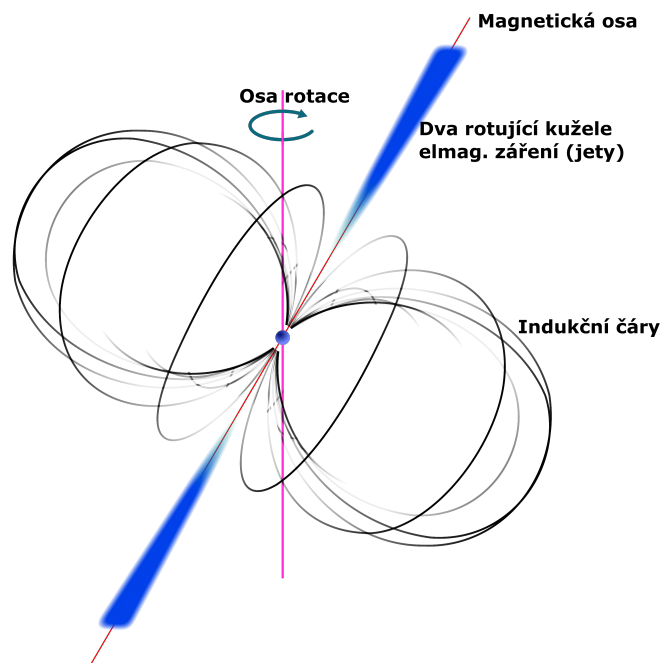
6.4.2 Neutronové hvězdy (NH)

Typická hmotnost M je přibližně $0,6M_{\text{S}}$ a typický poloměr R kolem 10 km.

Stabilitu neutronové hvězdy zajišťuje degenerovaný neutronový plyn ($p + e \longrightarrow n + \nu_e$). S růstem hmotnosti NH roste gravitace a její poloměr klesá. Při hmotnosti kolem $3M_{\text{S}}$ již tlak degenerovaného neutronového plynu nestačí vzdorovat gravitaci a objekt se zhroutí do černé díry.

Po výbuchu supernovy nově vytvořená NH velice rychle rotuje – jde o důsledek zákona zachování momentu hybnosti: náhlé zmenšení rozměrů jádra je doprovázeno prudkým zvýšením jeho úhlové rychlosti. Perioda rotace T je 0,03 - 0,3 s. Během několika desítek milionů let se v důsledku energetických ztrát rotace zpomalí[37].

Rychle rotující neutronové hvězdy představují tzv. pulsary (Obr. 34).



Obrázek 34: Pulsar

Převzato a upraveno z:

<https://en.wikipedia.org/wiki/Pulsar>

První pulsar objevila roku 1967 J. Bellová. Projevoval se jako objekt vysílající rádiové pulsy s periodou 1,3 s.

Pokud se Země ocitne v jednom ze dvou rotujících kuželů, můžeme pozorovat pulsy s periodou rotace hvězdy.

Neutronové hvězdy s extrémně silným magnetickým polem se nazývají magnetary.

Magnetary a pulsary po určité době zanikají (neutronové hvězdy ztrácejí rotaci).

6.4.3 Černé díry (CD)

Vznikají po výbuchu velmi hmotných hvězd, jejichž hmotnost je blízká $20M_{\text{S}}$. Hmotnost zbytku pak musí být větší nebo rovna M_{TOV} , což je přibližně $3M_{\text{S}}$. M_{TOV} je Tolmanova-Oppenheimerova-Volkoffova mez. Ta je známa jen velmi přibližně, protože není známa stavová rovnice neutronového plynu. Vliv na hmotnost M_{TOV} má i rotace a magnetické pole[37].

Klasická úvaha v rámci Newtonovy mechaniky

Předem je třeba poznamenat, že CD se řídí zákony obecné teorie relativity, nikoli mechanikou Newtonovou.

J. Mitchell a P. S. Laplace koncem 18. století za použití klasické Newtonovské mechaniky a analogie 2. kosmické rychlosti určili únikovou rychlost z povrchu kulového objektu o hmotnosti M a poloměru R :

$$\frac{mv^2}{2} - G \cdot \frac{mM}{R} = \frac{mv_{\infty}^2}{2} - 0 \geq 0$$

$$v \geq \sqrt{\frac{2GM}{R}} \quad (\text{analogie 2. kosmické rychlosti pro Zemi})$$

$$R \rightarrow 0 \Rightarrow v \rightarrow \infty$$

Protože však maximální rychlost v nemůže překročit rychlost světla c , musí platit:

$$v \leq c \Rightarrow R \geq \frac{2GM}{c^2} \equiv R_{\text{Sch}}$$

R_{Sch} ... Schwarzschildův poloměr – je-li hmota M soustředěna v oblasti $R < R_{\text{Sch}}$, nemůže z jejího povrchu uniknout nic, ani elektromagnetické záření. K téže hodnotě Schwarzschildova poloměru lze dospět i prostřednictvím obecné teorie relativity. Je čistě náhodné, že newtonovská mechanika vede ke stejné hodnotě.

Spočítejme Schwarzschildův poloměr pro objekty o hmotnosti Země a Slunce:

Země: $M_{\text{Z}} = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg} \Rightarrow R_{\text{Sch}} \sim 1 \text{ cm}$.

Slunce: $M_{\text{S}} = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg} \Rightarrow R_{\text{Sch}} \sim 3 \text{ km}$.

V černé díře se ztrácí většina informace. Ukazuje se, že může být charakterizována pouze třemi veličinami:

- hmotností M ,
- momentem hybnosti \vec{L} ,
- nábojem Q .

Výskyt černých děr

- 1) CD jako pozůstatky velmi hmotných hvězd jsou pozorovány v binárních systémech jako neviditelný průvodce o hmotnosti několika hmotností Slunce[35]. Plyn, dopadající na CD z doprovodné hvězdy, se silně zahřívá a je tak zdrojem záření X.

První adept na CD – Cygnus X-1 – byl objeven družicí Uhuru na počátku 70. let, jako součást dvojhvězdy. Viditelný průvodcem byl modrý nadobr spektrální třídy B. Neviditelný objekt měl hmotnost přibližně $10M_{\odot}$. Ze svého okolí emitoval záření X a byl velmi malý, z čehož je usuzováno, že se pravděpodobně jedná o CD.

- 2) CD v centrech galaxií. Hvězdy v okolí středu galaxie se pohybují velice rychle okolo velmi hmotného centra s M přibližně $(10^6 - 10^9) M_{\odot}$ [35].

Z jeho okolí vychází intenzivní emise elektromagnetického záření s charakteristickými výtrysky - jety.

Černou díru v centru Mléčné dráhy značíme Sagittarius A*, $M \sim 4,5 \cdot 10^6 M_{\odot}$.

Kvasary, pravděpodobně masivní CD v centrech aktivních galaxií, silně vyzařují v důsledku pohlcování okolní hmoty. Pozorované kvasary leží velmi daleko, takže je jejich sledování vlastně pohledem do daleké minulosti. Kvasary zřejmě představují určitou fázi vývoje galaxie.

- 3) Středněhmotné CD. Zdá se, že existují i CD o středních hmotnostech $M \sim (10^2 - 10^3)M_{\odot}$, například v centrech kulových hvězdokup.

7 Kosmologie

Roku 1915 A. Einstein formuloval obecnou teorii relativity (OTR), ze které vyplývají možné kosmologické modely vývoje vesmíru.

G. Lemaitre roku 1927 zjistil, že Einsteinovy rovnice OTR vedou k nestacionárnímu vesmíru. Uváděl, že vesmír vznikl z primordiálního atomu[37].

E. Hubble roku 1929 pozorováním potvrdil, že vesmír je nestabilní a že vzdálené galaxie se od sebe vzdalují rychlostí úměrnou jejich vzdálenosti:

$$v = H \cdot r,$$

přičemž v je radiální rychlost vzdalování, r je vzdálenost galaxií a H je Hubbleova konstanta, kdy podle současných měření $H \doteq 68 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}$ (při zvětšení vzdálenosti o 1 Mpc vzroste rychlost vzdalování o 68 km/s). Hubbleova konstanta se během vývoje vesmíru mění.

Dle OTR je rychlost vzdalování způsobena expanzí prostoru mezi galaxiemi. Odhad doby expanze z „jednoho bodu“ (tj. stáří vesmíru, doba od Velkého třesku – Big Bang):

$$t \sim \frac{r}{v} = \frac{r}{Hr} = \frac{1}{H} \sim 13,8 \text{ mld. let}$$

Při tomto výpočtu však není uvažováno, že rychlost v ani Hubbleova konstanta H nejsou během expanze konstantní.

Podle původního modelu OTR o průběhu expanze rozhoduje jen gravitační síla – temná energie ještě nebyla známa.

Z Hubbleovy konstanty lze teoreticky stanovit kritickou střední hustotu vesmíru ρ_{krit} :

$$H \sim \frac{70 \text{ km/s}}{\text{Mpc}} \Rightarrow \rho_{\text{krit}} \sim 9 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3 \text{ (tj. hmotnost pěti atomů vodíku v } 1 \text{ m}^3\text{)}$$

Skutečnou střední hustotu vesmíru označme ρ – v teorii se pracuje s kosmologickým parametrem hustoty $\Omega_0 \equiv \rho/\rho_{\text{krit}}$ [37].

a) $\rho < \rho_{\text{krit}}$ ($\Omega_0 < 1$)

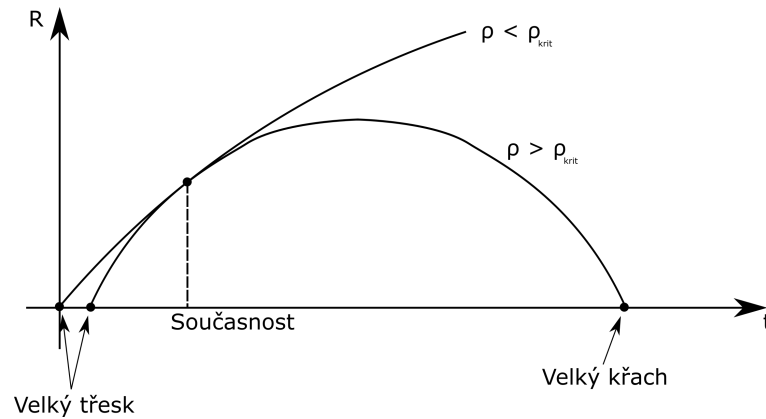
Gravitační síla sice zpomaluje počáteční rychlost expanze, úplně ji však nikdy nezastaví – vesmír se bude trvale rozpínat. Vesmír má zápornou křivost (analogie – povrch jezdeckého sedla) a má nekonečnou velikost – je otevřený.

b) $\rho > \rho_{\text{krit}}$ ($\Omega_0 > 1$)

Gravitační síla po určité době expanzi zcela zastaví a obrátí její směr – dojde k Velkému křachu. Vesmír má kladnou křivost (analogie – povrch koule) a má konečnou velikost – je uzavřený.

c) $\rho = \rho_{\text{krit}} (\Omega_0 = 1)$

Mezní stav – rychlost expanze se bude asymptoticky blížit nule. Kritický vesmír má nulovou křivost – je plochý (tj. euklidovský). Zdá se, že v takovém stavu náš vesmír je – to vysvětluje teorie inflace (“nafouknutí”) vesmíru.



Obrázek 35: Vývoj vesmíru

Veličina R v grafu představuje charakteristický rozměr vesmíru (např. vzdálenost dvou pevně daných galaxií).

Ukazuje se, že o budoucnosti vesmíru nerozhoduje gravitace, ale temná energie. Tři formy hmoty-energie ($E = mc^2$) ve vesmíru:

$$\rho = \rho_Z + \rho_L + \rho_{\text{TE}}$$

- ρ_Z ... hustota energie (nebo relativistické hmotnosti) elektromagnetického záření (fotonů)
- ρ_L ... hustota látky; zahrnuje látku tvořenou protony, neutrony, elektrony, ..., ale především dominující temnou látku (hmotu), jejíž částice nebyly v laboratořích dosud objeveny.
- ρ_{TE} ... hustota temné energie (TE); působí proti gravitaci a urychluje expanzi vesmíru. Podle současných představ jde o energii vakua (prostoru).

Podle dominance jednotlivých forem energie rozlišujeme ve vývoji vesmíru tři éry:

- Éra záření, $\rho_Z > \rho_L, \rho_Z > \rho_{\text{TE}}$
- Éra látky, $\rho_L > \rho_Z, \rho_L > \rho_{\text{TE}}$
- Éra temné energie, $\rho_{\text{TE}} > \rho_L, \rho_{\text{TE}} > \rho_Z$

S expanzí vesmíru a se zvětšováním prostoru se jednotlivé hustoty mění podle různých zákonů. V následujících úpravách písmenem R označme charakteristický rozměr vesmíru – může jít o poloměr myšlené koule, pevně spjaté s prostorem.

ad a) Hustota počtu fotonů $= \frac{\text{počet fotonů v kouli}}{\text{objem koule}} \sim \frac{1}{R^3}$

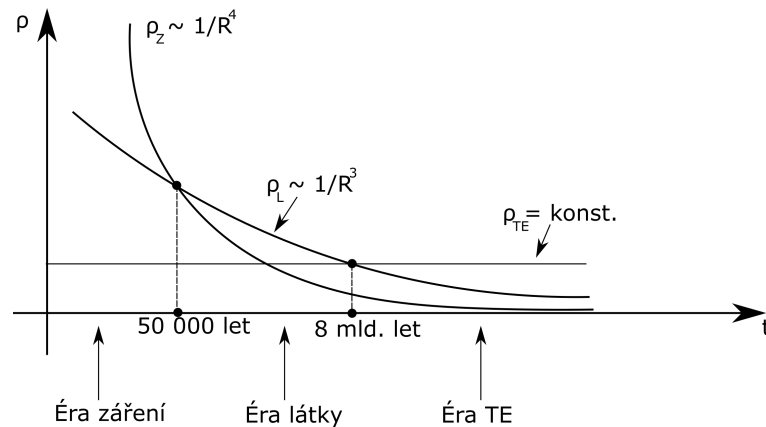
Současně se mění i vlnová délka fotonů – natahuje se s expanzí prostoru, $\lambda \sim R$. Tedy energie jednoho fotonu $= h \cdot c/\lambda \sim 1/\lambda \sim 1/R$.

Celková hustota energie – hmotnosti fotonů se tedy mění podle zákona:

$$\rho_Z \sim \frac{1}{R^3} \cdot \frac{1}{R} = \frac{1}{R^4}$$

ad b) Částice látky (atomy,...) mění s expanzí prostoru svou hustotu podle zákona $1/R^3$. Jejich energie se – na rozdíl od fotonů – nemění a je rovna $E = mc^2$, kde m je jejich hmotnost. Tedy: $\rho_L \sim 1/R^3$.

ad c) Temná energie je energií prostoru. Teoreticky se proto předpokládá, že její hustota (čili energie v jednotce objemu) je konstantní: $\rho_{TE} = \text{konst.}$



Obrázek 36: Grafické znázornění jednotlivých érá

Po Velkém třesku dominovalo vysoce energetické záření, které bylo v tepelné rovnováze s částicemi látky a antilátky:

$$\gamma + \gamma \leftrightarrow X + \bar{X}$$

Aby k tomuto procesu tvorby páru částice-antičástice mohlo docházet, musela být energie fotonů γ větší nebo rovna klidové energii částic X : $hf \geq m_X c^2$.

Během expanze vesmíru rychle klesala teplota a s ní i energie fotonů. Klesne-li energie fotonů pod hodnotu $m_X c^2$, nestačí jejich energie k tvorbě částic X – částice se od záření oddělí („vymrznou“).

Příklad:

$X = p$ (proton): reakce $\gamma + \gamma \leftrightarrow p + \bar{p}$ může probíhat oběma směry jen pro teploty $T \gtrsim 10^{13}$ K.

$X = e$ (elektron): reakce $\gamma + \gamma \leftrightarrow e^- + e^+$ může probíhat oběma směry, je-li $T \gtrsim 10^9$ K.

Z dosud nejasného důvodu měly v raném vesmíru částice převahu nad antičásticemi, např. 1 mld. \bar{p} : (1 mld. + 1)p. Po anihilaci každé miliardy párů p, \bar{p} zbude jediný proton. Proto žijeme ve světě hmoty, nikoli antihmoty.

7.1 Epochy po Velkém třesku

Poznámka: Uváděné časy a teploty je nutné brát jen orientačně.

1) Planckova epocha

$$0 < t \lesssim 10^{-43} \text{ s}$$

Všechny interakce (silná, slabá, elektromagnetická, gravitační) byly sjednoceny do jediné „prasíly“. Prostor a čas měly ve velmi malých měřítkách kvantové vlastnosti. Teorie neexistuje – chybí kvantová teorie gravitace.

2) GUTs (Great Unification Theories)

$$10^{-43} \text{ s} \lesssim t \lesssim 10^{-35} \text{ s}, T \sim 10^{32} \text{ K}$$

Od sjednocených interakcí se oddělila gravitace. Sjednoceny zůstaly interakce silná, slabá, elektromagnetická (popisují to teorie velkého sjednocení – je jich více).

3) Kvarková epocha

V čase $t \sim 10^{-35}$ s se vydělila silná interakce – vznik volných kvarků.

V čase $t \sim 10^{-10}$ s ($T \sim 10^{15}$ K) se od sebe oddělily elektromagnetická a slabá interakce.

V čase $t \sim 10^{-4}$ s ($T \sim 10^{13}$ K) se kvarky začaly vázat do protonů a neutronů ($p = (uud)$, $n = (udd)$) – konec kvarkové éry.

4) Leptonová epocha

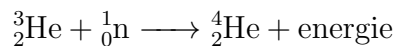
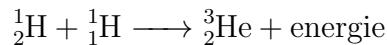
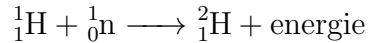
V čase $t \sim 1$ s ($T \sim 10^{10}$ K) neutrina přestala interagovat s hmotou \Rightarrow uvolnění reliktních neutrin (putují vesmírem dodneška).

V čase $t \sim 100$ s ($T \sim 10^9$ K) došlo k „vymrznutí“ e^- , e^+ (s malou převahou elektronů e^-) – konec leptonové epochy.

5) Nukleární epocha

$T \sim 10^8$ K \Rightarrow tvorba těžších nuklidů (${}^2_1\text{H}^+$... deuterium ${}^4_2\text{He}^{++}$... α částice - helion).

Příklady nukleárních reakcí:



Vytvořilo se ještě stopové množství lithia. Avšak v čase $t \sim 15$ min. klesla teplota na hodnotu $T \sim 300$ mil. K a těžší prvky se již nestačily vytvořit. Ty se vytvořily až později v nitru hvězd a v průběhu jejich explozí.

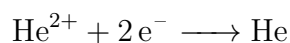
Konečný stav těsně po Velkém třesku: 1 atom He : 12 atomů H. Tomu odpovídá hmotnostní zastoupení He v raném vesmíru:

$$\frac{m(\text{He})}{m_{\text{TOT}}} = \frac{1 \cdot 4}{12 \cdot 1 + 1 \cdot 4} = 25 \%$$

Atmosféra Slunce obsahuje 28 % He. Tedy 3 % byly vytvořeny až po Velkém třesku ve hvězdách existujících před Sluncem.

6) Atomová epocha

V době $t \sim 380\,000$ let klesla teplota vesmíru na hodnotu $T \sim 3\,000$ K a při této teplotě mohlo již docházet ke vzniku atomů (fotony již neměly dostatek energie, aby atomy zpětně ionizovaly).



Záření předtím interagovalo s volnými elektrony. Po jejich zachycení v atomech přestalo s látkou interagovat – vzniklo reliktní záření.

7) Galaktická éra

200 mil. let $\lesssim t \lesssim$ 3 mld. let

Tvorba galaxií a dalších struktur (kupy, nadkupy).

8) Hvězdná éra

3 mld let $\lesssim t \rightarrow$ současnost

Období intenzivní tvorby hvězd. Od asi 8 mld. let od Velkého třesku po současnost – éra temné energie ($\rho_{\text{TE}} > \rho_{\text{L}}$), způsobuje urychlení expanze vesmíru.

1998, 1999 – S. Perlmutter; B. Schmidt a A. Riess – dvě nezávislé skupiny objevily urychlující se expanzi vesmíru. Roku 2011 za to obdrželi Nobelovu cenu[37].

7.2 Perioda inflace

Z astronomických pozorování vyplynuly dva jevy, které by kosmologické modely měly vysvětlit:

1. Zdá se, že vesmír je ve velkých měřítkách plochý – euklidovský. Je-li jeho křivost nulová, pak $\rho = \rho_{\text{krit}}, \Omega_0 = 1$.
2. Tzv. problém horizontu – z analýzy přicházejícího reliktního záření je zjevné, že vesmír je vysoce izotropní a homogenní, a to i v oblastech, které jsou od sebe tak daleko, že ani po dobu existence vesmíru si nemohly stihnout vyměnit energii a hmotu, které by vedly k nastolení homogenity. Jak tedy tato homogenita mohla vzniknout?

A. Guth roku 1980 přišel s hypotézou inflace (nafouknutí), která říká, že v důsledku kvantových fluktuací prostor (vakuum) zvýšil v nějaké oblasti následně svou energii. Prostor poté začal prudce expandovat.

K inflaci mohlo dojít na konci epochy GUTs. Během okamžiku kratšího než 10^{-32} s vesmír (případně nějaká jeho část) zvětšil své rozměry 10^{50} krát. Prostor přitom expandoval rychlostí mnohonásobně přesahující rychlost světla c ve vakuu (c je rychlost světla vůči místnímu prostoru, samostatný prostor však může expandovat nadsvětelnou rychlostí).

Inflace se ve vesmíru mohla objevit vícekrát a na více místech – vznik nezávislých inflačních bublin. Kosmos může obsahovat těchto bublin více, náš vesmír může být jen jednou bublinou z mnoha. Prostor mimo naši bublinu je pro nás nedostupný.

Inflace přirozeně vysvětluje oba předchozí problémy.

ad 1) Plochost vesmíru

Představme si modelově mravence o velikosti 1 cm, žijícího na povrchu koule o poloměru například 10 cm. Jelikož poloměr křivosti povrchu je srovnatelný s velikostí mravence, jeví se mu (resp. může se mu jevit) jeho vesmír – povrch koule – neeuklidovský.

Nafoukne-li se koule a její poloměr se zvětší 10^{50} krát na hodnotu 10^{51} cm = 10^{46} km, bude se mravenci (stále o velikosti 1 cm) jevit okolní povrch jako zcela plochý.

ad 2) Problém horizontu

Části vesmíru, které zdánlivě spolu nemohly nikdy komunikovat, jelikož jejich vzájemné vzdálenosti jsou nyní větší než je rychlost světla ve vakuu násobená stářím vesmíru, byly před inflací v těsném kontaktu a případné nehomogenity mezi nimi (rozdílné teploty, hustoty, tlak) se tak mohly vyhladit. Po expanzi zůstaly teplota a hustota v celém prostoru vyhlazené, tedy stejné[37].

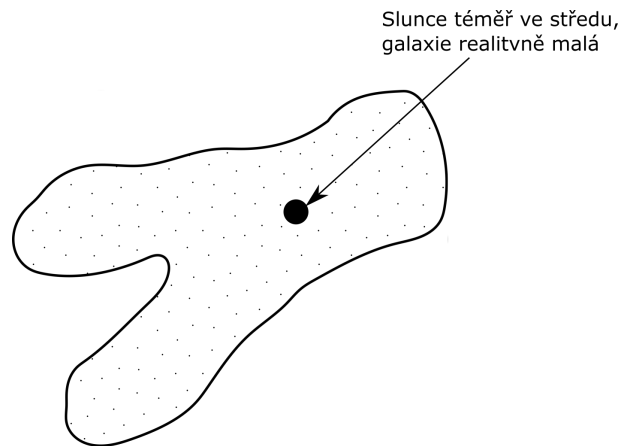
8 Galaxie

Gálaktos pochází z řečtiny a znamená mléko.

Naše galaxie se zve Mléčná dráha (MD) nebo jen Galaxie (s velkým G).

Ještě v 19. století se o existenci galaxií nic nevědělo, celý vesmír byl tvořen naší galaxií.

Představa W. Herschela na konci 18. století o tvaru naší galaxie je zobrazena na obrázku 37.



Obrázek 37: Galaxie dle W. Herschela

Při určování rozměrů MD a polohy Slunce v ní Herschel neuvažoval absorpci záření v mezihvězdném plynu. Viděl tak jen hvězdy poblíž a ve všech směrech od Slunce o stejném počtu.

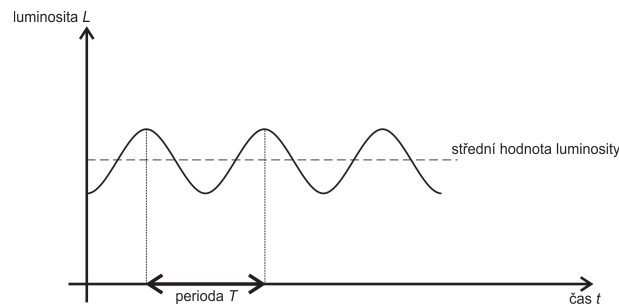
Koncem 19. století se řešila otázka: Co představují planetární a spirální mlhoviny? Jde o mračna prachu a plynu, ze kterých se rodí nové hvězdy? (Dnes je známo, že planetární mlhovina je odhozená hvězdná atmosféra středně těžké hvězdy v závěrečném stádiu vývoje. Spirální mlhoviny jsou pak galaxie.)

Při řešení povahy spirálních mlhovin (například v Andromedě) se přišlo se dvěma názory:

1. Spirální mlhoviny jsou relativně malé systémy uvnitř naší galaxie.
2. Spirální mlhoviny jsou naopak velké systémy vně naší galaxie.

Klíč k řešení ležel v určení vzdálenosti těchto objektů. Paralaxa byla neměřitelně malá, podařilo se však odhadnout tuto vzdálenost pomocí proměnných hvězd – cefeid (existují i další typy proměnných hvězd)[37].

8.1 Cefeidy



Obrázek 38: Průběh luminosity u proměnné hvězdy

Perioda T kolísání jasu pro cefeidy: 1 den $\lesssim T \lesssim$ 100 dní.

Henrietta Leavittová roku 1912 objevila, že střední hodnota luminosity L cefeid je funkcí periody T kolísání jejich svítivosti: $\bar{L} = f(T)$ (empirický vztah).

Určení vzdálenosti r cefeidy je možno změřením její periody T a středního jasu \bar{F} . Pak platí:

$$\bar{F} = \frac{\bar{L}}{4\pi r^2} = \frac{f(T)}{4\pi r^2} \Rightarrow r = \sqrt{\frac{f(T)}{4\pi \bar{F}}}$$

8.2 Klasifikace galaxií

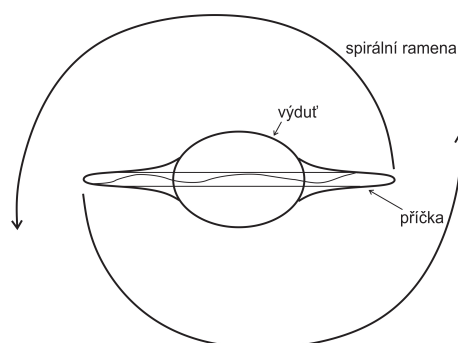
E. Hubble v letech 1922 - 1924 objevil tehdy největším dalekohledem (průměr 2,5 m) cefeidy v několika spirálních mlhovinách, mj. v Andromedě a Trojúhelníku. Pomocí cefeid zjistil, že tyto objekty jsou příliš daleko než aby mohly být součástí naší Mléčné dráhy. Jde o samostatné hvězdné ostrovy – galaxie.

Roku 1926 zavedl klasifikaci galaxií (jejich srovnání v Tabulce 2):

1. Spirální galaxie (S - spirals)

Vyznačují se zploštělým galaktickým diskem, ve středu mají výduť. Spirální ramena jsou zhuštěné oblasti, v nichž se rodí hmotné hvězdy (třídy O, B).

2. Spirální galaxie s příčkou (SB - barred spirals)



Obrázek 39: Spirální galaxie s příčkou

MD má pravděpodobně také příčku.

3. Eliptické galaxie (E - ellipticals)

Nemají spirální ramena ani plochý disk. Orbity hvězd jsou neuspořádané, hvězdy obíhají všemi směry v prostoru. Galaxie mají malou nebo žádnou rotaci.

Obsahují jen málo plynu a prachu. Nové hvězdy se tak v současnosti již nerodí a galaxie obsahují pouze staré, načervenalé, málo hmotné hvězdy.

Označují se čísly 0 - 7:

E0 ... galaxie téměř kulové.

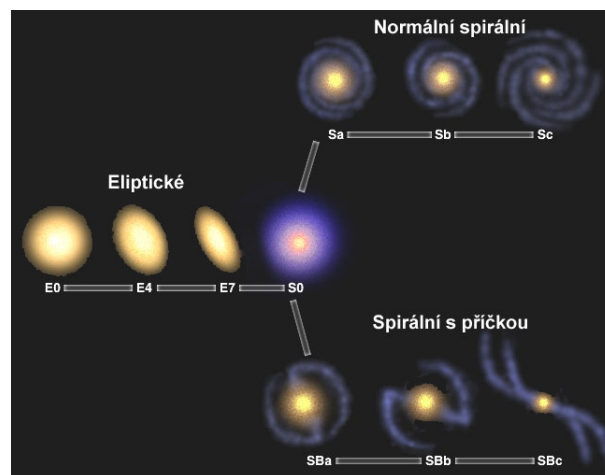
E7 ... galaxie nejvíce protažené.

4. Čočkovité (vřetenovité) galaxie (S0)

Přechodový tvar mezi galaxiemi eliptickými a spirálními. Mají tvar disku s centrální výdutí jako mají spirální galaxie, chybí ale spirální struktura.

5. Nepravidelné galaxie (Irr - irregulars)

Chybí jakákoli pravidelná struktura. Obsahují hodně mezihvězdné látky, proto v nich probíhá tvorba mladých hmotných hvězd.



Obrázek 40: Typy galaxií (Hubbleova ladička)

Převzato z:

<http://objekty.astro.cz/galaxie/1968-klasifikace-galaxii>

Hubbleovo uspořádání (Obr. 40) je jen na základě podobnosti, vývoj galaxií od jedné formy ke druhé je nejasný. Na vývoj galaxií od jedné formy ke druhé má vliv kolize galaxií a slapové síly (= nehomogenní gravitační síly).

Tabulka 2: Charakteristiky galaxií

S/SB	E	Irr
silně zploštělý disk, centrální oblast, sférické halo, spirální ramena elipsoid. tvar	žádný disk, elipsoid. tvar	žádná struktura občas explozivní zjev
disk obsahuje mladé i staré hvězdy, halo je pouze ze starých hvězd	pouze staré hvězdy	staré i mladé hvězdy
disk obsahuje dost plynu a prachu, halo málo	chybí studený plyn a prach, přítomen horký plyn emitující X-záření	hodně plynu a prachu
tvorba hvězd ve spirálních ramenech	posledních asi 10 mld. let žádná tvorba hvězd	prudká tvorba hvězd
cirkulární pohyb v disku, náhodné orbity v halo	náhodné 3D pohyby v celém objemu galaxie	silně nepravidelné orbity

8.3 Mléčná dráha

Jde o spirální galaxii s příčkou (pravděpodobně typu SBc). Je druhou největší galaxií v Místní skupině galaxií, největší je spirální galaxie v Andromedě.

Průměr Mléčné dráhy je přibližně 100 000 světelných let (30 kpc), hmotnost přibližně $8 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ a počet hvězd přibližně 300 miliard.

Mléčná dráha a galaxie v Andromedě se srazí přibližně za 4 mld let, poté zřejmě z obou galaxií vznikne galaxie eliptická.

Jádro galaxie se nachází ve směru k souhvězdí Střelce, kde se nachází obří černá díra o hmotnosti $\gtrsim 4 \cdot 10^6 M_{\odot}$. Objekt černé díry je označován Sagittarius A* [37].

Vzdálenost Slunce od centra galaxie je přibližně 27 000 světelných let (8,3 kpc), přičemž poloměr galaxie je 50 000 světelných let. Doba oběhu Slunce kolem centra je přibližně 240 mil. let, rychlost oběhu je pak asi 220 km/s.

8.4 Distribuce galaxií do větších skupin

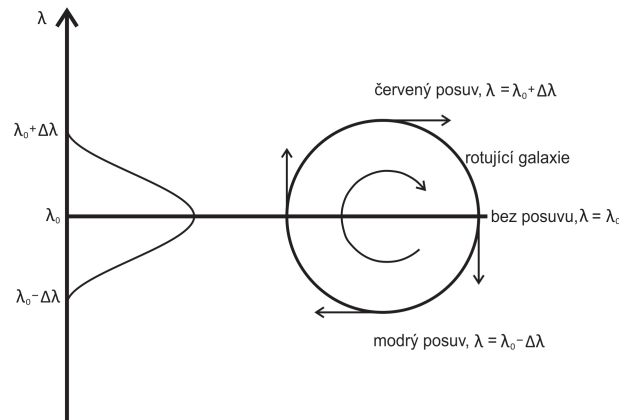
Klíčové k identifikaci galaxií, patřících do jedné skupiny, je určování jejich vzdáleností. Cefeidy lze použít do vzdálenosti asi 25 Mpc, většina galaxií je ale vzdálenějších [37].

Využívá se objektů se známou luminositou L – tzv. standardní svíčky – novy, planetární mlhoviny, supernovy I. typu (SNI – výbuch uhlíkové hvězdy po dosažení hmotnosti $1,4 M_S$ – Chandrasekharovy meze), celkové záření typických galaxií, atd. Využívají se přitom empirické vztahy mezi luminositou L a nějakým parametrem x , který se dá z astronomických pozorování určit: $L = L(x)$. Ze zdánlivého jasů objektu a jeho skutečné luminosity vypočítané z příslušného empirického vztahu, se poté určí vzdálenost.

Příklad:

Empiricky byl zjištěn překvapivě těsný vztah mezi rotační rychlostí ω galaxie a její luminositou L : $L = L(\omega)$ (Tullyův-Fisherův vztah).

Rotace ω se stanoví z rozšíření nějaké spektrální čáry v důsledku Dopplerova posuvu:



Obrázek 41: Dopplerův posuv

Nejčastěji se využívá vodíková čára 21 cm, neboť snadno prochází oblaky plynu a prachu.

Tullyův-Fischerův vztah lze použít pro určení vzdálenosti galaxie do vzdálenosti asi 200 Mpc. Výbuchy supernov I. typu lze použít do vzdáleností asi 1 Gpc[37].

8.5 Místní skupina galaxií

Menší skupina obsahující přes 50 galaxií. Tři z nich (galaxie v Andromedě, MD a trpasličí galaxie v Trojúhelníku) jsou spirální, ostatní jsou trpasličí eliptické nebo nepravidelné – např. Velký Magellanův oblak a Malý Magellanův oblak. Vzájemná vzdálenost MD a Andromedy je 0,8 Mpc (2,5 mil. ly), ostatní jsou k nim gravitačně vázány[37].

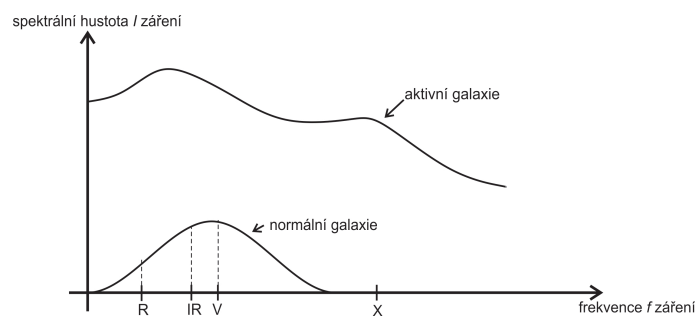
8.6 Kupy galaxií

Jde o větší celky. Nejbližší je Kupa galaxií v Panně (Virgo Cluster, VC). Je vzdálena od MD asi 17 Mpc, průměr kupy je asi 4 Mpc a obsahuje asi 2000 galaxií (Místní skupina jen 50)[35].

Ještě větší celky jsou nadkupy galaxií, obsahující řádově 100 000 galaxií.

8.7 Aktivní galaxie

Aktivní galaxie obsahují aktivní galaktické jádro, tvořené obrovskou černou dírou, obklopenou rotujícími oblaky prachu a plynu, které vyzařují (Obr. 42) jiným způsobem než hvězdy z galaxií z Hubbleovy klasifikace[37].



Obrázek 42: Záření aktivních galaxií

Charakteristicky aktivních galaxií:

- aktivní galaktické jádro,
- překotný hvězdný vývoj,
- 3 typické druhy: galaxie Seyfertovy, radiové a kvasary.

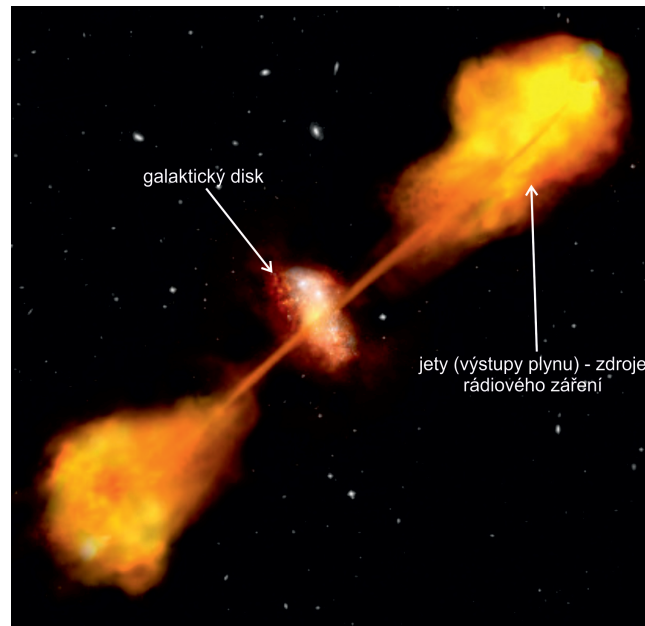
Hypotéza: Představuje aktivní galaxie dočasnou fázi vývoje každé galaxie?

a) Seyfertovy galaxie (C. Seyfert, 1943)

Ve viditelném spektru vypadají jako normální spirální galaxie. Mají aktivní galaktická jádra, řádově 1000x větší než např. MD. Většina vysoce energetického elmag. záření z jádra je absorbována okolním prachem a poté reemitována v IR (infračervené) oblasti (75% záření galaxie je v oboru IR)

b) Radiové galaxie

Maximum spektrální hustoty záření leží v radiové (R) oblasti. Radiové záření nevychází přímo z jádra, ale obrovských laloků (jetů) (Obr. 43).



Obrázek 43: Radiové galaxie

Převzato a upraveno z:

<http://sci.esa.int/herschel/51423-artist-s-impression-of-galaxy-with-radio-bright-jets-and-lobes/>

Příkladem radiové galaxie je Centaurus A ve vzdálenosti 4 Mpc – jde zřejmě o výsledek srážky eliptické a menší spirální galaxie před 500 miliony let.

c) Kvasary

Do roku 1960 byly známy stovky radiových zdrojů, u nichž se ale nedařilo identifikovat viditelného původce. Důvodem bylo nízké úhlové rozlišení tehdejší radioastronomie, objekty jsou navíc ve viditelné oblasti velmi slabé[37].

Až v roce 1960 byla na místě radiového zdroje 3C48 nalezena slabá modrá „hvězda“ s podivným spektrem. V roce 1962 byl objeven podobný objekt 3C273 a v roce 1963 bylo zjištěno, že jeho podivné spektrální čáry jsou obyčejné čáry H, hodně posunuté do červené oblasti: Velký červený posuv $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ byl důsledkem velké rychlosti vzdalování v , z čehož plynula i velká vzdálenost $r = \frac{v}{H}$ a tedy i obrovská luminosita $L = 4\pi r^2 F$ (navzdory malé intenzitě záření F).

Konkrétně: $L(3C273) \sim 2 \cdot 10^{13} L_S \sim 10^3 L_{MD}$ (objekt 3C273 září 1000krát více než MD)[37].

Pojmenování Quasars znamená quasi-stellar radio sources. Jde o historické označení, ve skutečnosti ne všechny kvasary jsou radiovými zdroji.

Vzdálené kvasary (~ 1000 Mpc) umožňují pohled do minulosti vesmíru (1 pc = 3,3 ly, 1000 Mpc = 3,3 mld. ly).

Současnou představou je, že kvasary jsou aktivní galaxie[37], v jejichž středu je obrovská černá díra. Při pádu oblaků plynu do černé díry se vytváří rychle rotující akreční disk, který se vnitřním třením silně zahřívá a vyzařuje tak ve všech oblastech spektra. Ve směru rotační osy se navíc vytvářejí vysokoenergetické výtrysky hmoty - jety.

Závěr

Jak jsem již zmínil v úvodu, smyslem této práce bylo vytvořit studijní materiály z astronomie pro učitele i studenty pedagogických fakult v oboru Fyzika.

Vzhledem k omezenému rozsahu této práce možná někteří shledají některé kapitoly příliš stručné nebo jim bude některé téma chybět. Jako takový případ mohu jmenovat například nepřítomnost kapitoly podrobně se věnující Zemi a Měsíci. Tuto kapitolu jsem se rozhodl vypustit, neboť povědomí a znalosti o Zemi a Měsíci jsou mezi studenty do určité míry rozšířené, a proto jsem uznal za vhodné věnovat se méně známým tématům.

Kdyby však měl na mou práci někdo později navazovat, jistě by bylo vhodné, kdyby tato nezačleněná témata zpracoval a mou práci tak doplnil. Jistě by také stálo za to některá témata rozpracovat více dopodrobna. Jako příklad mohu zmínit černé díry, efekty působící v jejich blízkosti a teorii jejich vypařování, kteréžto informace by pro studenty, dle mého mínění, mohly být velmi zajímavé.

Velice bych uvítal, kdyby tato práce usnadnila práci učitelům astronomie a studium studentům nejen vysokých škol.

Použitá literatura a zdroje

- [1] Astronomické poznatky v předantickém období. *Physics.muni* [online]. [cit. 2016-03-08]. Dostupné z:
<http://www.physics.muni.cz/astrohistorie/node5.html>.
- [2] Tháles. *Antika* [online]. 2004 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z:
<http://antika.avonet.cz/article.php?ID=1935>
- [3] Thalés z Milétu. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. 2015 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Thalés_z_Milétu.
- [4] Pythagorejci a jejich objevy. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2012 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z:
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1451-pythagorejci-a-jejich-objev>
- [5] Aristotle: Greek philosopher. *Encyclopædia Britannica* [online]. 2016 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://www.britannica.com/biography/Aristotle>
- [6] Aristoteles. *Antika* [online]. 2004 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z:
<http://antika.avonet.cz/article.php?ID=1304>
- [7] Aristarchus of Samos. *Encyclopædia Britannica* [online]. [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://www.britannica.com/biography/Aristarchus-of-Samos>
- [8] Aristarchus. *Cornell Astronomy* [online]. [cit. 2016-03-10]. Dostupné z:
<http://www.astro.cornell.edu/academics/courses/astro201/aristarchus.htm>
- [9] Apollonius of Perga. *New World Encyclopedia* [online]. 2012 [cit. 2016-03-10]. Dostupné z:
http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Apollonius_of_Perga
- [10] Apollonius of Perga. *MacTutor History of Mathematics archive* [online]. [cit. 2016-03-10]. Dostupné z:
<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Apollonius.html>
- [11] Hipparchus. *History and Philosophy of Science* [online]. 1999 [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://www.hps.cam.ac.uk/starry/hipparchus.html>
- [12] Hipparchus of Rhodes. *Turnbull* [online]. 1999 [cit. 2016-03-10]. Dostupné z:
<http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/history/Biographies/Hipparchus.html>
- [13] Claudius Ptolemy. *Turnbull* [online]. 1999 [cit. 2016-03-10]. Dostupné z:
<http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/history/Biographies/Ptolemy.html>

- [14] Ptolemy: Egyptian scientist and mathematician. *Encyclopædia Britannica* [online]. 1999 [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://www.britannica.com/biography/Ptolemy>
- [15] Ptolemaïův překomplikovaný vesmír a Koperníkovská revoluce. *Neviditelný čert* [online]. 2014 [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://www.neviditelnycert.cz/blog/popularne-naucny-koutek/1694-ptolemaiuv-prekomplikovany-vesmir-a-kopernikovska-revoluce.html>
- [16] Ekvant. *Wikina* [online]. 2014 [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://www.wikina.cz/a/Ekvant>
- [17] Copernicus, Nicholaus. *ScienceWorld* [online]. [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://scienceworld.wolfram.com/biography/Copernicus.html>
- [18] Rheticus. *ScienceWorld* [online]. [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://scienceworld.wolfram.com/biography/Rheticus.html>
- [19] Nicolaus Copernicus: Astronomer, Scientist, Mathematician. *Bio.* [online]. [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://www.biography.com/people/nicolaus-copernicus-9256984>
- [20] Tycho Brahe: spisovatel, astronom, astrolog. *Osobnosti* [online]. [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://www.spisovatele.cz/tycho-brahe>
- [21] Johannes Kepler: astronom, astrolog, mtematik. *Osobnosti* [online]. [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://zivotopis.osobnosti.cz/johannes-kepler.php>
- [22] Johannes Kepler. *Converter* [online]. [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/fyzici/kepler.htm>
- [23] Johannes Kepler: Johannes Kepler: His Life, His Laws and Times. *Kepler: A Search for Habitable Planets* [online]. [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://kepler.nasa.gov/Mission/JohannesKepler/>
- [24] Keplerovy zákony. *Astronomický koutek* [online]. 2016 [cit. 2016-03-16]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/kehar/astrokoutek/slovník/slovník1.html>
- [25] Slunce. *Aldebaran* [online]. [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/astrofyzika/sunsystem/slunce.html>
- [26] Mariner 10: First Mission to Mercury. *Space.com* [online]. 2012 [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://www.space.com/18301-mariner-10.html>

- [27] Zdánlivá hvězdná velikost. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2016-03-19].
Dostupné z:
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1070-zdanлива-hvezdna-velikost>
- [28] Absolutní hvězdná velikost. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2016-03-19].
Dostupné z:
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1072-absolutni-hvezdna-velikost>
- [29] ENERGETICKÉ SPEKTRUM. *Kvantová, atomová a jaderná fyzika* [online].
[cit. 2016-03-19]. Dostupné z: http://artemis.osu.cz/mm fyz/qm/qm_4_2_2.htm
- [30] Spektrum hvězd a barva hvězd. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2016-03-19].
Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1073-spektrum-hvezd-a-barva-hvezd>
- [31] HLAVÁČ, Zdeněk. *Téma: Astronomické souřadnice* [online]. [cit. 2016-04-15].
Dostupné z: <http://www.kme.zcu.cz/download/predmety/407-trol16.pdf>
- [32] Obzorníková soustava souřadnic. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2016-04-15].
Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/931-obzornikova-soustava-souradnic>
- [33] Soustava rovníkových souřadnic 1. druhu. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2016-04-15].
Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/934-soustava-rovnikovy-ch-souradnic-1-druhu>
- [34] Ekliptikální soustava souřadnic. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2016-04-15].
Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/935-ekliptikalni-soustava-souradnic>
- [35] MACHÁČEK, Martin. *Fyzika pro gymnázia*. 3. vyd. Praha: Prometheus, 2008. ISBN 978-80-7196-376-9.
- [36] VANÝSEK, Vladimír. *Základy astronomie a astrofyziky*. Academia, 1980. ISBN 21-011-80.
- [37] CHAISSON, Eric a Steve MCMILLAN. *Astronomy today*. 7th ed. Boston: Addison-Wesley, c2011. ISBN 01-321-2006-2.

Seznam obrázků

1	Stonehenge	9
2	Centrální oheň	11
3	Určení vzdálenosti Země, Měsíce a Slunce	13
4	Určení vzdálenosti Země, Měsíce a Slunce	13
5	Epicykl, deferent, ekvant a excentr	14
6	Obzorníkové souřadnice	18
7	Sledování polohy Marsu	21
8	Parametry elipsy	22
9	Elipsa pro kartézské souřadnice	22
10	Polární souřadnice elipsy	23
11	Plošná rychlost	24
12	Plocha rovnoběžníku	24
13	Plocha rovnoběžníku vektorově	25
14	Plošná rychlost vektorově	25
15	Gravitační zákon	26
16	Pohyb v radiálním poli	27
17	Sluneční soustava	29
18	Oortův oblak	30
19	Slunce	30
20	Merkur	31
21	Venuše	32
22	Mars	33
23	Hlavní pás asteroidů	34
24	Jupiter	36
25	Saturn	37
26	Saturn jako trojplaneta	38
27	Uran	39
28	Sklon Uranových os	39
29	Neptun	40
30	Pluto	41
31	Absorpční a emisní čáry	44
32	HR diagram	46
33	Struktura hvězdy (Slunce)	49
34	Pulsar	51
35	Vývoj vesmíru	55
36	Grafické znázornění jednotlivých ér	56
37	Galaxie dle W. Herschela	60

38	Průběh luminosity u proměnné hvězdy	61
39	Spirální galaxie s příčkou	61
40	Typy galaxií (Hubbleova ladička)	62
41	Dopplerův posuv	64
42	Záření aktivních galaxií	65
43	Radiové galaxie	66

Seznam tabulek

1	Titusovo-Bodeovo pravidlo	35
2	Charakteristiky galaxií	63

Přílohy

Na přiloženém DVD se nachází plné znění bakalářské práce, dále je na DVD umístěna sada osmi prezentací a osmi jednotlivých okruhů, jež budou zároveň k dispozici na webovém edukačním serveru.