



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Název projektu	Rozvoj vzdělávání na Slezské univerzitě v Opavě
Registrační číslo projektu	CZ.02.2.69/0.0./0.0/16_015/0002400

Základy astronomie a astrofyziky

Distanční studijní text

Tomáš Gráf

Opava 2020



**SLEZSKÁ
UNIVERZITA**
FILOZOFICKO-
PŘÍRODOVĚDECKÁ
FAKULTA V OPAVĚ

- Obor:** 053 Vědy o neživé přírodě, astronomie, astrofyzika.
- Klíčová slova:** Astronomie, astrofyzika, historie astronomie, astronomické veličiny, souhvězdí, jména hvězd, Měsíc, fáze Měsíce, zatmění Slunce, zatmění Měsíce, zákryty těles Měsícem, sluneční den, hvězdný den, rok, pravé slunce, fiktivní slunce, atomový čas, přestupná sekunda, přestupný rok, lunisolární kalendář, refraktor, reflektor, objektiv, okulár, montáž dalekohledu, CCD kamera, optická vada, hvězdná velikost, absolutní hvězdná velikost, zářivý výkon, jasnost, bolometrické veličiny, Pogsonova rovnice, fotometrický filtr, Johnsonův fotometrický systém, spektrum, luminozita, třída, Hertzsprungův-Russellův diagram, spektrální rozlišení, Morganova-Keenanova klasifikace, zárodečné mračno, fáze smršťování, hydrostatická rovnováha, termonukleární fúze, jádro a obal, hlavní posloupnost, posloupnost obrů, bílý trpaslík, neutronová hvězda, černá díra, výbuch supernovy, vícenásobná hvězdná soustava, hvězdná asociace, hvězdokupa, galaxie.
- Anotace:** Studijní text je určen studentům jednosemestrálního předmětu **Základy astronomie a astrofyziky**. Předmět je z velké části koncipován jako kapitoly z „klasické“ nebo „obecné“ astronomie. U studentů se předpokládá pouze základní orientace ve fyzikálních pojmech na úrovni učiva fyziky na středních školách. Je velmi vhodné, aby před tímto předmětem absolvovali předmět **Astronomický proseminář I a II**.
- Součástí předmětu Základy astronomie a astrofyziky jsou také cvičení. Témata příkladů nebo jiných aktivit jsou u kapitol pouze naznačena. Příklady nejsou do tohoto textu zahrnuty a předpokládá se využití již existujících sbírek, které jsou uvedeny v literatuře.

Autor: RNDr. Tomáš Gráf, Ph.D.

Obsah

ÚVODEM.....	8
RYCHLÝ NÁHLED STUDIJNÍ OPORY.....	9
1 PŘEDMĚT ZKOUMÁNÍ ASTRONOMIE, HISTORICKÝ ÚVOD, ZÁKLADNÍ POJMY	11
1.1 Obecný úvod	11
1.2 Obory astronomie a astrofyziky	12
1.3 Milníky vývoje astronomie a astrofyziky.....	13
1.3.1 Časová osa historického vývoje astronomie	14
1.4 Astronomická literatura a další informační zdroje.....	21
1.4.1 Periodické a neperiodické publikace	21
1.4.2 Literatura vědecká, odborná, popularizační.....	21
1.4.3 Mapy, atlasy, katalogy a ročenky	22
1.4.4 Učebnice	24
1.4.5 Astronomický SW, webové aplikace, virtuální observatoře.....	24
1.5 Astronomické veličiny a jednotky.....	24
1.6 Souhvězdí a označení hvězd	24
2 SOUSTAVY SOUŘADNIC, TRANSFORMACE, PRAKTICKÉ APLIKACE	27
2.1 Úvod.....	28
2.2 Souřadnicové systémy.....	30
2.2.1 Horizontální souřadnice	31
2.2.2 Rovníková souřadnicová soustava	31
2.2.3 Ekliptikální souřadnice	32
2.2.4 Galaktické souřadnice.....	32
2.2.5 „Nadgalaktická“ souřadnicová soustava.....	33
2.3 Transformace souřadnic	33
2.3.1 Transformace mezi rovníkovými a ekliptikálními souřadnicemi	35
3 ROTACE ZEMĚ, PRECESE, NUTACE, ABERACE, ATMOSFÉRICKÁ REFRAKCE.....	38
3.1 Planeta Země	39
3.1.1 Dohlednost	40
3.1.2 Souřadnice geocentrické, geodetické a astronomické	40
3.1.3 Rotace Země	42

3.2	Precese, nutace	44
3.2.1	Vliv precese na rovníkové souřadnice	44
3.2.2	Fyzikální příčiny precesního pohybu	47
3.2.3	Nutace	48
3.3	Aberace.....	49
3.4	Refrakce	51
4	FYZIKA SLUNEČNÍ SOUSTAVY, FAKTOGRAFIE SLUNEČNÍ SOUSTAVY	54
4.1	Fyzika sluneční soustavy.....	55
4.1.1	Problém dvou těles.....	55
4.1.2	Aplikace na Sluneční soustavu	58
4.1.3	Slapové síly a Rocheho mez	58
4.2	Sluneční soustava	61
4.2.1	Přehled těles ve Sluneční soustavě	61
4.2.2	Ménší tělesa Sluneční soustavy	62
4.2.3	Složení a struktura planet.....	63
4.2.4	Teploty	64
4.2.5	„Geologické“ procesy	65
4.3	Malá encyklopedie Sluneční soustavy	65
4.3.1	Merkur.....	65
4.3.2	Venuše.....	66
4.3.3	Země	67
4.3.4	Mars	67
4.3.5	Jupiter.....	68
4.3.6	Saturn	68
4.3.7	Uran.....	69
4.3.8	Neptun.....	69
4.3.9	Přirozené satelity planet.....	70
4.3.10	Trpasličí planety.....	70
5	POHYB MĚSÍCE, ZATMĚNÍ SLUNCE A MĚSÍCE	74
5.1	Pohyb Měsíce	74
5.2	Zatmění a zákryty.....	76
5.2.1	Zatmění Slunce a Měsíce	76
5.2.2	Zákryty hvězd Měsícem.....	77

5.2.3	Přechody planet přes Slunce	78
6	ČAS, KALENDÁŘ.....	79
6.1	Měření času	80
6.1.1	Hvězdné časy	81
6.1.2	Sluneční časy	81
6.1.3	Pásmový čas, datová hranice, posuny časů.....	83
6.1.4	Časové systémy definované fyzikálně	85
6.2	Kalendáře	86
6.2.1	Definice roků	86
6.2.2	Kalendářní systémy.....	86
7	ASTRONOMICKÉ PŘÍSTROJE	92
7.1	Astronomické dalekohledy.....	93
7.1.1	Úvod.....	93
7.1.2	Typy dalekohledů.....	95
7.1.3	Vady optiky.....	97
7.2	Montáže dalekohledů	98
7.2.1	Azimutální montáž.....	98
7.2.2	Paralaktická montáž	99
7.2.3	Automatizované montáže.....	99
7.3	Detektory.....	99
7.3.1	Okó.....	100
7.3.2	Fotografická emulze.....	100
7.3.3	Fotonásobiče	101
7.3.4	CCD detektory	102
8	ASTRONOMICKÁ FOTOMETRIE	104
8.1	Veličiny popisující jasnost astronomických objektů.....	104
8.2	Fotometrické systémy	107
8.2.1	Johnsonův systém <i>UBV</i>	108
9	ZÁKLADY ASTRONOMICKÉ SPEKTROSKOPIE.....	110
9.1	Spektra hvězd a jiných astronomických objektů.....	110
9.2	Spektrální klasifikace hvězd.....	112
9.2.1	Harvardská klasifikace	112
9.2.2	Morganova-Keenanova klasifikace	113

9.2.3	Hertzsprungův-Russellův diagram.....	114
9.2.4	Praktická spektroskopie	116
10	VÝVOJ HVĚZD.....	117
10.1	Vznik hvězd.....	117
10.2	Zapálení termonukleárních reakcí	119
10.3	Hvězdy hlavní posloupnosti	120
10.4	Hoření vodíku ve slupce	122
10.5	Zapálení heliových reakcí.....	123
10.6	Zapálení a hoření dalších prvků.....	124
10.7	Závěrečná stadia vývoje hvězd.....	124
10.7.1	Bílý trpaslík.....	126
10.7.2	Neutronová hvězda	126
10.7.3	Černá díra.....	126
11	HVĚZDOKUPY, GALAXIE, VZDÁLENÉ GALAXIE	128
11.1	Vícenásobné hvězdné soustavy	128
11.2	Hvězdné asociace	129
11.3	Otevřené hvězdokupy	130
11.4	Kulové hvězdokupy	130
11.5	Galaxie.....	131
11.6	Extragalaktické systémy	132
12	PŘÍLOHY	134
12.1	Periodická tabulka prvků	134
12.2	Sluneční soustava	135
12.3	Hvězdy.....	136
12.4	Galaxie.....	137
12.5	Přehled důležitých konstant.....	138
12.6	Orientace na noční obloze	139
12.6.1	Poloha Slunce, Měsíce a planet sluneční soustavy	139
12.6.2	Tabulka českých a latinských názvů souhvězdí.....	142
12.6.3	Časy začátků a konců občanského, nautického a astronomického soumraku v průběhu roku	145
12.6.4	Mapky noční oblohy v průběhu roku.....	147
	LITERATURA	154
	SHRNUTÍ STUDIJNÍ OPORY	155

PŘEHLED DOSTUPNÝCH IKON..... 156

ÚVODEM

Tento studijní text je určen studentům, kteří se rozhodli absolvovat jednosemestrální předmět Základy astronomie a astrofyziky. Jedná se o předmět s týdenní pětihodinovou dotací (v prezenčním studiu), která je rozdělena do tří hodin přednášky a dvou hodin cvičení.

Předmět Základy astronomie a astrofyziky je koncipován jako „úvodní“, tedy nepředpokládá žádné vyšší znalosti, než odpovídají středoškolským znalostem studentů (zejména z fyziky a matematiky). Je však velmi vhodné, aby studenti zapsaní do tohoto kurzu, již dříve úspěšně absolvovali předmět Astronomický proseminář I a II.

Studijní text má formu textu pro distanční vzdělávání, je tedy členěn a vybaven prvky, jak obsahovými, tak grafickými, které jsou pro tento typ studijních textů typické. Pokud to bude z nějakého důvodu nutné, je možné jednotlivé kapitoly nastudovat i samostatně, nemají totiž v sobě žádnou záměrnou návaznost, která by omezovala pochopení jejich obsahu.

Distanční studijní text je rozšířen také o LMS materiál, který je vytvořen v prostředí Moodle a v němž je možné realizovat aktivity vyžadující komunikaci nebo interakci. Je dostupný na e-learningových portálech fakulty a univerzity.

V textu jsou použity prvky typické pro distanční studijní texty, jejich přehled je na konci textu a jejich význam je zřejmý z názvosloví i použitého grafického prvku.

Jestliže při studiu naleznete nějakou chybu, budu rád, pokud mě na ni upozorníte zasláním na adresu tomas.graf@fpf.slu.cz, odměnou Vám může být jedna čokoláda Studentská pečeť podle vlastního výběru.

Děkuji kolegům z Ústavu fyziky FPF SU v Opavě a také Evropským strukturálním a investičním fondům za poskytnutí možnosti vypracovat tento studijní text.

V neposlední řadě děkuji své ženě Hance a našim synům Lukášovi a Davidovi, že mi pomáhali v mém vytrvalém boji s pokročilou prokrastinací (česky – leností).

V Opavě 23. dubna 2020, Tomáš Gráf

RYCHLÝ NÁHLED STUDIJNÍ OPORY

Studijní text je rozdělen do 11 různě rozsáhlých kapitol, které jsou většinou koncipovány jako úvod do dané problematiky.

Kapitola PŘEDMĚT ZKOUMÁNÍ ASTRONOMIE, HISTORICKÝ ÚVOD, ZÁKLADNÍ POJMY vysvětluje základní názvosloví a stručně popisuje vývoj astronomie jako jedné z vůbec nejstarších přírodních věd.

Kapitola SOUSTAVY SOUŘADNIC, TRANSFORMACE, PRAKTICKÉ APLIKACE se zabývá definicemi astronomických souřadnic a jejich transformacemi mezi různými souřadnicovými systémy.

Kapitola ROTACE ZEMĚ, PRECESE, NUTACE, ABERACE, ATMOSFÉRICKÁ REFRAKCE představuje naši Zemi jako planetu a poté vysvětluje jevy, které mají vliv na polohu astronomických objektů, pokud jsou pozorování prováděna ze zemského povrchu.

Kapitola FYZIKA SLUNEČNÍ SOUSTAVY, FAKTOGRAFIE SLUNEČNÍ SOUSTAVY se zabývá pohybem těles ve Sluneční soustavě a její druhá část je malou a stručnou encyklopedií všech typů těles, která tvoří naší planetární soustavu.

Kapitola POHYB MĚSÍCE, ZATMĚNÍ SLUNCE A MĚSÍCE se věnuje těmto jevům a obsahuje také webové odkazy na aktuální data související se zatměními a zákryty.

Kapitola ČAS, KALENDÁŘ vysvětluje astronomické definice času a obsahuje také přehled různých používaných kalendářních systémů.

Kapitola ASTRONOMICKÉ PŘÍSTROJE je zaměřena na základní informace o dalekohledech, jejich montážích a také detektorech.

Kapitola ASTRONOMICKÁ FOTOMETRIE je stručným úvodem do jedné ze základních úloh astronomických pozorování, tedy měření množství světla (záření), které od daného astronomického objektu dopadá do našeho dalekohledu (detektoru) na povrchu Země.

Kapitola ZÁKLADY ASTRONOMICKÉ SPEKTROSKOPIE představuje pokročilejší metodu astrofyzikálních pozorování.

Kapitola VÝVOJ HVĚZD je zaměřena na rekapitulaci fyzikálních procesů a dějů, které se podílejí na vzniku a vývoji hvězd různých hmotností.

Kapitola HVĚZDOKUPY, GALAXIE, VZDÁLENÉ GALAXIE se věnuje stelárním soustavám, od vícenásobných hvězd přes hvězdokupy až po skupiny galaxií.

V závěru publikace naleznete PŘÍLOHY, které obsahují periodickou tabulku prvků, přehledné tabulky s údaji o tělesech sluneční soustavy, vybraných hvězdách a galaxiích. Dále také přehled důležitých konstant a řadu pomůcek k orientaci na noční obloze.

1 PŘEDMĚT ZKOUMÁNÍ ASTRONOMIE, HISTORICKÝ ÚVOD, ZÁKLADNÍ POJMY

RYCHLÝ NÁHLED KAPITOLY



Astronomie patří mezi nejstarší vědy vůbec, její vývoj měl období rozvoje i stagnace, což dokumentuje přehled milníků napříč staletími. Dále se dělí do řady oborů a specializací, které jsou zde představeny. Následuje přehled některých astronomických jednotek, pojmů a základní literatury, která je v mnoha ohledech specifická.

CÍLE KAPITOLY



- Seznámení se s různými odvětvími astronomie
 - Získání základního přehledu o historii astronomie jako vědy
 - Orientace v astronomických jednotkách, pojmech a literatuře
-

ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU



2 hodiny

KLÍČOVÁ SLOVA KAPITOLY



Astronomie, astrofyzika, historie astronomie, astronomické veličiny, souhvězdí, jména hvězd.

1.1 Obecný úvod

Ve většině úvodů k astronomickým publikacím se můžete dočíst, že astronomie patří k vůbec nejstarším vědám, konkurovat jí může maximálně matematika. Takže i zde tím

začneme. Jenže datování těchto skutečností je velmi mlhavé, protože s velkou pravděpodobností byly obě vědecké disciplíny rozvíjeny již v době, kdy neexistovalo písmo.

Astronomii doajista můžeme řadit mezi přírodní vědy a ve své nejstarší podobě měla „pouze“ velmi konkrétní a praktické cíle, kterými bylo určování (měření) času a polohy, ale také různé náboženské a astrologické interpretace pozorovaných jevů. Samotné slovo *astronomie* pochází z řečtiny a je složeno ze dvou slov: *hvězda* (ἄστρον) a *zákon* nebo *pravidlo* (νόμος) a v dnešní podobě se jedná o skutečně multidisciplinární vědu, která podle potřeby využívá aparát teoretické i aplikované fyziky, matematiky, informatiky, chemie nebo také geologie či biologie.

Současnou astronomii a astrofyziku je možné rozdělit do podoborů hned podle několika hledisek, nejedná se však o nijak striktní nomenklaturu, protože řada podoborů se prolíná nebo překrývá, což bude vidět z následujícího rozdělení.

1.2 Obory astronomie a astrofyziky

ROZDĚLENÍ PODLE OBJEKTŮ ZKOUMÁNÍ

Podle objektu (předmětu) zájmu je možné astronomii dále rozdělit například takto:

- **planetologie** – fyzika a geologie planet a jejich přirozených družic,
- **fyzika a dynamika meziplanetární hmoty**,
- **stelární astronomie** – astrofyzika zaměřená na výzkum hvězd,
- **dynamika Galaxie** – studuje dynamiku naší Galaxie jako celku i jednotlivých podsystemů,
- **stavba a vývoj hvězd, hvězdných soustav** – astrofyzikální disciplína zaměřená na výzkum evoluce hvězd,
- **kosmologie** – podobor využívající poznatků teoretické, částicové a relativistické fyziky k výzkumu vzniku a vývoje vesmíru jako celku.

ROZDĚLENÍ PODLE OBORŮ

ASTROMETRIE

Je to jeden z nejstarších astronomických oborů, který se zabývá co nejpřesnějším určováním poloh astronomických objektů a změnami poloh v závislosti na čase. Je možné jej dále rozdělit na tři oblasti:

- **Sférická astronomie** – určování poloh (směrů) astronomických objektů a jejich redukce o další vlivy prostředí a pozorovacího stanoviště (precese, paralaxa, aberace, refrakce), časová služba,

- **Fundamentální astronomie** – vytváření katalogů s polohami a vlastními pohyby hvězd s nejvyšší možnou (dosažitelnou) přesností,
- **Praktická astronomie** – řeší teoretické aspekty astronomických pozorování a patří sem také praktické aplikace: geodetická astronomie, kosmická geodézie, astronavigace, synchronizace časových měření atp.

TEORETICKÁ ASTRONOMIE

Do této široké disciplíny se řadí například vývoj stále pokročilejších metod určování trajektorií těles z napozorovaných dat a výpočty jejich efemerid (*kosmická dynamika* a *nebeská dynamika*) nebo fyzikální *teorie stavby hvězd, planet a jejich atmosfér*. Je možné sem řadit také hraniční či multidisciplinární oblasti jakou je např. *astrochemie* nebo *astrobiologie*.

1.3 Milníky vývoje astronomie a astrofyziky

Astronomie je považována za jednu z nejstarších věd vůbec. Historicky jsou doloženy praktické aplikace astronomických znalostí již v době starých egyptských kultur, kdy byly využívány k orientaci v čase a ke stanovení přesných předpovědí záplav na řece Nilu.

Částečně astronomický kontext má také mohutná megalitická stavba Stonehenge, která je datována do období 2000 let před naším letopočtem, a v záznamech čínských kultur byly také nalezeny velmi staré zápisy o astronomických pozorováních. Na rozvoj astronomie v Evropě měla kdysi dávno bezprostřední vliv zejména babylónská astronomie.

PRO ZÁJEMCE



Podrobný přehled o vývoji nejen světové astronomie a astrofyziky, ale i rozvoji těchto věd v našich zemích je možné nalézt například v této publikaci:

Historie astronomie (Štefl, Krtička) – dostupné také na adrese:

<http://www.physics.muni.cz/astrohistorie/index.html>

1.3.1 ČASOVÁ OSA HISTORICKÉHO VÝVOJE ASTRONOMIE

OBDOBÍ PŘED NAŠÍM LETOPOČTEM

- 4 241 př. n. l. — první kalendář – Egypt
- do 4. tisíciletí př. n. l. – obrázky starověkých Mayů
- mezi 4. a 2. tisíciletím př. n. l. – megalitické stavby, Anglie, Bretan, počátek Stonehenge
- 3 379 př. n. l. – zatmění Měsíce, zachycené u starověkých Mayů
- kolem roku 3. tisíce př. n. l. – první astronomické zápisy v Egyptě, Babylónii, Číně
- 2 679 př. n. l. – zápis o slunečním zatmění v Číně
- 2 315 – 2 287 př. n. l. – záznamy o pozorování komet v Číně
- 2 000 př. n. l. – výstavba základního kruhu v Stonehenge
- 1 100 př. n. l. – z pozorování Slunce určen sklon ekliptiky k rovníku, Čína
- 763 př. n. l. – nejstarší záznam o pozorování úplného zatmění Slunce, Babylon
- 600 př. n. l. – základem astronomie matematika a geometrie, Thales z Milétu
- 530 př. n. l. – sférický tvar Země, Pythagoras ze Samu
- 370 př. n. l. – pohyb planet – skládání kruhových pohybů, Eudoxos z Knidu
- 360 př. n. l. – spis O nebi, Aristoteles
- 290 př. n. l. – počátky systematických určování poloh hvězd, Timocharis, Aristill
- 270 př. n. l. – myšlenka pohybu Země, Měsíce a planet kolem Slunce, pokus o stanovení prostorových vzdáleností Země – Měsíc – Slunce, Aristarchos ze Samu
- 230 př. n. l. – rozměry Země, Eratosthenes
- 220 př. n. l. – úhlová velikost Slunce, Archimedes
- 200 př. n. l. – pojmy: epicykl, deferent, Apollonius z Pergy
- 150 př. n. l. – katalog hvězd, precese, tabulky pohybu Slunce, Měsíce, Hipparchos
- 46 př. n. l. – zaveden juliánský kalendář

OBDOBÍ NAŠEHO LETOPOČTU

150 n. l. – Megalé syntaxi – Almagest, K. Ptolemaios

960 n. l. – katalog hvězd, Al Sufí

1054 – výbuch supernovy v souhvězdí Býka, zachycen v evropských, čínských a japonských kronikách

1252 – vydány Alfonsinské tabulky, polohy planet

1425 – observatoř v Samarkandu, Ulugh Beg

1472 – Nová teorie planet, G. Peurbach

1496 – překlad Almagestu do latiny

OBDOBÍ 16. AŽ 17. STOLETÍ

1543 – publikace O oběžích nebeských sfér, M. Koperník

1551 – Pruské tabulky, E. Reinhold

1572 – supernova v Kassiopeji a její pozorování

1582 – zaveden gregoriánský kalendář

1596 – proměnnost o Ceti, D. Fabricius

1603 – Uranometrie, hvězdný atlas, J. Bayer

1604 – pozorován výbuch supernovy

1609 – publikace Nová astronomie, J. Kepler

1609 – zkonstruován refraktor – dalekohled, H. Lipershey

1610 – pozorování oblohy dalekohledem, publikace Hvězdný posel, G. Galilei

1611 – rotace Slunce, G. Galilei

1619 – publikace Harmonie světa, J. Kepler

1627 – publikovány Rudolfinské tabulky, J. Kepler

1632 – Dialog o dvou hlavních světových soustavách, G. Galilei

1648 – rozklad světla hranolem, Jan Marek Marci

- 1651 – *Almagestum novum* G. B. Riccioli, mapa Měsíce
- 1655 – 1659 – objev prstenců Saturna, měsíce Titan, rotace Marsu, polární čepičky, Ch. Huygens
- 1665 – rozklad slunečního světla hranolem, I. Newton
- 1668 – 1671 – zkonstruován zrcadlový dalekohled (reflektor), I. Newton
- 1672 – stanovení paralaxy Slunce a hodnoty AU, J. Picard, J. Richer, G. D. Cassini
- 1675 – určení hodnoty rychlosti světla ze zákrytů měsíce Io Jupiterem, O. Römer
- 1687 – publikace *Matematické základy přírodní filozofie* I. Newton
- 1698 – *Cosmotheoros* Ch. Huygens, první pokus o stanovení hvězdných vzdáleností

OBDOBÍ 18. STOLETÍ

- 1705 – potvrzení periodičnosti některých komet, výpočet návratu komety, E. Halley
- 1717 – objev vlastního pohybu Aldebarana, Siria a Arktura, E. Halley
- 1728 – aberace světla hvězd (1725) a její interpretace (1728), J. Bradley
- 1743 – měření tvaru Země, A. Clairaut
- 1749 – formulace teorie precese a nutace, J. d'Alambert
- 1753 – nová teorie pohybu Měsíce, L. Euler
- 1755 – všeobecná historie přírody a teorie nebe, E. Kant
- 1761 – atmosféra Venuše, M. V. Lomonosov
- 1766 – 1772 – zákon Tituse – Bodeho
- 1773 – stabilita sluneční soustavy, P. S. Laplace
- 1781 – objev Uranu, W. Herschel
- 1783 – pohyb Slunce ve směru apexu, W. Herschel

OBDOBÍ 19. STOLETÍ

- 1801 – objev planety Ceres, G. Piazzi, K. F. Gauss
- 1803 – potvrzení existence fyzických dvojhvězd, W. Herschel

- 1809 – teorie pohybu nebeských těles kolem Slunce po kuželosečkách, K. F. Gauss
- 1814 – 1815 – popis více než 300 čar ve spektru Slunce, J. Fraunhofer
- 1817 – Měsíc a planety mají sluneční spektrum, září rozptýleným světlem, J. Fraunhofer
- 1837 – 1839 – změření paralaxy hvězd, V. J. Struve, F. V. Bessel, T. Henderson
- 1840 – první fotografie Měsíce, J. Draper
- 1842 – formulován Dopplerův princip
- 1843 – 1844 – stanovení periodičnosti výskytu slunečních skvrn, H. S. Schwabe
- 1846 – objev Neptunu J. F. Gallem po výpočtech U. J. Leveriera
- 1850 – počátek širokého používání fotografie v astronomii USA, Anglie
- 1851 – Foucaltovo kyvadlo demonstrující rotaci Země
- 1857 – 1863 – sestavení čtyřdílného BD katalogu 324 000 hvězd severní oblohy
- 1857 – matematický vztah mezi *jasností* hvězd a jejich *hvězdnou velikostí*, N. Pogson
- 1859 – zákony spektrální analýzy, G. Kirchhoff, R. Bunsen
- 1860 – počátky hvězdné spektroskopie
- 1862 – vizuální objev Siria B, A. Clark
- 1863 – klasifikace hvězdných spekter, A. Secchi
- 1864 – spektrální pozorování komet, G. B. Donati
- 1868 – pozorování protuberancí a koróny mimo zatmění, J. N. Lockyer, P. Jansen
- 1868 – vizuální měření radiálních rychlostí hvězd, W. Huggins
- 1868 – objev helia ve spektru Slunce při úplném zatmění, J. N. Lockyer
- 1870 – pozorování spektra erupce Slunce, Ch. Young
- 1872 – fotografie hvězdného spektra – Vega, určení radiální rychlosti
- 1874 – klasifikace spekter hvězd, H. C. Vogel
- 1877 – objeveny měsíce Marsu Phobos a Deimos, A. Hall

- 1879 – sestavení vztahu pro Balmerovu sérii spektrálních čar vodíku
- 1879 – 1881 – teorie slapů, vývoj soustavy Země – Měsíc, J. Darwin
- 1882 – katalog spekter 4051 hvězd, H. C. Vogel
- 1888 – počátek systematického fotografického studia hvězdných spekter
- 1888 – 1908 – katalog NGC mlhovin a hvězdokup, J. Drayer
- 1889 – 1891 – spektroheliograf, J. Heyl, A. Deland
- 1890 – 1924 – HD katalog H. Drapera
- 1898 – Nové metody kosmické mechaniky, H. Poincare

OBDOBÍ 20. STOLETÍ

- 1901 – rozpracována spektrální klasifikace, A. Cannon, E. Pickering
- 1905 – rozdělení hvězd pozdních spektrálních tříd na trpaslíky a obry, E. Hertzsprung
- 1908 – magnetická pole slunečních skvrn
- 1908 – 1912 – objevena závislost perioda – zářivý výkon u cefeid, H. Leavittová
- 1910 – počátek fotoelektrických pozorování hvězd se selénovými fotočlánky
- 1910 – 1912 – Göttingenská fotometrie, první katalog fotografických hvězdných velikostí, K. Schwarzschild
- 1910 – 1914 – počátky rozpracování teorie hvězdných atmosfér, K. Schwarzschild
- 1911 – 1914 – diagram spektrum – zářivý výkon, E. Hertzsprung, H. N. Russell
- 1912 – určení radiálních rychlostí galaxií, W. Slipher
- 1913 – teorie stavby atomu vodíku, objasňující série čar v hvězdných spektrech, N. Bohr
- 1914 – 1919 – teorie pulsace cefeid, stanovení nulového bodu, H. Shapley
- 1915 – 1916 – odklon světelných paprsků v gravitačním poli Slunce, A. Einstein
- 1915 – Sirius B potvrzen bílým trpaslíkem, W. Adams
- 1916 – počátky teoretického výzkumu stavby nitra hvězd, A. Eddington
- 1918 – uveden do provozu dalekohled o průměru 2,5 na observatoři Mount Wilson

- 1919 – observační potvrzení odklonu slunečních paprsků v průběhu slunečního zatmění v roce 1918, A. Eddington
- 1920 – teorie ionizace atomů ve hvězdných atmosférách, M. Saha
- 1920 – červený posuv čar ve spektrech galaxií, W. Slipher
- 1920 – 1923 – interferometrické měření průměru hvězd, A. Michelson
- 1922 – rozpracování vývojových nestacionárních modelů vesmíru, A. A. Fridmann
- 1923 – objev cefeid v galaxii M 31, E. Hubble
- 1923 – vynález spektroheliografu, J. Heyl
- 1923 – formulována závislost hmotnost – zářivý výkon, A. Eddington
- 1923 – popsána metoda křivek růstu, určení chemického složení hvězd, M. Minnaert
- 1926 – 1927 – diferenciální rotace Galaxie, B. Linblad, J. Oort
- 1929 – zákon rudého posuvu ve spektrech galaxií, E. P. Hubble
- 1929 – stanovení chemického složení Slunce, H. N. Russell
- 1930 – existence mezihvězdné absorpce, její selektivní charakter, R. Trümpler
- 1930 – objev Pluta, C. Tombaugh
- 1932 – objeveno rádiové záření Galaxie, K. Jansky
- 1933 – neutronové hvězdy jsou výsledkem exploze supernov, W. Baade, F. Zwicky
- 1937 – 1938 – termionukleární reakce ve hvězdách, H. Bethe, C. F. F. von Weizsäcker
- 1938 – existence oblastí H II kolem horkých hvězd, B. Strömgren
- 1944 – předpověď existence rádiového záření na vlnové délce 21 cm, Van der Hulst
- 1946 – radiolokace Měsíce, J. Stuart,
- 1948 – koncepce horkého modelu vesmíru, G. A. Gamov
- 1951 – objev předpovězeného rádiového záření vodíku
- 1952 – přepočítání škály mezigalaktických vzdáleností, W. Baade, A. Sandage
- 1954 – aktivita jader galaxií, V. A. Ambarcumjan

- 1957 – vypuštění první umělé družice Země
- 1958 – 1960 – radiační pásy kolem Země, J. A. Van Allen
- 1961 – oblet Země v kosmickém prostoru, J. A. Gagarin
- 1962 – 1963 – kvasary, J. Bolton, C. Hazard, M. Schmidt
- 1965 – objev reliktního záření, A. Penzias, R. Wilson
- 1968 – pulsary, J. Bell, A. Hewish.
- 1969 – lidé na Měsíci, N. Armstrong, E. Aldrin
- 1970 – satelit Uhuru vytvořil první „rentgenovou prohlídku“ oblohy
- 1972 – podán pozorovací důkaz existence černé díry, Ch. T. Bolton
- 1975 – sonda Venera 9 přistála na povrchu Venuše a zaslala snímky
- 1976 – dvojice sond Viking (NASA) zkoumala povrch Marsu
- 1977 – sondy Voyager 2 a Voyager 1 (NASA) vyslány k Jupiteru a Saturnu, V2 pak dále k Uranu a Neptunu a do mezihvězdného prostoru
- 1981 – zahájení provozu raketoplánů (Space Shuttle Columbia),
- 1983 – první infračervená observatoř v kosmu, IRAS, zmapovala 98 % oblohy,
- 1986 – Halleyova kometa zkoumána řadou sond, Giotto (ESA) pořídila i snímek jádra,
- 1990 – vypuštěn HST, první velký optický dalekohled na oběžné dráze,
- 1992 – satelit COBE mapuje reliktní záření, dokončen Keckův dalekohled (10 m),
- 1998 – začíná stavba nové orbitální stanice ISS, spolupráce USA a Ruska

SOUČASNOST – 21. STOLETÍ

- 2005 – astronom Brown a jeho tým objevili velké těleso, které se zdálo být větší než Pluto, bylo označeno (2003) UB313 (dnes Eris), začala debata o definici pojmu *planeta*,
- 2006 – nově definice pojmu *planeta* a kategorie trpasličí planeta (Pluto, Ceres a Eris),
- 2015 – úspěšný výzkum trpasličí planety Pluto při průletu sondy New Horizons (NASA), první detekce gravitačních vln detektorem LIGO,
- 2016 – objevena exoplaneta u hvězdy Proxima, je nejbližší naší Sluneční soustavě,

2019 – Event Horizon Telescope (interferometrie prováděná osmi radioteleskopy s celkovou základnou prakticky rovnou velikosti Země) získal první snímek velmi hmotné černé díry M87.

1.4 Astronomická literatura a další informační zdroje

Literatura a informační zdroje používané v astronomii mají některá svá specifika a můžeme je členit podle několika hledisek. Lze je rozdělit na:

- periodické a neperiodické publikace,
- popularizační, odborné a vědecké publikace,
- atlasy, katalogy, ročenky a učebnice,
- astronomický SW, webové aplikace, virtuální observatoře.

1.4.1 PERIODICKÉ A NEPERIODICKÉ PUBLIKACE

ASTRONOMICKÉ ČASOPISY (TIŠTĚNÉ)

Česká republika:

Vesmír (víceoborový), Astropis, Říše hvězd (již zanikl), Povětroň

Zahraniční:

Kozmos (Slovensko), Sky and Telescope (USA), Astronomy (USA), Nature (víceoborový), Science (víceoborový), Scientific American (víceoborový, existuje i česká verze), American Scientist (víceoborový) a mnohé další

1.4.2 LITERATURA VĚDECKÁ, ODBORNÁ, POPULARIZAČNÍ

Popularizační literatura je v oboru astronomie je velmi rozsáhlá. Její četba má spíše motivační nebo relaxační charakter, ale popularizační texty nemohou nahradit učebnice nebo literaturu odbornou a již vůbec ne vědecké články.

Uveďme si zde několik kvalitních titulů v českém jazyce:

- Grygar: Sejdeme se v nekonečnu, Vesmírná zastavení, Stavba a vývoj vesmíru, Vesmír jaký je, atd.
- Grygar, Horský, Mayer: Vesmír
- Horský, Mikulášek, Pokorný: Sto astronomických omylů
- Jakeš: Planeta Země
- Kleczek: Vesmír kolem nás

- Kopal: Vesmírní sousedé naší planety
- Koubský: Planety naší sluneční soustavy
- Novikov: Černé díry a vesmír
- Hawking: Stručné dějiny času, atd.

V současné době je na trhu dalších 20 až 30 astronomických popularizačních publikací, které jsou buď původní nebo se jedná o překlady (většinou anglicky píšících autorů). Jsou dostupné ve většině klasických nebo internetových knihkupectví.

Odborná literatura je určena především astronomům amatérům nebo může být vhodnou podporou při různých formách astronomického vzdělávání. Je možné sem zařadit různé návody na astronomická pozorování a jejich zpracování nebo publikace s jednoduchými astronomickými výpočty. Pokud vycházejí v tištěné formě, většinou se jedná o málonákladové tisky zpravidla vydávané některou z hvězdáren či podobnou institucí. Stále častější je však elektronická podoba takových publikací.

Vědecká literatura v astronomii a astrofyzice je vesměs cizojazyčná (v současnosti většinou v angličtině, dříve také v němčině a francouzštině). Předplatné vědeckých časopisů je velmi nákladné, je tedy vhodné využít služeb knihoven a možností, které nabízí internet.

Velmi obsáhlou databázi vědeckých článků naleznete zde: ADS (Astrophysics Data System) <http://www.adsabs.harvard.edu/> a většina článků je pak volně dostupná na úložišti ArXiv <https://arxiv.org/>.

1.4.3 MAPY, ATLASY, KATALOGY A ROČENKY

Mapám hvězdné oblohy patrně předcházely hvězdné glóby, které respektovaly zobrazení hvězdné oblohy „shora“ (Boží pohled) a byly velmi nepraktické při pozorování. Po zvládnutí projekčních technik potřebných k převedení sféry do rovinného obrazu začaly vznikat mapy hvězdné oblohy v podobě, v jaké je známe i dnes. Jejich velké rozměry byly opět nepraktické, začaly být tedy uspořádávány jako soubory menších map – hvězdné atlasy.

ATLASY – SOUBORY HVĚZDNÝCH MAP

Tabulka obsahuje výběr atlasů hvězdné oblohy:

Autor	Název, popis	Obsah
Marx – Pfau	Stern Atlas (1975)	Hvězdy do jasnosti 6 mag
Bečvář	Atlas Coeli	Hvězdy do jasnosti 6 mag
Argelander	Bonner Durchmusterung	Hvězdy do 9,5 - 10,0 mag
Vehrenberg	Fotografický atlas	Hvězdy do 13 mag

ASTRONOMICKÉ KATALOGY

Seznamy astronomických objektů doplněné dalšími údaji o nich se začaly označovat jako *katalogy*. Pokud se zaměříme na katalogy sestavované a používané ve stelární astronomii, kde jsou katalogizovanými objekty vesměs jednotlivé hvězdy, tak rozlišujeme katalogy *fundamentální*, které obsahují poměrně malý počet hvězd, ale jejich katalogizované údaje (např. polohy) mají velmi vysokou přesnost, a *katalogy poloh hvězd a dalších údajů*, ve kterých jsou polohy určeny relativně ke hvězdám z nějakého fundamentálního katalogu.

Příkladem katalogu může být **SAO katalog**, který obsahuje údaje o hvězdách do jasnosti 9 magnitud nebo **Henry Draper katalog** s údaji o 223 000 hvězdách.

Nové katalogy mají většinou podobu elektronické databáze umístěné na nějakém paměťovém médiu nebo dostupné online. Bývají doplněny i vykreslovacími programy a jsou tak použitelné zároveň jako atlasy.

Asi nejznámější takový katalog je **Guide Star Catalogue**, který byl sestaven pro potřeby HST a obsahuje asi 14 milionů objektů. V současné době se očekává publikování největšího a nejpřesnějšího astrometrického katalogu, který bude obsahovat asi miliardu hvězd a byl získán několikaletým měřením družicí GAIA. Jeho „předchůdcem“ jsou katalogy **Hipparcos** (118 000 hvězd) a **Tycho** (1 058 000 hvězd, nižší přesnost) jako výsledek měření družicí Hipparcos.

Některé katalogy se zaměřují na nehvězdné objekty nebo na astronomické objekty, které mají určité specifické vlastnosti. Například Messierův katalog (z roku 1781) obsahuje asi 110 objektů, které svým vzhledem připomínají komety, protože ty byly hlavními objekty zájmu jeho sestavitele a nechtěl si tyto objekty s nimi plést. Mnohem rozsáhlejší katalog difuzních objektů je NGC (New General Catalogue) a také neutronové hvězdy, Be hvězdy atp. mají své speciální katalogy.

ASTRONOMICKÉ ROČENKY

Jako *ročenky* se v astronomickém kontextu označují speciální publikace obsahující tabulky různých astronomických údajů, jako jsou souřadnice, časy atd. pro určité období. Jak vyplývá z jejich obecného označení, mají platnost většinou jeden rok. Jejich tištěná podoba může mít doplňky na paměťových médiích a existují i on-line verze.

Mezi nejvyužívanější ročenky se řadí: Nautical Almanach, Hvězdářská ročenka (Česká republika), Astronomická ročenka (Slovensko), Kleťská astronomická ročenka (<http://www.hvezcb.cz/cgi-bin/kar.cgi>) nebo U.S. Naval Observatory (<http://aa.usno.navy.mil/data/>).

1.4.4 UČEBNICE

Klasické učebnice astronomie a astrofyziky, které jsou psány v českém jazyce, jsou většinou ještě z minulého století. Uvádíme si je tady z určité tradice, ale existují i moderní publikace, které jsou dostupné většinou již pouze v elektronické podobě a mají spíše charakter vysokoškolských skript.

Uvedme si i zde několik doporučených titulů, další jsou v seznamu literatury:

- M. Šolc a kol., Fyzika hvězd a vesmíru,
- V. Vanýsek, Základy astronomie a astrofyziky
- Brož, M., Wolf, M., Astronomická měření, Brož, M., Šolc, M., Fyzika sluneční soustavy, Harmanec, P., Brož, M., Stavba a vývoj hvězd
- Skripta ÚTFA PřF MU v Brně: <https://astro.physics.muni.cz/documents/> nebo Astronomického ústavu MFF UK v Praze: <http://astro.mff.cuni.cz/predmety.html> .

Za zmínku jistě stojí také publikace a informační zdroje zaměřené na astronomické a astrofyzikální příklady: Široký, Široká, Základy astronomie v příkladech (<http://physics.ujep.cz/~zmoravec/astronomie/siroky/siroky.html>), V. Štefl, D. Korčáková, J. Krtička, Úlohy z astrofyziky (<http://www.physics.muni.cz/astroulohy/>) nebo řešené příklady Astronomické olympiády (<http://olympiada.astro.cz/archiv.html>).

1.4.5 ASTRONOMICKÝ SW, WEBOVÉ APLIKACE, VIRTUÁLNÍ OBSERVATOŘE

Existuje velké množství astronomických výpočetních programů, počítačových planetárií i online služeb a portálů. Ostatně internet využívali astrofyzikové ihned od jeho vzniku (např. na Astronomickém ústavu AV ČR od roku 1990) nejen jako elektronickou poštu, ale i jeho další aplikační nadstavby. Jako příklad si uvedme dva zahraniční portály <http://space.com> a <http://www.nasa.gov>, z českých pak vynikající portál České astronomické společnosti <http://www.astro.cz> .

1.5 Astronomické veličiny a jednotky

V astronomii a astrofyzice se používají některé specifické veličiny a jednotky, jejich základní přehled je uveden mezi přílohami.

1.6 Souhvězdí a označení hvězd

Lidská snaha po orientaci na hvězdné obloze vedla v historických dobách k rozdělení hvězdné oblohy na tzv. *souhvězdí*. Nejprve byla souhvězdí chápána pravděpodobně pouze jako spojnice nebo obrazce tvořené nejjasnějšími hvězdami v dané oblasti hvězdné oblohy. Rovněž počet, názvy a velikost jednotlivých souhvězdí se v průběhu staletí velmi měnily. Každá rozvinutější kultura měla navíc systém souhvězdí docela jiný.

Jednotnost a jednoznačnost byla vnesena do systému souhvězdí teprve mezinárodní úmluvou vytvořenou v minulém století. Byl to jeden z prvních úkolů, který si vytýčila a také splnila Mezinárodní astronomická unie (IAU), organizace profesionálních astronomů a astrofyziků založená v roce 1919. Výsledek několikaleté práce byl publikován astronomem Eugenem Delportem v díle *Delimitation scientifique des constellations (tables et cartes)* v roce 1930.

Hvězdná obloha je tak jednoznačně rozdělena přesně definovanými hranicemi na 89 ploch, které nesou jména 88 jednotlivých souhvězdí (souvězdí Hada se rozkládá na dvou navzájem nesousedících oblastech hvězdné oblohy). Oficiálně se používají latinské názvy souhvězdí nebo jejich třípísmenné zkratky. Seznam všech názvů souhvězdí je součástí přílohy tohoto textu.

OZNAČENÍ JEDNOTLIVÝCH HVĚZD

Až na výjimky (Orion, skupiny hvězd ve směru souhvězdí Býka atp.) jsou hvězdy v jednotlivých souhvězdích ve velmi odlišných vzdálenostech od nás, pouze se nám promítají do podobného směru. Nejjasnější hvězdy mají svá jména, která jsou většinou převzata z původních arabských, řeckých nebo latinských názvů (Rigel, Vega, Regulus, Sirius, Cassiopeia, Aldebaran, ...).

Na počátku 17. století zavedl astronom Bayer obecný systém, ve kterém je hvězdám přiřazeno označení písmenem řecké abecedy a názvem souhvězdí. Pořadí abecedy navíc většinou (ne vždy) určuje i pořadí jasnosti pojmenovaných hvězd (např. α Lyrae = Vega, β Persei = Algol atd.). Omezení tohoto nomenklaturního systému je dáno konečným a poměrně malým počtem řeckých písmen. Proto astronom Flamsteed zavádí označení číslem a názvem souhvězdí. Ovšem číselné pořadí jeho nomenklatury není určeno jasností hvězdy, ale postupuje ve směru rostoucí rektascenze (souřadnice).

Nehvězdné objekty (mlhoviny, dvojhvězdy atd.) mají i jiné způsoby označování, většinou podle svého katalogového zařazení.

SHRNUTÍ KAPITOLY



Astronomie je jednou z nejstarších věd a tato úvodní kapitola obsahuje nejen její další členění, ale také časovou osu jejího vývoje. Zvláštní pozornost je také věnována specifikaci literatury a informačních zdrojů. V závěru je vysvětlen systém souhvězdí i používaná nomenklatura jednotlivých hvězd.



KONTROLNÍ OTÁZKY A ÚKOLY

1. Uveďte, na jaké obory je možné dále astronomii dělit a čím se zabývají.
 2. Jak dělíme astronomickou literaturu a další informační zdroje?
 3. Co je obsahem astronomické ročenky? Uveďte konkrétní příklady.
 4. Jaký je rozdíl mezi hvězdným atlasem a katalogem hvězd?
 5. Jaká nomenklatura se používala a používá ve stelární astronomii?
-



CVIČENÍ

V rámci cvičení je možné se zaměřit na praktickou orientaci na hvězdné obloze, nejprve s využitím „slepých“ mapek v učebně, ale pak také praktická znalost souhvězdí při pozorování na ústavní observatoři.

2 SOUSTAVY SOUŘADNIC, TRANSFORMACE, PRAKTICKÉ APLIKACE

RYCHLÝ NÁHLED KAPITOLY



Jednou ze základních úloh, které astronomie musí řešit, je potřeba stále přesnější určování poloh astronomických objektů. V této kapitole jsou představeny základní souřadnicové systémy, které se k tomuto účelu používají.

Kromě obecného úvodu obsahuje kapitola definice horizontálních, rovníkových, ekliptikálních, galaktických a nadgalaktických astronomických souřadnicových systémů.

Zvláštní pozornost je pak věnována problematice transformací souřadnic mezi různými astronomickými souřadnicovými soustavami.

CÍLE KAPITOLY



- Pochopit obecné vlastnosti souřadnicových soustav
- Seznámit se se základními astronomickými souřadnicovými soustavami
- Umět transformovat astronomické souřadnice z jednoho souřadnicového systému do jiného s využitím maticového počtu

ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU



3 hodiny

KLÍČOVÁ SLOVA KAPITOLY



Astronomické souřadnice, sférické souřadnice, horizontální, rovníkové, ekliptikální a galaktické souřadnice, rektascenze, deklinace, transformace souřadnic, jarní bod

2.1 Úvod

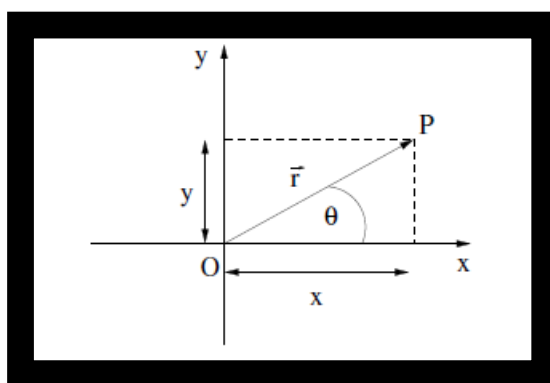
Jak už jsme si dříve uvedli, je astrometrie oborem astronomie, který se zabývá polohami a také pohyby astronomických objektů. Polohy jsou definovány směrem a také vzdáleností od nás. Pro jejich jednoznačný popis musíme zvolit vhodný souřadnicový systém. Jestliže si vezmeme příklad z kartografie, kdy každá poloha na celém povrchu Země je jednoznačně popsitelná zeměpisnou délkou a šířkou.

Podobně si můžeme představit takové souřadnice na hvězdné obloze. K popisu polohy objektu v prostoru však kromě dvou úhlových souřadnic potřebujeme znát také vzdálenost objektu od nějakého zvoleného bodu, který označíme jako *počátek souřadnicového systému*. Za počátek můžeme volit pozorovací stanoviště (topocentrické souřadnice), střed Země (geocentrické), střed Slunce (heliocentrické) atp.

Při pozorování z povrchu Země se polohy astronomických objektů vlivem různých faktorů trvale mění. Nejvýraznější vliv je patrně důsledek rotace Země kolem osy a tedy pohyb objektů po obloze od východu na západ. Tento vliv rotace Země je vhodné odstranit, což lze udělat vhodnou volbou souřadnicové soustavy, která rotuje spolu se Zemí. V takové soustavě se pak ukáže, že vzájemné polohy hvězd se nemění, ale planety, Měsíc a další objekty sluneční soustavy se oproti „kulise hvězd“ pohybují.

S těmi stálými pozicemi hvězd (též *stálic*) se však dopouštíme určité nepřesnosti, protože se mění důsledkem oběhu Země kolem Slunce (*roční paralaxa*) nebo také proto, že mají *vlastní pohyb* v prostoru. To jsou změny velmi malé a podrobněji jsou vysvětleny v jiné kapitole.

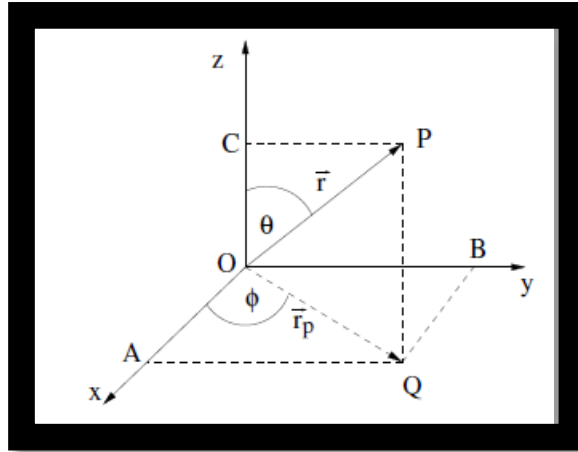
Přesnou polohu objektu můžeme popsat polohovým vektorem. Na obrázku je takový polohový vektor popisující polohu bodu P v rovině označen jako \vec{r} a jeho souřadnice pak jako x a y .



Obrázek 1: Popis polohy bodu P v rovině polohovým vektorem \vec{r} .¹

¹ Zdroj Jain, P., An Introduction to Astronomy and Astrophysics, ISBN 978-1-4398-8590-1

Uvedené souřadnice se označují jako *kartézské*. Polohový vektor \vec{r} svírá s osou x úhel θ s osou x . Označme jeho velikost, tedy vzdálenost bodů O a P jako r . Jeho projekce na osy x a y jsou dány vztahy: $x = r \cos \theta$, resp. $y = r \sin \theta$ a jsou to *složky* tohoto polohového vektoru. Alternativními souřadnicemi mohou být hodnoty (r, θ) a ty se označují jako *polární souřadnice*.



Obrázek 2: Popis polohy bodu P v prostoru polohovým vektorem \vec{r} .²

Analogicky je pak poloha libovolného bodu v trojrozměrném prostoru jednoznačně popsána třemi souřadnicemi a opět je možná volba kartézského souřadnicového systému a tedy souřadnic (x, y, z) . Situaci vidíme na obrázku, spojnice PC a PQ jsou kolmé k ose z , respektive rovině x - y . Rovněž spojnice QA a QB jsou kolmé k osám x a y . Souřadnice z je dána vztahem $z = r \cos \theta$. Velikost vektoru \vec{r}_p je dána vztahem $r_p = r \sin \theta$ a tedy pro složky x a y můžeme napsat $x = r_p \cos \phi = r \sin \theta \cos \phi$ a $y = r_p \sin \phi = r \sin \theta \sin \phi$.

To znamená, že pro kartézské souřadnice platí:

$$x = r \sin(\theta) \cos(\phi),$$

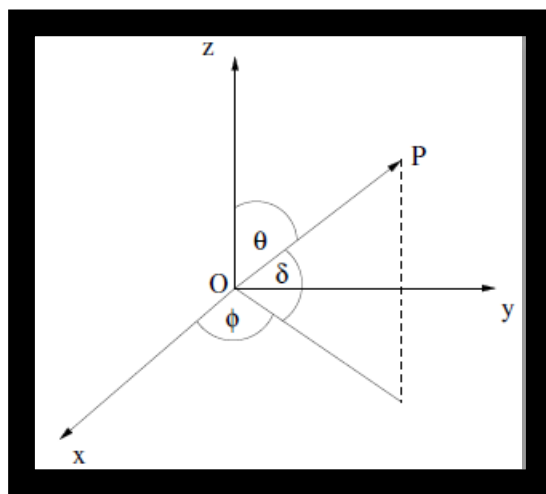
$$y = r \sin(\theta) \sin(\phi),$$

$$z = r \cos(\theta).$$

Pro sférickou astronomii je však mnohem výhodnější použití přímo souřadnic (r, θ, ϕ) , tedy *sférických souřadnic*. Jestliže hodnoty kartézských souřadnic mohou nabývat libovolných hodnot v intervalu od $-\infty$ do $+\infty$, pak sférické souřadnice mají hodnoty v rozsahu $r \geq 0, 0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \phi < 2\pi$, kde hodnoty všech úhlů jsou uvedeny v radiánech.

² Zdroj Jain, P., An Introduction to Astronomy and Astrophysics, ISBN 978-1-4398-8590-1

Jedinou úpravou astronomických sférických souřadnic je zavedení úhlu δ , definovaného jako $\delta = 90^\circ - \theta$ místo obvyklé souřadnice θ . Tato „nová“ souřadnice nabývá hodnot v intervalu -90° až 90° . Souřadnice ϕ je ekvivalentem zeměpisné délky.



Obrázek 3: Úhlové souřadnice (δ , ϕ) bodu P.³

V astronomii nás většinou nezajímá vzdálenost objektu, ale jednoznačné určení směru, ve kterém se nachází. Je to výhodné také z toho důvodu, že určení vzdálenosti je mnohem složitější úkol než měření úhlů.

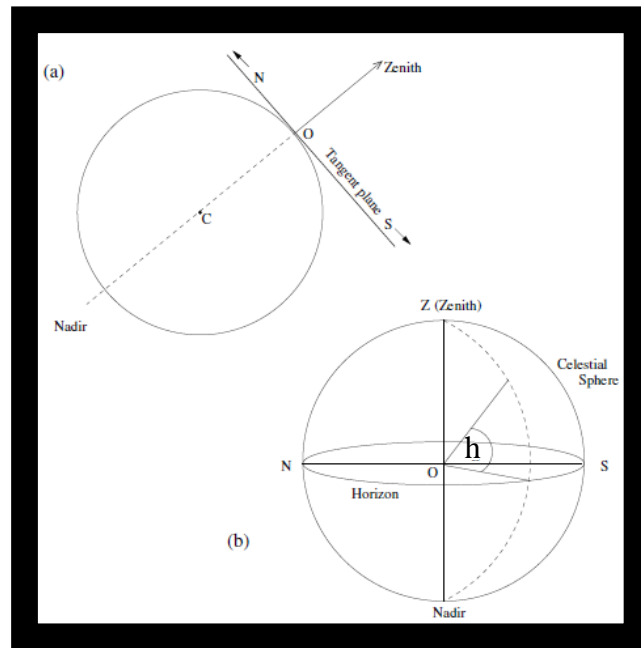
2.2 Souřadnicové systémy

Pro definici nějakého souřadnicového systému je nutné určit jednoznačně *počátek* souřadnicové soustavy, jeho *základní rovinu* a v ní ležící *základní směr* (polopřímka, která obsahuje i počátek souřadnicové soustavy).

Například zeměpisné souřadnice jsou definovány volbou roviny světového rovníku jako základní roviny a základního směru – směru k jihu.

³ Zdroj Jain, P., An Introduction to Astronomy and Astrophysics, ISBN 978-1-4398-8590-1

2.2.1 HORIZONTÁLNÍ SOUŘADNICE



Obrázek 4: (a) Tečná rovina k povrchu Země v bodě O (pozorovací stanoviště), písmeno C označuje střed Země a také je označen zenit a nadir. (b) Schéma oblohy s polohou pozorovatele O.⁴

Horizontální souřadnicová soustava je topocentrická se středem v místě stanoviště pozorovatele (na povrchu Země). Jestliže tímto bodem povedeme tečnou rovinu k povrchu Země, definujeme tak rovinu ideálního horizontu a ta je zároveň základní rovinou horizontální souřadnicové soustavy. Základním směrem pak zvolíme směr k jihu, na obrázku označen písmenem S. Rovina definovaná body NZS je rovina místního poledníku (meridiánu).

Poloha libovolného objektu (bodu) v této souřadnicové soustavě je určena *výškou nad horizontem* h a *azimutem* A . Na první pohled se zdá, že taková souřadnicová soustava je pro pozorovatele výhodná. Jenže je nejen topocentrická, ale v důsledku rotace Země je také časově závislá. Není tedy univerzálně použitelná a již vůbec se nehodí pro katalogizaci poloh astronomických objektů.

2.2.2 ROVNÍKOVÁ SOUŘADNICOVÁ SOUSTAVA

Potřebujeme tedy zjevně nějakou souřadnicovou soustavu, ve které se poloha objektu nebude časem měnit nebo se bude měnit jen nepatrně. Takovou podmínku může splnit například *rovníková souřadnicová soustava*. Jako základní rovinu volíme rovinu světového

⁴ Zdroj Jain, P., An Introduction to Astronomy and Astrophysics, ISBN 978-1-4398-8590-1

rovníku a základní směr je buď směr k jihu (v případě rovníkových souřadnic I. druhu) nebo směr k jarnímu bodu (v případě rovníkových souřadnic II. druhu).

V obou rovníkových souřadnicových soustavách se „šířková“ souřadnice označuje jako *deklinace* (δ). Její hodnoty leží v intervalu od -90° do 90° a pro všechny body v rovině světového rovníku je hodnota jejich deklinace $\delta = 0$. Druhá, tedy „délková“, souřadnice se jmenuje *rektascenze* (α) pro RS II. druhu nebo *hodinový úhel* (t) v případě RS I. druhu. Rektascenzi měříme od směru k *jarnímu bodu* proti směru hodinových ručiček, hodinový úhel se určuje od roviny místního poledníku.

Pro vyjádření hodnot těchto úhlů je obvyklé používat tzv. časově-úhlovou míru, která vychází z rovnice 24 hodin = 360 úhlových stupňů (tj. 1 hodina = 15 úhlových stupňů a 4 minuty = 1 úhlový stupeň).

V této souřadnicové soustavě jsou již hodnoty souřadnic na čase nezávislé, jejich nepatrné změny způsobuje pouze precesní pohyb (viz další kapitoly) a tak je zvykem vztahovat polohy k určitému datu, *ekvinokciu*. V klasických katalogích jsou polohy aktualizovány každých 50 let. Dříve byl např. používán systém B1950, nyní se používá ekvinokcium J2000. Elektronické katalogy a výpočetní SW však dokáží polohy aktualizovat průběžně.

2.2.3 EKLIPTIKÁLNÍ SOUŘADNICE

Ekliptika je rovina, ve které obíhá Země kolem Slunce a tato je zvolena za základní rovinu ekliptikální souřadnicové soustavy. Základním směrem je směr k jarnímu bodu.

Ekliptikálními souřadnicemi jsou pak *ekliptikální délka* (λ), což je úhel od základního směru měřený východním směrem, a *ekliptikální šířka* (β), tedy úhel mezi směrem k objektu (bodů) a rovinou ekliptiky. Samotná rovina ekliptiky a rovina světového rovníku spolu svírají úhel $23^\circ 27'$. A tak směr k severnímu ekliptikálnímu pólu se promítá do souhvězdí Draka.

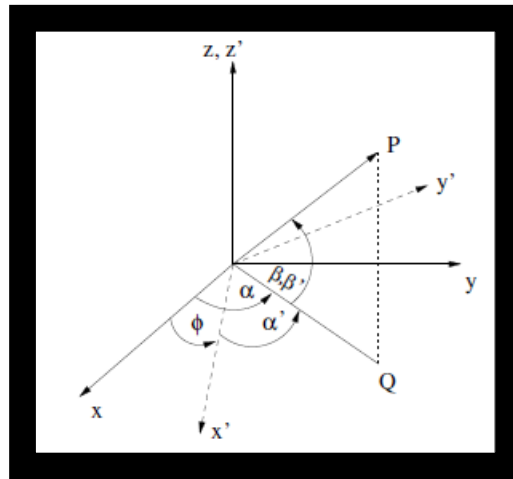
2.2.4 GALAKTICKÉ SOUŘADNICE

Při zavedení galaktické souřadnicové soustavy byla využita skutečnost, že Galaxie má tvar plochého disku. Jako základní rovina je tedy zvolena rovina galaktického rovníku, která prochází místy s největší koncentrací hvězd a přesněji je nepřímo definována polohou galaktických pólů. Pak souřadnice označujeme jako *galaktická šířka* b a *galaktická délka* l (měří se proti směru hodinových ručiček směrem ke středu Galaxie). Poloha severního galaktického pólu je v rovníkových souřadnicích $\delta = 27,13^\circ$ a $\alpha = 192,86^\circ$ (J2000) a střed Galaxie leží ve směru $\delta = -28,94^\circ$ a $\alpha = 266,40^\circ$.

2.2.5 „NADGALAKTICKÁ“ SOUŘADNICOVÁ SOUSTAVA

Taková soustava je výhodná při studiu rozložení galaxií, je definována polohou nadgalaktického pólu o rovníkových souřadnicích $\alpha = 283,8^\circ$ a $\delta = 15,7^\circ$ (J2000). Základní směr je pak na souřadnicích $\alpha = 42,3^\circ$ a $\delta = 59,5^\circ$.

2.3 Transformace souřadnic

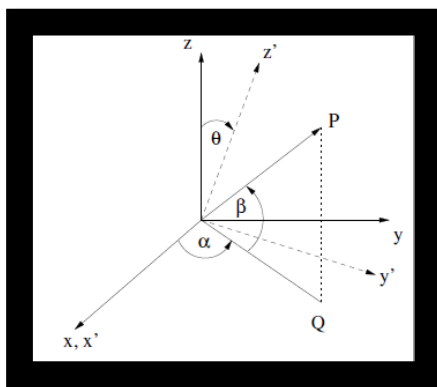


Obrázek 5: Souřadnicová soustava (x', y', z') se získá otočením soustavy (x, y, z) kolem osy z o úhel φ proti směru chodu hodinových ručiček. Sférické souřadnice bodu P v soustavách (x, y, z) a (x', y', z') jsou (β, α) a (β', α') .⁵

Přechod mezi různými souřadnicovými soustavami je možné řešit transformací souřadnic. Jak by vypadala transformace souřadnic bodu P , jehož úhlové souřadnice jsou (β, α) a (β', α') v soustavách (x, y, z) , respektive (x', y', z') ? Hodnoty β, β' odpovídají „šířkové“ souřadnici a hodnoty α, α' „délkové“. Potřebujeme najít vztah mezi těmito sférickými souřadnicemi. Obecně platí, že soustavu (x', y', z') lze transformovat na soustavu (x, y, z) rotací kolem os o tři různé úhly (Eulerovy úhly, podrobněji níže).

Nejprve si uveďme některé speciální případy. Předpokládejme, že systém (x', y', z') lze transformovat na (x, y, z) pouze rotací kolem osy z proti směru chodu hodinových ručiček o úhel ϕ , jak je znázorněno na obrázku. V tomhle případě je zřejmé, že $\beta' = \beta, \alpha' = \alpha - \phi$.

⁵ Zdroj Jain, P., An Introduction to Astronomy and Astrophysics, ISBN 978-1-4398-8590-1



Obrázek 6: Souřadnicová soustava (x', y', z') je získána rotací soustavy (x, y, z) ve směru chodu hodinových kolem osy x o úhel θ .⁶

Jinou transformací může být rotace soustavy kolem osy x ve směru chodu hodinových ručiček o úhel θ (viz obrázek). V tomto případě jsou souřadnice libovolného bodu P v těchto soustavách popsány těmito vztahy:

$$x' = x,$$

$$y' = \cos \theta y - \sin \theta z,$$

$$z' = \sin \theta y + \cos \theta z.$$

Nebo ve sférických souřadnicích:

$$x = \cos \beta \cos \alpha,$$

$$y = \cos \beta \sin \alpha,$$

$$z = \sin \beta,$$

s odpovídajícími vztahy pro „čárkované“ souřadnice. Potom transformační vztahy budou mít tvar:

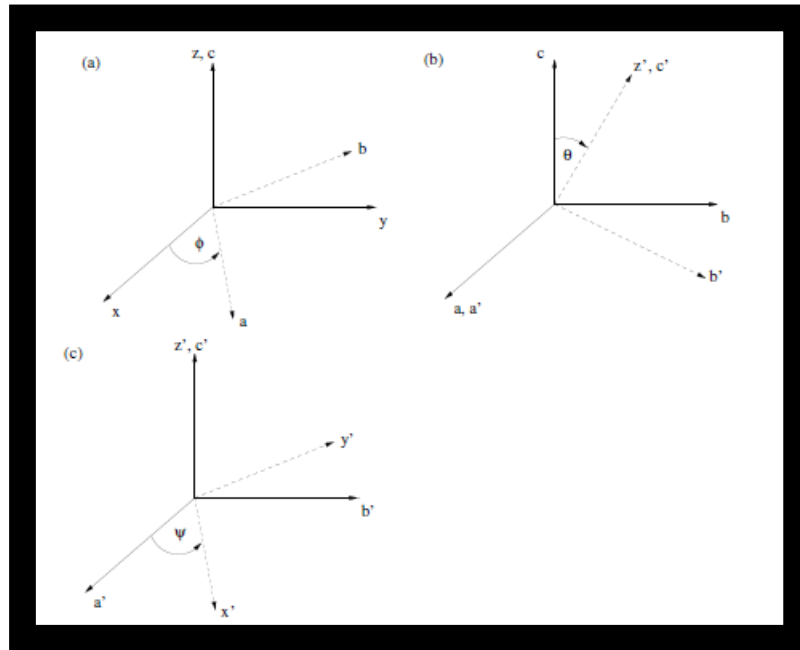
$$\cos \beta' \cos \alpha' = \cos \beta \cos \alpha,$$

$$\cos \beta' \sin \alpha' = \cos \theta \cos \beta \sin \alpha - \sin \theta \sin \beta,$$

$$\sin \beta' = \sin \theta \cos \beta \sin \alpha + \cos \theta \sin \beta.$$

⁶ Zdroj Jain, P., An Introduction to Astronomy and Astrophysics, ISBN 978-1-4398-8590-1

Tyto vztahy můžeme použít k vyjádření β' a α' . Hodnota β' může být určena přímo z třetí rovnice, k vyjádření α' využijeme první dvě rovnice. Obě rovnice potřebujeme zejména k jednoznačnému určení kvadrantu, ve kterém úhel leží.



Obrázek 7: Tři Eulerovy rotace pro transformaci ze soustavy (x, y, z) na (x', y', z') .⁷

V nejobecnějším případě je vztah soustav (x', y', z') a (x, y, z) popsateľný třemi (Eulerovými) úhly, viz obrázek. Nejprve získáme soustavu (a, b, c) rotací kolem osy z o úhel ϕ . Dále uděláme rotaci kolem osy a o úhel θ , abychom obdrželi soustavu (a', b', c') a nakonec rotace kolem osy c' o úhel ψ , abychom získali soustavu (x', y', z') . Úhly ϕ, θ, ψ jsou Eulerovy úhly.

2.3.1 TRANSFORMACE MEZI ROVNÍKOVÝMI A EKLIPTIKÁLNÍMI SOUŘADNICEMI

Jako příklad si uveďme transformaci mezi rovníkovými a ekliptikálními souřadnicovými soustavami. Tyto dvě soustavy mají shodnou definici hlavního směru – směr k jarnímu bodu. Rovina ekliptiky svírá s rovinou světového rovníku úhel $\theta = 23^{\circ}26'$, jak je znázorněno na obrázku. Potřebujeme určit ekliptikální souřadnice (β, λ) z rovníkových souřadnic (δ, α) . Vztahy jsou dány dříve uvedenou soustavou rovnic, do které použijeme následující substituce: $\beta' \rightarrow \beta, \alpha' \rightarrow \lambda, \beta \rightarrow \delta, \alpha \rightarrow \alpha, \theta \rightarrow -\theta$.

Musíme změnit $\theta \rightarrow -\theta$, protože rotace je proti směru chodu hodinových ručiček. Po dosažení pak obdržíme rovnice:

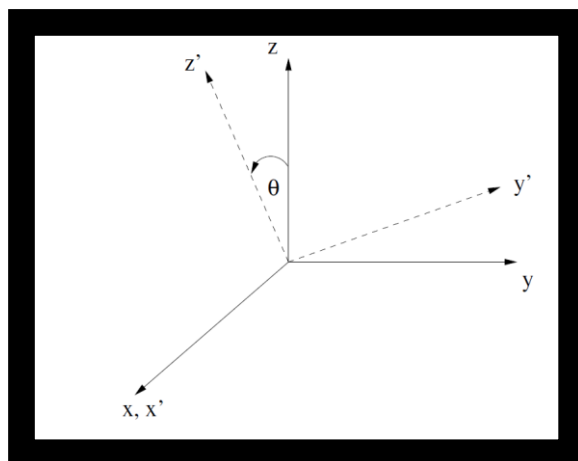
⁷ Zdroj Jain, P., An Introduction to Astronomy and Astrophysics, ISBN 978-1-4398-8590-1

$$\cos \beta \cos \lambda = \cos \delta \cos \alpha,$$

$$\cos \beta \sin \lambda = \cos \theta \cos \delta \sin \alpha + \sin \theta \sin \delta,$$

$$\sin \beta = -\sin \theta \cos \delta \sin \alpha + \cos \theta \sin \delta,$$

z nichž můžeme určit hodnoty souřadnic β a λ .



Obrázek 8: Transformace mezi rovníkovými (x, y, z) a ekliptikálními (x', y', z') souřadnicemi.⁸



SHRNUTÍ KAPITOLY

Při zavádění různých typů astronomických souřadnic je v textu využita analogie se souřadnicemi zeměpisnými. Jsou zmíněny jen základní typy astronomických souřadnic: horizontální, rovníkové, ekliptikální a galaktické. V části věnované transformaci souřadnic je věnována pozornost transformaci s využitím rotace kolem souřadnicových os (Eulerovy úhly). Pro jednoduchost je při transformacích předpokládán shodný počátek obou soustav, není řešena translace a ani operace zrcadlení. Jako praktický příklad jsou uvedeny transformační rovnice přechodu od rovníkové do ekliptikální souřadnicové soustavy.



KONTROLNÍ OTÁZKY

1. Co je to horizont? Jak jsou definovány horizontální souřadnice?
2. Jaký je rozdíl mezi kartézskými a sférickými souřadnicemi?
3. Jak je definován směr k jarnímu bodu?

⁸ Zdroj Jain, P., An Introduction to Astronomy and Astrophysics, ISBN 978-1-4398-8590-1

4. Vyjmenujte alespoň tři typy astronomických souřadnic.
 5. Co je to ekvinokcium?
-

CVIČENÍ



V rámci cvičení se předpokládá samostatné řešení několika desítek příkladů ze sférické astronomie, které jsou obsaženy ve sbírkách astronomických příkladů uvedených mezi doporučenými publikacemi.

3 ROTACE ZEMĚ, PRECESE, NUTACE, ABERACE, ATMOSFÉRICKÁ REFRAKCE



RYCHLÝ NÁHLED KAPITOLY

Kapitola se ve své první části zabývá některými vlastnostmi Země jako planety, jsou zde uvedeny definice různých typů zeměpisných souřadnic a fyzikální popis zemské rotace.

Dále jsou uvedeny hlavní jevy, které mají vliv na určení polohy astronomických těles, pokud tato jsou pozorována ze stanoviště na povrchu Země – tedy vliv precese, nutace, konečné rychlosti světla a atmosférické refrakce



CÍLE KAPITOLY

- Nastudování základních vlastností Země jako planety
 - Seznámení se zákonitostmi zemské rotace
 - Umět redukovat pozorování o vliv precese, aberace a refrakce
-



ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU

3 hodiny



KLÍČOVÁ SLOVA KAPITOLY

Dohlednost, zeměpisné souřadnice, rotace Země, precese, nutace, aberace, refrakce

3.1 Planeta Země

Pokusy o určení velikosti Země jsou doloženy už v antice, ale první měření v novověku byla provedena Jeanem Fernelem v roce 1528, který metodou otáčení kola o známé délce obvodu určil vzdálenost mezi městem Amiens a Paříží a stanovil tak délku Pařížského poledníku. Později se začala využívat metoda triangulace mezi body na zemském povrchu, mezi kterými byla přímá dohlednost a bylo možné určit jejich vzdálenost i úhly. Triangulační trojúhelníky tak měly délku stran asi 30 kilometrů. Systematická měření také brzy ukázala, že Země nemá tvar ideální sféry, ale že je zploštělá. Teoreticky se problémem zabýval Issac Newton, který správně dovozoval, že je to důsledek rotace Země. Z těchto měření délky poledníku byla odvozena také nová jednotka délky *1 metr* (původně definovaná jako 1/10 000 000 poledníkového kvadrantu Země), která byla ve Francii uznána za oficiální jednotku délky již v roce 1799 (v našich zemích k tomu došlo až v roce 1876). I když je tato jednotka SI používána dodnes, její definice je už docela jiná (jako vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu během časového intervalu 1/299 792 458 sekundy).

V současné době se ke geodetickým měřením využívají umělé družice Země, specifickými metodami takových měření a interpretace výsledků se zabývá *kosmická geodézie a dálkový průzkum Země*.

Přesný tvar naší planety neodpovídá žádnému tělesu s jednoduchou geometrií. Ekvipotenční plocha, která by nejtěsněji „kopírovala“ střední hladinu moří, oceánů a ke které je pak možné vztahovat tzv. *nadmořskou výšku*, je označována jako *geoid*. Je to velmi složitý tvar, takže se v kartografii i astronomii často používá modelů mnohem jednodušších. Jedním z nich může být rotační elipsoid, který ve válcových souřadnicích můžeme zapsat jako:

$$\left(\frac{\rho}{a}\right)^2 + \left(\frac{z}{b}\right)^2 = 1,$$

kde $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ je vzdálenost od osy rotace, a je rovníkový a b polární poloměr. Hodnota zploštění je popsána parametrem $i = (a - b)/a$.

Vznikly různé typy *referenčních elipsoidů* a patrně nejčastěji používaným je WGS-84, který je standard pro satelitní navigaci GPS. Tento model má střed ve středu Země, jeho poloosa $a = 6\,378\,137$ m, $b = 6\,356\,752,3$ m a zploštění $i = 1:298,257$.

Skutečnost, že naše Země má přibližně sférický tvar, je možné pozorovat na tvaru stínu Země při zatměních Měsíce, různou výškou stejných hvězd nad obzorem při změně zeměpisné šířky pozorovacího stanoviště nebo přímým pozorováním z vesmíru. Není bez zajímavosti si uvědomit, že odchylky od sférického tvaru nejsou vzhledem k velikosti naší planety nijak velké, dosahují maximálně 50 metrů!

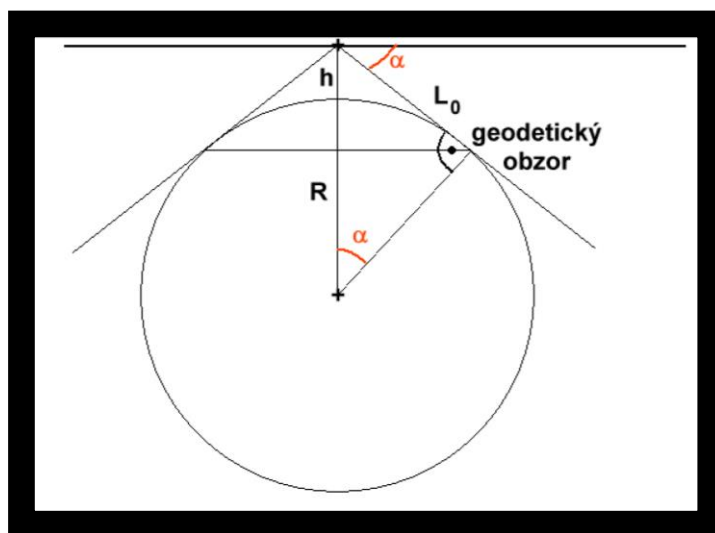
3.1.1 DOHLEDNOST

Při pozorování okolí z povrchu Země závisí hranice obzoru, tedy „kam až dohlédneme“, na nadmořské výšce pozorovacího stanoviště. Situace je znázorněna na obrázku. Můžeme tak definovat pojem *geodetického obzoru*:

$$L_0 = [(R + h)^2 - R^2]^{1/2} = \left[2Rh \left(1 + \frac{h}{2R} \right) \right]^{1/2} \cong \sqrt{2Rh}$$

a pro tangentu pak (α je úhel deprese)

$$\tan \alpha = \left[\frac{(R + h)^2 - R^2}{R^2} \right]^{1/2} \cong (2h/R)^{1/2}.$$



Obrázek 9: Geodetický obzor pro výšku h nad povrchem Země.⁹

Uveďme si nyní konkrétní příklad – jestliže zanedbáme vliv atmosféry, pak pro výšku 10 metrů bude vzdálenost geodetického obzoru asi 11,3 km (úhel deprese bude asi 6 úhlových minut). Přítomnost atmosféry pak vlivem refrakce zvětší tuto hodnotu přibližně o 6 %.

3.1.2 SOUŘADNICE GEOCENTRICKÉ, GEODETICKÉ A ASTRONOMICKÉ

Přirozeným důsledkem popisu tvaru Země nějakým nesférickým tělesem (např. rotačním elipsoidem) je možnost definování několika „druhů“ zeměpisné šířky. *Geocentrická* zeměpisná šířka (ψ) je definována polohou bodu na povrchu, středem Země a rovníkem, ale *geodetická* zeměpisná šířka (φ) je určena polohou bodu na povrchu Země, rovníkem a

⁹ Zdroj J. Janík, Z. Mikulášek, *Obecná astronomie*, MU Brno, <http://astro.physics.muni.cz/download/documents/skripta/F3170.pdf>, 2017

těžištěm Země. Z rovnice rotačního elipsoidu, kterou jsme si již uvedli, vyplývá, že úhel φ je možné vypočítat ze vztahu:

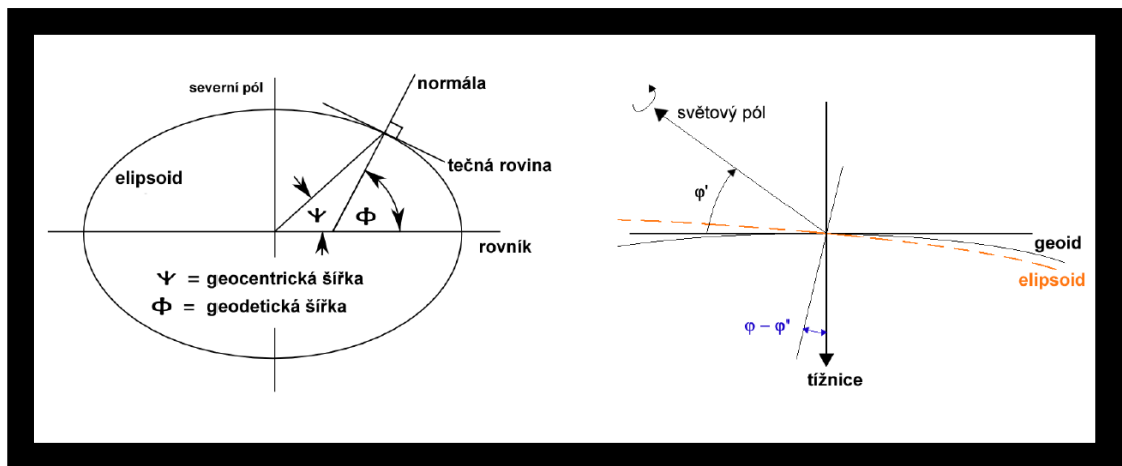
$$\tan \varphi = -\frac{dp}{dz} a \frac{2\rho d\rho}{a^2} + \frac{2zdz}{b^2} = 0,$$

a tedy

$$\tan \varphi = -\frac{a^2 z}{b^2 \rho} = \frac{a^2}{b^2} \tan \psi.$$

S využitím vztahu $\frac{a^2}{b^2} = \frac{1}{1-e^2}$, pak dostaneme přímý vztah mezi oběma zeměpisnými šířkami: $\tan \psi = (1 - e^2) \tan \varphi$. Po vyčíslení zjistíme, že maximální rozdíl je pro úhel $\varphi = 45^\circ$ (cca 11,5 úhlové minuty), kdežto na rovníku i na pólech jsou zcela shodné.

Astronomická zeměpisná šířka (φ') je definována jako úhel mezi osou rotace a kolmicí k místní tížnici $\varphi = \varphi' - \Delta\varphi$, kde $\Delta\varphi$ je tížnicová odchylka.



Obrázek 10: Geocentrická a geodetická zeměpisná šířka (vlevo) a zavedení astronomické zeměpisné šířky (vpravo).¹⁰

GRAVITAČNÍ POLE ZEMĚ

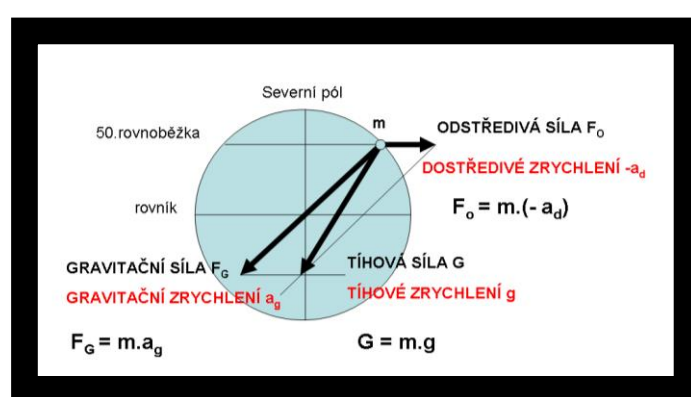
Studiem tíhového pole se zabývá *gravimetrie*. Jednou z veličin používaných k popisu gravitačního pole je *gravitační potenciál*. Pro tuto skalární veličinu platí vztah:

$$\phi(r) = -\frac{GM}{r}$$

¹⁰ Zdroj J. Janík, Z. Mikulášek, *Obecná astronomie*, MU Brno, <http://astro.physics.muni.cz/download/documents/skripta/F3170.pdf>, 2017

kde G je gravitační konstanta, M hmotnost hmotného bodu a r vzdálenost od hmotného bodu. Gradientem této veličiny je *gravitační zrychlení* \vec{g} . Pro měření gravitačního zrychlení je možné využít např. závislost délky kyvu kyvadla na hodnotě zrychlení.

Musíme si však uvědomit, že na velikost výsledné síly má vliv kromě zploštění Země také velikost odstředivé síly způsobené rotací naší planety. Pro úhlovou rychlost zemské rotace platí $\omega = 2\pi/P = 7,2921 \cdot 10^{-5}$ rad/s a střední hodnota gravitačního zrychlení ($\bar{g} = G \frac{M_Z}{R_Z^2}$) je $9,823$ m/s². Jestliže však zavedeme gravitační zrychlení jako převodní koeficient mezi hmotností a váhou tělesa, obdržíme hodnotu $g_0 = 9,80665$ m/s². Hodnota odstředivého zrychlení na rovníku je $a_{od} = 3,39 \cdot 10^{-2}$ m/s² a vzájemný poměr obou zrychlení má hodnotu 1/288,38.



Obrázek 11: Znázornění gravitačního, tíhového a odstředivého zrychlení a jim odpovídajících sil.¹¹

Helmert odvodil vztah, který nám umožňuje vypočítat hodnotu gravitačního zrychlení pro libovolnou nadmořskou výšku a zeměpisnou šířku:

$$g_\varphi = (9,8061999 - 0,0259296 \cos(2\varphi) + 0,0000567 \cos^2(2\varphi)) - 3,086 \cdot 10^{-6}h.$$

Například rozdíl mezi hodnotami na pólech a na rovníku je $5,2 \cdot 10^{-2}$ m/s² a přibližně z 1/3 je rozdíl dán zploštěním a ze 2/3 této hodnoty vlivem odstředivé síly.

3.1.3 ROTACE ZEMĚ

Naše planeta se otáčí kolem své osy jako pevné těleso, tedy všechny body na povrchu rotují shodnou úhlovou rychlostí ω . *Siderická perioda* rotace je definována jako jedna otočka Země vůči vzdáleným hvězdám a numerická hodnota velikosti úhlové rychlosti je pak: $\omega = 2\pi/P = 7,29211508 \cdot 10^{-5}$ rad/s a rychlost nějakého bodu na povrchu Země

¹¹ Zdroj Autor: Arctur – Vlastní dílo, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5706910>

je určena vztahem $v_\varphi = \omega_Z R_Z \cos \varphi$. Ze vztahu je zřejmé, že maximální hodnoty dosahuje velikost rychlosti na rovníku (465,1 m/s) a pro naši zeměpisnou šířku je to přibližně 290 m/s. Tyto údaje je nutné použít ke korekcím měření např. velikosti radiálních rychlostí jiných objektů atp.

Pro rotaci Země lze formulovat zákon zachování momentu hybnosti ve tvaru:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times m\vec{v} \text{ a } \vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r}.$$

Za předpokladu, že suma příspěvků k momentu hybnosti od jednotlivých hmotných elementů dm je $|\vec{r} \times \vec{v}| = r^2 \omega$ dostaneme vztah $L = \omega \int r^2 dm = \omega I$, kde I je moment setrvačnosti ($I = \int r^2 dm$). Protože rotační osa Země prochází jejím těžištěm, je možné napsat vztah pro rotační energii Země ve tvaru $E_{rot} = 1/2 I \omega^2$.

Pokud na Zemi působí vnější síly, pak vytvářejí dodatečné momenty sil, které mění orientaci osy rotace (tzv. precese) nebo může dojít ke změně momentu hybnosti, což se projeví zpomalováním zemské rotace a také zvětšováním velké poloosy měsíční dráhy („vzdalováním“ Měsíce od Země).

NEROVNOMĚRNOST ROTACE ZEMĚ

Všechny dosud zjištěné a pozorované změny v rotaci naší planety je možné rozdělit do tří skupin:

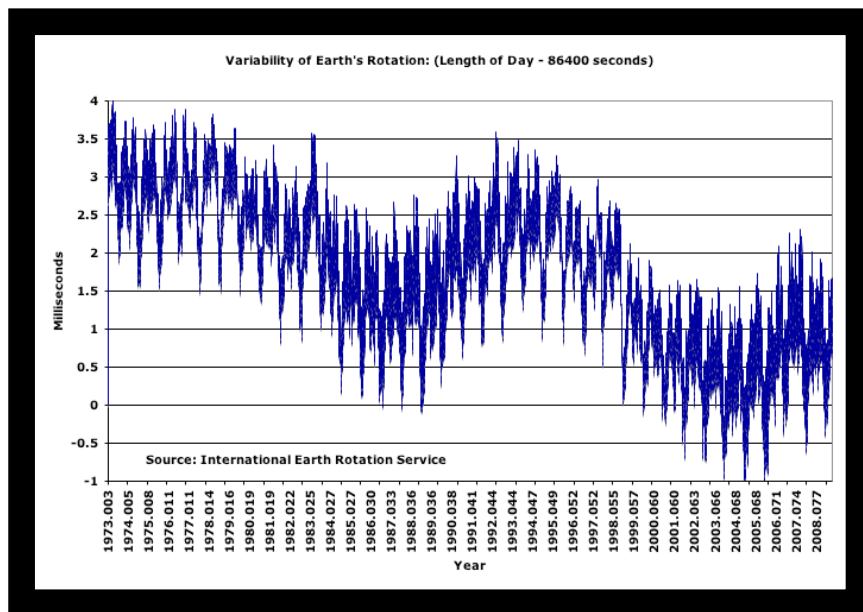
1. dlouhodobé změny v periodě rotace (tzv. sekulární)
2. nepravidelné změny v rychlosti rotace (tzv. skokové změny)
3. sezónní periodické změny.

Sekulární změny souvisejí se zpomalováním rotace Země. Jedním z důsledků slapového působení je přenos momentu hybnosti z rotace Země do momentu hybnosti oběhu Měsíce kolem Země. Rychlost tohoto zpomalování rotace je 0,001 sekundy až 0,002 sekundy za století. S využitím metod paleontologického datování lze spolehlivě určit, že před cca 400 miliony lety byla délka dne přibližně 22 hodin.

Všechny nepravidelné změny se týkají přesouvání nehomogenit v nitru Země a dosahují několika tisícín sekundy. Příkladem mohou být změny v souvislosti se silnými zemětřeseními (např. v Japonsku v roce 2011).

Periodické změny jsou kvantifikovány porovnáním s atomovým časem. Tak bylo zjištěno, že roční perioda související s přesunem vzdušných hmot, sněhu, ledu a změnami vegetace má amplitudu 0,022 s, vliv eliptické dráhy Země kolem Slunce se projevuje s půlroční periodou a amplitudou 0,010 s. Další periodický charakter změn rotace Země má

oběh Měsíce po eliptické dráze, tato kolísání rotace mají ještě menší amplitudu a měsíční, resp. dvoutýdenní, periodicitu.



Obrázek 12: Změny periody rotace Země v průběhu několika desetiletí.¹²

3.2 Precese, nutace

3.2.1 VLIV PRECESE NA ROVNÍKOVÉ SOUŘADNICE

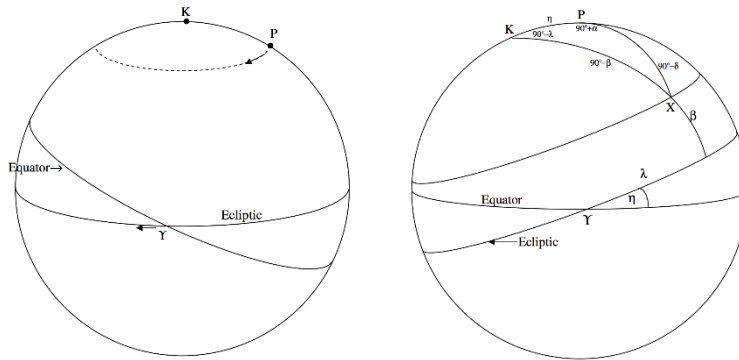
Směr k tzv. jarnímu bodu se nachází v souhvězdí Berana, a je definován přímkou, respektive polopřímkou, která je průsečíkem (množinou společných bodů) roviny ekliptiky a roviny světového rovníku. Jak je podrobněji vysvětleno v kapitole věnované astronomickým souřadnicím, je to základní směr rovníkových souřadnic 2. druhu. Tedy směr, od kterého se určuje např. rektascenze. Bylo by ideální, kdyby tento směr byl neměnný, tedy nezávislý na čase. Ve skutečnosti tomu tak ale není.

Na obrázku je rovina ekliptiky znázorněna vodorovně a rovina světového rovníku pak pod úhlem $23,4^\circ$. Je také znázorněn severní pól ekliptiky **K** a severní světový pól **P**.

Ani severní světový **P** ani směr k jarnímu bodu však nejsou časově nezávislé. Severní světový pól (**P**) se velmi pomalu pohybuje po kružnici o poloměru $23,4^\circ$ kolem pólu ekliptiky **K** a směr k jarnímu bodu se pohybuje na západ podél ekliptiky s periodou 25 800 let. Tento pohyb označujeme jako *precese* a jeho rychlost je možné v prvním přiblížení považovat za konstantní. Perioda 25 800 let pak odpovídá posunu podél roviny ekliptiky západním směrem rychlostí 50,2 úhlových vteřin za rok nebo 0,137 úhlové vteřiny denně. Složka precese „promítnutá“ do roviny světového rovníku bude mít hodnotu

¹² Zdroj <https://www.physicsforums.com/threads/earth-rotation-rate.343608/>

$0,137 \cdot \cos 23,4 = 0,126'' = 0,008^s$ za den. Proto je délka průměrného hvězdného dne, který je definován jako časový interval mezi dvěma po sobě následujícími kulminacemi jarního bodu o 0,008 sekundy kratší než časový interval odpovídající jedné otočce Země vůči hvězdnému pozadí.



Obrázek 13: Znárodnění pohybu směru k jarnímu bodu vlivem precesního pohybu, více v textu.¹³

Precese bodu P kolem bodu K znamená, že se celý systém rovníkových souřadnic (rektascenze a deklinace) se stále pohybuje a tedy rovníkové souřadnice všech hvězd se velmi pomalu mění. Z této skutečnosti vyplývá, že rovníkové souřadnice se musí vždy vztahovat k určitému datu (*ekvinokciu*).

Například ve 20. století byla většina katalogů a atlasů vztažena k ekvinokciu B1950.0, což je okamžik počátku Besselova roku 1950 (krátce před půlnocí v noci z 31. prosince 1949 na 1. ledna 1950), kdy rektascenze středního Slunce měla hodnotu 18h 40m. Většina katalogů od roku 1984 je pak vztažena k ekvinokciu J2000.0. To je začátek Juliánského roku 2000 (UT = 0h 0m 0s).

Uveďme si příklad pro souřadnice hvězdy Arcturus, jeho rovníkové souřadnice 2. druhu byly ve starších katalogích uváděny takto:

$$\alpha_{1950.0} = 14^h 13^m.4, \delta_{1950.0} = +19^\circ 26',$$

kdežto v novějších katalogích jsou uvedeny jako

$$\alpha_{2000.0} = 14^h 15^m.8, \delta_{2000.0} = +19^\circ 11'.$$

Je tedy vidět, že pro přesnou práci není rozdíl vůbec zanedbatelný, a uvádět rovníkové souřadnice objektu bez uvedení ekvinokcia vlastně nemá smysl. Při nastavování daleko-

¹³ Zdroj [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Astronomy_and_Cosmology/TextMaps/Map%3A_Celestial_Mechanics_\(Tatum\)/6%3A_The_Celestial_Sphere/6.07%3A_Precision](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Astronomy_and_Cosmology/TextMaps/Map%3A_Celestial_Mechanics_(Tatum)/6%3A_The_Celestial_Sphere/6.07%3A_Precision)

hledu směrem k pozorovanému objektu během nočních pozorování samozřejmě potřebujeme znát přesnou aktuální hodnotu rektascenze i deklinace. Jestliže používáme katalogizované hodnoty, je nutné je opravit také o precesi.

Použijeme cosinovou větu pro trojúhelník **PKX** (viz obrázek výše)

$$\sin \delta = \cos \eta \sin \beta + \sin \eta \cos \beta \sin \lambda.$$

Protože směr k Jarnímu bodu se posouvá po ekliptice směrem „dolů“, hodnota ekliptikální délky λ hvězdy **X** se zvyšuje. Pokud roste rychlostí $\dot{\lambda}$ ($= 50,2''$ za rok), lze míru změny jeho deklinace získat diferencováním výše uvedené rovnice podle času. Hodnoty β a η jsou konstantní, tedy:

$$\cos \delta \dot{\delta} = \sin \eta \cos \beta \cos \lambda \dot{\lambda}.$$

Ale $(\cos \beta \cos \lambda) / \cos \delta$ dosadíme ze sinové věty:

$$\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} = \frac{\cos \delta}{\cos \lambda}$$

Odtud získáme vyjádření hodnoty změny deklinace objektu v důsledku precese:

$$\dot{\delta} = \dot{\lambda} \sin \eta \cos \alpha.$$

Pro získání vyjádření rychlosti změny rektascenze můžeme napsat rovnici v této podobě:

$$\cos \alpha = \cos \beta \sec \delta \cos \lambda$$

a poté ji diferencovat podle času:

$$-\sin \alpha \dot{\alpha} = \cos \beta \sec \delta (\tan \delta \dot{\delta} \cos \lambda - \sin \lambda \dot{\lambda}),$$

kterou dále upravíme do podoby

$$-\sin \alpha \dot{\alpha} = \cos \beta \sec \delta \cos \lambda (\tan \delta \dot{\delta} - \tan \lambda \dot{\lambda})$$

Hodnotu $\cos \beta \sec \delta \cos \lambda$ můžeme získat z předchozích rovnic, stejně jako hodnotu deklinace (δ), ale stále potřebujeme najít výraz pro hodnotu $\tan \lambda$ v rovníkových souřadnicích. Můžeme to udělat využitím obecného vztahu pro sférický trojúhelník:

$$\cos b \cos A = \sin b \cot c - \sin A \cot C,$$

ve kterém je vnitřní úhel $90^\circ + \alpha$ a vnitřní strana je η :

$$-\cos \eta \sin \alpha = \sin \eta \tan \delta - \cos \alpha \tan \lambda.$$

Po dosazení předchozích rovnic do rovnice

$$-\sin \alpha \dot{\alpha} = \cos \beta \sec \delta \cos \lambda (\tan \delta \dot{\delta} - \tan \lambda \dot{\lambda})$$

získáme po určitých úpravách vyjádření velikosti změny rektascenze hvězdy v důsledku precese:

$$\dot{\alpha} = \dot{\lambda} (\cos \eta + \sin \alpha \tan \delta \sin \eta).$$

Pokud do rovnice dosadíme hodnoty $\dot{\lambda} = 50,2''$ za rok a hodnotu $\eta = 23,4^\circ$ obdržíme praktický vztah $\dot{\delta} = 19,9 \cos \alpha$ za rok, respektive $\dot{\alpha} = 46,1'' + 19,9'' \sin \alpha \tan \delta$ za rok (nebo také $\dot{\alpha} = 3,07^s + 1,33^s \sin \alpha \tan \delta$ za rok).

3.2.2 FYZIKÁLNÍ PŘÍČINY PRECESNÍHO POHYBU

Takzvaný „denní pohyb hvězd“ kolem severního nebeského pólu je důsledkem rotace Země kolem její osy a roční pohyb Slunce podél roviny ekliptiky, je způsoben oběhem Země kolem Slunce v průběhu roku. Úhel mezi rovinou ekliptiky a rovinou světového rovníku je přibližně stále stejný (cca $23,4^\circ$), ale orientace zemské rotační osy v prostoru se mění, vykonává precesní pohyb kolem kolmice k rovině ekliptiky s periodou přibližně 25 800 let.

Z pohledu klasické mechaniky je Země zploštělé symetrické rotující těleso. Tedy má osu symetrie a dva z jejích hlavních momentů setrvačnosti jsou stejné a jsou menší než moment setrvačnosti vztažený k ose symetrie. Precese takového tělesa je probírána podrobněji v klasické teoretické mechanice

Tvar Země je přibližně popsitelný tělesem zploštělého sféroidu. Pokud označíme rovníkový poloměr a a polární poloměr c , pak *geometrická elipticita* $(a - c)/a$ má hodnotu přibližně $1/297,0$. Pokud označíme odpovídající momenty setrvačnosti A a C , tak *dynamická elipticita* $(C - A)/A$ je asi $1305,1$. Rovník Země je nakloněn k ekliptice a díky rovníkové výdutí je rotující Země vystavena rušivým momentům jak od Slunce, tak od Měsíce (jehož dráha svírá s ekliptikou úhel asi 5°). Velikost momentu je úměrná součinu průměru Země a gradientu gravitačního pole $2GM/r^3$. Směr vektoru momentu je pak kolmý na vektor momentu hybnosti.

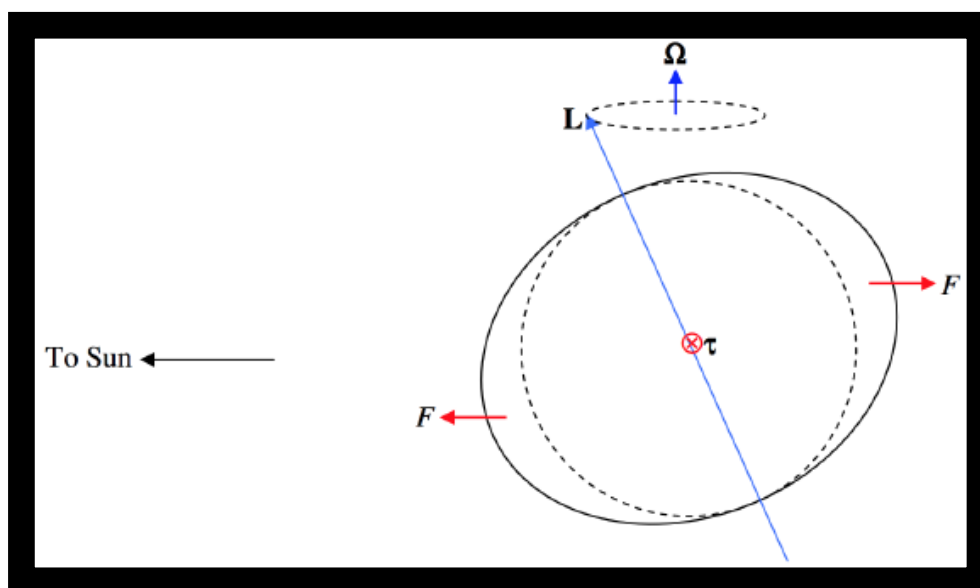
Nyní, pokud se symetrické těleso točí kolem své osy symetrie s momentem hybnosti L a pokud je vystaveno rušivému vnějšímu momentu τ , změní se jeho moment hybnosti (pouze směr, nikoliv velikost), a L bude vykonávat precesi s úhlovou rychlostí Ω danou vztahem

$$\tau = \Omega \times L$$

Rovnice však neurčuje jednoznačně směr vektoru Ω , protože ten závisí na počátečních podmínkách. Situace je znázorněna na obrázku. Rovníková výduť je hodně zvětšena. Obrázek je nakreslen ve vztažné soustavě, která obíhá kolem Slunce se Zemí, takže na Zemi nepůsobí žádná „čistá“ gravitační síla (gravitační přitažlivost Slunce je působena odstředivou silou). V takové soustavě existuje malá síla F působící směrem ke Slunci na výduť směřující ke Slunci a stejná síla působící směrem od Slunce na opačné straně. To odpovídá velikosti výsledného momentu velikosti $\tau = Fd \sin \eta$, kde η je sklon ekliptiky a d je průměr Země. Pokud tedy porovnáme velikost obou stran rovnice, dostaneme pro úhlovou rychlost precese vztah

$$\Omega = Fd/L,$$

který je není závislý na hodnotě η . Toto je pak příčina precese směru k jarnímu bodu. Zatím jsme uvažovali vliv Slunce, ale vliv Měsíce je asi dvakrát větší. Kombinovaný vliv Měsíce a Slunce je označován jako *lunisolární precese*. Vliv ostatních planet je mnohem menší, přesto jej lze vypočítat a pro jeho označení se používá pojem *planetární precese*.



Obrázek 14: Znázornění slapových sil působících na rotující Zemi, fyzikální příčina precesního pohybu zemské osy. Podrobnější vysvětlení v textu.¹⁴

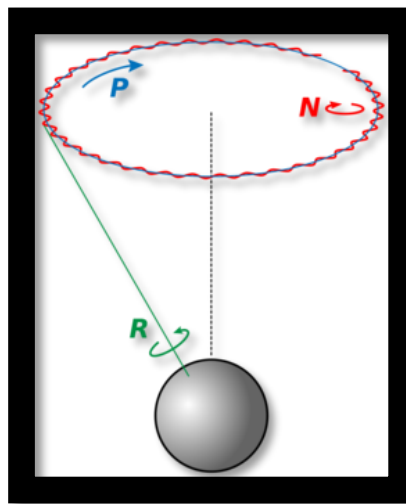
3.2.3 NUTACE

Rotující setrvačníky (gyroskopy) mohou kromě precese vykonávat také „kývavé“ pohyby. Osa rotace se vychyluje „nahoru a dolů“, amplituda takového pohybu, který je

¹⁴ Zdroj [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Astronomy_and_Cosmology/TextMaps/Map%3A_Celestial_Mechanics_\(Tatum\)/6%3A_The_Celestial_Sphere/6.07%3A_Precision](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Astronomy_and_Cosmology/TextMaps/Map%3A_Celestial_Mechanics_(Tatum)/6%3A_The_Celestial_Sphere/6.07%3A_Precision)

označován jako nutace, je závislá na počátečních podmínkách. Také osa rotace Země vykonalává nutační pohyb, ale ne ze stejné příčiny. U gyroskopů totiž dochází k rychlému útlumu nutací, a protože Země je pružné těleso, tento druh nutací by se již dávno utlumil.

Poloha osy rotace Země vykazuje nutační změny, protože podléhá různým rušivým momentům od Slunce a Měsíce – v prvním případě se mění kvůli excentricitě dráhy Země a ve druhém případě kvůli excentricitě a sklonu oběžné dráhy Měsíce. To znamená, že směr k jarnímu bodu se nepohybuje rovnoměrnou rychlostí podél ekliptiky a také sklon ekliptiky se mění téměř periodicky. Tyto dva účinky jsou známé jako *nutace délky* a *nutace sklonu*.



Obrázek 15: Precese a nutace zemské osy. Podrobnější vysvětlení v textu. ¹⁵

Asi největší vliv na oba typy nutace má stáčení uzlů měsíční dráhy, které má periodicitu 18,6 let. Obě složky nutace tedy mají v první aproximaci také periodu 18,6 let. Nutace v délce má amplitudu 17,2" a nutace sklonu má amplitudu 9,2". Navíc planetární poruchy způsobují sekulární (tj. neperiodické) snižování sklonu asi o 0,47" za rok.

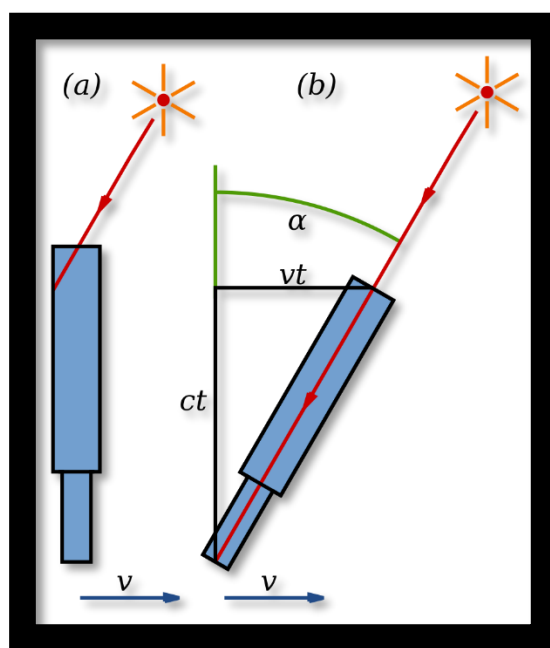
3.3 Aberace

Aberace je jedním z jevů, které mají vliv na polohu objektu při pozorování z povrchu Země. Je důsledkem konečné rychlosti světla. Mechanickou analogií je např. vhození tenisového míčku do otevřeného okna stojícího automobilu a automobilu, který se pohybuje určitou rychlostí nebo směrem, ve kterém držíme deštník za deště, pokud stojíme a směrem, pokud se dáme do pohybu.

¹⁵ Zdroj [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Astronomy_and_Cosmology/TextMaps/Map%3A_Celestial_Mechanics_\(Tatum\)/6%3A_The_Celestial_Sphere/6.07%3A_Precession](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Astronomy_and_Cosmology/TextMaps/Map%3A_Celestial_Mechanics_(Tatum)/6%3A_The_Celestial_Sphere/6.07%3A_Precession)

Velikost úhlu „odklonu“ α , je závislý pouze na rychlosti pohybu míčku a auta nebo chodce a deště a obdobně to platí pro pozorovatele stojícího na pohybující se Zemi a záření, které k nám přichází od nějakého astronomického objektu.

Jako *apex* označujeme okamžitý směr, ve kterém se Země pohybuje. Velikost rychlosti pohybu Země je přibližně 30 km/s. Pokud chceme, aby se objekt dostal do středu zorného pole dalekohledu, je nutno jej sklonit k apexu právě o úhel α , který je závislý na rychlosti pohybu Země v , rychlosti světla c a úhlu β , což je úhlová vzdálenost směru k objektu od směru k apexu.



Obrázek 16: Aberace jako důsledek konečné rychlosti šíření elektromagnetického záření. Podrobnější vysvětlení v textu. ¹⁶

Je zřejmé, že maximální hodnotu bude mít aberace pro hodnotu $\beta = 90^\circ$, protože platí vztah: $\tan \alpha = \frac{v}{c} \sin \beta$.

Pokud dále uvážíme, že $v/c \cong 10^{-4}$, je možné rovnici upravit do tvaru $\alpha = 20,47'' \sin \beta$, kde hodnota $20,47''$ je maximální velikost aberace. To je poměrně velký úhel a tak není bez zajímavosti, že tuto tzv. *roční aberaci* objevil Bradley (1727) při svých systematických měřeních, kterými chtěl určit *roční paralaxu* hvězd.

Také vlastní rotace Země kolem své osy má za následek obdobný jev – *denní aberaci*, jež dosahuje maximální hodnoty pro pozorovatele na rovníku, ale je řádově menší, přibližně $0,3''$.

¹⁶ Zdroj https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stellar_aberration.svg

3.4 Refrakce

Dalším jevem, který ovlivňuje veškerá astronomická pozorování prováděná ze zemského povrchu, je lom světla v zemské atmosféře. Pro lom světla na rozhraní dvou prostředí platí známý vztah:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_1}{n_2},$$

kde α_1 a α_2 jsou úhly v různých prostředích a n_1 a n_2 jsou odpovídající indexy lomu.

Pro průchod elektromagnetického záření atmosférou platí, že na něj lze pohlížet jako na průchod vícevrstevným prostředím, kdy na každém přechodu dochází k lámání světla směrem ke kolmici, protože hustota atmosféry se směrem k povrchu Země zvyšuje. Tento jev bývá označován jako *astronomická refrakce*.

Maximální hodnotu má refrakce u obzoru, minimálně se projevuje v zenitu. Jestliže označíme pozorovanou zenitovou vzdálenost objektu Z , pak její „skutečná“ hodnota bude $Z_0 = Z + R$, kde R je úhel refrakce.

Platí vztah odvozený ze zákona lomu

$$\sin(Z + R) = n \cdot \sin Z,$$

který pro malá R můžeme upravit do podoby:

$$\sin Z \cos R + \cos Z \sin R = n \cdot \sin Z,$$

kde navíc můžeme položit $\cos R = 1$ a $\sin R = R$, čili pak bude platit vztah

$$R = (n - 1) \tan Z.$$

Pro normální atmosférický tlak a $T = 0^\circ \text{C}$ je hodnota indexu lomu vzduchu $n = 1,000293$ a pouhá shoda okolností vedla k tomu, že hodnota $n - 1 = 0,000293$ je číselně rovna hodnotě jedné úhlové minuty vyjádřené v radiánech, což umožňuje pro malé úhly napsat vztah jako $\tan Z = R$, kde úhel R je v obloukových minutách, takže například pro hodnotu $Z = 45^\circ$ je úhel refrakce $R = 1'$.

Pro astronomická pozorování je dobré si uvědomit, že jev refrakce uspíší východ a opozdí západ objektů až o několik minut. Protože hodnota refrakčního úhlu závisí na indexu lomu a ten je funkcí vlnové délky, je také úhel refrakce funkcí vlnové délky procházejícího záření. To znamená, že „červená“ část spektra je ovlivněna méně než „modrá“. Astronomická refrakce má také vliv na tvar slunečního nebo měsíčního kotouče při jejich východu nad obzor nebo při jejich západu.

Tabulka hodnot refrakčního úhlu:

Zenitová vzdálenost ($90^\circ - \delta$) [$^\circ$]	Hodnota refrakce [$'$]
0	0,0
10	0,2
20	0,4
30	0,5
40	0,8
50	1,1
60	1,7
70	2,6
80	5,3
85	9,9
90	34,4

Hodnoty v tabulce jsou platné pro atmosférický tlak $p = 1,013 \cdot 10^5$ Pa, nadmořskou výšku 0 m n. m. a teplotu $T = 0^\circ$ C.



SHRNUTÍ KAPITOLY

V kapitole jsou uvedeny některé základní vlastnosti Země jako planety, definice různých typů zeměpisných souřadnic a fyzikální popis zemské rotace. Kromě výpočtu dohlednosti jsou zde uvedeny také rozdíly mezi souřadnicemi geocentrickými, geodetickými a astronomickými. Zvláštní pozornost je věnována popisu tvaru Země a její rotace.

Dále jsou podrobněji rozebrány hlavní jevy, které mají vliv na určení polohy astronomických těles, pokud tato jsou pozorována ze stanoviště na povrchu Země – tedy vliv precese, nutace, konečné rychlosti světla a atmosférické refrakce.



KONTROLNÍ OTÁZKY

1. Uveďte vztah pro výpočet dohlednosti pro pozorovatele na povrchu Země.
2. Jaký je rozdíl při popisu polohy pozorovatele na povrchu Země mezi souřadnicemi geocentrickými, geodetickými a astronomickými?
3. Uveďte hlavní vlivy, které způsobují nepravidelnost zemské rotace.
4. Odvoďte vliv precesního pohybu zemské osy na hodnotu rovníkových souřadnic astronomických objektů.
5. Vysvětlete jev nutace a jeho příčiny.

6. Co je to aberace? Uveďte výpočetní vztah pro hodnotu roční aberace.
 7. Vysvětlete pojem astronomické refrakce a uveďte vztah pro její výpočet.
-

CVIČENÍ



V rámci cvičení se předpokládá samostatné řešení příkladů, které jsou obsaženy ve sbírkách astronomických příkladů uvedených mezi doporučenými publikacemi.

4 FYZIKA SLUNEČNÍ SOUSTAVY, FAKTOGRAFIE SLUNEČNÍ SOUSTAVY



RYCHLÝ NÁHLED KAPITOLY

Sluneční soustava je naše nejbližší vesmírné okolí. Můžeme ji volně vymezit jako prostor, ve kterém převládá gravitační působení centrální hvězdy, Slunce, nad gravitačními vlivy okolních hvězd. Je to také zatím nejlépe prozkoumaná část vesmíru a jediná, kde byly prováděny i výzkumy „in situ“ čili na místě samém.

A tak je kapitola rozdělena do dvou částí, ta první shrnuje obecné vlastnosti naší planetární soustavy a v té druhé je soustředěn stručný encyklopedický přehled základních údajů, které se nám podařilo o tělesech ve Sluneční soustavě zjistit.



CÍLE KAPITOLY

- Pochopit a umět používat zákony popisující pohyb těles ve Sluneční soustavě
 - Získat přehled o jednotlivých druzích těles ve Sluneční soustavě
 - Naučit se základní fakta o Měsíci, planetách a dalších tělesech Sluneční soustavy
-



ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU

3 hodiny



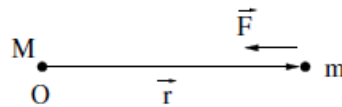
KLÍČOVÁ SLOVA KAPITOLY

Planetární soustava, centrální hvězda, Keplerovy zákony, planeta, trpasličí planeta, přirozený satelit, planetka, kometa.

4.1 Fyzika sluneční soustavy

Ve vesmíru je na velkých měřítcích patrně nejvýznamnější interakcí gravitace. Ta je zodpovědná za stabilitu Sluneční soustavy, Galaxie a vyšších galaktických struktur. Je poměrně dobře popsána Newtonovým gravitačním zákonem.

Mějme dva hmotné body o hmotnostech M a m . Pro jednoduchost budeme všechna astronomická tělesa považovat za hmotné body. Označme polohovým vektorem \vec{r} polohu hmotného bodu m vzhledem k poloze hmotného bodu M , jak je znázorněno na obrázku:



Pak síla, kterou působí na těleso m hmotný bod M je dána vztahem

$$\vec{F} = -G \frac{Mm\hat{r}}{r^2},$$

kde \hat{r} je jednotkový vektor podél \vec{r} . Záporné znaménko ve vztahu znamená „přitažlivou sílu“, tedy její vektor je orientován směrem k M . Pro většinu astrofyzikálních aplikací, pokud jsou rychlosti mnohem menší, než je rychlost světla, je tento Newtonův gravitační zákon dostatečně přesný. Gravitační síla má charakter tzv. centrální síly, což znamená, že její velikost je funkcí jen vzdálenosti r a směr je podél vektoru \vec{r} .

Ještě si můžeme definovat pojem gravitačního pole. Je to vlastně gravitační síla působící na hmotný bod jednotkové hmotnosti v každém bodě tohoto pole. Je-li tedy $\vec{g}(\vec{r})$ gravitační pole odpovídající poloze \vec{r} , pak síla působící na hmotný bod m v tomto místě je

$$\vec{F} = \vec{g}m.$$

Gravitační pole hmotného bodu M v místě \vec{r} je rovno

$$\vec{g} = G \frac{M\hat{r}}{r^2}.$$

4.1.1 PROBLÉM DVOU TĚLES

Pokud se zaměříme na vzájemné gravitační působení dvou těles a budeme chtít znát jejich dráhy, zjistíme, že tento problém je možné řešit analyticky. V případě, že jeden hmotný bod má mnohem větší hmotnost než druhý, je možné předpokládat, že těžké těleso je v klidu a stačí nalézt popis pohybu lehčího tělesa. Takovou podmínku velmi dobře splňují dvojice Slunce-Země nebo Země-Měsíc.

Označme si menší hmotnost m a větší M . Jak je zřejmé z náčrtku, gravitační síla působící na m směřuje k bodu O . Takže točivý moment působící na m vzhledem k počátku je nulový a jeho moment hybnosti zůstává konstantní. Moment hybnosti tělesa o hmotnosti m lze popsat vztahem $\vec{L} = m\vec{r} \times \vec{v}$, kde \vec{v} je jeho rychlost. Protože vektor momentu hybnosti \vec{L} je konstantní a kolmý k \vec{r} , tak vektor \vec{r} se musí nacházet v rovině a tedy i celá trajektorie hmotného bodu m leží v rovině. Tvar trajektorie pak závisí na hodnotě celkové energie hmotného bodu m , kterou lze vyjádřit jako $E = K + U = 1/2 m v^2 + U$, kde K je kinetická energie tělesa m , $v = |\vec{v}|$ velikost jeho rychlosti a U jeho potenciál energie. Hodnotu potenciální energie můžeme vyjádřit jako $U = -\frac{\alpha}{r}$, kde $\alpha = GMm$.

K analýze trajektorie v rovně dráhy je výhodnější použít polární souřadnice (r, θ) . Vektor rychlosti lze pak napsat jako $\vec{v} = \dot{r}\hat{r} + r\dot{\theta}\hat{\theta}$ a tedy kinetická energie K je pak

$$K = \frac{1}{2}m\dot{r}^2 + \frac{1}{2}(r\dot{\theta})^2 = \frac{1}{2}m\dot{r}^2 + \frac{L^2}{2mr^2},$$

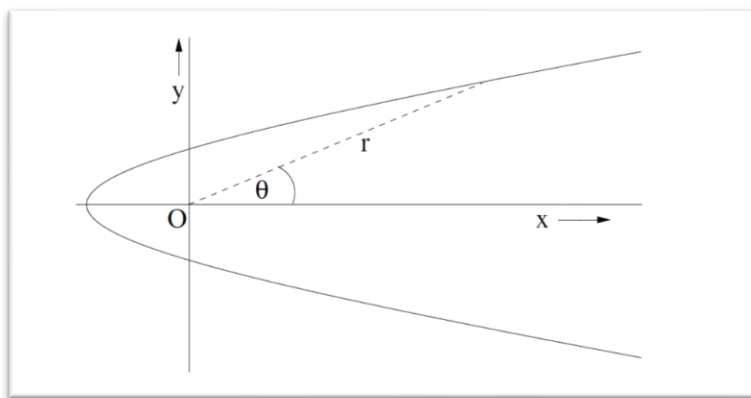
kde $L = |\vec{L}|$ je velikost vektoru momentu hybnosti.

Mohou nastat tři různé případy:

1. Pro $E > 0$: v tomto případě není těleso m gravitačně vázáno k tělesu M . Trajektorií pohybu hmotného bodu m pak bude jedna větev hyperboly. V rovinných polárních souřadnicích lze vyjádřit řešení jako

$$r = \frac{r_0}{1 - \epsilon \cos \theta},$$

kde $r_0 = L^2/(\alpha m)$ a $\epsilon = \sqrt{1 + \frac{2EL^2}{\alpha^2 m}} > 1$.



Obrázek 17: Hyperbolická trajektorie pohybu tělesa.¹⁷

¹⁷ Zdroj: Pankaj Jain, An Introduction to Astronomy and Astrophysics, ISBN 1439885907

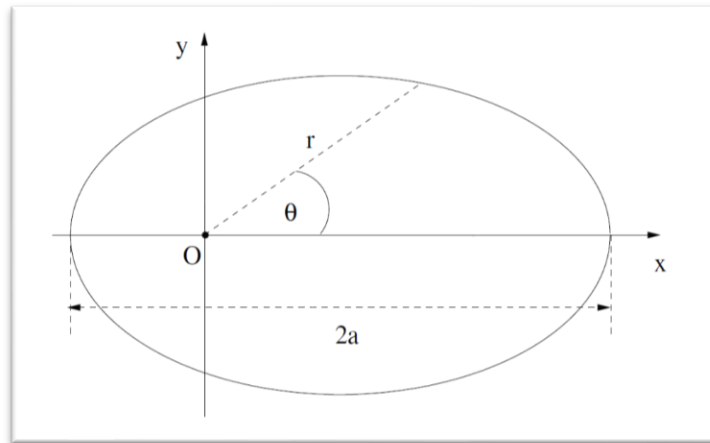
2. $E < 0$: v takovém případě je hmotný bod m trvale gravitačně vázán k tělesu M . Trajektorie jeho pohybu je elipsa, kterou je možné popsat stejnou rovnicí jako v prvním případě, jen $E < 0$ a pak tedy $0 \leq \epsilon < 1$. Pohyb tělesa je periodický s periodou T danou vztahem

$$T^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{(M+m)G} \approx \frac{4\pi^2 a^3}{MG},$$

kde a je velká poloosa elipsy. Pro hodnotu $\theta = 0$ je maximální vzdálenost mezi oběma tělesy rovna $r_{max} = r_0/(1 - \epsilon)$ a pro $\theta = \pi$ bude jejich vzdálenost minimální $r_{min} = r_0/(1 + \epsilon)$. Rychlost hmotného bodu m závisí na čase a je nejmenší při maximální vzdálenosti a naopak. Parametr excentricity eliptické dráhy je možné vyjádřit jako

$$\epsilon = \frac{r_{max} - r_{min}}{r_{max} + r_{min}}.$$

Pro hodnoty excentricity blíží se 1 je pak elipsa velmi protáhlá, pro hodnotu 0 je dráha kruhová.



Obrázek 18: Eliptická trajektorie pohybu tělesa.¹⁸

3. $E = 0$: hmotný bod m je právě na hranici mezi gravitačně vázaným a nevázaným případem. Trajektorií jeho pohybu je parabola, excentricita $\epsilon = 1$ a $r = \frac{r_0}{1 - \cos \theta}$. Rychlost částice ve vzdálenosti r , \vec{v}_E , označujeme jako únikovou rychlost, protože částice může uniknout gravitačnímu působení tělesa M , pokud bude jeho rychlost $v \geq \vec{v}_E$. Pro její hodnotu platí vztah

$$v_E = \sqrt{\frac{2GM}{r}}.$$

¹⁸ Zdroj: Pankaj Jain, An Introduction to Astronomy and Astrophysics, ISBN 1439885907

4.1.2 APLIKACE NA SLUNEČNÍ SOUSTAVU

Výsledky předchozí podkapitoly lze přibližně aplikovat také na pohyb těles ve Sluneční soustavě. Popisují trajektorii všech planet poměrně přesně. Při větších požadavcích na přesnost výsledků jsou však nutné korekce, protože Slunce ani planety nejsou hmotnými body a také soustava obsahuje více než pouhá dvě tělesa.



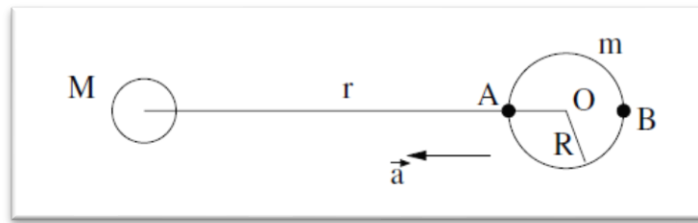
K ZAPAMATOVÁNÍ

Zákony popisující pohyb planet ve Sluneční soustavě formuloval jako první Kepler na počátku sedmnáctého století. Při jejich sestavení vycházel z přesných pozorování poloh planet, zejména Marsu, která systematicky prováděl Tycho Brahe. Keplerovy empirické zákony mohou být formulovány takto:

1. Každá planeta se pohybuje po eliptické dráze kolem Slunce, které se nachází v jednom z jejích ohnisek.
2. Plocha „vytvořená“ průvodičem planety za shodný časový interval je konstantní.
3. Druhé mocniny dob oběhu (period) T jsou úměrné třetí mocninám velikostí velkých poloos a , tj. $T^2 = Ca^3$. Konstanta úměrnosti C je stejná pro všechny planety a její hodnota je přibližně $C = 4\pi/(MG)$.

4.1.3 SLAPOVÉ SÍLY A ROCHEHO MEZ

V předchozích podkapitolách jsme řešili gravitační působení mezi dvěma hmotnými body. Situace se však stane složitější, vezmeme-li v úvahu reálné rozměry těles. Potom je gravitační síla odlišná pro každý bod daného tělesa. Může tedy deformovat jeho tvar nebo v některých případech ho může i „roztrhnout“. Tyto rozdíly ve velikosti gravitační síly například vytvářejí na Zemi příliv a odliv a ve své obecné podobě se označují jako *slapové síly*.



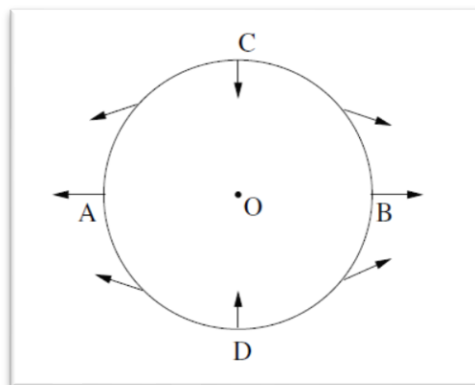
Obrázek 19: Homogenní sférické těleso o hmotnosti m v gravitačním poli jiného tělesa o hmotnosti M . Poloměr tělesa m je označen jako R . Na různé části tělesa m , např. na dva hmotné body v místech A a B , působí slapové síly. Šipka označuje směr vektoru zrychlení \vec{a} těžiště tělesa m .¹⁹

Uvažujme o slapovém působení na homogenní kouli o hmotnosti m a poloměru R , která je umístěna ve vzdálenosti r od homogenní koule o hmotnosti M . Dále budeme předpokládat, že umístíme hmotný bod μ do polohy označené jako A , jak je znázorněno na obrázku. Rozdíl ve velikosti gravitačního pole tělesa M mezi bodem A a středem O je roven

$$\Delta g = \frac{GM}{(r-R)^2} - \frac{GM}{r^2} \approx \frac{2GMR}{r^3} + \dots,$$

kde jsme po úpravách vztah aproximovali pouze prvním členem rozvoje. Vektor $\Delta \vec{g}$ je orientován směrem k tělesu M . Hmotný bod v poloze A bude mít tendenci se od tělesa m vzdálit. Podobně také částice umístěná v bodě B se bude snažit vzdálit od tělesa m .

Směr vektoru $\Delta \vec{g}$ je na několika místech tělesa m znázorněn na obrázku. Pouze v bodech C a D směřuje vektor ke středu O . Těleso je tedy slapovými silami namáháno v různých směrech a také velikost vektoru $\Delta \vec{g}$ závisí na poloze.



Obrázek 20: Směr slapové síly v různých bodech na homogenním sférickém tělese m , které se nachází v gravitačním poli hmotnějšího tělesa M .²⁰

¹⁹ Zdroj: Pankaj Jain, An Introduction to Astronomy and Astrophysics, ISBN 1439885907

²⁰ Zdroj: Pankaj Jain, An Introduction to Astronomy and Astrophysics, ISBN 1439885907

Změna velikosti a směru vektoru $\Delta\vec{g}$ v závislosti na poloze je například příčinou jevu přílivu a odlivu zemských oceánů. Hlavní vliv má slapové působení Měsíce a Slunce. Pro jednoduchost nyní uvažujeme pouze o slapovém působení Slunce (M) na Zemi (m). Představme si malý objem vody o hmotnosti μ umístěný blízko povrchu oceánu. Změny gravitačního působení Slunce na Zemi zanedbejme. V takové aproximaci se pak všechny body na Zemi zrychlují směrem ke Slunci stejně. Proto tlak způsobený oceánem vyrovnává gravitační tah Země na μ a není ovlivněn gravitačním polem Slunce. Kvůli odchýlkám v gravitačním poli Slunce, závisí tlak oceánu na poloze na povrchu Země, což způsobuje, že voda v určitém bodě stoupá a jinde klesá. To vede ke vzniku přílivu a odlivu. Vliv zemské rotace zanedbáme.

Předpokládejme nyní, že se těleso m se pohybuje přímo k M . V určité vzdálenosti by slapové síly mohly být tak velké, že by mohly narušit integritu tělesa m . Minimální vzdálenost, na kterou se těleso m může blížit k tělesu M , aniž by došlo k jeho destrukci, se nazývá *Rocheho mez*. Odvodíme si vztah pro tuto vzdálenost za předpokladu, že těleso m se pohybuje přímo směrem k tělesu M a nerotuje kolem vlastní osy.

Uvažujeme hmotný bod μ umístěný v poloze A a určíme vzdálenost r_{min} , při které opustí povrch tělesa m . Pro jednoduchost také předpokládáme, že těleso M je velmi hmotné a nachází se v klidu. Všechny body na m mají zrychlení \vec{a} , které se rovná zrychlení těžiště. Z Newtonova zákona získáme vztah

$$a = \frac{GM}{r^2},$$

kde r je vzdálenost mezi středy obou těles. Směr zrychlení je přímo směrem k M . Rovnice pohybu pro element μ může být ve tvaru

$$\frac{GM\mu}{(r-R)^2} + F = \mu a,$$

kde F představuje sílu vyvíjenou tělesem m na element μ . S využitím předchozího vztahu obdržíme rovnici

$$F = GM\mu \frac{2R}{r^3} + \dots$$

V limitním případě, kdy element opouští povrch tělesa m , se síla F rovná gravitační přitažlivosti tělesa m a tak můžeme napsat rovnici

$$\frac{Gm\mu}{R^2} = GM\mu \frac{2R}{r^3},$$

kterou upravíme do tvaru $r^3 = 2R^3 \frac{M}{m}$.

Jedná se o minimální hodnotu r , pro kterou element μ neopustí povrch m . Pokud budou mít tělesa m a M hustoty ρ , respektive ρ_M , a poloměr tělesa M bude R_M , můžeme vztah napsat také v této podobě:

$$r_{min} = \left(\frac{2\rho_M}{\rho}\right)^{1/3} R_M.$$

Právě tato mezní hodnota vzdálenosti r se nazývá Rocheho mez. V případě těles, jejichž součástí jsou také tekutiny, je situace složitější. Když se objekt přibližuje k jinému hmotnému tělesu, jeho povrch se začíná deformovat ještě před dosažením Rocheho meze:

$$r_{min} = 2,44 \left(\frac{\rho_M}{\rho}\right)^{1/3} R_M.$$

4.2 Sluneční soustava

Naše planetární soustava, Sluneční soustava, se skládá z jediné hvězdy – Slunce – a mnoha menších objektů: planet, trpasličích planet, planetek, měsíců a prstenců planet, komet a meziplanetárního plynu a prachu. Podle všech dosud zjištěných informací usuzujeme, že většina těchto objektů vznikla spolu se Sluncem asi před 4,5 miliardami let. Celá soustava vznikla z obrovského a velmi rozsáhlého mračna plynu a prachu jeho smršťováním. Centrální část se stala Sluncem a malá část materiálu ve vnějších částech nakonec vytvořila další tělesa.

Během minulého půlstoletí jsme se díky kosmonautice o Sluneční soustavě dozvěděli obrovské množství informací. Planetární astronomie a srovnávací geologie využily tuto výhodu, že mohou provádět také výzkum „in situ“, tedy na místě samém. A tak vědecké programy spojené s lety sond (např. Voyager, Pioneer, Cassini, Curiosity, Pathfinder nebo New Horizons) prozkoumaly všechny planety, několik trpasličích planet, stovky přirozených satelitů, čtyři soustavy prstenců, více než desítku asteroidů a několik komet. Lidé samotní se pak vydali v programu Apollo prozkoumat Měsíc.

4.2.1 PŘEHLED TĚLES VE SLUNEČNÍ SOUSTAVĚ

Jedinou hvězdou naší planetární soustavy je Slunce. Jeho zářivý výkon je větší než u 80 % hvězd v naší Galaxii a je nejhmotnějším tělesem Sluneční soustavy. Má sférický tvar a průměr přibližně 1,4 milionu kilometrů. Vlivem vysoké teploty je většina slunečního materiálu ve stavu plazmatu, tedy horkého ionizovaného plynu.

Relativní hmotnost jednotlivých složek Sluneční soustavy:

Objekt	Procentuální podíl z celkové hmotnosti sluneční soustavy
Slunce	99,80
Jupiter	0,10
kometry	0,0005 – 0,03 (odhad)

všechny ostatní planety a trpasličí planety	0,04
měsíce a prstence	0,00005
asteroidy	0,000002 (odhad)
meziplanetární prach	0,0000001 (odhad)

Z přehledu je zřejmé, že většina hmotnosti planet je ve skutečnosti soustředěna do největší z nich, Jupiteru, který je hmotnější než všechny ostatní planety dohromady.

Celkem známe osm planet – Merkur, Venuše, Mars, Jupiter, Saturn, Uran a Neptun. Všechny osm planet obíhá kolem Slunce stejným směrem. Kromě těchto planet byla objevena menší tělesa za Neptunem, která se nazývají transneptunická tělesa (TNO). Největší z nich jsou klasifikována také jako trpasličí planety a celkem bylo zatím objeveno asi dva tisíce TNO.

Každá planeta nebo trpasličí planeta také rotuje kolem své osy a ve většině případů je směr rotace shodný se směrem oběhu kolem Slunce. Výjimkou je Venuše, která rotuje velmi pomalu v retrográdním směru. Také Uran a Pluto mají neobvyklou polohu rotačních os, které se nacházejí téměř v rovinách jejich drah. Směr rotace trpasličích planet Eris, Haumea a Makemake zatím neznáme.

Čtyři planety, které se nacházejí Slunci nejbližší (Merkur, Venuše, Země a Mars) si jsou svými vlastnostmi podobné a označujeme je jako *planety typu Země*. Někdy je také Měsíc považován za člena této skupiny, ale jedná se o přirozený satelit, byť má řadu vlastností podobných jako planety typu Země. Všechny mají pevný povrch, který má reliéf vytvářený „geologickými“ procesy a skládá se z útvarů jako jsou krátery, hory a sopky. Všechny čtyři jsou těmi menšími tělesy z planet Sluneční soustavy a jsou tvořeny převážně z hornin a kovů.

Zbývající čtyři planety (Jupiter, Saturn, Uran a Neptun) jsou mnohem větší a hmotnější. Jsou složeny převážně z lehčích prvků, kapalin a plynů. Říkáme jim *planety typu Jupiteru* nebo také *obří planety*. Tyto planety nemají žádný pevný povrch, na kterém by bylo možné přistát. Jedná se spíše o obrovské plynné koule s mnohem menšími a hustými jádry.

4.2.2 MENŠÍ TĚLESA SLUNEČNÍ SOUSTAVY

Většina planet je doprovázena jedním nebo více přirozenými satelity (měsíci), pouze Merkur a Venuše žádný nemají. Zatím bylo objeveno více než 200 měsíců, které obíhají planety a trpasličí planety (viz https://en.wikipedia.org/wiki/Natural_satellite). Největší měsíce jsou stejně velké jako malé planety a neméně zajímavé.

Každá z obřích planet má také svou soustavu prstenců, jež jsou tvořeny nesmírným množstvím malých těles, jejichž velikost je od několika desítek metrů až po pouhá zrnka

prachu. Nejvýraznější jsou prstence Saturnu, ale všechny čtyři systémy prstenců jsou pro vědce zajímavé také z hlediska jejich složité struktury a dynamiky, ve které hrají roli i přirozené satelity obřích planet.

Další početnou skupinou malých těles jsou planetky, skalní útvary, které obíhají kolem Slunce jako „miniplanety“, většinou v oblasti mezi Marsem a Jupiterem. Většina planetek je vlastně pozůstatek prvotní populace těles, která existovala dříve, než se vytvořily planety.

Další velkou skupinou těles jsou *komety*. Jejich jádra o rozměrech až desítek kilometrů jsou tvořena směsí ledu, oxidu uhličitého a dalších příměsí. Jsou to rovněž pozůstatky od dob geneze Sluneční soustavy a většina z nich se nachází ve sférické oblasti nazývané *Oortovo mračno* více než půl světelného roku od Slunce.

Prostor mezi všemi těmito tělesy Sluneční soustavy není zcela prázdný, nachází se v něm velké množství malých tělísek, prachových zrn a molekul plynu (*meziplanetární hmota*). Když se tyto částice srazí se Zemí a vstoupí do zemské atmosféry, což se děje prakticky nepřetržitě, tak se zahřejí na vysokou teplotu a většina z nich se vypaří, stane se součástí naší atmosféry. Tento jev, světelný záblesk, je pozorovatelný v nočních hodinách a označujeme jej jako *meteor*. Pokud však dojde ke srážce s větším kusem skalnatého nebo kovového materiálu, jeho zbytek může dopadnout na zemský povrch jako tzv. *meteorit*.

4.2.3 SLOŽENÍ A STRUKTURA PLANET

OBŘÍ PLANETY

Dvě největší planety, Jupiter a Saturn, mají téměř stejné chemické složení jako Slunce. Jsou složeny převážně z vodíku a hélia, přičemž 75% jejich hmotnosti tvoří vodík a 25% helia. V pozemských podmínkách jsou oba prvky v plynném skupenství, takže Jupiter i Saturn jsou někdy nazývány plynnými planetami. Jupiter a Saturn jsou ale tak velká tělesa, že plyn je vystaven takovému tlaku, že se nachází ve skupenství kapalném. Jupiter i Saturn mají jádra složená z těžších hornin, kovu a ledu, což vyplývá z podrobných měření gravitačního pole poblíž každé z těchto obřích planet.

Planety Uran a Neptun jsou mnohem menší než Jupiter a Saturn, ale i každá z těchto planet má pevné jádro. Mají mnohem méně rozsáhlé atmosféry v poměru k jejich jádrům, protože celkové množství vodíku a hélia je u nich mnohem menší.

PLANETY TYPU ZEMĚ

Planety zemského typu se od těch obřích liší nejen velikostí, ale i svým složením. Jsou tvořeny zejména křemičitany a kovy, nejčastěji železem. Planeta Merkur má největší podíl kovů. Země, Venuše i Mars mají zhruba podobné složení, kdy asi jednu třetinu jejich hmotnosti tvoří sloučeniny železa a niklu, případně železa a síry, a dvě třetiny jsou křemičitany. Když se podíváme na vnitřní strukturu této skupiny planet, zjistíme, že nejhustší kovy jsou v samotných jádrech planet a lehčí křemičitany jsou pod povrchem. Z toho je možné usuzovat, že i když planety typu Země jsou dnes pevné, musely být kdysi dostatečně horké, aby se roztavily. Jedině tak mohl proběhnout proces diferenciacce, kterým gravitace uspořádala vnitřek planety do vrstev různého složení a hustot. Těžší prvky klesly a vytvořily hustší jádro, zatímco nejllehčí minerály vytvořily obal jádra a také povrchovou kůru. A když se planeta později ochladila, zůstala taková struktura zachována. Aby mohl proces diferenciacce proběhnout, musí být planeta zahřátá na teplotu tání hornin, která je vyšší než 1300 K.

MĚSÍCE, PLANETKY A KOMETY

Svým složením a strukturou je náš Měsíc podobný planetám zemského typu, ale většina přirozených satelitů obřích planet má složení podobné jádrům svých mateřských planet. Tři největší měsíce (Ganymed, Callisto a Titan) jsou z 50 % tvořeny ledem a z 50 % horninami a kovy. Většina těchto těles se během formování diferencovala a dnes má pevné jádro z hornin a kovů obalené silnými vrstvami tvrdého ledu.

Většina planetek, kometárních jader, stejně jako nejmenší přirozené satelity, se pravděpodobně nikdy nezahřály na teplotu tání. Přesto největší planetky, jako je například Vesta, jsou diferencované a některé jsou fragmenty nebo slepenci materiálu z diferencovaných těles. Protože většina planetek a komet si zachovala své původní složení, představují původní materiál pocházející z doby vzniku Sluneční soustavy. Pro vědce tak představují velmi cenné „materiálové konzervy“, které pomohou rekonstruovat dávné procesy, jejichž stopy byly u diferencovaných těles zcela smazány.

4.2.4 TEPLoty

Je logické, že platí obecné pravidlo, čím vzdálenější je nějaké těleso od Slunce, tím chladnější je její povrch. Planety jsou ohřívány energií přicházející od Slunce a která klesá se čtvercem vzdálenosti. Merkur má teplotu povrchu od 280 °C do 430 °C na jeho osvětlené straně, zatímco povrchová teplota na Plutu je přibližně -220 °C!

Kromě vzdálenosti od Slunce je povrchová teplota planet ovlivněna její atmosférou. Bez plynné atmosféry by například byly oceány na Zemi trvale zamrzlé. Naopak, kdyby měl Mars v minulosti hustší atmosféru, mohl mít tehdy mnohem mírnější klima než v současnosti. Planeta Venuše je ještě extrémnějším příkladem, kdy její hustá atmosféra oxidu uhličitého působí jako izolace, což snižuje únik tepla a vede k vyšším teplotám, než

jsou teploty na povrchu Merkuru. Naše Země je však jedinou známou planetou, kde povrchové teploty obecně leží mezi bodem mrazu a bodem varu vody.

4.2.5 „GEOLOGICKÉ“ PROCESY

Povrchy i kůry všech planet zemského typu, stejně jako větších přirozených satelitů, byly v průběhu vývoje Sluneční soustavy výrazně přetvořeny jak vnitřními, tak vnějšími silami. Dopady jiných těles na nich vytvořily impaktní krátery všech velikostí. Takové bombardování bylo mnohem častější v rané fázi existence naší planetární soustavy, ale s menší intenzitou trvá dodnes. Zároveň „vnitřní síly“ na planetách typu Země deformovaly jejich kůru, vznikla rozsáhlá pohoří a také sopečná činnost. Takové změny obecně označujeme jako *geologickou aktivitu*, přestože máme na mysli obdobné procesy nejen na Zemi (geo-), ale i na dalších planetách. Planety Země a Venuše měly patrně největší geologickou aktivitu, ale některé přirozené satelity obřích planet jsou také překvapivě aktivní. Náš vlastní Měsíc není geologicky aktivní již několik miliard let.

Geologická aktivita planet je důsledkem vysokých teplot uvnitř těchto těles. Vulkanická činnost a procesy vrásnění jsou poháněny teplem unikajícím z centrálních oblastí planet. Každá z planet byla v době svého vzniku horká a toto prvotní teplo zpočátku vytvářelo rozsáhlou sopečnou činnost, dokonce i na našem Měsíci. Ale menší tělesa, jako je Měsíc, brzy vychladla. A celá historie sopečné činnosti na pozemských planetách z velké části odpovídá této jednoduché teorii. Nejen na Měsíci, ale také na Merkuru sopečná činnost skončila přibližně ve stejné době. Planeta Mars představuje střední případ. Byl geologicky aktivní mnohem déle než Měsíc, ale kratší dobu než Země. Země i Venuše, největší planety zemského typu, mají roztavená jádra ještě i dnes, tedy asi 4,5 miliardy let po jejich vzniku.

4.3 Malá encyklopedie Sluneční soustavy

4.3.1 MERKUR

Merkur byl v minulosti terčem nesmírného množství meteoritů. Malé srážky způsobily jednoduché kilometrové krátery ve tvaru mísy. Větší nárazy způsobily talířovité krátery s malým vrcholkem vyčnívajícím uprostřed. Spolu s nárazy vznikala i pohoří. Jednou z posledních katastrof v dějinách Merkuru byla pravděpodobně srážka s planetkou, která měla rozměry kolem 100 kilometrů. Způsobila obrovský kráter nazvaný pánev Caloris. Náraz prorazil povrch a vytvořil kruhové pásmo horských hřbetů. Nemá atmosféru, která by ovlivňovala teplotu jeho povrchu. Ve dne je planeta vystavena spalujícímu žáru slunečních paprsků a například v pánvi Caloris, která leží poblíž Merkurova rovníku, vystoupí teplota nad 400 °C. V noci, když se povrch od Slunce odvrátí, klesne teplota 180 °C pod nulu.

Průměrná vzdálenost od Slunce: 0,38 au
Délka dne (jedna otočka kolem osy): 59 pozemských dní
Délka roku (jeden oběh kolem Slunce): 88 pozemských dní
Průměr: 4878 km
Hmotnost: 18 krát menší než hmotnost Země
Gravitace: 40 % pozemské gravitace, při hmotnosti 80 kg byste na Merkuru měli 32 kg
Povrchová teplota: -185 °C až 400 °C
Atmosféra: velmi řídká
Charakteristika povrchu: povrch velmi podobný měsíčnímu, nepřítomnost husté atmosféry umožňuje neustálé přímé bombardování meziplanetární látkou, velmi velké množství kráterů
Přirozené satelity (měsíce): nemá
Prstence: nemá

4.3.2 VENUŠE

Venuše je Zemi nejbližší planetou. Je přibližně stejně velká jako Země a má hustou atmosféru. To vedlo k představě, že by se mohla podobat Zemi i svým povrchem. Bujná fantazie lidí osídlila krajinu na Venuši dinosaury prohánějícími se bažinami a hustým porostem přesliček. Tyto představy nemohly být po staletí ani potvrzeny ani vyvráceny, protože ještě donedávna jsme neměli prostředky, kterými bychom pod hustou Venušinu atmosféru nahlédli. Velké změny nastaly, když vědci začali používat k výzkumu Venuše radar. Radarové vlny totiž bez problémů proniknou i tou nejhustší atmosférou. Pak přišla éra kosmických sond a všechny dosavadní představy o Venuši padly. Nebylo objeveno nic, co by připomínalo život. Dokonce ani voda tam nebyla nalezena. Povrch Venuše je suché a horké „peklo“. Teplotou dosahující k 500 °C předčí i teploty na denní straně Merkura. Povrch je z 85 % tvořen různými sopečnými útvary.

Průměrná vzdálenost od Slunce: 0,72 au
Délka dne (jedna otočka kolem osy): 243 pozemských dní, rotace má opačnou orientaci než je směr oběhu kolem Slunce, tzv. retrográdní rotace
Délka roku (jeden oběh kolem Slunce): 225 pozemských dní
Průměr: 12 100 km
Hmotnost: 80 % hmotnosti Země
Gravitace: 90 % pozemské, při hmotnosti 80 kg byste na Venuši měli 72 kg
Povrchová teplota: 500 °C
Atmosféra: extrémně hustá, pro světlo téměř neprůhledná
Charakteristika povrchu: jednodesková tektonika, několik vyvýšených oblastí, dlouhá údolí, menší počet kráterů
Přirozené satelity (měsíce): nemá
Prstence: nemá

4.3.3 ZEMĚ

Průměrná vzdálenost od Slunce: 1 au

Délka dne (jedna otočka kolem osy): 1 pozemský den

Délka roku (jeden oběh kolem Slunce): 365,25 pozemských dní

Průměr: 12 756 km

Hmotnost: $6 \cdot 10^{24}$ kg (to je 6 bilionů bilionů tun!)

Povrchová teplota: 14 °C

Atmosféra: dusík, kyslík

Charakteristika povrchu: jediné těleso ve sluneční soustavě, kde průkazně existuje voda v kapalném skupenství, oceány tvoří cca 70 % povrchu, zemská kůra má vícedeskovou tektoniku

Přirozené satelity (měsíce): 1

Prstence: nemá

4.3.4 MARS

Mars byl kdysi také považován za obydlenou planetu. Takové představy o Marsu vzaly za své až v roce 1965. Tehdy kosmická sonda Mariner doletěla k Marsu a pořídila první zřetelné snímky planety. Fotografie ukazovaly pustou planinu bez života, rozrušenou jen krátery. O deset let později byl zkoumán dvojicí amerických sond Viking. Přistávací moduly nesly na své palubě biologickou laboratoř. Ani jeden z pokusů však existenci života nedokázal. Ani další sondy zatím nebyly úspěšné. Nejvyšší sopky se tyčí do závratné výšky 25 kilometrů nad okolní krajinu! V dávné minulosti bylo na Marsu ohromné množství vody – v řekách a v mělkých mořích. Kam se poděla? Vědci se domnívají, že voda je nyní zachycena převážně v ledu pod povrchem. Na severním a jižním pólu Marsu jsou ledové polární čepičky. Není to však led, který znáte ze Země. Zima na Marsu je velmi studená a při teplotách kolem -100 °C zmrzne nejen voda, ale i oxid uhličitý obsažený v atmosféře. Mars byl zřejmě v dávné minulosti vlhkou a teplou planetou. Možná, že tenkrát tam byly příznivé podmínky pro vznik života a třeba se někdy podaří najít jeho otisky alespoň ve formě fosilií.

Průměrná vzdálenost od Slunce: 1,52 au

Délka dne (jedna otočka kolem osy): 24 hodin 37 minut

Délka roku (jeden oběh kolem Slunce): 687 pozemských dní

Průměr: 6787 km

Hmotnost: 10 % hmotnosti Země

Gravitace: 40 % pozemské gravitace, při hmotnosti 80 kg byste na Marsu měli 32 kg

Povrchová teplota: -63 °C

Atmosféra: asi desetkrát řidší než na Zemi, oxid uhličitý

Charakteristika povrchu: velmi členitý, planiny, sopky, dlouhá údolí, vyschlá řečiště jako memento kdysi tekoucí vody, velký vliv větrné eroze

Přirozené satelity (měsíce): 2

Prstence: nemá

4.3.5 JUPITER

Jupiter je největší a nehmotnější planetou ve sluneční soustavě. Velmi rychle rotuje, otočí se kolem své osy jednou za pouhých 10 hodin! Při této rychlosti se planeta na rovníku vydouvá a dochází k rychlé rotaci svrchní atmosféry, kde se oblaka roztahují do pestře barevných pásů. Největším vírem je „velká červená skvrna“, která má průměr tří zeměkoulí. Tento obrovský vír pozorují hvězdáři už od poloviny 17. století. V hloubce kolem 1000 km zřejmě existuje oceán tekutého vodíku a pod hranicí 17 000 km je vodík tlakem „drcen“ tak, že se chová jako kov. Elektrické proudy tekoucí kovovým vodíkem vytvářejí kolem Jupitera silné magnetické pole. V nitru Jupitera je zřejmě malé železné jádro.

Průměrná vzdálenost od Slunce: 5,20 au

Délka dne (jedna otočka kolem osy): 10 hodin

Délka roku (jeden oběh kolem Slunce): 12 pozemských let

Průměr: rovníkový 142 984, přes póly 133 708

Hmotnost: 318 hmotností Země

Gravitace: 250 % pozemské gravitace, při hmotnosti 80 kg byste zde vážili 200 kg

Povrchová teplota: -153 °C

Atmosféra: vodík, helium, metan

Charakteristika povrchu: hustota látky roste plynule směrem ke středu planety, neexistuje zde rozdělení na atmosféru a pevné těleso, není možné mluvit o „povrchu planety“

Přirozené satelity (měsíce): 79

Prstence: 2

4.3.6 SATURN

Saturn je podobný Jupiteru. V jeho atmosféře můžeme rovněž sledovat tmavé a světlé pásy a dokonce i oválné skvrny. Jeho hustota je menší než hustota vody. Ani tato planeta nemá pod atmosférou žádný kamenitý povrch. Nitro Saturna bude velmi podobné Jupiteru. Nejnápadnější ozdobou Saturna jsou jeho prstence. Tisíce drobných prstýnků tvořených kousky hornin pokrytých ledem. Většina částic prstence má průměr kolem jednoho metru. Každý úlomek, každé zrníčko prstence spořádaně krouží kolem své mateřské planety. Prstence mají průměr 400 000 km, ale jejich tloušťka nepřesahuje desítky metrů!

Průměrná vzdálenost od Slunce: 9,58 au

Délka dne (jedna otočka kolem osy): 11 hodin

Délka roku (jeden oběh kolem Slunce): 29 pozemských let

Průměr: rovníkový 120 536 km, přes póly 108 728 km

Hmotnost: 95 hmotností Země

Gravitace: 110 % pozemské gravitace, při hmotnosti 80 kg byste na Saturnu měli 88 kg

Povrchová teplota: -185 °C

Atmosféra: vodík, helium, metan

Charakteristika povrchu: je to plynná planeta typu Jupitera, není možné hovořit o „povrchu“

Přirozené satelity (měsíce): 82

Prstence: 7 hlavních

4.3.7 URAN

Uran je také složen z vodíku a hélia, ale přibližně jednu sedminu atmosféry tvoří metan. Ten je příčinou namodralého zbarvení. Teplota na téhle planetě je velmi nízká. Slunce je totiž tak daleko, že odtud vypadá jen jako jasná hvězda. Pod obalem atmosféry existují mraky. Z mraků pravděpodobně prší déšť tekutého metanu a čpavku. Pod nimi se nachází jakýsi „povrch“ tvořený vrstvou zmrzlé vody, čpavku a metanu. V nitru planety je ukryto pevné jádro obsahující mnoho železa. Uran obklopují tenké prstence složené z úlomků a prachu. Jsou velmi tmavé, doslova černé jako saze.

Průměrná vzdálenost od Slunce: 19,21 au

Délka dne (jedna otočka kolem osy): 17 hodin

Délka roku (jeden oběh kolem Slunce): 84 pozemských let

Průměr: 50 724 km

Hmotnost: 14,5 hmotnosti Země

Gravitace: 90 % pozemské hodnoty, při hmotnosti 80 kg byste na Uranu vážili 72 kg

Povrchová teplota: - 214 °C

Atmosféra: vodík, helium, metan

Charakteristika povrchu: kamenné jádro planety je pravděpodobně obklopeno „kašovitou“ směsí metanu, amoniaku a vody

Přirozené satelity (měsíce): 27

Prstence: 11

4.3.8 NEPTUN

Neptun se podobá Uranu stejně, jako je Jupiter podobný Saturnu. Má modrou barvu a podobně jako Uran za to vděčí metanu. Jeho atmosféra je však mnohem zajímavější. Rovník planety je lemován pásmem kupovitých oblaků. Podobně jako na Jupiteru i tady nalezneme velký oblačný vír. „Velká tmavá skvrna“ je rozměry srovnatelná s planetou Mars. Nad ní se neustále vznášejí bílá oblaka z krystalků metanu, která se podobají pozemským oblačným řasám.

Průměrná vzdálenost od Slunce: 30,06 au

Délka dne (jedna otočka kolem osy): 16 pozemských dní

Délka roku (jeden oběh kolem Slunce): 164 pozemských let

Průměr: 49 526 km

Hmotnost: 17,1 hmotnosti Země

Gravitace: 110 % pozemské hodnoty, pokud vážíte 80 kg, na Neptunu byste měli 88 kg

Povrchová teplota: -225 °C

Atmosféra: vodík, helium, metan

Charakteristika povrchu: předpokládá se obdobná struktura jako u Urana

Přirozené satelity (měsíce): 14

Prstence: 4

4.3.9 PŘIROZENÉ SATELITY PLANET

Aktuální informace o počtech a jménech přirozených satelitů planet je možné vyhledat na stránce https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_natural_satellites

4.3.10 TRPASLIČÍ PLANETY

ERIS

Eris je trpasličí planeta, patřící do rodiny transneptunických těles, pocházejících z Kuiperova pásu. Je doprovázena malým měsícem Dysnomia.

Průměrná vzdálenost od Slunce: 67,7 au

(přísluní 37,8 au, odsluní 97,6 au)

Délka roku (jeden oběh kolem Slunce): 557 pozemských let

Odhadovaný průměr: 2300 km

Hmotnost: $1,7 \cdot 10^{22}$ kg

CERES

Je prvním objeveným objektem, který obíhá mezi Marsem a Jupiterem, tedy v oblasti hlavního pásu planetek.

Průměrná vzdálenost od Slunce: 2,76 au

Délka dne (jedna otočka kolem osy): 9 hodin

Délka roku (jeden oběh kolem Slunce): 4,6 pozemského roku

Odhadovaný průměr: 952 km

Hmotnost: asi 6300x menší než hmotnost Země

PLUTO

Průměrná vzdálenost od Slunce: 39,24 au

Délka dne (jedna otočka kolem osy): asi 6 pozemských dní

Délka roku (jeden oběh kolem Slunce): přibližně 248 pozemských let

Průměr: 2274 km

Hmotnost: asi čtyřístakrát menší než je hmotnost Země

Gravitace: jen 7% pozemské hodnoty, při 80kg budete na Plutu vážit necelých 6 kg

Povrchová teplota: -228 °C

Atmosféra: řídká, obsahuje patrně dusík a metan

Charakteristika povrchu: zřejmě ledová usazenina tvořená dusíkem s příměsí metanu

Přirozené satelity (měsíce): 5

Prstence: nemá

Počet těles zařazených mezi „trpasličí planety“ se bude rozrůstat díky přesnějším pozorováním již známých těles, ale také budou objevenována tělesa nová. Jejich aktuální seznam si můžete doplnit sami (viz například https://cs.wikipedia.org/wiki/Trpasli%C4%8D%C3%AD_planeta).

NEZAPOMEŇTE NA ODPOČINEK



Pokud máte pocit, že potřebujete relaxovat, ideálním doplňkem této kapitoly je procházka nebo projížďka na kole po jednotlivých stanovištích opavského městského modelu Sluneční soustavy. Přitom mimo jiné na vlastní kůži zažijete a pochopíte, jak „prázdná“ je naše domácí planetární soustava.

Měřítko opavského modelu Sluneční soustavy je 1 : 627 000 000 a je dodrženo nejen pro vzdálenosti těles v modelu, ale také při stanovení velikosti modelů jednotlivých planet. A tak model trpasličí planety Pluto je vzdálen od koule představující Slunce více než 9 kilometrů a má průměr necelé 4 milimetry. Naopak model Slunce, Koule v kašně na Horním náměstí, má průměr přes 2 metry.

Tato procházka vám představí i nejzajímavější turistické cíle v Opavě a jejím okolí (pro případ, že jste pro samé studijní povinnosti neměli čas si své univerzitní město projít ☺).

Seznam objektů a jejich umístění:

Slunce		Opava, Horní náměstí
Merkur	92 m	Opava, Slezské divadlo
Venuše	173 m	Opava, Maticní ulice
Země	239 m	Opava, Dvořákovy sady
Mars	364 m	Opava, rektorát Slezské univerzity
planetky Oppavia a Silesia	700 m	Opava, náměstí sv. Hedviky
Jupiter	1 242 m	Opava, Víceúčelová hala
Saturn	2 286 m	Opava-Jaktař, pod kostelem
Uran	4 571 m	Milostovice, vojenská pevnost
Neptun	7 159 m	Stěbořice, kulturní dům
trpasličí planeta Pluto	9 420 m	Nový Dvůr, u vstupu do arboreta



PRO ZÁJEMCE

NÁZVOSLOVÍ TĚLES VE SLUNEČNÍ SOUSTAVĚ

Planety a přirozené satelity jsou pojmenovány podle bohů a hrdinů v řecké a římské mytologii (s několika výjimkami mezi názvy měsíců Uranu, které jsou podle postav z anglické literatury).

Komety jsou většinou pojmenované po svých objevitelích. Planetky mohou být svými objeviteli pojmenovány při zachování určitých pravidel celkem libovolnými názvy. Většinou jsou to jména jiných významných vědců či umělců nebo místa a události, kterým tak chce objevitel projevit úctu a uznání.

Jak jsme postupně mapovali většinu těles, začalo být nutné pojmenovávat také povrchové útvary. Pro tento účel byla vytvořena zvláštní komise Mezinárodní astronomické unie (IAU), která vytvořila pravidla pro pojmenování povrchových útvarů na jiných planetách. Například krátery na Venuši jsou pojmenovány po významných ženách. Sopečné útvary na jupiterově měsíci Io byly pojmenovány podle bohů ohně a hromů z mytologií různých národů. Krátery na Merkuru připomínají slavné romanopisce, dramatiky, umělce a skladatele. Na Saturnově měsíci Tethys jsou všechny útvary pojmenovány podle postav a míst v Homérově velké epické básni Odysseia.



SHRNUTÍ KAPITOLY

V první části kapitoly je podrobněji odvozeno vzájemné gravitační působení dvou těles a výsledky jsou aplikovány na popis pohybu těles ve Sluneční soustavě. Dále jsou vysvětleny a kvantifikovány důsledky nenulových rozměrů reálných těles – slapové síly. Rovněž je odvozen vztah pro hodnotu Rocheho meze v gravitačním poli hmotného tělesa.

Ve faktografické části kapitoly je pak pozornost věnována informacím o jednotlivých tělesech Sluneční soustavy, která se skládá ze Slunce, osmi planet, pěti trpasličích planet, více než 200 známých přirozených satelitů a řady menších objektů. Planety mohou být rozděleny do dvou skupin: planety typu Země a obří planety. Trpasličí planety Pluto, Ceres, Eris, Haumea, Makemake nepatří do žádné z těchto kategorií. Malá tělesa Sluneční soustavy zahrnují planetky, komety a velké množství zrn kosmického prachu.

V rozšiřujících částech kapitoly je stručně popsán opavský městský model Sluneční soustavy a vysvětlena metodika nomenklatury těles Sluneční soustavy a útvarů na jejich površích, jak ji zavedla a realizuje Mezinárodní astronomická unie (IAU).

KONTROLNÍ OTÁZKY



1. Odvoďte vztahy pro pohyb těles v centrálním gravitačním poli.
 2. Uveďte formulaci všech tří Keplerových zákonů.
 3. Co to jsou slapové síly? Odvoďte vztah pro slapové působení.
 4. Definujte Rocheho mez a odvoďte vztah pro její hodnotu.
 5. Která tělesa tvoří Sluneční soustavu?
 6. Uveďte základní vlastnosti planet Sluneční soustavy.
 7. Jaký je rozdíl mezi planetou a trpasličí planetou?
 8. U kterých planet typu Země již skončila geologická činnost?
-

CVIČENÍ



V rámci cvičení se předpokládá samostatné řešení několika desítek příkladů z kosmické mechaniky, které jsou obsaženy ve sbírkách astronomických příkladů uvedených mezi doporučenými publikacemi.

5 POHYB MĚSÍCE, ZATMĚNÍ SLUNCE A MĚSÍCE



RYCHLÝ NÁHLED KAPITOLY

Měsíc je jediný větší přirozený satelit naší Země a pro pozemské pozorovatele zároveň nejbližší kosmické těleso vůbec. V této kapitole se seznámíte s pohybem Měsíce po hvězdné obloze a věcmi s tím souvisejícími. Zvláštní pozornost pak bude věnována vysvětlení podstaty vzniku zatmění Slunce a Měsíce. Rovněž je diskutována možnost zákrytů dalších astronomických těles Měsícem.



CÍLE KAPITOLY

- Popis a hlubší pochopení pohybu Měsíce po hvězdné obloze
- Vysvětlení vzniku fází Měsíce
- Seznámit se s příčinami a průběhem zatmění Slunce a Měsíce
- Seznámení s problematikou zákrytů těles



ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU

2 hodiny



KLÍČOVÁ SLOVA KAPITOLY

Měsíc, fáze Měsíce, zatmění Slunce, zatmění Měsíce, zákryty těles Měsícem

5.1 Pohyb Měsíce

Jediný přirozený satelit Země, Měsíc, obíhá kolem naší planety proti směru hodinových ručiček. Jeho jeden oběh trvá přibližně 27,322 dnů (vůči hvězdám, *siderický měsíc*). Pro pozorovatele na povrchu Země je však podstatnější periodou *synodický měsíc*, což je interval mezi dvěma po sobě následujícími úplňky. Během siderického měsíce urazí Země téměř 1/12 oběžné dráhy kolem Slunce a pokud se má Měsíc dostat do stejné konfigurace vůči Slunci (do dalšího úplňku), musí urazit také ještě 1/12 své dráhy, což trvá asi 2 dny, takže fáze Měsíce se opakují každých 29 dní. Přesněji řečeno, délka *synodického měsíce* je 29,531 dne. Jinou definicí získáme periodu označovanou jako *drakonický měsíc*, což je doba, která uplyne mezi dvěma průchody Měsíce vzestupným uzlem jeho

dráhy. Protože uzlová přímka pomalu mění svou polohu, drakonický měsíc je o 3 hodiny kratší než hvězdný měsíc, tj. 27,212 dnů. Samotná elipsa oběžné dráhy také pomalu rotuje, takže *anomalistický měsíc*, čas mezi dvěma průchody Měsíce perigeem, je o 5,5 hodiny delší než hvězdný měsíc, tj. 27,555 dne.

Novoluní (nov) nastává, když je Měsíc v konjunkci se Sluncem. V tom okamžiku se hodnota ekliptikální délky Měsíce a Slunce shodují. Hodnoty ekliptikálních šířek jsou většinou rozdílné, protože rovina oběžné dráhy Měsíce svírá s rovinou ekliptiky úhel 5° . Tedy měsíční disk je „nad“ nebo „pod“ slunečním diskem. Přibližně za týden po novu se Měsíc dostává do fáze *první čtvrti*, když ekliptikální délky Měsíce a Slunce se liší o 90° . Pravá polovina Měsíce je osvětlená Sluncem (respektive levá polovina při pohledu z jižní polokoule). Přibližně čtrnáct dní po novu se Měsíc dostane se Sluncem do opozice a je ve fázi *úplňku*, asi za týden po něm pak v *poslední čtvrti* (Sluncem je osvětlena levá polovina měsíčního disku, resp. pravá při pohledu z jižní polokoule). Kromě těchto ustálených názvů se obecně fáze popisují tzv. *stářím* Měsíce, které se vyjadřuje ve dnech, které uplynuly od předchozího novoluní. Jeden cyklus od novu do novu, který odpovídá synodickému měsíci, se nazývá *lunace*.

Také měsíční dráha kolem Země má tvar elipsy s hlavní poloosou 384 400 km a malou excentricitou (0,055). Parametry dráhy se velmi pomalu mění vlivem gravitačních poruchových sil (největší vliv má Země a Slunce). Elipticita měsíční dráhy tedy způsobuje, že nejbližší vzdálenost Měsíce od středu naší Země je 356 400 km a maximální vzdálenost pak 406 700 km. Také se tím mění úhlový průměr kotouče Měsíce. Pro pozorovatele na povrchu Země má hodnotu v intervalu od 29,4 úhlových minut po 33,5 úhlových minut. Perioda vlastní rotace Měsíce je shodná se siderickým měsícem, takže Měsíc je k Zemi přivrácen stále stejnou stranou.

Vlivem *librací* však můžeme pozorovat z povrchu Země více než 50 % povrchu Měsíce. Prvním typem librace je skutečnost, že oběžná rychlost Měsíce se mění podle 2. Keplerova zákona, ale perioda jeho rotace je konstantní. V různých pozicích na oběžné dráze tak můžeme vidět mírně odlišné části jeho povrchu. Dalším typem librace je situace při východu Měsíce, kdy je možné pozorovat i části jeho povrchu „za pravým okrajem“ disku. Třetím efektem je librace v šířce. Protože oběžná dráha Měsíce není rovnoběžná s rovinou ekliptiky, můžeme vidět „za“ severní nebo jižní pól Měsíce v závislosti na jeho poloze.

Rovina oběžné dráhy Měsíce sice svírá s rovinou ekliptiky úhel pouze asi 5° a tak se Měsíc nachází vždy úhlově „poblíž“ ekliptiky, stejně jako Slunce a planety Sluneční soustavy, ale gravitační poruchy způsobují změnu polohy *uzlové přímky* (průnik roviny ekliptiky a oběžné roviny Měsíce), která vykoná jednu otočku za 18,6 let. Když je vzestupný uzel měsíční dráhy poblíž směru jarního bodu, Měsíc může být $28,5^\circ$ ($23,5^\circ + 5^\circ$) severně nebo jižně od rovníku. Jestliže se tam nachází sestupný uzel, je pak zmíněné rozmezí jen $18,5^\circ$ ($23,5^\circ - 5^\circ$) severně nebo jižně od rovníku.

5.2 Zatmění a zákryty

Jako *zatmění* označujeme v astronomii jev, kdy dojde k průchodu tělesa stínem jiného tělesa. Asi nejčastěji pozorovanými zatměními jsou zatmění Měsíce nebo zatmění velkých přirozených satelitů Jupiteru. Pod pojmem *zákryt* rozumíme jev, kdy dojde k zakrytí jednoho tělesa tělesem jiným. Typickým příkladem jsou zákryty hvězd Měsícem. Zatímco zákryty lze pozorovat pouze z poměrně úzkého pásu zemského povrchu, zatmění jsou viditelná všude, kde je těleso nad horizontem.

5.2.1 ZATMĚNÍ SLUNCE A MĚSÍCE

Zatmění Slunce²¹ a Měsíce jsou jedny z nejatraktivnějších předpověditelných astronomických úkazů. K zatmění Slunce dojde, když spolu s Měsícem a Zemí na jedné přímce. Jestliže dojde k překrytí celého disku Slunce Měsícem, jedná se o *úplné zatmění*, jinak je to *částečné zatmění*. Pokud se však Měsíc nachází poblíž apogea, jeho úhlový průměr je menší než průměr slunečního disku a nastane *prstencové zatmění*. Jestliže se zamyslíme nad geometrickým uspořádáním popisovaného jevu, napadne nás, že kdyby rovina oběhu Měsíce kolem Země byla shodná (rovnoběžná) s rovinou ekliptiky, tak by vlastně mohlo nastat jedno sluneční a jedno měsíční zatmění každý synodický měsíc! Ale není tomu tak, protože obě roviny, jak víme, svírají úhel asi 5° , takže Měsíc musí být blízko některého z uzlů své dráhy, aby vůbec zatmění mohlo nastat. Úhlová vzdálenost Měsíce od uzlu musí být menší než $4,6^\circ$ pro úplné zatmění Měsíce a $10,3^\circ$ pro úplné zatmění Slunce.

Každoročně dochází ke dvěma až sedmi zatměním. Obvykle se zatmění odehrává v sérii jednoho až tří, oddělených intervalem 173 dní. V jedné takové sérii může být jen jedno zatmění Slunce nebo posloupnost sluneční, měsíční a další zatmění Slunce. V jednom roce se mohou odehrát zatmění, která patří do 2 nebo 3 takových sérií.

Slunce a (vzestupný nebo sestupný) uzel oběžné dráhy Měsíce se nacházejí ve stejném směru jednou za 346,62 dnů. Devatenáct takových období (= 6585,78 dnů = 18 let 11 dní) odpovídá přibližně intervalu 223 synodických měsíců. Konfigurace Slunce a Měsíce a tedy i zatmění se opakují ve stejném pořadí právě s touto periodou, nazvanou Saros, kterou znali již starověcí Babylóňané.

Během zatmění Slunce je stín Měsíce na zemském povrchu široký asi 270 km. Stín se pohybuje rychlostí 34 km/min a maximální doba trvání úplného zatmění (teoretická) je 7,5 minuty. Pruh na povrchu Země, odkud je viditelné úplné zatmění, se označuje také jako *pás totality* a na jeho obou stranách jsou rozsáhlejší oblasti, odkud je zatmění pozorovatelné jako částečné.

Zatmění Měsíce je úplné, pokud je Měsíc zcela uvnitř plného stínu Země, pokud tomu tak není, jedná se o částečné zatmění. Je pozorovatelné na celé polokouli, kde je Měsíc

²¹ Pokud bychom se měli striktně držet definic, tak zatmění Slunce je vlastně zákrytem Slunce Měsícem.

nad obzorem a maximální doba trvání zatmění Měsíce je 3,8 hodiny a doba trvání celkové fáze je vždy kratší než 1,7 hodiny. Během fáze úplného zatmění má měsíční kotouč barvu většinou tmavě červenou až hnědou, protože část slunečního světla je rozptýlena zemskou atmosférou a osvětluje tak nadále měsíční povrch.

K ZAPAMATOVÁNÍ A DALŠÍMU STUDIU



Přehled informací, které se týkají zatmění Slunce a Měsíce, pozorovatelných z České republiky a okolí naleznete zde:

- <http://astro.sci.muni.cz/zatmeni/>
- <https://www.astro.cz/na-obloze/slunce/zatmeni-slunce.html>

5.2.2 ZÁKRYTY HVĚZD MĚSÍCEM

Pozorování a přesná fotometrická měření zákrytů hvězd Měsícem dříve sloužila ke zpřesňování parametrů jeho oběžné dráhy. Protože Měsíc nemá žádnou atmosféru, hvězda zmizí za dobu kratší než 0,02 s. Při záznamu rychlým fotometrem je možné zaznamenat průběh tohoto difrakčního jevu. Tak se daly určit nejen úhlové průměry některých hvězd, ale také parametry dvojhvězd. Měsíc se pohybuje po hvězdné obloze směrem na východ a je výhodné sledovat zákryty hvězd neosvětleným okrajem Měsíce ve fázi kolem první čtvrti. Zákryty jsou možné v pásu kolem dráhy Měsíce širokém asi 11° , ale zákryty objektů viditelných pouhým okem jsou vzácné.

PRO ZÁJEMCE



Samozřejmě, že zákryty hvězd mohou být způsobeny i planetami nebo planetkami. Přesné předpovědi těchto jevů jsou už náročnější, protože jsou viditelné z velmi úzkého pruhu na povrchu Země. Například prstence planety Uran byly nalezeny během zákrytu v roce 1977 a tvary některých planetek byly určeny během vhodných zákrytů, kdy byl jev pozorován vhodně rozestavenou sítí pozorovatelů na zemském povrchu.

Pokud se budete chtít aktivně zapojit do těchto pozorování, více informací naleznete například na stránkách evropské sekce International Occultation Timing Association (IOTA/ES) <http://www.iota-es.de/>.

5.2.3 PŘECHODY PLANET PŘES SLUNCE

Zvláštním případem zákrytu jsou přechody planet přes sluneční kotouč. Jev může nastat pouze pro Merkur nebo Venuši a to tehdy, když je planeta v čase kolem dolní konjunkce také poblíž uzlu své dráhy. Přechod Merkuru nastává asi 13 krát za století, ale pro Venuši je to pouze dvakrát.

Nejbližší přechody Merkuru nastanou 13. listopadu 2032 a 7. listopadu 2039 a Venuše až 11. prosince 2117 a 8. prosince 2125 a 11. června 2247 (předchozí nastaly v letech 2004 a 2012 viz https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99echod_Venu%C5%A1e).



SHRNUTÍ KAPITOLY

Kapitola se zabývá pohybem Měsíce kolem Země, jsou vysvětleny používané periody a také vznik fází Měsíce. Z povrchu Země, přestože má Měsíc vázanou rotaci, můžeme vlivem librací vidět více než 50 % jeho povrchu. V další části kapitoly jsou uvedeny základní informace o zatměních a zákrytech astronomických těles. Zvláštní pozornost je věnována zatměním Slunce a Měsíce, stejně jako zákrytům hvězd Měsícem nebo planetkami a krátce jsou diskutovány přechody vnitřních planet přes sluneční disk.



KONTROLNÍ OTÁZKY

1. Vysvětlete následující pojmy a uveďte jejich číselné hodnoty: *siderický měsíc*, *synodický měsíc*, *drakonický měsíc*, *anomalistický měsíc*.
2. Co je to librace Měsíce? Jaké typy librací známe?
3. Vysvětlete jev zatmění Slunce a Měsíce. Popište jejich průběh.
4. Viděli jste někdy tyto jevy na vlastní oči?
5. K čemu je možné vědecky využít zákryty hvězd Měsícem a planetkami?



CVIČENÍ

V rámci cvičení se předpokládá samostatné řešení dalších příkladů z kosmické mechaniky, které jsou obsaženy ve sbírkách astronomických příkladů uvedených mezi doporučenými publikacemi. Dále pak také práce s materiály, které se týkají astronomických jevů, kterým je věnována tato kapitola (mapy, tabulky, předpovědi zatmění atp.) a které jsou umístěny např. na webových stránkách NASA (<https://www.nasa.gov/eclipse> nebo <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/eclipse.html>)

6 ČAS, KALENDÁŘ

RYCHLÝ NÁHLED KAPITOLY



Měření času bylo po dlouhou dobu jednou z praktických aplikací spojených s astronomií a astronomickými pozorováními. V kapitole jsou přehledně představeny všechny postupně používané systémy „astronomického“ měření času. Přestože dnes již jsou principy měření času spojeny a navázány na fyzikální děje v „mikrosvětě“, jsou astronomicky definované časové systémy udržovány v souladu s „atomovým“ časem. Čas je nejpřesněji měřenou fyzikální veličinou.

V druhé části této kapitoly je pozornost věnována kalendářním systémům, tedy systémům měření času na delších časových úsecích. Kromě jejich přehledu jsou uvedena také pravidla, která umožňují převody datací mezi jednotlivými kalendáři.

CÍLE KAPITOLY



- Seznámit se s definicí času
- Pochopit astronomické principy měření času a souvislosti mezi atomovým časem a časy definovanými na základě astronomických dějů
- Seznámit se s různými kalendářními systémy
- Umět převádět data mezi různými typy kalendářů

ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU



2 hodiny

KLÍČOVÁ SLOVA KAPITOLY



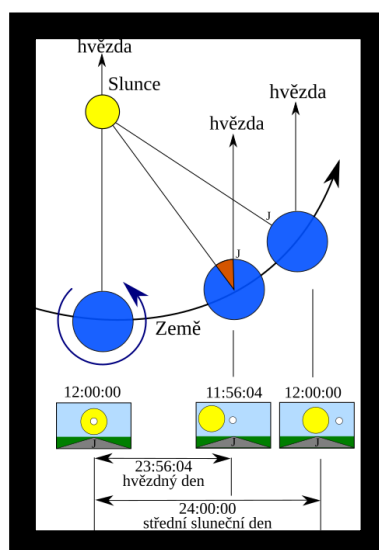
Sluneční den, hvězdný den, rok, pravé slunce, fiktivní slunce, atomový čas, přestupná sekunda, přestupný rok, lunisolární kalendář, Gregoriánská reforma

6.1 Měření času

Za klasické pojetí času považujeme chápání času jako fyzikální veličiny, jejíž hodnota se trvale mění a rovnoměrně narůstá. Takto zavedená veličina dává fyzikální smysl a je měřitelná až ve spojení s pohybem v konkrétní souřadné soustavě. V dávné minulosti se lidé nejprve snažili popsat plynutí času podle subjektivních pocitů jako je zvyšování pocitu hladu nebo žízně, později jej začali vztahovat k objektivním skutečnostem jako je změna výšky Slunce nad obzorem během dne nebo změna vzhledu Měsíce (fáze). V mírném klimatickém pásmu pak pro stanovení delší časové škály bylo možné využít pravidelně se střídajících ročních období. Asi od roku 2000 př. n. l. různé kultury vedly již systematické záznamy a začaly definovat délku dne, měsíce a roku.

Protože rytmus většiny lidských činností byl vázán na denní světlo, stala se poloha Slunce jevem, k němuž byla vázána většina používaných systémů časomíry. *Sluneční den* byl pak definován dobou, která uplynula mezi dvěma po sobě následujícími průchody Slunce nad poledníkem pozorovatele. Okamžik, kdy Slunce bylo na místním poledníku, byl zpravidla určován podle nejkratšího stínu nějakého svislého kůlu nebo sloupu.

Také rotace noční hvězdné oblohy poskytla další možný systém měření času tzv. *hvězdný čas*. Časový interval mezi dvěma po sobě následujícími průchody hvězdy přes poledník pozorovatele (meridián) definuje tzv. *hvězdný den*. Poměrně brzy pak bylo zjištěno, že rozdíl mezi těmito systémy měření času (slunečním a hvězdným) je způsoben orbitálním pohybem. Situaci znázorňuje obrázek.



Obrázek 21: Rozdíl mezi délkou *hvězdného* a *slunečního dne*.²²

²² Zdroj <https://kalendar.beda.cz/o-casu>

Takových časových systémů je možné definovat velmi mnoho a pokud jsou odvozeny z rotace Země, jedná se o rotační časové systémy. Druhou skupinou systémů měření času jsou pak časy definované fyzikálně.

Jak bylo v úvodu kapitoly naznačeno, rotační časy jsou definovány s využitím periodického rotačního pohybu Země kolem její osy. Z dnešního pohledu víme, že všechny takto definované časy jsou nerovnoměrné a mohou dnes sloužit k popisu nepravidelností rotační rychlosti Země.

6.1.1 HVĚZDNÉ ČASY

Hvězdný čas můžeme považovat za veličinu úměrnou hodnotě hodinového úhlu jarního bodu. Jeden hvězdný den je definován jako doba, která uplyne mezi dvěma horními kulminacemi jarního bodu. Podle metody redukce polohy jarního bodu rozlišujeme: *střední hvězdný čas \bar{S}* , který je vztažen ke střednímu jarnímu bodu (jen vliv precese) a *pravý hvězdný čas S* , který se váže k pravému jarnímu bodu (redukce precese i nutace).

V obecné podobě je možné hvězdné časy vztahovat k libovolnému poledníku, ale významné postavení má definitoricky *světový hvězdný čas*, který se váže k nultému poledníku. Časy vztažené k meridiánu se označují jako *místní hvězdné časy*. Pro všechny hvězdné časy se používá jednotka *hvězdný den*, který je členěn na 24 *hvězdných hodin* atd.

6.1.2 SLUNEČNÍ ČASY

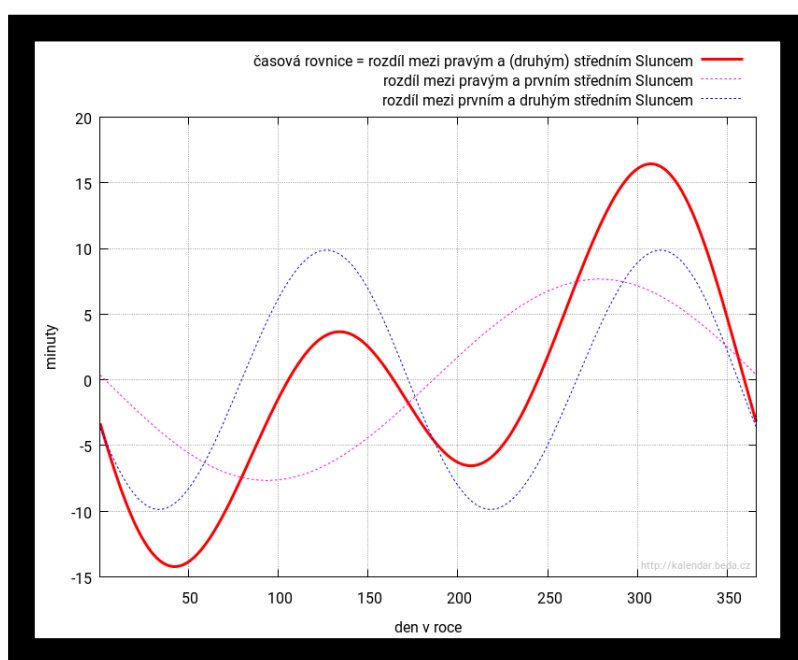
Jak již bylo uvedeno v úvodu kapitoly, jestliže rotaci Země budeme vztahovat ke Slunci, můžeme tak definovat *sluneční čas*. Rozlišujeme *pravý sluneční čas* a *střední sluneční čas*. Dále pak podle poledníku, ke kterému jsou vztaženy rozlišujeme *pravý greenwichský sluneční čas*, což je hodnota hodinového úhlu pravého Slunce zvětšená o 12 hodin, *nebo místní pravý sluneční čas*, což je hodnota hodinového úhlu pravého Slunce vztažená k meridiánu a zvětšená o 12 hodin.

Zcela analogicky je pak *pravý sluneční den* definován jako časový interval mezi dvěma po sobě následujícími kulminacemi pravého Slunce. Vzhledem k nerovnoměrnému pohybu pravého (skutečného) Slunce po obloze, protože se nepohybuje v rovině světového rovníku, ale v rovině ekliptiky a také rychlost jeho pohybu se během roku mění, nebylo používání pravých slunečních časů příliš praktické. Začala se používat fyzikální idealizace tzv. *střední Slunce*, což je fiktivní těleso, které se pohybuje rovnoměrně v rovině světového rovníku. Tak je možné definovat *střední sluneční čas*.

Střední greenwichský sluneční čas (světový čas UT) je vlastně greenwichský hodinový úhel středního Slunce zvětšený o 12 hodin. A stejně tak *místní střední sluneční čas* je hodinový úhel vztažený k meridiánu zvětšený o 12 hodin.

Potom *střední sluneční den* je definován jako doba mezi dvěma po sobě následujícími dolními kulminacemi středního Slunce.

Vztah mezi pravým a středním slunečním časem popisuje tzv. *časová rovnice*, která bývá prezentována jako diagram ročního průběhu rozdílu hodnot obou časových systémů. V průběhu roku rozdíl dosahuje extrémních hodnot ± 16 minut a čtyřikrát je roven nule (viz obrázek).



Obrázek 22: Grafické znázornění časové rovnice. Pojem *první střední Slunce* označuje idealizaci na rovnoměrný pohyb Slunce, *druhé střední Slunce* pak také idealizaci pohybu Slunce v rovině světového rovníku.²³



PRO ZÁJEMCE

Pravý sluneční čas lze zjistit na tzv. *slunečních hodinách*, které jsou často nápaditými uměleckými díly nebo drobnými architektonickými prvky. Existuje nepřeborné množství konstrukčních typů těchto hodin i celá řada jejich důmyslných ciferníků, které umožňují redukovat nepravidelnosti pravého slunečního času.

Rozsáhlé informace a také databázi slunečních hodin v naší republice naleznete například na tomto portále: http://www.astrohk.cz/slunecni_hodiny.html

²³ Zdroj <https://kalendar.beda.cz/o-casu>



Obrázek 23: Sluneční hodiny ve spodní části parku ve čtvrti Greenwich v Londýně. Byly zde instalovány v roce 2000.²⁴

SOUSTAVA SVĚTOVÝCH ČASŮ

UT0 (Universal Time) je světový čas určený astronomickým měřením a platí pro dané pozorovací místo (se souřadnicemi ϕ_0 a λ_0).

UT1 je světový čas vázaný na rotaci Země, neplyne rovnoměrně, z UT0 se UT1 určuje redukcí na střední polohu zemského pólu.

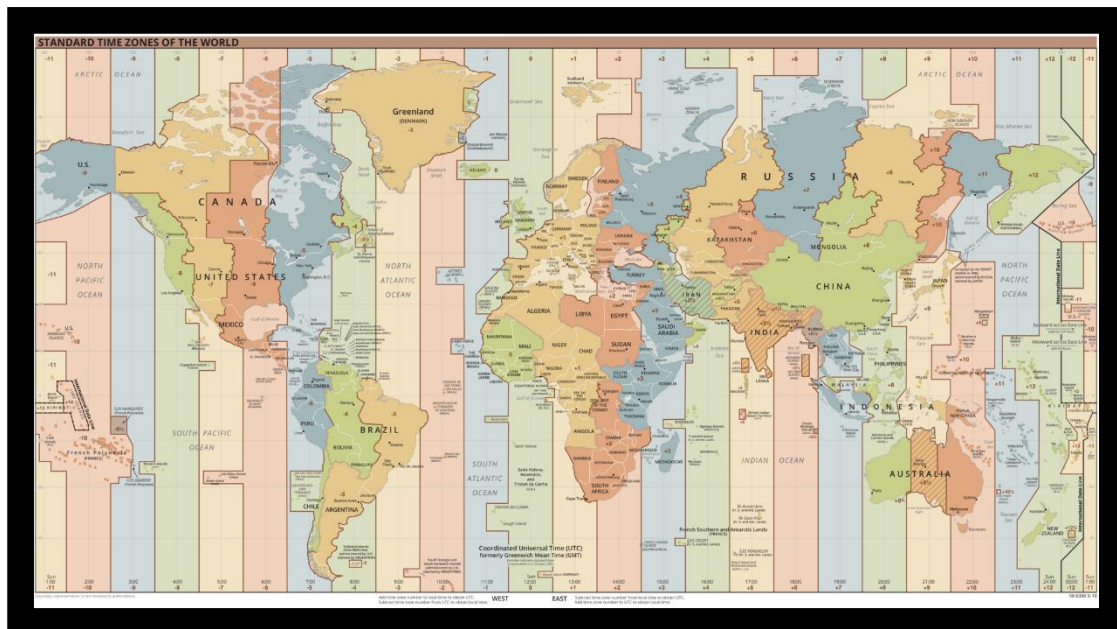
Zaváděním oprav nerovnoměrnosti rotace Země byl z UT1 odvozován čas UT2, který byl až do roku 1972 nejpřesnějším časovým systémem. Od roku 1972 se však používá atomový čas.

6.1.3 PÁSMOVÝ ČAS, DATOVÁ HRANICE, POSUNY ČASŮ

Z dříve uvedených definic je zřejmé, že místní čas roste se zeměpisnou délkou (směrem na východ). Pro konkrétní poledník má konstantní hodnotu, ale ta je odlišná od hodnoty na jiném poledníku. Rozdíl místních časů dosáhne 1 hodiny, pokud se zeměpisná délka míst liší o 15° . Takže města s různou zeměpisnou délkou měla dříve také různé místní časy. Již na konci 19. století, v přímé spojitosti s rozvojem dopravy, bylo nutné tento problém vyřešit. Od roku 1884 se tedy začal používat tzv. *pásmový čas*.

²⁴ Zdroj <https://www.royalpark.org.uk/parks/greenwich-park/things-to-see-and-do/monuments,-memorials-and-statues/millennium-sundial>

Celá zeměkoule byla rozdělena na 24 pásem, ve kterých platí vždy místní čas poledníku procházejícího středem pásma. V praxi však mohou hranice pásma kopírovat státní hranice nebo přirozená ohraničení (pobřeží atp. viz obrázek). Některé státy dokonce používají z politických důvodů čas odlišný o zlomek hodiny od času v okolních zemích.



Obrázek 24: Aktuální mapa časových pásem.²⁵

System pásmových časů má za důsledek také existenci datové hranice, která je teoreticky definována poledníkem 180°, ale v praxi je vedena neobydlenými oblastmi v jeho blízkosti. Jestliže je datová hranice překročena východním směrem, pak se jeden den odečítá a naopak.

V letních měsících se v řadě zemí světa zavádí tzv. *letní čas*, při kterém se přičítá k pásmovému času 1 hodina. Náš pásmový čas v České republice se označuje jako *středo-evropský čas* (zkratka SEČ) a jeho letní varianta jako *středo-evropský letní čas* (zkratka SELČ). Jeho zavádění obecně definuje směrnice EU, konkrétně pak Nařízení vlády ČR. Většinou se v České republice zavádí SELČ od 2 hodin poslední neděle v březnu do 3 hodin poslední neděle v říjnu daného roku. Experimenty s tzv. *zimním časem*, kdy se v zimním období od času pásmového 1 hodina odečte, se neujaly.

V době psaní tohoto textu bylo pravidelné zavádění letního času v rámci Evropské unie zrušeno s tím, že do několika let si mají jednotlivé státy samostatně rozhodnout, který pásmový čas budou celoročně využívat. Paradoxy celé situace je možné sledovat také na tomto portále: <https://www.stredoevropskycas.cz/>

²⁵ Zdroj https://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Casov%C3%A9_p%C3%A1smo#/media/Soubor:World_Time_Zones_Map.png

6.1.4 ČASOVÉ SYSTÉMY DEFINOVANÉ FYZIKÁLNĚ

ATOMOVÝ ČAS

DEFINICE



Oficiální definice atomové sekundy, která je základní fyzikální jednotkou SI:

Sekunda (zkratka **s**) je jednotka času; její velikost je určena číselnou hodnotou frekvence záření atomu cesia 133 v klidu při teplotě absolutní nuly při přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu, která je rovna přesně 9 192 631 770, je-li vyjádřena v jednotkách s^{-1} , což je ekvivalent jednotky Hz.

Od roku 1988 je Mezinárodní časová služba součástí Mezinárodního úřadu pro váhy a míry. Tento atomový čas, označovaný také jako TAI, je základním časem pro kosmickou geodézii, astrometrii a také pro GPS.

KOORDINOVANÝ ČAS

V praxi není využíván z řady důvodů přímo čas TAI, ale tzv. *koordinovaný světový čas* UTC, který je odvozen z TAI a je využíván zejména pro radiové časové signály. Proto je možné jej považovat za současný občanský čas.

V praxi ovšem žijeme podle času UT1, který je vázán na skutečnou, tedy nepravidelnou rotaci Země. Proto je nutné provázat UTC s časem UT1. Zároveň musí být UTC v jednoduchém vztahu k atomovému času TAI.

Tyto požadavky vedly k formulaci následujících pravidel:

- Sekunda UTC je rovna sekundě TAI. Chod UTC oproti času TAI je nulový, čas UTC je naprosto rovnoměrný.
- Rozdíl $TAI - UTC = n$, kde n je počet celých kladných nebo záporných sekund. Hodnota n je dána podmínkou $|UT1 - UTC| < 0,9$ s.
- Hodnotu $DUT1 = UT1 - UTC$ je nutné určovat měřeními a podle výsledků čas UTC upravovat přičtením nebo odečtením 1 sekundy.

Přehled všech dosud vložených přestupných sekund naleznete například zde: http://cs.wikipedia.org/wiki/Přestupná_sekunda .

6.2 Kalendáře

6.2.1 DEFINICE ROKŮ

TROPICKÝ ROK

Tropický rok je definován jako doba mezi dvěma po sobě následujícími průchody středního Slunce středním jarním bodem. Odpovídá 365,24218729 slunečním dnům a jeho délka se mění asi o půl sekundy za století. Začíná ve stejnou dobu pro celou Zemi.

SIDERICKÝ ROK

Siderický rok je čas, který potřebuje střední Slunce k opsání 360° , odpovídá 365,25636068 slunečním dnům. Jeho délka se mění jen o 0,01 sekundy za století a siderický rok začíná najednou pro celou Zemi.

JULIÁNSKÝ ROK

Juliánský rok byl zaveden tak, aby století mělo celý počet středních slunečních dnů, takže odpovídá 365,25 slunečním dnům a juliánské století má 36 525 dnů. Jeho začátek i konec závisí na pásmovém čase.

BESSELŮV ROK

Besselův rok je definován jako doba, za kterou změní střední fiktivní rovníkové Slunce svou rektascenzi o 24 hodin. Jeho délka je tedy shodná s tropickým rokem. Počátek roku však Bessel definoval okamžikem, kdy rektascenze středního fiktivního Slunce vztažená ke střednímu jarnímu bodu dosáhne hodnoty $18^h 40^m = 280^\circ$. Tento okamžik je vždy blízký počátku občanského kalendáře a je označován písmenem **B** před letopočtem a symbolem **.0** za ním. Je shodný pro všechna místa na Zemi. Jsou k němu vázány některé astronomické katalogy, v současnosti se nepoužívá, nahradil jej Juliánský rok.

6.2.2 KALENDÁŘNÍ SYSTÉMY

Různé systémy počítání dnů, tedy kalendáře, používá lidstvo velmi dlouho. Mohou se považovat za jeden z nejstarších vynálezů lidstva. Základní jednotkou bylo logicky střídání dne a noci, tedy sluneční den. U zemědělských civilizací, kde bylo důležité znát a sledovat průběh vegetačních období, se základní delší časovou jednotkou stal rok (tropický rok), ale pro pastevecká společenství byl důležitější jednotkou měsíc (synodický měsíc), protože na množství měsíčního světla záležel způsob ochrany stáda. Tak se vytvořily dvě větve kalendářů: *lunární* a *solární*. Třetím typem jsou kalendáře *lunisolární*, které oba přístupy kombinují.

Námi v současnosti používaný kalendář je vlastně solární, přestože například pohyblivé datum velikonočních svátků lze považovat za lunisolární prvek. Podle počátku jednotlivých kalendářních systémů je můžeme rozdělit na různé éry. Náš letopočet (křesťanská éra) má svůj původ u Dionýza Exiguuse, který v roce 525 předložil návrh, aby se roky počítaly od narození Krista, které datoval (dnes víme, že nepřesně) na rok 754 od založení Říma.

JULIÁNSKÝ KALENDÁŘ

Rok, který má střední délku 365,25 dnů, byl známý už ve staré Číně a o jeho zavedení se snažili i ve starém Egyptě. Ovšem známe jej jako juliánský kalendář, protože důsledně jeho používání zavedl Gaius Julius Caesar v roce 46 př. n. l. (Sosigenova reforma). Jeho uznání celým křesťanským světem však bylo zdoluhavé, ve své finální podobě byl od roku 525 n. l. nakonec používán déle než tisíc let.

Jeho pravidla:

- běžný rok má 365 dnů, přestupný 366 dnů
- přestupné roky jsou beze zbytku dělitelné čtyřmi
- rok je členěn na 12 měsíců s různým počtem dnů (31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31)
- přestupný den se vkládá na konec druhého měsíce (února), který tak má v přestupném roce 29 dnů

GREGORIÁNSKÝ KALENDÁŘ

Juliánský kalendář používá výhodné, ale nepřesné stanovení délky roku na 365,25 dne, přestože skutečná délka roku je 365,2422 dne. Tento rozdíl naroste za 128 let na celý jeden den a v 16. století byl už celých 10 dnů. To například znamenalo, že jarní rovnodennost nastávala již 11. března atp.

Ze všech návrhů na reformu kalendáře byla nakonec papežem Gregorem XIII. v roce 1582 realizována ta, kterou vypracoval Luigi Lilio. Takže po čtvrtku 4. října 1582 nastal pátek 15. října 1582, tak bylo odstraněno nadbytečných 10 dnů.

Dále se zavedlo nové pravidlo, že roky dělitelné beze zbytku stem budou přestupné jen tehdy, pokud budou současně beze zbytku dělitelné čtyřmi sty. Po této úpravě je střední délka roku, z pohledu celé periody čtyř století, rovna 365,2425 dne. Rozdíl o 0,0003 dne oproti skutečné délce roku způsobí rozdíl jednoho dne až za 3 300 let. Korekce se tak provede v roce 4840, který nebude přestupný.

Tento gregoriánský kalendář se dnes liší od juliánského o 13 dnů. Některé církve tuto reformu nepřijaly dodnes a používají původní juliánský kalendář.

JULIÁNSKÉ DATOVÁNÍ

Univerzální kalendářní systém, který je založen na docela jiném principu – na kontinuálním počítání dnů od určitého data, se nazývá *juliánské datum* (zkratka JD). V 16. století jej zavedl Josephus Justus Scaliger (1540 - 1609) a jeho počátek stanovil na 1. ledna 4713 př. n. l. ve 12.00 UT. Je to zároveň počátek astronomického kalendáře, protože se nepředpokládá, že by existovaly dřívější písemné záznamy nějakých astronomických pozorování.

Systém nepoužívá ani kratší ani delší časové jednotky, než je den. Kratší časový úsek než je jeden den, je v tomto datování vyjádřen čísly za desetinnou čárkou, tedy přepočten na příslušnou část dne. V tomto systému začíná den „v poledne“, takže celá noc má shodnou celočíselnou část datového údaje.

Juliánské datum bývá tabelováno např. ve Hvězdářské ročence nebo lze využít on-line převodníky (např. <http://aa.usno.navy.mil/data/docs/JulianDate.php> nebo http://www.onlinconversion.com/julian_date.htm).

Juliánské datování je výhodné zejména při analýze periodicity astronomických dějů (např. hledání period u proměnných hvězd atp.) a někdy se používá ve své modifikované verzi (MJD), kdy se od hodnoty JD odečítá 2 400 000,5 dne. Například datu **29. února 2020 v 18.00 UT** odpovídá **JD 2 458 909,25** a tedy **MJD 58 909,75**.



PŘÍPADOVÁ STUDIE

Astronomické ročenky obvykle obsahují také kapitulu, která upřesňuje kalendářní data pro aktuální nebo příští rok. Zde je ukázka takového textu, který byl autorem připraven pro tradiční slovenskou *Astronomickou ročenku 2021*.

ASTRONOMICKÁ ROČENKA - KALENĎÁŘNÍ DATA PRO ROK 2021

Rok **2021 gregoriánského (řehořského) kalendáře**, který v běžném životě používáme, u nás začíná 1. ledna v 0 h 0 min středoevropského času. Jedná se o nepřestupný rok o 365 dnech.

OSN prohlásila rok 2021 Mezinárodním rokem ovoce a zeleniny (rezoluce 74/244), Mezinárodním rokem míru a důvěry (rezoluce 73/338) a také Mezinárodním rokem kreativní ekonomiky pro udržitelný rozvoj (rezoluce 74/198).

Pro rok 2021 v gregoriánském kalendáři platí tyto hodnoty (vysvětlení viz níže):

indikce (římský počet, 15letá perioda)	14
nedělní písmeno	C
sluneční kruh (28letá perioda)	14
zlaté číslo (19letá perioda)	8
epakta	16
neděle velikonoční	4. duben 2021

Rok 2021 **juliánského** kalendáře (tzv. „starý styl“) začíná 14. ledna gregoriánského kalendáře. V současné době se používá na celém světě nejméně několik desítek různých kalendářních systémů. Jsou většinou odvozeny od periody oběhu Země kolem Slunce, periody oběhu Měsíce kolem Země nebo obě periody kombinují. Jako počátek jsou pak zvoleny různé události. Níže jsou uvedeny některé z nich, výběr je to náhodný a neúplný, účelem je doložit rozdílné pojetí kalendářních systémů u různých kultur a náboženských skupin.

Rok 2021 odpovídá:

- rokům 5781/5782 **židovské éry**. Rok 5781 začíná 19. září 2020, trvá 353 dnů a končí 6. září 2021. Rok 5782 začíná 7. září 2021, trvá 384 dnů a končí 25. září 2022.
- rokům 1442/1443 **muslimské éry Hidžry**. Rok 1442 začíná 20. srpna 2020, trvá 355 dní a končí 9. srpna 2021. Ramadán v roce 1442 začíná 13. dubna 2021 a končí 12. května 2021. Rok 1443 začíná 10. srpna 2021, trvá 354 dní a končí 29. července 2022.
- roku 6734 **Scaligerovy juliánské periody**. Rok 6734 začíná 14. ledna 2021 gregoriánského kalendáře.
- roku 2774 **ab Urbe condita** (a.U.c. – od založení Říma). Začíná jako juliánský rok, tedy 14. ledna.
- 3. roku japonské éry **Reiwa**. Éra začala 1. května 2019 s nástupem japonského císaře Naruhita.
- rokům 1737/1738 **Diokleciánovy éry** (tzv. *koptský kalendář*). Rok 1737 začíná 11. září 2020, trvá 365 dní a končí 10. září 2021. Rok 1738 začíná 11. září 2021, trvá 365 dní a končí 10. září 2022.
- roku 2564 **thajského kalendáře**, který je navázán na život Budhy, a je tedy o 543 let „napřed“ ve srovnání s křesťanskými kalendáři.

Juliánské datum (JD): datum 1. ledna 2021 v 0h TČ = 2 459 214,500 dne juliánské periody.

Modifikované juliánské datum (MJD): $MJD = JD - 2\,400\,000,5$

Pro 1. ledna 2021 má tedy hodnotu 59 214.

Scaligerova juliánská perioda má délku 7980 let. Je to vlastně součin period slunečního kruhu (28letá perioda), zlatého čísla (19letá perioda) a indikce neboli římského počtu (15letá perioda): $28 \times 19 \times 15 = 7980$. Počátek juliánské periody odpovídá gree-nwichskému střednímu polední 1. ledna roku 4713 př. n. l. juliánského kalendáře (tj. roku – 4712 astronomického letopočtu). Tohoto roku byly hodnoty všech zmíněných period 1.

Indikce je číslo udávající, kolikátý je daný rok v pořadí patnáctiletého, stále se opakujícího cyklu.

Sluneční kruh je definován jako cyklus střídání nedělních písmen v juliánském kalendáři, resp. počet let juliánského kalendáře, po jehož uplynutí připadá pořadí dnů v měsících na stejné dny týdne. Nedělních písmen je 7 a každý čtvrtý rok je přestupný, dostáváme cyklus 28 let.

Metonův cyklus postihuje skutečnost, že po 19 letech se opakují (s jistou drobnou nepřesností) fáze Měsíce ve shodných kalendářních datech.

Od roku 2001 se využívá **terestrický čas** (TT, TČ), který je definovaný vztahem $TT = TAI + 32,184 \text{ s}$, kde TAI je **mezinárodní atomový čas** (zavedený 1. ledna 1972), založený na průměrném údaji ze souboru nejpřesnějších atomových hodin světa.

Dalšími používanými časy je **čas světový** (UT, SČ – místní střední sluneční čas greenwichského poledníku) a **čas střeoevropský** (CET, SEČ), který je středním slunečním časem patnáctého poledníku východní délky. Jedná se o pásmový čas, který užíváme v běžném občanském životě, a platí ve většině evropských států. V části jarního, letního a části podzimního období je úředním nařízením zaváděn **letní čas** (CEST, SELČ), který začíná poslední neděli v březnu (v roce 2021 tedy 28. března), kdy se hodiny ve 2 h SEČ posunou o jednu hodinu vpřed. Letní čas končí poslední neděli v říjnu (v roce 2021 tedy 31. října), kdy se hodiny ve 3 h SELČ posunou o jednu hodinu zpět. Jednotlivé státy EU mohou od praxe změn času upustit.

Ze **světového času** UT (někdy také označovaný UT1) je odvozen také **koordinovaný světový čas** (UTC), ze kterého vychází světový systém občanského času. Jedná se o čas plynoucí rovnoměrně, ovšem korigovaný tak, aby se co nejvíce blížil času UT. Toto se provádí po skocích, vložením resp. vypuštěním přestupné sekundy 30. června nebo 31. prosince běžného roku. Podmínka pro vložení resp. vypuštění přestupné sekundy je, aby se UTC od UT nelišil o více než $\pm 0,8 \text{ s}$.

Naposledy byla přestupná sekunda zařazena ve 24 h UT 31. prosince 2016, resp. 0 h UT 1. ledna 2017 (sekvence 31. 12. 2016, 23h 59m 59s; 31. 12. 2016, 23h 59m 60s; 1. 1. 2017, 0h 0m 0s...), kdy $TAI - UTC = +35 \text{ s}$. K uvedenému datu byl tedy rozdíl $TT - UTC = (TAI - UTC) + (TT - TAI) = 37 \text{ s} + 32,184 \text{ s} = 69,184 \text{ s}$. Aktuální oznámení o případném vložení či vynechání přestupné sekundy je možno najít v bulletinu Mezinárodní služby rotace Země (IERS, <http://www.iers.org>).

Platí následující vztahy:

$$SELČ = SEČ + 1 \text{ h } 00 \text{ min } 00 \text{ s},$$

$$SEČ = UT + 1 \text{ h } 00 \text{ min } 00 \text{ s},$$

$$TT = TAI + 32,184 \text{ s} = UT + \Delta T,$$

kde veličina $\Delta T = 32,184 \text{ s} - (UT_1 - TAI)$ je tzv. oprava na nerovnoměrnost rotace Země.

Její hodnota se určuje na základě pozorování a je opět publikována v bulletinu Mezinárodní služby rotace Země (IERS, <http://www.iers.org>).

EPOCHY

Epocha **J2021,5** = 2 459 397,875 JD = 2,375 července 2021

Epocha **B2021,0** = 2 459 214,620 JD = 0,120 ledna 2021

PŘEVODNÍK MEZI RŮZNÝMI KALENDÁŘNÍMI SYSTÉMY

K převodu data mezi různými kalendářními systémy je možné využít tento portál:

https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcalhelp/hlp_analysis_calend.html#besselianN

SHRNUTÍ KAPITOLY



Kapitola seznamuje se základními vlastnostmi astronomických rotačních časových systémů, tedy hvězdného a slunečního času. Dále je vysvětlen koncept pásmových časů i jejich modifikací. Je uvedena aktuální fyzikální definice času a jeho jednotky *sekundy*, tedy tzv. atomového času.

Další část kapitoly je věnována kalendářním systémům, nejprve jsou uvedeny definice různých druhů roků (jako časomíry) a poté následuje přehled různých kalendářních systémů. V podobě případové studie jsou uvedena kalendářní data pro rok 2021, která obsahují také odkaz na převodník mezi hlavními kalendářními systémy.

KONTROLNÍ OTÁZKY



1. Jak je definován hvězdný den?
2. Uveďte definici slunečního dne?
3. Vysvětlete koncept *středního Slunce*.
4. Jaký čas udávají časová znamení Českého rozhlasu a jaký čas odečteme na slunečních hodinách?
5. Jak je definován tropický rok?
6. Vysvětlete princip Juliánského datování, převed'te datum 29. 2. 2024 v 18.00 SEČ do tohoto systému.

CVIČENÍ



V rámci cvičení se předpokládá samostatné řešení dalších příkladů, které jsou obsaženy ve sbírkách astronomických příkladů uvedených mezi doporučenými publikacemi. Dále pak také zvládnutí postupu při výpočtu hvězdného času pro konkrétní pozorovací stanoviště a převody kalendářních dat mezi různými systémy, zejména převod do Juliánského datování.

7 ASTRONOMICKÉ PŘÍSTROJE



RYCHLÝ NÁHLED KAPITOLY

Tato kapitola je věnována astronomické pozorovací technice, zejména dalekohledům. Podrobněji jsou představeny jak čočkové, tak zrcadlové astronomické dalekohledy. Pozornost je věnována také vysvětlením principů jejich montáží, tedy systémů uchycení optických prvků a konstrukcím, které umožňují nastavení dalekohledu požadovaným směrem a také jeho navádění za pozorovaným objektem.

Další část kapitoly stručně seznamuje s okuláry a také dalším příslušenstvím, včetně polovodičových detektorů CCD. Kapitola je zakončena stručnou rekapitulací optických vad astronomických dalekohledů.



CÍLE KAPITOLY

- Seznámení se základními vlastnostmi *astronomických dalekohledů*
 - Znalost principů *montáže* (stativu) astronomického dalekohledu
 - Vlastnosti okulárů a dalšího příslušenství
 - Znalost základních optických vad
-



ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU

2 hodiny



KLÍČOVÁ SLOVA KAPITOLY

Refraktor, reflektor, objektiv, okulár, montáž dalekohledu, CCD kamera, optická vada

7.1 Astronomické dalekohledy

7.1.1 Úvod

Patrně nepoužívanějším astronomickým přístrojem je astronomický dalekohled. V současné době bychom zejména u těch největších observatoří měli mluvit spíše o pozorovacích systémech, jejichž součástí jsou také dalekohledy. Dalšími prvky pak různá optická zařízení sloužící k analýze světla (záření) a také technologicky pokročilé detektory.

Samotný dalekohled má dvě základní funkce, slouží jako kolektor (sběrač) přicházejícího světla (záření) a umožňuje nám určit polohu (směr), odkud toto záření registrujeme. K tomu je možné využít dva fyzikální jevy, jedním je refrakce záření a tím druhým jeho reflexe. V prvním případě jsou optickými prvky *čočky* a dalekohled označujeme jako *refraktor (čočkový dalekohled)*, v druhém případě to jsou *zrcadla* a mluvíme o *reflektoru (zrcadlovém dalekohledu)*. Pokud optický systém dalekohledu obsahuje jak čočky, tak zrcadla, označujeme jej jako *katadioptrický dalekohled*.

Optické vlastnosti každého dalekohledu je možné popsat jeho hlavními parametry, mezi které patří:

- **Průměr vstupní pupily** – jedná se o základní parametr, udává se většinou v milimetrech nebo centimetrech a určuje celkovou plochu, ze které je světlo (záření) optickou soustavou dalekohledu soustředováno do jeho optického ohniska.
- **Ohnisková vzdálenost (f)** – vzdálenost mezi hlavním optickým prvkem (čočkou nebo zrcadlem) a ohniskem, tedy „bodem“, do kterého je soustředěno světlo (záření).
- **Velikost zorného pole (FOV)** – velikost části oblohy viditelné v dalekohledu, udává se v úhlových stupních nebo úhlových minutách.
- **Zvětšení** – poměr úhlové velikosti objektu s využitím dalekohledu a bez něj. Pro bodové objekty, např. hvězdy, nemá tento parametr prakticky žádný význam. V praxi pak používání velkých zvětšení znamená řadu problémů, protože se mnohem více projeví vliv zemské atmosféry. Zvětšení vy počteme jako poměr ohniskové vzdálenosti dalekohledu a ohniskové vzdálenosti použitého okuláru.
- **Úhlové rozlišení dalekohledu (α)** – charakterizuje úhlovou vzdálenost objektů, které je dalekohled schopen rozlišit ještě jako dva samostatné objekty. Je dáno velikostí tzv. *Airyho disku*, jedná se tedy o důsledek difrakčních jevů v optických prvcích dalekohledu. Hodnotu je možné přibližně určit podle vzorce:

$$\alpha'' = \frac{1,22\lambda}{D} \times 206\,256.$$

Ve většině skutečných situací však není možné této hodnoty při pozorování ze zemského povrchu dosáhnout, protože vliv turbulence atmosféry je větší.

První refraktor byl vyroben již na počátku 16. století a první systematické astronomické využití dalekohledu vlastní konstrukce je připisováno Galileu Galileimu, který využil jako objektiv spojnou čočku a jako okulár rozptylku. Kepler pak navrhl a používal jako okulár také spojku, což umožnilo dosáhnout větších zvětšení.

S rostoucími průměry refraktorů se však ukázaly jejich zásadní nevýhody. Například technický problém – čočku objektivu je možné upevnit k tubusu pouze po jejím obvodu, což je u čoček s vyšší hmotností velmi obtížné. Další problém představuje proměnlivá deformace optických ploch u velkých čoček podle jejich aktuální polohy a v neposlední řadě se u refraktorů musíme vypořádat se závislostí index lomu na vlnové délce, tedy korekcí *barevné vady*. To je možné vyřešit kombinováním více optických členů s různými indexy lomu. *Achromatické objektivy* využívají kombinaci čoček z dvou typů skla s různými indexy lomu spojené dohromady tak, aby vytvořily soustavu se stejnými indexy lomu pro červené a modré světlo. *Apochromatické objektivy* využívají stejný princip, jen mají tři členy – pro červenou, modrou a zelenou barvu.

Problém s velkou hmotností čoček velkého průměru však není řešitelný, limitní průměr pro refraktory je tak asi 100 cm a bylo jej dosaženo již na přelomu 19. a 20. století.

Schopnost zrcadel zvětšovat obraz byla známá již několik století před tím, než Newton sestrojil první astronomický zrcadlový dalekohled. Využití zakřivených zrcadlových ploch jako optických prvků má oproti skleněným čočkám řadu výhod. Například stačí přesně upravit pouze tvar a povrch zrcadla, tedy jedinou optickou plochu, což snižuje pracnost i nároky na kvalitu skla v celém jeho objemu. Navíc zrcadlové dalekohledy nemají barevnou vadu a hlavní zrcadlo je k tubusu připevnitelné jeho celou plochou, nejen po obvodu.

Ani u zrcadlových dalekohledů se technickým problémům nelze zcela vyhnout. Například sekundární zrcadlo je nutné vždy umístit do blízkosti primárního ohniska, což snižuje účinnost dalekohledu, protože dochází ke „stínění“ hlavního zrcadla. Dochází také k difrakci světla na úchytech sekundárního zrcadla (např. typické „paprsky“ kolem jasných objektů na snímcích).

7.1.2 TYPY DALEKOHLEDŮ

REFRAKTORY

Jak již jsme si uvedli v obecném úvodu, dalekohledy, které mají objektiv i okulár vytvořený z čoček, tedy optických prvků, které využívají lomu světla, se nazývají refraktory. Docela první sestavené dalekohledy (na počátku 17. století) byly právě jednoduché refraktory, které tvořila dvojice čoček – jedna jako objektiv a druhá jako okulár. Je zřejmé, že takové dalekohledy měly celou řadu optických vad.

Postupem času vznikaly složitější konstrukce, ve kterých byl objektiv i okulár složen z několika čoček. Nejčastěji byla korigována tzv. barevná vada, kterou lze potlačit, jestliže kombinujeme čočky vyrobené z různých druhů skla. Pokud použijeme dvě čočky, označujeme soustavu jako achromát, při použití tří čoček se jedná o dokonalejší apochromát. Současné běžně dostupné refraktory achromáty mají relativní otvor $f/10$ až $f/13$.

REFLEKTORY

Dalekohledy, které k fokusaci nevyužívají lomu světla, ale jeho odrazu, nazýváme reflektory neboli zrcadlové dalekohledy. Optickými členy takových soustav jsou totiž zrcadla, původně kovová, dnes skleněná s pokovenou povrchovou vrstvou. Jednou z hlavních výhod reflektorů je skutečnost, že nemají barevnou vadu, protože úhel odrazu není závislý na vlnové délce dopadajícího světla. Navíc výroba hlavního zrcadla je spojena, na rozdíl od výroby čoček, s vytvořením pouze jedné optické plochy.

Existuje několik typů reflektorů, které se liší technickým řešením umístění hlavního zrcadla a okuláru. Patrně nejjednodušší je tzv. **Newtonův dalekohled**, jehož objektiv tvoří sférické nebo parabolické zrcadlo. Svazek světla odražený od plochy zrcadla je ještě před ohniskovou rovinou odrážen mimo optickou osu rovinným zrcátkem svírajícím s optickou osou hlavního zrcadla úhel 45° . Tak se ohnisková rovina, respektive ohnisko, dostane mimo tubus dalekohledu. Obraz si pak můžeme prohlížet klasickým okulárem. Jednoduchá konstrukce a nutnost výroby pouze jediné zakřivené optické plochy učinily tento typ dalekohledu rozšířený zejména mezi astronomy amatéry. Pro větší a profesionální teleskopy však tento typ uspořádání není vhodný.

Složitější jsou technická řešení reflektoru navržená Gregorym a Cassegrainem ve druhé polovině 17. století. Jejich společným znakem je otvor uprostřed primárního parabolického zrcadla. **Cassegrainův dalekohled** využívá jako sekundární optický prvek konvexní hyperbolické zrcadlo. Svazek světla odražený od primárního zrcadla dopadá na sekundární zrcadlo, jež změni sbíhavost dopadajícího a posléze odraženého svazku, tak prodlužuje jejich dráhu potřebnou k dosažení ohniskové roviny. Světlo prochází otvorem v hlavním zrcadle a ohnisková rovina se tedy nalézá až za ním. Ohnisko tak leží na op-

tické ose dalekohledu. Tento systém průchodu světla optickou soustavou způsobí, že fyzicky jsou dalekohledy tohoto typu mnohem kratší, než jakou mají ohniskovou vzdálenost.

Gregoryho dalekohled má jako sekundární optický prvek konkávní (duté) zrcadlo, které je za primárním ohniskem v takové pozici, aby promítalo obraz vytvořený primárním zrcadlem za hlavní zrcadlo. Fyzický rozměr je však větší než u Cassegrainova uspořádání a dnes už se tento typ příliš nepoužívá.

Uspořádání **Ritchey-Chrétien** se používá u velkých astronomických dalekohledů. Jedná se vlastně technické řešení typu Cassegrain, ale jak primární, tak sekundární zrcadlo mají tvar rotačního hyperboloidu. Důvodem je potlačení optických vad, zejména komy a sférické vady. Nevýhodou je náročnost výroby, zejména primárního zrcadla, a z to ho vyplývající vysoká cena.

KATADIOPTICKÉ SYSTÉMY

Katadioptrické dalekohledy využívají kombinace optických prvků používaných v refraktorech a reflektorech, tedy čoček (nebo korekčních desek) a zrcadel. Snahou konstruktéra je využít výhod obou typů zobrazovacích optických prvků tak, aby výsledný dalekohled měl potlačeny v maximální možné míře všechny optické vady. Patrně jako první použil korekční desku v zrcadlovém dalekohledu estonský optik Schmidt (1930) v dalekohledu (komoře) sestaveném pro astrofotografii. Korekční deska má velmi komplikovaný tvar a její výroba je technicky obtížná a tedy i nákladná. Zabudováním Schmidtovy desky do Cassegrainova zrcadlového dalekohledem byl vytvořen velmi dobrý optický systém, který je znám pod názvem Schmidt-Cassegrain. Dnešní dalekohledy typu Schmidt-Cassegrain se vyrábějí s relativním otvorem $f/10$ až $f/12$.

Jiné technické řešení vytvořil Maksutov (1941) pro astrokomoru upravenou přidáním sekundárního zrcadla do tzv. Maksutova dalekohledu. Korekční člen má v tomto případě jednodušší tvar (meniskus). Korekční deska je ale silnější, dalekohled je tedy těžší a pomaleji reaguje na změny teplot. Relativní otvor Maksutových komor je $f/12$ až $f/15$.



PRO ZÁJEMCE

Více informací o velkých dalekohledech s průměry primárního zrcadla většími než 3 metry naleznete na tomto portále: http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_largest_optical_reflecting_telescopes

Rozsáhlý přehled projektů robotických dalekohledů je například zde:

<http://www.astro.physik.uni-goettingen.de/~hessman/MONET/links.html>

7.1.3 VADY OPTIKY

KULOVÁ VADA

Kulovou vadu neboli sférickou aberaci mají takové optické soustavy, ve kterých se ne-soustředí všechny paprsky do jediného ohniska, ale paprsky, které dopadají do objektivu v různých vzdálenostech od optické osy soustavy se protínají v různé vzdálenosti od objektivu. Takže paprsky bližší optické ose mají své ohnisko ve větší vzdálenosti než paprsky procházející okrajem objektivu. Výsledný obraz světelného bodu nebude bodový, ale vytvoří neostře ohraničenou plošku.

Velikost sférické aberace závisí na průměru objektivu a na relativní světelnosti. Korekce kulové vady je možná buď kombinací spojky a rozptylky nebo vybroušení optických ploch do tvaru rotačního paraboloidu. Menší kulovou chybu mají i ploskovypuklé čočky, popř. soustava dvou slabších čoček (s delšími ohniskovými vzdálenostmi) namísto jedné silné. Tato chyba se projevuje také u zrcadel (nejvíce pro kulový tvar jejich optické plochy).

ASYMETRICKÁ CHYBA (KOMA)

Porušení symetrie svazku paprsků, přicházejících od světelného bodu, který je mimo optickou osu soustavy, označujeme jako komu nebo také jako asymetrickou vadu. V případě, že světlo dopadne na poloměr křivosti optického prvku zešikma, nenastane v reálné optické soustavě v žádné rovině bodové zobrazení. Světelné paprsky dopadající šikmo na optickou plochu se rozptylují více. Celkový obraz původně bodového zdroje má tvar protáhlé čárky podobné obrazu komety. Koma je typická pro dalekohledy s velkým zorným polem. Korekci komy je možné udělat vhodnou konstrukcí objektivu, takové se pak označují jako aplanáty.

ASTIGMATISMUS A SKLENUTÍ OBRAZU

Pokud zobrazovaný předmět leží mimo optickou osu, tak světlo od něj přicházející do okrajové části objektivu kolmo se láme jinak než při šikmém dopadu. Dochází ke zkreslení označovanému jako astigmatismus. Obraz bodového světelného zdroje pak bude mít tvar elipsy. Jako sklenutí obrazu označujeme vadu, kdy daná optická soustava nemá ohniskovou rovinu, ale obrazová rovina má tvar zakřivené plochy. Pokud takovou soustavu použijeme k fotografování a detektor je „rovná plocha“, bude zaostřena jen část snímku. Soustavy s korekcí obou vad se označují jako anastigmaty.

ZKRESLENÍ

Pokud má optická soustava zvětšení závislé na vzdálenosti zobrazovaného objektu od optické osy, pak dochází také k deformaci obrazu. Například čtverec se zobrazí se stra-

nami prohnutými ven nebo dovnitř. Taková vada se označuje jako zkreslení neboli distorze. Obraz není neostrý, pouze zkreslený. Jestliže zvětšení vzrůstá se vzdáleností od optické osy, jedná se o tzv. poduškové zkreslení a je-li tomu naopak, pak jej označujeme jako tzv. soudkové zkreslení. Je to podstatný parametr zejména pro okuláry s velkým zorným polem. Optickou soustavu s korekcí distorze označujeme jako ortoskopickou.

BAREVNÉ VADY

Barevné vady neboli chromatické aberace se týkají pouze optických soustav využívajících ke zobrazování lomu světla. Rozlišujeme chromatické aberace polohy a zvětšení. Bohužel není možná korekce obou barevných vad současně pro všechny vlnové délky. Tento neodstranitelný chromatismus se označuje jako sekundární spektrum. Barevnou vadu korigujeme kombinací různých optických skel s opačnou hodnotou disperze.

7.2 Montáže dalekohledů

Pro astronomická pozorování je nutné, aby dalekohled byl umístěn na tzv. montáži. Je to mnohdy, zejména u velkých teleskopů, zařízení složitější než samotná optická soustava. Měla by umožňovat snadné nastavení dalekohledu do polohy potřebné k pozorování a také jeho setrvání v této poloze. Dokonalejší montáže sledují pozorovaný objekt (kompenzují rotaci Země) či dokonce samy nastaví dalekohled do příslušného směru podle zadaného jména či souřadnic objektu

7.2.1 AZIMUTÁLNÍ MONTÁŽ

Azimutální montáž je svým principem podobná běžnému fotografickému stativu. Dalekohledem na azimutální montáži je možné otáčet kolem dvou os. Pohybem v horizontální rovině (měníme azimut) a pohybem ve vertikální rovině (změna výšky nad obzorem).

Výhodou je její jednoduchost a snadné ovládání i pokud ji využíváme v manuálním režimu. Nevýhodou je to, že při kompenzaci rotace Země musíme vždy otáčet dalekohledem kolem obou os, a navíc se obraz v zorném poli stáčí, což je problematické při delších expozicích.

Specifickým případem technického řešení azimutální montáže je tzv. Dobsonova montáž, která je výhodná zejména pro zrcadlové dalekohledy typu Newton. Je tvořena nízkou základnou, do které je vložen tubus a která je umístěná na otočné desce. Takové řešení může zajistit levnou montáž i pro dalekohledy větších průměrů.

7.2.2 PARALAKTICKÁ MONTÁŽ

Jestliže pro vizuální pozorování představuje azimutální montáž velmi dobré řešení, v okamžiku potřeby fotografování nebo jakýchkoliv odbornějších pozorování je však tento typ montáže nevhodný. Pak je mnohem výhodnější použít tzv. paralaktickou montáž, která má jednu osu rotace rovnoběžnou s osou rotace Země. Její sklon k rovině ideálního horizontu sice závisí na zeměpisné šířce pozorovacího stanoviště, ale ke kompenzaci zemské rotace pak stačí otáčet dalekohledem právě jenom kolem této polární osy. Dokonalější paralaktické montáže jsou vybaveny také tímto pohonem, který je označován jako hodinový stroj. Tento druh montáže nám umožňuje vyhledat astronomické objekty přímo podle jejich rovníkových souřadnic (rektascenze a deklinace).

Nejčastější technická provedení paralaktické montáže jsou tzv. vidlicová a tzv. německá. Montáž vidlicová je velmi podobná azimutální montáži, jen má skloněnou polární osu. Některé montáže dokonce umožňují přecházet mezi oběma typy použitím tzv. paralaktického klínu. Německá paralaktická montáž má dalekohled upevněn na jedné straně a na druhé je protizávaží. Taková montáž je sice stabilnější a lépe rozložitelná na jednotlivé díly, ale je podstatně hmotnější (protizávaží).

7.2.3 AUTOMATIZOVANÉ MONTÁŽE

Nalezení astronomického objektu na obloze, zejména pokud se jedná o slabší objekty, není docela jednoduché. Proto byly postupně vyvíjeny různým způsobem automatizované montáže. Za nejdokonalější lze považovat dnes již běžně komerčně dostupné montáže vybavené GPS, rozsáhlými databázemi objektů, a především automatickým nastavováním dalekohledu, které bývá označováno jako tzv. GoTo systém. Profesionální astronom by však měl zvládnout jak manuální nastavení dalekohledu podle mapy hvězdné oblohy nebo speciální vyhledávací mapky, tak práci s automatizovanými dalekohledy.

7.3 Detektory

Ještě dlouhou dobu po vynálezu dalekohledu bylo stále jediným astronomickým detektorem oko pozorovatele a záznamovým zařízením jeho schopnost pořídit co nejdokonalější zápis nebo kresbu toho, co vidí v dalekohledu. Přes veškerou snahu o dokonalost se nemohlo jednat o objektivní záznamy. Na ty si museli astronomové počkat až do druhé poloviny 19. století. Dnes hrají detektory světla (a jiného elektromagnetického záření) spolu se záznamovou, tedy výpočetní, technikou velmi významnou roli v pozorovací astronomii a astrofyzice. Bez nich a bez potřebné automatizace procesu sběru a pořizování trvalého objektivního záznamu by nemohly vzniknout rozsáhlé astronomické přehledky oblohy a digitální databáze, ze kterých budou moci získávat nové a nové informace ještě následující generace astrofyziků.

7.3.1 OKO

Lidské oko je v mnoha ohledech, zejména pro světlo, velmi dokonalým detektorem. Jeho struktura je přizpůsobena potřebě zaostřit paprsek světla na sítnici, a tedy části oka, kterými světlo prochází, jsou průhledné. Právě rohovka a čočka pomáhají paprsek světla zaostřit na zadní stěnu oka – sítnici. Dopadající světlo pak způsobuje chemické přeměny ve světločivných buňkách, které vysílají nervové impulsy zrakovým nervem do mozku.

Světlo přichází do oka přes rohovku, do části vyplněné komorovou vodou, a dopadá na čočku přes panenku. Ta funguje jako clona, protože se díky svalům dokáže roztáhnout nebo smrštit, a tak regulovat množství procházejícího světla. Jiné svaly zajišťují regulaci tvaru čočky, která zaostřuje paprsky na sítnici, kde vzniká převrácený obraz. Oční čočka je optický prvek, jehož přední plocha je zakřivena méně než zadní, má průměr 9 až 10 mm. Její optická mohutnost je 17 až 20 dioptrií.

Na sítnici jsou dva typy receptorů: čípky (cca 130 milionů, tři druhy) pro vnímání barvy a tyčinky (7 milionů, jeden druh) registrující pouze jas. Nejedná se ovšem jen o pouhé detektory. Tyčinky i čípky jsou napojeny na nervové buňky a dohromady vytvářejí unikátní biologickou jednotku na zpracování obrazu. Takto předzpracované informace odcházejí do mozku. Oko samotné totiž nevidí, protože zrakový vjem vzniká až v mozku, který oko celkově řídí.

Při dostatečném osvětlení vidíme barevně (fotopické vidění). Citlivost očí je závislá na vlnové délce světla a maximum je přibližně pro vlnovou délku 555 nm (žlutá barva). Pokud se světelné podmínky zhorší (např. se již začne stmívat), převezmou funkci receptorů světla tyčinky, jež reagují i na velmi slabé osvětlení. Jejich maximum citlivosti leží u 510 nm (modrá barva). Až nastane tma, budou naše zrakové vjemy pouze černobílé a nebudeme schopni dokonale zaostřit (skotopické vidění), protože se zorničky docela otevřely a světlo do oka vstupuje i okrajovými částmi čočky. Ty totiž mají jinou ohniskovou vzdálenost než střed čočky.

Plná adaptace na noční vidění trvá přibližně 40 minut. V první fázi se během pár sekund zvětší zornička a asi deset minut roste citlivost čípků. Ve druhé fázi se pak během půl hodiny regeneruje rhodopsin v tyčinkách, protože ten se přes den rozložil. Při pozorování je pak vhodné si tuto adaptaci zachovat, tedy používat jen tlumené červené světlo (baterku).

7.3.2 FOTOGRAFICKÁ EMULZE

Využití fotografické emulze v pozorovací astronomii znamenalo velký pokrok. Fotografie byla pro astronomii velmi cenná hned ze tří důvodů:

1. umožnila poprvé v historii vytvořit trvalý objektivní záznam astronomického pozorování,
2. je to kumulativní (integrální) detektor, dlouhé expozice umožňují získat fotografický záznam mnohem slabších objektů než je možné stejným dalekohledem vidět očima,
3. je citlivá na širší oblast elektromagnetického záření než oko.

Různé druhy fotografických emulzí byly v astronomii dominantně využívány zhruba od roku 1900 do roku 1990. V současnosti se už pro vědecké účely nepoužívají. Fotografický proces je založen na fyzikálním principu interakce záření (fotonů) s pevnou látkou, na tzv. fotoelektrickém jevu, při kterém dochází k emisi elektronů dopadajícími fotony.

Fotografická emulze bývá nanášena na skleněné desce nebo plastickém pásu a elektrony vyražené po dopadu fotonů jsou v ní zachyceny malými krystalky bromidu stříbrného (například). Po skončení expozice je tzv. latentní obraz chemickým procesem zesílen (tzv. vyvolání a ustálení snímku) do podoby stříbrných zrněk vytvářejících již trvalý záznam.

Nevýhodou fotografické emulze je její nelineární reakce při malých nebo naopak velkých světelných tocích, obtížná kalibrace, její nízká účinnost (1 % až 3 %) a nejasný proces stárnutí fotografického záznamu. Samotný fotografický proces je velmi složitý komplex chemických reakcí, který také není do detailů zcela prozkoumán.

7.3.3 FOTONÁSOCIČE

Zejména nelineární odezva na dopadající proud fotonů byla pro fotografickou emulzi omezující při jejím využití k přesnému měření jasnosti hvězd (fotografická fotometrie). Astronomové hledali detektor, který by na počet dopadajících fotonů reagoval lineárně. Tento jejich požadavek splnily až fotonásobiče, které se staly hlavními detektory tzv. fotoelektrické fotometrie. Tato metoda dominovala přesnému měření jasnosti astronomických objektů od 50. do 80. let minulého století. Fyzikálním principem detekce je fotoelektrický jev, při kterém fotony po svém dopadu uvolňují na fotokatodě elektrony, jejichž proud je kaskádou dynod mnohonásobně zesílen a je dobře měřitelný. Fotonásobiče umožňují měření jasnosti s přesností na milimagnitudy s časovým rozlišením v řádu milisekund. Při měření a jeho zpracování je však nutné brát v potaz tzv. temný proud, který vzniká ve fotonásobiči jako důsledek tepelného pohybu elektronů na anodě a dynodách, a od naměřeného signálu jej musíme odečíst. Registrace je rušena také detekcí částic kosmického záření, závisí na úhlu dopadu světla, jeho polarizaci i orientaci fotonásobiče v magnetickém poli Země. Redukce měření fotonásobičem je možná, pokud během pozorovací noci provádíme kalibrační měření.

7.3.4 CCD DETEKTORY

Polovodičové detektory CCD (charge-coupled devices) sice byly vyvinuty již v 70. letech minulého století, ale jejich širší použití pro astronomická pozorování nastalo až v 90. letech 20. století. Také zde je fyzikálním principem detekce fotoelektrický jev, který nastává po dopadu světla na křemíkovou destičku, jež je členěna na menší části (pixely) a tvoří vlastně obrazovou matici. Během expozice se uvolněné elektrony na každém obrazovém prvku kumulují, teprve po ukončení exponování se postupně adresně načtou do počítače a jsou rovněž změřeny hodnoty na jednotlivých pixelech.

Pro astronomická pozorování mají CCD detektory hned několik velkých výhod:

- jsou velmi citlivé, kvantová účinnost může být přes 80 %, expozice mohou být mnohem kratší než pro fotografickou emulzi,
- mají přesně lineární odezvu a mohou být kalibrovány,
- jejich výstup je možné ihned digitalizovat a dále analyzovat počítačovými programy pro zpracování obrazu.

Není tedy divu, že v současné době tento typ detektorů v profesionální astronomii téměř úplně nahradil fotografickou emulzi. S klesající cenou CCD detektorů a výpočetní techniky je tato technologie v posledních letech dostupná i pro astronomy amatéry (např. pro pozorování proměnných hvězd). Pro profesionální využití je snad jedinou technickou komplikací nutnost potlačení teplotního šumu, takže špičkové CCD detektory musí být chlazeny na velmi nízké teploty. Aby se také velikostí detekční plochy vyrovnaly fotografickým deskám, sestavují se z jednotlivých CCD chipů větší snímací mozaiky.



SHRNUTÍ KAPITOLY

Za astronomické přístroje je možné považovat zejména astronomické dalekohledy, jejich montáže a detektory záření.

Astronomické dalekohledy se podle použitých zobrazovacích prvků rozdělují na refraktory (čočky), reflektory (zrcadla) a katadioptrické dalekohledy (kombinace čoček a zrcadel). Mezi hlavní optické vady patří kulová vada, koma, zkreslení a také barevné vady. Většinou jsou dalekohledy umístěny na paralaktické nebo azimutální montáži, které bývají vybaveny automatickým naváděním.

Jako detektory světla se kromě našich očí používají fotografické emulze, fotonásobiče, ale především polovodičové CCD detektory.

KONTROLNÍ OTÁZKY



1. Jaký je rozdíl mezi reflektorem a refraktorem?
 2. Jaký je základní princip paralaktické montáže?
 3. Uveďte alespoň tři druhy optických vad a vysvětlete jejich příčiny.
 4. Jaký je rozdíl mezi fotonásobičem a CCD kamerou při jejich použití jako astronomických detektorů světla?
 5. Je fotografická emulze lineárním detektorem světla?
-

CVIČENÍ



V rámci cvičení se předpokládá samostatné řešení příkladů z geometrické optiky ze sbírek astronomických příkladů uvedených mezi doporučenými publikacemi. Dále také praktická práce s různými dalekohledy, které jsou k dispozici na observatoři Fyzikálního ústavu (WHOO!).

8 ASTRONOMICKÁ FOTOMETRIE



RYCHLÝ NÁHLED KAPITOLY

V této kapitole jsou přehledně vysvětleny veličiny, které je možné použít k popisu jasnosti astronomických objektů. Pogsonova rovnice je využita k odvození vztahu pro modul vzdálenosti a zavedení pojmu absolutní hvězdná velikost.

Ve druhé části jsou pak krátce popsány vlastnosti ideálního fotometrického systému a jako příklad praktické realizace je popsán Johnsonův fotometrický systém.



CÍLE KAPITOLY

- Seznámení se s fotometrickými veličinami
- Umět definovat hvězdnou velikost a absolutní hvězdnou velikost
- Pochopit princip vytvoření fotometrického systému



ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU

1 hodina



KLÍČOVÁ SLOVA KAPITOLY

Hvězdná velikost, absolutní hvězdná velikost, zářivý výkon, jasnost, bolometrické veličiny, Pogsonova rovnice, fotometrický filtr, Johnsonův fotometrický systém

8.1 Veličiny popisující jasnost astronomických objektů

ZÁŘIVÝ VÝKON

Z fyzikálního hlediska můžeme hvězdy považovat v prvním přiblížení za izotropní zdroje elektromagnetického záření. Jejich celkový *zářivý výkon* L , odpovídající veškeré energii vyzářené ve všech vlnových délkách za jednotku času, se vyjadřuje ve watttech

nebo zářivých tocích tzv. nominálního Slunce L_S , jehož výkon byl rozhodnutím Valného shromáždění IAU z roku 1997 definován takto: $L_S = 3,846 \cdot 10^{26}$ W.

Další používanou veličinou je *zářivost* I (tedy bolometrická intenzita záření), což je zářivý tok vysílaný hvězdou nebo jiným zdrojem záření do prostorového úhlu o velikosti 1 steradiánu. Jeho jednotkou je W sr^{-1} a pro zářící zdroj, který splňuje podmínku izotropního zářiče, platí mezi zářivým výkonem a zářivostí jednoduchý vztah $L = 4\pi I$.

Někdy se používá také veličina *bolometrická jasnost* F (hustota zářivého toku), což je vlastně tok záření, který za sekundu projde jednotkovou plochou (1 m^2) orientovanou kolmo ke směru přicházejících paprsků. Veličinu F vyjadřujeme v jednotkách W/m^2 . Pokud vyjádříme vzdálenost zdroje r v metrech, pak platí jednoduché vztahy $I = r^2 F$, respektive pro izotropní zářiče: $L = 4\pi r^2 F$.

Samotné měření hustoty zářivého toku přicházejícího od hvězd a jiných astronomických zdrojů patří mezi fyzikálně složité a náročné úlohy, protože se jedná o kvantitativně velmi malé hodnoty, které by se měly se shodnou přesností registrovat ve všech vlnových délkách elektromagnetického záření. Navíc kromě technologické náročnosti takových měření je další překážkou při pozorováních z povrchu Země přítomnost jejího plynného obalu, tedy zemské atmosféry. Pro většinu vlnových délek elektromagnetického záření je atmosféra prakticky nepropustná. Výsledky měření je tedy nutné o vliv propustnosti atmosféry v maximální možné míře opravit. Zcela neodstranitelným vlivem, který zkresluje naše měření, je zeslabení světla hvězdy (zdroje) interakcí s neznámým množstvím mezihvězdné látky, která se nachází v mezihvězdném prostoru mezi zdrojem záření a pozorovatelem.

Při vlastním pozorování by se měla měření provádět tzv. *bolometry*, tedy detektory stejně citlivými v celém rozsahu vlnových délek. V takovém případě se jedná o tzv. bolometrická měření a bolometrické veličiny. Jenže takové detektory jsou pouhou fyzikální idealizací, v praxi neexistují. Místo nich se používají veličiny vztažené jenom na určitý obor elektromagnetického záření, který je určen většinou kalibrovaným filtrem s přesně definovaným průběhem propustností.

Je zřejmé, že zvláštní roli bude mít *vizuální obor*, definovaný filtrem označovaným písmenem V s propustností odpovídající spektrální citlivosti lidského oka, tedy maximum propustnosti filtru leží u vlnové délky 550 nm a efektivní šířka filtru je 89 nm. Pak se hustota zářivého toku v barvě V ztotožňuje s hustotou světelného toku, tedy *jasností* j (jednotkou jasnosti je W/m^2 , ale lze ji vyjadřovat také v jednotkách zavedených pro světlo, tedy lumen/m^2). Velmi podobně můžeme zavést i další „nevizuální“ jasnosti j_s definované vždy jako hustoty zářivého toku po průchodu určitým definovaným filtrem.

HVĚZDNÁ VELIKOST

V astrofyzice se z tradičních i praktických důvodů vyjadřuje jasnost zdroje záření také veličinou pojmenovanou jako *hvězdná velikost*, která se většinou označuje jako m . Jednotkou této veličiny je magnituda ([mag]).

Hvězdná velikost m je logaritmická veličina svázaná s příslušnou jasností j tzv. *Pogsonovou rovnicí*: $m = -2,5 \log(j/j_0)$ [mag], kde j_0 je tzv. referenční jasnost, která odpovídá jasnosti zdroje s hvězdnou velikostí $m = 0$ mag. Podle spektrálního oboru, ke kterému je jasnost vztahena, pak rozlišujeme např. *vizuální hvězdnou velikost* m_V , *bolometrickou hvězdnou velikost* m_{bol} , atp.

Převodní vztahy mezi bolometrickou jasností F a bolometrickou hvězdnou velikostí m_{bol} vycházejí z definice, že hvězda s bolometrickou hvězdnou velikostí $m_{bol} = 0$ mag působí mimo zemskou atmosféru hustotu zářivého toku $F_0 = 2,553 \cdot 10^{-8}$ [W m⁻²].

Jestliže se ale omezíme pouze na *vizuální hvězdnou velikost* m_V , pak je stanovena referenční jasnost $j_0 = 2,54 \cdot 10^{-6}$ [lm m⁻²] = $2,54 \cdot 10^{-6}$ luxů, což odpovídá hustotě zářivého toku přibližně $3,2 \cdot 10^{-9}$ [W m⁻²].

Pro převod mezi bolometrickou hvězdnou velikostí a vizuální hvězdnou velikostí je možné využít jednoduchý vztah: $m_{bol} = m_V + BC$, kde BC je tzv. *bolometrická korekce*, která vlastně charakterizuje distribuci energie ve spektru zdroje (v případě hvězd je determinována především teplotou). Bolometrická korekce byla definována tak, aby byla nulová u hvězd o povrchové teplotě kolem 7 000 K (hvězdy spektrálního typu F). Pro vyšší i nižší teploty však hodnota bolometrické korekce klesá a pro některé zdroje může mít hodnotu i v řádu jednotek magnitud.

Protože přímé měření bolometrických veličin je prakticky nemožné, tak se v observační astrofyzice v řadě aplikací nahrazují bolometrické veličiny snáze měřitelnými veličinami vizuálními. Takový zjednodušující postup se však nemůže používat pro všechny astrofyzikální problémy a všude tam, kde se bude jednat o celkové množství energie, které zdroj vydává prostřednictvím záření, je nutné pracovat s veličinami bolometrickými.

Bolometrická jasnost F určitého astronomického zdroje záření o zářivosti I (výkonu L) je nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti r , v níž jasnost měříme a jestliže porovnáme jasnosti F_1 a F_2 téhož zdroje záření, které však změříme v odlišných vzdálenostech r_1 a r_2 , dostaneme pro jejich poměr následující vztah:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{I r_1^2}{I r_2^2} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2.$$

Po dosazení do Pogsonovy rovnice (s bolometrickými hvězdnými velikostmi m_1 a m_2), dostaneme důležitý vztah pro jejich rozdíl ve tvaru:

$$m_2 - m_1 = -2,5 \log \left(\frac{F_2}{F_1} \right) = 5 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right).$$

Tato rovnice má však univerzální platnost pro libovolný typ hvězdných velikostí. Jak jsme si ukázali, závisí hodnota hvězdné velikosti nejen na zářivém výkonu zdroje záření, ale také na vzdálenosti. Pokud tedy chceme porovnávat zdroje podle jejich zářivého výkonu s využitím veličiny hvězdné velikosti, musíme tuto veličinu vhodným způsobem „normovat“, tedy zbavit závislosti na vzdálenosti.

Pro tento účel je výhodné zavést veličinu *absolutní hvězdná velikost* M , což je *hvězdná velikost* zdroje záření pozorovaného ze standardní vzdálenosti r_0 . Ve stelární astronomii byla jako standardní zvolena vzdálenost $r_0 = 10$ parseků (tedy $3,08568 \cdot 10^{17}$ m).

Pro tzv. *modul vzdálenosti* ($m - M$) pak můžeme napsat rovnici ve tvaru:

$$m - M = 5 \log r - 5 = -5 \log \pi - 5,$$

kde r je vzdálenost v parsecích a π je roční paralaxa v úhlových vteřinách. Například pro Slunce je modul vzdálenosti $(m - M)_S = -31,57$ mag.

8.2 Fotometrické systémy

Z praktických důvodů se pro fotometrická měření začaly používat sady filtrů s přesně definovanými propustnostmi. Propouštěné intervaly elektromagnetického záření se označují jako tzv. *barvy* a každý fotometrický systém jich má několik. Výběr vhodných pásem sice vyplývá z astrofyzikální podstaty registrovaného záření, ale často je ovlivněn také technickými a finančními nároky při jejich výrobě. Podle šířky pásma propustnosti je možné rozdělit systémy a jejich jednotlivé filtry do tří skupin:

- širokopásmové systémy pokrývající nejméně 30 nm v každém z filtrů,
- středněpásmové systémy, s pásmy od 10 do 30 nm,
- úzkopásmové systémy s křivkou propustnosti několika málo nm.

Pro každý systém je používán specifický postup, kterým se pozorované hvězdné velikosti převádějí na standardní. V dobách fotometrického pravěku měla každá observatoř svůj systém. Některé však byly natolik vhodně zvoleny, že se postupně staly celosvětovými.

Jaké vlastnosti by měl mít ideální fotometrický systém? Takový systém pro potřeby stelární astronomie by měl mít tyto parametry:

- „monochromatickou hvězdnou velikost“ ve vizuální vlnové délce (nejčastěji V),
- „fotometrický gradient“ rozložení energie ve spektru (nejčastěji v okolí V),

- alespoň jeden parametr postihující odchylku rozložení energie od záření absolutně černého tělesa příslušné efektivní teploty (nejčastěji kolem Balmerova skoku),
- parametr popisující velikost mezihvězdné extinkce.

Takový ideální fotometrický systém ale v praxi nemůže existovat, takže všechny používané systémy představují vždy jen kompromis a splňují výše uvedené body jen částečně.

8.2.1 JOHNSONŮV SYSTÉM *UBV*

Jako příklad konkrétního fotometrického systému si uveďme patrně nejrozšířenější takový systém ve stelární astronomii – *Johnsonův*. Jedná se o systém širokopásmových filtrů *UBV* zavedený asi v polovině 20. století.

Jeho původní verze je definována třemi filtry:

filtr *U* – propustnost od 300 nm do 420 nm s maximem propustnosti u 365 nm,
filtr *B* – propustnost od 360 nm do 500 nm s maximem u 440 nm,
filtr *V* – propustnost od 460 nm do 740 nm s maximem u 545 nm.

K jeho rozšíření a oblíbenosti přispělo i to, že Johnson a jeho kolegové proměřili mnoho tisíc hvězd (a výsledky publikovali) a také skutečnost, že systém má dobře definován vztah mezi určitými fyzikálními vlastnostmi hvězd a barvami určenými barevnými indexy (*U-B*) a (*B-V*). Původní systém byl později rozšířen do červené a infračervené oblasti spektra - filtry *R* (700 nm), *I* (900 nm), *J* (1 250 nm), *K* (2 200 nm) a *L* (3 400 nm).



SHRNUTÍ KAPITOLY

V kapitole jsou představeny základní fotometrické veličiny, např. zářivý výkon, hvězdná velikost, absolutní hvězdná velikost atp. Fotometrické filtry se podle pásma propustnosti dělí do tří skupin. Podrobněji je zde popsán nejpoužívanější fotometrický systém (Johnsonův systém *UBV*).



KONTROLNÍ OTÁZKY

1. Jak je definována veličina *zářivost* ?
2. Co je to *Pogsonova rovnice*? Napište ji a vysvětlete.
3. Co je to *absolutní hvězdná velikost*?
4. Jaké druhy fotometrických systémů známe?

CVIČENÍ



V rámci cvičení se předpokládá samostatné řešení příkladů zaměřených na využití Pogsonovy rovnice k výpočtům hvězdných velikostí nebo absolutních hvězdných velikostí, které jsou obsaženy ve sbírkách astronomických příkladů uvedených mezi doporučenými publikacemi.

NEZAPOMEŇTE NA ODPOČINEK



Dvacetiminutová procházka lesem nebo městským parkem se i v hektickém zkouškovém období do časového harmonogramu vejde a zvýší efektivitu přípravy. Stačí to už jen vyzkoušet!

9 ZÁKLADY ASTRONOMICKÉ SPEKTROSKOPIE



RYCHLÝ NÁHLED KAPITOLY

Kapitola je zaměřena na stručnou rekapitulaci základů astronomické spektroskopie. Je vysvětlena podstata Harvardské spektrální klasifikace a zavedení luminozitních tříd. Je představen původní Hertzsprungův-Russellův diagram. Závěr kapitoly se věnuje praktické spektroskopii.



CÍLE KAPITOLY

- Naučit se základní spektrální klasifikaci a dvouparametrickou klasifikaci
 - Znat fyzikální veličiny zjistitelné spektrální analýzou
 - Umět „číst“ v Hertzsprungově-Russellově diagramu
-



ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU

2 hodiny



KLÍČOVÁ SLOVA KAPITOLY

Spektrum, luminozitní třída, Hertzsprungův-Russellův diagram, spektrální rozlišení, Morganova-Keenanova klasifikace

9.1 Spektra hvězd a jiných astronomických objektů

Základy spektroskopie jako fyzikálního oboru, který studuje vznik, a především vlastnosti spekter, jsou náplní základního fyzikálního kurzu a jsou tedy zařazeny do jiných předmětů a laboratorních cvičení bakalářského studia. Spektroskopické zkoumání je vlastně metoda založená na interakci elektromagnetického záření se vzorkem látky a jistým specifickým spektroskopie v astrofyzice je věnována tato kapitola.

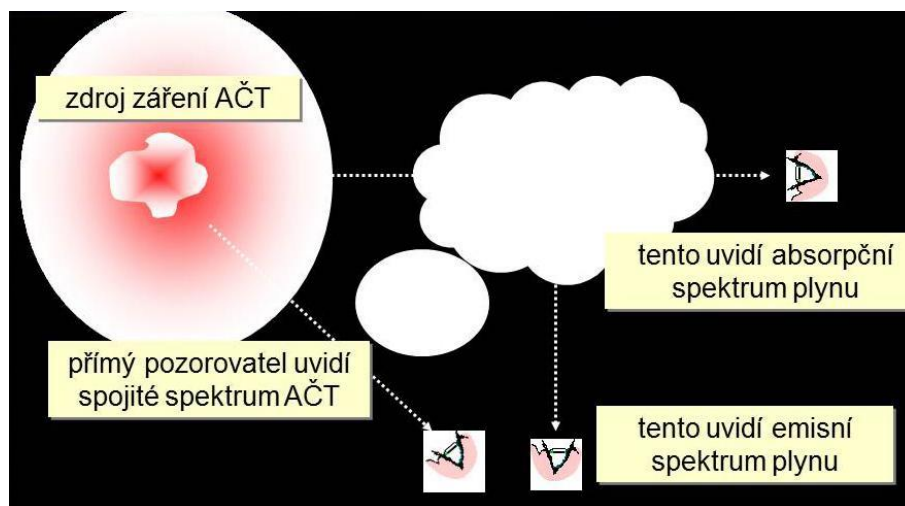
Za zakladatele spektroskopie je možné považovat Jana Marka Marci (https://cs.wikipedia.org/wiki/Jan_Marcus_Marci) a siru Isaaca Newtona (https://cs.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton). Ale první spektrometr zkonstruovali Kirchhoff a Bunsen až v roce 1860.

Spektroskopie elektromagnetického záření, které k nám přichází od astronomických objektů, je technicky a technologicky velmi náročná, protože se jedná o velmi nízké toky záření, které je obtížné registrovat i v jejich integrální podobě (viz také kapitola věnovaná astronomické fotometrii).

Ve spektrech astrofyzikálních zdrojů můžeme rozlišit tři různé spektrální typy:

1. **spojité spektrum** – odpovídá záření absolutně černého tělesa (dále AČT),
2. **absorpční spektrum** – je to vlastně spojité spektrum, jehož některé části jsou „zslabeny“ oproti hodnotě odpovídající záření AČT důsledkem absorpce prostředím v prostoru mezi zdrojem a pozorovatelem,
3. **emisní spektrum** – jedná se o diskrétní oblasti nebo v obecné podobě pak o „nadbityky“ oproti záření AČT v určitých částech spojitého spektra vznik emisních čar, emisní spektrum vyzařuje např. oblast plynu, jež absorbovala záření jiného zdroje.

V praxi jsou pak spektra tvořena směsicí všech tří typů. Velmi často záleží typ spektra, které pozorujeme, na geometrickém uspořádání zdroje, oblaku plynu a pozorovatele, jak to ilustruje obrázek.



Obrázek 25: Vliv geometrického uspořádání polohy zdroje, prostředí a pozorovatele na druh pozorovaného spektra.²⁶

²⁶ Zdroj: <http://astronomy.swin.edu.au/sao/story/downloads.xml>

Záření ze stelárních zdrojů k nám přichází z relativně velmi tenké vrstvy obalující hvězdné nitro, kterou označujeme jako tzv. *hvězdnou atmosféru*. Hvězdy jako tělesa nemají přesně ohraničený tvar, plynule přecházejí do okolního kosmického prostředí. Zároveň vnitřní části hvězd není možné pozorovat přímo, protože jsou skryty za opticky hustými, neprůhlednými vrstvami a nacházejí se ve stavu tzv. *lokální termodynamické rovnováhy* (LTE), část procházejících fotonů uniká do kosmického prostoru a odnáší s sebou energii. Hvězdná atmosféra je právě ta vnější oblast hvězdy, ze které k nám přichází její záření. V ní už je narušen stav termodynamické rovnováhy a 99 % záření v optické oblasti spektra pochází z tzv. *fotosféry*. Svrchní a opticky řídké vrstvy atmosféry, které se nacházejí nad fotosférou, označujeme jako *chromosféru* a *korónu*.

Přehled fyzikálních veličin, které můžeme zjistit ze spektra hvězdy, shrnuje následující tabulka:

fyzikální veličina	spektroskopický parametr
prvek	poloha spektrální čáry
množství látky	intenzita nebo ekvivalentní šířka čáry
makroskopické rychlosti	poloha a profil čáry
teplota, tlak, gravitační zrychlení	intenzita čáry
mikroskopické rychlosti, turbulence	profil čáry
magnetické pole	polarizace, Zeemanovy komponenty čáry

9.2 Spektrální klasifikace hvězd

Nyní se zaměříme na stelární spektroskopii. V předminulém století, kdy se začala spektroskopie v astronomii využívat, se právě hvězdy staly objekty, jejichž spektra byla pořizována velmi systematicky. Vzhled spekter jednotlivých hvězd se lišil a tak je astronomové začali třídit a sestavovat do skupin, které si byly vizuálně podobné.

Prvním rozsáhlejším vědeckým pokusem o spektrální klasifikaci hvězd je práce Angela Secchiho, který již v roce 1868 publikoval katalog se 4000 spektry a rozdělil hvězdná spektra do těchto čtyř skupin:

- I – bílé hvězdy pouze s čarami H (Sirius, Vega, Altair, Regulus),
- II – nažloutlé hvězdy slunečního typu (Arcturus, Capella) se spoustou čar tzv. kovů,
- III – oranžové hvězdy s absorpčními pásy (Betelgeuze, Mira), zpravidla proměnné,
- IV – červené s absorpčními pásy, ostrými u červeného a neostrými u modrého křídla.

9.2.1 HARVARDSKÁ KLASIFIKACE

V roce 1890 Pickering a Flemingová rozšířili posloupnost spektrálních tříd od bílých hvězd třídy A s nejsilnějšími čarami vodíku až po nejchladnější červené označované jako třída Q. Později bylo zjištěno, že některé třídy jsou nadbytečné a další je nutno v klasifikaci

přesunout jinam a tak vznikla harvardská spektrální posloupnost: **O B A F G K M**. Každá z těchto tříd je rozdělena do 10 podtříd označovaných čísly 0 až 9.

Pozorovaná hvězdná spektra lze sestavit v plynulou řadu podle klesající teploty. Kritériem pro zařazení jednotlivé hvězdy jsou relativní intenzity některých vybraných spektrálních čar, které jsou závislé právě na teplotě. Harvardská klasifikace je jednoparametrická, jako rozhodující jsou brány ty rysy spektra, které závisí především na efektivní teplotě hvězdy.

spektrální třída	charakteristiky spektrální třídy
O	čáry He II, He I, H I, O III, N III, C III, Si IV
B	čáry He I, H I, C II, O II, N II, Fe III, Mg III
A	čáry H I (Balmerova série), ionizované kovy
F	čáry H I, Ca II, Ti II, Fe II
G	čáry Ca II, neutrální kovy, molekuly
K	čáry Ca I, neutrální kovy, molekuly
M	pásy molekul TiO, čáry Ca I

V posledních desetiletích byla spektrální posloupnost rozšířena do oblasti nižších teplot, za spektrálním typem M8 následuje typ L0 až L8 a spektrální třídy T a Y.

Již v roce 1925 publikovala Payne-Gaposhkinová zásadní vědeckou práci, která ukazuje, že chemické složení fotosféry naprosté většiny hvězd je velice podobné: 70 % H, 28 % He a zbytek připadne na všechny ostatní prvky. Na každých 10 000 atomů H připadá zhruba 1000 atomů He, 8 atomů C, 15 atomů O, 12 atomů N, 0,2 atomů Si a ostatních ještě méně. Skutečnost, že zejména ve spektrech chladnějších hvězd převládají právě málo četné prvky, je způsobena tím, že jejich atomy lze mnohem jednodušeji vybudit k záření než atomy těch nejčetnějších prvků.

9.2.2 MORGANOVA-KEENANOVA KLASIFIKACE

Každé stelární spektrum nás informuje nejen o efektivní teplotě hvězdy, ale také o povrchovém gravitačním zrychlení g . Hmotnosti hvězd se mění v relativně malém intervalu, a tak odvozená hodnota *gravitačního zrychlení* je velmi dobrou informací o poloměru hvězdy. Například pro hvězdu spektrálního typu K0 se můžeme setkat s některou z těchto variant:

- hvězda hlavní posloupnosti, kde $g = 1,1 g_{\odot}$,
- běžný obr, pak je $g = 1,4 \cdot 10^{-2} g_{\odot}$,
- hmotný veleobr, s hodnotou $g = 3,3 \cdot 10^{-4} g_{\odot}$.

Protože rozdíly v hodnotě povrchového gravitačního zrychlení jsou řádové, musí být podmínky pro vznik spektra v atmosférách těchto typů hvězd velmi rozdílné. Pokud je gravitační zrychlení g vysoké, pak je hvězdná atmosféra je poměrně tenká a relativně hustá. To znamená, že dochází k častým srážkám atomů nebo iontů a spektrální čáry hvězdy jsou rozšířené tlakem. Spektrální čáry hvězd s malým povrchovým zrychlením, zejména veleobřů jsou naopak poměrně ostré a hluboké. Ze spektra je tak možné zjistit hodnotu gravitačního zrychlení a tím i přibližný poloměr hvězdy.

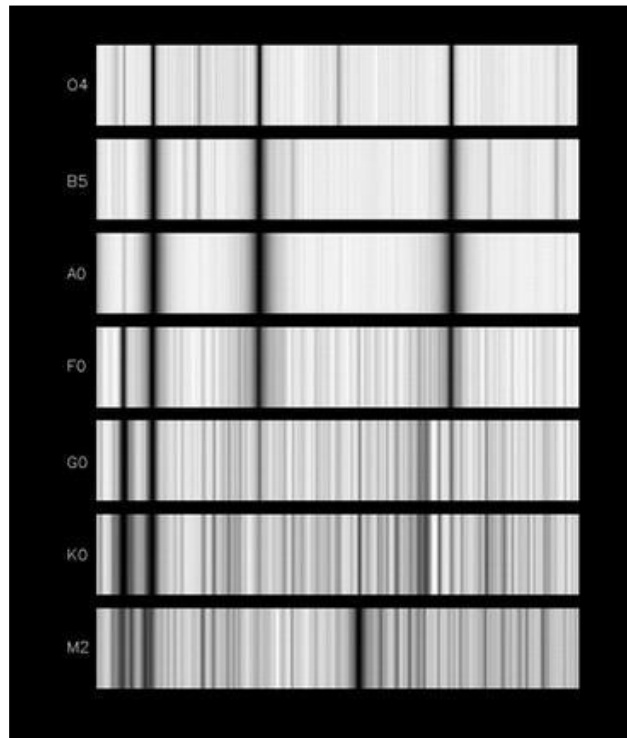
Od druhé poloviny 20. století se tedy používá dvouparametrická Morganova-Keenanova klasifikace, ve které se spektrální typ harvardské spektrální klasifikace na základě rozboru vzhledu spektra hvězdy doplňuje o tzv. *luminozitní třídu*:

Ia – jasní veleobři
Ib – veleobři
II – nadobři
III – obři
IV – podobři
V – hvězdy hlavní posloupnosti
VI – podtrpaslíci
VII – bílí trpaslíci

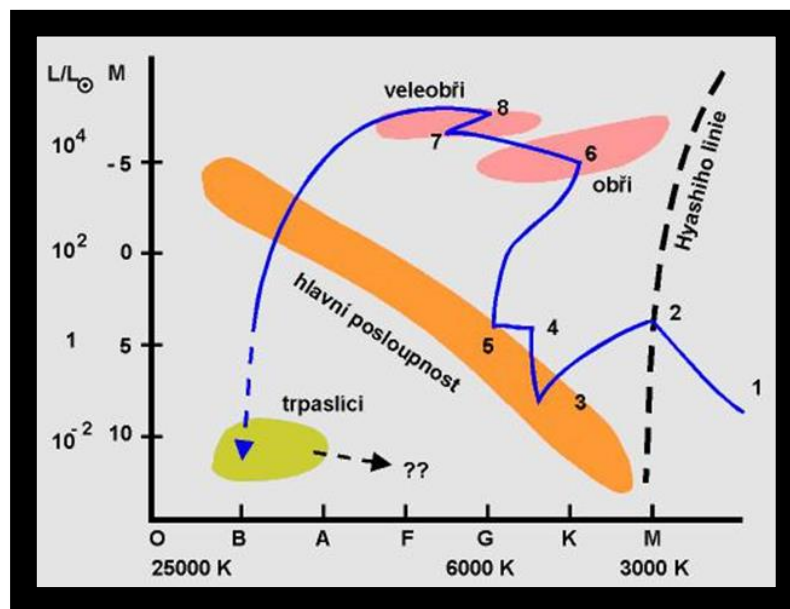
Jestliže známe spektrální klasifikaci hvězdy v Morganově-Keenanově klasifikaci, pak můžeme podle dostupných tabulek zhruba stanovit efektivní teplotu hvězdy, její absolutní hvězdnou velikost, tedy i vzdálenost a její poloměr. To všechno jsou charakteristiky, které určují poměrně jednoznačně i její vývojové stadium.

9.2.3 HERTZSPRUNGŮV-RUSSELLŮV DIAGRAM

Pokud vytvoříme graf závislosti základních fyzikálních charakteristik hvězd (např. M , L , T_e , R), zjistíme zajímavou skutečnost, že obrazy jednotlivých hvězd v takto sestrojených diagramech nepokrývají jejich plochu rovnoměrně, ale jsou soustředěny do několika oblastí. Již na počátku 20. století byl sestrojen takový diagram, který vyjadřoval závislost zářivého výkonu na efektivní teplotě hvězd, tzv. Hertzsprungův-Russellův diagram, zkráceně též HR diagram. Na diagramu jsou zřetelně odlišitelné skupiny hvězd stejné luminozitní třídy. Tyto skupiny jsou obrazy hvězd, které se nacházejí ve stejném evolučním stadiu.



Obrázek 26: Harvardská spektrální klasifikace. Na obrázku jsou fotografie reálných spekter pro základní spektrální třídy. Je zřetelné, že s klesající efektivní teplotou hvězd se zvyšuje množství absorpčních čar v jejím spektru.²⁷



Obrázek 27: Velmi schematická verze HR diagram, modrá linie znázorňuje evoluční dráhu hvězdy o hmotnosti Slunce.²⁸

²⁷ Zdroj: http://astro.hopkinsschools.org/course_documents/stars/spectral_classes/spectral_classes.htm

²⁸ Zdroj: <http://astronomy.swin.edu.au/sao/story/downloads.xml>

9.2.4 PRAKTICKÁ SPEKTROSKOPIE

Množství informací, které můžeme ze spekter zjistit je dáno především jeho kvalitou a rozlišením. Spektrální rozlišení je pro každé astrofyzikální spektrum možné definovat vztahem:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda},$$

kde λ je pozorovaná vlnová délka a $\delta\lambda$ nejmenší rozlišitelný interval vlnových délek v jejím okolí. Pojmem „disperze“ bývá označována veličina $d\lambda/dx$ v ohniskové rovině spektrografu (jednotkou je [nm/mm]), nízká disperze je cca 200 A/mm, vysoká 10 A/mm a méně.

Samotné detektory elektromagnetického záření jsou velmi širokopásmové, mají tedy velmi špatné spektrální rozlišení. Ke zlepšení rozlišení je nutné použít další optické prvky, tedy filtry, hranoly nebo difrakční mřížky.



SHRNUTÍ KAPITOLY

Spektrální klasifikace, ať už jednoparametrická nebo dvouparametrická MK klasifikace, je jedním ze silných nástrojů moderní astrofyziky. V kapitole jsou uvedeny vlastnosti hvězd jednotlivých spektrálních tříd a také přehled fyzikálních veličin, které jsou měřitelné pokročilou spektrální analýzou.



KONTROLNÍ OTÁZKY

1. Co je to Harvardská spektrální klasifikace?
2. Vyjmenujte jednotlivé spektrální třídy a jejich základní charakteristiky.
3. Co to jsou luminozitní třídy?
4. Vysvětlete HR diagram a vyznačte v něm obraz Slunce.
5. Co je to rozlišovací schopnost spektrografu?



CVIČENÍ

Cvičení budou věnována rozsáhlejší práci s HR diagramy v jejich klasické i elektronické podobě a také praktické spektrální klasifikaci nejvýznamnějších hvězd.

10 VÝVOJ HVĚZD

RYCHLÝ NÁHLED KAPITOLY



Proces vzniku a vývoje hvězd je souhrn fyzikálních procesů, které jsou studovány s využitím matematických modelů hvězd, které jsou většinou reprezentovány soustavou diferenciálních rovnic. V této kapitole jsou kvalitativně rekapitulovány podstatné etapy vývoje hvězd s různou hmotností.

CÍLE KAPITOLY



- Seznámení s procesem vzniku hvězd
 - Pochopení základních fyzikálních principů, které jsou spojeny s vývojem hvězd
 - Seznámení se se závěrečnými útvary vývoje hvězd různých hmotností
-

ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU



4 hodiny

KLÍČOVÁ SLOVA KAPITOLY



Zárodečné mračno, fáze smršťování, hydrostatická rovnováha, termonukleární fúze, jádro a obal, hlavní posloupnost, posloupnost obrů, bílý trpaslík, neutronová hvězda, černá díra, výbuch supernovy.

10.1 Vznik hvězd

Hvězdy v současné etapě vývoje vesmíru vznikají nejčastěji ve skupinách z náhodného zhuštění v oblaku poměrně chladné a husté mezihvězdné látky, uvnitř tzv. obřích molekulových mračen, což jsou gravitačně vázané objekty složené z plynu a prachu o hmotnostech od 10^5 do $10^6 M_{\odot}$ a o lineární velikosti asi 50 pc. V těchto útvarech je obsaženo přes

50 % mezihvězdné látky v galaxiích a doba jejich stabilní existence se odhaduje na 10^8 let.

Molekulová mračna jsou tvořena molekulárním a neutrálním vodíkem, heliem a dalšími prvky. Velmi podstatnou složkou jsou ale zrníčka mezihvězdného prachu, která stíní vnitřní části mračna a přebytečné teplo dokáží účinně vyzářit do prostoru. Tak se tam udržuje velmi nízká teplota několika Kelvinů. Právě nízká teplota vylepšuje fyzikální podmínky ke vzniku hvězd, jak uvidíme při formulaci Jeansova kritéria.

Samotná rychlost vznikání hvězd je obecně velmi proměnlivá, ve vývoji galaxií je možné doložit období, kdy vznik hvězd téměř ustane anebo naopak je velmi překotný.

JEANSOVO KRITÉRIUM

Pokud se podíváme na obecné fyzikální zákony, tak nalezneme řadu skutečností, které genezi nových hvězd brání. Už samotný vznik fluktuace hustoty, kdy se část oblaku začne gravitačně hroutit, je automaticky doprovázen zvýšením neuspořádaného tepelného pohybu molekul, který má tendenci vzniklou fluktuaci opět „zrušit“.

Bylo zjištěno, že takto náhodně vzniklá fluktuace hustoty se nerozplyne, pokud je splněno tzv. *Jeansovo kritérium*:

$$M > M_J \cong \textit{konst.} \left(\frac{kT}{G\mu_a m_u} \right)^{3/2} \frac{1}{\sqrt{\rho}},$$

kde M_J je Jeansova (kritická) hmotnost, k Boltzmannova konstanta, G gravitační konstanta, μ_a průměrná hmotnost molekul v atomových hmotnostních jednotkách m_u a konstanta nabývá hodnot od 0,1 do 10 v závislosti na rozložení hustoty uvnitř oblaku.

Jestliže se na vztah podrobněji podíváme, tak z něj vyplývá, že hvězdy mohou vznikat pouze v částech molekulových mračen s nejnižší teplotou a maximální možnou hustotou materiálu. Jenže rozbořením reálných poměrů v takovém oblaku bylo zjištěno, že pro samovolný vznik nové hvězdy nejsou ani tyto podmínky dostačující. Nadkritické zhuštění je možné pouze nějakým vnějším impulzem, kterým může být:

- srážka molekulového oblaku s rozpínající se oblastí velmi horkého a řídkého ionizovaného vodíku (oblasti H II)
- vzplanutí blízké supernovy
- průchod mračna hustotní vlnou ve spirální galaxii, což je fyzikálně vlastně srážka oblaku se stacionární rázovou vlnou vytvářející spirální strukturu galaxie
- nepružná srážka dvou galaxií (pravděpodobné v galaktických kupách)

Zhuštění se v průběhu kontrakce začne rozpadat na menší části, které pak můžeme považovat za zárodky hvězd, tzv. protohvězdy. Z fyzikálního hlediska pak určitou překážku vývoje představuje zákon zachování momentu hybnosti. Jestliže se nějaká část oblaku začne smršťovat, rotuje a pokud odstředivé zrychlení vyvolané rotací někde v protohvězdě přesáhne hodnotu gravitačního zrychlení, kontrakce se zde zastaví a celý nestabilní útvar se může rozpadnout.

A tak vývoj směrem ke vzniku hvězdy může pokračovat jedině tehdy, když se zahájí procesy, jimiž se zárodek hvězdy přebytečného momentu dostatečně účinně zbaví – např. vytvořením rozsáhlého plochého *akrečního disku* o poloměru stovek astronomických jednotek, který na sebe naváže nadbytečnou část momentu hybnosti

Během gravitačního hroucení protohvězdy probíhají dvě fáze: počáteční rychlou fází následuje mnohem pomalejší smršťování.

Rychlá fáze není vlastně nic jiného než volný pád částic do centra tíže. Takovým procesem by se například Slunce zhroutilo do bodu asi za 30 minut, pro oblak s typickou koncentrací 10^4 molekul vodíku v cm^3 (s hustotou $3,3 \cdot 10^{-17} \text{ kg m}^{-3}$) dostáváme charakteristický čas 350 000 let

V centrálních částech hvězdy v důsledku rychlého kolapsu rychle vzrůstá hustota, teplota a tlak materiálu, roste i gradient tlaku až do ustavení hydrostatické rovnováhy. Hvězda na počátku této pomalé fáze kontrakce je objektem v rovnovážném stavu drženým pohromadě vlastní gravitací.

V průběhu kolapsu pak klesá potenciální energie a roste vnitřní – kinetická energie – a část energie se dostává do prostoru v podobě záření. Rychlost smršťování a ohřívání bude diktováno rychlostí úniku energie, tedy zářivým výkonem hvězdy. Hvězda je tak únikem tepla z povrchu paradoxně zahřívána.

10.2 Zapálení termonukleárních reakcí

V rané fázi vývoje vstupují do hry termonukleární reakce jako velmi vydatný alternativní zdroj energie a termonukleární reakce probíhají nejúčinněji v centru smršťující se hvězdy, v místech, kde je největší hustota a teplota. Během smršťování se nejprve zapalují termonukleární reakce, při nichž se mění lehčí prvky, jako lithium, bór a deuterium, na helium. Ale po spotřebování prvků s relativně nízkou „zápalnou teplotou“ pokračuje smršťování jako předtím.

Teprve až v nitru hvězdy vzroste teplota alespoň na 8 milionů K, začnou ve hvězdě dostatečně rychle probíhat vodíkové reakce a část zářivého výkonu hvězdy bude na úkor výkonu uvolněného vodíkovými reakcemi. Postupně se zvyšuje se tempo vodíkových reakcí, a tím i jejich energetický přínos, v okamžiku, kdy je schopen výkon pocházející

z termonukleárních reakcí plně hradit veškeré energetické ztráty hvězdy způsobené vyzařováním, se smršťování hvězdy zastaví. Hvězda vstupuje do nejdelší a nejstabilnější části své existence – stává se hvězdou hlavní posloupnosti.



PRO ZÁJEMCE

Výjimkou jsou objekty o hmotnosti menší než $0,075 M_{\odot}$, protože v průběhu pomalé fáze smršťování se v nich zvýší hustota tak, že se v centrálních oblastech hvězdy objeví elektronová degenerace, která proces smršťování zastaví. Teplota v těchto tělesech nepřesáhne 8 milionů K a termonukleární reakce se nezapálí. Takové objekty, které jsou svými vlastnostmi na hranici mezi velkými planetami a hvězdami, označujeme jako **hnědé trpaslíky**.

Hnědí trpaslíci po svém neúspěšném pokusu o zapálení vodíkových reakcí končí aktivní část svého vývoje a mění se v elektronově degenerované objekty složené převážně z vodíku. Vzhledem k tomu, že tlak v elektronově degenerovaných objektech prakticky nezávisí na teplotě, jejich poloměr se v průběhu času mění jen nepatrně. Hnědý trpaslík však má nenulovou povrchovou teplotu a nutně dále ztrácí svou energii vyzařováním. Tentokrát se tak děje výhradně na účet vnitřní energie hvězdy, potenciální energie se již nemění. Hvězda chladne, její vnitřní i povrchová teplota klesá. Hnědý trpaslík se pozvolna stává nezářícím **černým trpaslíkem**.

10.3 Hvězdy hlavní posloupnosti

Hvězdami *hlavní posloupnosti* (Main Sequence – MS) jsou ty hvězdy, jejichž zářivý výkon je takřka plně hrazen z energie, která se v jejich centrálních částech uvolňuje termonukleární přeměnou vodíku na helium. Ve stadiu hvězdy hlavní posloupnosti hvězdy stráví až 90 % svého aktivní existence.



DEFINICE

Množina všech bodů na HR diagramu, které obsadí chemicky homogenní hvězdy standardního chemického složení (70 % H, 28 % He), je označována jako *hlavní posloupnost nulového stáří* (Zero Age Main Sequence – ZAMS). Poloha hvězdy na ZAMS je jednoznačně určena její hmotností.

Víme, že závislost hmotnosti a zářivého výkonu hvězdy je možné přibližně popsat vztahem $L \sim M^{3,5}$ a jedná se o důsledek vlastností vnitřní stavby hvězd, kdy teplejší

hvězdy s větší hmotností jsou od okolí méně izolovány než hvězdy s nižší hmotností. Z toho mimo jiné vyplývá, že hmotnější hvězdy mají ve svém centru vyšší teplotu, než hvězdy lehčí.

Nejhmotnější hvězdy stráví na hlavní posloupnosti řádově miliony let, nejméně hmotné pak stovky miliard let. Vesmír není starší než 15 miliard let, takže ani ty nejstarší hvězdy ve vesmíru s hmotností menší než $0,85 M_{\odot}$ ještě neopustily hlavní posloupnost a jejich vývoj po opuštění hlavní posloupnosti nelze tudíž ověřit pozorováním.

Ve hvězdách o hmotnosti menší než $2 M_{\odot}$ je energeticky nejvýznamnější tzv. protonově-protonový řetězec. Jaderné reakce hoří v blízkosti centra, přenos energie se děje zářivou difuzí, vyhořelý materiál se tu tudíž nepromíchává. Nejrychleji probíhají jaderné reakce v samotném centru, protože tam je největší teplota i hustota; směrem od centra se tempo jaderných reakcí zvolňuje. Největší odchylku od standardního chemického složení proto lze očekávat právě v centru, směrem k povrchu bude chemické složení monotónně přecházet ve složení standardní.

Poněkud jiné poměry jsou ve hvězdách hmotnějších, kde se energeticky nejúčinnější jeví teplotně enormně citlivý CNO cyklus. Díky této přecitlivělosti dochází ke spalování vodíku dostatečně rychle jen v nepatrném ohnisku v samotném centru. Zdroj energie je zde takřka bodový a zářivá difúze není schopna veškerou energii přenášet. Nastupuje tedy konvekce, která nejen že odvádí teplo z této přehřáté oblasti, ale slouží též jako účinný mechanismus dopravující do místa jaderného hoření stále čerstvý jaderný materiál.

I během vývoje hvězd hlavní posloupnosti dochází k závažným změnám ve vnitřní stavbě hvězdy, které se pak odrazí i v jistém pozvolném vývoji pozorovatelných charakteristik hvězd. Rozhodující příčinou vývoje je změna chemického složení hvězdy v oblasti jaderného hoření (u hmotných hvězd v oblasti konvektivního jádra).

V centrálních oblastech hvězd se postupně hromadí popel vodíkových jaderných reakcí – He. Tato oblast je oddělena od povrchových vrstev hvězdy statickou zónou, kde se energie přenáší výhradně zářivou difuzí, k místům jaderného hoření se nemůže dostat čerstvý hvězdný materiál bohatý na vodík, třebaže je ho ve hvězdě dostatek.

V jádru se postupně zásoba vodíku vyčerpává. Dalo by se tak očekávat, že s postupem času bude jaderný výkon centra klesat. Opak je však pravdou. Souvisí to se skutečností, že při H reakcích klesá počet částic na 1 kg látky. Pokud by se udržovala na stejné teplotě a hustotě, pak by v ní klesal tlak, což by ovšem nutně muselo vést k narušení stavu mechanické rovnováhy. Ve skutečnosti je však tato rovnováha ve hvězdě neustále úzkostlivě udržována, což znamená, že hvězda uvnitř přestavuje – centrální části hvězdy se pozvolna hroutí, zahušťují, jejich konfigurační energie klesá.

Při tomto pozvolném procesu se uvolňuje energie, která z části odchází z hvězdy, zčásti v ní však zůstává a způsobuje, že se vnitřek hvězdy pomalu dále nahřívá. Zvyšující

se teplota je pak příčinou toho, že v centru tempo jaderných reakcí i jejich energetická vydatnost rostou, výkon jádra roste.

Na počátku stadia hvězdy hlavní posloupnosti bylo jen obtížné najít hranici mezi vnějším obalem hvězdy a jejím jádrem. S tím však, jak se jádro se zvyšujícím se podílem helia hroutí a zahušťuje, je však tento rozdíl stále patrnější. Pozorujeme zde i jistý skok, a to nejen v chemickém složení, ale i v hustotě. Jádro se v průběhu vývoje pozvolna osamostatňuje a začíná určovat i to, jak vypadá zbytek hvězdy.

Monotónně rostoucí tok energie uvolňované v jádru hvězdy vede jak ke zvyšování jejího výkonu hvězdy, tak slouží k nárůstu potenciální energie obalu. Vnější vrstvy hvězdy expandují, hvězda se rozpíná, její poloměr i povrch se zvětšují. Dochází též k jisté pozvolné změně efektivní teploty hvězdy – u hvězd hmotnějších než 2 Ms teplota v průběhu času mírně klesá, u hvězd s hmotností sluneční a menší naopak po celou dobu stadia hvězdy hlavní posloupnosti mírně roste.

10.4 Hoření vodíku ve slupce

Jakmile se v centrálních částech hvězd hlavní posloupnosti vyčerpá zhruba 95 % zásob vodíku, nebude již s to výkon termonukleárního reaktoru zajistit celý výkon vyzařovaný hvězdou. V centru se okamžitě nasazuje přídatný zdroj energie – hvězda se zde začne rychle smršťovat. Centrální části hvězdy se rychle zahušťují, teplota zde roste.

Rozměry takřka vyhořelého jádra se zmenšují, jádro za sebou strhává i ty oblasti hvězdy, které dosud nebyly jaderně aktivní, a vtahuje je do míst s výrazně vyšší teplotou. V přilehlých oblastech s vysokým obsahem vodíku se vzápětí zapalují vodíkové reakce probíhající zde v poměrně mocné vrstvě, které se záhy stanou dominantním zdrojem jaderné energie ve hvězdě. V jádru i nadále dobíhají vodíkové reakce, které po sobě záhy zůstaví prakticky čistě heliové jádro.

Výkon uvolňovaný prostřednictvím termonukleárních reakcí probíhajících ve slupce vrstvě brzy překoná předchozí výkon jádra. Obal hvězdy tak dostává z nitra více tepla než předtím, více než stačí přenést. Část toku energie se v tak obalu zadrží a poslouží k jeho expanzi. Poloměr hvězdy rychle roste, roste tím i plocha, jíž se do prostoru zvýšený výkon hvězdy odvádí. Obal se tak podřizuje diktátu nyní již takřka zcela samostatného jádra, které vyrábí stále více energie. Hvězda zmnohonásobuje své rozměry a chladne. Ve vnějších vrstvách těchto rozměrných hvězd se energie začne přenášet především konvekcí.

Tempo vodíkových reakcí neustále roste, hmotnost vyhořelého jádra se zvolna zvětšuje. U méně hmotných hvězd, jejichž nitro je relativně hustší a chladnější, zakrátko dochází k elektronové degeneraci heliového jádra. Vrstvička hořícího vodíku se postupně ztenčuje, ale její teplota vzrůstá. Na HR diagramu se hvězda rychle přesouvá do oblasti

rozměrných červených obrů (Red Giant Branch – RGB). Zde stav hvězdy už vůbec nezávisí na počáteční hmotnosti hvězdy, důležitý je vnitřní stav hvězdy daný zejména okamžitou hmotností jejího kompaktního jádra.

10.5 Zapálení heliových reakcí

S tím, jak se zvyšuje hmotnost vyhořelého heliového jádra, roste i jeho teplota. Jakmile hmotnost jádra přeroste 0,45 M_{\odot} , přesáhne v něm teplota hranici 100 milionů K. Tehdy dojde v nitru hvězdy k významné události – k zažehnutí nového zdroje energie, jímž jsou heliové reakce, při nichž vzniká uhlík, případně i kyslík. Jakkoli jsou to reakce energeticky chudé, znamenají ve vývoji hvězdy důležitý obrat, daný skutečností, že se znovu energeticky aktivní jádro poněkud rozepne. Tím se ovšem ochladí vrstvička hořícího vodíku obalující heliové jádro a tempo jaderných reakcí zde výrazně klesne.

Celkový výkon uvolňovaný termonukleárními reakcemi tak po zapálení dalšího jaderného zdroje paradoxně poklesne. Snížený příkon energie z centra vede k tomu, že se obal hvězdy smrští a zahřeje. Hvězda se stává běžným hvězdným obrem jen několikrát větším než Slunce, obrem typu Arctura či Capelly.

Heliové reakce probíhají rychle, celá tato poměrně poklidná etapa trvá pouhých 10 let. V centru hořícího heliového jádra se brzy začíná hromadit popel reakcí – uhlík a kyslík. Jakmile se ve hvězdě vytvoří energeticky neaktivní jádro z vyhořelého jaderného materiálu, začne se vnitřek hvězdy opět hroutit. Na povrchu neaktivního C-O jádra se zažehne vrstvička hořícího helia. K ní zvnějšku přiléhá slupka neaktivního helia a nad níž nacházíme skutečnou energetickou centrálu hvězdy, jíž je vrstvička hořícího vodíku, která zajišťuje takřka celý výkon hvězdy.

Hvězda se znovu nadýmá, tentokrát ještě více než kdykoli předtím, stává se příslušníkem tzv. asymptotické větve obrů (Asymptotic Giant Branch - AGB). Její zářivý tok až o 4 řády překonává tok, který dotyčná hvězda produkovala ve stadiu hvězdy hlavní posloupnosti.

V závěru této dramatické vývojové fáze, kdy hvězda mohutně září, a navíc rychle ztrácí svou hmotu hvězdným větrem a pulzacemi obalu, dojde v centru k několika explozivním opakovaným zažehnutím heliových reakcí ve slupce obalující C-O jádro. V důsledku těchto, tzv. tepelných pulzů se v centru prostřednictvím *s-procesu* (zachycování pomalých neutronů) syntetizují i poměrně vzácné nuklidy.

Vzhledem k tomu, že konvektivní vrstva zasahuje až do oblasti jaderného hoření, jsou jeho zplodiny vynášeny do horních vrstev hvězdy, odkud se hvězdným větrem dostávají do prostoru. AGB hvězdy tak velice účinně ovlivňují chemické složení mezihvězdné látky a jsou motorem chemického vývoje Galaxie.

10.6 Zapálení a hoření dalších prvků

V jádru hvězdného obra, které se stává stále hustším a teplejším, se postupně vytvářejí podmínky pro zapálení další série termonukleárních reakcí, při nichž „termonukleárně hoří“ uhlík a kyslík na těžší prvky.

Tempo jaderného vývoje v centrálních částech hvězdy se neustále zvyšuje, struktura jádra hvězdy je komplikovaná, ve hvězdě existuje řada aktivních i neaktivních vrstev. Dochází k zapalování i zhášení různých typů reakcí, jimiž se vytvářejí stále těžší prvky až po prvky skupiny železa. Jejich jádra jsou nejpevněji vázána, jimi poklidný jaderný vývoj končí.

Jakmile se ve hvězdě vytvoří degenerované železné jádro dostatečné hmotnosti (1,4 M_{\odot}) dojde k zhroucení celého vnitřku hvězdy – výsledkem je neutronová hvězda nebo černá díra – hvězda vzplane jako supernova typu II, respektive I b. Nicméně do takových konců dojde jen nepatrné procento hvězd.

Po celou dobu nukleárního vývoje hraje v energetické bilanci hvězdy nejdůležitější úlohu energie uvolňovaná vodíkovými reakcemi. To tvrzení platí i ke konci vývoje, kdy v centru hvězdy nacházíme hned několik oblastí jaderného hoření a samotná vrstvička hořícího vodíku je až neuvěřitelně tenká. Navzdory tomu její výkon v rozhodující míře určuje výkon celé hvězdy.

Ve vývoji je nutno počítat ještě s dvěma dalšími okolnostmi, které mohou tempo i směr vývoje hvězdy změnit, je to elektronová degenerace a únik látky z hvězdy.

10.7 Závěrečná stadia vývoje hvězd

Po vyčerpání veškerých dosažitelných zásob své vnitřní energie přechází hvězda do konečného neaktivního stavu, kdy přestane zářit. Může skončit jako degenerovaný, gravitačně vázaný objekt, jako černá díra, může se též beze zbytku rozplynout do okolního prostoru. Rozeznáváme dva typy završení hvězdného vývoje:

- **rovnovážný**, kdy se hvězda mění v neaktivní gravitačně vázaný objekt ve stavu hydrostatické rovnováhy
- **nerovnovážný**, kdy se ve zbytku hvězdy již nikdy hydrostatická rovnováha neustaví

NEROVNOVÁŽNÁ ZÁVĚREČNÁ STADIA VÝVOJE

Výbuch supernovy typu Ia, který je výsledkem explozivního zapálení termonukleárních reakcí v elektronově degenerovaném C-O trpaslíkovi. Látka explodující hvězdy se smísí s okolní mezihvězdnou látkou, hvězda přestává definitivně existovat.

Protipólem je vznik černé díry. Pokud probíhá kolaps degenerovaného železného jádra na konci jaderného vývoje ve hvězdách s mimořádně vysokou hmotností, pak jej nezastaví ani gradient tlaku neutronově degenerovaného plynu.

Černou díru mezi nerovnovážné konfigurace řadíme z toho důvodu, že z našeho hlediska, tj. z hlediska vzdáleného pozorovatele kolaps hvězdy nikdy nekončí, maximálně tzv. „zamrzne“ na Schwarzschildově gravitačním poloměru.

ZÁVĚREČNÁ STADIA HVĚZD V HYDROSTATICKÉ ROVNOVÁZE

Hvězdy skončí jako nezářící objekty, v nichž je mechanická rovnováha udržovaná gradientem tlaku v látce hvězdy, jež je z větší části tvořena degenerovanou látkou. Mohou to být útvary složené převážně z elektronově degenerované látky – tzv. *černí trpaslíci* nebo se může jednat o objekty z neutronově degenerované látky - tzv. *neutronové hvězdy*.

Jako elektronově degenerovaní trpaslíci mohou ukončit svou existenci hned tři různé hmotnostní kategorie hvězd:

1. *hnědí trpaslíci* s hmotností pod $0,075 M_{\odot}$, v nichž již v průběhu počátečního smršťování centrální teplota nikdy nepřekročila 8 MK, takže se v nich nezažehly termonukleární reakce transformující vodík na helium, v tomto případě se jedná o tzv. *vodíkové černé trpaslíky*,
2. *hvězdy o hmotnosti menší než $0,5 M_{\odot}$* , v jejichž nitru se úspěšně zapálily vodíkové reakce, hvězdy prošly fází hvězdy hlavní posloupnosti. Poté se v nich zažehly vodíkové reakce v slupce obalující vyhořelé heliové jádro, které brzy zdegenerovalo. Ke vznícení heliových reakcí v centru jádra u nich však nedojde, neboť hmotnost degenerovaného jádra nepřevýší nezbytnou hranici $0,4 M_{\odot}$. Hlavní složkou tohoto (zatím jen hypotetického) typu degenerovaných hvězd je helium.
3. *hvězdy o počáteční hmotnosti menší než $11 M_{\odot}$* , u nichž se jejich obal hvězdným větrem a pulzací rozplyne dříve, než v centru C-O jádra vzroste teplota natolik, aby se v něm zažehly reakce spalující uhlík a kyslík na těžší prvky. Jde o elektronově degenerované objekty složené především z uhlíku a kyslíku, výjimečně i z těžších prvků, jako hořčíku či křemíku.

Neutronové hvězdy, jejichž vnitřek je tvořen především neutrony a kůra je z elektronově degenerované látky, vznikají kolapsem železného elektronově degenerovaného jádra hmotných hvězd ($M > 11 M_{\odot}$). V důsledku kolapsu dochází též ke vzplanutí supernov typu II a I b.

10.7.1 BÍLÝ TRPASLÍK

Bílí trpaslíci jsou kompaktní hvězdy s hmotnostmi slunečními a rozměry planet zemského typu. Jejich střední hustoty jsou řádově milionkrát větší než střední hustota Slunce, tedy asi 109 kg m^{-3} . Z větší části jsou tvořeny elektronově degenerovaným plynem, který je s to vytvořit v nitru těchto hvězd potřebný gradient tlaku, jímž hvězda vzdoruje své vlastní gravitaci.

Prvními objevenými představiteli tohoto typu objektů v závěrečné fázi svého vývoje byly bílí trpaslíci 40 Eri B a Sírius B. Tyto hvězdy raného spektrálního typu jsou řazeny mezi bílé hvězdy – odtud „bílí“ trpaslíci. Později byly objeveny žhavější, ale i chladnější hvězdy tohoto typu. S tím, jak budou tyto hvězdy chladnout, stanou se postupně nezářivými „černými trpaslíky“.

Bílí trpaslíci jsou konečnou vývojovou fází hvězd s počáteční hmotností menší než 11 M_{\odot} . V naší Galaxii dospělo do tohoto stadia vývoje asi 7 % hvězdné populace.

10.7.2 NEUTRONOVÁ HVĚZDA

To jsou stabilní hvězdy v hydrostatické rovnováze složené převážně z neutronů. Jejich existence byla předpovězena ve třicátých letech Landauem, krátce po objevu neutronu Jamesem Chadwickem. Baade a Zwicky v roce 1934 poprvé spekulovali o možné existenci suprahustých neutronových hvězd.

V roce 1968 byly ztotožněny s radiovými a optickými pulzary, v roce 1971 pak odhaleny v rentgenových pulzarech a vybuchujících zdrojích rentgenového záření, v roce 1975 byly nalezeny též v tzv. burstech. Dosud bylo objeveno několik stovek neutronových hvězd.

Hustota v neutronových hvězdách, stejně jako ve všech hydrostaticky rovnovážných hvězdách, roste směrem k centru, kde dosahuje nebo i překračuje hustotu atomových jader (kolem $2 \cdot 10^{17} \text{ kg m}^{-3}$). Z tohoto hlediska bývají neutronové hvězdy někdy označovány jako gigantická atomová jádra s 10^{57} nukleony. Zásadní rozdíl oproti běžným jádrům tkví v tom, že neutronové hvězdy drží pohromadě gravitace, nikoli jaderné síly.

10.7.3 ČERNÁ DÍRA

U hvězd s velmi vysokou počáteční hmotností (50 M_{\odot} a více), pokračuje v jejich centrálních oblastech jaderný vývoj velice rychle: proběhnou zde veškeré možné exogenní jaderné reakce a vytvoří se hmotné železné jádro, v němž jaderné reakce již nehoří. Je-li hmotnost jádra vyšší než limitní hmotnost neutronové hvězdy (asi 3 M_{\odot}), pak již nic nemůže pokračující kolaps odvrátit ani zastavit. Gravitační síly se zde stanou zcela dominantní, začne rychlý kolaps. Vnější vrstvy hvězdy explodují, hvězda vybuchuje jako tzv. supernova typu I b. Uvnitř však kolaps nezadržitelně pokračuje. Vnitřek hvězdy se mění v

tzv. černou díru, objekt zahuštěný natolik, že jeho vlastní gravitace napříště zabráni čemukoli, aby z něj uniklo do vnějšího prostoru.

SHRNUTÍ KAPITOLY



Vývoj hvězd jsme schopni studovat díky tomu, že dokážeme formulovat matematický model hvězdy, většinou reprezentovaný soustavou diferenciálních rovnic. V kapitole jsou kvalitativně rekapitulovány získané poznatky. Vývoj hvězdy závisí především na její hmotnosti. Převážná většina hvězd (více než 90 %) stráví většinu své existence na hlavní posloupnosti HR diagramu, tedy ve fázi termonukleárního slučování vodíku na hélium v jádře. Hmotností jsou také určena závěrečná stadia vývoje hvězd, tedy zda vývoj skončí v podobě bílého trpaslíka, neutronové hvězdy nebo černé díry.

KONTROLNÍ OTÁZKY



1. Popište fyzikální procesy, které se uplatňují při vzniku hvězdy.
2. Co je to stav hydrostatické rovnováhy?
3. Jaký proces v jádře hvězdy je charakteristický pro hvězdy na hlavní posloupnosti?
4. Jak se liší závěrečná stadia hvězdného vývoje?
5. Co je určujícím parametrem evoluce hvězd?

CVIČENÍ



Cvičení budou věnována rozsáhlejší práci s HR diagramy v jejich klasické i elektronické podobě a také praktické spektrální klasifikaci nejvýznamnějších hvězd.

11 HVĚZDOKUPY, GALAXIE, VZDÁLENÉ GALAXIE



RYCHLÝ NÁHLED KAPITOLY

Většina hvězd je součástí složitějších struktur. Tvoří dvojhvězdy, vícenásobné hvězdné systémy, hvězdokupy a konečně jsou také podstatnou složkou galaxií. V této kapitole jsou shrnuty základní vlastnosti hvězdných soustav.



CÍLE KAPITOLY

- Seznámení se vlastnostmi vícenásobných hvězdných soustav
 - Pochopení struktury Galaxie
 - Znalost různých typů galaxií
-



ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU

1 hodina



KLÍČOVÁ SLOVA KAPITOLY

Vícenásobná hvězdná soustava, hvězdná asociace, hvězdokupa, galaxie

11.1 Vícenásobné hvězdné soustavy

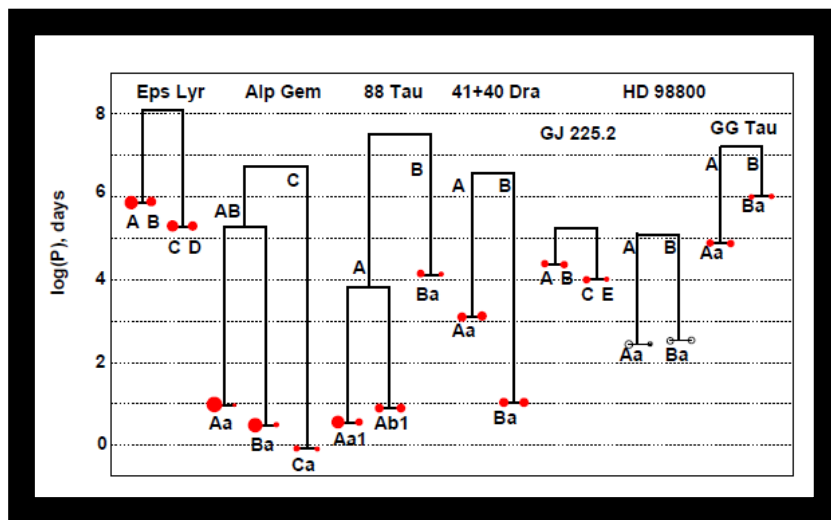
Jako vícenásobný hvězdný systém označujeme malý počet hvězd, které obíhají kolem společného těžiště a jejich interakce je způsobena převážně gravitací. Počet hvězd takových systémů je však ještě natolik malý, že je možné relativně přesně definovat dráhy jednotlivých členů soustavy.

Za vícenásobné hvězdné soustavy se nepovažují planetární systémy u jiných hvězd a pokud počet členů takové soustavy přesáhne řádově desítky, označujeme systém jako *hvězdnou asociaci* nebo *hvězdokupu*.

Z pozorování víme, že geometrické uspořádání stabilních vícenásobných hvězdných soustav může být různé, zejména u soustav s vyšším počtem členů.

PŘÍKLADY

- **dvojhvězdy** – např. Sirius, Prokyon, Mira
- **trojhvězdy** – Polárka
- **čtyřhvězdy** – Mizar, ϵ Lyr
- **pětihvězdy** – 91 Aql, δ Ori
- **šestihvězdy** – Castor, Alcor (s Mizarem)
- **sedmihvězdy** – AR Cas



Obrázek 28: Schémata geometrického uspořádání některých vícenásobných hvězdných soustav²⁹

PRO ZÁJEMCE



Více informací včetně možných hierarchií uspořádání členů soustav je možné najít v katalogu vícenásobných hvězdných soustav (autor Tokovinin, dostupné na webových stránkách <http://www.ctio.noao.edu/~atokovin/stars/intro.html>)

11.2 Hvězdné asociace

S jistou nadsázkou je na asociace možné pohlížet jako na vícenásobné hvězdné systémy s extrémně velkým počtem členů. Z pohledu početnějších hvězdných uskupení se

²⁹ Zdroj: <http://astronomy.swin.edu.au/sao/story/downloads.xml>

však jedná se o skupiny hvězd s poměrně malým počtem členů a mohou vznikat buď rozpadem gravitačně nestabilních hvězdokup, nebo při procesu formování nově vznikajících hvězdokup, kdy hvězdy mají podobné trajektorie v prostoru.

Takové skupiny označujeme jako *pohybové asociace* a příkladem mohou být: asociace ve Velké medvědi (od souhvězdí UMa přes Cep až po souhvězdí TrA), Hyády nebo Jesličky.

Skutečné *hvězdné asociace*, které nejsou jen pohybovými skupinami, jsou většinou tvořeny hvězdami ve stejném nebo velmi podobném evolučním stadiu. Podle toho jsou pak dále děleny do několika skupin:

- **O asociace** (v souhvězdí Ori)
- **OB asociace** (v souhvězdí Sco nebo Cen)
- **R asociace** (střední hmotnost hvězd, obsahují i zbytky původní látky – Mon R2)
- **T asociace** (hvězdy typu T Tauri)

11.3 Otevřené hvězdokupy

Jedná se o gravitačně vázané struktury, pro které je hlavním znakem jejich nepravidelný tvar a většinou obsahují řádově stovky hvězd. V naší Galaxii se nacházejí poblíž roviny galaktického rovníku a velmi často tedy obsahují kromě hvězd také rozptýlený mezihvězdný prach a plyn. Jedná se většinou o relativně mladé hvězdy a jejich seskupení je gravitačně nestabilní. Za typické příklady otevřených hvězdokup lze považovat Plejády, Hyády, Jesličky atd.



11.4 Kulové hvězdokupy

Jedná se rovněž o gravitačně vázané struktury se silnou koncentrací hvězd směrem ke středu celého útvaru. Počet hvězd je mnohem vyšší než u otevřených hvězdokup, pohybuje se v řádech stovek tisíc až jednoho milionu členů. Kulové hvězdokupy jsou gravitačně velmi stabilní útvary a v naší Galaxii patří mezi nejstarší struktury vůbec, jejich

stáří je určeno na cca 10 miliard let. Nacházejí se většinou v *galaktickém halo*, tedy sférické složce Galaxie.

ZÁKLADNÍ ÚDAJE O HVĚZDOKUPÁCH

	Asociace	Otevřené h.	Kulové h.
Tvar	nepravidelný	nepravidelný	sférický
Počet členů	desítky až stovky	stovky až tisíce	statisíce až milion
Koncentrace	výjimečně	slabá	silná
Lokace v Galaxii	spirální ramena	rovina rovníku G.	galaktické halo
Poloha v HR diagramu	jako u mladých hvězd	populace I	populace II

11.5 Galaxie

Naše Galaxie, resp. její spirální ramena jsou dobře viditelná jako *Mléčná dráha*, světlý pás, který zasahuje do značné části hvězdné oblohy. Její výraznější partie můžeme od nás pozorovat v létě, ale mnohem impozantnější část Mléčné dráhy je viditelná z jižní polokoule. Rovněž všechny ostatní hvězdy, které jsou viditelné pouhým okem, patří do systému naší Galaxie, kterou celkově tvoří několik set miliard hvězd, velké množství mezihvězdné látky a patrně i *skryté hmoty*.

V centrální části Galaxie se prokazatelně (doloženo pozorováním pohybu hvězd v její blízkosti) nachází velmi hmotná černá díra. Při pohledu „z boku“ z mimogalaktického prostoru by měla Galaxie plochý tvar (jako dva talíře přiklopené na sebe), ale pohled „shora“ by ukázal spirálovitou strukturu s centrální příčkou. Rotace Galaxie je poměrně složitá, vnitřní části rotují téměř jako pevné těleso, pohyb hvězd na periferii je keplerovský. Naše Slunce se nachází ve 2/3 vzdálenosti poloměru Galaxie od jejího středu a jeden oběh vykoná přibližně za 240 milionů let

Určení vlastností Galaxie, zejména jejího tvaru, bylo velmi obtížné, protože se nacházíme „uvnitř“ systému, který chceme zkoumat. Docela první model Galaxie sestavil ze svých pozorování William Herschel již v 18. století a byl zatížen mnoha chybami, protože předpokládal shodný zářivý výkon všech hvězd, jejich konstantní prostorovou hustotu a nebyly známy hodnoty mezihvězdné extinkce. Výsledkem byl model Galaxie o průměru 3 kpc se Sluncem uprostřed. Dokonalejší model sestavil v roce 1922 Kapteyn, který již uvažoval různé zářivé výkony, ale také zanedbal extinkci. Výsledkem byl elipsoid 8 500 pc na 1 700 pc s polohou Slunce 650 pc od jeho středu.

STRUKTURA GALAXIE

Struktura Galaxie je dána rozložením jejích jednotlivých složek, tedy hvězd, mezihvězdné látky a skryté hmoty. Potom rozlišujeme kulovou složku (halo), diskovou složku, plochou složku a jádro Galaxie.

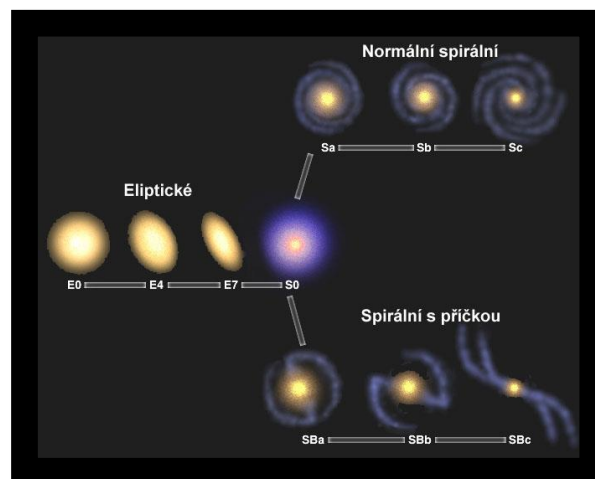
11.6 Extragalaktické systémy

První novodobý objev nějakého extragalaktického systému je spojován se zámořskými objevnými plavbami v 16. století a popisem Magellanových mračen, která je možné pozorovat z jižní polokoule. Dnes je známo přibližně 100 miliard jiných galaxií, některé statistické studie uvádějí počty ještě o řád vyšší.

HUBBLEOVA KLASIFIKACE (PODLE VZHLEDU GALAXIÍ)

Je to pravděpodobně nejznámější klasifikační systém, ale do jisté míry je již překonán, protože klasifikuje galaxie pouze podle jejich vzhledu.

V původní Hubbleově klasifikaci bylo 13 % galaxií eliptických (E), 62 % spirálních (S), asi 9 % mělo čočkovitý tvar (S0) a nepravidelných byla pouze 3 %. Přibližně 13 % galaxií se z této klasifikace vymyká, jedná se o *aktivní galaxie*, které jsou dále členěny na Seyferťovy galaxie, rádiové galaxie a kvasary (QSO – quasi stellar object)

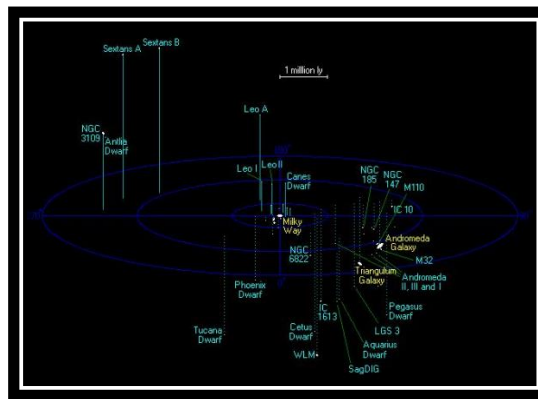


Obrázek 29: Hubbleova klasifikace galaxií (morphologická)³⁰

VELKOŠKÁLOVÉ STRUKTURY

Galaxie vytvářejí také vyšší struktury a celky. Většinou se nacházejí v prostoru v gravitačně vázaných skupinách, příkladem může být *Místní skupina galaxií*, která je tvořena naší Galaxií, galaxiemi M 31 a M 33, Velkým a Malým Magellanovým mračnem a také dalšími nepravidelnými galaxiemi soustředěnými v prostoru o průměru 800 kpc. Nejvyšší známá struktura se označuje jako *buněčná struktura* vesmíru a její rozměry jsou řádu setin až desetin rozměrů pozorovatelného vesmíru.

³⁰ Zdroj: <http://objekty.astro.cz/galaxie/1968-klasifikace-galaxii>



Obrázek 30: Schéma Místní skupiny galaxií³¹

SHRnutí KAPITOLY



Kapitola představuje vyšší struktury, které vytvářejí jednotlivé hvězdy. Přehledně jsou zde uvedeny vlastnosti vícenásobných hvězdných soustav, různých hvězdokup a hvězdných asociací. Zvláštní pozornost je pak věnována větším strukturám, kterými jsou především galaxie. Podrobně je vysvětlena struktura naší Galaxie a uvedena základní klasifikace jiných galaxií.

KONTROLNÍ OTÁZKY



1. Jaký je rozdíl mezi vícenásobnou hvězdnou soustavou a hvězdnou asociací?
2. Vysvětlete pojem *otevřená hvězdokupa*.
3. Kde se v naší Galaxii nacházejí *kulové hvězdokupy*?
4. Jakého typu je naše Galaxie?
5. Jmenujte další typy galaxií.

CVIČENÍ



Ve cvičeních se budou řešit některé jednoduché úlohy z galaktické kinematiky. Podrobněji bude probírána velkoškálová struktura vesmíru a bude věnován prostor také některým kosmologickým otázkám, tedy vzniku vesmíru a jeho vývojovým etapám.

³¹ Zdroj: https://cs.wikipedia.org/wiki/M%C3%ADstn%C3%ADskupina_galaxi%C3%AD

12.2 Sluneční soustava

Tabulka 1: Základní fyzikální vlastnosti Slunce, všech planet a dvou trpasličích planet naší sluneční soustavy.

Název	Poloměr (km)	Poloměr ($R_{Země}$)	Hmotnost (kg)	Hmotnost ($M_{Země}$)	Průměrná hustota (g/cm^3)	Povrchová gravitace ($Země=1$)	Úniková rychlost
Slunce	695 000	109	$1,99 \cdot 10^{30}$	333 000	1,41	27,5	--
Merkur	2440	0,382	$3,30 \cdot 10^{23}$	0,055	5,43	0,38	4,43
Venuše	6051	0,949	$4,87 \cdot 10^{24}$	0,815	5,25	0,91	10,4
Země	6378	1,000	$5,97 \cdot 10^{24}$	1,000	5,52	1,00	11,2
Mars	3397	0,533	$6,42 \cdot 10^{23}$	0,107	3,93	0,38	5,03
Jupiter	71 492	11,19	$1,90 \cdot 10^{27}$	317,9	1,33	2,36	59,5
Saturn	60 268	9,46	$5,69 \cdot 10^{26}$	95,18	0,70	0,92	35,5
Uran	25 559	3,98	$8,66 \cdot 10^{25}$	14,54	1,32	0,91	21,3
Neptun	24 764	3,81	$1,03 \cdot 10^{26}$	17,13	1,64	1,14	23,6
Pluto	1187	0,186	$1,31 \cdot 10^{22}$	0,0022	1,86	0,06	1,21
Eris	1163	0,183	$1,67 \cdot 10^{22}$	0,0028	2,52	0,08	1,38

Tabulka 2: Vlastnosti rotace a oběžných drah Slunce, všech planet a dvou trpasličích planet naší sluneční soustavy.

Název	Vzdálenost od Slunce (au)	Vzdálenost od Slunce (10^6 km)	Oběžná doba (roky)	Sklon roviny oběhu (stupně)	Excentricita dráhy	Siderická doba rotace (pozemské dny)	Sklon rotační osy (stupně)
Slunce	--	--	--	--	--	25,4	7,25
Merkur	0,387	57,9	0,2409	7,00	0,206	58,6	0,0
Venuše	0,723	108,2	0,6152	3,39	0,007	-243,0	177,3
Země	1,00	149,6	1,0	0,00	0,017	0,9973	23,45
Mars	1,524	227,9	1,881	1,85	0,093	1,026	25,2
Jupiter	5,203	778,3	11,86	1,31	0,048	0,41	3,08
Saturn	9,54	1427	29,5	2,48	0,056	0,44	26,73
Uran	19,19	2870	84,01	0,77	0,046	-0,72	97,92
Neptun	30,06	4497	164,8	1,77	0,010	0,67	29,6
Pluto	39,48	5906	248,0	17,14	0,248	-6,39	112,5
Eris	67,67	10,120	557	44,19	0,442	15,8	78

12.3 Hvězdy

Tabulka 3: Vlastnosti 15 nejbližších hvězd.

Hvězda	Vzdálenost (ly)	Spektrální typ	Luminozitivní třída	Rektascenze		Deklinace		Žářivý výkon (L/L _s)
				h	m	stupně	minuty	
Slunce	0,000016	G2	V	--	--	--	--	1,0
Proxima	4,2	M5	V	14	30	-62	41	0,0006
α Cen A	4,4	G2	V	14	40	-60	50	1,6
α Cen B	4,4	K0	V	14	40	-60	50	0,53
Barnardova hvězda	6,0	M4	V	17	58	+04	42	0,005
Wolf 359	7,8	M5	V	10	56	+07	01	0,0008
Lalande 21185	8,3	M2	V	11	03	+35	58	0,03
Sirius A	8,6	A1	V	06	45	-16	42	26,0
Sirius B	8,6	DA2	BT	06	45	-16	42	0,002
BL Ceti	8,7	M5	V	01	39	-17	57	0,0009
UV Ceti	8,7	M6	V	01	39	-17	57	0,0006
Ross 154	9,7	M3	V	18	50	-23	50	0,004
Ross 248	10,3	M5	V	23	42	+44	11	0,001

Tabulka 4: Vlastnosti nejjasnějších hvězd:

Hvězda	Souhvězdí	Rektascenze		Deklinace		Vzdálenost (ly)	Spektrální typ	Luminozitivní třída	Hvězdná velikost (mag)	Žářivý výkon (L/L _s)
		h	m	stupně	minuty					
Sirius	CMa	6	45	-16	42	8,6	A1	V	-1,46	26
Canopus	Car	6	24	-52	41	313	F0	Ib - II	-0,72	13 000
α Cen	Cen	14	40	-60	50	4,4	G2	V	-0,01	1,6
							K0	V	1,3	0,53
Arcturus	Boo	14	16	+19	11	37	K2	III	-0,06	170
Vega	Lyr	18	37	+38	47	25	A0	V	0,04	60
Capella	Aur	5	17	+46	00	42	G0	III	0,75	70
							G8	III	0,85	77
Rigel	Ori	5	15	-08	12	772	B8	Ia	0,14	70 000
Procyon	CMi	7	39	+05	14	11,4	F5	IV-V	0,37	7,4
Betelgeuze	Ori	5	55	+07	24	643	M2	Iab	0,41	120 000
Achernar	Eri	1	38	-57	15	144	B5	V	0,51	3600
Hadar	Cen	14	04	-60	22	525	B1	III	0,63	100 000
Altair	Aql	19	51	+08	52	17	A7	IV-V	0,77	10,5
Acrux	Cru	12	27	-63	06	321	B1/B3	IV/V	1,4/1,9	22000/7500

12.4 Galaxie

Tabulka 5: Vlastnosti vybraných členů Místní skupiny galaxií.

Název	Vzdálenost (Mly)	Rektascenze		Deklinace		Typ galaxie	Zářivý výkon (milióny L _s)
		h	m	stupně	minuty		
Galaxie	--	--	--	--	--	Sbc	15 000
WLM	3,0	00	02	-15	30	Irr	50
IC 10	2,7	00	20	+59	18	dIrr	160
NGC 147	2,4	00	33	+48	30	dE	131
NGC 185	2,0	00	39	+48	20	dE	120
NGC 205	2,7	00	40	+41	41	E	370
And VIII	2,7	00	42	+40	37	dE	240
M 32	2,6	00	43	+40	52	E	380
M 31	2,5	00	43	+41	16	Sb	21 000
SMC	0,19	00	53	-72	50	Irr	230
M 33	2,7	01	34	+30	40	Sc	2 800
LMC	0,16	05	24	-69	45	Irr	1 300
NGC 3109	4,1	10	03	-26	09	Irr	160
NGC 6822	1,6	19	45	-14	48	Irr	94
IC 5152	5,2	22	03	-51	18	dIrr	70

12.5 Přehled důležitých konstant

ASTRONOMICKÉ VZDÁLENOSTI

1 AU $\approx 1,496 \cdot 10^8$ km = $1,496 \cdot 10^{11}$ m
1 světelný rok (ly) $\approx 9,4 \cdot 10^{12}$ km = $9,46 \cdot 10^{15}$ m
1 parsec (pc) $\approx 3,09 \cdot 10^{13}$ km $\approx 3,26$ ly
1 kiloparsec (kpc) = 1000 pc $\approx 3,26 \cdot 10^3$ ly
1 megaparsec (Mpc) = 10^6 pc $\approx 3,26 \cdot 10^6$ ly

FYZIKÁLNÍ KONSTANTY

Rychlost světla: $c = 3,00 \cdot 10^5$ km/s = $3 \cdot 10^8$ m/s
Gravitační konstanta: $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ m³/(kg·s²)
Planckova konstanta: $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ joule·s
Stefanova-Boltzmannova konstanta: $s = 5,67 \cdot 10^{-8}$ watt/(m² · K⁴)
Hmotnost protonu: $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg
Hmotnost elektronu: $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg
Hmotnost Slunce: $1M_S \approx 2 \cdot 10^{30}$ kg
Poloměr Slunce: $1R_S \approx 696\,000$ km
Zářivý výkon Slunce: $1L_S \approx 3,8 \cdot 10^{26}$ wattů
Hmotnost Země: $1M_Z \approx 5,97 \cdot 10^{24}$ kg
Poloměr Země (rovníkový): $1R_Z \approx 6378$ km
Gravitační zrychlení na povrchu Země: $g = 9,8$ m/s²
Úniková rychlost pro povrch Země: $v = 11,2$ km/s = 11 200 m/s

JEDNOTKY ČASU

1 sluneční den = 24h
1 hvězdný den ≈ 23 h 56m 4,09s
1 synodický měsíc $\approx 29,53$ slunečních dnů
1 siderický měsíc $\approx 27,32$ slunečních dnů
1 tropický rok $\approx 365,242$ slunečních dnů
1 siderický rok $\approx 365,256$ slunečních dnů

DALŠÍ JEDNOTKY

Energie: 1 joule = 1 (kg·m²)/s²
Výkon: 1 watt = 1 joule/s
Elektronvolt: 1 eV = $1,60 \cdot 10^{-19}$ joule

12.6 Orientace na noční obloze

12.6.1 POLOHA SLUNCE, MĚSÍCE A PLANET SLUNEČNÍ SOUSTAVY








Ke zjištění aktuální polohy Slunce, Měsíce, planet nebo dalších těles ve sluneční soustavě je vhodné využít Hvězdářskou ročenku na daný rok nebo některý z níže uvedených odkazů.

KLEŤSKÁ ASTRONOMICKÁ ROČENKA


Jedná se o jednoduchou online ročenku, která je praktická, pokud potřebujete údaje pro jeden konkrétní den: <http://www.hvezdarnacb.cz/cgi-bin/kar.cgi>

Polohy planet, Slunce a Měsíce


Poloha: $\lambda = +18^{\circ}00'00''$ $\phi = +50^{\circ}00'00''$ $h = 260$ m. n. m.
 Čas: UT = 2019-04-13 19:08:00 JD = 2458587.29722 TT = 2458587.29826 LAST = 09:46:43

	rektascenze	deklinace	delta	r	průměr	fáze	Elon	mag	t	Azi	h
	hh mm.m	+ss mm	AA.UUUUU	AA.UUUUU	vv.v	f.ff	sssS	mm.m	hh mm.m	sss +ss	
 Merkur	23:49.1	-03 39	0.89869	0.46502	7.5	0.51	28Z	0.3	09:57.7	141	-37
 Venuše	23:31.6	-04 33	1.35036	0.72817	12.4	0.84	32Z	-3.9	10:15.1	145	-39
 Mars	04:28.2	+22 46	2.11721	1.58275	4.4	0.95	45V	1.5	05:18.5	98	24
 Jupiter	17:35.4	-22 41	4.75612	5.31840	38.8	0.99	119Z	-2.4	16:11.3	265	-34
 Saturn	19:27.6	-21 30	9.94794	10.05514	15.1	1.00	93Z	1.2	14:19.1	237	-51
 Úran	02:00.0	+11 43	20.84139	19.85010	3.3	1.00	8V	5.9	07:46.7	118	-7
 Neptun	23:15.6	-05 49	30.74181	29.93705	2.2	1.00	36Z	7.9	10:31.1	150	-42

[Zpět na zadání](#) [Vypnit](#)

	rektascenze	deklinace	delta	průměr	fáze	Elon	t	Azi	h
	hh mm.m	+ss mm	km	mm.mm	f. ff	sssS	hh mm.m	sss +ss	
 Měsíc	08:36.6	+19 20	369491.9	32.34	0.61	103V	01:10.1	31	56

[Zpět na zadání](#) [Vypnit](#)

	rektascenze	deklinace	delta	průměr	t	Azi	h
	hh mm ss	+ss mm vv	AA.UUUUU	mm.mm	hh mm.m	sss +ss	
 Slunce	01:27:15	+09°08'57"	1.00271	31.90	08:19.5	123	-14

[Zpět na zadání](#) [Vypnit](#)

K výpočtu je užito Planetární a lunární efemeridy (DE405/LE40) spravovaných Jet Propulsion Laboratory
 1549 1 31 (2011-01-01) Jm064
 Kletská astronomická ročenka on-line je určena pouze pro nekomerční využití
 © J. Gráf, 2011-2019

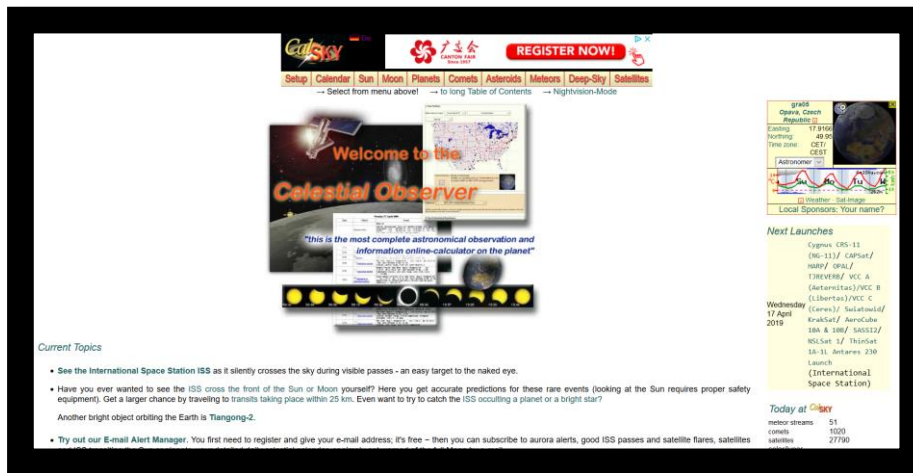
Obrázek 31: Ukázka výstupu z Klet'ské astronomické ročenky.³²

CELESTIAL OBSERVER

Portál CalSky umožňuje generovat textovou nebo grafickou podobu astronomické ročenky. Je to pouze jedna z jeho palety služeb, které astronomům poskytuje na adrese:

<https://www.calsky.com/>

³² Zdroj: <http://www.hvezdarnacb.cz/cgi-bin/kar.cgi>



Obrázek 32: Titulní strana portálu Celestial Observer. ³³

ASTRONOMICAL APPLICATIONS DEPARTMENT OF THE U.S. NAVAL OBSERVATORY

Pravděpodobně nejkvalitnější efemeridy, které jsou přístupné online naleznete na portálu U.S. Naval Observatory na adrese: <https://aa.usno.navy.mil/data/index.php>

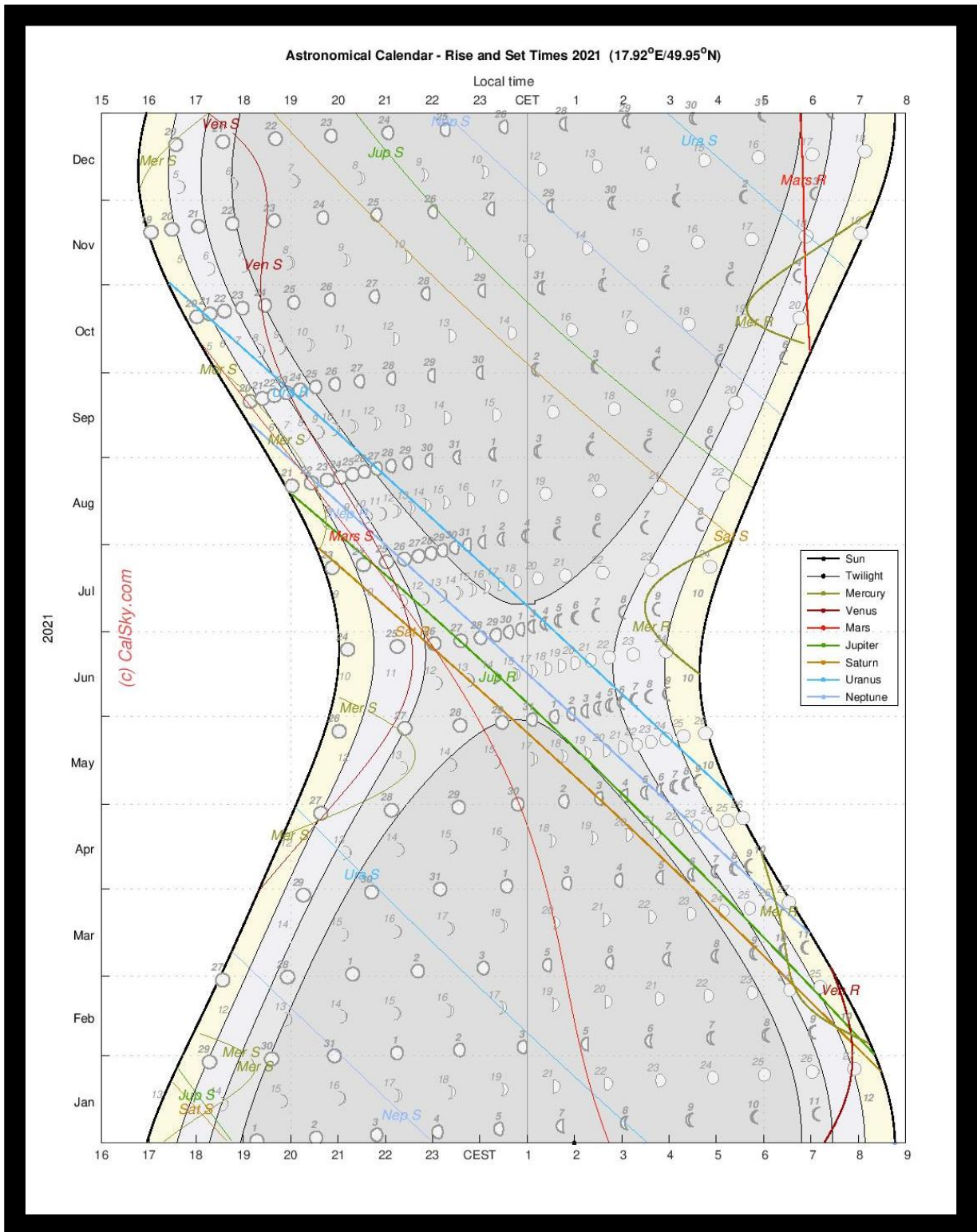


Obrázek 33: Titulní strana portálu U.S. Naval Observatory. ³⁴

³³ Zdroj: <https://www.calsky.com/>

³⁴ Zdroj: <https://aa.usno.navy.mil/data/index.php>

Obrázek 34: Korzetový diagram pro polohu Opavy a rok 2021.³⁵



³⁵ Zdroj: <https://www.calsky.com/>

12.6.2 TABULKA ČESKÝCH A LATINSKÝCH NÁZVŮ SOUHVĚZDÍ

Latinský název	genitiv	zkratka	překlad
Andromeda	Andromedae	And	Andromeda
Antlia	Antliae	Ant	Vývěva
Apus	Apodis	Aps	Rajka
Aquartus	Aquarii	Aqr	Vodnář
Aquila	Aquilae	Aql	Orel
Ara	Arae	Ara	Oltář
Aries	Arietis	Ari	Beran
Auriga	Aurigae	Aur	Vozka
Bootes	Bootis	Boo	Pastevec, Pastýř
Caelum	Caeli	Cae	Rydlo
Camelopardalis	Camelopardalis	Cam	Žirafa
Cancer	Cancri	Cnc	Rak
Canes Venatici	Canum Venaticorum	CVn	Honící psi
Canis Maior	Canis Majoris	CMA	Velký pes
Canis Minor	Canis Minoris	CMi	Malý pes
Capricornus	Capricorni	Cap	Kozoroh
Carina	Carinae	Car	Lodní kýl
Cassiopea	Cassiopeiae	Cas	Kasiopeja
Centaurus	Centauri	Cen	Kentaur
Cepheus	Cephei	Cep	Kefeus
Cetus	Ceti	Cet	Velryba
Chameleon	Chamaeleontis	Cha	Chameleon
Circinus	Circini	Cir	Kružítko
Columba	Columbae	Col	Holubice
Coma Berenices	Comae Berenices	Com	Vlasy Bereniky
Corona Australis	Coronae Australis	CrA	Jižní koruna
Corona Borealis	Coronae Borealis	CrB	Severní koruna
Corvus	Corvi	Crv	Havran
Crater	Crateri	Crt	Pohár
Crux	Crucis	Cru	Kříž, Jižní kříž
Cygnus	Cygni	Cyg	Labuť
Delphinus	Delphini	Del	Delfín
Dorado	Doradus	Dor	Mečoun
Draco	Draconis	Dra	Drak
Equuleus	Equulei	Equ	Koníček
Eridanus	Eridani	Eri	Eridanus
Fornax	Fornacis	For	Pec
Gemini	Geminorum	Gem	Blíženci
Grus	Gruis	Gru	Jeřáb

Hercules	Herculis	Her	Herkules
Horologium	Horologii	Hor	Hodiny
Hydra	Hydrae	Hya	Hydra
Hydrus	Hydri	Hyi	Malý vodní had
Indus	Indi	Ind	Indián
Lacerta	Lacertae	Lac	Ještěrka
Leo	Leonis	Leo	Lev
Leo Minor	Leonis Minoris	LMi	Malý lev
Lepus	Leporis	Lep	Zajíc
Libra	Librae	Lib	Váhy
Lupus	Lupi	Lup	Vlk
Lynx	Lyncis	Lyn	Rys
Lyra	Lyrae	Lyr	Lyra
Mensa	Mensae	Men	Tabulová hora
Microscopium	Microscopii	Mic	Mikroskop
Monoceros	Monocerotis	Mon	Jednorozec
Musca	Muscae	Mus	Moucha
Norma	Normae	Nor	Pravítko
Octans	Octantis	Oct	Oktant
Ophiuchus	Ophiuchi	Oph	Hadonoš
Orion	Orionis	Ori	Orion
Pavo	Pavonis	Pav	Páv
Pegasus	Pegasi	Peg	Pegas
Perseus	Persei	Per	Perseus
Phoenix	Phoenicis	Phe	Fénix
Pictor	Pictoris	Pic	Malíř
Pisces	Piscium	Psc	Ryby
Piscis Austrinus	Piscis Austrini	PsA	Jižní ryba
Puppis	Puppis	Pup	Lodní záď
Pyxis	Pyxidis	Pyx	Kompas
Reticulum	Reticuli	Ret	Mřížka
Sagitta	Sagittae	Sge	Šíp
Sagittarius	Sagittarii	Sgr	Střelec
Scorpius	Scorpii	Sco	Štír
Sculptor	Sculptoris	Scl	Sochař
Scutum	Scuti	Sct	Štít
Serpens	Serpentis	Ser	Had
Sextans	Sextantis	Sex	Sextant
Taurus	Tauri	Tau	Býk
Telescopium	Telescopii	Tel	Dalekohled
Triangulum	Trianguli	Tri	Trojúhelník

Přílohy

Triangulum Australe	Trianguli Australis	TrA	Jižní trojúhelník
Tucana	Tucanae	Tuc	Tukan
Ursa Maior	Ursae Maioris	UMa	Velká medvědice
Ursa Minor	Ursae Minoris	Umi	Malý medvěd
Vela	Velorum	Vel	Plachty
Virgo	Virginis	Vir	Panna
Volans	Volantis	Vol	Létající ryba
Vulpecula	Vulpeculae	Vul	Lištička

12.6.3 ČASY ZAČÁTKŮ A KONCŮ OBČANSKÉHO, NAUTICKÉHO A ASTRONOMICKÉHO SOUMRAKU V PRŮBĚHU ROKU

Všechny časové údaje v tabulce jsou v SEČ a jsou vypočteny pro zeměpisnou polohu 50° severní šířky a 15° východní délky, nadmořskou výšku 0 metrů a ideální horizont.

DEFINICE



Občanský soumrak – končí v okamžiku, kdy je Slunce šest úhlových stupňů pod obzorem.

Nautický soumrak – končí a nastává *nautická noc*, když je Slunce dvanáct úhlových stupňů pod obzorem.

Astronomický soumrak – končí a nastává *astronomická noc*, když Slunce zapadne více než osmnáct úhlových stupňů pod obzor.

Tabulka 6: Časy soumraků v průběhu roku pro zeměpisnou polohu České republiky

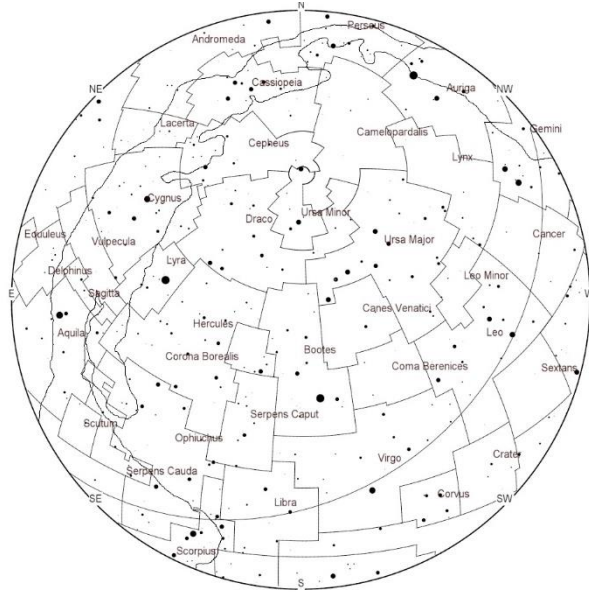
Datum	Astronomický		Nautický soumrak		Občanský	
	Zač.	Konec	Zač.	Konec	Zač.	Konec
1. 1.	5:54	18:13	6:33	17:34	7:14	16:53
15. 1.	5:51	18:28	6:30	17:49	7:10	17:09
29. 1.	5:41	18:46	6:19	18:08	6:58	17:29
12. 2.	5:23	19:06	6:00	18:29	6:38	17:51
26. 2.	4:58	19:28	5:36	18:51	6:13	18:14
11. 3.	4:29	19:52	5:07	19:14	5:45	18:36
25. 3.	3:55	20:17	4:36	19:37	5:14	18:59
8. 4.	3:18	20:46	4:02	20:02	4:43	19:22
22. 4.	2:38	21:20	3:28	20:30	4:12	19:46
6. 5.	1:55	22:00	2:55	20:59	3:44	20:10
20. 5.	1:05	22:49	2:26	21:28	3:21	20:33
3. 6.	-----	-----	2:03	21:54	3:05	20:52
17. 6.	-----	-----	1:54	22:08	2:59	21:03
1. 7.	-----	-----	2:01	22:07	3:05	21:03
15. 7.	0:41	23:30	2:21	21:50	3:20	20:52
29. 7.	1:39	22:33	2:49	21:24	3:40	20:32
12. 8.	2:22	21:47	3:17	20:52	4:03	20:05
26. 8.	2:58	21:05	3:44	20:18	4:27	19:36
9. 9.	3:28	20:26	4:10	19:44	4:49	19:04
23. 9.	3:54	19:50	4:33	19:11	5:11	18:33
7.10.	4:17	19:18	4:55	18:40	5:32	18:02
21.10.	4:39	18:50	5:16	18:12	5:54	17:35
4.11.	4:59	18:27	5:37	17:50	6:15	17:11

Přílohy

18.11.	5:18	18:12	5:57	17:33	6:36	16:54
2.12.	5:35	18:04	6:14	17:25	6:55	16:44
16.12.	5:47	18:04	6:27	17:25	7:08	16:43
30.12.	5:53	18:12	6:33	17:33	7:14	16:52
15. 1.	5:51	18:28	6:30	17:49	7:10	17:09
29. 1.	5:41	18:46	6:19	18:08	6:58	17:29

Azimutální souřad. ARC
 Zdárnivě
 Opava
 2019-05-15
 00h00m00s (CEST)
 Mag 4.6/6 0.60 0'
 Zorné pole +360°00'00"

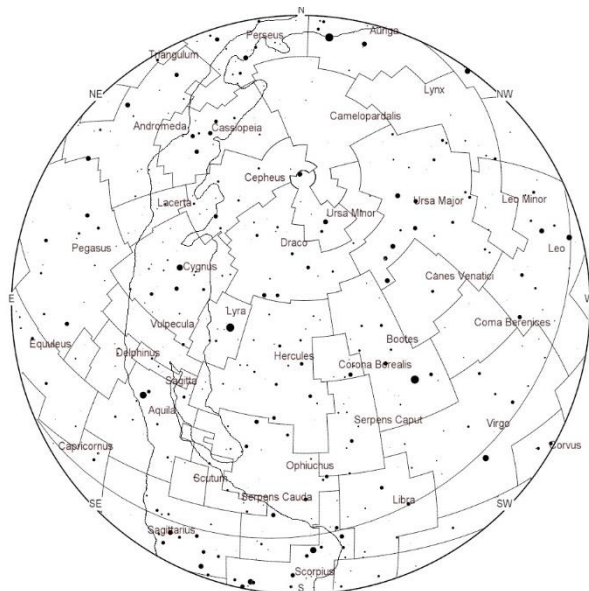
●	●	●	●	●	●	
0	1	2	3	4	5	6
+	○	○	○	○	○	○
Ast	Com	Var	Dbl	Dirk	Gcl	Gx
○	⊕	⊗	⊠	⊞	+	x
Oc	Gb	Pl	Nb	C+N	*	?



Obrázek 39: Hvězdná obloha v ČR 15. května v 00.00 hodin SEČ⁴⁰

Azimutální souřad. ARC
 Zdárnivě
 Opava
 2019-06-15
 00h00m00s (CEST)
 Mag 4.6/6 0.60 0'
 Zorné pole +360°00'00"

●	●	●	●	●	●	
0	1	2	3	4	5	6
+	○	○	○	○	○	○
Ast	Com	Var	Dbl	Dirk	Gcl	Gx
○	⊕	⊗	⊠	⊞	+	x
Oc	Gb	Pl	Nb	C+N	*	?



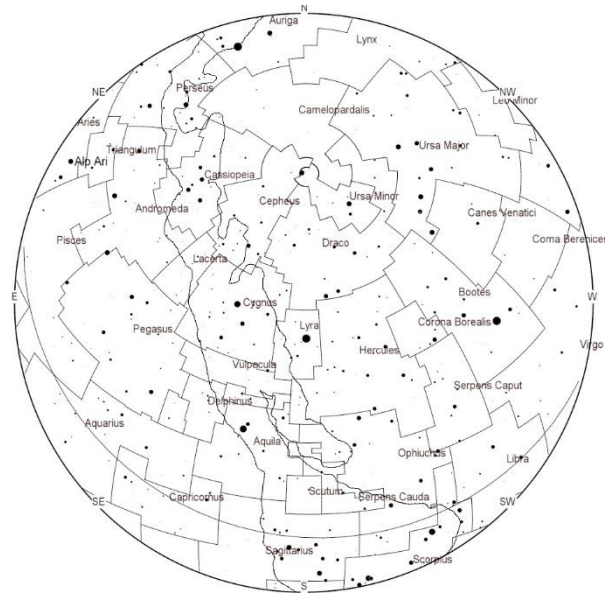
Obrázek 40: Hvězdná obloha v ČR 15. června v 00.00 hodin SEČ⁴¹

⁴⁰ Zdroj: Cartes du Ciel, v. 4.0

⁴¹ Zdroj: Cartes du Ciel, v. 4.0

Azimutální souřad. ARC
 Zdárnivě
 Opava
 2019-07-15
 00h00m00s (CEST)
 Mag 4.6/6 0,60 0'
 Zorné pole +360°00'00"

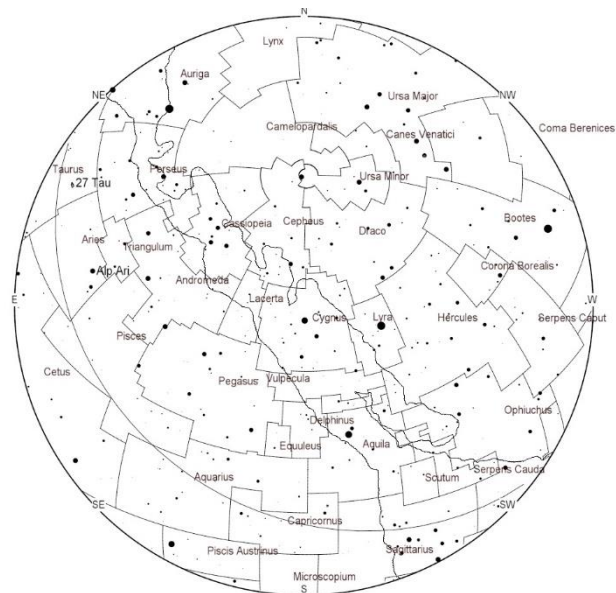
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
0	1	2	3	4	5	6			
•	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Ast	Com	Var	Dbl	Dirk	Gcl	Gx			
○	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
Oc	Gb	Pi	Nb	C+N	*	?			



Obrázek 41: Hvězdná obloha v ČR 15. července v 00.00 hodin SEČ⁴²

Azimutální souřad. ARC
 Zdárnivě
 Opava
 2019-08-15
 00h00m00s (CEST)
 Mag 4.6/6 0,60 0'
 Zorné pole +360°00'00"

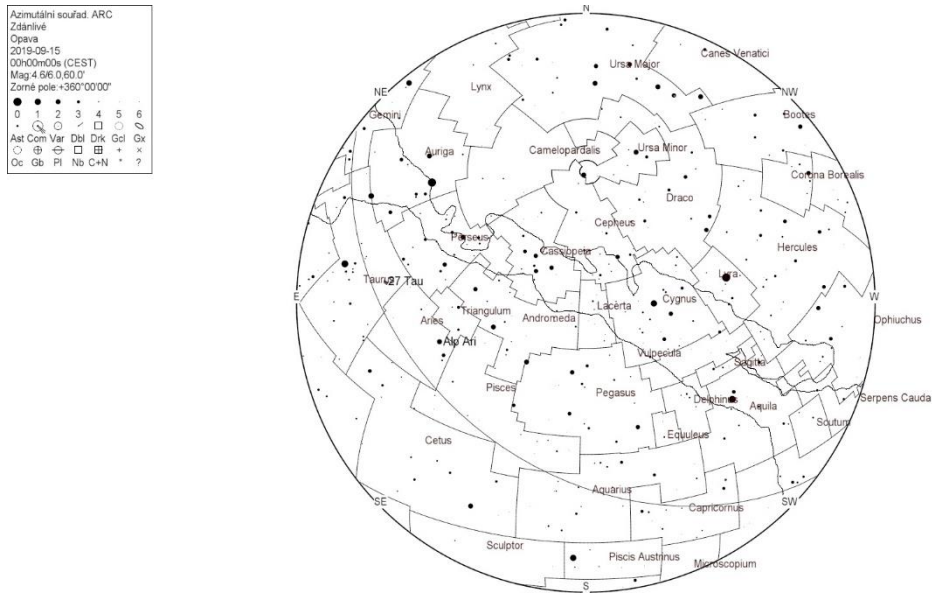
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
0	1	2	3	4	5	6			
•	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Ast	Com	Var	Dbl	Dirk	Gcl	Gx			
○	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
Oc	Gb	Pi	Nb	C+N	*	?			



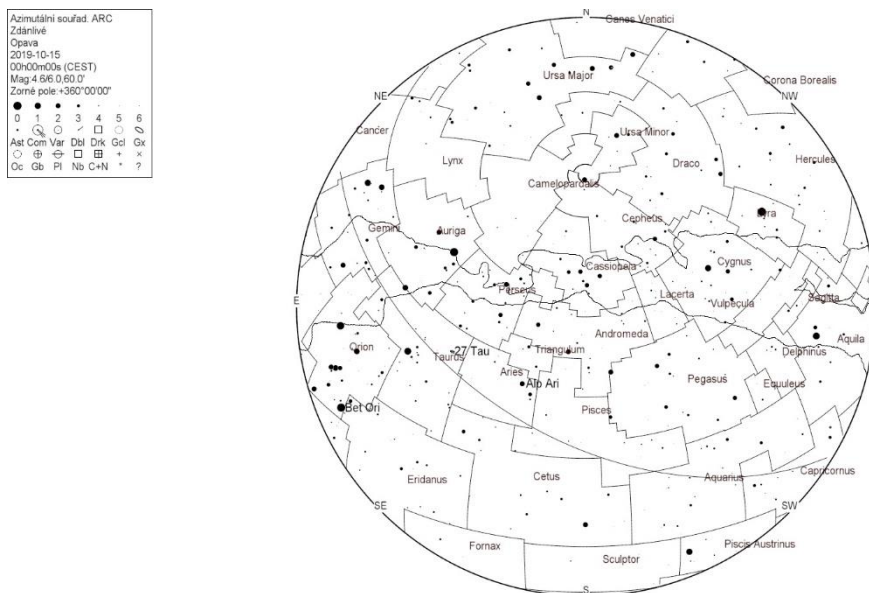
Obrázek 42: Hvězdná obloha v ČR 15. srpna v 00.00 hodin SEČ⁴³

⁴² Zdroj: Cartes du Ciel, v. 4.0

⁴³ Zdroj: Cartes du Ciel, v. 4.0



Obrázek 43: Hvězdná obloha v ČR 15. září v 00.00 hodin SEČ ⁴⁴



Obrázek 44: Hvězdná obloha v ČR 15. října v 00.00 hodin SEČ ⁴⁵

⁴⁴ Zdroj: Cartes du Ciel, v. 4.0

⁴⁵ Zdroj: Cartes du Ciel, v. 4.0

LITERATURA

- [1] E. Böhm-Vitense, *Introduction to stellar astrophysics, Vol. 1*
- [2] D. F. Ferguson, *Introductory Astronomy Exercises*
- [3] H. Karttunen, P. Kröger, H. Oja, M. Poutanen, K. J. Donner, *Fundamental Astronomy*
- [4] P. Jain, *An Introduction to Astronomy and Astrophysics*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015, ISBN 13: 978-1-4398-8591-8,
- [5] J. Janík, Z. Mikulášek, *Obecná astronomie*, MU Brno, <http://astro.physics.muni.cz/download/documents/skripta/F3170.pdf>, 2017,
- [6] Z. Mikulášek, M. Zejda, *Proměnné hvězdy*, MU Brno, <http://astro.physics.muni.cz/download/documents/skripta/F5540.pdf> , 2013,
- [7] Z. Mikulášek, J. Krτίčka, *Úvod do fyziky hvězd*, MU Brno, <https://astro.physics.muni.cz/download/documents/skripta/F3080.pdf> , 2005,
- [8] A. J. Norton, *Observing the Universe*, Cambridge University Press, ISBN 0521603935, 2004,
- [9] A. E. Roy, D. Clarke, *Astronomy Principles and Practice*, CRC Press; 4 edition (March 29, 2018), ISBN-10: 1138406228, ISBN-13: 978-1138406223
- [10] Z. Řehoř, *Základy optiky*, portál ČAS, <http://posec.astro.cz/index.php/clanky/teorie>, 2013,
- [11] J. L. Safko, *Self-paced Study Guide & Laboratory Exercises in Astronomy*
- [12] Chr. Sterken, J. Manfroid, *Astronomical Photometry: A Guide*, Kluwer Academic Publishers, ISBN 0792316533, 1992,
- [13] Široký, Široká, *Základy astronomie v příkladech*
- [14] V. Vanýsek, *Základy astronomie a astrofyziky*
- [15] M. Wolf a kol., *Astronomická příručka*, Academia, ISBN 802000467X, 1992,
- [16] M. Zejda, *Základy astronomie I*, MU Brno, <http://astro.physics.muni.cz/download/documents/skripta/F1251.pdf> , 2013,
- [17] M. Zeilik, *Astronomy – The Evolving Universe*

SHRNUTÍ STUDIJNÍ OPORY

Text této studijní opory by měl zájemcům o studium předmětu Základy astronomie a astrofyziky usnadnit orientaci v některých tématech, kterými se zmíněný semestrální kurz zabývá. Jednotlivé kapitoly jsou koncipovány jako úvod do této problematiky nebo její shrnutí, pokud se dané téma přednáší v jiném předmětu podrobněji. V textu jsou použity prvky typické pro distanční studijní texty, jejich přehled je na konci textu a jejich význam je zřejmý z názvosloví i použitého grafického prvku.

Studijní opora má také svou ELM nadstavbu v prostředí Moodle, kterou mohou zájemci najít na univerzitním nebo fakultním e-learningovém portálu (<https://elearning.slu.cz/>).

První kapitola se věnuje přehledu oborů astronomie a astrofyziky, milníkům vývoje astronomie a astrofyziky, přehledu astronomické literatury a další informačních zdrojů, astronomickým veličinám a jednotkám a také přehledu souhvězdí a označení hvězd.

Druhá kapitola vysvětluje různé druhy astronomických souřadnicových systémů a také jejich vzájemné transformace.

Třetí kapitola je zaměřena na vlastnosti Země jako planety a také jsou vysvětleny vlivy precese, nutace, aberace a refrakce na polohu objektu pro pozorovatele na povrchu Země.

Čtvrtá kapitola se věnuje základům fyziky Sluneční soustavy a obsahuje také malou encyklopedii těles Sluneční soustavy.

Pátá kapitola vysvětluje pohyb Měsíce a také se zabývá zatměními a zákryty astronomických těles, zejména těch, které se týkají Měsíce.

Šestá kapitola představuje astronomické metody měření času a také různé kalendářní systémy.

Sedmá kapitola se zabývá nejen astronomickými dalekohledy, ale také jejich montážemi a základními typy detektorů používaných k astronomickým pozorováním.























Osmá kapitola obsahuje definice fyzikálních veličin popisujících jasnost astronomických objektů a základní informace o astronomické fotometrii a fotometrických systémech.

Devátá kapitola je úvodem do astronomické spektroskopie. Je v ní vysvětlena podstata spektrální klasifikace hvězd a také Harvardská klasifikace i Hertzsprungův-Russellův diagram

Desátá kapitola rekapituluje naše současné představy o vzniku a vývoji hvězd různých hmotností.

Jedenáctá kapitola je věnována vícenásobným hvězdným soustavám, hvězdným asociacím, otevřeným a kulovým hvězdokupám a v neposlední řadě také Galaxií a galaxiím.

PŘEHLED DOSTUPNÝCH IKON

	Čas potřebný ke studiu		Cíle kapitoly
	Klíčová slova		Nezapomeňte na odpočinek
	Průvodce studiem		Průvodce textem
	Rychlý náhled		Shrnutí
	Tutoriály		Definice
	K zapamatování		Případová studie
	Řešená úloha		Věta
	Kontrolní otázka		Korespondenční úkol
	Odpovědi		Otázky
	Samostatný úkol		Další zdroje
	Pro zájemce		Úkol k zamyšlení

Název: **Základy astronomie a astrofyziky**

Autor: **RNDr. Tomáš Gráf, Ph.D.**

Vydavatel: Slezská univerzita v Opavě
Filozoficko-přírodovědecká fakulta v Opavě

Určeno: studentům SU FPF Opava

Počet stran: 157

Tato publikace neprošla jazykovou úpravou.