

Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity  
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Miloslav Zejda

## Základy astronomie

Skripta – verze 0.15  
23. ledna 2013

Brno 2013



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

# Obsah

<b>Základy astronomie 1</b>	<b>7</b>
<b>1 Historický úvod</b>	<b>9</b>
1.1 Vznik a význam astronomie . . . . .	9
1.2 Mezníky v dějinách astronomie . . . . .	11
<b>2 Základní pojmy v astronomii</b>	<b>19</b>
2.1 Obloha a hvězdná obloha . . . . .	19
2.2 Jak je to jasné? . . . . .	22
2.3 Jednotky hmotnosti, výkonu . . . . .	24
2.4 Vesmírné dálavy . . . . .	25
2.4.1 Astronomické délkové jednotky . . . . .	25
2.4.2 Vzdálenosti ve vesmíru . . . . .	27
<b>3 Čas</b>	<b>31</b>
3.1 Jednotky času . . . . .	31
3.2 Měření času . . . . .	32
3.2.1 Časy v astronomii . . . . .	36
3.3 Doba rotace a doba oběhu . . . . .	38
3.3.1 Den . . . . .	38
3.3.2 Hvězdný čas . . . . .	41
3.3.3 Místní a pásmový čas . . . . .	41
3.3.4 Rok . . . . .	43
3.4 Kalendáře . . . . .	45
<b>4 Hvězdné objekty noční oblohy</b>	<b>49</b>
4.1 Souřadnicové soustavy v astronomii . . . . .	49
4.1.1 Obzorníková soustava souřadnic . . . . .	51
4.1.2 Rovníková soustava souřadnic . . . . .	54
4.1.3 A přece se mění . . . . .	56
4.2 Hvězdy a souhvězdí . . . . .	59
4.2.1 Hvězdné mapy a atlasy . . . . .	61
4.2.2 Označování hvězd . . . . .	66
4.2.3 Dvojhvězdy . . . . .	67
4.2.4 Proměnné hvězdy . . . . .	68
4.3 „Nehvězdné“ objekty ze světa hvězd . . . . .	70
4.3.1 Hvězdokupy . . . . .	71
4.3.2 Mlhoviny . . . . .	73
4.4 Naše a cizí galaxie . . . . .	76
4.5 Atmosférické vlivy na astronomická pozorování . . . . .	78
4.5.1 Vlivy při pozorování . . . . .	78
4.5.2 Seeing . . . . .	78
4.5.3 Světelné znečištění . . . . .	80

---

<b>5</b>	<b>Vesmírní sousedé na obloze</b>	<b>83</b>
5.1	Slunce . . . . .	83
5.1.1	Slunce na obloze . . . . .	85
5.1.2	Slunce na hvězdné obloze . . . . .	87
5.2	Měsíc . . . . .	88
5.2.1	Měsíc siderický a synodický . . . . .	89
5.2.2	Fáze Měsíce . . . . .	90
5.2.3	Měsíční tvář . . . . .	91
5.3	Kosmické divadlo - zatmění . . . . .	95
5.3.1	Zatmění Měsíce . . . . .	96
5.3.2	Zatmění Slunce . . . . .	98
5.3.3	Četnost a pozorovatelnost zatmění . . . . .	102
5.4	Planety, trpasličí planety . . . . .	102
5.4.1	Pozorování planet . . . . .	105
5.4.2	Tanec planet . . . . .	106
5.4.3	Aspekty . . . . .	108
5.5	Planetky . . . . .	109
5.6	Komety . . . . .	110
5.7	Meteoroidy, meteory, meteority . . . . .	110
5.8	Umělé družice . . . . .	114
<b>6</b>	<b>Informace z vesmíru</b>	<b>116</b>
6.1	Meteority . . . . .	116
6.2	Dovoz vzorků . . . . .	117
6.3	Kosmický vítr aneb nálety částic . . . . .	119
6.3.1	Kosmické záření . . . . .	119
6.3.2	Sluneční vítr . . . . .	120
6.3.3	Neutrina . . . . .	121
6.3.4	Gravitační vlny . . . . .	122
6.4	Elektromagnetické záření . . . . .	123
6.4.1	Okna do vesmíru . . . . .	125
6.4.2	Jak tělesa září? . . . . .	127
6.4.3	Záření absolutně černého tělesa . . . . .	130
<b>7</b>	<b>Spektroskopie</b>	<b>136</b>
7.1	Dopplerův jev . . . . .	137
7.2	Počátky astrofyziky . . . . .	138
7.3	Spektroskopie hvězd . . . . .	139
7.4	Spektrální klasifikace hvězd . . . . .	141
<b>8</b>	<b>Fotometrie</b>	<b>146</b>
8.1	Pogsonova rovnice . . . . .	146
8.2	Absolutní jasnost, modul vzdálenosti . . . . .	149
8.3	Barvy v astronomii . . . . .	150

<b>9</b>	<b>Optická astronomie</b>	<b>155</b>
9.1	Astronomův nejcennější přístroj . . . . .	155
9.2	Prehistorie a historie dalekohledu . . . . .	159
9.3	Funkce dalekohledů a jejich typy . . . . .	161
9.3.1	Čočkové dalekohledy (refraktory) . . . . .	162
9.3.2	Zrcadlové dalekohledy (reflektory) . . . . .	163
9.3.3	Kombinované dalekohledy . . . . .	166
9.3.4	Speciální dalekohledy . . . . .	167
9.4	Charakteristiky a vady astronomických optických přístrojů . . . . .	170
9.4.1	Zvětšení dalekohledu . . . . .	170
9.4.2	Světelnost dalekohledu . . . . .	171
9.4.3	Rozlišovací schopnost dalekohledu . . . . .	172
9.4.4	Optické vady dalekohledů . . . . .	173
9.5	Příslušenství dalekohledů . . . . .	175
9.5.1	Okuláry . . . . .	175
9.5.2	Optické filtry . . . . .	178
9.5.3	Detektory . . . . .	179
9.5.3.1	Fotografie . . . . .	180
9.5.3.2	Fotonásobiče a fotometry . . . . .	182
9.5.3.3	Na bázi křemíku . . . . .	183
9.5.4	Chytrá řešení . . . . .	186
9.5.5	Montáže dalekohledů . . . . .	187
9.6	Největší observatoře a teleskopy světa . . . . .	190
9.7	Kosmické observatoře . . . . .	192
<b>10</b>	<b>Neoptická astronomie</b>	<b>196</b>
10.1	Astronomie gama záření . . . . .	196
10.2	Rentgenová astronomie . . . . .	197
10.3	Ultrafialová astronomie . . . . .	199
10.4	Infračervená astronomie . . . . .	199
10.5	Radioastronomie . . . . .	201
10.6	Částicová astronomie . . . . .	203
10.6.1	Kosmické záření . . . . .	204
10.6.2	Neutrinová astronomie . . . . .	204
10.6.3	Gravitační vlny . . . . .	206
<b>11</b>	<b>Sluneční soustava - přehled</b>	<b>209</b>
11.1	Inventura ve Sluneční soustavě . . . . .	209
11.2	Vývoj Sluneční soustavy . . . . .	210
11.2.1	Vznik Sluneční soustavy . . . . .	210
11.2.2	Stopy předchozího vývoje na tváři planet . . . . .	211
11.3	Základní informace o planetách . . . . .	214
11.3.1	Merkur ☿ . . . . .	214
11.3.2	Venuše ♀ . . . . .	215
11.3.3	Země ♂ . . . . .	216

11.3.4	Mars $\♂$ . . . . .	218
11.3.5	Jupiter $\♃$ . . . . .	220
11.3.6	Saturn $\♄$ . . . . .	221
11.3.7	Uran $\♅$ . . . . .	223
11.3.8	Neptun $\♆$ . . . . .	224
11.4	Malá tělesa Sluneční soustavy . . . . .	225
11.4.1	Trpasličí planety . . . . .	225
11.4.2	Planetky . . . . .	227
11.4.3	Komety . . . . .	228
11.5	Modely Sluneční soustavy . . . . .	229
11.5.1	Geocentrický model . . . . .	229
11.5.2	Heliocentrický model . . . . .	230
11.5.3	Tychonův kompromis . . . . .	231
11.6	Keplerovy zákony . . . . .	232
<b>12</b>	<b>Exoplanety</b> . . . . .	<b>236</b>
12.1	Co je (exo)planeta? . . . . .	237
12.2	Přehled metod pro detekci exoplanet . . . . .	240
12.2.1	Přímé zobrazování . . . . .	240
12.2.2	Astrometrie . . . . .	241
12.2.3	Gravitační mikročochky . . . . .	241
12.2.4	Zpožd'ování záblesků pulsarů . . . . .	243
12.2.5	Radiální rychlosti . . . . .	244
12.2.6	Transity . . . . .	245
<b>13</b>	<b>Jsou tam?</b> . . . . .	<b>247</b>
13.1	Vznik života . . . . .	248
13.2	Život ve vesmíru z pohledu astronoma . . . . .	249
13.3	Četnost života ve vesmíru - Drakeova rovnice . . . . .	250
13.3.1	Život na Zemi – typický vzorek? . . . . .	251
13.4	Hledání mimozemského života . . . . .	252
13.4.1	Život ve Sluneční soustavě . . . . .	254
13.5	Kontakt s mimozemšťany . . . . .	255
13.6	Domněnka o vzácné Zemi . . . . .	257
<b>14</b>	<b>Rejstřík osob</b> . . . . .	<b>259</b>
<b>A</b>	<b>Appendix: Vývoj astronomie</b> . . . . .	<b>273</b>
<b>B</b>	<b>Appendix: Fotometrické pojmy</b> . . . . .	<b>287</b>
B.1	Slovníček pojmů z fotometrie . . . . .	287
<b>C</b>	<b>Appendix: Kuželosečky</b> . . . . .	<b>288</b>
<b>D</b>	<b>Appendix: Metody měření vzdáleností ve vesmíru</b> . . . . .	<b>288</b>
<b>E</b>	<b>Appendix: Výslovnost latinských slov</b> . . . . .	<b>289</b>

<b>F Appendix: Řecká abeceda</b>
----------------------------------

<b>289</b>
------------

# Základy astronomie 1





# 1 Historický úvod

## 1.1 Vznik a význam astronomie

Lidé od nepaměti vzhlíželi k obloze a sledovali, co se na ní odehrává. Temná obloha posetá hvězdami je opravdu kouzelná. Dokáže zaujmout, uchvátit. V minulosti ale bylo přímo otázkou života a smrti rozpoznat nejen aktuální počasí a jeho změny, ale i sledovat čas, nástup noci, příchod ročních období. Znalost oblohy, fází Měsíce, jasných hvězd a kalendáře tak předešla písmo o desítky tisíc let!



Obrázek 1.1: Pozorování oblohy se (pra)člověk věnoval už v dávných dobách. Zdroj: <http://www.boards.ie>

Soubor znalostí o vesmíru, jeho složkách, stavbě, vzniku a vývoji, stejně jako nauku, která se jimi zabývá označujeme jako **astronomie**. Její vznik pokládáme do doby asi před 6000 lety. Jde tedy o nejstarší vědu, starší než literatura!

Termín *astronomie* poprvé použil Platón ve 4. století př. n. l. Slovo astronomie je složeno z části *astron* značící hvězdu a *nomos*, což můžeme překládat jako počítat nebo zákon. Ve 13. století rozdělil Albertus Magnus obor znalostí o vesmíru a jeho objektech na teoretickou část (astronomii) a praktickou (astrologii). Z dnešního pohledu je důvod zřejmý. Zatímco astronomie pozorovala a zkoumala vzdálené světy bez nějakého spojení s praktickým životem, astrologie bezprostředně ovlivňovala životy lidí, kteří jí věřili.<sup>1</sup>

Astronomie jako jediná věda hledá zákonitosti a popisuje (periodické) děje na obloze. Vysvětluje, proč se střídá den a noc, roční období, jak a proč se mění délka noci nebo vzhled Měsíce, jeho fáze. Jistě bychom našli i další otázky. Lidé se jimi zabývají už tisíce let, správné odpovědi na ně jsou také známé velmi dlouho. Je ale smutné, že i dnes s odpověďmi zápolí nejen laici, ale i někteří zájemci o fyziku, astronomii a astrofyziku.

Většina lidské činnosti má jistý účel, smysl. Člověk zajišťuje své materiální i duševní potřeby. Jaký prospěch má ale z astronomie? Na první pohled by se mohlo zdát, že jde

<sup>1</sup>Ještě dnes si někteří lidé pletou astronoma a astrologa, přitom rozdíl mezi nimi je zásadní. Liší se zejména přístupem k problémům. Zatímco astronom pracuje výhradně vědeckými metodami, astrolog využívá i nevědecké postupy. V českém prostředí by se možná nabízelo použití termínu „hvězdář“. Ten se ale zpravidla využívá jen v historickém kontextu.

o nepraktickou aktivitu hrstky nadšenců, kteří prostě rádi koukají v noci na hvězdné nebe a dlouze o tom debatují. Přínos astronomie lidstvu je ale zřetelný a jasný. Pozorování nebeských těles položilo základy kalendáře a měření času. Pozorované periodické jevy (střídání dne a noci, fáze Měsíce a další) se staly prvotní etalony časových škál. Z takového pozorování periodických jevů vychází i zjištění staroegyptských učenců, že heliaktický východ<sup>2</sup> Síria předznamenává vždy období záplav. Pro první zemědělské kultury usazené poblíž velkých vodních toků to byla nesmírně cenná informace. S rozvojem civilizace se lidé stále častěji vydávali na daleké cesty, při nichž byla nezbytná správná orientace a navigace. Spolu s určováním polohy lze tyto znalosti založené na astronomických poznacích označit za strategické. Sloužily dobyvatelům, válečníkům, objevitelům, obchodníkům. V dnešní době není třeba při cestách používat orientaci podle hvězd nebo měření sextantem, ale moderní družicové systémy využívají orientaci podle hvězd a podklady opět poskytli astronomové. V současnosti přispívají astronomové také k řešení dalších problémů. Ukazuje se například, že je velmi důležité sledovat aktivitu našeho Slunce. Zvýšená aktivita Slunce s výronem částic směrem k Zemi může znamenat vážné ohrožení činnosti družic a všech činností, které je využívají (komunikace, televizní a rozhlasové vysílání, bankovní terminály, internetové satelitní spojení atd.) ale také masivní výpadky rozvodné sítě elektrické energie. Včasné varování tak může zabránit nejen obrovským materiálním ztrátám ale zachránit i lidské životy. Lidská společnost se navíc snaží najít recept na stále rostoucí spotřebu energie. Vědci mnoha oborů napodobují výtvoř přírody na Zemi. Lidstvo by však do jisté míry potřebovalo napodobit i výtvoř kosmické přírody - děje probíhající v nitru hvězd. Pokud bychom je ovládli, byla by vyřešena naše stále rostoucí poptávka po energii. A je tu ještě jeden přínos. Astronomické přístroje patří obecně k největším a technologicky nejvyspělejším zařízením. Požadavky astronomů na lepší a výkonnější pozemní přístroje i kosmické sondy tak představují do jisté míry hnací sílu technického a technologického rozvoje.

Možná ve výčtu příspěvků astronomie lidstvu někomu chybí horoskopy. Nepochybně v minulosti ovlivňovaly důležitá státnická rozhodnutí a hrály významnou roli. Právě víra, že děje na obloze, konstelace planet, Slunce a Měsíce určují lidský osud a chod dějin, jsou typické pro astrologii. Astrologie byla v minulosti z hlediska vědeckého poznání prospěšná snad pouze tím, že výpočty horoskopů vyvolaly nutnost předvídat polohy hvězd, Slunce, Měsíce a planet na obloze, což přispělo k rozvoji astronomie. Ve srovnání s astrologií je však astronomie věda praktická a potřebná. S trochou nadsázky můžeme tvrdit, že v těžkých dobách pomohla astrologie i uživit některé astronomy. Jak o ní smýšlel Kepler je zřejmé z následujících ukázek:

*„Astrologie si nezasluhuje, aby jí člověk věnoval svou pozornost, avšak lidé žijí v klamně představě, že k matematikovi patří.“*

*„Pravda, astrologie je bláznivá holčička, avšak, milý bože, kampak by se poděla její matka, vysoce rozumná astronomie, kdyby tuto bláznivou dcerku neměla!..., ...A příjmy matematiků jsou ostatně tak ubohé, že by matinka určitě hladověla, kdyby dceruška nic nevydělávala.“*

---

<sup>2</sup>heliaktický východ – poprvé během roku lze spatřit dané těleso před východem Slunce na ranní obloze

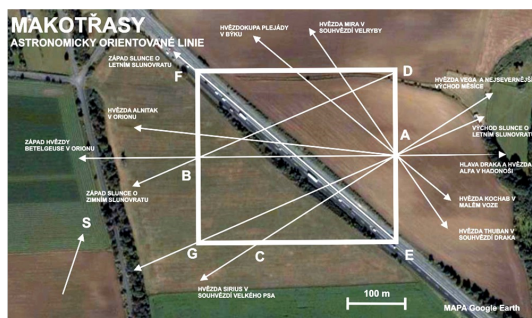


Obrázek 1.2: Ukázky starověkých předmětů s astronomickými motivy. Zdroj: Internet.

## 1.2 Mezníky v dějinách astronomie

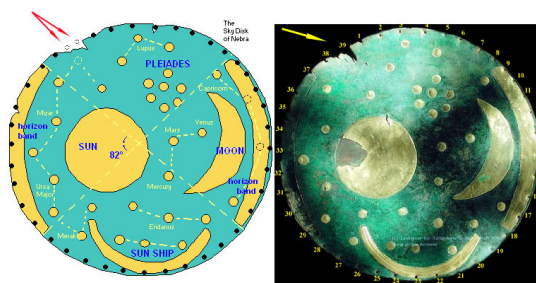
Stanovit nejdůležitější mezníky v dějinách astronomie je obtížné a někdy velmi diskutabilní, zejména u těch nejstarších. Přinášíme alespoň stručný přehled.

- kolem 9 000 let př.n.l. - soustava staveb a kamenných kruhů v jihovýchodním Turecku. Část mohla sloužit i jako svatyně a observatoř. Místo není dosud plně prozkoumáno.
- 5. tisíciletí př.n.l. - předpokládá se nejstarší použití gnómonu.
- 5.-4. tisíciletí př.n.l. - při stavbách v oblasti Nilu, Eufratu a Tigridu se používá zaměřování pomocí hvězd.
- kolem 4000(?) př.n.l. – nejstarší zaznamenaná astronomická pozorování pochází z Egypta a Severní Ameriky; v Egyptě vzniká nejstarší kalendář.
- 3500 př.n.l. - vznikají kamenné observatoře – kamenné řady. Pozůstatky jedné z nich lze nalézt v Čechách u Makotřas (viz obrázek 1.3).



Obrázek 1.3: Astronomicky orientované linie v Makotřasech. Zdroj: [www.observatory.cz](http://www.observatory.cz)

- asi 3400 př.n.l. - nejstarší (Mayský) záznam o pozorování zatmění Měsíce. Může se ale jednat i o zpětný výpočet z pozdější doby.
- kolem 3000 př.n.l. – první písemné materiály o astronomii se objevují v Egyptě, Číně, Mezopotámii i Střední Americe); posláním astronomie je předpověď období záplav a kalendář.



Obrázek 1.4: Disk z Nebry. Památka na astronomii doby bronzové. Interpretace Andis Kaulins. Zdroj: [www.siloam.net](http://www.siloam.net)

- 3. tisíciletí př.n.l. - k měření hodin používají v Egyptě sluneční hodiny
- 3000-2000 př.n.l. - v Číně určena délka roku na 365,25 dne



Obrázek 1.5: Čínská mapa hvězdné oblohy. Zdroj: <http://heads-in-the-heavens.tumblr.com>

- 2697 př.n.l. - nejstarší zachovaný záznam o zatmění Slunce (Čína)
- 2461 př.n.l. - v Číně zaznamenána konjunkce planet (není ale vyloučeno, že jde o pozdější výpočet).
- 2296 př.n.l. nejstarší záznam čínského katalogu komet.
- 2136 př.n.l. - kuriózní událost, která skončila smrtí astronomů. Dvorní astronomové Hsi a Ho prý nepředpověděli zatmění Slunce a nevarovali před ním. Věřilo se totiž, že zatmění způsobuje zlý drak, který žere slunce. Proti němu se dá bojovat například bubnováním, střelením. A protože lidé sami nemohli účinně zahánět draka a bylo jen dílem náhody a štěstí, že drak slunce nesežral celé, byli astronomové potrestáni.
- kolem 2000 př.n.l. - první slunečně-měsíční kalendáře v Egyptě a Mezopotámii.
- 1900 př. n.l - vznikla svatyně a observatoř Stonehenge v Anglii.
- poč. 2. tis. př.n.l. - první teorie pohybu Slunce, Měsíce a planet. Babylónští astronomové využili geocentrickou představu. Tam také poprvé vykreslili souhvězdí.



Obrázek 1.6: Jasná hvězda vlevo od Měsíce na skále v kaňonu Chaco, by mohla být záznamem supernovy z roku 1054. Obrazec podobný víru mohl být inspirován Halleyovou kometou, která se objevila na nebi o 12 let později. Zdroj: H. Couperová, N. Henbest: Dějiny astronomie, Knižní klub 2009



Obrázek 1.7: Monument Stonehenge. Zdroj: <http://storiografia.blog.cz>

- 11. st. př.n.l. - čínský vědec Ču Kong určil poměrně přesně sklon ekliptiky k rovníku.
- 8.-3. st. př.n.l. - v Mezopotámii pracovala pravidelná astronomická pozorovací služba. Na její pozorování se často odvolává Ptolemaios. Výsledkem měření bylo zpřesnění délky roku, délky měsíčního cyklu, objev periody saros a další.
- 6. st. př.n.l. - Pythagoras a Tháles z Miletu spekulují, že Země je koule.
- 585 př. n.l. - Tháles z Milétu předpověděl zatmění Slunce
- 2. pol. 6. st. př.n.l. - babylonský učenec Kidinn tvrdil, že rychlost pohybu planet je nerovnoměrná, ale během roku postupně roste a pak zase klesá
- 530 př.n.l. - vznik pythagorejského spolku; stoupenci např. Filoláos) považovali za střed vesmíru centrální oheň, kolem něhož obíhají planety, měsíc i Slunce.
- 4. st. př.n.l. - v Číně vznikl nejstarší atlas komet, který posbíral i mnohem starší záznamy. Tzv. Hedvábná kniha byla objevena v roce 1973. Ve stejném období vytvořil Ši Šen (možná s kolektivem spolupracovníků) i první známý hvězdný katalog Ken-Š'ing-ťing (Základy určování hvězd) obsahující polohy několika set hvězd.

- 4. st. př.n.l. - Platón znal nepravidelnosti v pozorovaném pohybu planet. Eudoxos vytvořil geocentrický model pohybu planet, Slunce, Měsíce.
- 340 př.n.l. - Aristoteles sepsal knihu „O nebi“, kde shrnul a zobecnil tehdejší empirické kosmologické poznatky. Vytvořil geocentrický systém s dvěma částmi – sublunární sféra včetně Země je tvořena čtyřmi elementy (oheň, voda, vzduch, země) a supralunární sféru hvězd, která je neměnná a je vyplněna éterem.



Obrázek 1.8: Starověká ilustrace z rukopisu z dobu kolem roku 1300. Astronomové věřili, že Slunce, Měsíc, Merkur, Venuše, Mars, Jupiter a Saturn obíhají kolem Země. V díle je také poznamenáno, že každá ze čtyř měsíčních fází trvá 7 dní. Zdroj: <http://www.luckypalm.com/2010/astronomy-to-the-power-of-seven-graphic/>

- kolem 280 př.n.l. - Aristarchos ze Sámu předpokládá, že Země obíhá kolem Slunce (heliocentrismus); první odhad vzdálenosti Země-Slunce.
- kolem 240 př.n.l. - Eratosthenes měří obvod Země.
- kolem 130 př.n.l. - Hipparchos objevuje precesi a sestavuje první (evropský) katalog hvězd, v němž je zhruba 1000 nejjasnějších hvězd.
- 1. st. př.n.l. - Titus Lucretius Carus obhajuje atomismus a mj. rozvíjel myšlenku nekonečného hmotného vesmíru, který existuje bez účasti božských sil.
- 45 př.n.l. – císař Julius Caesar zavedl v římské říši čistě sluneční, tzv. juliánský kalendář (na radu řeckého astronoma Sosigena).
- kolem 140 n.l. – Ptolemaios – publikoval propracovanou teorii geocentrismu ve velkolepém spisu Megalé Syntaxis (Almagest).
- 2. st.n.l. - čínský astronom Čang-Cheng uvádí ve spisu Ling sien (Složení vesmíru), že Měsíc má tvar koule a nemá vlastní světlo.
- 682 - Mayští astronomové z města Tikal určili délku synodického měsíce na 29,53020 dní (dnešní měření: 29,53059); podobně pak určili délku tropického roku na 365,2420 dní (dnes: 365,2422).



Obrázek 1.9: Galileův bohatě zdobený dalekohled. Řez replikou Galileova dalekohledu, která ukazuje strukturu a složení částí dalekohledu. Zdroj: <http://blogs.telegraph.co.uk>; <http://brunelleschi.imss.fi.it/galileopalazzostrozzi/>



Obrázek 1.10: Práce na observatoři Taqi al-Dina. Obrázek k epické básni Shahinshah-nama, kterou napsal 'Al ad-Din Mansur-Shirazi. <http://www.muslimheritage.com>.

- konec 8. st. - al-Chvárizmí změřil obvod Země 40 700 km.
- 882-910 - al-Battání prováděl v té době nejpřesnější astronomická měření a vydal "Knihu o hvězdovědě", ve které byly opraveny Ptolemaiovy nepřesnosti. Mimo jiné se zde objevily goniometrické funkce.
- přelom 10. a 11. st. - al-Bírúní provedl velmi přesné astronomické zeměpisné měření a stanovil úhel sklonu ekliptiky k rovníku s odchylkou v řádech sekund. Vypočítal rozměry Země. Předpokládal pohyb Země okolo Slunce.
- 1054 - zaznamenán výbuch supernovy, z níž vznikla dnešní Krabí mlhovina.
- 15.st. - změřena vzdálenost Měsíce od Země.
- 16.st. - změřena vzdálenost Země-Slunce.
- 1542 - Mikuláš Koperník prezentoval heliocentrický model pohybu planet včetně Země.

- 1572 - Tadeáš Hájek z Hájků, Tycho Brahe a další pozorovali supernovu v souhvězdí Kasiopéji.
- 1582 - papež Řehoř XIII. zavedl reformu kalendáře.
- 1584 - G. Bruno zveřejnil teorii nekonečnosti vesmíru a světů, obhajoval heliocentrismus.
- 1596 - D. Fabricius objevil první proměnnou hvězdu Míru Ceti.
- 1603 - J. Bayer vytvořil hvězdný atlas Uranometria.
- 1609 - Galileo a Harris jako první použili dalekohledy v astronomii
- poč. 17. století - přelomová událost – uvědomění si vztažných soustav a vzájemných přechodů mezi nimi (Keplerův Měsíční sen).
- 1609 - J. Kepler formuloval první dva zákony pohybu planet.
- 1618 - J. Kepler formuloval třetí zákon pohybu planet.
- 1632 - Galileo dokázal pravdivost heliocentrického modelu a formuloval princip nezávislosti pohybů.
- 1668 - J. Hevelius publikoval spis o kometách s měřeními paralax komet z let 1652 a 1664. Tím prokázal, že se nejednalo o meteory v zemské atmosféře.
- 1672 - G. D. Cassini a J. Richer změřili paralaxu Slunce a určili jeho vzdálenost na 140 miliónů kilometrů (správně: 150.000.000 km).
- 1676 - O. Römer určil na základě pozorování Jupiterových měsíců konečnost rychlosti světla.
- 1717 - E. Halley objevil vlastní pohyb hvězd a dokázal tak, že hvězdy nejsou stálicemi.
- 1725 - posmrtně vyšly výsledky měření poloh hvězd v Greenwichské observatoři J. Flamsteeda, což lze považovat za první moderní katalog 2852 hvězd.
- 1771 - Ch. Messier sestavil katalog mlhovin.
- 1781 - W. Herschel objevil planetu Uran.
- 1782 - J. Goodricke znovuobjevil proměnnost Algolu a správně ji interpretoval jako zákryty dvojice hvězd.
- 1801 - G. Piazzi objevil planetku (dnes trpasličí planetu) Ceres.
- 1814 - J. von Fraunhofer objevil systém, temných absorpčních čar ve slunečním spektru.
- 1837 - F. Besselovi se poprvé podařilo změřit vzdálenost hvězdy 61 Cygni.
- 1840 - J. W. Draper získal první astrofotografii – snímek Měsíce.
- 1842 - Ch. Doppler prezentoval v Praze svůj objev posunu čar v závislosti na radiální vzájemné rychlosti pozorovatele a zdroje.
- 1846 - na základě analýzy nepravidelnosti v pohybu Uranu vypočítal U. Verrier polohu a dráhu další planety. Neptun posléze objevil J.Galle.
- 1850 - W. C. Bond pořídil první daguerrotypie Měsíce.
- 1850 - J. A. Whipple získal první fotografii hvězdy v astronomii (Vega).
- 60. léta 19. st. – R. Bunsen a G.R.Kirchhoff formulovali zákony spektrální analýzy. Studium spekter hvězd, objev hélia na Slunci a potvrzení jeho výskytu na Zemi vedly ke vzniku astrofyziky.



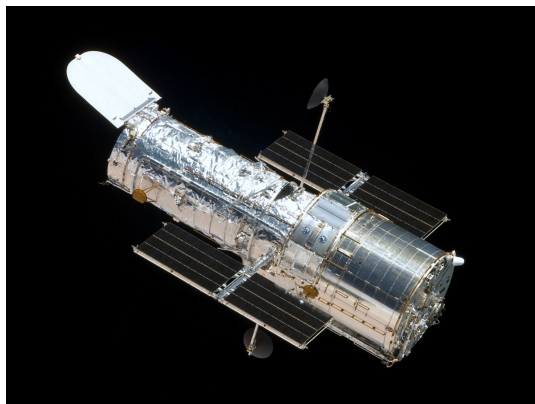
- 1872 - H. Draper pořídil první snímek spektra hvězdy (Vega).
- 1900 - M. Planck publikoval zákon popisující záření absolutně černého tělesa.
- 1905 - A. Einstein publikoval teorii relativity.
- 1911, 1913 - E. Hertzsprung a H. N. Russel prezentují tzv. Hertzsprung-Russelův diagram.
- 1913 - V. F. Hess objevil kosmické záření.
- 1919 - A. Eddington na základě pozorování zatmění Slunce potvrdil platnost teorie relativity.
- 1929 - E. Hubble formuloval zákon vzdalování galaxií. Zjistil, že rychlost vzdalování je úměrná vzdálenosti.



Obrázek 1.11: Edwin Hubble u 2.5m dalekohledu. Zdroj: S. Mais, <http://www.soteoria.hpg.ig.com.br/Hubble/page1.htm>.

- 1930 - C. Tombaugh objevil Pluto.
- 1937 - G. Reber postavil první radioteleskop.
- 1946 - počátek radarové astronomie. Podařilo se zachytit ozvěnu rádiových signálů od povrchu Měsíce.
- 1948 - G. Gamow prezentoval teorii velkého třesku.
- 1957 - start první umělé družice Země, Sputniku 1 (SSSR).
- 1959 - R. Giacconi sestrojil první rentgenovský dalekohled k pozorování rentgenového záření z kosmu.
- 1962 - R. Giacconi objevil první rentgenový zdroj mimo Sluneční soustavu – Scorpius X-1.
- 1965 - A. A. Penzias a R. W. Wilson objevili spojitě radiové záření kosmického pozadí (reliktní záření).
- 1968 - J. Wheeler poprvé použil termín „černá díra“.
- 1968-1969 - J. Bellová a A. Hewish objevili pulsary
- 1969 - američtí astronauti se jako první lidé procházeli po povrchu Měsíce.

- 1973 - B. Carter prezentoval antropický princip.
- 1973 - americké špionážní družice Vela objevily zábleskové zdroje  $\gamma$  záření.
- 1979 - první použití CCD prvku jako detektoru na observatoři Kitt Peak.
- 1981 - A. Guth publikoval teorii inflačního modelu vesmíru.
- 1990 - vypuštěn Hubbleův kosmický teleskop.



Obrázek 1.12: Hubbleův kosmický dalekohled (HST) z raketoplánu Atlantis během 4. servisní mise v roce 2009. Zdroj: <http://spaceflight.nasa.gov/>

- 1995 - objev první planety mimo Sluneční soustavu.
- 1997 - publikovány měření družice Hipparcos, která trigonometricky určila paralaxy zhruba 100 tisíc hvězd (vzdálených až 600 ly).
- 2006 - Na valném shromáždění Mezinárodní astronomické unie byla přijata definice planety a trpasličí planety. Pluto bylo přerazeno mezi trpasličí planety.

## Doplňující literatura

### Literatura

- Akvinský, T., 1993, Jsou nebeská tělesa příčinou lidských skutků? *Universum* 10, 47
- Couperová, H., Henbest, N., 2009, *Dějiny astronomie*, Knižní klub
- Folta J., Nový, L., 1979, *Dějiny přírodních věd v datech*, Mladá fronta, Praha, 360 str.
- Grün, M., 1990, *Je astrologie věda?* Horizont, Praha 1990
- Grygar, J., 2003, Soumrak astrologie? *Zpravodaj Sisyfos* 9, č. 2-3, str. 1
- Hollan, J., 1993, [http://astro.sci.muni.cz/pub/hollan/a\\_papers/oblnebe/oblnebe.html](http://astro.sci.muni.cz/pub/hollan/a_papers/oblnebe/oblnebe.html)
- Jelínek, O., 1993, Středověký vědec a filozof o astrologii. *Universum* 10, str. 44
- Vanýsek, V., 1998, Co nám může říci astrologie? in: *Věda kontra iracionalita* (vyd. J. Heřt a L. Pekárek); Academia, Praha, str. 9 - 35

## 2 Základní pojmy v astronomii

Na počátku kurzu je nutné vysvětlit několik pojmů, s nimiž se budeme setkávat. Možná překvapivě jsou mezi pojmy, které je třeba definovat i takové, které jsou všeobecně známé a používané jako například pojem „obloha“. Naopak některým termínům, které se dosud běžně v astronomické literatuře používají, se pokusíme vyhnout. Před dalším používáním mnohdy nepřesných a zastaralých termínů budeme dokonce varovat. Na druhé straně pro řadu jevů nebo efektů neexistuje dosud české názvosloví a jsme nuceni zatím vystačit s převzatými (většinou anglickými) termíny.

### 2.1 Obloha a hvězdná obloha

Když malému dítěti řeknete: „Koukni, na obloze letí balónek!“, zcela samozřejmě zvedne hlavu vzhůru a hledá letící balónek. Pojem obloha chápe tak, že je to něco „nad námi“, něco „nahore“. U intuitivního uchopení termínu ale většinou zůstáváme po zbytek života. Učebnice základní i střední školy ba ani vysokoškolská skripta žádnou definici oblohy neobsahují. Jak tedy tento pojem definovat?

Začneme od nás, od pozorovatele. Sledujeme-li okolí kolem nás, náš zrak se vždy alespoň na chvíli zaměří na jistou věc z okolí. Mezi našima očima a sledovaným objektem je vytvořena pomyslná spojnice. Polopřímku vycházející z našich očí k sledovanému objektu nazveme **směrem**. Tyto polopřímky (směry) mohou mířit do okolní krajiny nebo nad ni. Krajinu, která nás obklopuje, kterou obzíráme, nazveme **obzorem**. Do našeho obzoru patří nejen přírodní výtvořky v našem okolí - kopce, hory, údolí, ale samozřejmě také lidské výtvořky - stavby, budovy, auta i třeba osoby v našem okolí. To vše tedy v našem pojetí tvoří obzor.

Dříve se často uvádělo, že obzor je jakási pomyslná čára, kdesi v dálce, kde se země „setkává“ s oblohou, případně, že obzor odpovídá vodorovné rovině v místě pozorovatele. Ani jedno vyjádření však není správné. Posuďte například situaci pozorovatele, který pozoruje východ Slunce z vrcholu hory, vysoké rozhledny nebo třeba ze střechy mrakodrapu Burdž Chalífa<sup>1</sup>. Ve chvíli, kdy má Slunce nad obzorem, skočí (samozřejmě s padákem) dolů a může pozorovat východ Slunce během téhož dne a na stejném místě (stejných zeměpisných souřadnicích) podruhé. Při pozorování z vrcholu bylo Slunce při východu pod vodorovnou rovinou. Při pozorování z přízemí uvedené budovy bude Slunce při východu zhruba na vodorovné rovině a pokud budeme pozorovat východ Slunce nad obzor z údolí na úpatí hory, může být Slunce dokonce i poměrně vysoko nad vodorovnou rovinou.

Představme si pozorovatele na pozorovacím stanovišti. Obhlíží krajinu kolem sebe a tím vymezuje svůj obzor. Ale co když jeho zrak zamíří nad obzor? Všechny směry vycházející z pozorovatele, z jeho očí, mířící nad obzor, tvoří **oblohu**. Takové určení je pro naše účely dostačující, nicméně zájemce o přesnou definici oblohy odkazují na práci J. Hollana (1993). Na obloze můžeme pozorovat spoustu úkazů, jevů a nejrůznějších těles – východy a západy Slunce, Měsíce, planet, hvězd, občas nějakou kometu, ale

<sup>1</sup>Mrakodrap Burdž Chalífa byl v době dokončení v roce 2009 s výškou 828 m nejvyšší budovou světa. Dva nadšenci Nasr Al Niyadi a Omar Al Hegelan si skok z vrcholu mrakodrapu vyzkoušeli a na zemi přistáli za jeden a půl minuty.

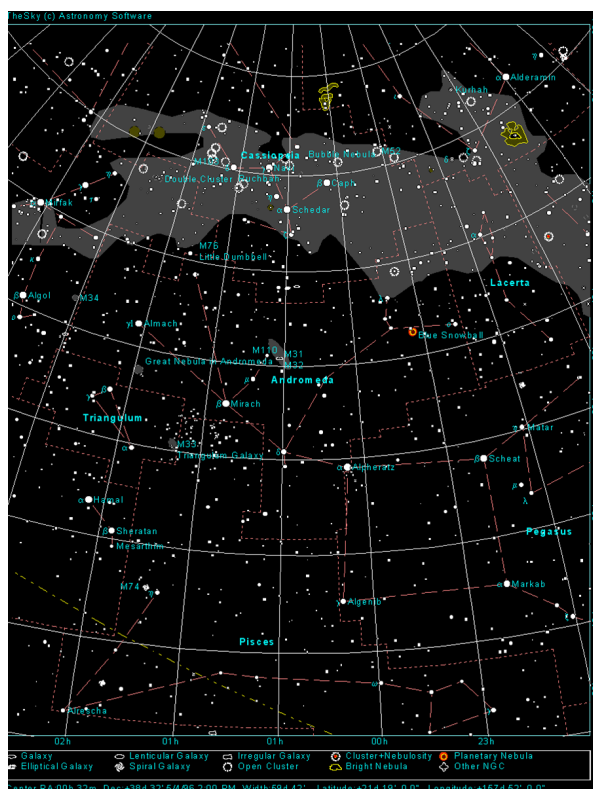


Obrázek 2.1: Obloha s objekty pozemskými (letadlo, mraky) i kosmickými (Měsíc, Venuše, Jupiter). Foto: Michael Wilson.

nejen to. Na obloze spatříme také mraky, ptáky, letadla, balóny i ty balónky zmiňované v úvodu kapitoly. Samozřejmě můžete přidat i exotické jevy nebo tělesa jako polární záři, meteorický roj nebo UFO<sup>2</sup>. Astronomové jsou většinou spojováni s pozorováním noční oblohy. Když se počasí vydaří, neruší vás světelné znečištění, jste někde daleko od civilizace, máte nad sebou za temné bezměsíčné noci sametově černou oblohu doslova posetou hvězdami. Je to opravdu nádherný, povznášející pohled. Obloha plná hvězd! Řeknete si, hvězdná obloha je nádherná! Ale pozor - vždyť vy v té chvíli hodnotíte něco, z čeho vidíte jen zhruba polovinu! Co když ta druhá část bude mnohem méně zajímavá, s menším počtem hvězd... Na hvězdy, na okolní vesmír se díváme z povrchu mateřské planety Země. Protože Země není průhledná, pozorovatel na zemském povrchu je vždy omezen okolní krajinou, obzorem. Je to stejná situace, jako když byste se posadili k oknu vyhlídkové restaurace ve vrcholu nějaké věže, která se pomalu otáčí. Váš výhled na město bude omezen tím oknem, kterým se díváte, ale postupně, jak se bude restaurace otáčet, si prohlédnete město celé. Tím pomyslným restauračním oknem do vesmíru je teď naše obloha. Na ní postupně během noci defilují různé části hvězdné oblohy, různé hvězdy, jak se Země otáčí kolem své osy. **Hvězdná obloha** tedy pro nás bude ta vzdálená „kulisa“ hvězd, na níž se promítají například planety Sluneční soustavy, Měsíc nebo i naše Slunce. Rozlišovat oba pojmy je opravdu nezbytné. Nejde jen o hru se slovíčky. Jde přece o různé vztažné soustavy – zatímco jedna je vztažena k našemu pozorovacímu stanovišti na povrchu rotující a pohybující se Země, druhá je vztažena ke vzdáleným hvězdám! Je tedy zřejmé, že rozdílný bude nejen popis polohy objektů, ale popis jejich

<sup>2</sup>Pozor, o létající talíře se nejedná! UFO znamená „Unidentified Flying Object“, prostě něco, co ve chvíli pozorování nedokážete určit nebo vysvětlit. Za nějaký čas se pak může ukázat, že vaše UFO byl například meteorologický balón nasvícený Sluncem a podobně.

pohybu. Kosmická tělesa se jinak pohybují na obloze a jinak na hvězdné obloze! Hvězdy na hvězdné obloze se během jednoho dne nepohnou, ale na obloze mohou vycházet, vrcholit a zapadat nebo opisovat kružnice kolem Polárky. Slunce se na obloze během dne pohybuje od východního obzoru k západnímu a na stejné místo oblohy se dostane přibližně za jeden den. Na hvězdné obloze se ale Slunce pohybuje zcela jinak – jeho pohyb vůči vzdálené kulise hvězd vzniká projekcí ze Země, která Slunce obíhá. Takže za jeden den Slunce urazí na hvězdné obloze jen přibližně jeden stupeň a na stejné místo na hvězdné obloze se dostane za jeden rok! A podobné rozdíly bychom mohli uvést i u Měsíce nebo planet. V řadě knih je pohyb vesmírných objektů po obloze označován jako zdánlivý. Takové označení je však velmi zavádějící a nesprávné! Nejde o pohyb zdánlivý, ale pozorovaný. Ten pohyb je přece běžně pozorován, dokumentován, můžete si jej nafilmovat, nafotit, o žádný klam nebo zdání nejde.



Obrázek 2.2: Hvězdná obloha - výřez mapy hvězdného pozadí.

Slunce, ale i Měsíc nebo planety vidíme jen v určitých místech hvězdné oblohy. Množinu směrů, kde se v průběhu roku na hvězdné obloze nachází Slunce, nazýváme **ekliptika**. Pohyb Slunce po ekliptice je samozřejmě dán oběhem Země kolem Slunce v rovině ekliptiky. Planety a Měsíc neobíhají kolem Slunce přesně v rovině ekliptiky ale roviny jejich oběžných trajektorií se od roviny ekliptiky mírně odchyľují. U Měsíce je to odchylka přibližně  $5^\circ$ . V důsledku toho bude při pozorování ze Země Měsíc pozorovatelný v pásu  $\pm 5^\circ$  kolem ekliptiky.

V několika výše uvedených řádcích jsme měnili vztahovou soustavu, v níž jsme popisovali polohu a pohyb objektů. Nejprve jsme sledovali okolní svět ze zemského povrchu, pak jsme vztáhli pohyb těles ke Slunci a nakonec jsme se opět vrátili na pozorovací



Obrázek 2.3: Pohyb Měsíce na obloze a hvězdné obloze.

stanoviště na povrchu Země. Zatím se jednalo jen o myšlenkové přechody bez výpočtů, ale obecně můžeme konstatovat, že právě takové úvahy, změny vztažných soustav a přechody mezi nimi patří k nejnáročnějším částem kurzu Základy astronomie.

Vraťme se k našemu pozorovacímu stanovišti na zemském povrchu. Můžeme na něm vytyčit řadu významných směrů. Směr svislý vzhůru označujeme jako **nadhlavník (zenit)**, směr svislý dolů jako **podnožník (nadir)**<sup>3</sup>. Rovina kolmá na směr zenitu či nadiru procházející pozorovacím stanovištěm je vodorovná rovina. Přímkou rovnoběžnou s rotační osou Země procházející naším pozorovacím stanovištěm nazýváme **světová osa**. Jedna polopřímka přitom míří k **severnímu světovému pólu** a druhá k **jižnímu světovému pólu**. Průmět světové osy do vodorovné roviny udává směr severní a směr jižní. Směry severní, jižní a zenit definují **rovinu místního poledníku**, tzv. **meridiánu**. Rovinu kolmou na světovou osu, procházející místem pozorování označujeme jako **rovinu světového rovníku**. Samozřejmě je rovnoběžná s rovinou zemského rovníku. Rovina světového rovníku a rovina ekliptiky spolu svírají úhel přibližně  $23.5^\circ$ . Jejich průsečnici zpravidla dělíme na dvě polopřímky s počátkem v místě pozorování. Jednu polopřímku nazýváme **jarní bod**, druhou pak **podzimní bod**. Podivná situace, kdy polopřímku označujeme jako bod, je výsledkem archaické představy o nebeské sféře. Jde o pomyslnou kouli jistého velkého poloměru, na kterou umísťujeme všechny objekty, jejichž polohu nebo pohyby studujeme. Souřadnice i vzájemné vzdálenosti na takové sféře jsou definovány pomocí sférické trigonometrie. V moderní astronomii ale pojem nebeská sféra nepotřebujeme. Ale o tom až v kapitole 4.1.

## 2.2 Jak je to jasné?

Když už se člověk pokochá krásami noční oblohy, většinou ho napadne, jak to, co vidí, nějak roztrždit, popsat, oměřit. První a nejčastější otázky v této souvislosti jsou dotazy, jak je ten pozorovaný objekt vlastně jasný a jak je daleko. Svě by vám o těchto dotazech jistě pověděli pracovníci hvězdáren, kteří ukazují hvězdné nebe návštěvníkům. Pokud

<sup>3</sup>Termín *zenit* je zřejmě zkomoleninou arabského *zemt-arras*, což značí směr hlavy. Některé zdroje uvádějí, že slovo pochází z italského, špatným čtením z *l'azimut*. Nadir znamená protilehlý (k zenitu).

se mezi návštěvníky vyskytne někdo s fyzikálním vzděláním, většinou se zajímá také o velikost, respektive hmotnost pozorovaného objektu a jeho zářivý výkon. Samozřejmě v záplavě dotazů jsou i ty, které míří na použitý dalekohled, ale v této chvíli nás zajímají jen dotazy na sledované objekty. Všechny zmíněné otázky mají jedno společné. K jejich zodpovězení potřebujete mít jasně určené, definované veličiny a jejich jednotky. Zdánlivě jednoduché otázky a očekávané stručné odpovědi se tím poněkud protáhnou, ale pro další výklad je toto rozšíření nezbytné.

První hvězdný katalog připisovaný Hipparchovi a jeho aktualizace publikovaná Ptolemaiem uvádějí hvězdy viditelné prostýma očima rozdělené do několika skupin, tříd jasnosti. Postupem času se intuitivní rozdělování hvězd do tříd změnilo v určování přesných veličin, které jasnost hvězdy nebo obecně nebeského objektu popisují. Dnes k tomu slouží veličina nazvaná *hvězdná velikost*, jejíž jednotkou je 1 magnituda [mag]. Se skutečnou velikostí, rozměry hvězdy to nijak nesouvisí. Přesnou matematickou definici a také důkladnější popis uvedeme později, pro nedočkavce v kapitole 8.1. Zatím vystačíme s jednoduchým vztahem. Je-li rozdíl hvězdných velikostí dvou objektů, například dvou hvězd 5 mag, pak jedna hvězda je 100krát jasnější než druhá. Samozřejmě se v běžné řeči setkáme s tvrzením, že jde například o objekt 4. hvězdné velikosti. Tím myslíme, že sledovaný objekt má hvězdnou velikost v rozmezí 3,5 mag až 4,5 mag, matematicky z intervalu  $(3,5; 4,5)$ . Naopak objekt s hvězdnou velikostí  $m$  v intervalu  $(-1,5; 0,5)$  mag označíme jako objekt mínus první velikosti. Neměli bychom však zaměňovat veličinu a její jednotku. Bohužel lze stále nalézt řadu článků a knih, kde autor tvrdí například, že daná hvězda má magnitudu 8,5 mag. Ale je to stejný nesmysl jako kdybyste napsali, že věž má metr 10,3 metru. Ostatně příklady správného a nesprávného použití pojmu hvězdná velikost a magnituda včetně analogií naleznete v tabulce 2.1.

Tabulka 2.1: Použití pojmů hvězdná velikost a magnituda a analogická tvrzení.

### Správná tvrzení

hvězda má hvězdnou velikost 10,3 magnitudy	věž má výšku 10,3 metru
hvězda s hvězdnou velikostí 10,3 magnitudy	věž s výškou 10,3 metru
hvězda jasná asi 10 mag	věž velká 10 metrů
hvězdná velikost sledovaného objektu je 10,3 magnitudy	výška pozorované věže je 10,3 metru

### Nesprávná tvrzení

hvězda desáté magnitudy	věž desátého metru
hvězda o jasnosti 10 magnitud	věž o mohutnosti 10 metrů
hvězda s magnitudou 10,3 magnitudy	věž s metrem 10,3 metrů
hvězda má magnitudu 10,3	věž má metr 10,3
na svislou osu grafu vynášíme magnitudu hvězd	na svislou osu grafu vynášíme metr věže

## 2.3 Jednotky hmotnosti, výkonu

Kosmické objekty popisujeme pomocí řady parametrů. Mezi ty nejdůležitější patří jejich hmotnost a zářivý výkon. Obě veličiny můžeme vyjadřovat pomocí základních jednotek SI. Jednotka hmotnosti patří dokonce mezi sedm základních jednotek SI. Jeden kilogram je odvozen od mezinárodního etalonu, válce ze slitiny platiny a iridia. Jak se však ukázalo, jeho hmotnost se za posledních 100 let zmenšila o přibližně 50 mikrogramů. Proto se uvažuje se o zavedení definice jednoho kilogramu pomocí pevné hodnoty Planckovy konstanty.



Obrázek 2.4: Jedna z kopií mezinárodního vzoru kilogram pod ochranným poklopem v amerických vládních laboratořích Sandia. Foto: Sandia National Laboratory.

Hmotnosti vesmírných těles jsou o mnoho řádů větší než hmotnosti těles, s nimiž se setkáváme v běžném životě. Proto se v astronomii používá vyjádření hmotnosti těles nejčastěji pomocí tzv. **nominální hmotnosti Slunce**, která byla stanovena na  $1 M_{\odot} = 1,9891 \cdot 10^{30}$  kg (přesně). Pro menší tělesa než Slunce, planety a jejich Měsíce se používá jako jednotka hmotnosti hmotnost Jupitera  $1 M_J = 1,899 \cdot 10^{27}$  kg, případně hmotnost Země  $1 M_Z = 5,9736 \cdot 10^{24}$  kg.

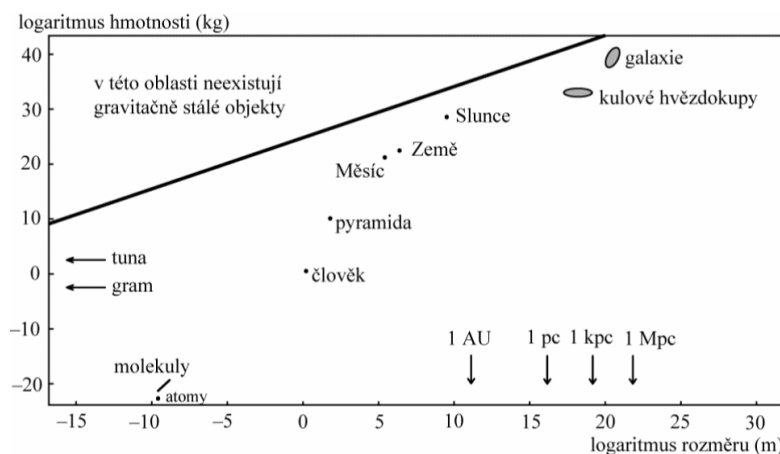
Pro Valné shromáždění Mezinárodní astronomické unie (IAU) v roce 2012 byla připravena rezoluce s novými definicemi etalonových hmotností vesmírných těles. Zásady nového přístupu s zdůvodnění změn jsou uvedeny v článcích Harmanec & Prša (2011) a Prša & Harmanec (2012). V návrhu, který se bude projednávat v roce 2015, je  $1 M_{\odot} = 1,988\,547 \cdot 10^{30}$  kg a  $1 GM_{\odot}(2010) = 1,32712442099(10) \cdot 10^{20} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ , přičemž gravitační konstanta  $G(2010) = (6,67384 \pm 0,00080) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ . Obdobně pomocí gravitační konstanty by měly být definovány i  $1 M_J$ ,  $1 M_Z$ .

Měření hmotnosti kosmických objektů se nejčastěji provádí s pomocí gravitačního zákona a Keplerových zákonů. Nejsnáze a nejpřesněji určíme hmotnost hvězd, pokud jsou členy dvojhvězdného páru.

Vesmírná tělesa studujeme v převážné míře na dálku, prostřednictvím záření, které vysílají do okolního prostoru. Globální charakteristikou objektu je tedy celkové množství vyzářené energie za jednotku času, tzv. **zářivý výkon**. Můžeme jej vyjadřovat přímo ve wattech a nebo si opět vypomoci naším Sluncem. Rozhodnutím Valného shromáždění



Mezinárodní astronomické unie IAU z roku 1997 byl **zářivý výkon nominálního Slunce** definován  $1 L_{\odot} = 3,846 \cdot 10^{26}$  W. Nová nominální hodnota zářivého výkonu bude zřejmě součástí „generačního upgradu“ jednotek na valném shromáždění IAU v roce 2015.



Obrázek 2.5: Rozměry a hmotnosti některých objektů ve vesmíru. Převzato z Pokorný (2006).

## 2.4 Vesmírné dálavy

Velká čísla jako by v astronomii neměla konce. Už jsme vyřešili jejich ”redukcii” vhodnými jednotkami hmotnosti, zářivého výkonu, ale co vzdálenost. Vzdálenosti ve vesmíru jsou přece tak obrovské, že běžné délkové jednotky nemohou stačit. Ale i tady astronomové mají řešení a dokonce hned několik.

### 2.4.1 Astronomické délkové jednotky

Základní jednotka soustavy SI pro délku je jeden metr. Ten je dnes definován jako vzdálenost, jakou urazí světlo ve vakuu za  $1/299\,792\,458$  s. Metr nám v běžném životě stačí na popis velikosti předmětů. Na určení vzdáleností už používáme většinou kilometry. Jenže ve vesmíru by nám násobek  $10^3$  zdaleka nestačil ani pro rozměry kosmických objektů. Vždyť vzdálenost jakou urazilo světlo od počátku našeho vesmíru je až  $10^{26}$  metrů.

Mezinárodní soustava jednotek SI definuje kromě základních a doplňkových také vedlejší jednotky. Nepatří sice do SI, ale praxe si v podstatě vynutila jejich vznik a používání. Mezi ně patří i astronomické délkové jednotky:

**Astronomická jednotka** (au, dříve také a.j.) je definována jako střední vzdálenost Země od Slunce. Její hodnotu stanovila Mezinárodní astronomická unie na Valném shromáždění v roce 2012 na  $149\,597\,870\,700$  metrů. Také doporučila označení astronomické jednotky „au“. Je dobré si pamatovat přibližnou hodnotu 150 milionů kilometrů. Astronomická jednotka se uplatňuje zejména při popisu vzdáleností těles ve Sluneční soustavě, ale také například u dvojhvězd.

**Světelný rok** (ly, dříve také sv.r.) vyjadřuje vzdálenost, kterou světlo šířící se vakuem urazí za 1 rok<sup>4</sup>. Přesná hodnota je 1 ly (sv.r.) = 63 241 AU = 9,460 730 472 580 800 m. Výjimečně se používá i podobně zavedených menších délkových jednotek jako světelný den, světelná hodina atd. Světelný rok se využívá hlavně při popisu vzdáleností ve světě hvězd. Často se ale setkáme také se zcela špatným použitím, kdy někteří laici chápou světelný rok jako časovou jednotku. Marie Rottrová například v písni „Večerem zhýčkaná“ zpívá:

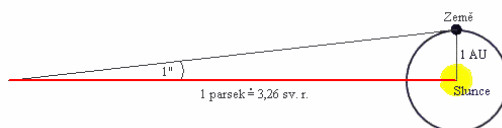
*Večerem zhýčkaná, za sliby provdaná,  
půlnočním kouzlům věrná, hvězdám upsaná.  
Za množinou přání leží nový svět,  
však blíž je kytká na římse.  
Mít navíc pár světelných let,  
tak vzdám se tepla tvých dlaní.*

Ale příkladů jistě najdete celou řadu.

**Parsek**<sup>5</sup>, je jako nejdelsí astronomická jednotka délky definována jako vzdálenost, ze které lze vidět úsečku o délce 1 astronomické jednotky (postavenou kolmo k zornému paprsku) pod úhlem 1". Jinak řečeno paralaxa<sup>6</sup> objektu, vzdáleného 1 parsek je 1". Protože paralaxa objektů ve vzdálenosti parseku a větší je velmi malá, lze vztah mezi vzdáleností  $r$  v parsecích a paralaxou  $\pi$  v obloukových vteřinách jednoduše vyjádřit jako

$$\pi = 1/r. \quad (2.1)$$

Velikost parseku lze psát 1 pc = 3.262 ly = 206 264.806 AU = 3.0856776 · 10<sup>16</sup> m. Používá se zejména ve hvězdné a galaktické astronomii. Ale ani parsek nestačí, takže se běžně setkáme i s násobky kiloparsek, megaparsek a gigaparsek.



Obrázek 2.6: K definici parseku. Zdroj: <http://hvezdy.astro.cz>.

Aby byl náš výčet délkových astronomických jednotek kompletní, musíme ještě zmínit jednotku, která se používá při popisu velikostí, rozměrů hvězd nebo obřích planet. Je jím poloměr Slunce. V současné době je velikost této jednotky stanovena deklarací Mezinárodní astronomické unie 1 R<sub>☉</sub> = 6.95508(26) · 10<sup>8</sup> m.

<sup>4</sup>Dle definice je v tomto případě uvažován tzv. juliánský rok, který má délku 365,25 dne.

<sup>5</sup>Slovo *parsek*, v angl. originále *parsec* vzniklo složením části slov **paralaxa** a **sekunda**, tedy v originále **parallax** a **second**.

<sup>6</sup>Paralaxa je obecně úhel, který svírají přímky vedené ze dvou různých míst v prostoru k pozorovanému bodu. Čím je pozorovaný předmět dál od pozorovacích míst, tím je paralaxa menší. *Paralaxa* je složené slovo řeckého původu. Zatímco *para* znamená vedle, *allasein* lze přeložit jako dělat jinak nebo měřit. Jednoduše řečeno, pohnete-li hlavou, blízký předmět se pohne na jiné místo vůči vzdálenému pozadí.

### 2.4.2 Vzdálenosti ve vesmíru

Představte si, že stojíte v nádherné krajině někde na Zemi. Při pozorování okolí má běžný člověk k dispozici dvojici očí, vzdálených od sebe 7 až 8 centimetrů. To znamená, že přibližně do vzdálenosti 30 až 50 metrů je paralaxa pozorovaných objektů dostatečně velká, aby člověk vnímal své okolí prostorově. Odhadovat vzdálenosti v okolní krajině, tedy k objektům obzoru<sup>7</sup>, lze ale i výrazně dál než je výše uvedených 50 metrů. Pomůže nám naše zkušenost a znalost velikostí předmětů nebo určitých vzdáleností. Víme například, jak daleko jsou od sebe sloupy, patníky, jak velký je zhruba automobil apod. Navíc nám pomáhá zemská atmosféra. Vzdálené objekty jsou více zamlžené. Pro přesné určení vzdáleností lze použít elektronickou mapu s GPS, zeměměřičské vybavení (teodolit, nivelační tyče), dálkoměry nebo to můžeme prostě změřit metrem. Jak ale odhadovat, měřit vzdálenosti ve vesmíru? Vždyť jsou obrovské a metody známé ze Země použít nemůžeme.



Obrázek 2.7: a) V krajině na Zemi lze odhadovat vzdálenosti podle známých skutečností. Zdroj: <http://mail.vukoz.cz>. b) Na Měsíci nejsou pro odhad vzdálenosti k dispozici srovnávací předměty (budovy, patníky, sloupy elektrického vedení apod.) ani „zamlžení“ vzdálených objektů vlivem ovzduší. Zdroj: NASA.

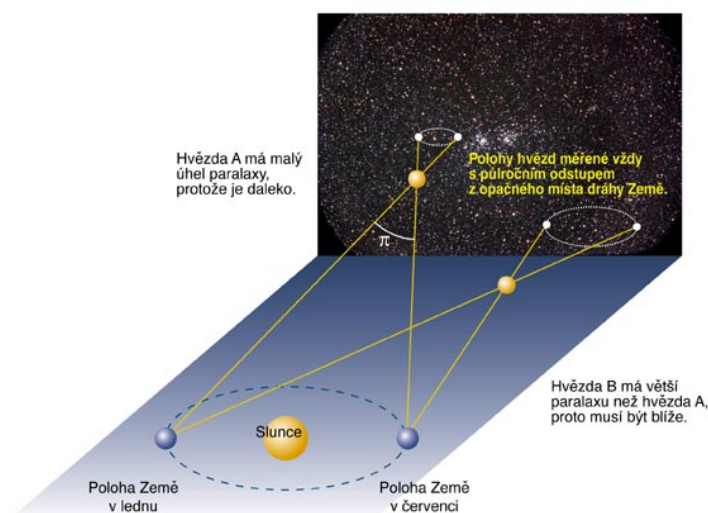
Už američtí astronauté si doslova na vlastní kůži vyzkoušeli, jak zrádné mohou být odhady vzdáleností v neznámém prostředí, kde se „nemáte čeho chytit“. Při procházkách na Měsíci nemohli využít ani vliv atmosféry ani srovnání s objekty známých velikostí. A tak se dopouštěli chyb v odhadech vzdáleností až desítky procent. A odhadovat vzdálenosti mezi vesmírnými objekty je ještě horší. Měli bychom se spolehnout na výsledky měření vzdáleností. Bohužel, přímá měření vzdáleností lze úspěšně realizovat jen pro blízké objekty (např. pomocí triangulace nebo radiolokace). Pro vzdálenější objekty můžeme použít kvalifikovaný odhad vzdáleností. Jenže tu hraje roli výběrový efekt. Při takovém odhadu totiž zpravidla mlčky předpokládáme, že všechny hvězdy jsou stejné a tedy, že slabší hvězdy jsou od nás dál. Nebereme v úvahu zeslabování světla hvězd, tzv. **extinkci**<sup>8</sup> v zemské atmosféře nebo mezihvězdném prostředí. Pro správné

<sup>7</sup>Připomínám, že obzor jsme si definovali jako krajinu kolem nás, kterou obhlížíme, včetně všech staveb, předmětů objektů, které se v ní nacházejí.

<sup>8</sup>Slovo extinkce pochází z latinského *extinctio* značící zničení nebo zánik.

určení vzdálenosti je však třeba brát podobným efekty v úvahu.

Ve vesmíru tedy nelze spoléhat na odhady vzdáleností, ani ve volném prostoru, ani na vesmírných tělesech! Nezbyvá, než vzdálenosti měřit, určovat. Bohužel neexistuje jediná univerzální metoda určování vzdáleností ve vesmíru, která by obsáhla celou škálu vzdáleností ve vesmíru. Máme k dispozici celou řadu metod, kde jedna metoda navazuje na jinou. Mluvíme pak o tzv. „žebříčku kosmických vzdáleností“. Takové řešení má však své úskalí. Protože jedna metoda vlastně slouží ke kalibraci metody následující, stačí chyba v jedné metodě a změní se celá škála zmíněného žebříku. V následujícím přehledu si uvedme velmi stručně jen ty nejvýznamnější metody určování vzdáleností ve vesmíru. V průběhu kurzu se jim budeme věnovat podrobněji a s některými se seznámíte i v laboratorních a praktických cvičeních.

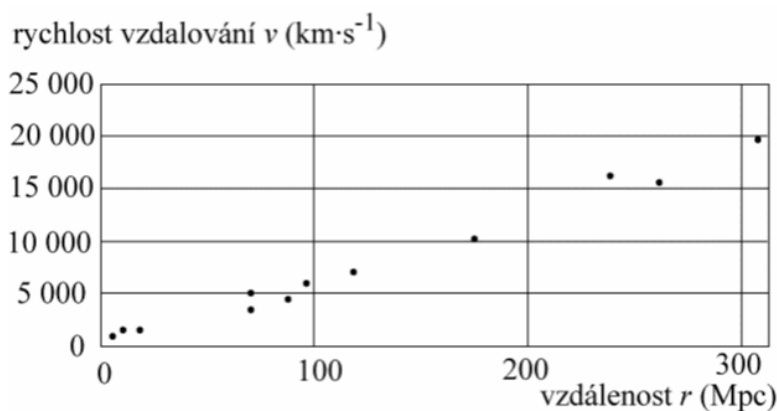


Obrázek 2.8: Trigonometrická metoda pro určování vzdálenosti hvězd. Zdroj: <http://hvezdy.astro.cz>.

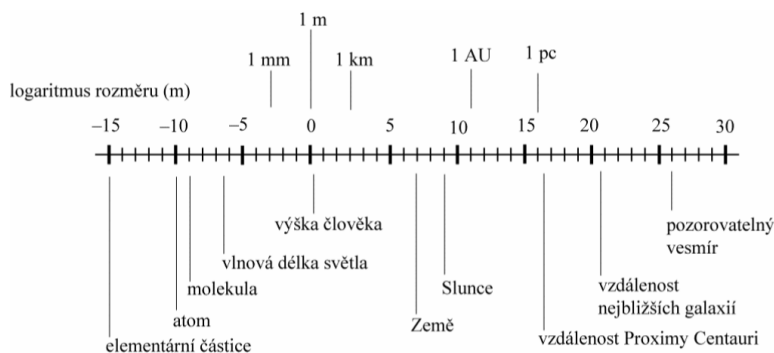
## Metody měření vzdáleností

- *Triangulační (trigonometrická) metoda* je založena na měření polohy objektu ze dvou stanovišť. S pomocí úhlu mezi těmito dvěma směry (paralaxou objektu) a vzdáleností pozorovacích stanovišť lze následně určit vzdálenost objektu. Využívá se pro objekty Sluneční soustavy a blízké hvězdné objekty.
- *Radiolokace* využívá měření doby mezi odesláním a příjmem rádiového impulsu. Objekt, jehož vzdálenost takto měříme, musí mít schopnost odrážet rádiové impulsy musí mít dostatečný úhlový průměr. Používá se pro objekty ve Sluneční soustavě, protože pro větší vzdálenosti jsou pomyslné „terče“ příliš malé.
- *Cefeidy* představují jakési majáky ve vesmíru. Jedná se o hvězdy, které mění pravidelně svou jasnost. Změny jasnosti lze na Zemi poměrně snadno pozorovat, přičemž perioda změn je úměrná vzdálenosti zdroje. Cefeidy se užívá k určení vzdáleností v naší hvězdné soustavě, naší Galaxii i cizích galaxiích.

- *Standardní svíčky* jsou objekty, které mají v určitém okamžiku stejný nebo známý zářivý výkon. Díky tomu, je možné srovnáním s pozorovanou jasností objektu určit jeho vzdálenost. Nejčastěji jako standardní svíčky označují vybuchující masivní hvězdy na konci svého vývoje (tzv. supernovy typu Ia). V posledních letech se podobně využívají i zákrytové dvojhvězdy. Ty mohou být sice každá jiná, ale v principu lze zjistit, jak každá z dvojice hvězd září, a pak spočítat jejich vzdálenost. Stejně jako u cefeid se metoda používá pro určení galaktických i extragalaktických vzdáleností.
- *Hubbleův vztah* popisuje přímou úměru mezi vzdáleností objektu  $r$  a rychlostí jeho vzdalování  $v$  (viz obrázek 2.9). V roce 1929 ji odhalil E. Hubble a matematicky zapsal jako  $v = H\Delta r$ , kde  $H$  je Hubbleova konstanta. Platnost vztahu a jeho použití je ale omezeno jen na svět galaxií!



Obrázek 2.9: Závislost rychlosti vzdalování galaxií na jejich vzdálenosti od nás. Hubbleův zákon. Převzato z Pokorný (2006).



Obrázek 2.10: Velikosti objektů a vzdálenosti ve vesmíru. Převzato z Pokorný (2006).

## Doplňující literatura

Harmanec, P., & Prša, A. 2011, PASP 123, 976

Hollan, J., 1993, [http://astro.sci.muni.cz/pub/hollan/a\\_papers/oblnebe/oblnebe.html](http://astro.sci.muni.cz/pub/hollan/a_papers/oblnebe/oblnebe.html)

Tabulka 2.2: Typické velikosti a vzdálenosti objektů

Část škály	Rozsah [m]		Jednotka	Popis
	$\geq$	$<$		
Subatomární	0	$10^{-15}$	am	elektron, kvark, Planckova délka
Atomová	$10^{-15}$	$10^{-12}$	fm	proton, neutron
Buněčná	$10^{-12}$	$10^{-9}$	pm	vlnová délka $\gamma$ a rentgenovského záření, atom vodíku
Lidská	$10^{-9}$	$10^{-6}$	nm	šroubovice DNA, virus, vlnová délka světla
	$10^{-6}$	$10^{-3}$	$\mu\text{m}$	baktérie, kapička vodní páry, lidský vlas
	$10^{-3}$	$10^0$	mm	komár, hokejový puk, fotbalový míč
Astronomická	$10^0$	$10^3$	m	lidská postava, Václavské náměstí, Petřínská rozhledna
	$10^3$	$10^6$	km	Mount Everest, maraton, větší asteroid
	$10^6$	$10^9$	Mm	Měsíc, Země, 1 světelná sekunda
	$10^9$	$10^{12}$	Gm	Slunce, 1 světelná minuta, oběžná trajektorie Země
	$10^{12}$	$10^{15}$	Tm	trajektorie vnějších planet, Sluneční soustava
	$10^{15}$	$10^{18}$	Pm	1 světelný rok; vzdálenost k Proximě Centauri
	$10^{18}$	$10^{21}$	Em	vzdálenost ke středu Galaxie
$10^{21}$	$10^{24}$	Zm	Galaxie, vzdálenost ke galaxii M31	
	$10^{24}$	$\infty$	Ym	viditelný vesmír

Tabulka byla převzata z anglické verze wikipedie a upravena.

Pokorný, Z., 2006, Vademecum - Váš průvodce vesmírem, Hvězdárna a planetárium M.

Koperníka v Brně

Prša, A., & Harmanec, P. 2012, IAU Symposium, 282, 339

## 3 Čas

„Nemám čas.“ Jedno z nejběžněji používaných úsloví dnešní moderní uspěchané doby. Ale co je to vlastně „čas“? Komici Jan Werich s Miloslavem Horníčkem skončili debatu o čase výrokiem, že čas si vymysleli lidi, by věděli odkdy dokdy a co za to. Fyzik by zřejmě odpověděl prozaicky: Čas je základní fyzikální veličina vyjadřující posloupnost dějů a stavů. Filozof by s vámi na to téma vedl dlouhou diskusi opřenu o názory celých generací filozofů. Podle Aristotela vzniká čas počítáním pravidelných pohybů nebo dějů, například střídáním dne a noci. Imanuel Kant tvrdil, že čas je vedle prostoru základní formou (kategorií a podmínkou) každé smyslové zkušenosti. A tak bychom mohli pokračovat mnoha názory a myšlenkami vysvětlujícími tok času nebo naše vnímání času<sup>1</sup>. Vraťme se ale k fyzikům. Pregnantně formuloval odpověď na otázku „Co je čas?“ americký fyzik, který se zabýval teorií relativity a relativistickou astrofyzikou, John Archibald Wheeler (1911-2008): „Čas – to je způsob, jakým příroda zajišťuje, aby se všechno neodehrálo najednou.“

Sepětí astronomie a času je velmi úzké. Vždyť právě jedním ze základních poslání astronomie bylo měření času. Dnes řeší otázky času astronomové spolu s fyziky.

### 3.1 Jednotky času

Základní jednotkou času je v soustavě SI **sekunda** (mezinárodní značka *s*), která je definována jako doba trvání 9 192 631 770 period záření, které odpovídá přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu atomu cesia 133 (při teplotě 0 K). Vedlejšími jednotkami času jsou v SI **minuta**, **hodina** a **den**, přičemž platí 1 minuta (min) = 60 s, 1 hodina (h) = 60 min = 3 600 s, 1 den = 24 h = 1 440 min = 86 400 s.

V běžném životě používáme také **kalendářní jednotky** času *týden*, *měsíc*, *rok*. Zatímco den je odvozen z otáčení Země kolem své osy, rok je definován pomocí doby oběhu Země kolem Slunce. Počet otoček Země kolem své osy během jednoho oběhu Země kolem Slunce ale není celočíselný, proto se v kalendáři objevují roky s 365 dny pro běžný rok nebo 366 dny pro rok přestupný. Takový přístup je dostatečný pro běžný život, ale věda potřebuje přesnou délku roku. Jenže to není tak jednoduché. Délka oběhu Země kolem Slunce a tedy i délka roku se bude lišit podle zvolené vztažné soustavy. O tom si povíme v následujících kapitolách. Většina lidí používá při výpočtech jako délku roku 365,25 dne a netuší, že vlastně používají *střední juliánský rok*, který definovala Mezinárodní astronomická unie IAU: 1  $a_j$  365,25 dne, tedy  $3.15576 \cdot 10^7$  s. Pro nejdelší časové škály, v nichž vyjadřujeme například stáří hvězd, galaxií nebo i celého vesmíru, pak používáme násobku tohoto roku – milióny nebo miliardy let, které někdy zkráceně zapisujeme My, Gyear. Naopak nejkratší časový úsek nám vymezuje tzv. Planckův čas. Vymezuje dobu, kterou potřebuje foton ve vakuu pro překonání Planc-

<sup>1</sup>Naše vnímání času je opravdu relativní. Často máme pocit, že čas ubíhá velmi rychle, někdy se naopak vleče. Vzpomeňte si na častý povzdech starších lidí: „Jak ten čas letí.“ V tomto případě je ale vysvětlení snadné. Desetiletému dítěti bude připadat doba mezi po sobě následujícími vánocemi strašně dlouhá. Není divu, je to desetina jeho života. Ale pro sedmdesátníka je to přece jen jedna sedmdesátina života.



Obrázek 3.1: Vlevo: Světoznámý pražský orloj na Staroměstském náměstí z roku 1410. Převzato z <http://www.vyletnik.cz>. Vpravo: O šest století mladší orloj zvláštního tvaru instalovaný na brněnském náměstí Svobody v roce 2010. <http://www.ilovebrno.cz>.

kovy délky (přibližně  $1.6 \cdot 10^{-35}$  metrů). Jeho hodnota závisí na znalosti univerzálních fyzikálních konstant (rychlosti světla ve vakuu, Planckovy konstanty a gravitační konstanty), které jsou určeny experimentálně. Současná hodnota Planckova času byla stanovena na  $t_P = 5,39124(27) \cdot 10^{-44}$  s.

## 3.2 Měření času

Měření toku času je jednou z nejstarších fyzikálních úloh. Na počátku bylo jen prosté uvědomění si jisté posloupnosti dějů v čase (střídání dne a noci, fází Měsíce, ročních období). Nicméně postupně, se změnou životního stylu, rozvojem obchodu, vědy, rostly požadavky na přesnost určování času. Počátkem 21. století došli lidé až k neuvěřitelně přesným měřením. V roce 2011 byla dosažena přesnost měření, která znamená odchylku jednu sekundu za 32 miliard let, tedy relativní přesnost  $4 \cdot 10^{-19}$ . Od vynálezu hodin to představuje zlepšení o 16 řádů! Měření času a kmitočtu dnes patří k nejpřesnějším fyzikálním měřením vůbec.

Je zřejmé, že každý z nás má ve svém těle své „biologické hodiny“. Základní jednotkou našeho biologického času je jeden den, doba odvozená z délky otočky Země kolem své osy. Už víme, že dnes je prostě stanoveno v soustavě jednotek SI, že  $1 \text{ d} = 24 \text{ hodin} = 1440 \text{ min} = 86400 \text{ s}$ . Ale jak vlastně měřili délku dne naši předkové? Z historických záznamů můžeme vyčíst, že jeden den si zpravidla dělili na čas denní,



noční a soumrak, přičemž čas denní byl dále dělen na 10 částí a k tomu případně ještě dvě soumrakové části – ranní a večerní soumrak. Noční část byla někdy chápána jako jeden celek, někdy byla také dělena na 12 dílů. Proč zrovna dvanáct? Původ tohoto dělení není zcela zřejmý. Někdy se uvádí, že důvodem bylo prostě to, že se jednalo o tehdy oblíbenou dvanáctkovou číselnou soustavu. Řada autorů se přiklání k tomu, že důvodem bylo „kopírování“ počtu měsíců v roce a některé zdroje uvádějí, že dvanáctka byla použita proto, že bez palce máme na ruce 12 článků prstů. Délka a dělení dne bylo tedy jasné, ale kdy vlastně den začínal? Dnes je to zřejmé – začíná o půlnoci. Nicméně ve starověku a středověku se počátek dne počítal od východu Slunce. Poledne pak nastávalo kolem šesté hodiny. Do poloviny 18. století, respektive do 17. století se používaly systémy počítání dní italský a český. Jejich společným rysem je to, že den měl 24 hodin a počítal se od západu Slunce, respektive večerního soumraku. Zajímavé je, že v takovém systému počítání času nastávalo poledne dle ročního období v různou hodinu – v 15 hodin nebo dokonce až v 19 hodin. Podobně se počítal den od večerního soumraku ve středověkém islámském systému. Náš dnešní systém, kdy počátkem nového dne a koncem starého je půlnoc, pochází z Německa.

Čas je možné v principu měřit dvěma způsoby. Jednak přímým měřením nějakého rovnoměrného pohybu nebo jeho projevu a jednak počítáním nějakých krátkoperiodických oscilací. Do první skupiny patří i historicky nejstarší měření času podle Slunce a to i přesto, že vlastně pohyb Slunce po obloze rovnoměrný není<sup>2</sup>. Stačilo k tomu v principu velmi jednoduché zařízení, v podstatě jen svislá tyč – gnómón. Čas je odměřován podle stínu, který tyč vrhá na zemi. V principu může být gnómónem i tyč vodorovná nebo šikmá vůči vodorovné rovině, většinou rovnoběžná s rotační osou Země. V takovém případě je vlastně gnómón ukazatelem slunečních hodin.

Bohužel nevíme, kdy člověk objevil tento způsob měření času. Nejstarší gnómóny lze datovat do období zhruba 5 000 let před naším letopočtem. V Evropě je řada míst, kde byly buď přímo nalezeny prastaré gnómóny nebo se jedná o velmi staré observatoře – jako například na hoře Bégo severně od francouzského Nice, v německém Gnosecku, irském Knowthu, českých Makotřasech nebo proslulém anglickém Stonehenge. Jejich stáří se pohybuje mezi čtyřmi až sedmi tisíci let. Zdokumentovány jsou ale i další případy – obelisky sloužící jako gnómón se používaly kolem 3500 př.n.l. v Egyptě, Babylónii, Indii a Číně. Nicméně nejstarší astronomickou observatoří, kde se nepochybně i měřil čas, je podle posledních průzkumů turecké Göbekli Tepe, které se nachází nedaleko syrských hranic. Jeho stáří se odhaduje na 11 000 let.

V psaných záznamech se objevuje popis gnómónu v čínském spisu „Devět kapitol matematického umění“, kterou postupně tvořilo několik generací učenců od 10. až do 2. století př.n.l. Řeckou kulturu seznámil s gnómónem Anaximandros kolem roku 560 př.n.l., který se o něm zmiňuje jako o babylonském nástroji. Řekové ale měření času pomocí Slunce rozvinuli. Zhruba do prvního století našeho letopočtu je pak datován objev tzv. polosy, ukazatele slunečních hodin, který je rovnoběžný s rotační osou Země. Zajímavostí je, že jeden z nejstarších psaných záznamů o slunečních hodinách obsahuje i bible. Český katalog slunečních hodin, který mapuje jejich výskyt na území České republiky a několika desítek dalších států lze nalézt na <http://www.astrohk.cz/ashk/>

<sup>2</sup>O pohybu Slunce po obloze se čtenář dozví více až v dalších kapitolách.



Obrázek 3.2: Část vykopávek chrámu v tureckém Göbekli Tepe. Zdroj: <http://www.perceptions.couk.com/westward.html>.

sluneční hodiny<sup>3</sup>.

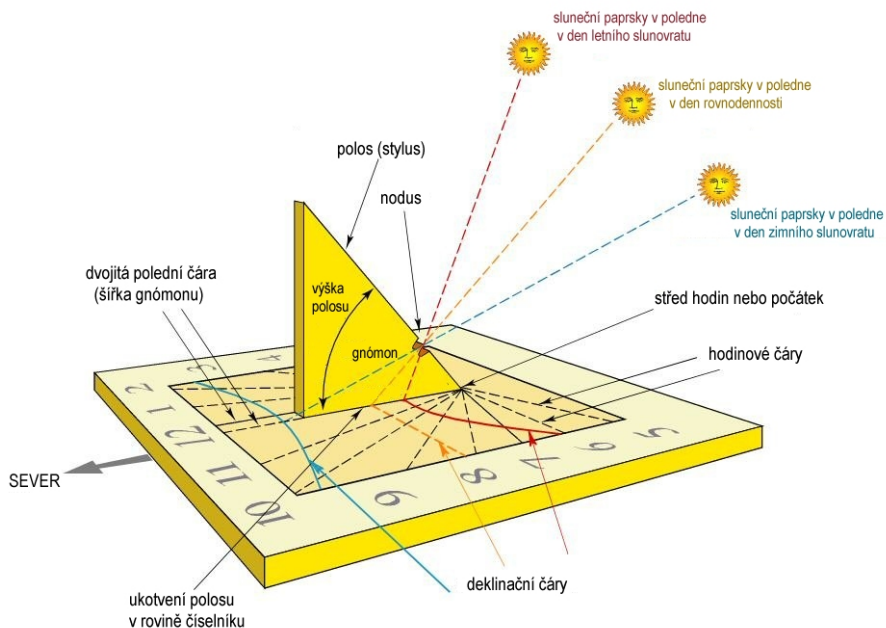
Kromě Slunce se využívalo k měření času i pozemských živlů – vody, země i ohně. Vodní hodiny, tzv. klepsydry se poprvé objevily ve 14.-16. století př. n. l. v Egyptě, Babylonu, Indii nebo Číně. Nicméně například Cowan (1958) tvrdil, že první klepsydry se objevily v Číně už kolem 4000 let př. n.l. a patří tak k nejstarším přístrojům. Přesýpací hodiny jsou oproti tomu mnohem mladší. Poprvé jsou zmiňovány v Evropě v 8. století n.l., ale první jasný důkaz představuje až freska Alegorie dobré vlády Ambrogia Lorenzettiho z let 1338 až 1339 na zdech paláce v Sieně (Itálie). Ani první použití ohně pro měření času není jasné. První zmínku o tzv. svíčkových hodinách lze najít v čínské básni od básníka You Jiangu roku 520 n.l.. Podobné hodiny se hojně používaly v Japonsku do počátku 10. století a do pozdějších dob v arabských zemích.

Všechny výše uvedené metody měření času měly i přes velmi důmyslná vylepšení omezenou přesnost. Zcela jinou kategorii představuje měření času počítáním pravidelných pohybů, ať již mechanických, elektrických nebo atomárních oscilací. U prvních mechanických hodin bylo třeba zejména zajistit rovnoměrný chod. Od konce 13. století<sup>4</sup> až do Galileiho objevu využití kyvadla se používal tzv. lihýř. Takové hodiny bylo nutné natahovat každých pět až šest hodin a za tuto dobu se mohly rozejít od správného času až o dvě hodiny! Přestože Galileo navrhl krokové ústrojí kyvadlových hodin, hodiny samotné sestrojil až roku 1655 Christian Huygens<sup>5</sup>. V témže roce Huygens vy-

<sup>3</sup>V knižní podobě jej vydali Brož a kol. (2005)

<sup>4</sup>Spekuluje se o tom, že mechanické hodiny vznikly v raném středověku, například se traduje, že podobné hodiny zkonstruoval budoucí papež Sylvestr II. První zřejmou zmínku o mechanických hodinách nalezneme v Božské komedii Dante Aligieriho, která vyšla roku 1320. Nicméně, pokud vezmeme v úvahu i známý mechanismus z Antikythéry vyrobený v letech 150-100 př.n.l., musíme naše úvahy o době vzniku mechanických hodin řádně poopravit.

<sup>5</sup>Sestrojení hodin oznámil krátkou zprávou v roce 1657 a podrobně popsal v díle *Horologium oscillatorium* v roce 1673.



Obrázek 3.3: Schéma vodorovných slunečních hodin pro severní polokouli. Na jižní polokouli jde číselník proti směru hodinových ručiček. Převzato z webu British Sundial Society a upraveno.



Obrázek 3.4: Vlevo: První zobrazení přesýpacích hodin. Detail Lorenzettiho fresky. Uprostřed: Klepsydra, vodní hodiny: rekonstrukce jílového originálu z konce 5. století př.n.l. uložená v aténském muzeu. Vpravo: Svíčkové hodiny. Zdroj: wikipedie.

nalezl i setrvačku (tzv. nepokoj) pro mechanické hodiny, kterou si nechal o dvacet let později patentovat<sup>6</sup>. Setrvačky a kyvadla vytlačily dříve používaný lihýř, přinesly zlepšení přesnosti, které ale bylo stále nedostatečné pro potřeby námořnictva. Britský parlament dokonce nabídl odměnu v dnešních cenách zhruba 100 milionů korun pro

<sup>6</sup>Nezávisle na Huygensovi vynalezl setrvačku i Robert Hooke

toho, kdo dodá přesný chronometr použitelný pro přesné určování polohy lodí, jejich zeměpisné délky. Po čtyřiceti letech práce to dokázal hodinář John Harrison, jehož chronometr udržel přesnost 0,2 s za den. Zásadní změny se měření času dočkalo ve 20. století. W. Marrison a J. W. Horton v Bell Telephone Laboratories sestrojili v roce 1927 první hodiny, jejichž oscilátorem byl piezoelektrický výbrus (tzv. quartz). V 60. letech se pak původně rozměrné laboratorní zařízení podařilo zmenšit do velikosti přenosných, náramkových hodinek, které začala sériově vyrábět firma Seiko v roce 1969. Přesnější než kmity piezoelektrického oscilátoru krystalu křemene jsou kmity atomů. Po teoretických konceptech byly první atomové hodiny využívající atomy čpavku postaveny krátce po druhé světové válce (1949) ve Spojených Státech. Jejich přesnost ale ještě nebyla vyhovující. První přesné atomové hodiny využívající atomu cesia postavili L. Essen a J. V. L. Parry v roce 1955 v National Physical Laboratory ve Velké Británii (Essen & Parry, 1955). Objev principu atomových hodin posloužil i pro novou definici sekundy platnou od roku 1967<sup>7</sup>. V současné době se přechází z cesiových hodin na soustavu vodíkových maserů. Atomové hodiny se dnes používají ke kontrole a kalibraci všech hodin a vědeckých a navigačních přístrojů, slouží jako nejpřesnější normály času.

### 3.2.1 Časy v astronomii

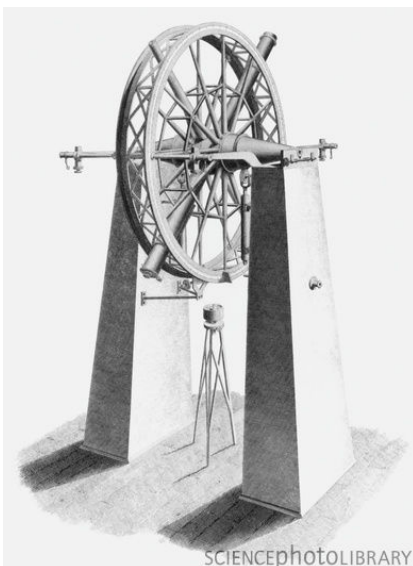
Astronomové nezdědka stojí před závažným problémem spojeným s časem. Časové standardy se v průběhu staletí měnily, měnila se jejich přesnost. Jak tedy co nejlépe navázat pozorování z různých historických období. A nemylte se, nemusí jít jen o dávnou historii, problémem je někdy i zpracování dat z 20. století.

V minulosti byly časy odvozeny od pohybů Země. Délka dne se měřila pomocí průchodu hvězd místním poledníkem a k tomu sloužil speciální dalekohled, který se mohl pohybovat jen v rovině meridiánu (viz obrázek 3.5). Dnes se pro měření času používá interferometrických pozorování VLBI<sup>8</sup> velmi vzdálených objektů zvaných kvazary. Dosahuje se přesnosti řádově až milisekundy a je možné pak sledovat i drobné změny v délce otoček Země kolem své osy.

V roce 1884 byl oficiálně přijat jako mezinárodní časový standard místní střední sluneční čas v anglické Greenwichi (Greenwich Mean Time, GMT). Zatímco občanský čas GMT se počítal od půlnoci, astronomický den stejného data (založený též na GMT) začínal o 12 hodin později v poledne. Nepřesnosti a zmatky, které z toho vycházely byly ukončeny až 1. ledna 1925, kdy byl nově definován Greenwichský střední astronomický čas (Greenwich Mean Astronomical Time, GMAT), v němž den začínal v poledne. O tři roky později zavedla Mezinárodní astronomická unie termín „Universal Time“ UT (světový čas), v němž den pro občanské i astronomické účely začíná o půlnoci (McCarthy & Seidelmann, 2009). Světový čas UT existuje v různých verzích. Nejvíce se užívá čas UT1, který je stejný pro celou zeměkouli a definuje skutečný rotační úhel Země vůči pevné vztážené

<sup>7</sup>Jedna sekunda je v SI od roku 1967 definována jako 9 192 631 770 kmitů atomů cesia. Do té doby byla charakterizována jako 1/86 400 středního slunečního dne (viz kapitola 3.3.1).

<sup>8</sup>Interferometrická pozorování jsou založena na skládání signálů (optických, rádiových) z více přístrojů (dalekohledů, radioteleskopů). Přesným složením signálů z jednotlivých členů interferometru se získá výsledný signál, jehož rozlišení je podobné jako by tento signál byl pořízen jediným zařízením o rozměrech srovnatelných se vzdáleností členů interferometru. Jedním z největších interferometrů je VLBI (anglického Very Long Baseline Interferometry), tedy Interferometr s velmi dlouhou základnou.



Obrázek 3.5: První pasážník svého druhu vyrobil roku 1806 Edward Troughton (1753-1835) pro anglického astronoma Stephena Groombridge (1755-1832). Obrázek je převzatý z publikace „Úvod do praktické astronomie“, kterou v několika částech vydal v letech 1824-1829 William Pearson.

soustavě (dané velmi vzdálenými objekty). Jeho nepřesnost jsou  $\pm 3$  milisekundy za den. Až do padesátých let minulého století byly časové signály v rozhlase založeny na UT a tedy odvozeny z doby rotace Země. Teprve pak se začaly uplatňovat atomové hodiny. Čas, který je od nich odvozený, se označuje jako atomový čas TAI (International Atomic Time). Od roku 1961 je provozován časový standard UTC<sup>9</sup> (Coordinated Universal Time). UTC představuje základ pro občanské měření času, využívají ho například hodiny v počítačích (synchronizovaných přes Network Time Protocol (NTP) server). Chod UTC je odvozen od rovnoměrně běžících atomových hodin. Jenže UTC je definován tak, že se nesmí odchýlit od UT1 o více než 0.9 sekundy. Proto je třeba někdy zařadit do UTC tzv. přestupnou sekundu, zpravidla na konci pololetí nebo celého roku. Od zavedení těchto přestupných sekund jich bylo do roku 2012 vloženo 34! A to už je časový interval velmi dobře měřitelný i na náramkových hodinkách. Čas UTC tedy není kontinuální, což je nesmírně důležitý závěr, který je třeba mít při zpracování časových řad pozorování na paměti.

Nicméně astronomie řešila ještě jiný úkol. Jak počítat čas za delší období? Jak jednoznačně určit, kdy k nějaké události v minulosti došlo? Jak si řekneme v závěru kapitoly, existuje i řada kalendářů. Různé oblasti měly v minulosti jiný systém počítání let a dní v kalendáři. Jak tedy zajistit, aby každá událost (z našeho pohledu zejména každé pozorování) bylo opatřeno správnou časovou značkou? Řešení je celkem snadné, ale historie řešení je spleťtá.

V roce 1583, rok po zásadní reformě kalendáře provedené Řehořem XIII., popsal francouzský učenec Joseph Justus Scaliger velký časový cyklus o délce 7980 let. S jeho pomocí chtěl popsat veškeré historické události, proto šel do minulosti před všechny

<sup>9</sup>Oficiálně byl takto označen až roku 1967.

popsané události a počátek pro počítání dní ve svém datování stanovil na 1. ledna roku 4713 př. n. l. 12 hodin v Alexandrii. Od toho dne se tedy v rámci tzv. juliánského<sup>10</sup> datování počítají průběžně jednotlivé dny. K poledni 1. ledna 2012 jich bylo už 2 455 928. Scaligerovy myšlenky se chopil John Herschel a roku 1849 navrhl využití juliánského datování v astronomii (Herschel, 1849). V roce 1884 se po zavedení nultého Greenwichského poledníku pro začátek počítání času v juliánském datování stanovilo poledne v Greenwichi. Prvním, kdo skutečně využil juliánské datování v astronomické praxi, byl Edward Pickering (1890). Dnes se s tímto vyjádřením času setkáte prakticky v každém astronomickém článku. Algoritmy pro převody občanského data v našem kalendáři na juliánské a opačně je možné najít například v Seidelmann (1992). Pro výpočet juliánského data z občanského se hojně využívá algoritmu z krátké práce Fliegel & van Flandern (1968). Je-li  $R$  rok,  $M$  měsíc,  $D$  den, pak výsledné juliánské datum  $JD$  dostanu ze vztahu

$$\begin{aligned}
 JD &= 1461 * [R + 4800 + (M - 14)/12]/4 \\
 &+ 367 * [M - 2 - 12 * ((M - 14)/12)]/12 \\
 &- 3 * [(R + 4900 + (M - 14)/12)/100]/4 + D - 32075.
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Poznamenejme, že na zlomky dne se převedou také údaje o hodinách, minutách, případně sekundách.

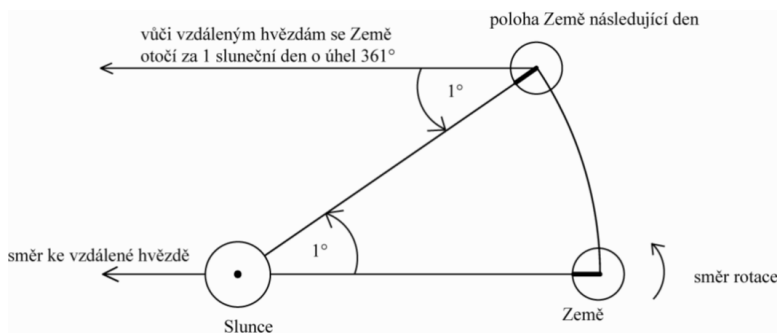
## 3.3 Doba rotace a doba oběhu

### 3.3.1 Den

Zatímco délka jednoho dne je přímo definována v soustavě jednotek SI (viz kapitola 3.1), délku jednoho roku jsme ve stejné části pouze zmínili, konkrétně délku středního juliánského roku podle definice IAU. Obě jednotky – den i rok jsou odvozeny z pohybu Země. Jeden den odpovídá jedné otočce Země kolem své osy a jeden rok zase době jednoho oběhu Země kolem Slunce. Tak se to učí školáci na základní škole. Jenže situace ani zdaleka není tak jednoduchá. Rotace Země není stabilní. Dlouhodobě se rotace Země brzdí tempem zhruba 1.5 ms za století (Brosche & Sündermann, 1990). K tomu je třeba připočítat i krátkodobé změny doby rotace Země v řádu milisekund. Navíc je třeba rozlišovat vztažné soustavy použité pro měření doby otočky Země. Jinak řečeno je třeba rozlišovat vůči čemu budeme dobu rotace Země měřit. Není den jako den. Máme den dle definice SI, kalendářní den, hvězdný den, sluneční den a ten ještě pravý a střední. Ale nepředbíhejme.

Pokud budeme poměřovat dobu rotace Země ve vztažné soustavě ke hvězdám, mluvíme o tzv. hvězdném dni. Jeden **hvězdný (siderický) den**, tedy doba otočky Země o 360° vůči hvězdám, je pak definován jako doba mezi dvěma po sobě následujícími

<sup>10</sup>O označení „juliánský“ se vedou spory. Často se traduje, že je to podle jména jeho otce, ale sám Scaliger přímo píše: „Julianum vocauimus: quia ad annum Julianum dumtaxat accomodata est“, což můžeme volně přeložit jako „označujeme juliánská, protože vyhovuje juliánskému roku“, tedy roku z juliánského kalendáře Julia Ceasara.



Obrázek 3.6: Sluneční a hvězdný den. Převzato z Pokorný (2006).

horními kulminacemi<sup>11</sup> jarního bodu<sup>12</sup>. Naše denní biologické hodiny, jeden z tzv. cirkadiálních rytmů je synchronizován se Sluncem. Jeden **sluneční den** odpovídá délce otočky Země měřené vůči Slunci. Pokud budeme vycházet z měření skutečného Slunce, bude tzv. **pravý sluneční den** dobou mezi dvěma následujícími horními kulminacemi skutečného Slunce. Jenže v takové vztažné soustavě se během jedné otočky Země změní i vzájemná poloha Země a Slunce. Země se posunula ve své dráze při pohybu kolem Slunce. To znamená, že aby Slunce opět kulminovalo na místním poledníku, musí se Země ještě potočit za Sluncem (viz obrázek 3.6). Sluneční den je tak vždy o zhruba 4 minuty delší než den hvězdný. Pro větší přehlednost přinášíme i jednoduché převodní vztahy mezi hvězdným a slunečním dnem.

Převodní vztahy:

1 sluneční den = 24 h 3 min 57 s hvězdného času

1 hvězdný den = 23 h 56 min 4 s slunečního času

ale

1 hvězdný den = 24 h 0 min 0 s hvězdného (!) času

1 sluneční den = 24 h 0 min 0 s slunečního (!) času

Jak ale víme už ze střední školy, ve vztažné soustavě spojené se Sluncem, obíhá Země kolem Slunce po málo výstředné elipse a to znamená, že v důsledku druhého Keplerova zákona nerovnoměrně (viz kapitola ??). Změníme-li „úhel pohledu“, korektně řečeno vztažnou soustavu a budeme nyní sledovat pohyb Slunce vůči Zemi, pak se skutečné, pravé Slunce pohybuje v této soustavě také nerovnoměrně. Proto se v astronomii zavádí tzv. střední Slunce, a hned dokonce dvě. **První střední Slunce** se pohybuje rovnoměrně po ekliptice. S pravým Sluncem se přitom na ekliptice setkává v přísluní a odsluní. Osa rotace Země je ale různoběžná s osou ekliptiky, takže se takto definované první střední Slunce nebude pohybovat rovnoměrně po světovém rovníku. Proto bylo zavedeno **druhé střední Slunce**, které se po světovém rovníku pohybuje rovnoměrně. S prvním středním

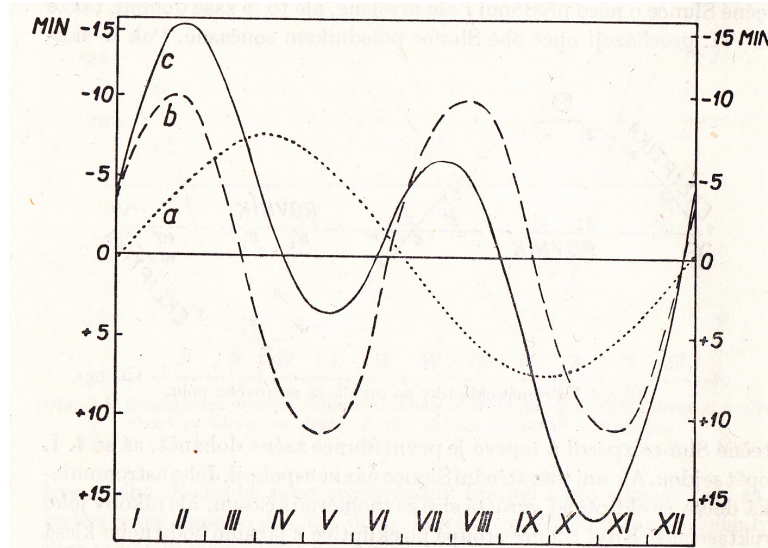
<sup>11</sup>Slovo kulminace znamená „vrchol“, protože latinsky *culmen* je vrchol. V době horní kulminace objekt vrcholí, má na obloze maximální úhlovou výšku (nad vodorovnou rovinou). Naopak v době dolní kulminace má objekt nejmenší úhlovou výšku, někdy i zápornou, takže může být pod obzorem a nemusí být v tom okamžiku pozorovatelný.

<sup>12</sup>Jak se čtenář dozví později v kapitole 4.1.3, ani jarní bod není stabilní, jeho poloha se v dlouhodobé časové škále mění. V důsledku pohybu jarního bodu je hvězdný den kratší o 0.009 s středního času než doba otočky Země o 360° (měřeno vůči hvězdám), což odpovídá hodnotě denního posunu jarního bodu.

Sluncem se setkává v jarním a podzimním bodě. Poloha druhého středního Slunce pak určuje okamžiky střední půlnoci, středního poledne a délku středního slunečního dne. Jednotkou středního slunečního času je **střední sluneční den**, který je zaveden jako doba mezi dvěma po sobě následujícími dolními kulminacemi Slunce. Dolní kulminace byla použita proto, aby den začínal o půlnoci. Rozdíl mezi průchody pravého Slunce (PS) a druhého středního Slunce (SS2) meridiánem se označují jako **časová rovnice**

$$E = PS - SS2. \quad (3.2)$$

Velikost výsledných hodnot v časové rovnici je dána tím, že se Slunce pohybuje po ekliptice nerovnoměrně a také tím, že čas měříme podél světového rovníku a nikoli podél ekliptiky. Změny velikosti časové rovnice ukazuje obrázek 3.7.



Obrázek 3.7: Časová rovnice. Křivka (a) udává rozdíl mezi časem odvozeným od pravého Slunce a časem z prvního středního Slunce. (b) ukazuje rozdíl mezi prvním a druhým středním Sluncem a konečně křivka (c) vyznačuje výslednou časovou rovnicí. Převzato z Guth a kol. (1954).

Podobná situace jako na Zemi samozřejmě nastává i u ostatních planet. Naše úvahy tak můžeme zobecnit. Pokud se v literatuře někde hovoří o rotaci planety bez bližšího udání, máme se většinou na mysli doba rotace vůči hvězdám, tedy tzv. střední siderická<sup>13</sup> doba rotace, siderický den  $D_*$ . Na druhé straně délku dne na té které planetě charakterizujeme podle doby rotace vůči centrální hvězdě, hovoříme o tzv. synodickém<sup>14</sup> dnu  $D$ . Uvažujme nyní, že planeta obíhá kolem centrální hvězdy za dobu  $P$ . Pokud je počet siderických dní za jednu oběžnou periodu  $P/D_*$  větší než počet synodických dní  $P/D$ , pak lze psát

$$\frac{P}{D_*} - \frac{P}{D} = 1 \quad \text{nebo} \quad \frac{1}{D} = \frac{1}{D_*} - \frac{1}{P}. \quad (3.3)$$

<sup>13</sup>Slovo *siderický* vychází z latinského označení hvězdy (*sidus*) a znamená tedy "hvězdný".

<sup>14</sup>Původní význam řeckého slova *synodos* můžeme vyjádřit jako schůzku, shromáždění, soutok, společnost. Přeneseně v astronomii pak pod pojmem *synodický* rozumíme takový, který nastane při určitém postavení zúčastněných kosmických těles.



V této podobě platí vztah ale jen tehdy, jestliže planeta rotuje ve směru orbitálního pohybu, pro planety Sluneční soustavy tedy proti směru otáčení hodinových ručiček při pohledu od severního světového pólu. Je-li smysl otáčení opačný nebo obecně retrográdní, je počet siderických dní v jedné orbitální periodě naopak menší než počet synodických dní a diskutovaný vztah pak má tvar

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{D_*} + \frac{1}{P}. \quad (3.4)$$

Platnost výše uvedených převodních vztahů pro Zemi snadno ověříte dosazením hodnot  $P=365,2524$  d, a  $D = 1$  d. Výsledkem je  $D_*= 0,99727$  d = 23 h 56 min 4 s.

### 3.3.2 Hvězdný čas

Z předchozího výkladu vyplývá, že hvězdný čas a střední sluneční čas a tedy i občanský čas se rozcházejí. Jak tedy zjistit, kolik je právě na ciferníku hvězdných hodin? Zatímco sluneční čas je odvozen z hodinového úhlu Slunce, čas hvězdný je definován jako hodinový úhel jarního bodu. To znamená, že v okamžiku horní kulminace jarního bodu je 0 h 0 min 0 s místního hvězdného času. Jestliže bude hodinový úhel jarního bodu  $+30^\circ$ , pak hvězdné hodiny v místě pozorování budou ukazovat 2 hodiny místního hvězdného času. Ke stanovení hvězdného času se dříve používalo měření poloh hvězd, respektive jejich průchodu meridiánem. Dnes si většinou vystačíme s číselným modelem, aproximací, která z dříve naměřených hodnot vychází. Výpočet probíhá v několika krocích. Nejprve si aktuální datum  $T$  vyjádříme v juliánských stoletích<sup>15</sup>

$$T = (JD_0 - 2451545.0)/36525, \quad (3.5)$$

kde  $JD_0$  je juliánské datum pro nejbližší předcházející půlnoc světového času (UT). Pro stejnou půlnoc spočítáme hvězdný čas na nultém poledníku (v Grenwichi)  $S_0$ . Pro běžné použití postačí následující členy aproximace:

$$S_0 = 6.697374558 + 2400.05133691T + 0.000025862T^2 - 0.0000000017T^3. \quad (3.6)$$

Čas  $t$  v daném dni, který uběhl od půlnoci (UT), vyjádříme v hodinách a zeměpisnou délku  $l$  místa ve stupních a spočítáme výsledný místní hvězdný čas dle vztahu<sup>16</sup>

$$S = S_0 + 1.0027379093t + l/15. \quad (3.7)$$

Jednotkou hvězdného času je hvězdný den a jak jsme již uvedli výše, jeden hvězdný den má 24 hvězdných hodin, přičemž každá z nich má 60 minut a ty lze dále dělit na 60 sekund. Délka těchto hvězdných jednotek je však odlišná od slunečních!

### 3.3.3 Místní a pásmový čas

Každému místu na Zemi přísluší místní „sluneční“ čas, čas platný pro zeměpisný poledník, procházející daným místem. Rozdíl takových místních časů pak odpovídá rozdílu

<sup>15</sup>Připomeňme, že 1 juliánský rok dle definice IAU je roven 365,25 dne.

<sup>16</sup>Výsledný čas  $S$  případně změníme o celistvý násobek 24 hodin, tak aby  $0 \leq S < 24$ .

zeměpisných délek těchto dvou míst. Místa východně od našeho stanoviště mají větší místní čas (Slunce tam kulminuje dříve), místa položená západně mají místní čas menší než my. Pro Českou republiku dělá časový rozdíl mezi nejvýchodnějším a nejzápadnějším bodem území 27 minut. Ale třeba pro území Číny je to už více než 4 hodiny a pro Rusko dokonce téměř 11.5 hodiny. V dřívějších dobách, při pomalém cestování takový rozdíl místních časů ničemu nevadil, ale s rozvojem rychlé<sup>17</sup> železniční dopravy se objevil nový problém. Na železničních křižovatkách, kde se setkávaly důležité dálkové trasy, musely mít zvláštní hodiny pro každou trať. Časy na nich odpovídaly časům výchozích stanic. A tak například na nádraží v Pittsburghu, v americké Pennsylvánii (USA) udržovali hodiny s šesti různými časy. Najít správné spojení v jízdním řádu pak byl docela rébus. A byli to právě zaměstnanci železničních společností, kteří si nejdříve uvědomili nutnost změny. Charles F. Dowd navrhl systém hodinových pásmových časů pro Americké dráhy kolem roku 1863<sup>18</sup>. Jeho návrh ale nebyl nikdy přijat. Později (v roce 1876) navrhl Kanadčan Sir Sandford Fleming celosvětový systém časových pásem. O tři roky později návrh upravil, ale zejména pro něj začal intenzivně hledat podporu na mezinárodním fóru. Snaha vyvrcholila na mezinárodní konferenci v říjnu 1884. Po přijetí koncepce Grenwichského nultého poledníku bylo také státům světa navrženo přijmout systém 24 pásmových časů, kde šířka jednoho časového pásma odpovídá 15° zeměpisné délky. Většina zemí tento návrh přijala do roku 1929. Ale existují výjimky od striktního pravidla. Některé státy jako například Indie, Írán, Venezuela používají půlhodinovou odchylku od standardního času a některé státy jako například Nepál dokonce odchylku čtvrt hodinovou. Větší státy, které přesahují přes několik časových pásem, mohou stanovit oficiální čas dle konkrétního území, rozložení obyvatelstva a podobně. Nejvíce je to patrné v Číně, která se rozkládá na území pěti časových pásem. Ty byly používány do roku 1949. Dnes mají v celé Číně jednotný čas.

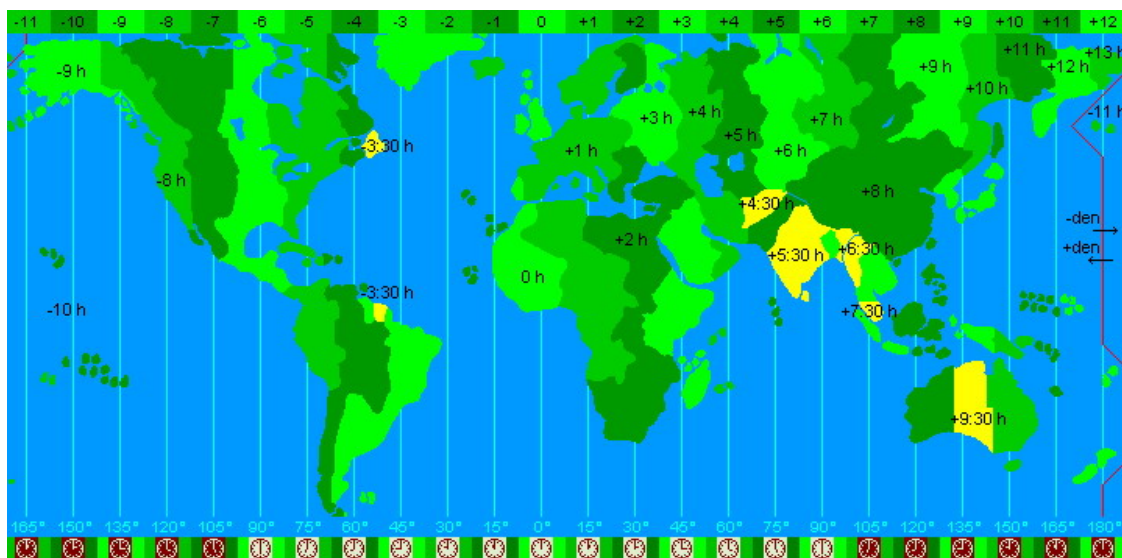
Jinými odchylkami od standardního pásmového času jsou časy zimní a letní. Princip podobný letnímu času navrhl (ale ironicky) Benjamin Franklin roku 1784 vydavatelům časopisu *Journal of Paris*<sup>19</sup>. Poprvé byl letní čas oficiálně zaveden v několika zemích během první světové války, nejdříve zřejmě roku 1916 ve Švédsku a později téhož roku i v Rakousko-Uhersku, tedy i na území dnešní České republiky. Letní čas byl u nás (tehdy na území Protektorátu Čechy a Morava) opět zaveden během druhé světové války. Každoročně se u nás vyhláší letní čas od roku 1979. V některých zemích je posun o více než jednu hodinu od standardního času, například v zimě o jednu a v létě o dvě nebo tři hodiny. Někde platí letní čas trvale – například ve Francii nebo Španělsku a nově se to týká například Ruska, Běloruska či Ukrajiny. Letní čas tedy předbíhá skutečný čas daného pásma, přebírá čas pásma ležícího východně od nás. V období, kdy

<sup>17</sup>Chápáno z pohledu tehdejších cestovatelů. Z dnešního pohledu nás rychlost tehdejších strojů příliš neohromí.

<sup>18</sup>Zajímavé je, že první popis pásmových časů publikoval v knize Miranda! italský matematik Quirico Filopanti v roce 1858.

<sup>19</sup>Ještě starší by mělo být použití letního času Brňany v srpnu 1645. Švédové vedení generálem Torstensonem tenkrát oblehli Brno. Podle pověsti byl Torstenson rozmrzelý dlouhým, bezvýsledným obléháním Brna, a proto prý prohlásil, že pokud město nedobude do poledne, odtáhne s vojskem pryč. Obránci se to dověděli a tak, když už jim bylo opravdu ouzko, začali zvonit poledne už v 11 hodin. Torstenson měl pak dostát svému slibu a ukončit obléhání. Město bylo zachráněno a na paměť této události zvoní každý den zvony katedrály sv. Petra a Pavla poledne už v jedenáct hodin. Dodejme, že jde jen o pěknou pověst. Podle historických záznamů se Brňané ubránili i bez letního času.

neplatí letní čas, se zpravidla vracíme ke standardnímu pásmovému času daného místa. Neznamená to, že bychom nyní měli v zimě zimní čas, jak s oblibou tvrdí novináři! Zimní čas je takový, kdy se hodiny posunou o jednu hodinu zpět vůči pásmovému času. Takový čas byl vyhlášen v Československu zákonem č. 212/1946 Sb. Platnost zákona nebyla zrušena, takže vláda stále může v principu zimní čas vyhlásit. S velkou pravděpodobností jde o světový unikát.



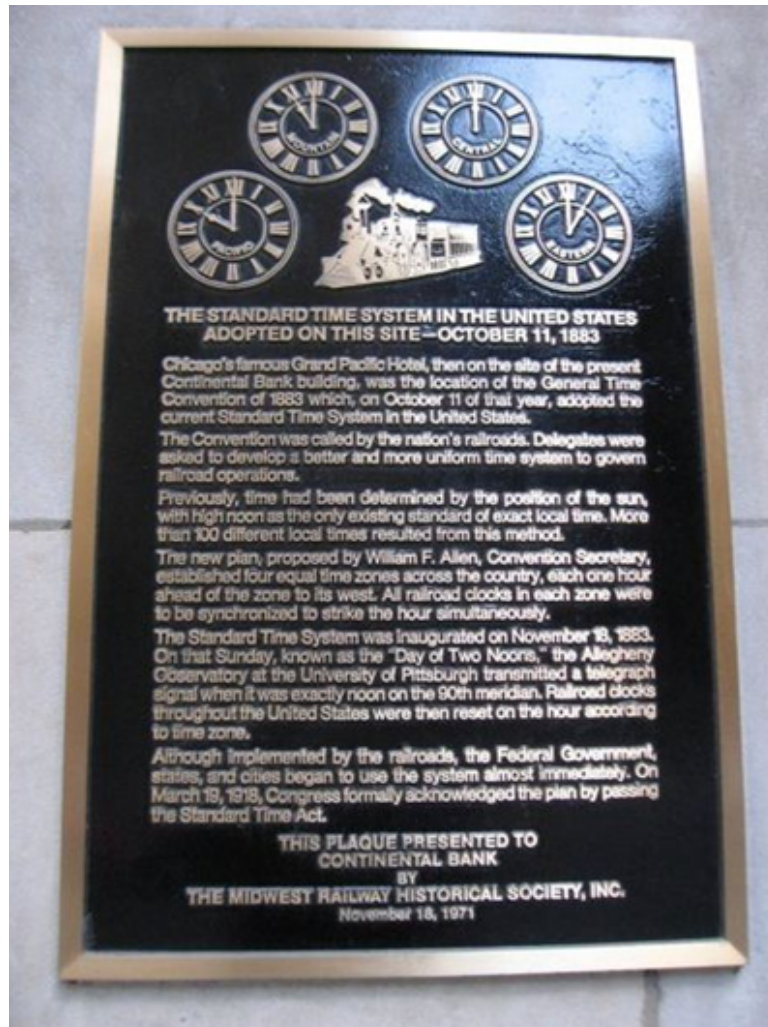
Obrázek 3.8: Časová pásma. Zdroj: [http://www.svetcest.cz/storage/200610201335\\_time.png](http://www.svetcest.cz/storage/200610201335_time.png).

### 3.3.4 Rok

Zatímco den je odvozen od doby otočky Země kolem své osy, rok má svůj původ v době oběhu Země kolem Slunce. Máme teď na mysli takové ty „běžné roky“, jejichž délka byla v minulosti určována jako časová vzdálenost mezi například dvěma po sobě následujícími zimními slunovraty. Nebudeme se bavit o tzv. uherském roku, jehož přesnou délku vlastně ani nikdo nezná. Naším tématem bude rok, s kterým se setkáváme v kalendáři, ale také rok tropický a siderický.

Kalendářní rok je docela zvláštní jednotka. Jen si zkuste vybavit jinou jednotku, která má dvě různé délky! Běžný kalendářní rok má přece 365 dní, ale jednou za čtyři roky je o jeden den delší a má 366 dní. Přidává se 29. února a to vždy, když je letopočet našeho kalendáře dělitelný čtyřmi. Pokud je letopočet dělitelný 100, je přestupným jen pokud je dělitelný také 400. To znamená, že rok 2000 přestupný byl, ale rok 2100 přestupný nebude. A proč to všechno? Jde o snahu, co nejvíce se přiblížit délce tzv. **tropického roku**<sup>20</sup>, což je doba mezi dvěma po sobě následujícími průchody pravého Slunce, přesněji středu jeho disku, jarním bodem. Jeho délka je zhruba 365.2422 dne středního slunečního času. Jenže nic není tak jednoduché, jak na první pohled vypadá. Délka tropického roku je vztažena k jarnímu bodu, ale jeho poloha se zvolna

<sup>20</sup>Označení *tropický* se zde nevztahuje k horkým oblastem kolem rovníku. Přívlastek má původ v řeckém slově *tropos*, což znamená obrat. Obratníky Raka a Kozoroha vymezují nejsevernější a nejjižnější oblast, ve které Slunce dosáhne při svém pohybu nadhlavníku.



Obrázek 3.9: Pamětní deska připomínající dohodu o používání času na železnici v Severní Americe z roku 1883 (Railway General Time Convention). Zdroj: wikipedia.

mění v důsledku precesního pohybu<sup>21</sup>. Za rok se jarní bod posune o 50,26" po ekliptice proti pohybu Slunce na hvězdné obloze. Pak bychom měli k délce tropického roku vždy připojit údaj, k jakému datu je hodnota vztahena. Střední tropický rok k 1. lednu 2000 byl například 365.2421897 dní nebo 365 dní, 5 hodin, 48 minut, 45.19 sekund. Pro běžný život stačí použít přibližnou aproximaci. Průměrnou délku tropického roku lze vyjádřit jako  $146,097/400 = 365 + 97/400 = 365.2425$  dní (Seidelmann, 1992, str. 576–81). Pro vyjádření délky tropického roku v časově odlehlejších okamžiku lze použít následující vztah

$$rok_{\text{trop}} = 365.2421896698 - 6.15359 \cdot 10^{-6}T - 7.29 \cdot 10^{-10}T^2 + 2.64 \cdot 10^{-10}T^3. \quad (3.8)$$

Podobně jako jsme vztahovali dobu otočení Země kolem své osy vůči hvězdám, můžeme totéž udělat i při sledování oběhu Země kolem Slunce. Dobu, za kterou se Slunce vrátí do téhož směru na hvězdné obloze, respektive k téže hvězdě na ekliptice, označujeme

<sup>21</sup>Detailněji je o něm pojednáno v kapitole 4.1.3.

jako **hvězdný rok**. Oproti tropickému roku je o 20 minut delší a zejména není ovlivněn precesí.

## 3.4 Kalendáře

O astronomických cyklech, na jejichž základě je založeno počítání času, jsme již psali. Jenže, jak vlastně počítat dny, týdny, měsíce, roky? Systém počítání času v jednotkách dnů a delších, tedy **kalendář**, je vlastně jedním z nejstarších vynálezů lidstva. Potřeba počítat a zaznamenávat čas je člověku vlastní. Za kalendář lze považovat i stěny cely, na které třebaš vězeň Edmond Dantès, budoucí hrabě Monte Christo, den za dnem přidával další čárku. Nám ale půjde přece jen o propracovanější systémy, kalendáře. Každý kalendář je určen počátkem počítání let v dané soustavě, délkou roku, stanovením začátku roku a členěním roku na kratší období a určení jejich začátků. Jeden rok vychází z délky oběhu Země kolem Slunce, kratší jednotky jako týden, měsíc jsou odvozeny z pohybu Měsíce a jeho fází a konečně nejkratší jednotka - jeden den je, jak víme, dána délkou otočky Země kolem své osy. Týden a měsíc známe z našeho kalendáře, ale v jiných kalendářních systémech se vyskytovaly i cykly jiných délek.

Náš v současnosti používaný kalendář má svůj původ ve starověkém Římu. Počátek římského kalendáře spadl v dnešním počítání do roku 753 před naším letopočtem, kdy byl založen Řím. Roku 46 př.n.l. vydal císař Gaius Julius Caesar dekret, kterým ustanovil délku roku 365.25 dne a pozměnil délku a názvy některých měsíců. Nový kalendář se začal uplatňovat od následujícího roku (45 př.n.l.), proto je někdy uváděn v souvislosti s juliánským kalendářem tento rok. Každý čtvrtý rok, takový, který je dělitelný čtyřmi, se stal rokem přestupným. O takřka šest století později se římský kněz skythského původu Dionysius Exiguus domníval, že historicky mnohem významnější událostí bylo narození Ježíše Krista a tak se pokusil stanovit datum jeho narození a k tomuto roku pak vztahovat počítání let v letopočtu. Jeho návrh na údobí „Anno Domini“ (česky Léta Páně) se ale začal rozšiřovat až zhruba v polovině 8. století, ale používá se vlastně dodnes. Dnes víme, že se Dionysius Exiguus dopustil několika zásadních chyb a Ježíš Kristus se zřejmě narodil o několik let dříve, než vypočetl. V běžném životě označujeme roky po domnělém narození Krista jako roky našeho letopočtu, roky před ním jako před naším letopočtem (př.n.l.). Angličané používají pro roky před naším letopočtem jednodušší zkratku BC (before Christ), tedy před Kristem. Pokud ale popisují samotné narození Ježíše Krista, dostanou se do nesnází. Tvrzení, že Ježíš Kristus se narodil v roce 4 BC (před Kristem), působí opravdu zvláště.

Z čistě matematického hlediska chybí na výše popsané časové škále rok 0. Datum „1. 1. roku nula“ neexistuje. Prvním dnem prvního tisíciletí byl 1. leden roku 1. Z toho vyplývá, že na vášnivou debatu, vedenou před několika lety, kdy začíná 21. století, je jednoduchá odpověď. Až 1. 1. 2001. Přejít na rok 2000 byl sice pěkný magický, ale nic víc. Dalším důsledkem matematického počítání let do minulosti je ovšem také to, že roky před naším letopočtem, vyjádřené matematiky, budou o jednotku menší. Rok 46 př.n.l. byl rokem -45!

Vraťme se ale ještě k délce roku juliánského kalendáře. Julius Caesar ji stanovil na 365.25 dne, ale odchylka od skutečné délky tropického roku způsobila, že v 16. století už rozdíl mezi kalendářem a skutečností (slunovraty a rovnodennostmi) a na ně navázanými

svátky narostl na deset dnů. Proto přistoupil papež Řehoř XIII. roku 1582 k reformě juliánského kalendáře a upravil systém přestupných roků tak, že z roků dělitelných stem jsou přestupné jen roky dělitelné 400, zatím se tedy jednalo o roky 1600 a 2000. Průměrná délka gregoriánského roku se reformou dostala na hodnotu 365,2425 dne, takže je jen o 26 s delší než tropický rok. Gregoriánská reforma ale provedla také okamžitou nápravu stavu a tak po 4. říjnu 1582 následoval hned 15. říjen 1582. Ani gregoriánská reforma nebyla přijata okamžitě po jejím vyhlášení. V českých zemích byl gregoriánský kalendář přijat roku 1584. Rudolf II. tehdy nařídil, aby po 6. lednu bezprostředně následoval 17. leden. Na Moravě byl nový kalendář přijat na podzim roku 1584 a na Slovensku o tři roky později. Ale například sever Evropy včetně severu Německa gregoriánský kalendář akceptoval až k roku 1700, konzervativní Anglie teprve roku 1752 a v Rusku byl přijat až roku 1918<sup>22</sup>(Horský et al., 1988, str. 157).

Přestože se celosvětově používá gregoriánský kalendář, můžete se setkat i s řadou dalších kalendářů, historicky významných nebo důležitých například pro určitá náboženství. V některých státech je dokonce náboženský kalendář součástí státního práva. Jeden z nejstarších kalendářů je *egyptský kalendář*. Vznikl přibližně ve 4. tisíciletí před naším letopočtem. Roky se ale nečíslovaly průběžně, nýbrž od začátku vlády panujícího faraona. Jeho vznik byl zpočátku vynucen zemědělstvím, stanovením období záplav pomocí heliaktického východu Síria. Později byl vylepšován zejména kvůli účetnictví a daňové evidenci. Roku 266 př.n.l. zavedl Ptolemaios III. přestupné roky. Přestože přímo v Egyptě se tato reforma příliš neujala, později se stala inspirací pro juliánský kalendář.

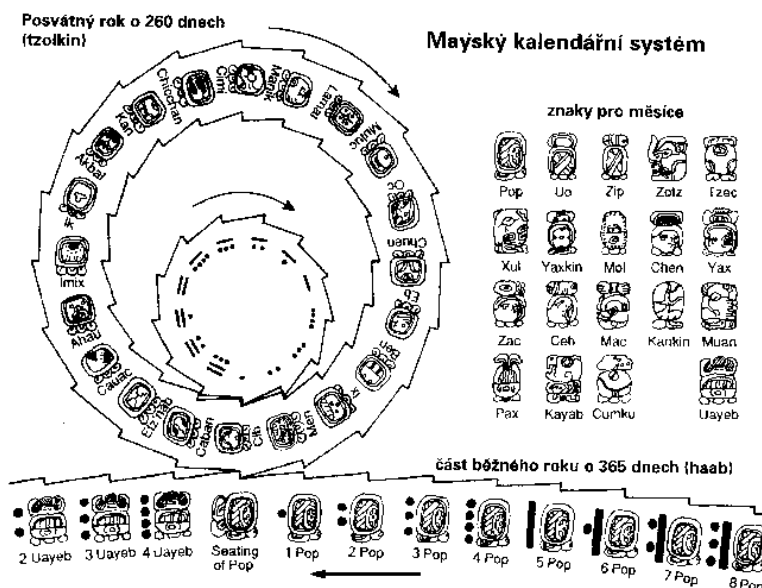
*Řecký kalendář* měl počátek stanovený na první den prvních olympijských her, v gregoriánském kalendáři 8. července roku 776 př.n.l. Termín „olympiáda“ znamenal tehdy čtyřleté období mezi hrami. Řecký měsíc se členil na tři dekády a den začínal východem Slunce.

V roce 2012 se často mluví o *mayském kalendáři* a jeho předpovědi konce světa v prosinci tohoto roku. Pravdou je, že mayský kalendář je velmi složitý a propracovaný systém různých cyklů. Jeho počátek spadá do roku 3114 př.n.l. Problémem je, že přesné „nasazení“ schématu mayského kalendáře na historické události je docela obtížné a tak vysvětlujících teorií najdete téměř dvě stovky. Jeden z posledních příspěvků pochází i z české kotliny. Amatérští badatelé V. a B. Böhmovi (2004) odhalili v mayských zápisech záznamy astronomických událostí a s pomocí odborníků z Astronomického ústavu AV ČR následně dokázali mayský kalendář správně interpretovat (Klokočník et al., 2008).

*Židovský kalendář* se odkazuje na bibli. Počátek kalendáře odpovídá stvoření světa, k němuž mělo podle bible dojít 7. října roku 3671 př.n.l. Tento letopočet se ale objevil až ve středověku. V současné podobě je kalendář zhruba od 10. století. Rok má 12 měsíců, které mohou mít 29 nebo 30 dní. Rok tak může mít 353 až 355 dní. Sedm dní tvoří týden. V něm má pouze sedmý den samostatné jméno, „šabat“<sup>23</sup>. Zajímavé je i rozdělení dne. Den začíná západem Slunce a dělí se na hodiny, jejichž délka je určována jako dvanáctina denní nebo noční části dne.

<sup>22</sup>Pozdní přijetí gregoriánské reformy také stojí za zdánlivou chybou, kdy je ruská komunistická revoluce ze 7. listopadu 1917 označována jako Velká říjnová socialistická revoluce. Mimořádně ruská pravoslavná církev gregoriánskou reformu dosud nepřijala a tak se pravoslavné vánoce začínají slavit až 6. - 7. ledna.

<sup>23</sup>Ze slova „šabat“ je odvozeno české označení „sobota“.



Obrázek 3.10: Každý den v roce má v mayském kalendáři své jméno složené z několika částí. Jméno pro ten který den lze vytvořit pomocí do sebe zapadajících ozubených kol. Každý zub každého kola nese určitou část budoucího jména dne. Převzato z [http://vesmir.msu.cas.cz/Pavel/mayove\\_cisla.html](http://vesmir.msu.cas.cz/Pavel/mayove_cisla.html)

Nejmladším je z našeho stručného přehledu *kalendář islámský*. Jedná se o čistě měsíční (lunární) kalendář. Zavedl jej chalífa<sup>24</sup> Umar roku 637. Za počátek kalendáře zvolil tzv. hidžru, tedy přesídlení proroka Mohameda z Mekky do Medíny v létě roku 622. Rok v muslimském kalendáři trvá 354 dní a má 12 měsíců.

## Použitá a doplňující literatura

- Böhm, V., Böhm, B. 2004, Vesmír 83, říjen 2004, 568 - 573
- Brosche, P., Sündermann, J., eds., 1990, Earth's rotation from eons to days : proceedings of a workshop held at the Centre for Interdisciplinary Research (ZiF) of the University of Bielefeld, FRG, September 26–30, 1988. Berlin: Springer-Verlag.
- Brož, M., Nosek, M., Trebichavský, J., Pecinová D., 2005, Praha: Academia
- Cowan, H.J., 1958, Time and Its Measurement: From the stone age to the nuclear age. Ohio: The World Publishing Company, str. 58
- Essen, L., & Parry, J. V. L. 1955, Nature, 176, 280
- Fliegel, H. F., van Flandern, T. C. 1968, Communicat. of the ACM, Vol. 11 No. 10, 657
- Guth V., Link, F., Mohr, J.M., Šternberk, B., 1954, Astronomie I, Praha, Nakladatelství ČSAV
- Herschel, J. F. W., Sir 1849, London, Printed for Longman, Brown, Green, and Longmans
- Horský, Z., Mikulášek, Z., & Pokorný, Z. 1988, Praha: Svoboda, 1988. Vyd. 1.

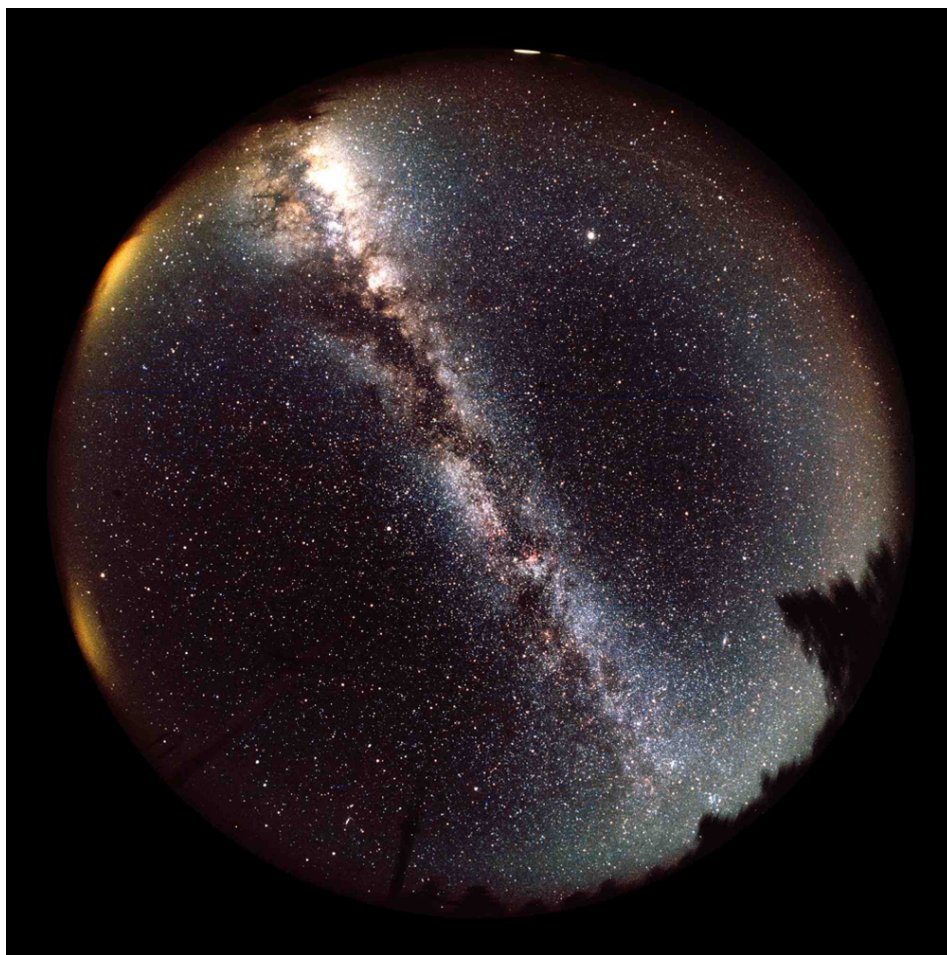
<sup>24</sup>Chalífa, kalif byl nejvyšším islámským duchovním (imámem) a do poloviny 13. století i světským vládcem.

- Klokočník, J., Kostelecký, J., Böhm, V., et al. 2008, *Astron. Nachrichten*, 329, 426
- McCarthy, D. D., & Seidelmann, P. K. 2009, *Time: From Earth Rotation to Atomic Physics*, Wiley, str. 10-11
- Michal, S., 1980, *Hodiny*. Praha: SNTL 1980
- Pickering, E. C. 1890, *Annals of Harvard College Observatory*, 18, 285 (Appendix)
- Pokorný, Z., 2006, *Vademecum - Váš průvodce vesmírem*, Hvězdárna a planetárium M. Koperníka v Brně
- Seidelmann, P. K. 1992, *Published by University Science Books*, 648 Broadway, Suite 902, New York, NY 10012, 1992. Edit. Seidelmann, P. K.



## 4 Hvězdné objekty noční oblohy

Zřejmě nejvíce lidi přitahuje k astronomii právě pohled na temnou noční oblohu posetou hvězdami. Je to opravdu úžasný a fascinující pohled. Můžeme se jím kochat celé hodiny. Ale co to vlastně pozorujeme? Jaké jsou to objekty? Můžeme o nich zjistit něco více jen z prostého pohledu na ně? V této kapitole si stručně představíme kaleidoskop astronomických objektů nočního nebe a řekneme si, jak popsat polohu těchto objektů.



Obrázek 4.1: Hvězdné nebe.

### 4.1 Souřadnicové soustavy v astronomii

Jednou ze základních úloh astronomie je určení polohy objektu na obloze a hvězdné obloze. Vždyť právě taková měření byla u zrodu časomíry a později posloužila i při určování polohy pozorovatele na zemském povrchu. Starověkému veleknězi stačilo při pozorování oblohy určovat polohu objektů na obloze například pomocí menhirů ve starobylých svatyních. Vždy pozorování prováděl ze stejného místa a tak stačilo, když se objekt objevil ve směru určitého kamene a výsledek byl na světě. Takový popis je z dnešního pohledu samozřejmě nedostatečný. Naše pozorovací stanoviště se mění, přesouváme se nejen po

zemském povrchu, ale okolní vesmír sledujeme i z kosmu. Potřebujeme znát tedy polohu objektů nejen na obloze, ale i na hvězdné obloze a s vysokou přesností. Je zřejmé, že přesné určení polohy a času dnes rozhodně není jednoduchou úlohou. Navíc je důležité zvolit správnou vztažnou soustavu, vybrat správný souřadný systém pro danou úlohu, případně přejít z jednoho systému do druhého.

Polohy objektů na obloze, hvězdné obloze budeme určovat pomocí směrů, respektive úhlů mezi dvěma směry. Většinou jsou objekty umístěny na pomyslnou nebeskou sféru – polohu objektu pak udávají soustavy sférických souřadnic. V minulosti byly sférické souřadnice definovány výhradně pomocí nebeské sféry, pomyslné koule o jistém blíže nespecifikovaném poloměru. Transformace souřadnic mezi jednotlivými soustavami souřadnic nebo výpočet vzdálenosti dvou objektů na obloze nebo hvězdné obloze byl řešen pomocí sférické trigonometrie. V dnešní době se ale můžeme celkem dobře bez této sféry obejít. Transformace souřadnic lze řešit jednoduše maticovým počtem. Navíc vzdálenost k objektu nebo chcete-li poloměr oné sféry pro určení polohy objektu na obloze nebo hvězdné obloze nepotřebujeme. Objekt, jehož souřadnice chceme určit, se přece nachází v určitém směru, na polopřímce od zvoleného *počátku soustavy souřadnic*. Jde tedy jen o úlohu, při níž popisujeme polohu jedné polopřímky v prostoru. K tomu potřebujeme znát zmíněný počátek soustavy souřadnic, základní rovinu a základní směr v této rovině<sup>1</sup>. Pokud bude počátek soustavy souřadnic souhlasit s polohou pozorovatele, mluvíme o *topocentrické soustavě souřadnic*. Pokud počátek vztáhneme například k poloze Země nebo Slunce, mluvíme o *geocentrické*, respektive *heliocentrické* soustavě.

Z počátku soustavy souřadnic vychází vždy směr k pólu. Na tuto polopřímku je kolmá *základní rovina* souřadné soustavy. Základní rovinou může být rovina rovníku, vodorovná rovina v místě pozorování nebo rovina ekliptiky a podobně. Směr k objektu spolu s polopřímkou k pólu definují *rovinu poledníku*. V této rovině měříme od základní roviny směrem k pólům šířkovou souřadnici – jde tedy o orientovaný úhel mezi směrem k objektu a průsečnicí roviny poledníku se základní rovinou. V základní rovině definujeme *základní směr*, od něhož pak měříme orientovaný úhel k rovině poledníku našeho objektu. Princip zavedení je u všech souřadných soustav stejný. Je třeba si jen uvědomit, jak je v daném systému definována základní rovina a základní směr a jaké jsou vzájemné vztahy mezi definičními prvky daných souřadných soustav. Zvládnutí této části kurzu je výchozí například pro kurz *Obecná astronomie*.

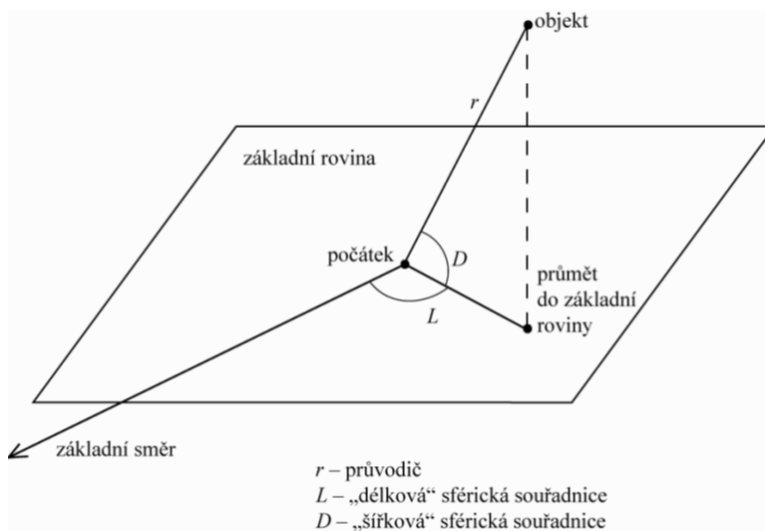
Názvy astronomických soustav souřadnic už napovídají, co bude pro každou jednu z nich základní rovinou. Astronomové postupně zavedli několik soustav astronomických souřadnic:

- obzorníková,
- rovníková 1. typu,
- rovníková 2. typu,
- ekliptikální,
- galaktická.

Ale zkusme se nejprve vrátit zpět k učivu zeměpisu a přírodovědy na základních školách, kde jsme se seznamovali se zeměpisnými souřadnicemi. Soustava zeměpisných

<sup>1</sup>Někdy se místo pojmů "základní" rovina a "základní" směr používá přívlastek "referenční".

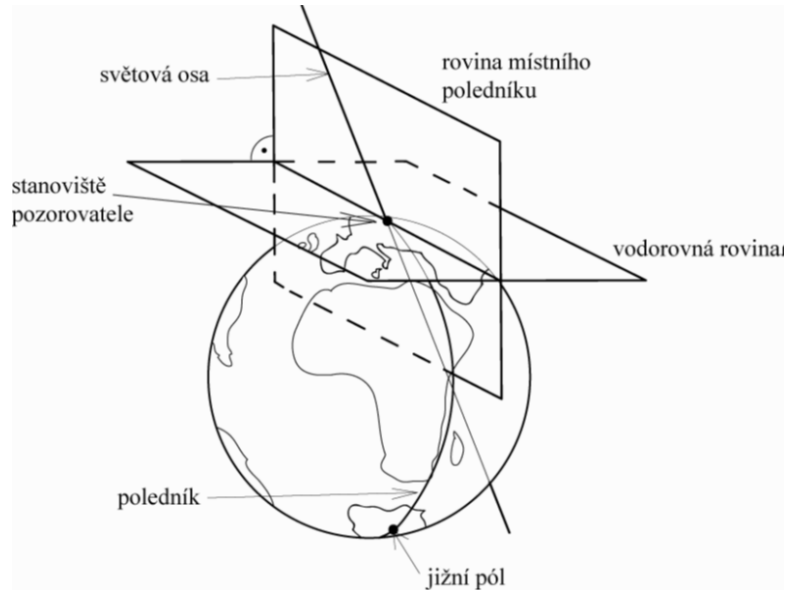
souřadnic má počátek ve středu Země. Její základní rovinou je rovina zemského rovníku. Základním směrem v této rovině je směr k poledníku procházejícímu anglickou observatoří Greenwich. Polohu jakékoli místa na povrchu Země je nyní možné definovat pomocí dvou souřadnic – zeměpisné délky a zeměpisné šířky. Třetí prostorová souřadnice, vzdálenost od středu Země, nebo chcete-li výška nad stanovenou nulovou sférou (definovanou pomocí hladiny moře), se běžně neuvádí. Zeměpisná délka určuje jaký poledník prochází daným místem. Počítá se od nultého (greenwichského) poledníku kladně směrem východním, tedy proti směru otáčení hodinových ručiček při pohledu od severního pólu. Zeměpisná šířka pak určuje jak "vysoko" nad základní rovinou se dané místo na povrchu Země nachází. Jinak řečeno je dána úhlem mezi směrem k danému místu a projekcí toho směru do základní roviny. Počítá se kladně od rovníku směrem k severu a záporně směrem k jihu. U astronomických souřadnic je to analogické. Jinak je definována "jen" základní rovina a základní směr. V tabulce 4.1 najdete srovnání zeměpisné a tří astronomických soustav souřadnic. Mimo jiné je zde uvedeno, zda je soustava pravotočivá nebo levotočivá. Jak to zjistíme? Tato vlastnost soustav souřadnic souvisí se směrem počítání délkové souřadnice. Pokud palec natažené ruky míří na „pól“ (viz tabulka 4.1) a paží vyznačíme základní směr v dané soustavě souřadnic, pak zahnuté prsty ruky ukazují směr, kterým se délková souřadnice počítá kladně. Jestliže jsme použili pravou ruku, jde o souřadnicovou soustavu pravotočivou a při použití levé ruky levotočivou souřadnou soustavu.



Obrázek 4.2: Zavedení souřadného systému. Převzato z Pokorný (2006).

### 4.1.1 Obzorníková soustava souřadnic

Hned první soustava astronomických souřadnic je trochu zvláštní. Na rozdíl od ostatních v tabulce 4.1 je jediná levotočivá. Jde o soustavu topocentrickou, je vázána na pozorovací stanoviště. Mění se tedy nejen při změně pozorovacího stanoviště ale také průběžně s časem. Souřadnice určují polohu objektu na obloze. Například hvězda Vega bude mít různé obzorníkové souřadnice pro různá pozorovací stanoviště a to i ve stejný okamžik.



Obrázek 4.3: Zavedení souřadného systému 2. Převzato z Pokorný (2006).

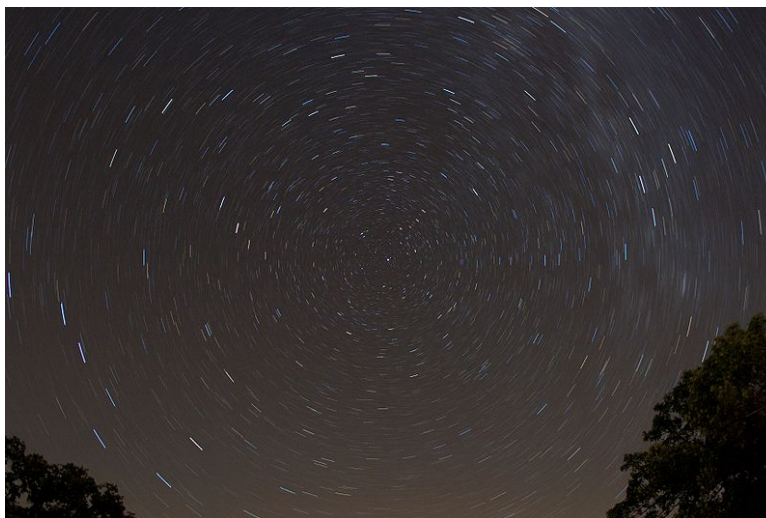
Tabulka 4.1: Souřadnicové soustavy

soustava	zeměpisná	obzorníková	rovníková	ekliptikální
„pól“ soustavy	severní zem. pól	zenit	severní světový pól	severní pól ekliptiky
„rovník“ soustavy	zemský rovník	vodorovná rovina	světový rovník	ekliptika
směr, který určuje základní poledník	severní	jižní	jarní bod	jarní bod
délková souřadnice	zeměpisná délka	azimut	rektascenze $\alpha$	ekliptikální délka
šířková souřadnice	zeměpisná šířka	(úhlová) výška	deklinace $\delta$	ekliptikální šířka
soustava	pravotočivá	levotočivá	pravotočivá	pravotočivá

A měnit se budou i obzorníkové souřadnice Vegy v průběhu jediné noci pro jedno pozorovací stanoviště! Základní rovinou je v této soustavě vodorovná rovina procházející pozorovacím stanovištěm. Základním směrem v této rovině je pak směr jižní. Délková souřadnice – *azimut*<sup>2</sup> se značí  $A$  a se udává v rozmezí  $0^\circ$ - $360^\circ$ . Šířková souřadnice se označuje jako *úhlová výška*, značí se  $h$  a nabývá hodnot teoreticky v rozmezí  $-90^\circ$  až  $+90^\circ$ , nicméně v běžných situacích to bude zhruba od  $0^\circ$  do  $+90^\circ$ .

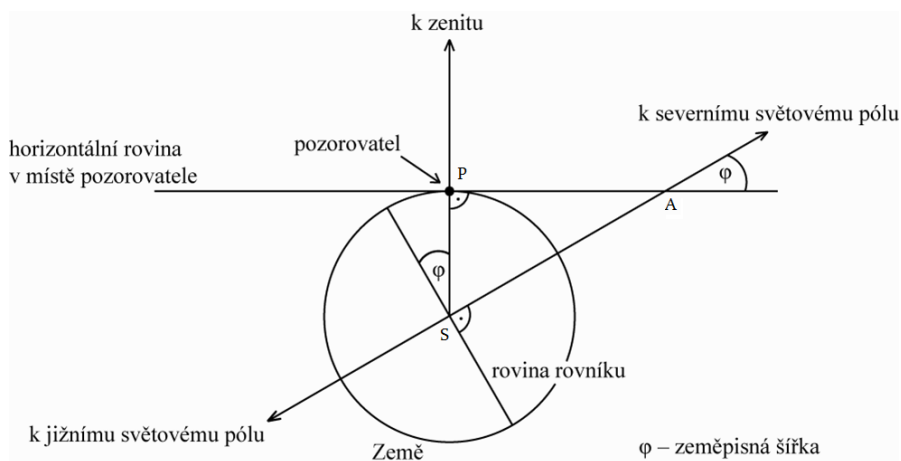
Na obrázku 4.4 jsou krásně zaznamenány změny polohy hvězd v okolí severního světového pólu, v okolí Polárky. Jak vysoko, ale můžeme Polárku pozorovat? Jaká je její úhlová výška v Brně, jaká bude na dovolené v Turecku a co třeba na rovníku nebo na severním zeměpisném pólu? Situaci ozřejmí obrázek 4.5. Z něj je zřejmé, že úhlová výška Polárky odpovídá zeměpisné šířce pozorovacího stanoviště. K tomuto poznatku lze dospět poměrně snadno. Na schématickém obrázku Země si nejdříve vyznačíme směr k severnímu světovému pólu a k němu kolmou rovinu rovníku. V místě pozorování nakreslíme vodorovnou rovinu a k ní kolmý směr k zenitu. Vznikne tak trojúhelník PSA. Úhel  $\angle SPA$  je pravý, úhel  $\angle PSA$  má velikost  $90^\circ - \varphi$ , kde  $\varphi$  je zeměpisná šířka pozorovacího

<sup>2</sup>Původ slova azimut vychází z arabského *as-samt*, což značí "cesta slunce".



Obrázek 4.4: Hvězdná obloha v okolí severního světového pólu. Cvičenému oku jistě neujde Velký vůz nebo hvězdy v souhvězdí Kasiopeja. Převzato z <http://planetarium.ipspd.org>.

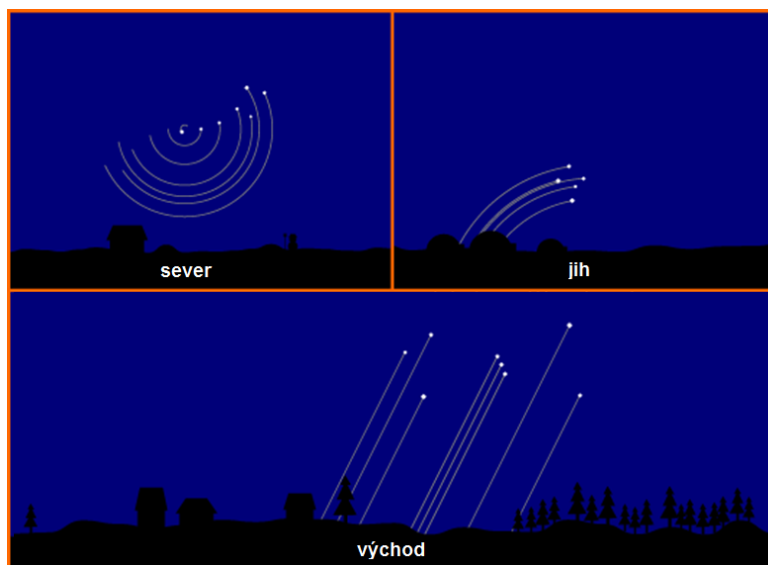
vacího stanoviště  $P$ . Při zachování součtu vnitřních úhlů trojúhelníku  $180^\circ$  připadá na zbývající úhel  $\angle PAS$  hodnota  $\varphi$ . Ze shodnosti vrcholových úhlů pak už je zřejmé, že i úhlová výška severního světového pólu nabývá stejné hodnoty  $\varphi$ . Můžeme si ale pomoci i kratší úvahou a selským rozumem. Pokud se bude pozorovatel nacházet na severním pólu, bude mít Polárku a tedy severní světový pól nad hlavou prakticky v zenitu (zeměpisná šířka  $\varphi = 90^\circ$ , úhlová výška Polárky  $h = 90^\circ$ , zatímco na rovníku ( $\varphi = 0^\circ$ ) bude Polárka vidět pouze z vyvýšeného místa vodorovným směrem, tedy v nulové úhlové výšce.



Obrázek 4.5: Odvození závislosti úhlové výšky Polárky na zeměpisné šířce pozorovacího stanoviště.

Podívejme se nyní, alespoň v našich úvahách, do čínského Hongkongu, který leží na 22. rovnoběžce (na severní polokouli). Polárka bude tedy pro pozorovatele v Hongkongu jen  $22^\circ$  nad vodorovnou rovinou. Hvězdy vzdálené na hvězdné obloze do oněch  $22^\circ$  od Polárky budou stále nad vodorovnou rovinou a budou na obloze opisovat kružnice (viz obrázek 4.6). Takovým objektům se říká obtočnové, cirkumpolární. Hvězdy poblíž

jižního světového pólu jako například Jižní kříž na obrázku 4.6, budou v Hongkongu pozorovatelné jen krátce nad jižním obzorem. Jejich dráha po obloze bude mít podobu půlkružnic kolem jižního směru. Hvězdy z oblasti rovníku budou vycházet na východním obzoru, pohybovat se přes jih směrem k západu, kde budou zapadat (viz obrázek 4.6).



Obrázek 4.6: Pohyby hvězd na obloze - pro hvězdy z okolí severního a jižního světového pólu a pro východní obzor (pro Hongkong  $22^\circ$  s.z.š. a  $114^\circ$  v.z.d.). Převzato z webu Hongkongské univerzity.

### 4.1.2 Rovníková soustava souřadnic

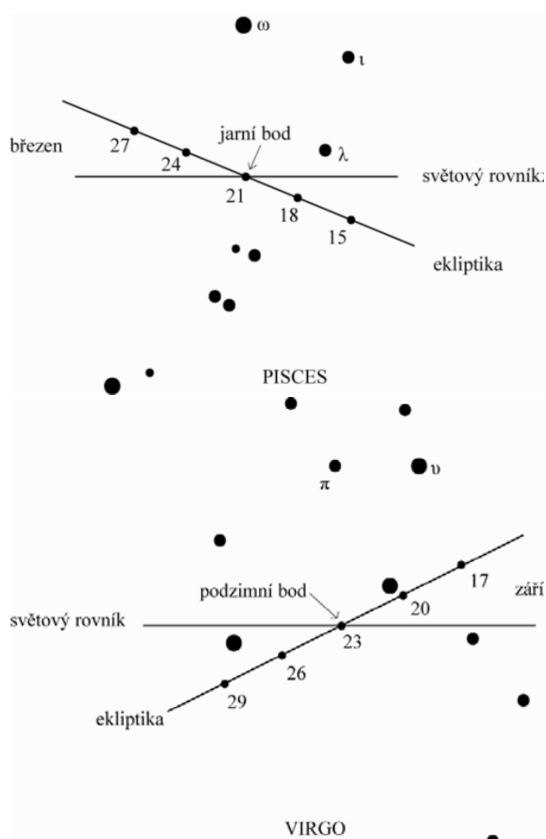
Nejběžnější soustava souřadnic používaná v astronomii je rovníková soustava druhého typu<sup>3</sup>. Používá se pro určení nebo popis polohy objektu na hvězdné obloze. Její základní rovinou je rovina světového rovníku (viz tabulka 4.1). Základním směrem je jarní bod, společná polopřímka roviny světového rovníku a roviny ekliptiky. V jarním bodě se nachází Slunce přesně v okamžik rovnodennosti. V okamžiku podzimní rovnodennosti se naopak nachází opačným směrem, v podzimním bodě. Šířkovou souřadnicí je v této soustavě deklinace<sup>4</sup>  $\delta$ , která se udává ve stupních v rozmezí  $-90^\circ$  až  $+90^\circ$ . Délková souřadnice – rektascenze<sup>5</sup>  $\alpha$  se může uvádět opět ve stupních a to v rozmezí  $0^\circ$ - $360^\circ$ , ale zcela běžně se uvádí také v časově-úhlové míře. Takové vyjadřování vychází z historických dob, kdy byl čas odvozován od rotace Země vzhledem ke Slunci a ke hvězdám, tedy z měření poloh hvězd a úhlových vzdáleností mezi hvězdami. Je zřejmé, že plný úhel  $360^\circ$  odpovídá v časově-úhlové míře 24 hodinám. Ale pozor časově-úhlové jednotky – hodiny  $h$ , minuty  $m$  a sekundy  $s$  píšeme v exponentu:  $1^h = 360^\circ/24 = 15^\circ$ ,  $1^m =$

<sup>3</sup>Dále v textu budeme používat jen spojení rovníkové souřadnice. Pokud půjde o rovníkové souřadnice prvního druhu bude to výslovně uvedeno.

<sup>4</sup>deklinace - z latiny declinatio = odkloňovat, uchylovat

<sup>5</sup>rektascenze – z latiny, složenina z rectus (rovný, přímý) a ascensio (výstup)

$$15', 1^s = 15''.^6$$

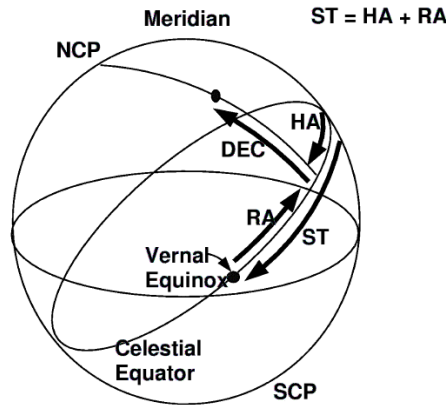


Obrázek 4.7: Jarní a podzimní bod. Převzato z Pokorný (2006).

Rovníkové souřadnice druhého typu například pro hvězdu Vega se na rozdíl od obzorníkových souřadnic nemění během jedné noci. Nemění se ani v závislosti na pozorovacím stanovišti. Hvězdná obloha, známé obrazce hvězd vypadají stejně dnes v noci jako zítra a nezmění se, ani pokud budu cestovat a dívat se na hvězdnou oblohu z různých míst zemského povrchu. Nicméně například pro planety a tím méně pro Měsíc to neplatí. Planety a Měsíc se přece pohybují na hvězdné obloze, vůči hvězdnému pozadí, takže jejich rovníkové souřadnice druhého typu se budou měnit, u Měsíce viditelně i v průběhu jediné noci.

Pro úplnost bychom měli představit i rovníkové souřadnice prvního typu. Jejich základní rovinou je také rovina světového rovníku. Základní směr je ale tentokrát dán pomocí roviny místního poledníku. Zatímco šířková souřadnice, deklinace  $\delta$  je stejná jako pro druhý typ rovníkových souřadnic, délková souřadnice se jmenuje *hodinový úhel*. Označuje se  $t$ , případně  $HA$  (z anglického "hour angle"). Zásadní rozdíl oproti rektascenzi spočívá v tom, že se měří opačným směrem a mění se průběžně s časem! Hodinový úhel je definován jako úhel mezi rovinou deklinační kružnice místního poledníku a rovinou deklinační kružnice objektu (viz obrázek 4.8) a vyjadřuje se podobně jako

<sup>6</sup>Z textu vyplývá, že známe celkem tři různé minuty a je třeba je rozlišovat a důsledně dbát na jejich správné značení: časově úhlová minuta  $1^m$ , úhlová minuta  $1'$  a časová minuta 1 min.



Obrázek 4.8: Rovníkové souřadnice. Převzato z <http://www.physics.uc.edu/sitko/>.

rektascenze v úhlové nebo časově-úhlové míře. Mezi rektascenzí  $\alpha$  a hodinovým úhlem  $t$  lze psát vztah

$$t = \Theta - \alpha, \quad (4.1)$$

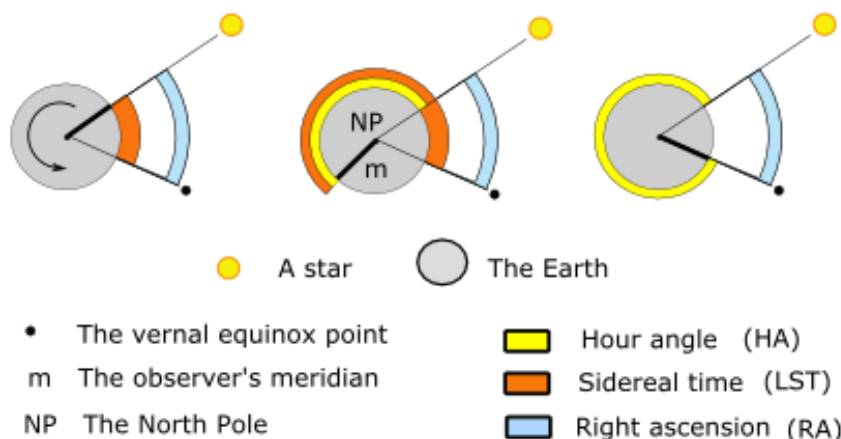
kde  $\Theta$  je tzv. místní hvězdný čas odvozený z rotace Země vůči hvězdám (viz kapitola 3). Graficky je závislost zobrazena na obrázku 4.9. Je-li jarní bod právě na místním poledníku, pak místní hvězdné hodiny ukazují čas 00:00:00. Pokud hodinový úhel jarního bodu naroste po nějaké chvíli na  $+15^\circ$ , znamená to, že je právě 1 hodina místního hvězdného času, ale také to vzhledem k definici rovníkových souřadnic znamená, že právě kulminují objekty s rektascenzí  $\alpha = 1^h$ . Toho často využívají pozorovatelé, kterým hodinový úhel dává bezprostředně informaci o poloze objektu. Například má-li objekt hodinový úhel  $t=+2$  hodiny, znamená to, že před dvěma hodinami kulminoval na místním poledníku a nyní je od meridiánu 30 stupňů západním směrem. Záporná hodnota hodinového úhlu znamená, že se daný objekt teprve blíží k meridiánu a je od něj v této chvíli východním směrem.

### 4.1.3 A přece se mění

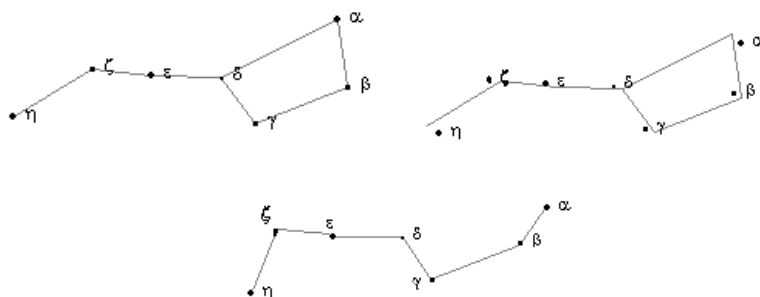
V předchozí kapitole jsme uvedli, že se rovníkové souřadnice druhého druhu nemění, s výjimkou objektů naší Sluneční soustavy. Nemění se ale jen, když budeme uvažovat poměrně krátké časové úseky. Na časové škále roků, desítek let můžeme zjistit drobné změny polohy hvězdy na hvězdné obloze z atlasů a map. Proto je u přesně udaných rovníkových souřadnic druhého druhu (rektascenze a deklinace) zpravidla uvedeno i tzv. ekvinokcium, tedy letopočet, k němuž jsou vztaženy. Ke změnám poloh hvězd na hvězdné obloze dochází v důsledku vlastních pohybů hvězd, nicméně tyto změny jsou velmi pomalé. Vzhled známých uskupení hvězd na hvězdné obloze se promění až po desítkách tisíc let. Takovou simulaci pro známé uskupení velkého vozu ukazuje obrázek 4.10.

Rektascenze a deklinace objektu se tedy mění v důsledku jeho vlastních pohybů. Ale nejen to. Mění se v důsledku změny samotné soustavy souřadnic. Vztažná soustava definovaná pomocí roviny světového rovníku a jarního bodu se totiž také v čase





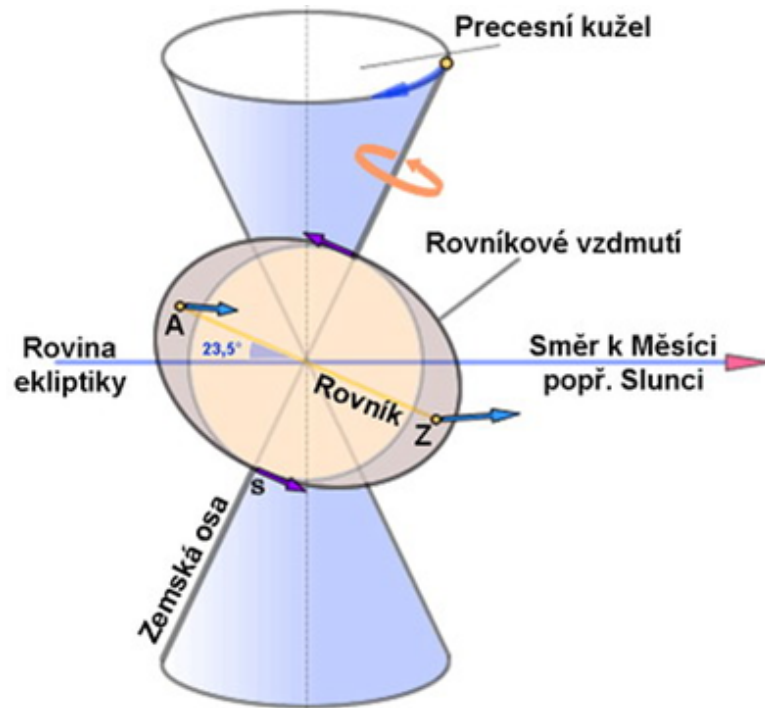
Obrázek 4.9: Vlevo: Hvězda v kulminaci na místním poledníku pozorovatele ( $t = 0^h$ ), takže  $\alpha = \Theta$ . Vpravo: Jarní bod je v kulminaci na místním poledníku  $m$  ( $\Theta = 0^h$ ) (Kladné úhly:  $\alpha$ , proti směru otáčení hodinových ručiček;  $t$  a  $\Theta$ , ve směru hodinových ručiček). Převzato z wikipedia; autor Francisco Javier Blanco González.



Obrázek 4.10: Změna podoby Velkého vozu (skupiny sedmi jasných hvězd ze souhvězdí Velké medvědice): dnes (vlevo), za 50 000 let a za 100 000 let (vpravo). Převzato z <http://astronomia.zcu.cz>

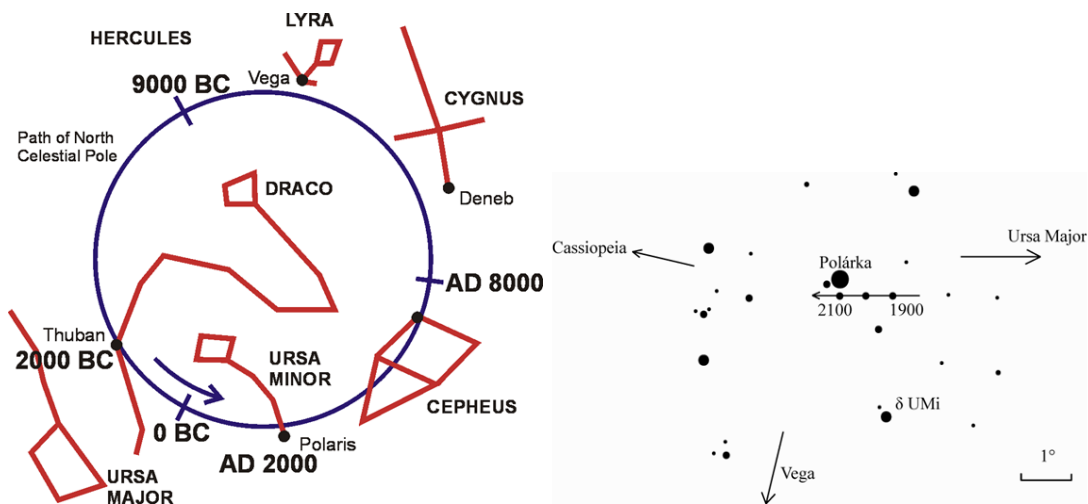
mění! Rotační osa Země totiž není stabilní. I když v prvním přiblížení lze její orientaci v prostoru považovat za neměnnou, na delších časových škálách se zvolna pohybuje. S tím se samozřejmě mění i vzájemná poloha rovníku a ekliptiky. Rovina světového rovníku se stáčí vůči ekliptice o zhruba  $0,5''/\text{rok}$ . Jarní bod se tak posouvá po ekliptice o  $50,26''/\text{rok}$  proti směru pohybu Slunce. Jako první si tohoto trendu povšiml Hipparchos už kolem roku 125 př. n. l. Vzniká jako důsledek působení planet Sluneční soustavy, Slunce a zejména Měsíce. Nejvíce ovlivňuje zemskou osu tzv. precese.

Protože Země nemá ideální tvar koule, ale vypadá jako zploštělý elipsoid, působí na rovníkovou "výduť" momentová dvojice gravitačních sil Měsíce a Slunce, a snaží se ztotožnit rovinu zemského rovníku s rovinou ekliptiky a rovinou oběhu Měsíce. Zemská rotační osa tak opisuje kužel s vrcholovým úhlem přibližně  $47^\circ$  (obrázek 4.11). Jeden cyklus dokončí za tzv. platónský rok, což je přibližně 25 800 let. Precesního pohyb zemské osy samozřejmě vede i ke stáčení roviny rovníku a tím i posunu jarního a podzimního



Obrázek 4.11: Precese. Převzato z <http://naske.blog.cz/0911/cely-zemepis-od-zacatku-roku>.

bodů po ekliptice.



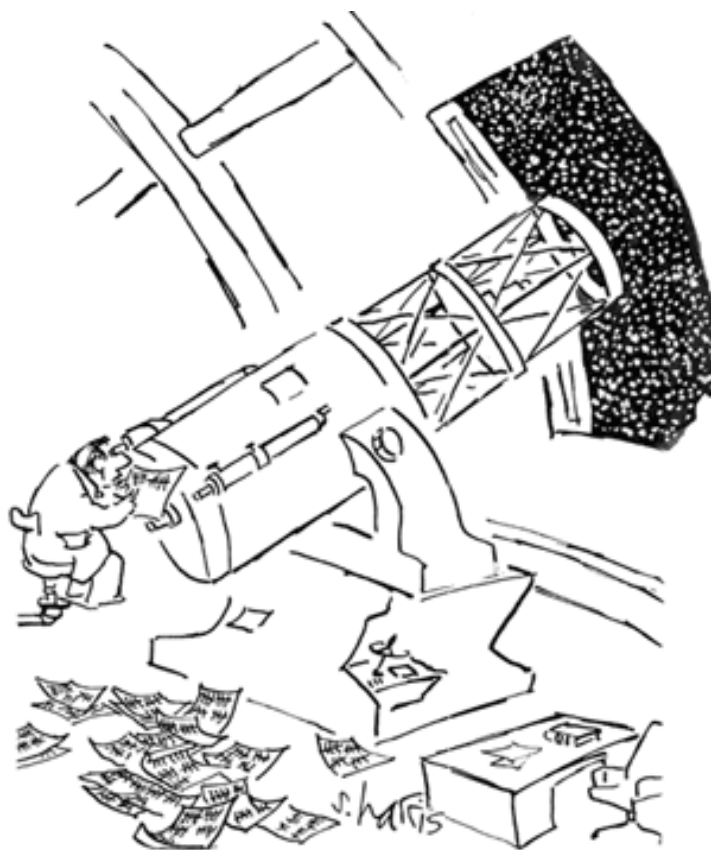
Obrázek 4.12: Precesní pohyb severního světového pólu. Převzato z wikipedia, Pokorný (2006).

V důsledku precesního pohybu se také mění poloha světových pólů. V současnosti se těsně u severního světového pólu nachází hvězda Polárka, ale před čtyřmi tisíci let, v době vzniku prvních slunečně-měsíčních kalendářů v Egyptě a Mezopotámii, to byla hvězda Thuban (obrázek 4.12).

## 4.2 Hvězdy a souhvězdí

Řekne-li se astronom, hvězdář, většině lidí se okamžitě vybaví: "To je ten, co v noci pozoruje hvězdy." Samozřejmě skutečnost je dnes zcela jiná. Astronom 21. století tak opravdu nepracuje, ale hvězdy jsou opravdu základním objektem pozorovaného vesmíru. Jenže. Co vlastně taková hvězda je? Přestože se následující definice může zdát poněkud vágní, je opravdu nejlepší, jakou můžeme použít.

Hvězda jako vesmírný objekt je samostatné převážně kulové těleso tvořené plazmatem, udržované pohromadě vlastní gravitací o hmotnostech v rozmezí hmotnosti 0,012 až stovky hmotností Slunce  $M_{\odot}$ . Spodní hranice hmotnosti odpovídá hmotnosti 13 planet Jupiter  $M_J$  a udává se také jako spodní hranice hmotnosti tzv. hnědých trpaslíků, objektů na pomezí mezi hvězdou a planetou. Horní hranice se ještě na počátku století udávala v rozmezí 60-80  $M_{\odot}$ , ale dnes už jsou známy hvězdné objekty s větší hmotností. Nicméně přesná hranice dosud určena není. Podrobněji se budeme hvězdám a jejich vlastnostem věnovat v druhé části kurzu. Nyní se zaměříme na pozorování světa hvězd.



Obrázek 4.13: Takto astronom opravdu nepracuje. Autor: S. Harris.

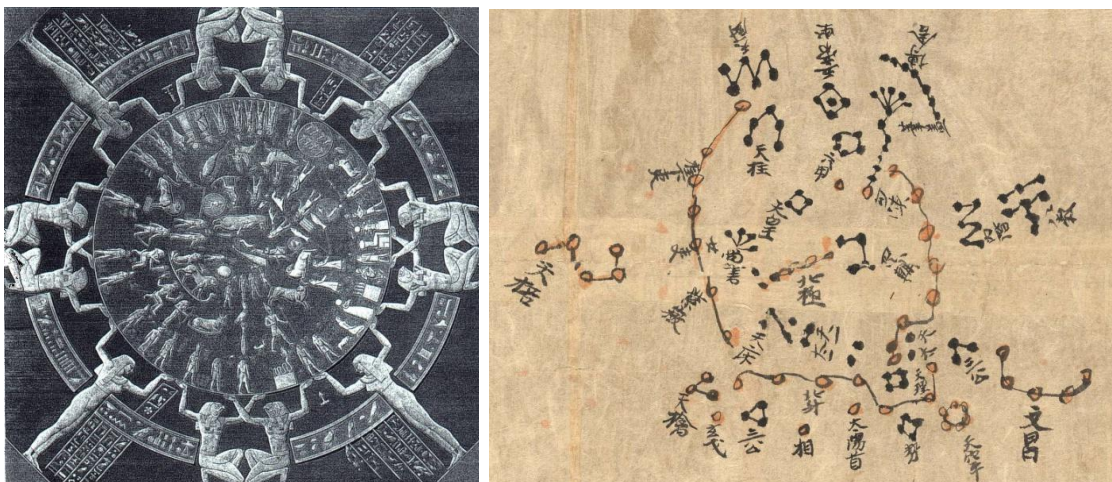
Básníci často opěvují noční nebe poseté myriádami hvězd. Ale kolik těch hvězd na temné noční obloze je? Je to opravdu nespočetné množství nebo je můžeme spočítat? Sčítat hvězdu po hvězdě (viz obrázek 4.13) vypadá na první pohled jako bláznivý nápad. Ale proč by to nešlo? Ke konečnému číslu lze dospět i překvapivě snadno. Celé hvězdné nebe zabírá plochu 41 253 stupňů čtverčních. Vyberme si z hvězdné oblohy jednu část

například o velikosti čtverce  $10^\circ \times 10^\circ$ . Spočítáme hvězdy v této oblasti a pak už snadno zjistíme kolik hvězd zhruba připadá na celou hvězdnou oblohu. V publikacích se většinou uvádí, že za ideálních podmínek je na hvězdné obloze pozorovatelných pouhýma očima bez dalekohledu jen zhruba pět až šest tisíc hvězd. Jenže k takovému výsledku by při pozorování mohl dospět jedině osamocený kosmonaut kdesi v kosmu, kde mu nic nebrání ve výhledu. Nám tady na povrchu Země, vlastně právě Země brání ve výhledu, takže na obloze nad sebou můžeme za ideálních podmínek vidět jen asi dva až tisíce hvězd. Jedna hvězda pozorovatelná prostýma očima tak připadá na plochu téměř čtyřiceti měsíčních úplňků. A to jsme zatím mluvili jen o ideálních podmínkách. Ve městech s rušivým osvětlením a znečištěným ovzduším je situace ještě mnohem horší. Tam už mnohde můžeme hvězdy pozorovatelné na obloze pouhýma očima počítat jen na desítky! Samozřejmě se situace promění, když si pomůžeme dalekohledem. Malým binokulárním dalekohledem, tzv. triedrem můžeme pozorovat za dobrých podmínek až 200 000 hvězd. Se zvětšujícími se dalekohledy se zvětšuje i počet pozorovaných hvězd, a to až o několik řádů. Otázkou ale je, proč jsou odhady laiků tak nadsazené, přemrštěné. Zřejmě hraje roli několik faktorů. Hvězdy na obloze jsou rozmístěny nepravidelně, nevidíme žádné referenční body, čáry, hranice. A nepochybně závisí také na tom, jak celý obraz noční oblohy vnímá lidská mysl. Aby se lidé na hvězdné obloze nějak vyznali, orientovali se na ní, začali pojmenovávat nejjasnější hvězdy. Absenci pozorovatelných hranic nahradili tím, že si ve svých představách seskupovali určité hvězdy do skupin a těm dávali jména a vymýšleli k nim pěkné příběhy, které odrážely jejich život, kulturu. A tak se na hvězdné obloze ocitly bájně postavy, zvířata nebo věci. Nejstarší taková vyobrazení jsou stará i řadu tisíciletí (viz obrázek 4.14).



Obrázek 4.14: První vyobrazení souhvězdí – jeskyně Lascaux (jižní Francie) - před 17 300 lety! (Rappenglück 1996). Zdroj: <http://www.iau.org>.

Těmto pomyslným obrazcům na hvězdném nebi se dříve říkalo souhvězdí. Každá kultura měla různá souhvězdí. Například čínská starobylá souhvězdí jsou obecně menší než ta evropská a představují jiné objekty (viz obrázek 4.15). Dnes se pro takové skupiny hvězd na hvězdném nebi užívá označení **asterismus**. Význam slova **souhvězdí** se změnil. Jedním z prvních úkolů Mezinárodní astronomické unie IAU bylo ve dvacátých letech minulého století jednoznačně definovat souhvězdí a tím i příslušnost různých objektů k souhvězdím. Představte si, že se díváte na hvězdnou oblohu. U jasných hvězd,



Obrázek 4.15: Vlevo: Souhvězdí, jak jsou vyobrazena na reliéfu v chrámu bohyně Hathor v Dendeře, Egypt z 1.st. př.n.l. Zdroj: wikipedia.org. Vpravo: Mapa z Dunhuangského hvězdného atlasu, který vznikl v letech 649 - 684 n.l. Zdroj: <http://jaga-lux.livejournal.com>

kteří vytvářejí nějaký obrazec, například letící labuť, je zřejmá příslušnost k tomu obrazci. Ale co třeba nějaká slabší hvězda mezi dvěma takovými uskupeními hvězd na hvězdné obloze? Kam ji přiřadit? A co teprve ty spousty hvězd pozorovatelné dalekohledy? Řešením bylo rozčlenit celé hvězdné nebe na jednotlivé části a tak nově definovat souhvězdí. „Nová“ souhvězdí však byla většinou vytvořena tak, že v nově vymezeném „území“ hvězdné oblohy se nacházejí jasné hvězdy určitého obrazce a souhvězdí tak převzalo od tohoto uskupení i svůj název. Většina dnešních souhvězdí zejména severní části hvězdného nebe má svůj původ ve starém Řecku. Na jižním hvězdném nebi pak najdeme souhvězdí inspirovaná plavbami mořeplavců v 15. až 17. století. Hranice mezi souhvězdími samozřejmě nelze na nebi pozorovat, ale jsou zakresleny v mapách a atlasech. Hranice souhvězdí jsou tak obdobou hranic mezi státy.

O nové definici souhvězdí jednala první tři valná shromáždění IAU v letech 1922, 1925, 1928. Na posledně uvedeném byly schváleny přesné hranice pro všech 88 souhvězdí (viz tabulka 4.2). Příslušnou publikaci připravil a vydal Eugène Delporte v roce 1930.

Existují ale známé skupiny hvězd, která nedaly jméno žádnému souhvězdí – například Velký letní trojúhelník, kde každá hvězda patří do jiného souhvězdí nebo naopak velmi známá skupina sedmi hvězd Velký vůz, kde všechny hvězdy patří do rozsáhlého souhvězdí Velké medvědice. Stejně jako historická uskupení hvězd, která nedala vznik oficiálním souhvězdím, je označujeme jako asterismy.

### 4.2.1 Hvězdné mapy a atlasy

Jak již víme jsou nejstarší vyobrazení částí hvězdné oblohy stará i mnoho tisíc let. Na nich většinou dominuje postava zvířete, do něhož jsou zakresleny i polohy jasných hvězd. O mapách hvězdné oblohy však můžeme mluvit až mnohem později. Jedna z nejstarších hvězdných map byla nalezena jako součást stropní výzdoby hrobky architekta a ministra Senemuta z období vlády královny Hapšepsut v 15. století př.n.l. Do prvního století před naš letopočet se klade i vznik hvězdného atlasu Poeticon astrono-

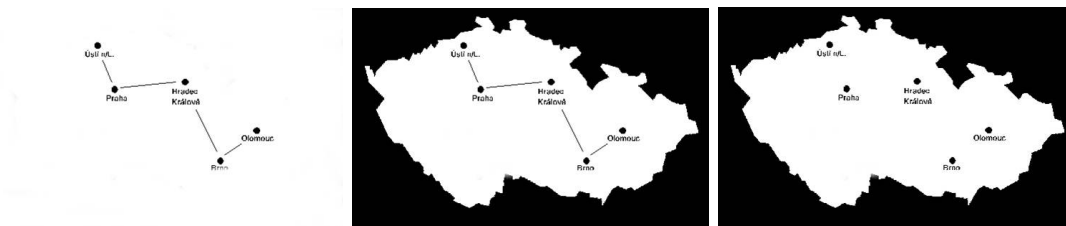
Tabulka 4.2: Seznam souhvězdí. Každé souhvězdí má i své mezinárodní (latinské) jméno a třípísmennou zkratku, které se používají v publikacích. Jejich znalost je nezbytnou výbavou každého astronoma.

Zkratka	Český název	Latinský název	Latinský genitiv	Rozloha [čtver. stupňů]
And	Andromeda	Andromeda	Andromedae	722
Ant	Vývěva	Antlia	Antiliae	239
Aps	Rajka	Apus	Apodis	206
Aql	Orel	Aquila	Aquiliae	652
Aqr	Vodnář	Aquarius	Aquarii	980
Ara	Oltář	Ara	Arae	237
Ari	Beran	Aries	Arietis	441
Aur	Vozka	Auriga	Auriage	657
Boo	Pastýř	Boötes	Boötis	907
Cae	Rydlo	Caelum	Caeli	125
Cam	Žirafa	Camelopardalis	Camelopardalis	757
Cap	Kozoroh	Capricornus	Capricorni	414
Car	Lodní kýl	Carina	Carinae	494
Cas	Kassiopeia	Cassiopeia	Cassiopeiae	598
Cen	Kentaur	Centaurus	Centauri	1 060
Cep	Kefeus	Cepheus	Cephei	588
Cet	Velryba	Cetus	Ceti	1 231
Cha	Chameleon	Chamaeleon	Chamaeleontis	132
Cir	Kružítko	Circinus	Circini	93
CMA	Velký pes	Canis Major	Canis Majoris	380
CMi	Malý pes	Canis Minor	Canis Minoris	182
Cnc	Rak	Cancer	Cancri	506
Col	Holubice	Columba	Columbae	270
Com	Vlasy Bereniky	Coma Berenices	Comae Berenicis	386
CrA	Jižní koruna	Corona Australis	Coronae Australis	128
CrB	Severní koruna	Corona Borealis	Coronae Borealis	179
Crt	Pohár	Crater	Crateris	282
Cru	Jižní kříž	Crux	Crucis	68
Crv	Havran	Corvus	Corvi	184
CVn	Honící psi	Canes Venatici	Canum Venaticorum	465
Cyg	Labuť	Cygnus	Cygni	804
Del	Delfín	Delphinus	Delphini	189
Dor	Mečoun	Dorado	Doradus	179
Dra	Drak	Draco	Draconis	1 083
Equ	Koníček	Equuleus	Equulei	72
Eri	Řeka Eridanus	Eridanus	Eridani	1 138
For	Pec	Fornax	Fornacis	398
Gem	Blíženci	Gemini	Geminorum	514
Gru	Jeřáb	Grus	Gruis	366
Her	Herkules	Hercules	Herculis	1 225
Hor	Hodiny	Horologium	Horologii	249
Hya	Hydra	Hydra	Hydrae	1 303
Hyi	Malý vodní had	Hydrus	Hydri	243
Ind	Indián	Indus	Indi	294
Lac	Ještěrka	Lacerta	Lacertae	201
Leo	Lev	Leo	Leonis	947
Lep	Zajíc	Lepus	Leporis	290
Lib	Váhy	Libra	Librae	538

---

LMi	Malý lev	Leo Minor	Leonis Minoris	232
Lup	Vlk	Lupus	Lupi	334
Lyn	Rys	Lynx	Lyncis	545
Lyr	Lyra	Lyra	Lyrae	286
Men	Tabulová hora	Mensa	Mensae	153
Mic	Mikroskop	Microscopium	Microscopii	210
Mon	Jednorožec	Monoceros	Monocerotis	482
Mus	Moucha	Musca	Muscae	138
Nor	Pravítko	Norma	Normae	165
Oct	Oktant	Octans	Octantis	291
Oph	Hadonoš	Ophiuchus	Ophiuchi	948
Ori	Orion	Orion	Orionis	594
Pav	Páv	Pavo	Pavonis	378
Peg	Pegas	Pegasus	Pegasi	1 121
Per	Perseus	Perseus	Persei	615
Phe	Fénix	Phoenix	Phoenicis	469
Pic	Malír	Pictor	Pictoris	247
PsA	Jižní ryba	Piscis Austrinus	Piscis Austrini	245
Psc	Ryby	Pisces	Piscium	889
Pup	Lodní zád'	Puppis	Puppis	673
Pyx	Kompas	Pyxis	Pyxidis	221
Ret	Mřížka	Reticulum	Reticuli	114
Scl	Sochař	Sculptor	Sculptoris	475
Sco	Štír	Scorpius	Scorpii	497
Sct	Štít	Scutum	Scuti	109
Ser	Had	Serpens	Serpentis	637
Sex	Sextant	Sextans	Sextantis	314
Sge	Šíp	Sagitta	Sagittae	80
Sgr	Štíelec	Sagittarius	Sagittarii	867
Tau	Býk	Taurus	Tauri	797
Tel	Dalekohled	Telescopium	Telescopii	252
TrA	Jižní trojúhel	Triangulum Australe	Trianguli Australis	110
Tri	Trojúhelník	Triangulum	Trianguli	132
Tuc	Tukan	Tucana	Tucanae	295
UMa	Velká medvědice	Ursa Major	Ursae Majoris	1 280
UMi	Malý medvěd	Ursa Minor	Ursae Minoris	256
Vel	Plachty	Vela	Velorum	500
Vir	Panna	Virgo	Virginis	1 294
Vol	Létající ryba	Volans	Volantis	141
Vul	Lištička	Vulpecula	Vulpeculae	278

---



Obrázek 4.16: K vysvětlení pojmu souhvězdí. Jestliže si vybereme pět našich měst a spojíme je na mapě, dostaneme písmeno "W". Výrok typu: "Toto dvojité vé je Česká republika." je nesmyslný. Těch pět bodů rozhodně nepředstavuje celou Českou republiku. Česká republika je tvořena územím, na němž se nachází nejen těch pět měst, ale také spousta dalších měst, městeček, vesnic. Výrok je tedy třeba pozměnit, například na: "Města, tvořící toto dvojité vé patří do České republiky." Úplně stejná situace je pak u seskupení hvězd, asterismů a souhvězdí.

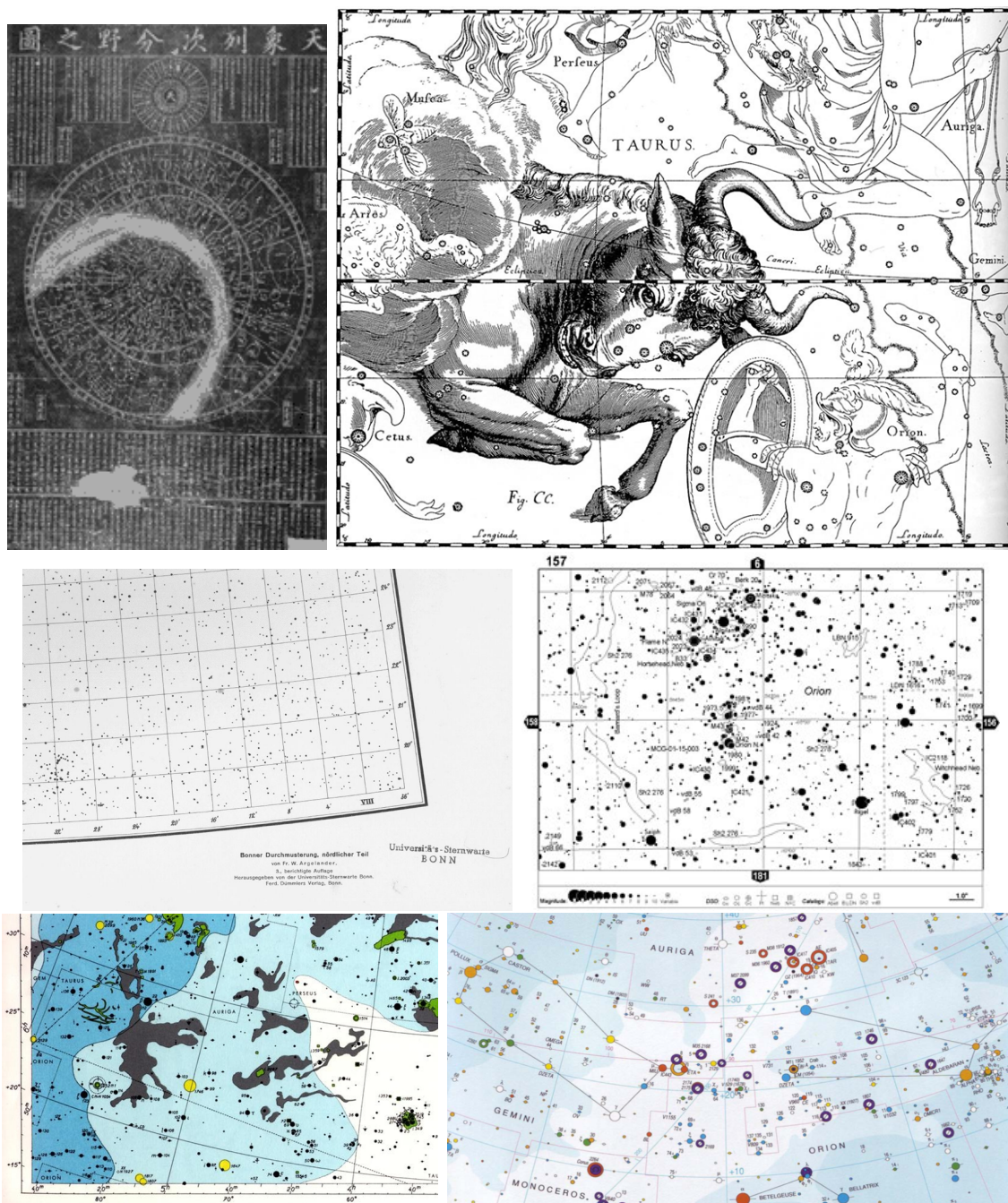
micon, jehož autorem by měl být Gaius Julius Hyginus. V daleké Číně vznikl v 7. století již zmiňovaný Dunghuangský hvězdný atlas. První tištěnou mapou hvězdné oblohy byl v Evropě obraz dvou hemisfér od Albrechta Dürera z roku 1515 (Ridpath, 1988). První „moderní“ hvězdný atlas Uranometria sestavil na základě tzv. Rudolfských<sup>7</sup> tabulek v roce 1603 Johann Bayer. Známý je i atlas, který na sklonku téhož století v roce 1693 publikoval Johann Hevelius. V podstatě uzavřel období hvězdných map a atlasů konstruovaných na základě pozorování prostým okem. Pro přípravu dalších map, atlasů se už využívaly dalekohledy a posléze nejrůznější záznamová zařízení (fotografie, elektronické čipy). S nástupem techniky přišla snaha, všechny pozorovatelné, zaznamenatele hvězdy katalogizovat. Hvězdné atlasy pak byly vlastně grafickým výstupem katalogu. Z těch nejvýznamnějších jmenujme Bonner Durchmusterung z let 1857-1863 od F. W. A. Argelandera, který obsahuje hvězdy severní hvězdné oblohy do 9 mag. Podobně byl vydán atlas k jižní přehlídce v katalogu Córdoba Durchmusterung. Jedním z největších hvězdných atlasů je Palomar Sky Atlas. Jedná se o kopie fotografické přehlídky oblohy pořízené na observatoři Mount Palomar a později doplněné snímky z Evropské jižní observatoře ESO v Chile a na observatoři Siding Spring v Austrálii. Jsou zde zachyceny objekty o hvězdné velikosti až 20 mag. Původně pouze fotografický atlas je dnes digitalizován.

Českým a slovenským astronomům je velmi dobře známá světově proslulá série hvězdných atlasů Antonína Bečváře – Atlas Coeli (1962; 1965), Atlas Eclipticalis (1964), Atlas Borealis (1962), Atlas Australis (1964). Bečvářovy atlasy sloužily astronomům na celém světě v různých edicích a rozšířených verzích, například Sky Atlas 2000.0 (Tirion, 1981) nebo Atlas Coeli Novus (Hlad a kol., 1998). V dnešní době je ale zdá se těmto atlasům odzvoněno. Uživatelé většinou používají digitální atlasy a mapy jako například Megastar, Guide, Cartes du Ciel nebo populární Stellarium. Většina z nich používá jako základní zdroj dat Guide Star Catalogue vytvořený pro podporu Hubblova kosmického dalekohledu. Větší množství hvězd obsahují například různé verze USNO katalogů (A1.0, B1.0, A2.0, UCAC) a podobně. Špičkový interaktivní softwarový hvězdný atlas, který umožňuje vizualizovat digitalizované astronomické snímky a propojit je

<sup>7</sup>Rudolfské tabulky obsahovaly Keplerův katalog hvězd z roku 1627, připravený s využitím některých pozorovacích dat Tycho Braheho. Tabulky nesou jméno císaře Rudolfa II.



s dostupnými daty v nejrůznějších hvězdných katalogích, představuje služba Aladin na <http://aladin.u-strasbg.fr/>.



Obrázek 4.17: Ukázky hvězdných map a atlasů. Odshora zleva: Kamenná korejská mapa z r. 1395, Firmamentum Sobiescanum sive Uranometria (Hevelius 1693), Bonner Durchmusterung, händlicher Teil von Fr. W. Argelander, 1. Sternkarte der Anlage Hirschingen von der Universität Sternwarte Bonn, Ferd. Dummler Verlag, 1916, dole zleva: Sky Atlas (Tirion, 1981), Atlas Coeli (Bečvář, 1962) a mapa hvězdné oblohy (Hlad a kol, 1998).

### 4.2.2 Označování hvězd

Zatímco pojmenování a označování souhvězdí už je jasné, ani zdaleka to neplatí pro hvězdy. V jejich označování je doslova džungle. Ale jako se zkušený lovci vyznaží v divočině, tak se zkušený astronomové vyznaží ve jménech a označeních hvězd. Hvězdy svá jména a označení získávaly podle různých kritérií. Jedna hvězda může mít i několik desítek různých označení. Pokud vám ale někdo nabídne, že po vás nějakou hvězdu pojmenuje (zpravidla za malý obnos), nevěřte mu. Nic takového není přípustné.

Nejstarší označení hvězd jsou vlastní jména těch nejjasnějších. Například jméno nejjasnější hvězdy naší hvězdné oblohy Sírius pochází z řeckého *seírios*, což značí blikotající, jiskřící, protože pro pozorovatele ve starověkém Řecku byl pozorovatelný jako mihotající se jasný bod nízko nad obzorem. Ale stejné hvězdě se také říká Canicula, Psí hvězda nebo Aschere podle toho, z jakých zdrojů, z jaké kultury budeme vycházet. Většina současných vlastních jmen hvězd má svůj původ v arabštině (Denk & Hlad, 1996).<sup>8</sup> Johann Bayer si při tvorbě atlasu počátkem 17. století uvědomil potřebu označení dalších hvězd, nejen těch se jmény a začal je označovat malými písmeny řecké abecedy<sup>9</sup>. Jeho označení se používá dodnes, ale většinou ve spojení s třípísmennou zkratkou názvu souhvězdí. Nejjasnější hvězda v daném souhvězdí má zpravidla označení alfa, druhá nejjasnější beta atd. Takže nejjasnější hvězda ze souhvězdí Velkého psa Sírius je současně  $\alpha$  CMa. Ale existují i výjimky, například u nejjasnějších dvou hvězd v souhvězdí Blíženců je jejich písmenné označení prohozeno a jasnější Pollux je "jen"  $\beta$  Gem. Jenže řecká abeceda má jen 24 písmen a to nestačilo, Bayer tedy po vyčerpání malých písmen řecké abecedy začal pro hvězdy čísla 25 až 50 používat malá písmena latinské abecedy a pak pro hvězdy 51 až 76 měl vyhrazena velká písmena z latinky. Počátkem 18. století pracoval na novém hvězdném katalogu anglický astronom John Flamsteed. V katalogu *Historia Coelestis Britannica*, který sestavil, je použito označení hvězd čísly v každém souhvězdí podle vzrůstající rektascenze, například 15 Pegasi, 61 Cygni. Je zajímavé, že katalog vyšel neautorizovaný po úpravě Edmonda Halleyho. A navíc, protože čísla vycházejí z předchozí verze katalogu, v níž bylo mnoho chyb, číselné označení poloze hvězdy příliš neodpovídá.

Slabší hvězdy se zpravidla označují podle katalogu, v němž jsou uvedeny, například Bonner Durchmusterung (BD), Henry Draper Catalog (HD), Cordoba Durchmusterung (CD), Cape Durchmusterung (CpD), Smithsonian Astrophysical Observatory Catalog (SAO), Positions and Proper Motions Catalog (PPM), Guide Star Catalogue (GSC) a jiné. Některé katalogy jsou spojené s velkými přehledkovými projekty jako 2MASS, ASAS, OGLE a dalších. Příklad všech označení jedné hvězdy je uveden níže.

Zcela zvláštní postavení mají proměnné hvězdy. Jejich systém označování je na první pohled nepřehledný. Zasloužil se o to velký propagátor pozorování proměnných hvězd 19. století F. W. A. Argelander. V roce 1862 navrhl, aby proměnné hvězdy byly vždy v daném souhvězdí označeny velkým písmenem latinské abecedy. A protože Bayer při svém značení ve třech souhvězdích (Kentaur, Lodní zád' a Plachty) došel až k písmenu "Q", začal Argelander od "R". Devět proměnných v každém souhvězdí – to přece musí stačit. Jenže záhy se ukázalo, že je to málo. Pokračovalo se tedy zdvojením písmen,

<sup>8</sup>Pěkný přehled o moderním názvosloví hvězd a jeho původu lze najít v Kunitzsch & Smart (1986,2006).

<sup>9</sup>Jak vidíte, je znalost řecké abecedy pro astronoma nezbytná. Najdete v příloze F

ale opět od R, resp. RR a dále RS, RT, až po RZ a pak SS, ST až SZ a poslední kombinace byla ZZ. Ale ani to nestačilo. Začalo se tedy od začátku systémem AA, AB, až AZ, BB, BC, až BZ, atd. až QQ, QR, až QZ, jen se vynechaly kombinace s „J“. Vzniklo 334 kombinací, které ale opět nestačily. Konečně se tedy přešlo na číslování od čísla 335 v každém souhvězdí. Označení proměnné hvězdy v daném souhvězdí je vždy doprovázeno zkratkou souhvězdí, např. Z And, TW Dra, V1010 Oph. Počet proměnných hvězd v některých souhvězdích je už dnes mnoho tisíc. Argelander tedy velmi silně situaci podcenil.

V* VY Dra	GC 21098	IRAS 15391+6449	TYC 4185-1512-1
AG+64 737	GSC 04185-01512	2MASS J15395049+6439423	[HFE83] 1132
AGKR 14008	HD 140453	PPM 19536	AAVSO 1538+64
AN 4.1922	HIC 76709	SAO 16806	
BD+65 1069	HIP 76709	SKY# 28335	

Jen několik málo hvězd je pojmenováno podle astronoma. Jsou to například známá Barnardova šipka nebo Kapteynova hvězda, dvě hvězdy s největším známým vlastním pohybem. Zvláštností jsou jména hvězd  $\alpha$  a  $\beta$  Delphini, Sualocin a Rotanev. Jde o pozpátku psané latinské jméno Nicolaus Venator italského astronoma Niccolò Cacciatoresho, asistenta Giuseppe Piazziho.

Stručný souhrn pro pojmenovávání hvězd, ale i jiných astronomických objektů lze najít na stránkách Mezinárodní astronomické unie nebo v publikaci Bakich (1995). Pro praktické použití je ale důležitější znát astronomický portál SIMBAD <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>. Po zadání jména hvězdy vám ukáže všechna alternativní jména a označení hvězdy a postará se tak, abyste se v džungli hvězdných názvů neztratili.

### 4.2.3 Dvojhvězdy

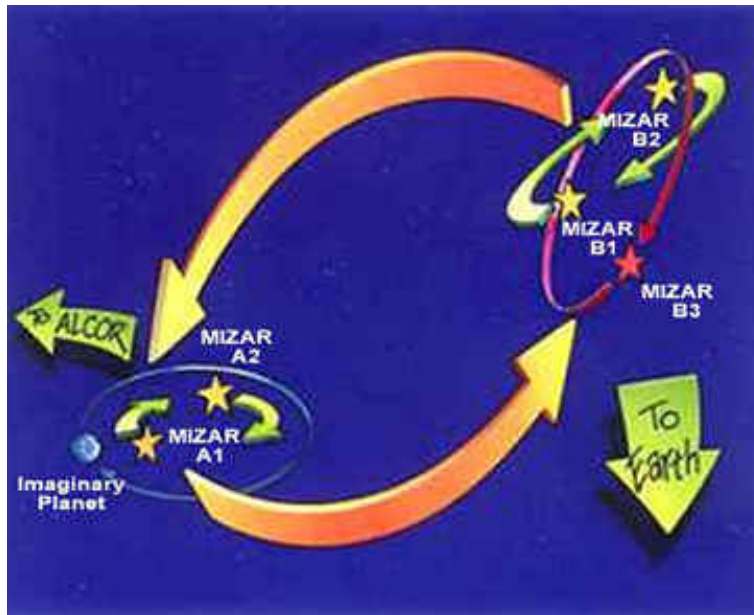
Při pohledu na hvězdné nebe prostýma očima a poté i při pohledu do dalekohledu můžete někdy pozorovat dvě hvězdy těsně vedle sebe. Na rozdíl od našich předků ale víme, že hvězdy nejsou umístěny na nebeské sféře, všechny ve stejné vzdálenosti od Země. Znamená to, že ne všechny pozorované dvojice jsou skutečnými gravitačně vázanými hvězdnými páry. Některé dvojice vznikly prostou projekcí. Dvě hvězdy se nalézají takřka ve stejném směru od nás. Mohou být ale různě daleko. Takovým hvězdným dvojicím říkáme **optické dvojhvězdy**. Existují ale i gravitačně vázané dvojice hvězd obíhající kolem společného těžiště. Takovým říkáme **fyzické dvojhvězdy**. Populární publikace většinou tvrdí, že je jich ve vesmíru mnohem více než osamocených hvězd jako naše Slunce. Pravdou je, že přesný podíl neznáme. Existuje řada studií, která určuje výskyt fyzických dvojhvězd vždy jen v určité skupině hvězd a tak jsou výsledky dost zkreslené. V každém případě představují takové hvězdné páry významné procento hvězdné populace.

Pokud je možné pozorovat například v dalekohledu obě složky takové fyzické dvojhvězdy, označujeme ji jako **vizuální dvojhvězda**. Příkladem je Mizar ze souhvězdí Velké medvědice. Mizar se slabším společníkem Alcorem najdeme v oji Velkého vozu. Od nepaměti se tato dvojice používala pro otestování kvality zraku. Vidíte-li obě hvězdy za dobrých podmínek bez potíží, máte zrak v pořádku, ale stačí krátkozrakost nebo dalekozrakost jedné dioptrie a Alcor od Mizaru již nerozlišíte. Když si astronomové na tuto

Tabulka 4.3: Vybrané dvojhvězdy pro pozorování.

Označení	Jméno	Typ	Barvy	Hv. velikosti [mag]	Úhlová vzdálenost	Rozlišení
$\zeta$ UMa + 80 UMa	Mizar a Alcor	viz	obě bílé	2.4+4.0	11.8'	O
$\zeta$ UMa	Mizar	viz	obě bílé	2.4+4.0	14.4"	D
$\alpha$ Cap	Algiedi	opt	obě žluté	4.2+3.6	6.4'	O
$\epsilon$ Lyr	"Double double"	viz	všechny bílé	(4.7+6.2)+(5.1+5.5)	(2.6")-3.5"-(2.3")	O
$\beta$ Cyg	Albireo	opt	oranžová a modrá	3.1+5.1	34.3"	T
$\alpha$ Cen	Toliman	viz	obě bílé	-0.01+1.34	2" až 22"	D
$\alpha$ CVn	Cor Caroli	viz	obě bílé	2.9+5.6	19.3"	D
$\theta$ Ori	Trapez	viz	všechny bílé	5.4+6.8+8.0+6.3	19" až 9"	D
$\gamma$ And	Alamak	viz	oranž. a modrozelená	2.13+4.84	9.6"	D
$\gamma$ Ari	Mesarthim	viz	obě bílé	4.58+4.64	7.61"	D
$\gamma$ Leo	Algieba	viz	oranž. a žlutá	2.28+3.51	4.24"	D
$\alpha$ Cru	Acrux	viz	obě bílé	1.58+2.09	4.7"	D
74 UMa+75 UMa	M40	opt	obě bílé	5.4+6.1	20'	D

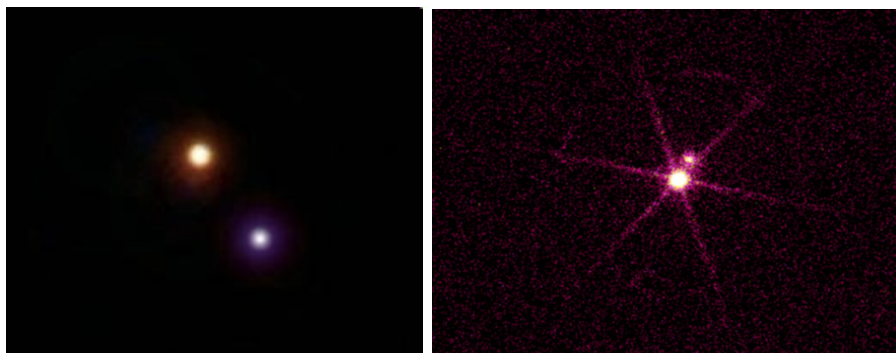
dvojici "posvítili", nestačili se divit. Postupně vyšlo najevo, že jde o složitý vícehvězdný systém (obr. 4.18). Třináct vybraných dvojhvězd a vícenásobných dvojhvězd pro pozorování okem a v malém dalekohledu je uvedeno v tabulce 4.3.



Obrázek 4.18: Schéma vícenásobného systému Alcor a Mizar.

#### 4.2.4 Proměnné hvězdy

Při pozorování noční oblohy poseté hvězdami se neubráníte dojmu, že se hvězdy mění, mihotají, poblikávají. Jde o tzv. scintilaci, která je způsobena neklidem zemského ovzduší. Příčina proměnnosti je tedy v průchodu světla hvězd zemským ovzduším. Existují ale hvězdy, které se skutečně samy mění. Mění se jejich hvězdné velikosti. Takovým hvězdám říkáme proměnné hvězdy. Změny hvězdných velikostí mohou být v rozsahu řekněme tisícín magnitud až několika magnitud a to na časových škálách zlomků sekund až desítek let. Graf závislosti hvězdné velikosti na čase pak nazýváme světelná křivka. V současnosti je známo přes dvě stě tisíc proměnných hvězd a hvězd podezřelých z proměnnosti, které



Obrázek 4.19: Ukázky dvojhvězd: vlevo Albireo (snímek Georger Lilley), vpravo Sirius v rentgenovém oboru (28. 10. 1999 družice Chandra, NASA/SAO/CXC).

jsou uvedeny v katalogu VSX (Watson et al., 2012). Katalog proměnných hvězd s definitivním označením (viz kapitola 4.2.2) nazvaný Generální katalog proměnných hvězd (GCVS) obsahuje nyní přes 45 000 proměnných hvězd (Samus et al., 2012).

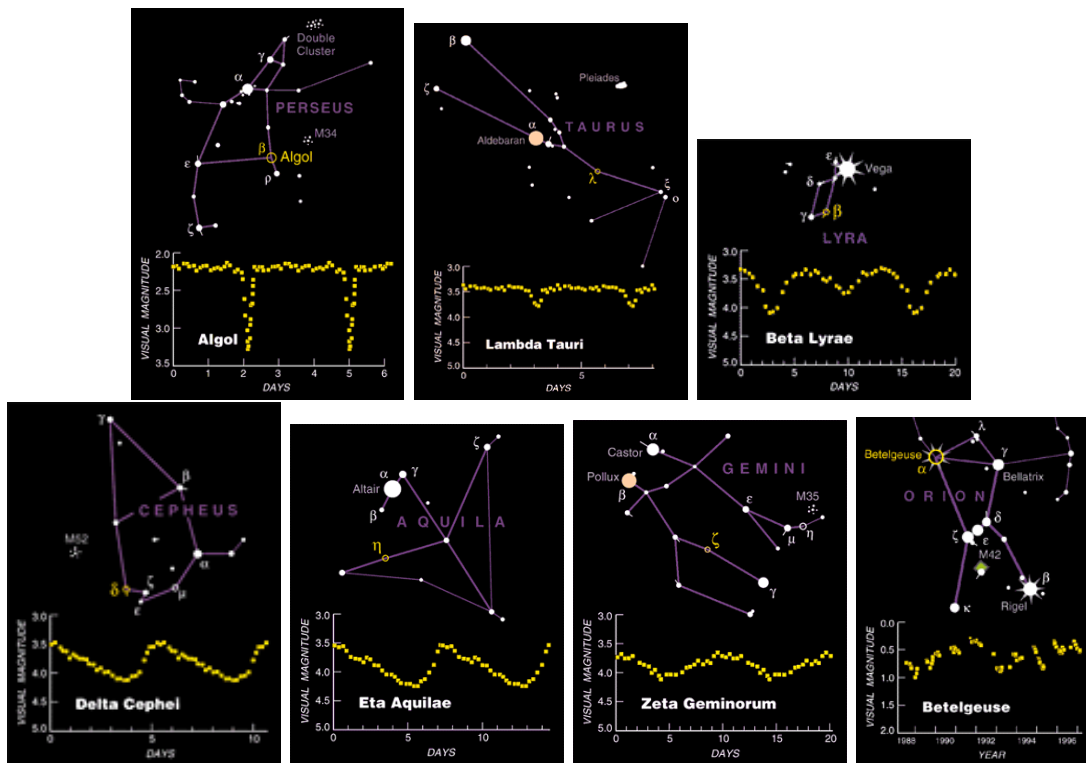
V takovém množství proměnných hvězd lze najít řadu skupin hvězd se společnými vlastnosti i charakterem změn jasnosti. Typů proměnných hvězd je tak dnes více než sto. Podrobně se jim budeme věnovat později. Pro tuto chvíli postačí, když si uvědomíme dva zásadní rozdíly v původu proměnnosti. Změny jasnosti mohou být důsledkem prosté geometrie nebo může jít o fyzické změny hvězd.

U **geometrických proměnných hvězd** (angl. *extrinsic variable stars*) je pozorovaná změna jasnosti vyvolaná změnou geometrie hvězdy nebo soustavy hvězd. Například jde o rotující proměnné hvězdy, které mají na svém povrchu jednu nebo více skvrn a jak rotují, natáčejí k nám jasnější nebo temnější stranu, což se projeví změnou jasnosti. Podobně se může měnit jasnost hvězdy pokud její tvar není kulový, ale elipsoidální a při otáčení k nám se mění velikost plochy, která září ve směru k nám. Mezi geometrické proměnné hvězdy řadíme i zákrytové dvojhvězdy, tedy těsné dvojhvězdy obíhající kolem společného těžiště. Na rozdíl od vizuálních dvojhvězd tady jednotlivé složky dvojhvězdy nerozlišíme. Celý systém je příliš daleko, ale jeho rovina oběžné trajektorie je skloněna tak, že zorný paprsek ze Země leží v této rovině nebo se od ní jen mírně odklání. To pak znamená, že se nám hvězdy při svém vzájemném oběhu zakrývají. Při zákrytu pak místo společného světla obou hvězd pozorujeme jen jednu hvězdu, dojde tedy k poklesu celkové jasnosti.

Na druhou stranu existuje velká skupina hvězd – **fyzicky proměnné hvězdy** (angl. *intrinsic variable stars*), kde se v důsledku fyzikálních procesů mění parametry těchto hvězd a tak i jejich jasnost. Nejpočetnější je skupina pulsujících hvězd, které v čase mění svoji velikost a teplotu povrchu a tím i zářivý výkon. Mezi fyzické proměnné hvězdy patří i hvězdy, kde dochází k různým erupcím, od relativně malých vzplanutí na povrchu hvězdy až po zcela devastující výbuchy supernov, které hvězdu úplně rozmetají do okolního prostoru.

Řadu řekněme dnes již klasických proměnných hvězd můžeme pozorovat na noční obloze i pouhými očima bez dalekohledu. Jsou to například zákrytové dvojhvězdy  $\beta$  Per (Algol) a  $\beta$  Lyr (Sheliak) nebo pulsující proměnné hvězdy  $\alpha$  (Mira) Ceti nebo  $\delta$  Cep. Proměnná je třeba i Polárka, ale u ní nejsou změny jasnosti příliš dobře patrné. Na

obrázku 4.20 je uvedeno několik jasných proměnných hvězd s vyznačením jejich polohy v mateřském souhvězdí a také pozorovanou světelnou křivkou.



Obrázek 4.20: Světelné křivky a mapky pro několik nejjasnějších proměnných hvězd na naší obloze. Převzato z <http://www.skyandtelescope.com>

### 4.3 „Nehvězdné“ objekty ze světa hvězd

Trochu zvláštní název. Jistě. Ale zcela vystihuje obsah následující kapitoly. Budeme se věnovat katalogům, které obsahují zejména hvězdokupy, mlhoviny a galaxie. Většina z nich se jeví v malém dalekohledu jako mlžinka, malá mlhovinka, a právě proto, aby je pozorovatelé snadno odlišili od dalších mlžinek – komet, vznikly specializované katalogy. První seznam sestavil italský astronom Giovanni Battista Hodierna<sup>10</sup> v roce 1654. Obsahoval 40 položek, z nichž minimálně 19 byly reálné a prokazatelně mlhovinné objekty, které bylo možné si splést s kometami. Hodiernova práce předznamenala Messierův katalog, i když není zřejmé, zda o ní Messier věděl. Bohužel práce upadla v zapomnění a byla objevena až relativně nedávno (Serio et al., 1985). Není tedy ani zřejmé, zda o ní věděl Charles Messier, když v letech 1757–1771 pracoval na svém katalogu. Messierův katalog obsahuje 110 objektů (mlhovin, hvězdokup, galaxií), označovaných M1–M110. Ale obsahuje i dvě výjimky. O dvojhvězdě M40 jsme již psali v předchozích kapitolách. M73 je objekt viditelně tvořený čtyřmi hvězdami, zdá se však, že jde o rozpadající se otevřenou hvězdokupu, kterou do svého katalogu zařadil i Messierův pokračovatel John

<sup>10</sup>Někde též Giovan Battista Odierna.

Louis Emil Dreyer<sup>11</sup> (1852–1926). Ten sestavil katalog objektů s názvem ”New General Catalogue” NGC (1888), který obsahuje 7 840 objektů. Později jej doplnil o dva dodatky ”Index Catalogue” IC1 v roce 1895 a IC2 v roce 1908, které obsahovaly 5 386 objektů.



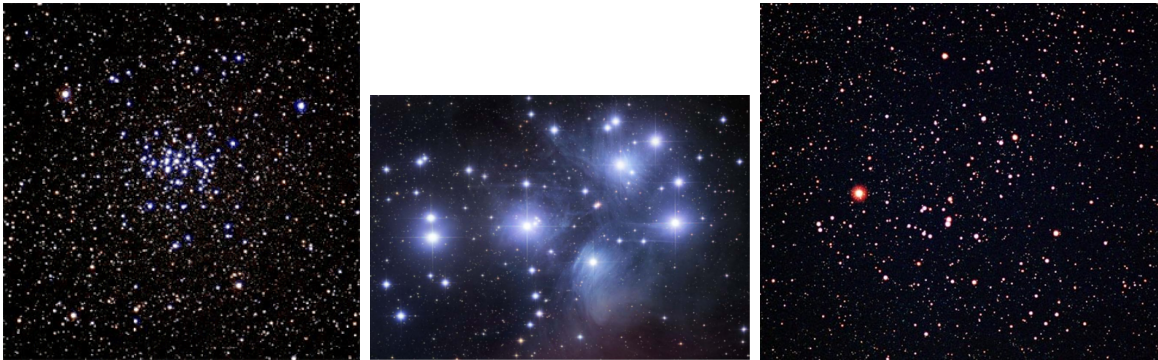
Obrázek 4.21: Objekty Messierova katalogu.

### 4.3.1 Hvězdokupy

Messier při svém pátrání po mlhavých objektech zaznamenával i zvláštní seskupení hvězd. Navíc z řady jeho mlhovin se po použití větších dalekohledů vyklubala seskupení hvězd, tzv. hvězdokupy. V podstatě rozlišujeme hvězdokupy otevřené a kulové. Jak už název napovídá odlišující se svým vzhledem. Zatímco **kulové hvězdokupy** mají

<sup>11</sup>Narodil se v Kodani jako Johan Ludvig Emil Dreyer.

většinou souměrný tvar koule, v dalekohledu kotoučku, kde koncentrace hvězd směrem k centru roste, **otevřené hvězdokupy** mají nepravidelný tvar a jsou tvořeny zpravidla jen desítkami až stovkami hvězd, na rozdíl od kulových, které mohou obsáhnout desetitisíce až milióny hvězd. Odlišností je ale více a budeme se jim věnovat v pozdějších kapitolách.



Obrázek 4.22: Otevřené hvězdokupy Jesličky, Plejády a Hyády.

Zřejmě nejstarší vyobrazení otevřené hvězdokupy můžeme najít na známém disku z Nebry (viz obrázek 1.4). Znalost Plejád tak sahá nejméně do 16.-17. století př.n.l. do doby bronzové. Ptolemaios uvádí kolem roku 150 n.l. v *Almagestu* například Praesepe nebo dvojitou hvězdokupu v Perseovi. Perský astronom Abd al-Rahman al-Sufi (Azophi) publikoval v roce 964 poutavou knihu o astronomii, v níž mimo jiné píše o pozorování hvězdokupy Omikron Velorum (IC 2391) (Moore & Rees, 2011). Pro pozorování dalších hvězdokup a zejména jejich rozlišení na jednotlivé hvězdy bylo zapotřebí dalekohledu. Galileo Galilei nejen rozlišil hvězdy v Mléčné dráze, ale zamířil dalekohled na některé mlhavé skvrny zmiňované Ptolemaiem a zjistil, že jsou to ve skutečnosti skupinky hvězd. U známých hvězdokup pak zvýšil počet jejich pozorovaných členů, například místo 6-7 jich v Plejádách našel 50 (Maran & Marschall, 2009). Pravděpodobně prvním objevitelem nových otevřených hvězdokup dalekohledem ale byl sicilský astronom Giovanni Battista Hodierna, který inspirován Galileem objevil roku 1654 objekty dnes označené M41, M47, NGC 2362 a NGC 2451 (Jones, 1986).

V současnosti známe zhruba 2 100 otevřených hvězdokup. Jejich přehled lze najít v katalogu DAML02 (Dias et al., 2002, 2012). Jsou to vesměs nestabilní útvary, které se postupně rozpadají. Jejich stáří se pohybuje průměrně v řádech desítek miliónů let, jen zcela výjimečně dosáhnou miliardy let. Mezi nejznámější otevřené hvězdokupy patří Plejády, Hyády, Praesepe nebo dvojitá hvězdokupa  $h$  a  $\chi$  Persei (viz tabulka 4.4).

Zvláštním podtypem otevřených hvězdokup jsou *pohybové hvězdokupy*, kde se členové pohybují stejnou rychlostí a stejným směrem vůči hvězdnému pozadí („hvězdám pole“). Příkladem takové pohybové hvězdokupy jsou Hyády. Některé pohybové hvězdokupy jsou tak rozsáhlé a nacházejí se relativně blízko nás, že jejich hvězdy jsou rozesety po celé obloze. Příkladem je uskupení Ursa Major (Collinder 285), které obsahuje hvězdy Velkého vozu a hvězdy od souhvězdí Kefeia až po Jižní trojúhelník.

Nejstarší pozorování kulové hvězdokupy je připisováno německému amatérskému astronomovi. Johann Abraham Ihle objevil v roce 1665 ve Střelci objekt M22 (Sharp, 2006). Po něm následovaly další objevy – Edmond Halley objevil v roce 1677  $\omega$  Centauri



Tabulka 4.4: Zajímavé otevřené hvězdokupy pro pozorování.

Označení	Jméno	Souhvězdí	Charakteristika	Úhlové rozměry	Viditelnost
M45	Plejády (Kuřátka)	Býk	rozlehlá, velmi jasná	100'	O
$\chi, h$	Hyjády	Býk	rozlehlá, velmi jasná	??'	O
M44	dvojitá hvězdokupa	Perseus	velmi jasná	35'+35'	O
M35	Praesepe (Jesličky)	Rak	celková hv. vel. 4.5 mag	80'	O
M7		Blíženci	celková hv. vel. 5.5 mag	30'	T
M11		Štír	50 hvězd, 7-11 mag	60'	T
NGC 4755	Klenotnice	Jižní kříž	50 hvězd, 6-10 mag	10'	T
M11		Štír	200 hvězd, 11-14 mag	12'	T

Tabulka 4.5: Zajímavé kulové hvězdokupy pro pozorování.

Označení	Souhvězdí	Hv.velikost [mag]	Úhlové rozměry	Viditelnost
M13	Herkules	5.7	23'	T
M5	Rak	6.2	13'	T
M15	Blíženci	6.5	12'	T
$\omega$ Centauri	Kentaur	4	30'	O

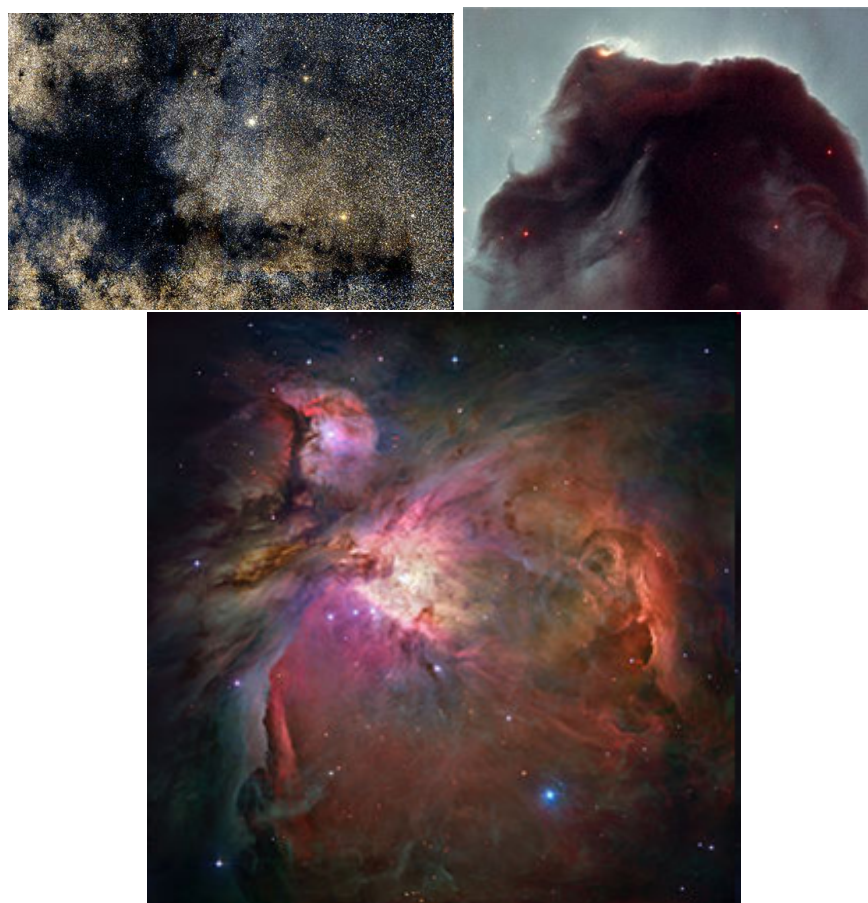
a roku 1714 M13 v Herkulovi a Gottfried Kirch roku 1702 M5 v Hadovi. Teprve v polovině 18. století se ale podařilo rozlišit první hvězdy v kulových hvězdokupách. Takové privilegium se připisuje Messiérovi při pozorování kulové hvězdokupy M4. Nejnovější katalog kulových hvězdokup v naší Galaxii (Harris, 2010) obsahuje 157 záznamů. Na rozdíl od otevřených hvězdokup patří ty kulové mezi velmi staré vesmírné útvary obsahující staré hvězdy. Jejich stáří se zpravidla pohybuje v řádu miliard let. Mezi nejznámější a nejlépe pozorovatelné kulové hvězdokupy patří již zmiňované objekty – M13 v souhvězdí Herkula nebo na jižní hvězdné obloze  $\omega$  Centauri.

Obrázek 4.23: Nejjasnější kulová hvězdokupa na hvězdné obloze  $\omega$  Centauri a 10' detail její centrální oblasti z HST. Převzato z <http://heritage.stsci.edu>.

### 4.3.2 Mlhoviny

Na první pohled by se mohlo zdát, že prostor mezi hvězdami je úplně prázdný. Ale při bližším pohledu zjistíme v některých místech hvězdné oblohy mlžinky, které nelze ani v největších dalekohledech rozlišit na jednotlivé hvězdy. Naopak bližší pohled ukazuje, že

jde o rozsáhlé prostorové útvary – mlhoviny, tvořené mezihvězdným plynem a prachem. Jejich hustota je v pozemských měřítkách opravdu nicotná. Dala by se poměřovat snad jen s hustotou vakua dosaženého v nejlepších pozemských laboratořích<sup>12</sup>, ale v astronomii hrají mlhoviny zcela zásadní roli. Mlhoviny mohou být místem vzniku nových hvězd, doslova hvězdnými porodnicemi, ale také mohou na druhé straně ukazovat místo, kde nějaká hvězda relativně nedávno zanikla. Nehledě na původ onoho plynu a prachu, díky němu je náš pohled do vesmíru velice zkreslený. Nejen samotné mlhoviny ale i rozptýlená mezihvězdná látka totiž vydatně pohlcuje procházející světlo, a tak jsou všechny objekty nacházející se za ní výrazně utlumeny. Zeslabování, neboli extinkce světla je samozřejmě největší ve směru do centra naší hvězdné soustavy, naší Galaxie. Tam jde až o 30 magnitud!



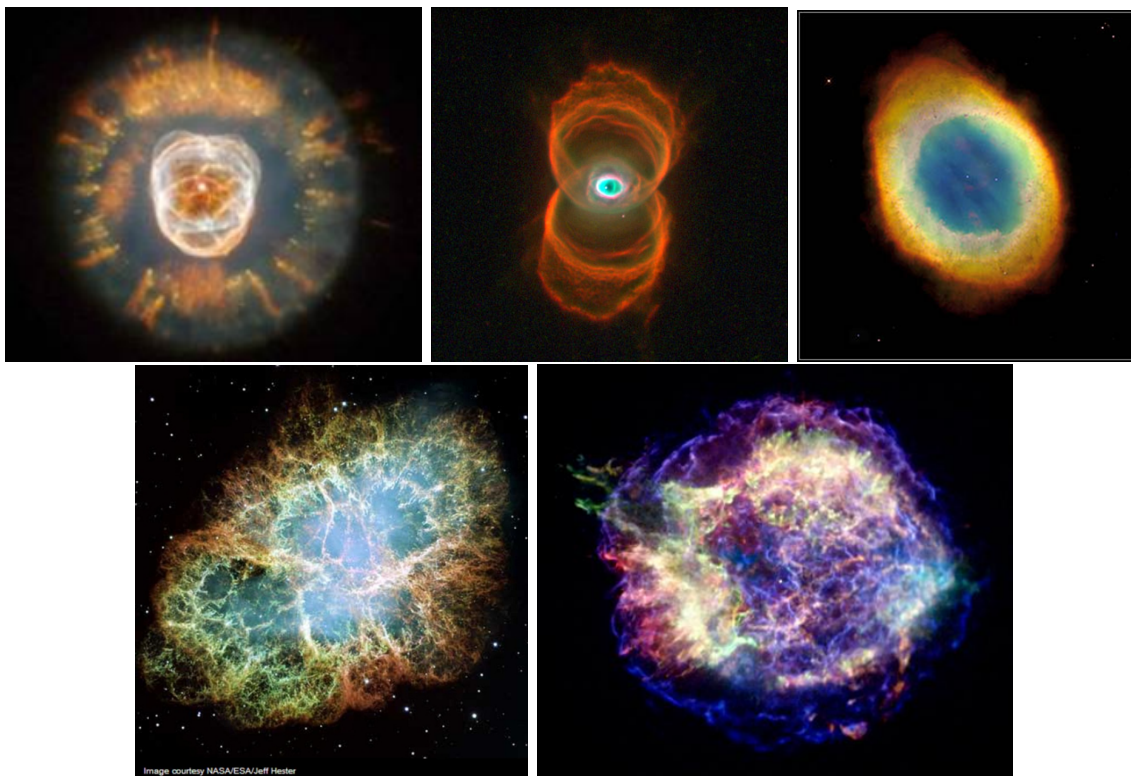
Obrázek 4.24: Mlhoviny tvořené mezihvězdným materiálem. Zleva: Temná mlhovina Pipe v souhvězdí Hadonoše, temná mlhovina Koňská hlava v Orionu a dole emisní mlhovina M42=NGC1976. V centru mlhoviny M42 můžeme navíc pozorovat hvězdokupu Trapez.

Kdo první pozoroval na obloze nějakou mlhovinu už zřejmě nikdy nezjistíme. Jeden z nejstarších záznamů o pozorování pěti „mlhavých hvězd“ lze najít v Ptolemaiově Almagestu z období kolem roku 150 n.l. Zmiňuje se také o mlhavém útvaru mezi Velkou

<sup>12</sup>Hustota mlhovin se udává v rozmezí 100-10 000 částic/cm<sup>3</sup>, mezihvězdný plyn má zhruba 1 částici v 1 cm<sup>3</sup>. Pro srovnání vzduch má 10<sup>19</sup> částic/cm<sup>3</sup>. Nejlepší laboratorní vakuum, tzv. extrémně vysoké vakuum má méně než 10<sup>4</sup> molekul/cm<sup>3</sup>.

medvědicí a Lvem, který nebyl spojen s nějakou hvězdou. Arabský astronom Abd al-Rahman al-Sufi popsal své pozorování „mlhoviny“ v Andromedě na místě galaxie M31. Po vynálezu dalekohledu zaznamenal první pozorování mlhoviny, a to mlhoviny v Orionu (M42), 26. listopadu 1610 Nicolas-Claude Fabri de Peiresc. První detailní studii téže mlhoviny pak uskutečnil až roku 1659 Christian Huygens<sup>13</sup>. První minikatalog šesti mlhovin sestavil Edmund Halley v roce 1715.

Mlhoviny historicky rozdělujeme na temné a svítící. O přítomnosti **temné mlhoviny** svědčí jen to, že zakrývá světlejší pozadí nebo prostě v určité části hvězdné oblohy „chybí“ hvězdy. Příkladem může být mlhovina Koňská hlava v Orionu (viz obrázek 4.24 vpravo nahoře) nebo tzv. Uhelný pytel, kterého si pozorovatel povšimne snadno na jižní hvězdné obloze v Mléčné dráze kousek od Jižního kříže. Naproti tomu **svítící mlhoviny** samy září do okolního prostoru. Zdroj záření ale může být různý. Některé mlhoviny září díky rozptýlenému nebo odraženému světlu nějaké blízké hvězdy, u některých dojde k vybuzení vlastního záření přítomností blízké horké hvězdy. Příkladem takové emisní mlhoviny je již zmiňovaná mlhovina v Orionu M42 (viz obrázek 4.24 dole).



Obrázek 4.25: V horní řadě snímků jsou planetární mlhoviny, zleva Eskymák, Kočičí oko a Prstencová mlhovina v Lyře a v dolní řadě Krabí mlhovina v Býku a pozůstatek supernovy v souhvězdí Kasiopeji.

Podrobněji se budeme mlhovinám věnovat později, ale je dobré si již nyní uvědomit, že současný mezihvězdný materiál ve vesmíru je tvořen pozůstatky předchozích generací hvězd. Nicméně některé mlhoviny hvězdy vytvářejí v průběhu svého vývoje a nachází

<sup>13</sup>Huygens se také domníval, že právě on objevil mlhovinnou povahu tohoto objektu.

se tedy v jejich bezprostředním okolí nebo na místě, kde byl dříve jejich původce. K takovým mlhovinám patří tzv. planetární mlhoviny a pozůstatky po výbuchu supernovy. Kataklyzmickým výbuchem supernovy končí život velmi hmotné hvězdy. Mohou být při něm doslova rozervány na kusy a postupně se rozplynout do okolí v podobě mlhoviny<sup>14</sup>. To se roku 1054 stalo i supernově, která dala vzniknout dnešní Krabí mlhovině (M1) (viz obrázek 4.25). Naproti tomu vznik planetární mlhoviny není pro hvězdu příznakem smrti. Vzniká v poměrně krátkém období, kdy hvězda odhazuje svou vnější obálku, která je pak pozorovatelná v podobě prstence, prstýnku kolem mateřské hvězdy. Při pozorování se prvním objevitelům a pozorovatelům jevila jako kotouček planety, proto ten zavádějící přívlastek "planetární", přestože s planetami opravdu nic společného nemá. Jedna z nejkrásnějších planetárních mlhovin M57 se nachází v souhvězdí Lyry (viz obrázek 4.25).



Obrázek 4.26: Okouzlující pás Mléčné dráhy. V levé části snímku Luise Argeriche jsou vidět dva malé mlhavé obláčky – Magellanova mračna

## 4.4 Naše a cizí galaxie

Když se v létě za ideálních podmínek podíváme na temnou noční oblohu posetou hvězdami, neujde naší pozornosti stříbrný pás, který se vine celou oblohou. Jde o pás Mléčné dráhy. Za to, že jej vidíme na obloze, může podle staré řecké báje záletný Zeus, který si tentokrát vyhlédl královnu Alkménu a vzal na sebe podobu jejího manžela, krále Amfytrióna. Po čase se Alkméně narodil Hérakles, který byl ale jen smrtelným polobohem. Aby Zeus zajistil Héraklovi nesmrtelnost přiložil jej tajně k prsu své ženě Hére, aby se napil mléka nesmrtelnosti a stal se tak skutečným bohem. Héra se však při nechtěném krmení vzbudila a prudkým pohybem cizí dítě odhodila. Při tom se ale její mléko rozstříklo po temném nebi a vytvořila se Mléčná dráha. Z řeckého výrazu pro Mléčnou dráhu galaxias ( $\gamma\alpha\lambda\alpha\xi\iota\alpha\sigma$ ) vzniklo označení galaxie. **Galaxie** představuje obrovský gravitačně vázaný, vnitřně strukturovaný a organizovaný útvar tvořený hvězdami, mezihvězdným plynem a prachem a nezářivou látkou. Počet takových útvarů ve viditelném vesmíru se odhaduje na řádově jeden bilión. V jedné takové soustavě se samozřejmě nachází i naše Slunce. Tu naši soustavu jsme pojmenovali Galaxie a píšeme ji tedy s velkým počátečním písmenem, podobně jako měsíc obíhající kolem planety Země se v češtině označuje Měsíc. Hvězdy v naší Galaxii jsou seskupeny do útvaru

<sup>14</sup>V anglické literatuře se tento typ objektů označuje SNR – supernova remnants.

připomínajícím v prvním přiblížení plochý disk. Při pohledu zevnitř takové soustavy se hvězdy na hvězdné obloze koncentrují do pásu – Mléčné dráhy. Mléčná dráha je tedy označení pouze pro ten nádherný mlhavý pás na nebeské klenbě, je to „boční“ pohled na naši Galaxii, nikoli celá hvězdná soustava<sup>15</sup>. Prvním, kdo rozlišil Mléčnou dráhu na jednotlivé hvězdy a zjistil tak její podstatu, byl Galileo Galilei. V roce 1610 popsal svá zjištění ve svém díle *Hvězdný posel* (*Sidereus Nuncius*).

Vzdálené galaxie se odlišují vzhledem a tvarem. Nejběžnější jsou galaxie, v nichž hvězdy vytvoří spirály nebo spirály s příčkou (viz obrázek 4.27). Můžeme se ale setkat i s eliptickými nebo zcela nepravidelnými galaxiemi. Konec konců nepravidelné jsou i dvě cizí galaxie, které jsou nejjasnější na hvězdné obloze, ale bohužel pozorovatelné jen v jižních zeměpisných šířkách – Velké a Malé Magellanovo mračno (obrázek 4.26). V našich končinách můžeme pozorovat pouhýma očima jen méně nápadnou galaxii v Andromedě (M31). Jedná se ale o nejvzdálenější objekt, jaký můžeme na hvězdné obloze spatřit bez dalekohledu. Světlo z této hvězdné soustavy k nám putuje zhruba dva a půl miliónu let. V malých dalekohledech je pak možné pozorovat například galaxii M33 v Trojúhelníku, dvojici M81 a M82 ve Velké medvědi a další.



Obrázek 4.27: Galaxie zleva M31 v Andromedě (autor: Christof Angerer), M51 Vírová v Honicích psech (zdroj: STScI, NASA) a dole Velký Magellanův oblak. (autor: Stéphane Guisard).

<sup>15</sup>Termíny „Mléčná dráha“ a Galaxie je vhodné striktně odlišovat. V tomto směru si nelze brát jako vzor anglicky psanou literaturu, kde většinou používají jediný termín „Milky Way“.

## 4.5 Atmosférické vlivy na astronomická pozorování

Pozorovatel na zemském povrchu má dosti nesnadnou úlohu. Svá pozorování provádí na dně vzdušného oceánu, který výsledky pozorování silně ovlivňuje. Zemská atmosféra nejen určuje co je a není možné pozorovat, ale i tam, kde pozorování umožní, výsledky pozmění, zkreslí. Nyní se budeme zabývat jen optickým "oknem" do vesmíru. O různých oblastech elektromagnetického spektra, které zemská atmosféra (ne)propouští, si řekneme až v kapitole 6.4.1.

### 4.5.1 Vlivy při pozorování

Zemská atmosféra funguje svým způsobem jako filtr, který každé propuštěné záření zeslabí. Absorpce a rozptyl záření na částicích vzdušného obalu Země, molekulách plynu i prachových částicích se obecně nazývá *atmosférická extinkce*<sup>16</sup>. Její velikost je závislá na vlnové délce dopadajícího záření a vlastnostech atmosféry ve směru pozorovaného objektu. Kromě zeslabení signálu (úbytku energie dopadající do detektorů) způsobuje také zčervenání pozorovaných objektů. Extinkce roste s tloušťkou atmosféry nad místem pozorování ve směru ke sledovanému vesmírnému objektu, tzv. vzdušnou hmotou. Velikost vzdušné hmoty  $X$  lze obecně aproximovat jednoduchým vztahem

$$X = \sec z. \quad (4.2)$$

Nejmenší (rovna jedné) je samozřejmě v zenitu. Pozorovanou hvězdnou velikost hvězdy lze opravit o vliv extinkce podle vztahu

$$m_0 = m - kX, \quad (4.3)$$

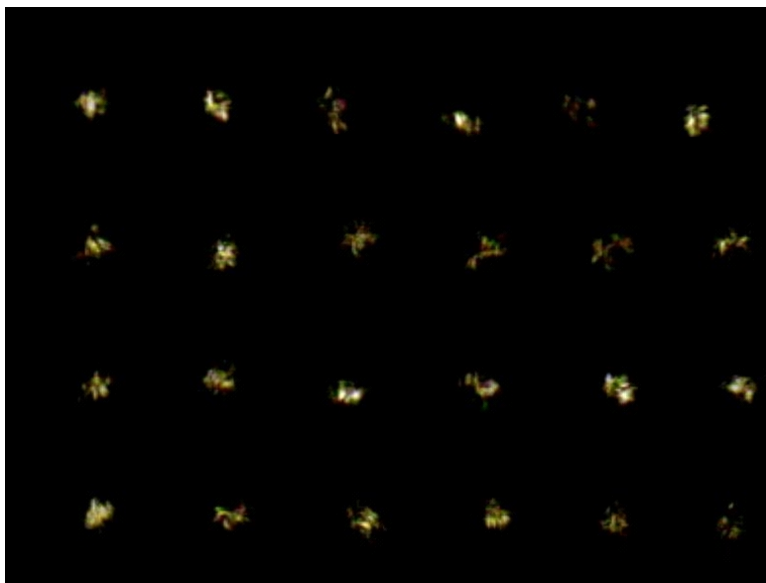
kde  $m_0$  je hvězdná velikost, jakou by měl pozorovaný objekt mimo zemskou atmosféru,  $m$  pozorovaná hvězdná velikost a  $k$  tzv. extinkční koeficient. V praxi bývá tato korekce prováděna pro jednotlivé barvy, v nichž byl objekt pozorován, a vyžaduje použití přesnějších vztahů než 4.2 a 4.3.

K extinkci přispívají i drobné kapičky vodní páry v ovzduší. Změny obrazu při pozorování v dalekohledu se mohou měnit spíše vlivem vodních par tvořících tenké mraky. Ty nemusí být na první pohled viditelné, ale mohou přecházet oblohou právě ve směru našeho pozorování a tak ovlivňovat kvalitu našeho pohledu do vesmíru a znehodnocovat případná měření jasnosti.

### 4.5.2 Seeing

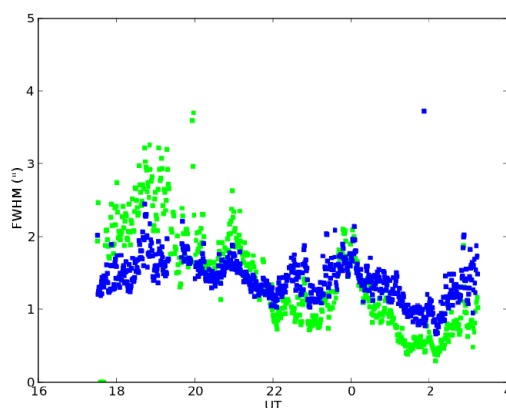
Astronomická pozorování na zemském povrchu bezprostředně ovlivňují meteorologické jevy. Nicméně, i když bude jasná obloha bez mraků, stále budeme hvězdy pozorovat přes neklidnou atmosféru, v níž se mísí vrstvy různých teplot a tedy i různých indexů lomu. Projevem tohoto neklidu je i poblikávání hvězd na obloze, tzv. **scintilace**. Obrazy hvězd na snímku se rychle proměňují, jsou deformovány i více než stokrát za sekundu (viz obrázek 4.28). Místo ideálního, bodového obrazu tak dostaneme obraz rozmazaný do

<sup>16</sup>Tam kde je zcela zřejmé, že jde o zeslabení světla působené zemskou atmosférou, se přívlastek "atmosférická" vynechává. Obecně je ale nezbytný, abychom tuto extinkci odlišili od té mezihvězdné.



Obrázek 4.28: Vliv astronomického seeingu na kvalitu obrazu hvězdy na snímku. Na obrázku jsou snímky hvězdy pořízené na větším amatérském dalekohledu web kamerou s expoziční dobou 0.01 s. Mezi snímky byla vždy prodleva zhruba jedna sekunda. Převzato z <http://www.vikdhillon.staff.shef.ac.uk/>

kotoučků. Jejich velikost určuje tzv. **seeing**<sup>17</sup>, který vyjadřuje míru neklidu vzdušných mas v atmosféře. U nás se velikost seeingu běžně pohybuje kolem 2"-5", ale na nejlepších pozorovacích místech světa může klesnout až k 0,4". Velikost seeingu se samozřejmě může měnit i v průběhu jedné noci, jak dokládá i obrázek 4.29.



Obrázek 4.29: Změna vlastností atmosféry nad pozorovacím stanovištěm může působit i poměrně rychlé změny v seeingu. Na obrázku je průběh seeingu během noci 9/10. března 2012 na observatoři SAAO v Sutherlandu v Jižní Africe.

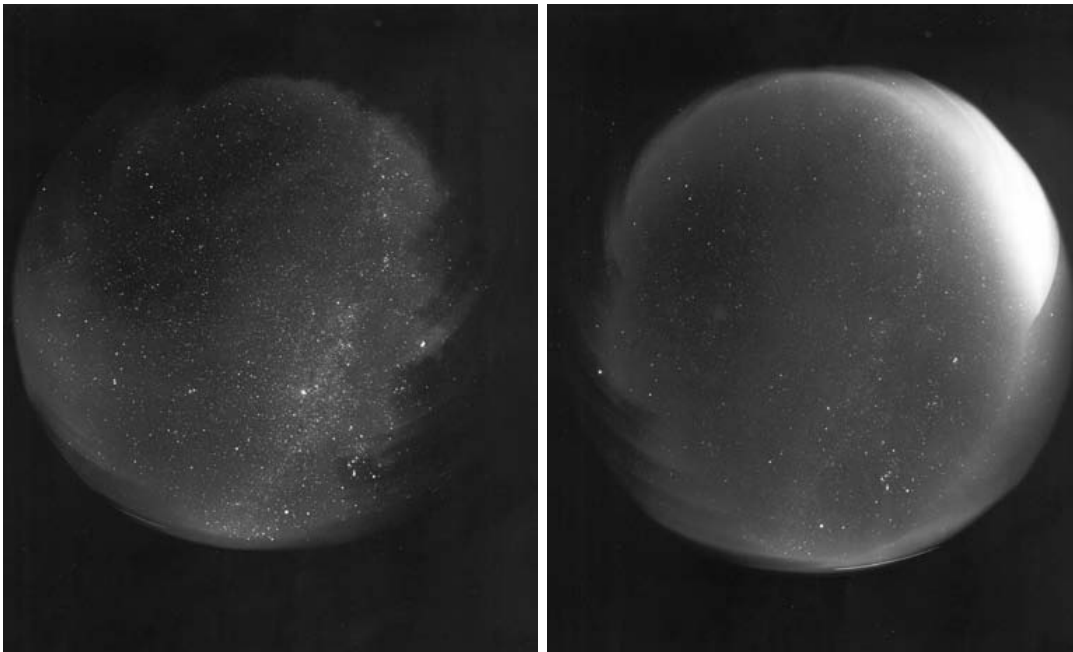
Je třeba si ale uvědomit, že v horším seeingu, například v důsledku vysoké relativní vlhkosti ovzduší bude obraz hvězdy větší, více zeslabený, ale relativně stabilní. Při malé

<sup>17</sup>Velikost obrazu hvězd na snímcích se vyjadřuje pomocí veličiny FMHW z anglického *full width at half maximum*. Jedná se tedy o úhlový rozměr obrazu hvězdu v poloviční úrovni signálu.

průhlednosti atmosféry je obraz hvězdy slabší, ale velikost obrazu hvězdy tím obecně není nijak dotčena.

### 4.5.3 Světelné znečištění

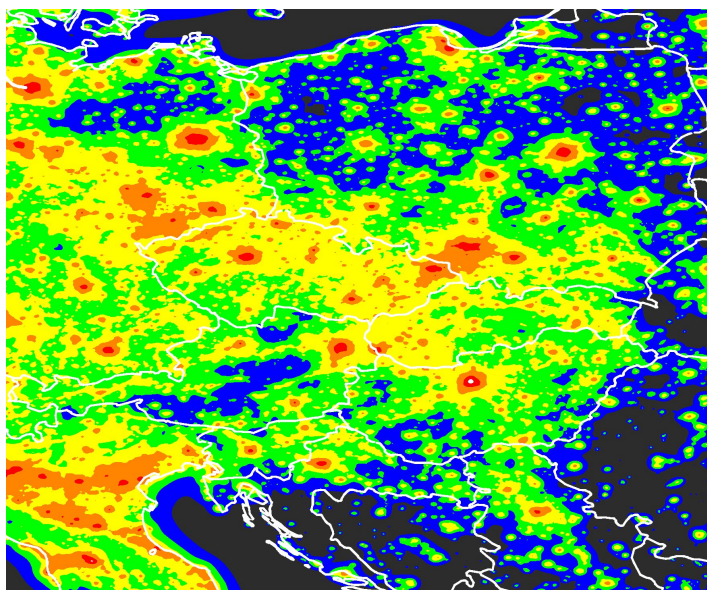
V dnešní době je v hustě osídlených oblastech už poměrně obtížné najít vhodné místo pro noční astronomická pozorování, kde by nic nerušilo krásu noční hvězdné oblohy. Samozřejmě neutečeme před přirozenými zdroji světelného znečištění noční oblohy jako je zejména Měsíc nebo na severu třeba mohutné polární záře. Více starostí nám ale v poslední době dělají umělé zdroje světla, zejména městské osvětlení, které, pokud je provedeno necitlivě, může působit světelné znečištění i na velmi velkou vzdálenost. Pod pojem **světelné znečištění** ale zahrnujeme veškeré světlo přidané do nočního prostředí, které může někoho obtěžovat nebo někomu vadit. Na první pohled by se mohlo zdát, že ten „někdo“ jsou jen hvězdáři, ale to rozhodně neplatí. Světelné znečištění má totiž závažné důsledky ekonomické a zdravotní pro všechny. Nesprávné pouliční osvětlení (například lampy ve tvaru koulí nebo kuželů obrácených vzhůru) neosvětluje cestu, jak by měly. Aby plnily svůj účel, musí svítit více, což znamená více elektrické energie a větší náklady na provoz. Samozřejmě, že pokud v některých oblastech doslova měníme noc v den, narušujeme přirozené biorytmy přírody, zvířat a také samozřejmě nás samotných. Naše vnitřní hodiny jsou silně synchronizovány s přirozeným střídáním dne a noci a důsledky narušení těchto cirkadiánních cyklů mohou být vážné – od nespavosti, neurologických potíží až po vznik rakoviny.



Obrázek 4.30: Fotografie byly pořízeny tzv. celooblohovou kamerou na Astronomickém ústavu AV ČR v Ondřejově. První, na které je zachyceno výrazně více hvězd a obloha je tmavší, byla pořízena v roce 1977. Druhá vznikla po 27 letech v roce 2004. Obloha je zde shodně orientována. Porovnání fotografií jasně ukazuje zvýšení světelného znečištění. Převzato z letáčku České astronomické společnosti "Proč se zabývat světelným znečištěním?".



Astronomové si jako první začali uvědomovat vážnost situace a začali proti světelnému znečištění bojovat. Srovnávací snímky z různých míst ukazují bohužel postupující světelné znečištění. To je vidět i na obrázku 4.30, kde je zachycena změna situace v okolí naší největší astronomické observatoře. A neradostné jsou i pohledy z kosmu (obrázek 4.31). Nicméně hnutí za temné noční nebe přece jen sílí a má za sebou i první úspěchy – legislativní změny v zákonech několika zemích, vznik přírodních oblastí tmavé oblohy a další. Více na <http://www.astro.cz/znecesteni> nebo <http://www.darksky.org/>.



Obrázek 4.31: Světelné znečištění ve střední Evropě. Červená barva ukazuje oblasti s největším světelným znečištěním. Převzato z webu ČAS.

## Doplňující literatura

- Argelander F. W. A., 1859-62, Bonner Sternverzeichniss, erste bis dritte Sektion, Astronomischen Beobachtungen auf der Sternwarte des Koeniglichen Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universitaet zu Bonn, Bände 3-5
- Bakich, M. E. 1995, Cambridge ; New York, NY, USA : Cambridge University Press, 1995
- Bečvář, A. 1962, Praha: Nakl. Československé akademie věd, 1962, edit. Mohr, J.M. ; Mayer, P.
- Bečvář, A. 1962, Praha: Nakl. Československé akademie věd, 1962, edit. Mohr, J.M. ; Mayer, P.
- Bečvář, A. 1964, Praha: Nakl. Československé akademie věd, 1964, 2. vyd., edit. Mohr, J.M. ; Mayer, P.
- Bečvář, A. 1964, Praha: Nakl. Československé akademie věd, 1964, edit. Mohr, J.M. ; Mayer, P.
- Bečvář, A. 1965, Praha, Nakl. Československé akademie věd, 19 [Vyd 4., doplněné, v NČSAV]

- Boyd, R. N. 2008, *An Introduction to Nuclear Astrophysics*, by Richard N. Boyd. ISBN 978-0-226-06971-5 (HB). Published by the University of Chicago Press, Chicago, IL USA, 2008
- Delporte, E. 1930, Cambridge, At the University press, 1930.
- Denk, Z., Hlad, O., 1996, *Hvězdy s arabskými názvy, Hvězdárna a planetárium hlavního města Prahy*, Praha
- Dias, W. S., Alessi, B. S., Moitinho, A., & Lépine, J. R. D. 2002, *A&A*, 389, 871
- Dias W. S. et al. 2012, <http://www.astro.iag.usp.br/~wilton/>
- Dušek, J., 2005, "Nebeský cestopis", Computer Press, Brno, 164 str.
- Gráf, T. 2009, "Se zakloněnou hlavou pozorujeme hvězdy", Computer Press, Brno, 2. vydání, 174 str.
- Halley, E. 1714–16. "An account of several nebulae or lucid spots like clouds, lately discovered among the fixt stars by help of the telescope". *Philosophical Transactions* XXXIX: 390–2.
- Harmanec, P. 2010, *AST007.pdf - učební texty*
- Harris, W. E. 2010, *arXiv:1012.3224*
- Hlad, O., Hovorka, F., Sojka, P., Weiselová, J. 1998, *Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy a ETC publishing, s. r. o., Praha*
- Jones, K. G. 1986, *Journal for the History of Astronomy*, 17, 187
- Karkoschka, E. 2007, "Karkoschkův astronomický atlas hvězdné oblohy", Computer Press, Brno, 160 str.
- Kondziolka, J. 2008, "Světelné znečištění. Co to je?" Leták ČAS, Praha
- Kleczek, J. 2000, "Naše souhvězdí", Albatros, Praha, 411 str.
- Kleczek, J. 2007, "Naše souhvězdí", Albatros, Praha, CD-ROM
- Kunitzsch, P., & Smart, T. 1986, Wiesbaden: Harrassowitz, 2. vydání 2006
- Moore, P., & Rees, R. 2011, *Patrick Moore's Data Book of Astronomy by Patrick Moore and Robin Rees*. Cambridge University Press, 2011. ISBN: 9780521899352
- Maran, Stephen P.; Marschall, Laurence A. (2009), *Galileo's new universe: the revolution in our understanding of the cosmos*, BenBella Books, p. 128, ISBN 1-933771-59-3
- Pokorný, Z., 2006, *Vademecum - Váš průvodce vesmírem*, Hvězdárna a planetárium M. Koperníka v Brně
- Ridpath, I. 1988, New York: Universe Books, 1988, 52 (online <http://www.ianridpath.com/startales/durer.htm>)
- Rükl, A. 1997, "Minimum o hvězdách", Olympia, Praha (elektronicky na <http://mladez.astro.cz/?p=86>)
- Samus, N. N., Durlevich, O. V., & et al. 2012, *VizieR Online Data Catalog*, 1, 2025
- Serio, G. F., Indorato, L., & Nastasi, P. 1985, *Journal for the History of Astronomy*, 16, 1
- Sharp, N. A. 2006, "M22, NGC6656". REU program/NOAO/AURA/NSF. Retrieved 2006-08-16.
- Tirion, W. 1981, Cambridge: Sky Publishing Co. and University Press, 1981, Deluxe edition
- Watson, C., Henden, A. A., & Price, A. 2012, *VizieR Online Data Catalog*, 1, 2027

## 5 Vesmírní sousedé na obloze

V předchozí kapitole jsme se věnovali objektům ze světa hvězd pozorovatelným na noční obloze. Na obloze nad námi ale můžeme pozorovat i jiné astronomické objekty a nejen v noci. Podívejme se nyní na objekty našeho kosmického okolí, objekty z naší Sluneční soustavy. Jsou podstatně menší než většina objektů ze světa hvězd, ale jsou z hlediska astronomických vzdáleností velmi blízko. Řadu objektů pak je možné spatřit i pouhým okem, bez dalekohledu. Nejjasnější objekty – Slunce a Měsíc – jsou zřejmé, ale přidejme ještě některé planety, komety nebo meteory. V dalekohledech pak spatříme i zbylé planety, planetky, trpasličí planety, měsíce planet a další.

Zdálo by se, že třeba Slunce a Měsíc není třeba představovat, vždyť je vidáme od mala, učíme se o nich od nejnižších ročníků základní školy. Bohužel praxe ukazuje, že znalosti pohybů Měsíce kolem Země, Země kolem Slunce a jejich důsledků jsou docela žalostné. Následující kapitola je malým příspěvkem ke zlepšení situace.



Obrázek 5.1: Slunce s žirafami. Zdroj: <http://www.obrazyramy.cz>

### 5.1 Slunce

Význam Slunce si lidé uvědomovali už v dávné minulosti, kdy jej uctívali jako boha mocného, životadárného, ale též zkázonosného, spalujícího vše živé nemilosrdným žářem. V dnešní době lidé „shodili“ Slunce z onoho božského piedestalu, ale o jeho významu nikdo ani dnes nepochybuje.

Z pohledu astronoma je naše Slunce centrálním tělesem naší Sluneční soustavy, naší mateřskou hvězdou. Slunce je tedy hvězda<sup>1</sup> a ne ledažáká hvězda. Rozhodně to není

<sup>1</sup>Pozor na jednoduchou ale docela záhadnou otázku, která se čas od času vyskytuje v některých kvízích: Která je k Zemi nejbližší hvězda? Lidé buď nevědí nebo chybně odpovídají Proxima Centauri. Na Slunce nevzpomenou a přitom je zná každý!

Tabulka 5.1: Srovnání parametrů Slunce a průměrné hvězdy naší Galaxie

Parametry	Slunce	„typické“ hvězdy
poloměr R	$1 R_{\odot} = 6.955 \cdot 10^8 \text{ m}$	$1/5 R_{\odot}$
hmotnost M	$1 M_{\odot} = 1.988 \cdot 10^{30} \text{ kg}$	$1/6 M_{\odot}$
zářivý výkon L	$1 L_{\odot} = 3.84 \cdot 10^{26} \text{ W}$	$1/250 L_{\odot}$

běžná tuctová hvězda, jak se nám občas snaží namluvit některé populární publikace. Zkusme porovnat Slunce se stovkou nejjasnějších hvězd naší oblohy. Jen jediná má menší zářivý výkon než naše Slunce. Tady se Slunce krčí na pomyslném chvostu pořadí a znamenalo by to, že je málo zářivou hvězdou. Ale zkusme nyní změnit kritéria a vyberme stovku nejbližších hvězd. Slunce se zařadí do první desítky. Jen sedm hvězd má v tomto výběru větší zářivý výkon. Rozšířme náš výběr na rovnou tisícovku nejbližších hvězd. Ani tady se Slunce neztratí. Jen čtyřicet hvězd je tady hmotnějších a zářivějších. Takže z toho by zase vyplývalo, že Slunce je hvězdou velmi zářivou. Ani v jednom výběru nebylo Slunce blízko průměru. Opravdu to tedy není běžná, tuctová hvězda. Srovnáním mnohem většího vzorku hvězd, můžeme určit, jak vypadá průměrná hvězda naší Galaxie a dospět tak k závěru, že Slunce je hvězdou nadprůměrně hmotnou a nadprůměrně zářivou. Konec konců, podívejte se sami. Srovnání základních parametrů Slunce a typické, průměrné hvězdy naší Galaxie, tzv. červeného trpaslíka ukazuje tabulka 5.1. Náš předchozí příklad je ale velmi důležitý i z jiného hlediska. Ukazuje, že v astronomii hrají významnou roli výběrové efekty, které leckdy mohou zcela zastřít pravou podstatu věcí. Při posuzování nejrůznějších astronomických jevů ve vesmíru je třeba mít se na pozoru.

Vraťme se ke Slunci. Naše hvězda je složena ze 73 % (podle hmotnosti) z vodíku a z 25 % z hélia. Zbytek připadá na těžší prvky. Povrchová teplota dosahuje 5780 K. Z velikosti Slunce a jeho povrchové teploty pak vyplývá i celkový zářivý výkon Slunce, tedy množství energie vyzářené do okolního prostoru za jednu sekundu. Jen pro představu, celková energie uvolněná ze Slunce za jednu sekundu tedy  $L_{\odot} = 3.84 \cdot 10^{26} \text{ J}$  je řádově srovnatelná s celosvětovou produkcí energie za celý rok. Za jednu sekundu lidé na Zemi vyrobí energii řádově  $10^{19} \text{ J}$  (IEA, 2011)<sup>2</sup>.

Známe-li vzdálenost a velikost našeho Slunce, snadno spočítáme úhlový průměr Slunce. Na obloze můžeme naše Slunce pozorovat jako zářivý k okrajům ztemnělý kotouč o úhlovém průměru  $0.5^{\circ}$ . Jen zcela výjimečně lze na slunečním disku pozorovat i pouhýma očima tmavé flíčky, tzv. sluneční skvrny a s jejich pomocí i sledovat, jak se Slunce otáčí kolem své osy jednou za zhruba 25 dní<sup>3</sup>. Při pozorování Slunce je však nutné dodržovat striktní bezpečnostní pravidla. I letmý pohled přímo na Slunce pouhýma očima bez dalekohledu během dne je při jasné obloze velmi nepříjemný. Je třeba oči chránit. A zejména je třeba dávat pozor při pozorování Slunce dalekohledem. Bez řádného slunečního filtru by při přímém pozorování dalekohledem mohlo dojít

<sup>2</sup>Srovnáme-li produkci sluneční energie s pozemskými úkazy, jasně se ukazuje, jak mohutným zdrojem energie Slunce je. Při průměrném výbuchu sopky je uvolněna energie  $10^{15} - 10^{18} \text{ J}$  (K. Smith (2002, 157)???)

<sup>3</sup>Uvedená doba rotace platí pouze pro rovníkové oblasti Slunce. Oblasti blízko slunečních pólů rotují pomaleji. Jedna otočka jim trvá až 36 dní. Slunce tedy nerotuje jako pevné těleso.

k vážnému poškození zraku nebo dokonce jeho ztrátě! Rozhodně nedejte na radu jisté léčitelky Alušky, která doporučuje civět do Slunce co nejdéle, abyste údajně prostřednictvím fotonů pronikajících okem do mozku vyléčili všechny vaše neduhy. Výsledkem takové léčebné procedury může být jediné to, že vám jeden neduh (poškození očí) přibude.

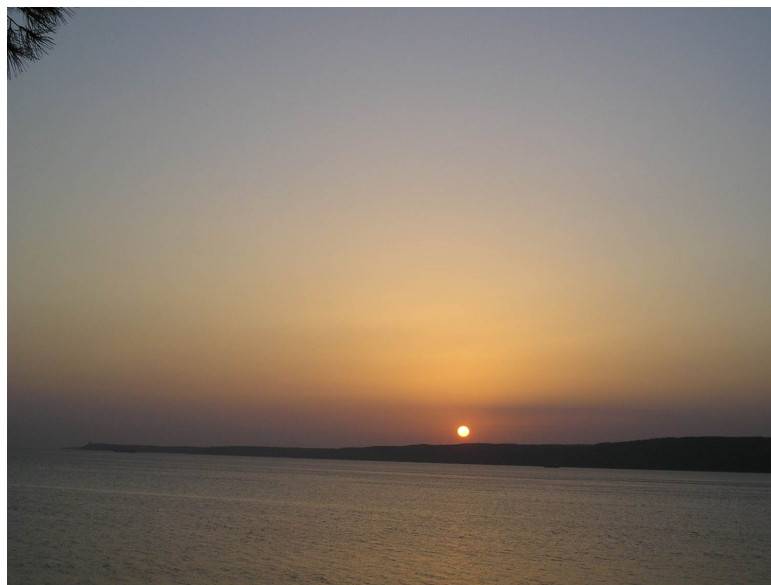
### 5.1.1 Slunce na obloze

Zaměřme se ale nyní zejména na to, kde vlastně můžeme Slunce na obloze pozorovat. Dráha a výskyt Slunce na obloze bude samozřejmě záviset na poloze našeho pozorovacího stanoviště. Začneme tedy v České republice na 50. stupni severní zeměpisné šířky. Situace tady by měla být jasná. Vždyť přece Slunce sledujeme jaksi mimochodem už mnoho let, od chvíle, kdy jsme začali jako malé děti vnímat okolní svět. Víme třeba, že v zimě je vidět jen krátce a poměrně nízko nad krajinou. Ale jak vysoko? A jak dlouho je nad obzorem? Odpovědi na tyto otázky se sice učí děti už na základní škole, ale zkušenosti bohužel ukazují, že mohou být problematické i pro vysokoškoláky. Zkusme si tedy připomenout možná kdesi zapadlé učivo a propojit jej s poznatky každodenního života.

Školní rok začíná v září, začneme tedy také v tomto měsíci. 22. nebo 23. září nastává podzimní rovnodennost. Okamžikem podzimní rovnodennosti se myslí chvíle, kdy se Slunce nachází v podzimním bodě. Tento okamžik se samozřejmě dá přesně spočítat, je běžně uváděn například v astronomické ročence jako astronomický začátek podzimu. V den rovnodennosti jsou bílý den a noc stejně dlouhé, rozdělí si shodně po 12 hodinách. Slunce vychází v 6 hodin ráno místního času východním směrem a zapadá večer v 18 hodin západním směrem. Ale pozor, některé publikace tvrdí, že vychází přesně na východě a zapadá přesně na západě. Je to ale možné? Kdybychom chtěli být opravdu přesní, pak by Slunce přesně na východě vycházelo jen v okamžiku rovnodennosti a zapadalo na západě opět jen v okamžiku rovnodennosti. Jde ale o okamžik, nikoli celý den nebo jeho několika hodinový úsek. Takže pokud by ráno Slunce vycházelo v okamžik podzimní rovnodennosti přesně na východě, večer už bude zapadat západním směrem, ale o kousíček směrem na jih od západního směru. V poledne nalezneme na naší zeměpisné šířce Slunce jižním směrem na úhlové výšce  $40^\circ$ . Podobné je to také o jarní rovnodennosti, která nastává 20. nebo 21. března. Slunce také vychází v 6 hodin, zapadá v 18 hodin, takže noc a (bílý) den trvají po 12 hodinách a v poledne je Slunce asi  $40^\circ$  vysoko (nad vodorovnou rovinou).

O zimním slunovratu (21. prosince) je bílý den v našich končinách krátký. Trvá jen osm hodin. Vždyť Slunce vychází až v 8 hodin a zapadá zhruba v 16 hodin. Noc se nám naopak protáhne na 16 hodin. V poledne sice nalezneme Slunce jižním směrem ale bude mít úhlovou výšku jen asi  $17^\circ$ . Kde Slunce v ten den vychází a kde zapadne? K tomu nás dovede snadná úvaha. Slunce se přece po obloze pohybuje v průběhu roku zhruba stejně rychle. Tento pohyb Slunce po obloze je dán otáčením Země kolem své osy a ta nezávisí na ročním období. Ale v zimě, resp. na astronomickém počátku zimy je Slunce nad obzorem nebo přesněji nad vodorovnou rovinou jen krátce. To znamená, že pokud putuje oblohou přibližně stejnou rychlostí na jaře, v létě na podzim i v zimě, musí být její cesta po obloze v zimě kratší. Střed toho oblouku na obloze je směrem jižním. V zimě se od něj tedy příliš bod východu i bod západu Slunce nevzdálí a Slunce bude vycházet na jihovýchodě a zapadat na jihozápadě. O půlroku později (21. června)

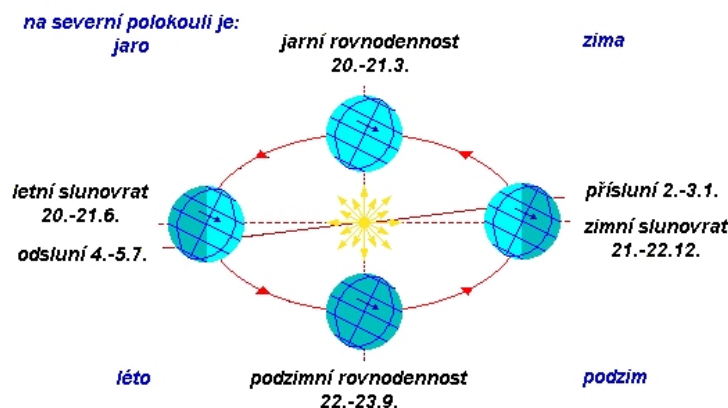
v den letního slunovratu Slunce vystoupá v poledne až do úhlové výšky  $63^\circ$ . Je nad vodorovnou rovinou od 4 hodin od rána do 20 hodin večer, takže jeho pouť po obloze je dlouhá. Body východu a západu se vzdálí od jižního směru. Slunce bude vycházet na severovýchodě a zapadat na severozápadě.



Obrázek 5.2: Západ Slunce v Canakkale, Turecko. Foto: autor

Samozřejmě to vše, co jsme popsali, platí pro Českou republiku, pro území na 50. stupni severní zeměpisné šířky. Pokud se vydáme na daleké cesty severním nebo jižním směrem, pak se výše uvedené okolnosti změní. Při cestě jižním směrem až na rovník si především povšimneme, že přechod mezi dnem a nocí je mimořádně rychlý. Slunce se pohybuje po obloze téměř kolmo k obzoru, takže soumrakové jevy prakticky chybí. Překročíme-li rovník, ocitneme se ve zvláštním světě. Některé věci jsou tam obráceně. Nejen to, že se třeba v Jižní Africe, Austrálii nebo na Novém Zélandu jezdí vlevo. Ale během dne se tam za Sluncem otáčíme směrem doleva, zatímco u nás doma směrem doprava. Slunce je tam v poledne severním směrem a nejlepší svahy vinic jsou orientovány na slunný sever. Ještě dále na jih na Antarktidě za 60. stupněm jižní zeměpisné šířky Slunce neklesne hlouběji pod vodorovnou rovinu než  $6^\circ$  až  $10^\circ$ . Pak dochází ke splnutí večerního soumraku s ranním svítáním. Nastávají tzv. bílé noci, kterými je proslavený například na severní polokouli ruský Petrohrad. Pokud bychom cestovali dále k jižnímu nebo severnímu zeměpisnému pólu, mohli bychom si naplno užívat radostí a strastí nejdelšího bílého dne, případně noci na této planetě. Jistě tušíte, že se jedná o polární den, případně polární noc.

V předchozím odstavci jsme prošli polohy Slunce během slunovratů a obou rovnodenností. Ale proč vlastně dochází ke střídání ročních období? Velmi častá odpověď, že jde o důsledek oběhu Země kolem Slunce ale nestačí! I ve Sluneční soustavě nalezneme planety, které kolem Slunce samozřejmě obíhají a přesto na nich žádná roční období nejsou. Tou druhou nezbytnou podmínkou je totiž sklon zemské osy (viz obrázek 5.3).



Obrázek 5.3: Strídání ročních období. Původní zdroj: <http://www.observatory.cz/>

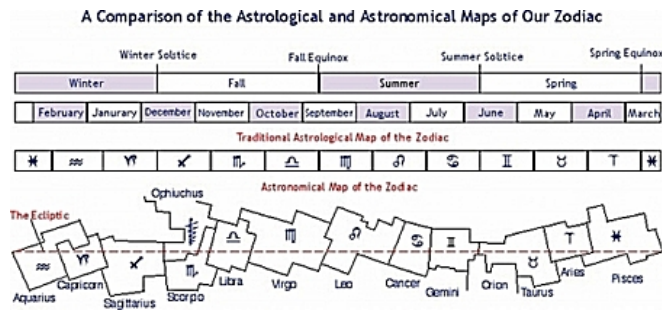
### 5.1.2 Slunce na hvězdné obloze

Pohyb Slunce po obloze je důsledkem toho, že okolní vesmír včetně Slunce sledujeme jakoby z kolotoče, z povrchu Země, která rotuje kolem své osy přibližně jednou za 24 hodin<sup>4</sup>. Spojíme-li tedy pozorovací stanoviště (a tedy i vztažnou soustavu se Zemí) bude se pak Slunce pohybovat po obloze zhruba rovnoměrnou rychlostí tak, že se za jeden den dostane přibližně na stejné místo oblohy. Například každé poledne bude tedy Slunce u nás na meridiánu jižním směrem.

Země ale vykonává, jak víme, i druhý pohyb – obíhá kolem Slunce. Budeme-li tento pohyb opět popisovat ve vztažné soustavě spojené se Zemí, tedy z pozice pozorovatele na Zemi, pak se bude projevovat pohybem Slunce vůči vzdáleným hvězdám, tedy pohybem Slunce na hvězdné obloze. Na stejné místo hvězdné oblohy se přitom Slunce dostane za jeden rok. Za jeden den se posune na hvězdné obloze jen o necelý jeden stupeň. Slunce při své pouti hvězdnou oblohou projde během roku třinácti souhvězdími. Ano, čtete dobře. Třinácti. Běžně se udává, že ekliptika prochází dvanácti souhvězdími zvířetníku, ale ekliptikálních souhvězdí je celkem třináct (viz obrázek 5.4). Slunce postupně prochází souhvězdími Beran, Býk, Blíženci, Rak, Lev, Panna, Váhy, Štír, Střelec, Kozoroh, Vodnář, Ryby. Tím třináctým souhvězdím je Hadonoš mezi Střelcem a Štírem. Za několik tisíciletí se naši potomci dočkají dokonce i čtrnáctého ekliptikálního souhvězdí. Stane se jím Orion. Nicméně nyní ani Orion ani Hadonoš nejsou zařazovaní mezi dvanáctku vyvolených zvířetníkových souhvězdí, která posloužila také pro vznik dvanácti tzv. znamení zvěrokruhu. Když se pozorně podíváte na obrázek 5.4 povšimnete si, že shodné značky souhvězdí a astrologických znamení jsou posunuta. Chyba to ale není. V kapitole 4.1.3 jsme stručně popsali precesi zemské osy. V jejím důsledku se posouvá po ekliptice jarní bod, takže se pomalu rozchází astronomická souhvězdí s astrologickými znameními. O 30°, jednu dvanáctinu kruhu a tedy jedno znamení se jarní bod posune za zhruba dvě tisíciletí.

Svoje znamení, do kterého spadá datum narození, si asi každý pamatuje. Zda máte vlastnosti, které vám výklad astrologických znamení přisuzuje, ponechám laskavě na čtenáři samotném. Ale zkuste zapřemýšlet, zda v době, kdy slavíte narozeniny, je souhvězdí odpovídající "vašemu" znamení pozorovatelné. Doufám, že pokud to nevíte, jistě

<sup>4</sup>Podrobněji jsme se této problematice věnovali v kapitole 3.3.1.



Obrázek 5.4: Mapa ekliptikálních souhvězdí ve srovnání s astrologickými znameními. Zdroj: Saint René Descartes University.

rychle odhalíte, že je to spíše naopak. O vašich narozeninách to ”vaše” souhvězdí vidět není. Pokud by neexistovala precese, právě v něm by totiž bylo o vašich narozeninách Slunce. Díky precesi je Slunce v sousedním souhvězdí, ale i tak to znamená, že na období nejlepšího pozorování toho ”vašeho” souhvězdí si musíte zhruba půl roku počkat.

## 5.2 Měsíc

Druhým nejjasnějším objektem oblohy je po Slunci náš Měsíc. Není ale jen tím druhým, patří mu nejedno prvenství. Je to k nám nejbližší kosmické těleso. První a zatím jediné kosmické těleso (mimo Zemi samozřejmě), na kterém se procházeli lidé. A tak bychom mohli pokračovat. Ale zkusme si našeho souseda nejdříve představit. Jeho střední vzdálenost od Země je 384 000 kilometrů. Průměr dosahuje asi 3 500 km, což je zhruba čtvrtina průměru Země. Na pozemské obloze tak má úhlový průměr  $0.5^\circ$ . Jeho hmotnost je  $7.349 \cdot 10^{22}$  kg (přibližně  $1/81$  hmotnosti Země). Proto se někdy hovoří místo o planetě Zemi a jejím souputníku Měsíci přímo o dvojplanetě Země-Měsíc.



Obrázek 5.5: Měsíc v úplňku nad obzorem. Zdroj: <http://www.nies.ch>

Pro Zemi a život na Zemi má Měsíc zásadní význam. Jeho přítomnost dlouhodobě stabilizovala zemskou osu. Měsíc se převážnou měrou podílí na vzniku přílivu a odlivu moří. A právě tento pohyb vodních mas zřejmě v minulosti napomohl přechodu života z moří na souši. Měsíc je tedy jakýmsi katalyzátorem života na naší planetě. Kdybychom



jej neměli, byla by jistě naše literatura významně ochuzena o všechna zejména básnická díla o Měsíci, Luně a jejím stříbřitém svitu. Lunární cyklus, střídání podob Měsíce dal vzniknout lunárnímu kalendáři, a dokonce se mluví o vlivu na různé biologické cykly. Nejčastěji se v té souvislosti hovoří o menstruačním cyklu žen. Ale lze najít i další příklady závislosti na měsíčních fázích, které jsou sice prokázané, zdokumentované, ale dosud nevysvětlené. Jedním z nich je červ Palolo zelený (*Eunice viridis*) (obrázek 5.6), který žije v korálových útesech teplého pásma Tichého oceánu. K jeho rozmnožování dochází jednou za rok, ale pokaždé v den, kdy nastává listopadová poslední čtvrt. Při rozmnožování červi, respektive jejich části vyplavou v ohromném množství na hladinu moře. Obyvatelé souostroví Fidži, Banksových ostrovů, Vanuatu a dalších je sbírají a upravují na různé způsoby jako vzácnou lahůdku. Přestože toho dne pro ně nastává opravdová slavnost, ani staří zkušení domorodci údajně nedokážou určit tento den s takovou přesností jako samotní červi palolo.



Obrázek 5.6: Červ Palolo zelený (*Eunice viridis*). Zdroj: <http://eol.org>

Někteří lidé, ale vliv Měsíce přeceňují. Píší o vlivu Měsíce na počasí, růst hub nebo rostlin. Kam až může lidská hloupost zajít ale ukazuje kniha, kterou v roce 1996 v Německu vydali Johanna Paunggerová a Thomas Poppe. Stala se jedním z bestsellerů a vyšla již ve 20 jazycích, mimo jiné i česky pod názvem "Neznámá moc Luny". Nakonec posuďte sami. V knize se mimo jiné píše:

- „Obnažte svá řadra pod noční oblohou při přibývajícím Měsíci - podporuje to jejich růst.
- Nehnojte na zahradě při dorůstajícím Měsíci - země v té době špatně přijímá tekutiny.
- Posad'te se za úplňku holou zadnicí do čerstvě vyorané brázdy - zbavíte se tak hemeroidů.

### 5.2.1 Měsíc siderický a synodický

Při stanovení délky jedné otočky Země kolem své osy, délky jednoho dne, je nutné uvést v jaké vztažné soustavě se vlastně pohybujeme, tedy vůči čemu to otáčení měříme. A stejné je to i s oběhem Měsíce kolem Země. Můžeme jej vztáhnout ke hvězdám, hvězdné obloze a pak hovoříme o **siderickém měsíci**. Jeho délka byla určena na přibližně 27 a jednu třetinu dne, přesněji na 27 dní 7 hodin 43 minut a 12 sekund. Za tu dobu se Měsíc dostane na stejné místo na hvězdné obloze. Jednoduchým výpočtem pak zjistíte, že to znamená posun Měsíce vůči hvězdnému pozadí o více než  $13^\circ$  za den, tedy více

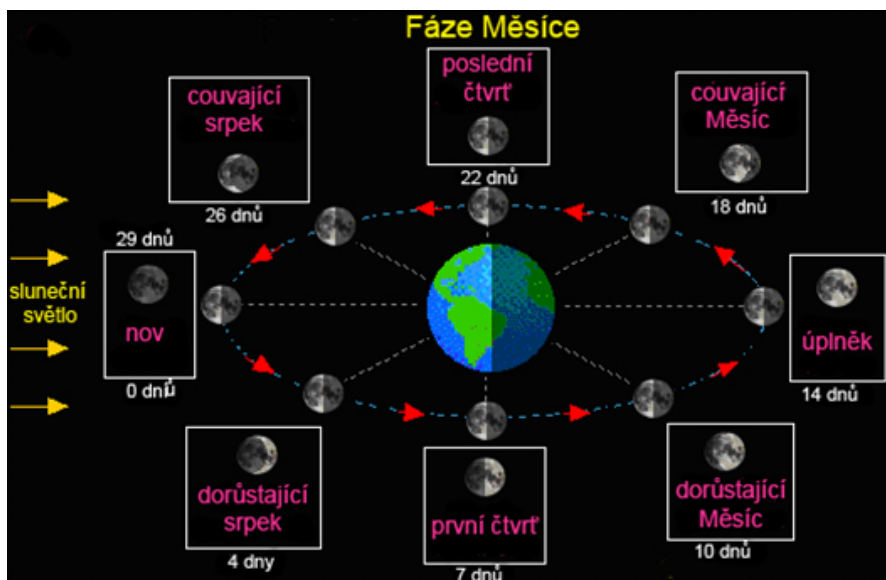
než půl stupně za hodinu. Ale  $0.5^\circ$  je úhlový rozměr Měsíce, takže měsíc se zhruba za hodinu posune o svůj úhlový průměr. Je-li poblíž Měsíce na obloze nějaká jasnější hvězda nebo více hvězd, určitě si jeho pohyb na hvězdné obloze v průběhu noci povšimnete. Je to i pěkná ukázka, proč je nutné rozlišovat pojmy *obloha* a *hvězdná obloha*. Zatímco na obloze budete v průběhu noci pozorovat, jak Měsíc putuje oblohou od východního obzoru přes jih až k obzoru západnímu, během téže noci můžete pozorovat jak se posune "v protisměru" na hvězdné obloze vůči vzdáleným hvězdám. Dokonce je někdy možné pozorovat jak Měsíc při tomto pohybu na hvězdné obloze některou z hvězd zakryje. Nastane zákryt hvězdy Měsícem. A pokud Měsíc prochází na hvězdné obloze třeba Plejádami nebo zakryje dokonce některou z planet Sluneční soustavy, je to opravdu pěkný zážitek.

Výše uvedená délka siderického měsíce je ale příliš krátká. Délka kalendářního měsíce je spíše 30 nebo 31 dní a doba mezi dvěma po sobě následujícími úplňky je 29 a půl dne. Tak jak to tedy je. Už v úvodu jsme upozorňovali na nutnost správné volby vztahné soustavy. Siderický měsíc popisuje oběh Měsíce vůči hvězdám, ale vztáhneme-li jeho pohyb vzhledem ke Slunci, dostaneme tzv. **synodický měsíc**. Jeho délka je přibližně 29,5 dne, přesněji 29 dní 12 hodin 44 minut a 3 sekundy. Jde o dobu, za kterou se Země, Měsíc a Slunce dostanou do stejného vzájemného postavení, Měsíc bude ukazovat stejnou fázi. Synodický měsíc tedy vymezuje cyklus střídání měsíčních fází. A proč je delší než měsíc siderický? Za zhruba jeden měsíc se přece Země posune ve své dráze kolem Slunce a Měsíc musí proto, aby zaujal stejnou pozici vůči Zemi a Slunci ještě "korigovat" tuto změnu polohy Země.

### 5.2.2 Fáze Měsíce

Jeden z nejnámějších astronomických úkazů vůbec jsou nepochybně fáze Měsíce. Bohužel nezřídka se setkáme i mezi jinak vzdělanými lidmi s mylnou představou, jak tyto měsíční proměny vznikají. Měsíční povrch je sám o sobě poměrně temný. Lapidárně řečeno, není-li nasvícen, není vidět. Je to vlastně stejné jako s herci černého divadla. V černém oblečení vůči černému pozadí scény nejsou vidět dokud se neodhalí nebo se na ně řádně neposvítí. Měsíc jako herec takového velkého černého kosmického divadla je vydatně nasvětlován Sluncem. Jenže při oběhu kolem Země se na něj díváme pokaždé z různé strany. Můžeme vidět nasvětlenou buď celou polokouli přivrácenou k Zemi, měsíční úplněk, jen část nasvětlené části Měsíce nebo se dokonce dívat směrem k Měsíci v době, kdy Slunce svítí na odvrácenou polokouli. Pak se ale také díváme takřka směrem ke Slunci a v tu dobu není Měsíc na obloze pozorovatelný. Nastal měsíční nov. Názorně je situace vidět na obrázku 5.7. Jenže pokud by Měsíc obíhal kolem Země přesně v rovině ekliptiky, pak by vlastně muselo při novu Měsíc vstoupit mezi Zemi a Slunce a Slunce by tak zakryl a při úplňku by se zase Měsíc schoval do zemského stínu. Docházelo by k zatměním. Jenže rovina oběžné trajektorie Měsíce kolem Země je vůči ekliptice skloněna o pět  $^\circ$ , takže v naprosté většině novů a úplňků je Měsíc pod nebo nad rovinou ekliptiky. Tato malá odchylka oběžné roviny Měsíce také způsobuje, že se při pozorování výrazněji než například u planet nebo Slunce mění výška Měsíce nad obzorem.

Vzhledem k tomu, že jsou fáze Měsíce úzce spojeny se vzájemnou polohou Slunce, Měsíce a Země, lze snadno určit, v jaké fázi bude Měsíc pozorovatelný například celou noc nebo kdy vychází a zapadá. Malý přehled je uveden v následující tabulce. Pokud



Obrázek 5.7: Vznik fází Měsíce. Zdroj: <http://leccos.com>

poznatky v ní uvedené neznáte, rozhodně se je ale neučte nazpaměť. Nemá to smysl. Stačí si vždy danou situaci představit a třeba i načrtnout a jistě k správnému řešení dojdete sami. Není na tom nic složitého.

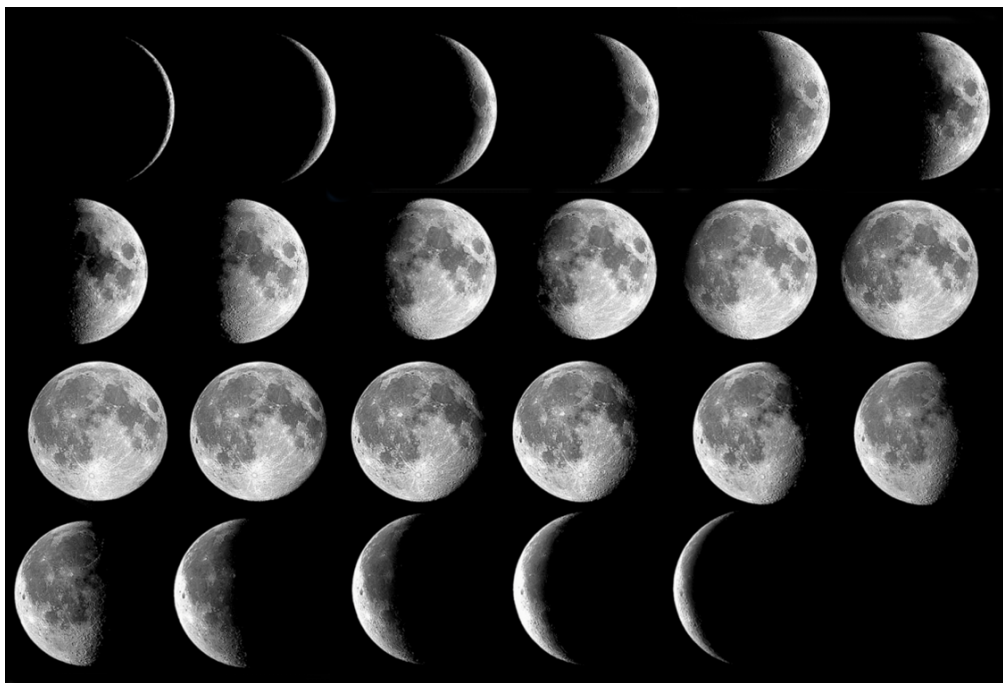
Fáze	Kdy vychází	Kdy je nejvýše na obloze	Kdy zapadá
nov	ráno	v poledne	večer
první čtvrt	v poledne	večer	o půlnoci
úplněk	večer	o půlnoci	ráno
poslední čtvrt	o půlnoci	ráno	v poledne

Tak například pokud je Měsíc v úplňku, znamená to, že je na opačné straně od Země než Slunce. Na obloze je tedy Měsíc o  $180^\circ$  posunutý oproti Slunci. Ve chvíli, kdy Slunce zapadá, Měsíc vychází a bude nad obzorem po celou noc. Po úplňku Měsíc ubývá, říká se také, že couvá, má tvar písmene C. Slunce je vždy na obloze tím směrem, kde je "zaoblený" okraj Měsíce, takže při ubývajícím Měsíci je to východním. Když je Slunce na východ od Měsíce, vychází později než Měsíc. V třetí (poslední) čtvrti vyjde Měsíc o půlnoci, ráno při východu Slunce bude kulminovat a v poledne zapadne.

Zatím jsme mluvili jen o význačných fázích - nov, úplněk první a poslední čtvrt. Ale co všechny ty fáze mezi nimi? Jak je popsat? Pomoc je vcelku snadná. Velikost měsíční fáze můžeme udávat ve dnech (a zlomcích dne), které uplynuly od posledního novu. Takovému času se pak říká *stáří Měsíce*.

### 5.2.3 Měsíční tvář

Člověk sleduje Měsíc od nepaměti. Dalo by se s nadsázkou říci, že jde o nejokoukanější kosmické těleso. Už v dávných dobách si lidé na Měsíc „promítali“ nejrůznější motivy, různé postavy nebo zvířata. Zapojíte-li fantazii jistě tam podobné obrazy uvidíte i vy (viz obrázek 5.9). Fantazii se meze nekladou. Velmi známá je také měsíční tvář z jednoho z prvních vědecko-fantastických filmů na obrázku 5.10. Nám však nyní půjde o víc.



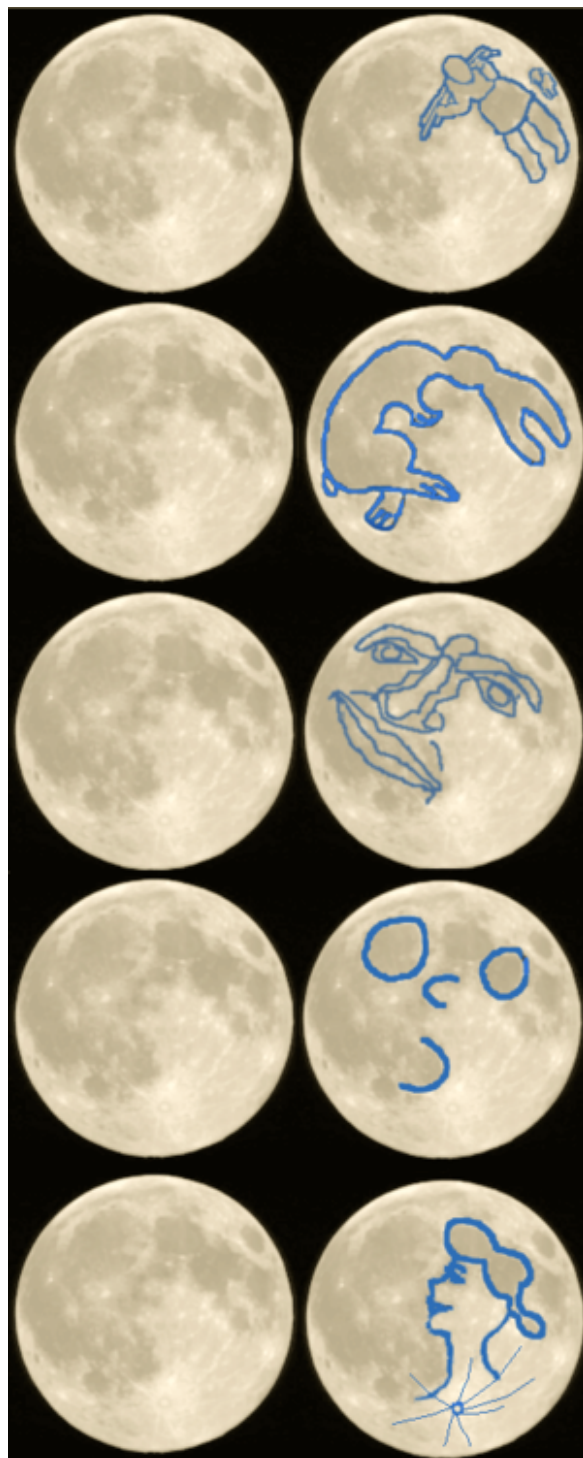
Obrázek 5.8: Fáze Měsíce. Foto: A. Cidadao

Budeme chtít popsat pozorovaný povrch Měsíce a také vysvětlit, proč nám vlastně Měsíc nastavuje stále stejnou tvář.

Ze Země skutečně pozorujeme stále stejnou část měsíčního povrchu a tak první snímky odvrácené strany Měsíce, které zaslala na Zemi sovětská sonda Luna 3 v roce 1959 způsobily doslova pozdvižení, i když nebyly zrovna nejostřejší. Dnes už je detailně zmapován celý povrch Měsíce (obrázek 5.11). Na první pohled si všimneme výrazného rozdílu mezi (k Zemi) přivrácenou a odvrácenou stranou Měsíce. Zatímco na přivrácené straně je celá řada tmavých ploch, tzv. měsíčních moří, na odvrácené straně prakticky žádné nejsou. Na přivrácené straně pak najdeme i jediný měsíční oceán. Měli bychom připomenout, že i když najdeme na Měsíci spoustu útvarů „plných vody“ jako oceán, moře, záliv, bažiny a podobně, rozhodně se na povrchu měsíce s vodou v kapalném stavu nesetkáte<sup>5</sup>. Mimo pomyslné vodní plochy nalezneme na Měsíci různá pohoří, rýhy, brázdy a všudypřítomné krátery. Přestože by se mohlo zdát, že pohled na Měsíc je nudnou záležitostí, opak je pravdou. Můžete objevovat krásu nejruznějších měsíčních zákoutí, jak ji například popisuje v sérii publikací P. Gabzdyl (2002; 2006) a když budete mít velké štěstí můžete zaznamenat i dopad cizího tělesa na měsíční povrch a vznik nového kráteru. Každý astronom by ale měl na Měsíci rozpoznat alespoň několik základních útvarů, pojďme se tedy v rychlosti seznámit s místopisem Měsíce.

Chcete-li poznávat přivrácenou stranu Měsíce, je nejlepší tak činit krok za krokem, tedy přesněji den za dnem. Pokud se budete dívat na měsíc v úplňku, uvidíte sice přivrácenou stranu Měsíce celou, uvidíte na ní najednou všechny nejvýraznější útvary, ale spousta krásných zákoutí vám unikne. Nádherné detaily povrchu vyniknou zejména

<sup>5</sup>Stopy vody v pevném skupenství zaznamenaly indická sonda Chandrayaan-1 a americká sonda LCROSS v roce 2009.



Obrázek 5.9: Tvář Měsíce podle různých představ. Zdroj: <http://www.catherinesvehla.com>.

v těsné blízkosti rozhraní světla a stínu tzv. terminátoru. Při měsíčním úplňku jsou ale tyto detaily přezářeny. Přesto začneme s orientací na měsíci právě v této fázi.

Na východním okraji Měsíce můžeme pozorovat pěkně ohraničené takřka kruhové Moře nepokojů. Jižně od něj Moře plodnosti a ještě více na jih malé Moře nektaru. Na jihozápad až západ od Moře nepokojů leží Moře klidu, na jehož jižním okraji poprvé v



Obrázek 5.10: Tvář Měsíce z filmu G. Méliése Cesta na Měsíc (Le Voyage dans la Lune, 1902).



Obrázek 5.11: Přivrácená a odvrácená strana Měsíce. Zdroj: <http://cs.wikipedia.org>

roce 1969 stanuli lidé na Měsíci. Mezi Mořem nepokojů a Mořem klidu se nachází malý ale nápadný, mladý kráter Proclus. Na Moře klidu navazuje na severozápadě Moře jasů. To je na západní straně ohraničeno horským hřbetem měsíčních Apenin a Kavkazu. Na západ od nich se rozkládá největší měsíční moře – Moře dešťů. V něm nalezneme jednak 250 km velký Záliv duhy a jednak několik větších kráterů. Na severním okraji je to kráter Plato, na východě Aristillus, Archimedes, na jihu Eratosthenes a majestátní Koperník. Ten se ostatně nachází už na rozhraní mezi Mořem dešťů a Mořem ostrovů. Na západním okraji tohoto moře se nachází další výrazný kráter. Kráter Kepler představuje jakýsi výběžek, který zasahuje do rozsáhlého Oceánu bouří. Těsně u západního okraje Měsíce za Oceánem bouří můžeme pozorovat kráter Grimaldi, který nám podobně jako

Moře nepokojů u východního okraje může pomoci sledovat měsíční libraci. Pro úplnost<sup>6</sup> ještě dodejme jména tří moří jižně a jihovýchodně od Oceánu bouří – Moře poznané, Moře par a Moře oblaků a jednoho, které se nachází blízko severního pólu. Jde o protáhlé Moře chladu. Za úplňku je jedním z nejnápadnějších útvarů mladý kráter Tycho na jižní polokouli se soustavou jasných paprsků.

Když budete Měsíc pozorovat v průběhu celého cyklu fází, pak při dorůstání Měsíce můžeme doporučit pozorování trojice kráterů Theophilus – Cyrillus – Catharina a dvojic severních kráterů Hercules – Atlas a Aristoteles – Eudoxus. V poslední čtvrti pak již zmiňované krátery Koperník, Kepler, ale také Aristarchus, Aristillus, Archimedes nebo trojici Ptolemaeus – Alphonsus – Arzachel. A připojme ještě jednu horu. Jižně o kráteru Plato v Moři dešťů je osamělá hora Mt. Pico.

Zajímavých zákoutí je samozřejmě mnohem více. Nemůžeme postihnout všechny. Zájemcům doporučujeme navštívit web <http://mesic.astronomie.cz> nebo si prostudovat některou z následujících publikací – Sadil (1953); Růkl (1991); Gabzdyl (1997, 2006).

Už jsme několikrát zmínili, že Měsíc k nám přivrací stále stejnou polokouli. Ale proč je tomu tak? Jedná se o projev tzv. vázané (synchronní) rotace, která je důsledkem dlouhodobého gravitačního působení Země. Její slapové síly tak dlouho brzdí rotaci Měsíce, až se doba jeho rotace rovná době oběhu. Taková situace ale nastává nejen u dvojice Země – Měsíc. Stejný efekt najdeme i jinde ve Sluneční soustavě nebo i v soustavách těsných dvojhvězd.

Poněkud překvapivě pak může znít otázka. Když má Měsíc vázanou rotaci a nastává nám stále stejnou tvář, kolik procent jeho povrchu můžeme ze Země pozorovat. Logika velí přesně polovinu, 50 procent. Jenže postupně, v průběhu času můžeme pozorovat až 59 % měsíčního povrchu. Měsíc totiž není na své dráze „usazen“ úplně pevně, ale trochu se jakoby kývá. Těmto výkyvům se říká librace. Dochází k nim jak v délce, tak i v šířce a jsou docela dobře pozorovatelné (viz obrázek 5.13). Jsou důsledkem hned několika faktorů. Rotace Měsíce (vůči hvězdám) je rovnoměrná, ale jeho pohyb kolem Země nikoli. Měsíc obíhá Zemi po elipse nerovnoměrně. Navíc sklon rotační osy Měsíce vzhledem k rovině oběžné dráhy kolem Země kolísá od 3,60° do 6,69°. A svou roli hraje i vejčitý tvar Měsíce. Jeden z důsledků librace jsme už zmínili. Ze Země v průběhu času vidíme až 59 procent měsíčního povrchu. Pokud by k libracím nedocházelo, pak by případný pozorovatel na povrchu Měsíce pozoroval Zemi stále nebo by ji neviděl vůbec. Nemohl by ale pozorovat východy a západy Země. Díky libracím ale je možné zhruba ze 1/7 celého měsíčního povrchu východy a západy Země na Měsíci pozorovat. Pro 3/7 povrchu Měsíce je Země stále nad obzorem a pro zbylé 3/7 vždy pod obzorem.

## 5.3 Kosmické divadlo - zatmění

Vesmír nám uchystal nejedno překvapení v podobě řady náhod nebo nepravděpodobných situací. Jednou z nich je i to, že pro pozorovatele na Zemi má Slunce i Měsíc stejný úhlový rozměr. Přestože je Měsíc 400krát menší než Slunce, je náhodou 400krát blíže k Zemi než Slunce. A navíc obíhá Měsíc kolem Země tak, že alespoň jednou za čas se dostane

<sup>6</sup>Na Měsíci najdete celkem dvacet moří a jeden oceán, takže náš výčet tak úplný není. Ale moře, která jsme neuvedli, jsou méně významná a hůře pozorovatelná.



Obrázek 5.12: Mapa přivrácené strany Měsíce. Zdroj: Sky Publishing Corp.

přesně na spojnici středů Země a Slunce. Pak se obyvatelé Země mohou těšit na úžasné kosmické divadlo. Nastane zatmění Slunce nebo zatmění Měsíce.

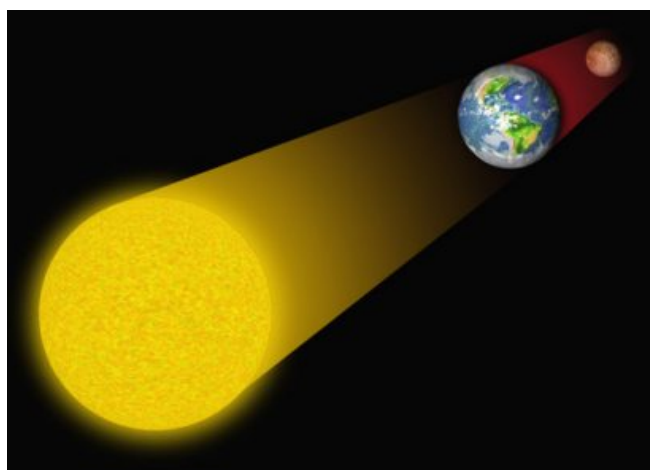
### 5.3.1 Zatmění Měsíce

Slunce ozařuje Zemi, která vrhá do prostoru kuželovitý stín v délce téměř 1.4 miliónu kilometrů. Jestliže do tohoto stínu vstoupí Měsíc, jinak řečeno, jestliže se Měsíc dostane na polopřímku Slunce – Země, nastane zatmění Měsíce. Náš souputník ale může vstoupit jen do tzv. polostínu (viz obrázek 5.15), pak nastane polostínové zatmění Měsíce. Pokud nevstoupí do plného zemského stínu celý, ale jen do něj „nakoukne“, hovoříme o částečném zatmění Měsíce. Kudy, jakou částí zemského stínu, Měsíc prochází, určuje i délku zatmění. Nejdelší může trvat až téměř dvě hodiny, při tom úplná fáze až tři čtvrtě hodiny. Během úplné fáze Měsíc z oblohy kupodivu nezmizí. Není to ale v rozporu s naším dřívějším tvrzením, že povrch Měsíce sám nezáří a že bez slunečního svitu by byl skrytý zraku pozorovatelů? Vysvětlení je poměrně snadné. Slunce není z Měsíce





Obrázek 5.13: Librace Měsíce. Nahoře: librace v délce, dobře patrná podle červeného bodu v Moři nepokojů. Zdroj: Steve Schimmrich. Dole: librace v šířce. Výborným orientačním bodem je kráter Tycho. Zdroj: John Chumack (vlevo), Frank Barrett (vpravo).



Obrázek 5.14: Schéma vzniku zatmění Měsíce. Zdroj: <http://www.aldebaran.cz>

v době úplné fáze úplného zatmění pozorovatelné, ale zářit nepřestalo. Jeho paprsky pronikají k Měsíci skrz zemskou atmosféru, kde se lámou zejména paprsky s dlouhou vlnovou délkou (z červeného konce slunečního spektra). Zemská atmosféra tak nejen umožní mírné nasvětlení Měsíce i v době, kdy je celý v geometrickém stínu Země, ale také určuje zabarvení Měsíce během zatmění. Podle polohy Měsíce v zemském stínu a stavu zemské atmosféry (např. při zaprášení při sopečných erupcích, velkých požárech) se může lišit zabarvení Měsíce od rudé, oranžové, hnědé až po namodralé nebo šedé odstíny. Každé zatmění měsíce je tak unikátní a stojí za to jej pozorovat. Naštěstí nastává pro jedno

konkrétní pozorovací stanoviště relativně často, protože je možné jej pozorovat z celé noční polokoule Země. Takže šance, že třeba Brno bude na té správné straně Země je veliká. K zatmění Měsíce dochází pouze za měsíčního úplňku, ale každý úplněk nena-



Obrázek 5.15: Vznik tří podob zatmění Měsíce. Zdroj: ČAS.

stane zatmění Měsíce. Je to dáno sklonem roviny oběžné trajektorie Měsíce vůči rovině oběžné dráhy Země. Jak již víme není příliš veliký, jen asi  $5^\circ$ . Rovina oběžné trajektorie Měsíce se vlivem gravitačních poruch způsobovaných především Sluncem stáčí. Do roka tak mohou nastat maximálně tři zatmění Měsíce, ale nemusí také nastat zatmění žádné. Přehled nejbližších úplných zatmění Měsíce viditelných z našeho území je uveden v tabulce 5.2.



Obrázek 5.16: Tři snímky z konce fáze úplného zatmění Měsíce 24. 10. 2004 (začíná fáze částečného zatmění).

### 5.3.2 Zatmění Slunce

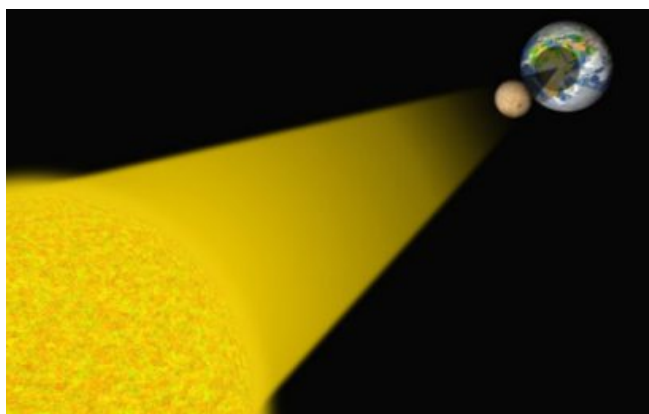
Zatímco zatmění Měsíce by se dalo přirovnat k úspěšnému poměrně často opakovanému představení, zatmění Slunce je vždy hitem sezóny. Můžete si přecíst úžasná líčení zatmění

Tabulka 5.2: Úplná zatmění Měsíce v letech 2012-2020 (viditelná z našeho území)

datum	začátek	začátek	maximum	konec	konec	viditelnost
datum	část. z.	úpl. z.		úpl. z.	část. z.	viditelnost
2015-09-28	01:07	02:11	02:47	03:23	04:27	celý průběh
2018-01-31	11:48	12:52	13:30	14:08	15:12	konec část. z.
2018-07-27	18:24	19:30	20:22	21:14	22:20	celý průběh
2019-01-21	03:33	04:41	05:12	05:43	06:51	celý průběh

Poznámky k tabulce: převzato z Kleczek (2002).

Slunce, jako například to od rakouského spisovatele Adalberta Stiftera<sup>7</sup> (1842), můžete vidět spoustu fotografií, filmů nebo videozáznamů, ale úplné zatmění Slunce musíte prostě zažít! Až jej uvidíte na vlastní oči, jistě mi dáte za pravdu, že v reálu je to nádherný a vzrušující zážitek.



Obrázek 5.17: Schéma vzniku zatmění Slunce.

Zprávy o pozorovaných zatměních Slunce patří mezi nejstarší astronomické záznamy vůbec. Jak jsme už uvedli v kapitole 1.2 v roce 2136 př.n.l. byli dokonce dva astronomové kvůli zatmění Slunce popraveni. Tehdy se věřilo se, že zatmění způsobuje zlý drak, který žere Slunce. Pokud budete včas na zatmění upozorněni, můžete zlého draka dostatečným hlukem zahnat. Ale právě to nešťastní astronomové Ho a Hsi neudělali. Dnes už víme, že tím pomyslným žrutem Slunce je náš Měsíc, který Slunce zastíní. Dochází k tomu, když je Měsíc v novu a navíc přesně na spojnici mezi středy Slunce a Země (obrázek 5.17). Měsíc vrhá na Zemi stín a jen v místě dopadu plného měsíčního stínu na zemský povrch je možné pozorovat úplné zatmění Slunce. Měsíční stín má samozřejmě tvar kruhu, ale Země se pod ním stále otáčí kolem své osy. Stín putuje po zemském povrchu a vytváří tzv. pás totality, odkud je možné úplné zatmění Slunce pozorovat (obrázek 5.18). Pás je široký do zhruba 250 kilometrů a dlouhý i několik tisíc kilometrů. Z toho je zřejmé, že šance, že například Brno bude v pásu totality pro nějaké zatmění je poměrně malá. Pokud tedy chceme úplné zatmění vidět živě, musíme se vydat na dalekou cestu a nebo

<sup>7</sup>Rodný dům Adalberta Stiftera najdete v Horní Plané na Šumavě.

si počkat na rok 2135, kdy bude úplné zatmění Slunce pozorovatelné z území České republiky. Z Brna bylo úplné zatmění Slunce pozorovatelné v minulém tisíciletí jen v letech 1415 a 1485 a další uvidí obyvatelé moravské metropole až v roce 2726. Za našeho života můžeme z Brna vidět alespoň částečná zatmění. V té chvíli se Brno nachází jen v oblasti kam dopadá měsíční polostín (viz obrázek 5.19). Někdy se ovšem Měsíc dostane na spojnici středů Země a Slunce zrovna v období, kdy je, díky výstřednosti své oběžné trajektorie, dále od Země, poblíž apogea. Pak je měsíční stín příliš krátký a nedosáhne až na Zemi. V takové situaci můžeme pozorovat prstencové zatmění Slunce (viz obrázek 5.19). Velmi vzácně nastává zatmění hybridní, kdy z některých míst na Zemi je vidět zatmění úplné a z některých jen jako prstencové.



Obrázek 5.18: Stín Měsíce zatemňuje při úplném zatmění Slunce část Země. Tento stín se po Zemi pohyboval rychlostí skoro 2000 km/h. Dva jasné body vlevo nahoře jsou Jupiter a Saturn. Snímek byl pořízen posádkou orbitální stanice Mir 11. srpna 1999. Zdroj: CNES.



Obrázek 5.19: Možné podoby zatmění Slunce. Zdroj: ČAS.

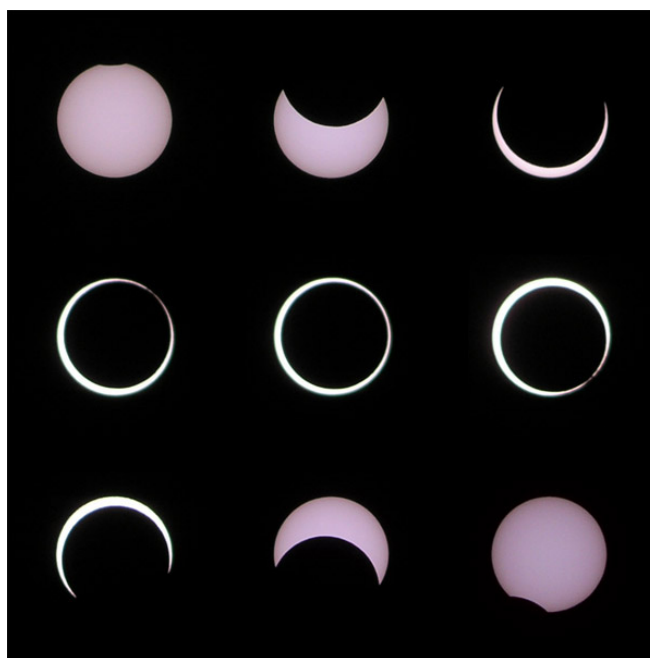
V době úplné fáze úplného zatmění Slunce, trvající až 7 a půl minuty, je sluneční

Tabulka 5.3: Úplná sluneční zatmění v letech 2012-2020

datum	UT	$R_{\odot}=1$ km	min:s	geogr. délka	geogr. šířka	viditelnost
2012-11-13	22:12	1,05	179 4:02	161,3° z. d.	39,9° j. š.	sev. Austrálie, již. Tichý oceán
2013-11-03	12:46	1,02	58 1:40	11,7° z. d.	03,5° s. š.	záp. Atlantik, Guinejský záliv, rovník. Afrika
2015-03-20	09:45	1,04	463 2:47	06,6° z. d.	64,4° s. š.	již. od Grónska, Špicberky, sev. pól
2016-03-09	01:57	1,04	155 4:09	148,8° v. d.	10,1° s. š.	záp. Indický oceán, Indonésie, Tichý oceán
2017-08-21	18:25	1,03	115 2:40	87,6° z. d.	37,0° s. š.	sev. Tichý oceán, USA, Atlantský oceán
2019-07-02	19:23	1,05	201 4:33	108,9° z. d.	17,4° j. š.	již. Tichý oceán, Chile, Argentina
2020-12-14	16:13	1,02	90 2:10	67,9° z. d.	40,3° j. š.	již. Tichý oceán, Argentina, již. Atlantik

Poznámky k tabulce: V prvním a druhém sloupci je uvedeno datum a čas (UT) největšího zatmění, tj. okamžiku, kdy osa měsíčního stínu prochází nejbliže ke středu Země. Třetí sloupec udává velikost zatmění, tj. kolikrát je měsíční disk větší než sluneční (úhlový poloměr slunce  $R_{\odot} = 1$ ), čtvrtý sloupec šířku pásu úplného zatmění (km), pátý maximální trvání úplného zatmění (min:s), šestý a sedmý geografickou délku a šířku místa s maximálním úplným zatměním a osmý území, z něhož je zatmění viditelné. Převzato z Kleczek (2002).

disk zcela zakryt a odstíněn Měsícem a můžeme pozorovat slabou zářící svrchní vrstvu atmosféry Slunce – korónu. Až do poloviny 19. století přitom převládal Keplerův názor, že jde o měsíční atmosféru nasvětlenou Sluncem. Teprve tehdy se však prokázalo, že se kotouč Měsíce pohybuje během zatmění na pozadí této atmosféry. Jedny z nejlepších snímků sluneční koróny na světě pořizuje profesor brněnského VUT, astronom Miloslav Druckmüller (2012).



Obrázek 5.20: Průběh prstencového zatmění Slunce v roce 2005 v Tunisku. Zdroj: J. Polák



Obrázek 5.21: Slunce v době úplného zatmění. Kolem temného měsíčního kotouče je vidět světlá struktura koróny. Snímek vznikl složením stovek jednotlivých snímků, které 11.7.2010 na atolu Tatakoto ve Francouzské Polynésii pořídili Miloslav Druckmüller, Martin Dietzel, Shadia Habbal, Vojtech Rušin.

### 5.3.3 Četnost a pozorovatelnost zatmění

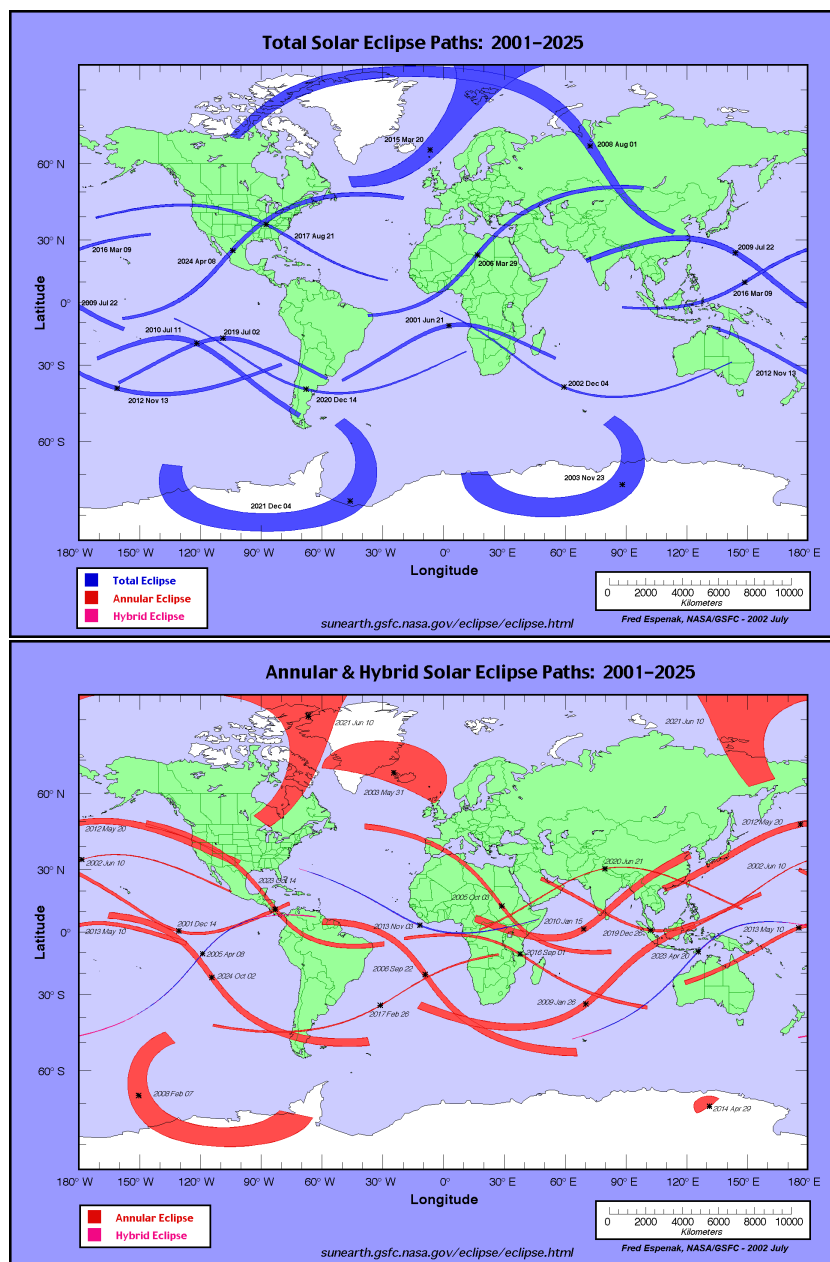
Pozorování zatmění Měsíce a Slunce patří k nejstarším astronomickým záznamům. Už jsme se zmiňovali o nešťastných čínských císařských astronomech z 22. století před naším letopočtem. Ale skutečných předpovědí zatmění jsme se dočkali až mnohem později. V 7. století př.n.l. objevili Chaldejci v Babylonii, že sled slunečních a měsíčních zatmění se opakuje s periodou, kterou nazvali „saros“. Trvá 18 let, 11 dnů (celkem 6585 dní), 7 hodin a 42 minut a během nich proběhne 43 slunečních zatmění, z toho 15 úplných, 15 částečných a 13 prstencových, a 29 zatmění Měsíce. Z uvedených počtů by se mohlo zdát, že máte větší šanci pozorovat zatmění Slunce, ale není to tak. Z jednoho místa na Zemi jsou častěji pozorovatelná zatmění Měsíce. O důvodech jsme již psali. Připomeňme, že úplné zatmění Měsíce lze pozorovat z celé noční polokoule Země, zatímco úplné zatmění Slunce jen z úzkého pásu totality.

První předpověď konkrétního zatmění Slunce se připisuje Tháletovi z Milétu v květnu roku 585 př.n.l. Tháles využil znalosti periody saros, určil, kdy k zatmění dojde, ale že jej také v místě svého pobytu pozoroval bylo, zdá se, spíše dílem náhody než skutečnou předpovědí.

Meeus & Mucke (1992) a Mucke & Meeus (1992) publikovali přehled měsíčních i slunečních zatmění v období téměř čtyř a půl tisíce let. V letech -2003 až +2526 zjistili 10 774 zatmění Slunce, z toho 6 886 úplných či prstencových, a 10 936 zatmění Měsíce, z nichž 3159 bylo úplných, 3810 částečných a 3967 polostínových.

## 5.4 Planety, trpasličí planety

Po Slunci a Měsíci jsou dalším pravidelně pozorovaným nejjasnějším objektem na obloze planety. Slovo *planeta* pochází z řeckého „planétés“, což znamená tulák nebo kolem bloudící, což docela pěkně vystihuje podstatu pohybu planet na hvězdné obloze, kde jakoby bloudí mezi hvězdami v okolí ekliptiky. Přestože už dlouho bylo astronomům



Obrázek 5.22: Pásy, odkud jsou pozorovatelná úplná, prstencová a hybridní zatmění Slunce. Zdroj: F. Espenak, NASA.

jasné, že ve vesmíru kolem jiných hvězd než Slunce obíhají také tělesa jako naše planety ve Sluneční soustavě, na jejich objev jsme čekali až do konce 20. století. Do roku 1995 na otázku, co si představujeme pod pojmem planeta, stačilo prostě uvést definici výčtem. Děti školou povinné tak odříkávaly planety Merkur, Venuše, Země, Mars, Jupiter, Saturn, Uran, Neptun, Pluto. S objevy planet mimo Sluneční soustavu, tzv. extrasolárních planet, zkráceně exoplanet vyvstala potřeba řádné definice. Ukázalo se, že definovat, co je vlastně planeta, je velmi složitý problém. V roce 2006 byla na valném shromáždění Mezinárodní astronomické unie v Praze přijata následující definice (IAU, 2006): "Planeta je vesmírné těleso, které:

- (a) obíhá kolem Slunce,
- (b) má dostatečnou hmotnost, aby se ustavila hydrostatická rovnováha a těleso nabylo přibližně kulového tvaru,
- (c) vyčistilo okolí své trajektorie.”

Jaký je ale zásadní nedostatek? Definice se týká jen naší Sluneční soustavy! Otázku exoplanet vůbec neřeší.<sup>8</sup> Dalším „problémem“ výše uvedené definice planety byl fakt, že Pluto přestalo být planetou! V současné době má tedy Sluneční soustava osm planet. Pluto bylo zařazeno mezi tzv. *trpasličí planety*, které jsou definovány takto (IAU, 2006): ”Trpasličí planeta je objekt Sluneční soustavy podobný planetě, který:

- obíhá okolo Slunce,
- má dostatečnou hmotnost, aby jeho gravitace překonala vnitřní síly a dosáhl přibližně kulového tvaru,
- během svého vývoje nepročistil své okolí, aby se stal v dané zóně dominantní, není satelitem.”

Seznam členů a kandidátů této podskupiny planet průběžně aktualizuje na svém webu M. Brown (2012). V červnu 2012 měl na seznamu trpasličích planet 8 objektů: Pluto, Makemake, Eris, Haumea, Orcus, Quaoar, Sedna, a 2007 OR<sub>10</sub>. Přidejme ještě devátý objekt, k nám nejbližší Ceres. V budoucnu přibudou pravděpodobně další tělesa, zejména velká transneptunická<sup>9</sup> tělesa. Brown uvádí k polovině roku 2012 dalších 30 objektů, které s vysokou pravděpodobností jsou trpasličí planety, a na seznamu je ještě přes pět set dalších objektů, které by mohly být v budoucnu označeny za trpasličí planety.



Obrázek 5.23: Trpasličí planety a kandidáti.

<sup>8</sup>My se budeme otázkou exoplanet podrobně zabývat v samostatné kapitole, kde uvedeme i jejich používanou, akceptovanou, ale stále nepřesnou definici.

<sup>9</sup>Transneptunická tělesa obíhají za drahou Neptunu.



### 5.4.1 Pozorování planet

Astronomové z doby před objevením dalekohledu a jeho využitím v astronomii znali 6 planet. Venuše, Jupiter, Saturn i Mars bývají na pozemské obloze poměrně jasné, někdy i nejjasnější jakoby hvězdné objekty. Merkur je pozorovatelný dost obtížně, jen za soumraku krátce po západu nebo před východem Slunce.<sup>10</sup> Lze ale planetu na noční obloze rozpoznat a odlišit ji od hvězd? Do jisté míry ano. Během chvilky nám pomohou některá omezení, ale bez hvězdných map bychom na potvrzení toho, že se jedná o planetu museli počkat delší dobu. Tak především planetu můžeme na obloze pozorovat jen v těsném okolí ekliptiky. Z České republiky tedy rozhodně nehledejme planetu v zenitu nebo severním směrem. Navíc, jak už jsme uvedli, některé planety jsou velmi výrazné, zejména to platí pro Jupiter a Venuši, takže v době jejich největší jasnosti si je prakticky s ničím nespletete. Planety se ale od jasných hvězd odlišují také tím, že svítí klidnějším, stálým světlem, zatímco obrazy hvězd se mihotají, podléhají scintilaci. Důvod je zřejmý. Planety vidíme prostýma očima jako světelné body podobně jako hvězdy. Jenže hvězdy jsou skutečné bodové zdroje, zatímco planety malé plošky, kotoučky pod rozlišovací schopností oka. A na plošném objektu se změny jasnosti působené neklidem ovzduší průměrují, vyrovnávají. I planeta tedy za silného neklidu atmosféry může jevit scintilaci, ale vždy méně než hvězda. Někdy vám ale ani všechny uvedené rady nepomohou. Pro definitivní potvrzení, že pozorovaný objekt je planeta byste jej pak museli sledovat po řadu dní, či spíše týdnů a sledovat jeho pohyb na hvězdné obloze. Dnes je ale situace mnohem snazší než v minulosti, vždyť stačí i aplikace v chytrém telefonu namířené na oblohu a na displeji můžete sledovat identifikaci a popis objektů pozorované části oblohy včetně planet.

Pokud tedy odhalíte na obloze planetu, zkuste se zaměřit na zajímavosti, detaily, které na ní můžete pozorovat. U Venuše si povšimněte jejích fází (viz obrázek 5.24), které se staly v minulosti důkazem heliocentrického uspořádání naší Sluneční soustavy (viz kapitola 11.5). Venuši můžeme pozorovat jen zvečera jako Večernici nebo ráno jako Jitřenku. Je to po Slunci a Měsíci třetí nejjasnější objekt naší oblohy a také třetí a poslední objekt, který za temných nocí v době, kdy má nejmenší hvězdnou velikost, osvítlí předměty natolik, že vrhají stín.

Vnější planety, tedy vzdálenější od Slunce než Země mohou být pozorovatelné i celou noc. K jejich pozorování se už hodí použít nějaký dalekohled. Na Marsu jsou pozorovatelné světlé a tmavé skvrny. Pozorovatelé s připojením na internet mohou využít applet na stránkách časopisu Sky&Telescope Mars Profiler<sup>11</sup>, který ukazuje jakou část povrchu Marsu můžete právě vidět ve vašem dalekohledu.

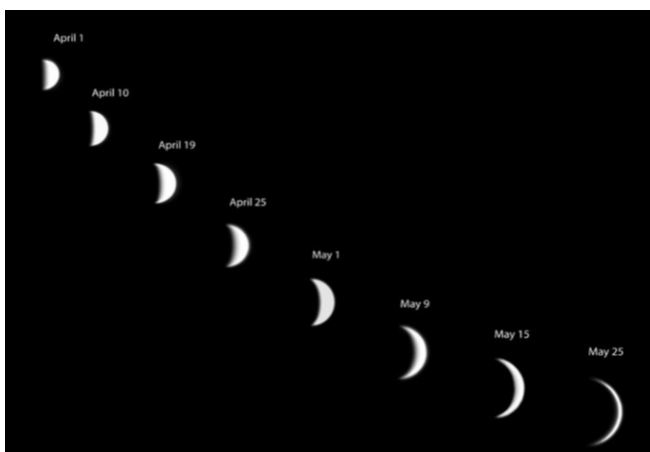
Jupiter zaujme především pásovou strukturou pozorovaných vnějších vrstev (obrázek 5.26) a pak soustavou měsíců, z nichž čtyři největší, tzv. Galileovské družice Io, Europa, Ganymed a Kalisto, jsou dobře pozorovatelné i menšími přístroji.

Poslední z prostým okem viditelných planet, Saturn, je krasavec. Jeho prstence jsou v dalekohledu opravdu nádherné. Vidět je i největší Saturnův měsíc Titan.

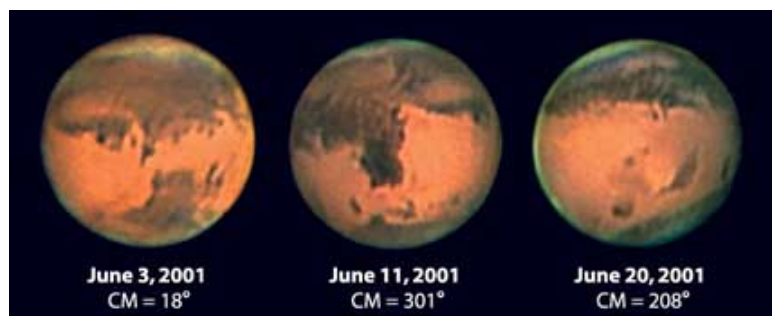
Uran a Neptun jsou sice planety větší než naše Země, ale jsou od nás velmi daleko, takže při pozorování běžnými dalekohledy o průměru 20 cm je uvidíme jen jako nazeleňalý, resp. namodralý malý kotouček. Chceme-li vidět detaily, musíme od dalekohledu

<sup>10</sup>Traduje se, že dokonce ani Johannes Kepler planetu Merkur nepozoroval za celý svůj život.

<sup>11</sup><http://www.skyandtelescope.com/observing/objects/javascript/mars>



Obrázek 5.24: Fáze Venuše v dubnu a květnu 2004. Foto: John Rummel.



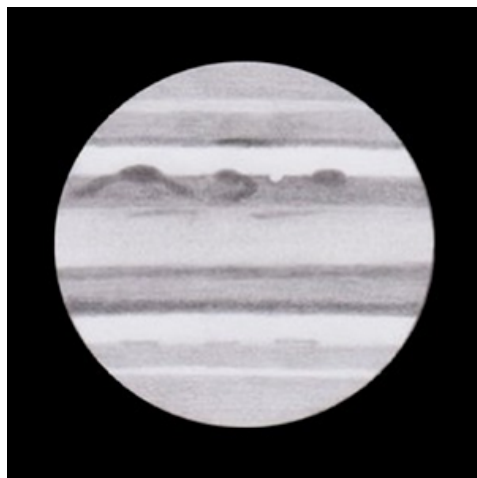
Obrázek 5.25: Snímky Marsu pořídil Ed Grafton pomocí CCD kamery SBIG ST6 a dalekohledu Celestron 14". Každý snímek na obrázku je výsledkem složení snímků přes červený, zelený a modrý filter. CM označuje délku centrálního meridiánu Marsu. Jih je nahoře. Nápadná tmavá skvrna poblíže středu na snímku z 11. června je Syrtis Major.

k počítači a k archivu snímků kosmických sond.

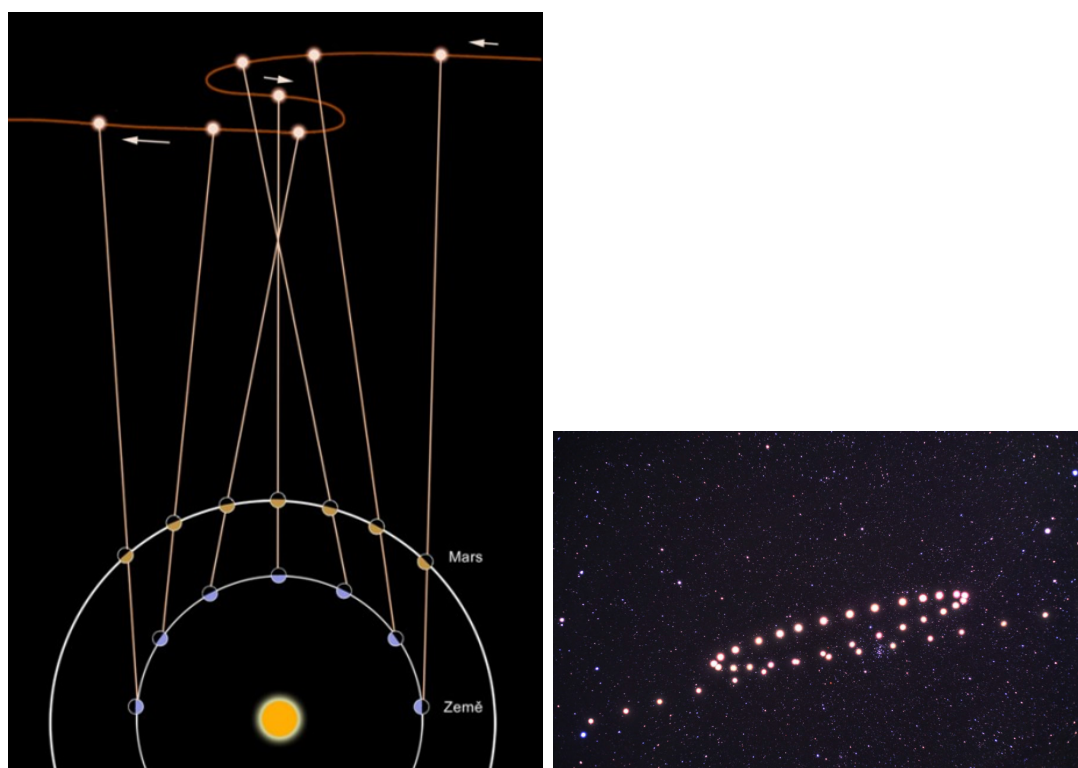
## 5.4.2 Tanec planet

V předchozí kapitole jsme uvedli, že jeden z možných důkazů, že pozorovaný objekt je planeta, je jeho dlouhodobé sledování, zejména jeho pohybu na hvězdné obloze, vůči vzdálenému hvězdnému pozadí. Samozřejmě náš objekt za tu dobu mnohokrát vyjde nad obzor, bude se pohybovat oblohou a pak zapadne. Jeho pohyb po obloze bude každý den přibližně stejný. Na hvězdné obloze se za jeden den posune jen velmi málo. Za delší období ale zjistíme, že pouť planety mezi hvězdami není přímočará. Planety na hvězdné obloze tvoří kličky nebo smyčky. Je to důsledek vzájemného pohybu Země a pozorované planety kolem Slunce a samozřejmě také volby vztažné soustavy vůči níž budeme pohyb planety popisovat. Konkrétní situace při dlouhodobém sledování Marsu je zobrazena na obrázku 5.27.

V kapitole 3.3.1 jsme si všímali rozdílu v délce dne, pokud jej odvodíme od rotace planety vztažené vůči hvězdám nebo vůči Slunci. Planety se samozřejmě nejen otáčejí kolem své osy, ale také obíhají kolem Slunce. Tento orbitální pohyb můžeme



Obrázek 5.26: Kresba Jupiteru. Převzato z <http://www.astro.cz>.



Obrázek 5.27: Vlevo: schematický náčrt vzniku smyček planet na hvězdné obloze. Převzato z Astronomického koutku. Ota Kéhar. Vpravo: Smyčka planety Mars v souhvězdí Raka v období říjen 2009 až květen 2010. Foto Tunc Tezel.

vztáhnout opět ke hvězdám. Takovou oběžnou dobu, za kterou se planeta dostane na stejné místo na hvězdné obloze, označíme *siderická oběžná doba*. Pokud budeme popisovat polohu planety vůči Slunci nebo třeba jiné planetě, půjde o dobu mezi dvěma stejnými po sobě následujícími vzájemnými postaveními. Například u vnitřních planet Merkuru a Venuše to může být doba, za jakou se planeta dostane opět do stejného směru

od Země jako je Slunce. V tom případě hovoříme o *synodické oběžné době*. Mezi siderickou a synodickou oběžnou dobou lze najít jednoduchý vztah obdobný vztahu mezi délkou synodického a siderického dne. Pro odvození je nutné si uvědomit, že se budeme pohybovat ve vztažné soustavě s počátkem ve Slunci. V ní urazí Země za jeden den úhlovou vzdálenost  $360^\circ/P_Z$ , kde  $P_Z$  je siderická doba oběhu Země. Obdobně zvolená planeta se siderickou oběžnou dobou  $P_p$  urazí za jeden den úhlovou vzdálenost  $360^\circ/P_p$ . Jejich vzájemná úhlová vzdálenost od nějakého počátečního postavení se bude měnit o  $|360^\circ/P_Z - 360^\circ/P_p|$ . Za synodickou oběžnou dobu  $S$  tento rozdíl naroste na  $360^\circ$ . Jednoduchou úpravou pak dostaneme

$$\left| \frac{1}{P_Z} - \frac{1}{P_p} \right| = \frac{1}{S}. \quad (5.1)$$

### 5.4.3 Aspekty

Pro určování synodických oběžných dob planet se zpravidla používá významná poloha planety vůči Slunci a Zemi, tzv. **aspekt**. Jinak řečeno aspekt je zpravidla postavení planety, kdy její *elongace*<sup>12</sup>, tedy úhlová vzdálenost od Slunce (obecně jiného zvoleného tělesa) nabývá výjimečných hodnot. Nulovou elongaci, kdy jsou Slunce a sledovaná planeta, případně dvě planety od Země stejným směrem, označujeme jako **konjunkce**<sup>13</sup>. Tehdy mají Slunce a planeta, resp. obecně dvě různá sledovaná tělesa, stejnou rektascenzi. Pokud jsou sledovaná tělesa v opačných směrech, rozdíl jejich rektascenzí je  $\Delta\alpha=180^\circ = 12^h$ , hovoříme o **opozici**<sup>14</sup>. Z obrázku 5.28 je zřejmé, že tato situace neplatí pro vnitřní planety. Ty nemohou být pro pozorovatele na Zemi nikdy v opozici se Sluncem. Merkur a Venuše se pro téhož pozorovatele nedostanou ani do kvadratury se Sluncem, kdy je elongace  $90^\circ$ . Zpravidla se u nich udává maximální elongace, tedy maximální úhlová vzdálenost od Slunce. Pro Merkur je to přibližně  $18^\circ$  až  $28^\circ$  a pro Venuši  $45^\circ$  až  $48^\circ$ <sup>15</sup>. Z toho zcela jasně pro pozemského pozorovatele vyplývá, že pokud se třeba Merkur nemůže vzdálit od Slunce o více než  $28^\circ$ , pak bude vždy na obloze jen za soumraku krátce po západu Slunce nebo před jeho východem. U maximálních elongací i kvadratur zpravidla připojujeme přívlástek východní nebo západní. Pokud bude planeta ze Země pozorovatelná východně od Slunce, bude ve východní elongaci. Znamená to, že bude vycházet po Slunci a bude pozorovatelná nejlépe večer po západu Slunce.

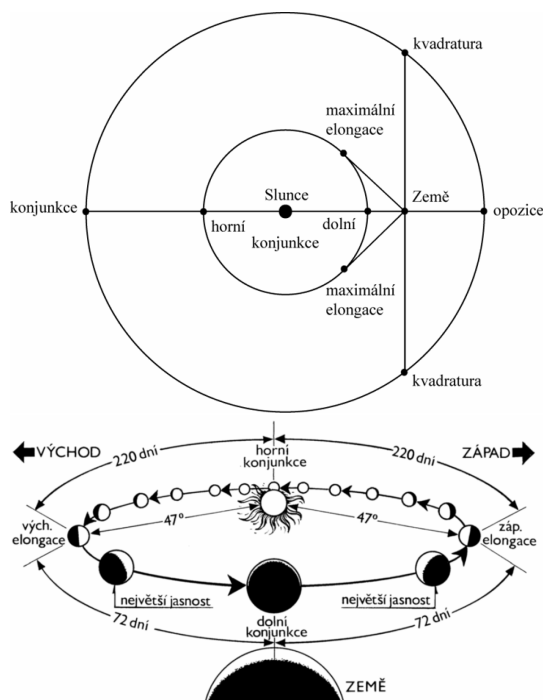
Některé z významných konjunkcí v následujících letech

<sup>12</sup>Termín pochází z latinského *elongatio*, což znamená prodlužovat.

<sup>13</sup>Slovo konjunkce vychází opět z latiny, kde *coniunctio* znamená spojení.

<sup>14</sup>Slovo „opozice“ asi není třeba představovat. Slýcháme jej každý den v politických zprávách, ale samotný termín vychází z latiny, kde *oppositus* má význam „naproti postavený“

<sup>15</sup>Rozmezí je uváděno proto, že se oběžná trajektorie planet stáčí a maximální elongace se v průběhu času mění.



Obrázek 5.28: Aspekty.

Datum a čas	Planety	Poloha vůči Slunci
20.zář 2013 0:14	Venuše 3°45' jižně od Saturnu	41.7° východně
1. července 2015 14:17	Venuše 24' jižně od Jupiteru	42.2° východně
17. října 2015 13:50	Mars 24' severně od Jupiteru	39.8° západně
26. října 2015 08:15	Venuše 1°04' jižně od Jupiteru	46.4° západně
3. listopadu 2015 16:09	Venuše 42' jižně od Marsu	46.2° západně
9. ledna 2016 03:57	Venuše 5' severně od Saturnu	36.3° západně
27. srpna 2016 21:48	Venuše 4' severně od Jupiteru	22.3° východně
5. října 2017 13:26	Venuše 13' severně od Marsu	23.4° západně

## 5.5 Planetky

Ve Sluneční soustavě se kromě planet a trpasličích planet nacházejí i menší objekty, kterým říkáme planetky<sup>16</sup>. První planetku Ceres objevil 1. ledna 1801 Giuseppe Piazzi<sup>17</sup>. Od roku 2006 a již zmíněné definice planet a trpasličích planet se Ceres přesunul do kategorie trpasličích planet. Mezi planetky nyní řadíme malá tělesa větší než zhruba 100 metrů<sup>18</sup>) obíhající kolem Slunce (případně jiné hvězdy) většinou nepravidelného tvaru. Ve Sluneční soustavě se nacházejí zejména v hlavním pásu mezi Marsem a Jupiterem a dále za drahou Neptuna. Některé ale mohou i křížit dráhu Země a dostávat se ke

<sup>16</sup>Při objevech prvních planetek se zdálo, že jde o planety. Záhy se zjistilo, že jsou to tělesa příliš malá a začala být označována v angličtině „minor planet“. Odtud český termín planetky. Stále se ale můžeme setkat i se staršími názvy asteroid (hvězdě podobný), planetoid (těleso podobné planetě).

<sup>17</sup>Podle planetky byl později pojmenován prvek cer (cerium).

<sup>18</sup>Menší tělesa se označují jako meteoroidy.

Slunci blíže než naše planeta.

Pozorování planetek se v České republice věnují zejména dva týmy odborníků, kteří se jednak podílejí na monitoringu a jednak objevují nové planetky a určují nebo zpřesňují trajektorie těch známých a jednak studují vlastnosti planetek, z toho, jak se mění jejich jasnost v důsledku rotace jejich nepravidelného těla. Jen výjimečně mohou být některé planetky viditelné malými dalekohledy (například Vesta), ale detaily povrchu nevidíte.

## 5.6 Komety

Mezi nejpůsobivější kosmické objekty pozorovatelné na naší obloze nepochybně patří komety<sup>19</sup>. V minulosti je lidé považovali za zlé znamení, které zvěstovalo nemoci, bídu, utrpení nebo války. Přesto se ale časem kometa dostala i do betlémů, kde naopak zvěstovala narození spasitele. Historie zápisů o kometách a výkladů jejich objevů je opravdu zajímavé a někdy i dost dobrodružné čtení, vždyť nejstarší zápisy jsou staré několik tisíciletí. Současné zápisy jsou většinou o dost prozaičtější.

Pro komety je typický jejich dlouhý zahnutý ohon tvořený prachovými částicemi uvolňovanými z povrchu jádra komety, když se přiblíží ke Slunci. Pokud jsou příhodné podmínky, kometa je dostatečně veliká, přiblíží se ke Slunci a současně prolétá kolem Země, pak může na pozemské obloze její ohon dosáhnout až několik desítek stupňů. Někdy je pozorovatelný i přímý plynný ohon, jako v případě komety Hale-Bopp (viz obrázek 5.29 vlevo). Slabší komety v dalekohledu připomínají mlhovinu.

Objevit nějakou kometu vyžadovalo dříve velkou trpělivost a jistou dávku štěstí. Nejúspěšnější lovci komet jsou Rob McNaught, který má na svém kontě dosud 72 objevů (stav k létu 2012) a Gene a Carolyn Shoemakerovi s 32 kometami. Objevitelé jsou za svou námahu odměněni tím, že kometa nese jejich jméno. Mezi kometami tak můžeme najít i „české“ zástupce – komety Kohoutek, Mrkos, Tichý a další. Ale v dnešní době už objevitelé nemusí trávit mnoho hodin u dalekohledu pod hvězdnou oblohou. Stačí počítač a internet. Sluneční družice SOHO snímkuje Slunce a na snímcích se vyskytnou občas i neznámé komety. A protože snímky jsou k dispozici na internetu v reálném čase, může takto objevovat komety vlastně kdokoli. Družice SOHO se stala nejúspěšnějším lovcem komet. Kometu SOHO s pořadovým číslem 2000 objevil Marcin Kusiak, student astronomie v Krakově 26. 12. 2010. V červenci 2012 už seznam obsahoval 2337 komet. Ale komety se nyní nalézají i na snímcích v rámci různých přehlídkových projektů, například LINEAR survey hlásí do léta 2012 212 komet, Catalina Sky Survey 97 komet a podobně.

## 5.7 Meteoroidy, meteory, meteority

Drobná tělíška, doslova vesmírný odpad, nejsou sice přímo pozorovatelná, ale mohou se postarat o pěknou podívanou. Máme na mysli meteoroidy, tělesa, která jsou menší než 100 metrů a značně větší než atomy a molekuly<sup>20</sup>. Drouboučkových milimetrových me-

<sup>19</sup>Původ slova *kometa* lze hledat v řečtině, kde „kométés“ znamená dlouhovlasý.

<sup>20</sup>O přesném vymezení termínu meteoroid se stále diskutuje. Jako spodní hranice se uvádí 10 nebo 100  $\mu\text{m}$ , jako horní 10 m, 50 m, případně 100 m, což je hranice, od níž považujeme tělesa ve Sluneční



Obrázek 5.29: Vlevo: Kometa Hale-Bopp s modrým plynovým a nažloutlým prašným ohonem. Foto: Alessandro Dimai a Davide Ghirardo, 16. 3. 1998. Vpravo: Kometa 17P/Holmes s obří komou. Foto: AnnMarie Jones, Aberllefenni, Wales, UK (Nov. 5, 2007).

teoroidů narazí do Země denně řádově milióny. Setkání s většími objekty jsou naštěstí vzácná, ale dochází k nim. Poměrně nedávno 4. února 2011 například došlo k takové události. Objekt 2011 CQ<sub>1</sub> o velikosti 1 m byl objeven pouhých 14 hodin před těsným průletem kolem Země, ve vzdálenosti pouhých 5840 km nad zemským povrchem. Ke střetu tedy nedošlo, ale byla pozorována dosud nejvýznamnější změna trajektorie kosmického tělesa, kdy se směr změnil o 60°.

Jiný objekt 2008 TC<sub>3</sub> o velikosti 4 m byl objeven 6. října 2008 a ukázalo se, že je na kolizním kurzu se Zemí. Ke srážce došlo následujícího dne a meteoroid vybuchl ve výšce 37 km nad Súdánem (viz obrázek 5.31). Přes počáteční skepsi se dokonce podařilo najít i úlomky, které dopadly na zemi, tzv. meteority. Jedná se tak o první případ, kdy bylo těleso pozorováno před vstupem do zemské atmosféry jako meteoroid, jeho průlet atmosférou jako meteor, výbuch a následně byly nalezeny meteority na zemi.

Pozorovat na obloze takový úkaz je ale něco zcela mimořádného. Většina meteoroidů, které se setkávají se Zemí má průměr řádově milimetry. Takové tělísko způsobí při vstupu do atmosféry světelný efekt, kterému říkáme **meteor**. Při průletu atmosférou ve výškách 75 - 120 km excituje a ionizuje molekuly atmosféry a právě ty vidíme jako meteor<sup>21</sup> Pouhýma očima vidíme meteory způsobené tělísky o hmotnostech řádově miligramy a větších. Pokud má meteoroid rozměr kolem 10 cm, způsobí velmi jasný meteor, jasnější

soustavě za planetky.

<sup>21</sup>Lidové označení „padající hvězda“ s hvězdami samozřejmě nemá nic společného.



Obrázek 5.30: Kometa McNaught na snímku Miloslava Druckmüllera z 28. ledna 2007.



Obrázek 5.31: Výbuch meteoroidu 2008 TC<sub>3</sub> nad súdánskou pouští. Snímek je z videozáznamu, který na mobilní telefon pořídil Mohamed Elhassan Abdelatif Mahir.

než Venuše v době své největší jasnosti (-4 mag), který se označuje jako bolid<sup>22</sup>. Jsou tak jasné, že je možné je pozorovat i ve dne (viz obrázek 5.32 vlevo).

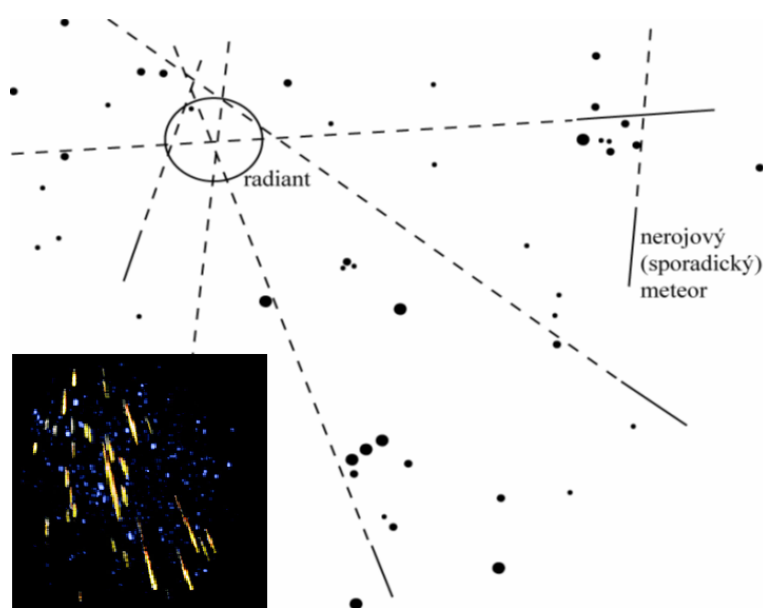
Meteoroidy se mohou připlést Zemi do cesty víceméně nahodile, pak uvidíme osamocené, sporadický meteor. V trajektorii Země je ale několik míst, kde se Země setkává s celým houfem drobných částíček. Pak můžeme sledovat celý roj meteorů. Při průchodu

<sup>22</sup>Původ slova můžeme hledat v řečtině, kde „bolídos“ značí metací střelu.





Obrázek 5.32: Vlevo: Denní bolid nad Jižním Walesem zachytil na konci září 2003 Jonathan Burnett. Vpravo: Jeden z bolidů meteorického roje Leonidy v listopadu 1999. Snímek pořídil Arne Danielsen.



Obrázek 5.33: Radiant meteorického roje. Na vloženém malém snímku je zachycen roj Alfa-Monocerotid v roce 1995. Zdroj NASA.

Země meteorickým rojem můžeme zpozorovat, že rojové meteory vyletují z jednoho místa hvězdné oblohy, tzv. radiantu roje. Podle polohy radiantu v určitém souhvězdí pak označujeme celý roj, například Leonidy, Orionidy nebo snad nejznámější Perseidy, které jsou pozorovatelné každý rok kolem 11. srpna. Shluky částic, které způsobují meteorické roje, pocházejí z komet. Ty se totiž při cestě vnitřní částí Sluneční soustavy pomalu rozpadají a ve své trajektorii zanechávají drobné zbytky. Pokud se Země dostane do míst, kudy prolétala zdrojová kometa nedávno, může být množství částic vysoké a pak může být intenzita roje tak velká, že mluvíme o meteorickém dešti. Poslední opravdu intenzivní a krásný má na svědomí kometa Tempel-Tuttle, která dotuje roj Leonid. V roce 1999 bylo jejich pozorování opravdovým zážitkem, frekvence meteorů byla až několik tisíc za hodinu a řada pozorovaných meteorů byla bolidy.



Obrázek 5.34: Meteorický déšť Leonid v roce 1833 na dobové kresbě (zdroj: Samuel J. Wormley) a snímek téhož roje Leonidy, který během maxima 16.11.1998 pořídil Juraj Toth na slovenské observatoři v Modre.

## 5.8 Umělé družice

V době počátku kosmického věku sledovaly přelety prvních družic nadšené davy pozorovatelů. Dnes je v záplavě letadel a na přesvětlené městské obloze vnímá jen málokdo. Nicméně občas se stane, že je některá družice a nebo dokonce přímo Mezinárodní kosmická stanice ISS mimořádně jasná a lze ji dobře pozorovat. Družice vypadají na noční obloze jako jasné body, které se tiše sunou mezi hvězdami. Je zřejmé, že to, co pozorujeme v takovém případě, není vlastní světlo svítící z družice na Zemi, ale sluneční světlo odražené od lesklého povrchu družice. Někdy tak může družice díky rotaci „svítit“ i přerušovaně. Občas je možné zachytit stopu družice i na snímku při fotografování objektů hvězdné oblohy (viz obrázek 5.35). Polohy družic a jejich pozorovatelnost v daném místě na Zemi je možné zjistit na <http://www.heavens-above.com/>.

## Doplňující literatura

- Brown, M. 2012, <http://www.gps.caltech.edu/~mbrown/dps.html>  
 Druckmüller, M., 2012, <http://www.zam.fme.vutbr.cz/~druck/>  
 International Energy Agency 2011, Key World Energy Statistics 2011, 82 str.  
 Gabzdyl, P., 1997, Měsíc v dalekohledu, Hvězdárna Valašské Meziříčí, 68 str.  
 Gabzdyl, P., 2002, Pod vlivem Měsíce. Hvězdárna a planetárium M. Koperníka v Brně.  
 Gabzdyl, P., 2006, Měsíc. Aventinum.  
 Hopkin, M., 2007, Nature, doi:10.1038/news.2007.261  
 IAU, 2006, General Assembly (International Astronomical Union), Praha [http://www.iau.org/static/resolutions/Resolution\\_GA26-5-6.pdf](http://www.iau.org/static/resolutions/Resolution_GA26-5-6.pdf)  
 Kleczek, J., 2002, Velká encyklopedie vesmíru. Academia, 584 str.



Obrázek 5.35: Mezinárodní kosmická stanice (ISS) na večerní obloze nad městečkem Tomahawk, Wisconsin, USA 9. dubna 2002 (kolem 9 pm CDT). Na snímku s 30s expozicí se ISS posunuje na východ (doprava) souhvězdím Kasiopeja. Pod ním je vidět kometa Ikeya-Zhang s malým ohonem. Foto: Carol Lakomiak.

- Meeus, J., & Mucke, H. 1992, Canon of lunar eclipses: -2002 to +2526., by Meeus, J.; Mucke, H.. Astronomisches Büro, Wien (Austria), 166 str
- Mucke, H., & Meeus, J. 1992, Canon of solar eclipses: -2003 to +2526., Astronomisches Büro, Wien (Austria), 508 str.
- Phillips, T, 2005, NASA Science News, <http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa>
- Rükl, A. 1991, Atlas Měsíce, Aventinum, 224 str.
- Sadil, J., 1953, Orbis, 241 str.
- Stifter A., 1842, Zatmění Slunce 8. července 1842 ve Wiener Zeitschrift für Kunst, Literatur und Mode, červenec 1842. Plný překlad J. Mědílek v katalogu Státní galerie výtvarného umění v Náchodě 1996. Zkrácený překlad I. Vykoupilová v Z. Pokorný: Vademecum, Brno 2006

## 6 Informace z vesmíru

Na první pohled by se mohlo zdát, že informace o okolním vesmíru získáváme jen a pouze prostřednictvím světla, respektive celého spektra elektromagnetického záření. Jenže to úplná pravda není. Vždyť naše Země je neustále vystavena i dalším atakům kosmického prostředí. Na Zemi dopadá nejen záření z různých vesmírných objektů, ale také kosmické záření, Země je pod vlivem slunečního větru, případně proudu částic, gravitačních vln, střetává se s meteoroidy. Studium těchto kosmických posílů provádíme nejen rozbořením záření či detekcí vln. Můžeme analyzovat i vzorky v kosmu, na jiných kosmických tělesech a nebo dokonce vzorky dopravit k analýze do pozemských laboratoří. Prostě škála informací z vesmíru a jejich nositelů je rozhodně bohatší než by se mohlo na první pohled zdát.

Naše povídání o toku informací z vesmíru začneme od těch „nejtěžších vah“, tedy meteoritů.

### 6.1 Meteority

Jak víme z předchozí kapitoly, meteority jsou pozůstatky těles, která se střetla se Zemí, přežila průlet naší atmosférou a dopadla na zemský povrch. Původ materiálu, který se k nám takto dostává je opravdu různý. Zdrojem je nejen „smetí“ z okolí Země, ale jsou doložené i meteority z Měsíce, Marsu nebo planetek například Vesta, Božněmcová, Parthenope, Thetis, Amphitrite (McSween, 1999).

Dnes se udává téměř dvě stovky zdokumentovaných měsíčních meteoritů, které v součtu představují vzorky měsíčních hornin o hmotnosti několika desítek kilogramů. Přesný přehled lze najít na [http://meteorites.wustl.edu/lunar/moon\\_meteorites\\_list\\_alumina.htm](http://meteorites.wustl.edu/lunar/moon_meteorites_list_alumina.htm).

Meteority z Marsu jsou vzácnější. Databáze meteoritů vedená mezinárodní Meteorickou společností<sup>1</sup> uváděla k 5. říjnu 2012, že je registrováno 44342 pojmenovaných meteoritů a 10818 meteoritů s provizorními jmény, z toho 5627 meteoritů je s úplným popisem. V těchto číslech se doslova ztrácí několik desítek meteoritů z Marsu. I když jeden z nich se skutečně proslavil. Byl nalezen v Antarktidě v roce 1984 a byl nejstarším nalezeným meteoritem z Marsu (viz obrázek 6.1). Na Zemi dopadl před 13 tisíci lety, ale z domovské planety byl vymrštěn už před zhruba 16 milióny let. Při jeho podrobném zkoumání byly objeveny struktury připomínající „nanofosilie“, které by mohly být důkazem mikrobakteriálního života na Marsu před 3,6 miliard lety. Jenže jejich přítomnost lze vysvětlit i anorganickými procesy nebo kontaminací na Zemi.

Většina meteoritů pochází z nalezišť v Antarktidě<sup>2</sup>. Ale ani v České republice není člověk bez šance. Většinou ale jde o nález po předchozím pozorování meteoru nebo záznamu průletu tělesa atmosférou a následném vypočtení místa dopadu. První takový případ na světě se podařil československým vědcům v roce 1959 pod vedením Zdeňka Ceplechy. Od Příbramského meteoritu se podobná událost podařila mnohokrát. Jedním z posledních případů je meteorit Košice z února 2010. Při pátrací akci v okolí Košic bylo

<sup>1</sup>Jedná se o Meteoritical Bulletin Database v péči The Meteoritical Society, společnosti pro meteority a planetární vědy (<http://meteoriticalsociety.org>).

<sup>2</sup>Detaily lze najít na <http://curator.jsc.nasa.gov/antmet/index.cfm>.



Obrázek 6.1: Meteorit ALH84001 z Marsu. Vpravo je detail jemných struktur připomínajících zárodky života z elektronového mikroskopu. Převzato z wikipedia

nalezeno 70 úlomků meteoritu<sup>3</sup>. Čeští astronomové patří v meteorické astronomii ke světové špičce. Znovu to prokázali například v roce 2011, kdy se jim podařilo po dvaceti letech od pozorování bolidu Benešov objevit tři úlomky původního tělesa (Spurný et al., 2012)<sup>4</sup>.

Nalezené meteority jsou tříděny podle poměrného zastoupení křemičitanů a ryzích kovů. Odhaduje se, že 96% všech meteoroidů, které zasáhnou Zemi, tvoří kamenné meteority, 3% železné a 1% železokamenné. V některých kamenných meteoritech nalézáme malá kulovitá zrníčka s průměrem do 5 mm, zvaná chondry nebo chondrule. Podle jejich výskytu a poměru různých chemických prvků pak kamenné meteority rozdělujeme ještě na chondrity, uhlíkaté chondrity a achondrity. Zastoupení meteoritů z množství pozorovaných pádů odpovídá jejich zastoupení v okolí Země. Statistika nálezů je ale odlišná. V běžné krajině jsou železné meteority nápadné dlouho po pádu a tvoří více než čtvrtinu nalezených meteoritů. Na antarktických bílých pláních to ale neplatí, tam je každý kámen na bílém sněhu stejně nápadný.

Při studiu meteoritů se už nemusíme omezovat jen na ty pozemské. V lednu 2005 byl oznámen objev prvního meteoritu na jiném kosmické tělese. Vozítko Opportunity našlo na Marsu železný meteorit<sup>5</sup>.

## 6.2 Dovoz vzorků

V dnešní době už při studiu vzorků hornin z kosmických těles nejsme jen odkázáni na to, co nám lakonicky řečeno prostě spadne na hlavu. Vzorky jiných vesmírných těles už na Zemi z kosmu dovážíme. Samozřejmě nejvíce takových vzorků je z Měsíce. Šest posádek projektu Apollo přivezlo v letech 1969–1972 2 415 vzorků o hmotnosti 382 kg. Tehdy soupeřící sovětská kosmonautika získala díky třem automatickým družicím Luna celkem 0.32 kg vzorků.

<sup>3</sup>Největší z úlomků o hmotnosti 2,1 kg našla studentka MU Tereza Krejčová. Podrobnosti na [http://www.ta3.sk/l2\\_sk.php?part=news\\_events&cont=meteorit](http://www.ta3.sk/l2_sk.php?part=news_events&cont=meteorit)

<sup>4</sup>Podrobnosti na [http://www.rozhlas.cz/meteor/prispevky/\\_zprava/bolid-benesov-vydal-tajemstvi-video--1061668](http://www.rozhlas.cz/meteor/prispevky/_zprava/bolid-benesov-vydal-tajemstvi-video--1061668).

<sup>5</sup>Detaily o nálezu meteoritu na Marsu na <http://marsrovers.jpl.nasa.gov/newsroom/pressreleases/20050119a.html>.



Obrázek 6.2: Vlevo: Chondrit s patrným výskytem chondrulí a kovových prvků. Autorem snímku je H. Raab. Vpravo: Detail chondrulí z meteoritu Grassland, L4. Oba snímky jsou převzaty ze serveru wikipedia.



Obrázek 6.3: Železný meteorit z Campo del Cielo. Převzato z wikipedia.

Po éře Apolla se americká NASA pokusila o sběr vzorků v kosmickém prostoru a návrat na Zemi až po dlouhé prodlevě. V roce 2001 odstartovala sonda Genesis, která měla po tři roky sbírat částice slunečního větru. Bohužel návratovému pouzdru se neotevřel padák a modul byl silně poškozen. V roce 1999 odstartovala sonda Stardust, jejíž hlavním úkolem bylo uskutečnit výzkum komety Wild-2 a provést sběr prachových částic v meziplanetárním prostoru a při průletu kómou komety a dopravit je k analýze na Zemi. Tentokráte se vše zdařilo a návratové pouzdro přistálo na Zemi v lednu 2006<sup>6</sup>. O rok dříve přistála japonská sonda Hayabusa na planetce Itokawa a odebrala vzorky. Bohužel technické problémy při návratu způsobily pád sondy na povrch Země místo řízeného sestupu. Modul byl silně poškozený, ale nakonec se v troskách vzorky planetky

<sup>6</sup>Detaily viz <http://stardust.jpl.nasa.gov/home/index.html>.



Obrázek 6.4: Největší nalezený meteorit se nachází v Namíbii. Hmotnost železného meteoritu Hoba se odhaduje na zhruba 66 tun. Snímek byl převzat z <http://www.swakop.com/skies/WaterHoba.htm>.

Itokawa podařilo najít.

V plánu vědců jsou další podobné mise. Americká NASA plánuje projekt vyslat v roce 2016 sondu OSIRIS-REx k planetce 1999 RQ<sub>36</sub> s návratem odebraných vzorků na Zemi v roce 2023. Evropská vesmírná agentura (ESA) zvažuje realizaci sondy Marco Polo-R, která by měla po startu v letech 2020–2022 přistát na malé planetce nepříliš vzdálené od Země, vrtat do jejího povrchu, získat vzorky hornin a prachu a také se s nimi vrátit na Zemi.

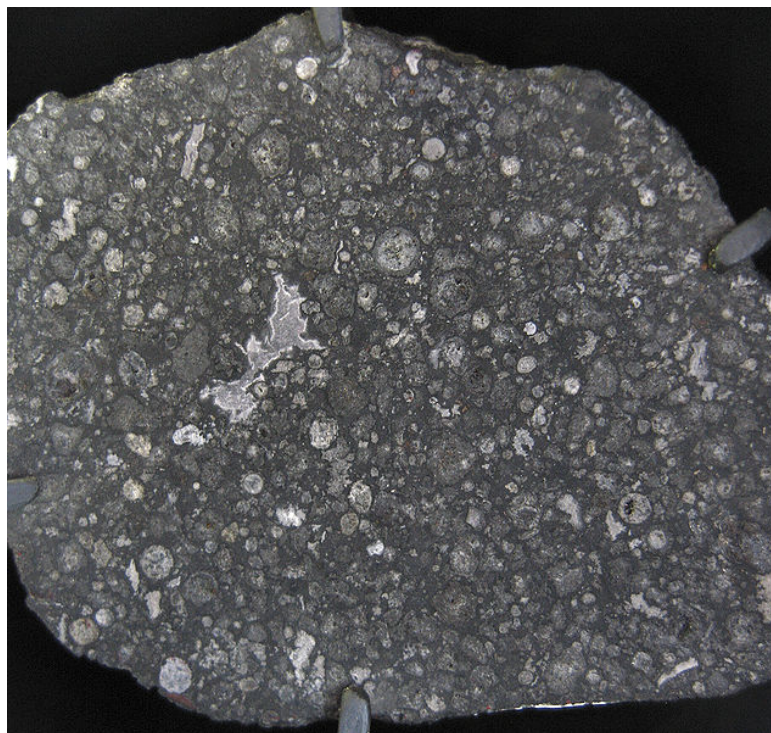
## 6.3 Kosmický vítr aneb nálety částic

### 6.3.1 Kosmické záření

Rakouský fyzik Victor Franz Hess objevil v roce 1912 během balónového výstupu v Ústí nad Labem záření, jehož intenzita roste s nadmořskou výškou.<sup>7</sup> Nazval je „výškové záření“. Jedná se o proud energetických částic pohybujících se vysokou rychlostí a dopadajících do zemské atmosféry. Primární kosmické záření (před dopadem do atmosféry Země) je tvořeno z téměř 90 % protony, 9 % představují jádra hélia a 1 % elektrony. Ve výšce 12 až 15 km nad zemským povrchem reagují tyto částice primárního kosmického záření s jádry kyslíku a dusíku. Z jedné primární částice může vzniknout ve zlomku sekundy proud až několika milionů sekundárních částic a fotonů záření gama. Energie primární částice je tak využita ke vzniku spršky sekundárního kosmického záření. Zmíněné spršky vysokoenergetického záření objevil v roce 1938 francouzský astronom Pierre Auger. Částice v nich dosahují energie až  $10^{20}$  eV.

Původ kosmického záření není dosud zcela objasněn. Mechanismus urychlování částic

<sup>7</sup>V roce 1936 dostal za svůj objev Nobelovu cenu.



Obrázek 6.5: Řez 4.5 miliardy let starým meteoritem z Allende. Tento kámen se zformoval v době vzniku Sluneční soustavy. Autorem snímku je Shiny Things. Převzato z wikipedie.

na tak vysoké energie nebyl dosud spolehlivě objasněn. Má se za to, že roli hraje zejména urychlování v silných magnetických polích. Část kosmického záření sice pochází ze Slunce, ale částice s nejvyšší energií vyletují z mezihvězdného a mezigalaktického prostoru. Jejich zdrojem by tedy mohly být jevy nebo objekty jako výbuch supernovy, aktivní galaktická jádra či gama záblesky.

V roce 2000 byla v Argentině zahájena stavba Observatoře Pierre Augera<sup>8</sup> tvořené 1 600 detektory na ploše 3 000 km<sup>2</sup>. Po dokončení půjde o největší detektor kosmického záření na světě. Na projektu se podílejí také vědci z Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky.

### 6.3.2 Sluneční vítr

Ze sluneční atmosféry, zejména z tzv. koróny uniká všemi směry nepřetržitý proud částic, především protonů,  $\alpha$  částic (jader hélia) a elektronů. Jejich rychlost se pohybuje kolem 300 až 700 km.s<sup>-1</sup>, přičemž v jednom centimetru krychlovém je obvykle 3 až 15 částic. Hustota i rychlost se ale může přechodně významně zvýšit, zejména po velkých slunečních erupcích. Země je před slunečním větrem chráněna svým magnetickým polem, ale intenzivnější sluneční vítr může geomagnetické pole narušit a způsobit částečnou ionizaci zemské atmosféry, která se projevuje výskytem polární záře, poruchou příjmu na krátkých rádiových vlnách. Výjimečně může vyvolat i kolísání a výpadky v elektrické síti. Podrobněji se budeme účinkům a vlivu Slunce na Zemi věnovat v dalších kapitolách.

<sup>8</sup>[http://www.auger.org/cosmic\\_rays/](http://www.auger.org/cosmic_rays/)





Obrázek 6.6: "Lunar Olivine Basalt 15555" vzorek přivezený z Měsíce posádkou Apolla 15. Zformoval se před 3.3 miliardami let. Dnes je vystaven v Národním muzeu přírodních věd USA ve Washingtonu. Převzato z wikipedie.

Obdobně jako ze Slunce vane sluneční vítr, uniká tok částic i z jiných hvězd. Označujeme jej jako hvězdný vítr. Jeho vliv na Zemi je za normálních okolností mizivý. Vše by změnila nějaká kataklyzmatická událost v relativně malé kosmické vzdálenosti.

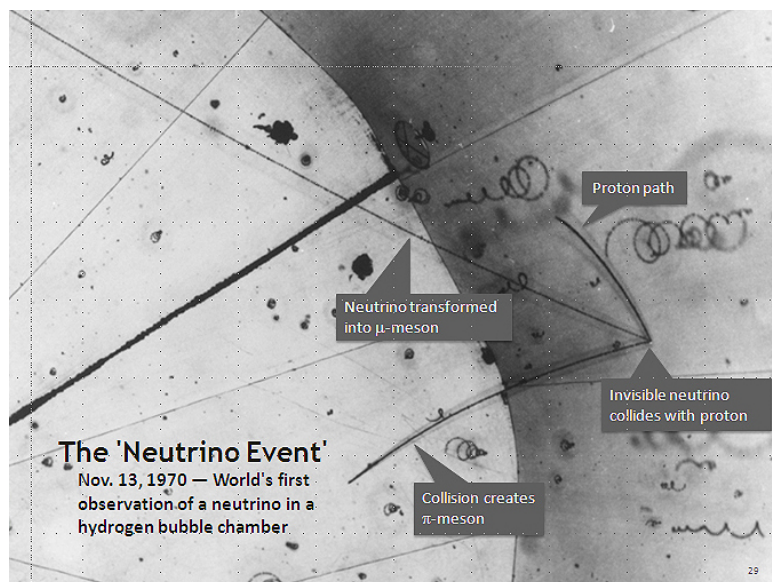
### 6.3.3 Neutrino

Neutrino patří mezi lehké elementární částice (leptony). Jeho hmotnost je sice ve srovnání s většinou elementárních částic velmi malá, ale nenulová. Na druhou stranu má neutrino nulový elektrický náboj. Jeho spin  $\hbar/2$  jej řadí mezi fermiony. Neutrino je dalo by se říci netečná částice. Nijak ji neovlivní silná ani elektromagnetická interakce. Částečně se podvolí jen slabé interakci a velmi málo gravitaci. Z toho ovšem vyplývá pro nás nepříjemná vlastnost neutrin. Jsou tak velmi obtížně detekovatelná, s okolím prakticky neinteragují.

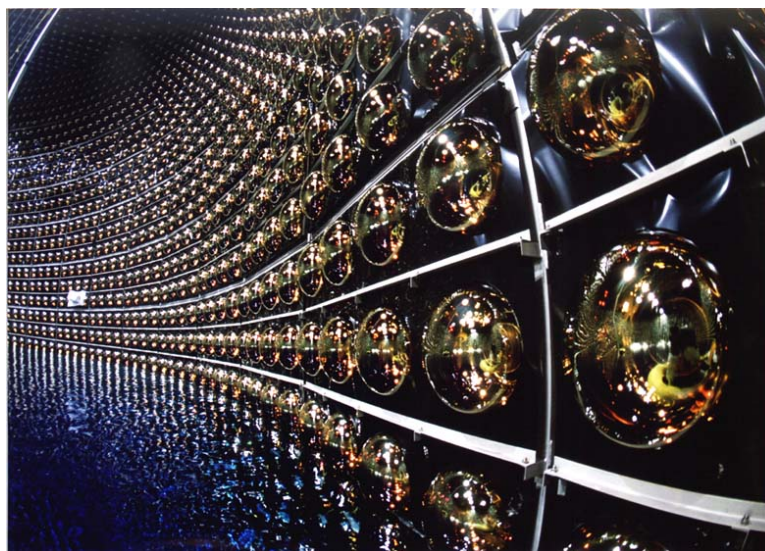
Neutrino vznikají při jaderných reakcích, kterým se říká beta rozpad. V současné době je známo pět zdrojů neutrin. Zdrojem neutrin může být kolaps hvězdy při výbuchu supernovy, ale také běžné jaderné reakce ve hvězdách. Na Zemi vznikají při interakcích kosmického záření s atomy atmosféry nebo rozpadem radioaktivních hornin v zemských útrobách. A nezapomeňme také na lidskou produkci neutrin v jaderných elektrárnách.

V provozu je nyní celá řada zařízení na detekci neutrin, například SuperKamiokande, ANTARES, AMANDA, IceKube<sup>9</sup>. Detekce neutrin a následné vyhodnocení měření mají posloužit především k určení jejich hmotnosti, ale také k ověření našich modelů a představ o stavbě a vývoji hvězd.

<sup>9</sup>Podrobněji se budeme detekci neutrin věnovat v kapitole 10



Obrázek 6.7: První detekce neutrína 13. listopadu 1970. Neutrino se srazilo s protonem v atomu vodíku. Srážka se objevila v bodě, odkud vychází tři trajektorie (na obrázku vpravo). Argonne National Laboratory



Obrázek 6.8: Skleněné baňky s fotonásobiči v detektoru neutrín Super Kamiokande. Japan Radio Glass Co.,Ltd.

### 6.3.4 Gravitační vlny

Spektrum našich znalostí o okolním vesmíru by mohla rozšířit i detekce gravitačních vln, periodických zakřivení prostoru a času, které se, zjednodušeně řečeno, šíří od zdroje podobně jako elektromagnetické nebo zvukové vlny. Je zřejmé, že tím zdrojem musí být objekt, který bude silně zakřivovat prostorčas, například dvojice velmi malých a hutných hvězd obíhajících kolem společného těžiště. Dvojice takových neutronových hvězd tvoří pulsar PSR1913+16, u něhož byly gravitační vlny nepřímo prokázány. Složky

pulsaru totiž kolem sebe oběhnou za 465 minut, ale perioda oběhu se zkracuje o 76 mikrosekund za rok. Takový výsledek odpovídá podle teoretických předpokladů úbytku energie systému v důsledku vyzařování gravitačních vln<sup>10</sup>. Bohužel přímá detekce gravitačních vln se dosud nepodařila, přestože probíhá řada experimentů, které by je měly být schopny detekovat. Podrobněji se jim budeme věnovat v kapitole o neoptické astronomii.

## 6.4 Elektromagnetické záření

Nejrozšířenější formou, jakou nám okolní vesmír o sobě předává informace, je elektromagnetické záření. Je pak na nás, jak s nabídkou těchto informací naložíme a zda jsme vůbec schopni je správně číst a interpretovat. Meteority, případně z kosmu dovezené vzorky, nám přinášejí informace o prostředí jen za našimi kosmickými humny, ale o vesmírných dálavách neříkají zhora nic. Chceme-li pronikat do tajemství hlubin vesmíru, musíme zvládnout analýzu elektromagnetického záření.

Analyzovat elektromagnetické záření ale není tak jednoduché. Budeme studovat proud částic nebo elektromagnetické vlnění? V roce 1924 navrhl Louis de Broglie, že je možné každé volně se pohybující částici s energií  $E$  a hybností  $\vec{p}$  přiřadit frekvenci  $\nu$  a vlnovou délku  $\lambda$  a popsat je analogickými vztahy, které platí pro fotony. Pak

$$E = h\nu = mc^2, \quad (6.1)$$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}, \quad (6.2)$$

kde  $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$  J·s je Planckova konstanta a  $m$  je klidová hmotnost částice<sup>11</sup>. Jistá energie a hybnost tak charakterizují stav rovnoměrně a přímočaře se pohybující částice, určitá frekvence a vlnová délka zase postupnou rovinou vlnu. Jen tři roky po de Brogliem zformuloval Werner Heisenberg základní princip kvantové mechaniky, který popisuje, že není možné přesně měřit současně v určitém časovém okamžiku polohu a hybnost částice. Měříme-li její polohu, získáme informaci o částicové vlastnosti elektromagnetického kvanta, ale nemáme žádnou informaci o vlnové vlastnosti. A naopak. Právě princip neurčitosti tak odráží známý dualismus vlna – částice. Elektromagnetické záření může někdy vykazovat vlnový charakter, například při ohybu záření, jindy se chová jako proud částic, například u fotoelektrického jevu<sup>12</sup>. Ve výsledku to znamená, že pro popis záření lze použít dle situace jak vlnovou teorii, tak i kvantovou teorii.

Pokud budeme elektromagnetické záření chápat jako vlnění, bude se jednat o vlnění příčné, charakterizované kmitočtem (frekvencí)  $\nu$ , eventuálně vlnovou délkou  $\lambda$ .

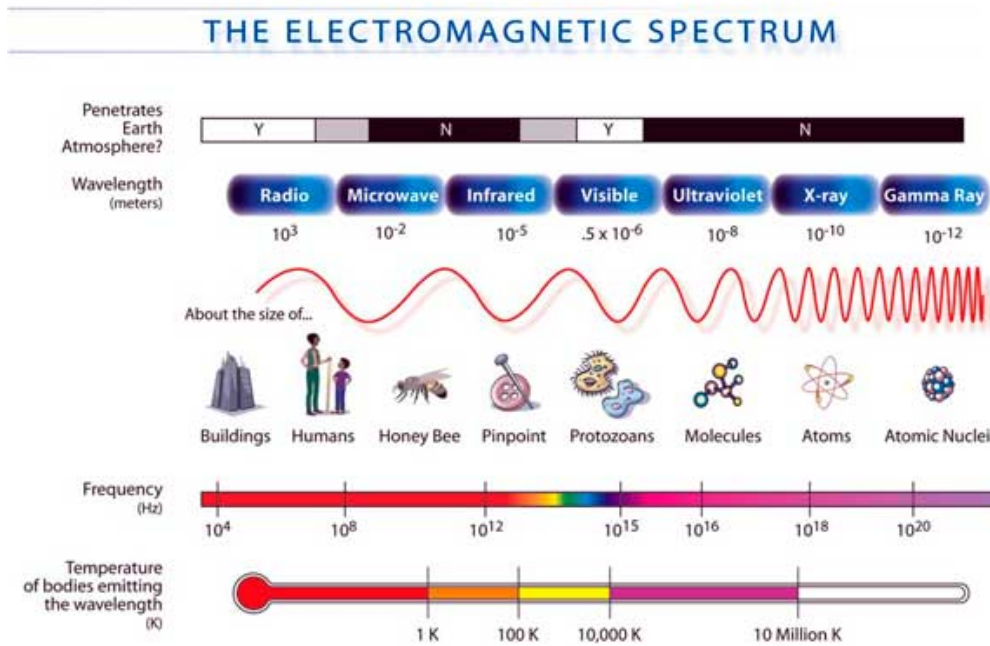
$$c = \lambda\nu, \quad (6.3)$$

<sup>10</sup>R. A. Hulse a J. H. Taylor obdrželi za objev binárního pulsaru z roku 1974 a nepřímou detekci gravitačních vln v roce 1993 Nobelovu cenu.

<sup>11</sup>Německý fyzik Max Planck v roce 1900 vztahy odvodil jen pro fotony, které mají jako částice nulovou klidovou hmotnost. Nicméně de Brogliho vztahy platí obecně i pro částice s nenulovou klidovou hmotností.

<sup>12</sup>Právě Albert Einstein využil v roce 1905 poprvé myšlenku dualismu vlna–částice pro objasnění fotoelektrického jevu.

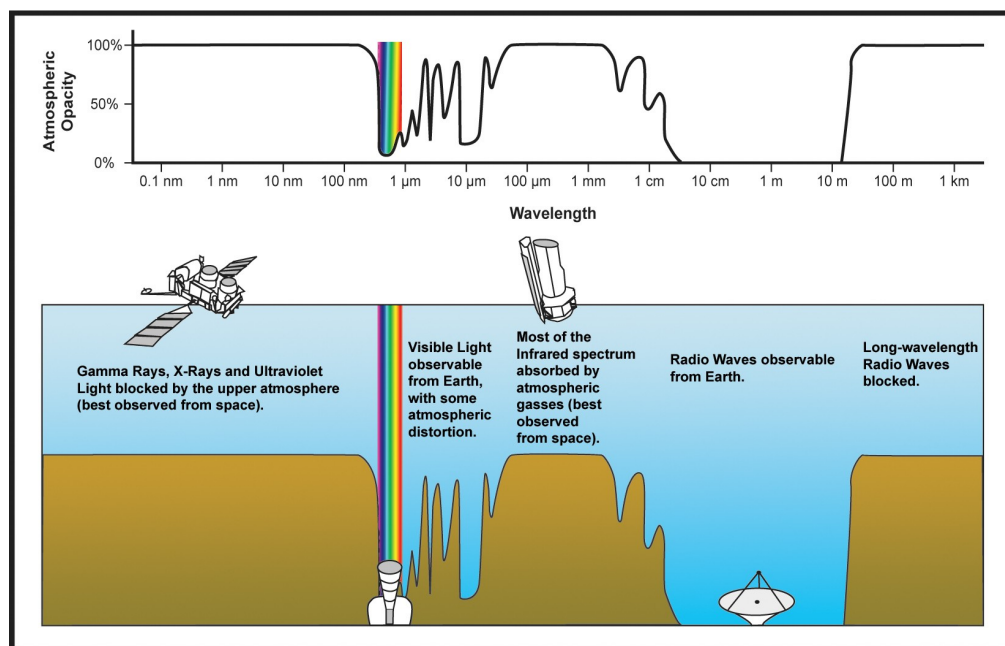
kde  $c$  je rychlost šíření světla v daném prostředí (ve vakuu maximálně  $299\,792\,458\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Naproti tomu při částicové interpretaci budeme sledovat proud částic, fotonů, a určovat jejich charakteristiky, tedy hybnost a energii, která je navíc kvantovaná, jak je patrné ze vztahu 6.1. Kvantum energie se přitom mění v závislosti na kmitočtu záření.



Obrázek 6.9: Elektromagnetické spektrum. Zdroj: NASA

Tabulka 6.1: Rozdělení elektromagnetického záření podle vlnových délek

Záření	Vln. délka	Frekvence [Hz]	Energie
Radiové	600 m - 0.187 m	$30 - 1.6 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^{-9} - 0.6 \cdot 10^{-5}$ eV
Mikrovlnné	187 mm - 1 mm	$1 - 300 \cdot 10^6$	$0.6 \cdot 10^{-5} - 0.1 \cdot 10^{-2}$ eV
Sub-mm	539 - 616 $\mu\text{m}$	$487 - 556 \cdot 10^6$	$2.0 \cdot 10^{-3} - 2.3 \cdot 10^{-3}$ eV
Daleké IR	40 - 350 $\mu\text{m}$	$300 \cdot 10^6 - 30 \cdot 10^{12}$	$3.1 \cdot 10^{-2} - 0.35 \cdot 10^{-2}$ eV
Střední IR	5 - 40 $\mu\text{m}$	$30 - 120 \cdot 10^{12}$	$3.1 \cdot 10^{-2} - 2.5 \cdot 10^{-1}$ eV
Blízké IR	1 - 5 $\mu\text{m}$	$120 - 440 \cdot 10^{12}$	$2.5 \cdot 10^{-1} - 1.2$ eV
Optické	380 - 780 nm	$400 - 790 \cdot 10^{12}$	1.59 - 3.3 eV
Ultrafialové	10 - 400 nm	$750 \cdot 10^{12} - 30 \cdot 10^{15}$	3.1 - 124 eV
Rentgenové	10 - 0.01 nm	$30 \cdot 10^{15} - 100 \cdot 10^{18}$	124 - $1.24 \cdot 10^5$ eV
Gama	0.01 - 0.000006 nm	$100 \cdot 10^{18} - 3,862 \cdot 10^{21}$	$1.24 \cdot 10^5 - 2.07 \cdot 10^8$ eV
Kosmické	10 - 0.000006 nm	$30 \cdot 10^{15} - 3,862 \cdot 10^{21}$	124 - $2.07 \cdot 10^8$ eV



Obrázek 6.10: Atmosférická okna do vesmíru. Zdroj: NASA

### 6.4.1 Okna do vesmíru

Vesmírná sonda ve volném kosmickém prostoru může měřit v jakékoli části elektromagnetického spektra záření nebo v celém rozsahu spektra. Obdobná observatoř na zemském povrchu, na dně vzdušného oceánu má ale možnosti značně omezené. Atmosféra Země propouští jen určité oblasti, úseky spektra elektromagnetického záření, jak je vidět na obrázku 6.10. Náš pohled do okolního vesmíru je tím zkreslený. Je to podobné, jako kdyby pianistovi někdo zakryl části klaviatury a on měl zahrát nějakou skladbu. Výhled do vesmíru ze zemského povrchu je sice omezen jen na určité oblasti, pomyslná okna do vesmíru<sup>13</sup>, ale je třeba si uvědomit, že nebýt atmosféry a její schopnosti odfiltrovat, nepropustit na Zemi nebezpečné záření, tak tady vlastně nejsme.

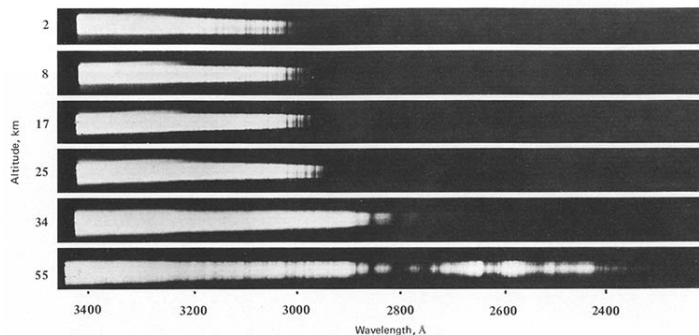
Optické okno do vesmíru není sice největší (naopak, je velmi úzké), ale je nám nejbližší. V optické oblasti spektra člověk okolní vesmír zkoumá nejdéle. Existence dalších částí elektromagnetického spektra byla odhalována postupně. Nejprve si roku 1800 William Herschel všiml, že rtuťový teploměr vložený do slunečního spektra ukazuje zvýšené hodnoty i za viditelným červeným okrajem spektra. Když se o rok později o Herschelově objevu dozvěděl mladý německý chemik a fyzik Johann Wilhelm Ritter, napadlo ho zkusit, zda není nějaké neviditelné záření také na opačném, fialovém konci spektra. Pomocí chloridu stříbra záhy objevil ultrafialové (UV) záření. Jak Herschel, tak i Ritter rozšířili naše znalosti o spektru elektromagnetického záření jen o malé části přimykající se k optické oblasti. K podstatnému rozšíření poznané oblasti spektra přispěl až o desítky let později v roce 1887 Heinrich Hertz, který ve své laboratoři generoval záření o vlnových délkách řádově 10 až 100 m. Lidstvo poznalo rádiové vlny. Na konci 19. století ale také celá řada fyziků studovala záření ve vakuovaných trubicích emitované

<sup>13</sup>V roce 1981 odvysílala tehdejší Československá televize na svou dobu unikátní seriál Okna vesmíru dokořán, jehož hlavním protagonistou byl Jiří Grygar.

na elektrodě. Nicméně jako oficiální objevitel paprsků X je uváděn Wilhelm Röntgen, který o nich publikoval souhrnnou studii na sklonku roku 1895. Záhy začali fyzikové tyto paprsky po objeviteli označovat jako rentgenové. Mozaiku objevitelů ještě doplníme jménem francouzského fyzika a chemika Paula Ulricha Villarda, který roku 1900 objevil záření nepodléhající magnetickým silám. V roce 1914 Ernest Rutherford a Edward Andrade prokázali, že jde o druh elektromagnetického záření a prvně jmenovaný jej také označil jako  $\gamma$  záření.

V 19. století tedy začalo odhalování celého spektra elektromagnetického záření a také se uskutečnily první pokusy o pozorování okolního vesmíru v nově objevených oborech spektra. V 1856 detekoval Charles Piazzi Smyth infračervené záření ve svitu Měsíce. Piazzi také zjistil, že pro pozorování v infračerveném oboru je výhodnější vyšší nadmořská výška, což lze považovat za první důkaz toho, že zemská atmosféra pohlcuje část infračerveného záření z vesmíru. Infračervené okno je částečně propustné, jak je vidět na obrázku 6.10. Velká část infračerveného a mikrovlnného záření je pohlcena molekulami vody a kyslíku (resp.  $\text{CO}_2$  a  $\text{O}_2$ ), proto jsou dalekohledy pro pozemskou infračervenou astronomii umísťovány do vysokohorských observatoří v suchých oblastech. I to byl jeden z důvodů, proč se první systematická infračervená pozorování vesmírných objektů začala provádět až ve dvacátých letech 20. století.

Zcela nové okno do vesmíru otevřel v roce 1931 Karl Guthe Jansky, který detekoval mimozemské rádiové záření pocházející z centra Galaxie. Rádiové okno je poměrně široké, je možné v něm sledovat záření kosmických objektů s vlnovou délkou řádově milimetry až desítky metrů.



Obrázek 6.11: První fotografie ultrafialového spektra Slunce pořizená z rakety V2 10.října 1946. Tým pod vedením Richarda L. Touseyho ukázal, že s rostoucí výškou nad zemí roste množství zachyceného ultrafialového záření ze Slunce. Zdroj: NASA

Bohužel oblasti spektra s nejkratšími vlnovými délkami od  $\gamma$  až po UV záření jsou pohlcovány zejména atmosférickým ozónem ve výškách 15 až 35 kilometrů. Pro pozorování vesmírných objektů je proto nutné se dostat až nad něj. To bylo možné až po druhé světové válce. V roce 1946 využil Američan Richard Tousey ukořistěné německé rakety V2 a s pomocí spektrometru v hlavici jedné z nich získal první ultrafialové spektrum Slunce. Také počátky rentgenové astronomie jsou spojeny s raketami V2. Skutečné otevírání oken do vesmíru ale nastalo až s počátkem kosmické éry, zejména v šedesátých letech minulého století. Velkou zásluhu na tom má americký astronom Lyman Spitzer, který už v roce 1946 vypracoval studii o dalekohledu umístěném v kosmu na oběžné

dráze kolem Země<sup>14</sup> a podílel se na sérii amerických astronomických kosmických observatoří OAO (Orbiting Astronomical Observatory) vypouštěných na přelomu 60. a 70. let minulého století. Hned první z nich v roce 1966 nesla na palubě přístroje pracující v ultrafialové, rentgenové a gama oblasti spektra.

Na počátku 21. století mají astronomové k dispozici celou škálu observatoří a družic, takže můžeme říci, že všechna okna do vesmíru jsou už otevřena.

### 6.4.2 Jak tělesa září?

Při studiu vzdálených kosmických světů máme k dispozici jen záření, které od nich přichází. Z něj získáváme značnou část informací o objektech ve vesmíru. Záření každého objektu má tři základní vlastnosti:

- směr, odkud k nám záření přichází, studuje astrometrie,
- hustotu toku záření, která je předmětem fotometrie,
- spektrální složení zkoumá spektrometrie neboli spektroskopie.

U fotometrie tedy v podstatě měříme množství energie dopadající na určitou plochu (například plochu fotografické desky, čipu CCD kamery) a to buď v celém rozsahu spektra nebo v určitých vybraných oblastech spektra, které jsou vymezeny speciálními filtry. Můžeme tedy vyhodnotit jen množství dopadajícího záření. Větší škálu informací nám poskytuje spektroskopická analýza záření. Výsledkem může být řada fyzikálních parametrů místa vzniku záření. Jenže – víme, jak vlastně záření těles vzniká? Jak mohou tělesa zářit, jinak řečeno, jak uvolňují a pohlcují fotony? Tyto otázky budou zodpovězeny zejména v kurzech fyziky. Zde si jen stručně připomeňme jednotlivé mechanismy, které ke vzniku záření vedou.

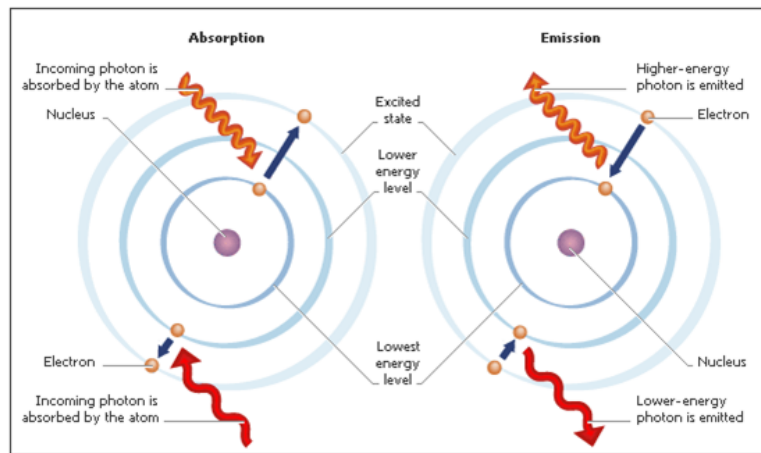
Max Planck odvodil v roce 1900 empirický vztah, kterým popsal záření absolutně černého tělesa, dnes nazývaný Planckův zákon. V něm je energie vyzařována v kvantech. S vysvětlením, proč tomu tak je, přišel v roce 1905 Albert Einstein, když vysvětloval fotoelektrický jev<sup>15</sup>. Tvrdil, že záření (lhostejno, zda jde o záření absolutně černého tělesa nebo jiné) musí přicházet v malých „balíčcích“, zvaných fotony<sup>16</sup>. Jak už víme, je energie fotonů závislá na jejich frekvenci  $E = h\nu$ . Právě o tato kvanta se může měnit energie ve vázaných soustavách, v atomech nebo molekulách. Změna energie částice ve vázané soustavě může být totiž realizována jednak srážkami a jednak vyzářením (emisí) nebo pohlcením (absorpcí) fotonu neboli kvanta elektromagnetického záření. Můžeme tedy říci, že obecně velikost energie, kterou je nějaká částice schopna přijmout nebo vydat, závisí na vzájemné interakci částice a okolí. Vázané částice se musí podvolit zákonitostem kvantové mechaniky a mohou nabývat jen určitých energií. Energie volné částice může nabývat prakticky libovolné hodnoty, protože volným částicím nic nebrání, aby přecházely mezi dvěma prakticky libovolnými energetickými stavy. Podobné je to i v případě, kdy jeden stav je volný a druhý vázaný.

<sup>14</sup>Jak dnes víme Spitzerova myšlenka byla nakonec realizována. V roce 1990 byl na oběžnou dráhu vynesena Hubbleův kosmický dalekohled.

<sup>15</sup>Později, v roce 1921 za tuto práci dostal Nobelovu cenu za fyziku.

<sup>16</sup>Název *foton* navrhl americký chemik Gilbert N. Lewis v roce 1926.

Pokud jsou částice velice nahuštěné a velmi silně interagují (například v pevné látce zahřáté na vysokou teplotu, hustém plazmatu ve hvězdách), vzniká spojité záření, tzv. kontinuum. Spojité spektrum obsahuje záření všech vlnových délek, ale platí, že čím vyšší je teplota emitujícího tělesa, tím vyšší je maximum vyzářené energie. Vlnová délka odpovídající tomuto maximu je nižší, frekvence maxima s rostoucí teplotou roste. Vyšší teplota znamená vyšší kinetickou energii, takže atomy jsou excitovány do vyšších energetických stavů a při následné deexcitaci je vyzářeno záření vyšší frekvence.



Obrázek 6.12: Vznik a zánik fotonu. Převzato z [http://light.physics.auth.gr/enc/wavelength\\_en.html](http://light.physics.auth.gr/enc/wavelength_en.html).

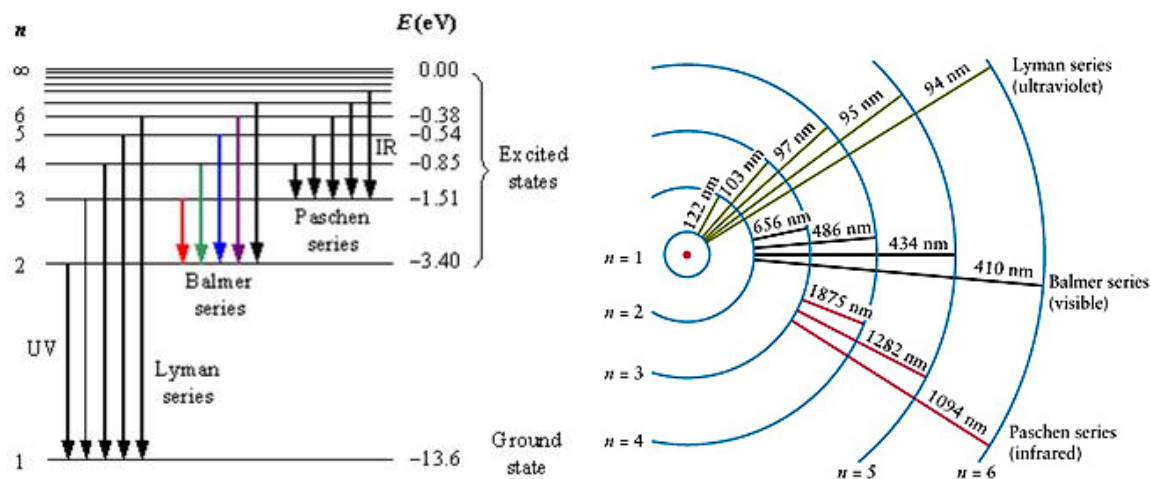
Pokud budeme například v nějakém plynu sledovat přeskoky elektronů mezi různými energetickými hladinami, bude emitováno nebo absorbováno záření určité vlnové délky. Vznikají absorpční nebo emisní spektrální čáry. Absorpce je dána pohlcením fotonu o dané energii, odpovídající rozdílu mezi dvěma energetickými hladinami. Při ní dojde k excitaci atomu. Naproti tomu emise, tedy vyzáření fotonu, je dána deexcitací. Energie vyzářeného fotonu odpovídá rozdílu energií hladin, mezi nimiž došlo k (se)skoku elektronu. Protože jednotlivé přeskoky jsou jasně definované pro jisté energetické hladiny i určité prvky, je možné rozbořením spektrálních čar zjistit složení zdroje záření.

Ve vesmíru se samozřejmě setkáme nejen s částicemi, které jsou vázány v atomu nebo molekule, ale mohou se vyskytovat i zcela volné částice. Mechanismus vzniku elektromagnetického záření je zde jiný než u vázaně-vázaných, volně-vázaných nebo vázaně-volných přechodů. U volných částic je vyzařování důsledkem jejich pohybu v elektrickém nebo magnetickém poli. Jestliže bude na nějakou nabitou částici působit síla a částice se v důsledku toho bude pohybovat zrychleně, bude emitovat záření. Protože nejjednodušší a nejsnáze ovlivnitelný je elektron, bude právě tato částice nejčastějším zdrojem takového záření. Konkrétním příkladem může být situace, kdy se elektron pohybuje v poli kladně nabitých částic. Vlivem působení kationtu se změní trajektorie elektronu a jeho rychlost. Elektron je zbrzděn, ztratí kinetickou energii a je uvolněna energie v podobě kvanta záření. Na cestu vyrazí foton *brzdného záření* (viz obrázek 6.14).

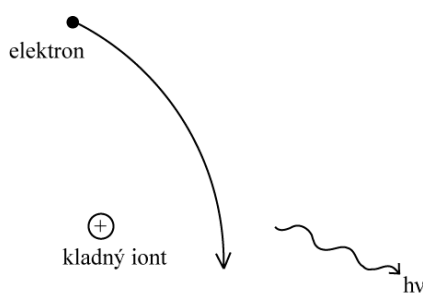
Obdobně se chová elektron v magnetickém poli. Tam podléhá působení Lorentzovy síly

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B},$$





Obrázek 6.13: Schématické znázornění přeskoků elektronů mezi hladinami nejjednodušší atomové struktury (atomu vodíku). Vpravo jsou uvedeny vlnové délky vyzářených fotonů. Převzato z [http://www.daviddarling.info/encyclopedia/H/hydrogen\\_spectrum.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/H/hydrogen_spectrum.html)

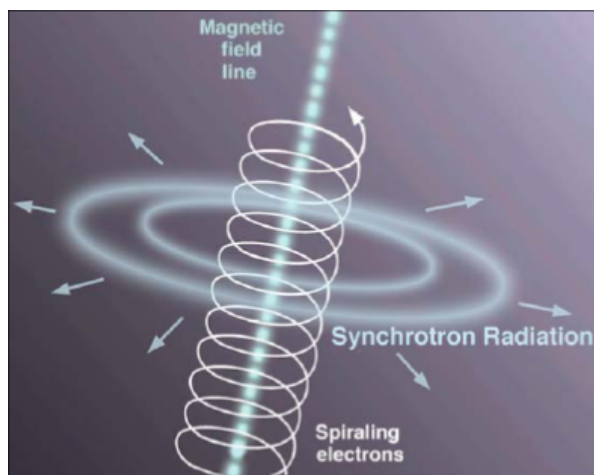


Obrázek 6.14: Vznik brzděného záření. Převzato z Pokorný (2006).

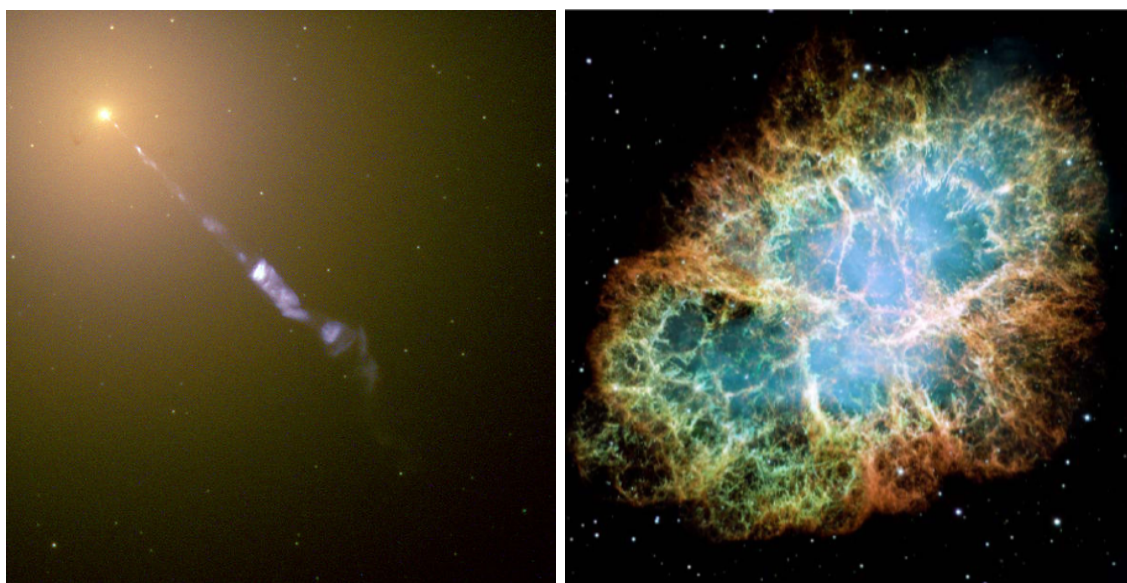
kde  $q$  je náboj elektronu (obecně pohybující se nabitě částice),  $\vec{v}$  její rychlost a  $\vec{B}$  intenzita magnetického pole. Lorentzova síla způsobuje zakřívání trajektorie elektronu a tím také i jeho vyzařování. Druh emitovaného záření ale v tomto případě záleží na rychlosti pohybu elektronu. Pokud je rychlost dostatečně malá ve srovnání s rychlostí světla ( $v \ll c$ ), vzniká všesměrové *cyklotronové záření*.<sup>17</sup> Ve vesmíru se s takovým zářením, můžeme setkat v mezihvězdné látce nebo v okolí černých děr a slouží nám jako zdroj informací o magnetickém poli v místě jeho vzniku. Jestliže je před vstupem do magnetického pole elektron urychlen na rychlost blízké rychlosti světla, vznikne jeho pohybem v magnetickém poli tzv. *synchrotronové záření*.<sup>18</sup> Tentokrát jde o intenzivní záření v široké oblasti spektra od mikrovln až po tvrdé rentgenové záření. Stejně jako cyklotronové je i toto záření silně polarizované, takže je možné určit směr magnetických siločar ve zdroji. Ve vesmíru jsou zdrojem synchrotronového záření místa různých výtrysků nebo výbuchů. Poprvé bylo detekováno u mohutného výtrysku (jetu) z galaxie M87 (Burbidge, 1956).

<sup>17</sup>Název záření je odvozen od kruhových vysokofrekvenčních urychlovačů částic, tzv. cyklotronů.

<sup>18</sup>Název je opět odvozen od typu urychlovačů částic, synchrotronů. Poprvé bylo záření detekováno v roce 1946.



Obrázek 6.15: Vznik synchrotronového záření. Zdroj: Jon Lomberg, Gemini Observatory.



Obrázek 6.16: Zdroje synchrotronového záření. Vlevo: výtrysk u galaxie M87. Vpravo Krabí mlhovina M1. Převzato z wikipedie.

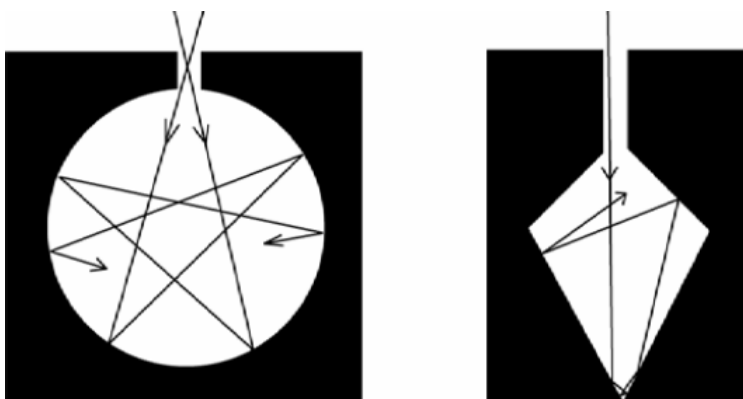
Závěrem kapitoly tedy můžeme konstatovat, že rozbořením elektromagnetického záření z kosmu lze zjišťovat způsob i podmínky vzniku tohoto záření. Jde tak o velmi cenný zdroj informací o vesmíru, na nichž si můžeme ověřovat i základní principy fyziky. Větší laboratoř než náš vesmír prostě nemáme.

### 6.4.3 Záření absolutně černého tělesa

V předchozí kapitole jsme si popsali různé mechanismy vzniku záření. Budeme-li ale chtít popisovat záření reálného tělesa, půjde o nesmírně náročnou úlohu. Fyzikové si úlohu zjednodušili. Vymysleli ideální těleso, které pohltí veškeré záření dopadající na jeho povrch a které i samo září a to tak, že ze všech těles se stejnou teplotou vyzařuje

největší množství energie. Takový ideální absorber a zářič je opravdu vhodný pro snazší popis záření těles. Kirchhoff (1860) začal těmto tělesům říkat: „...perfectly black, or, more briefly, black bodies“, tedy **absolutně černé těleso**. Z dnešního pohledu to nebylo příliš vhodně zvolené označení. Vždyť tělesa jsou „černá“, když nezáří, ale absolutně černé těleso září a má barvu v závislosti na své teplotě! Jak tedy k tomu termínu došel? A jak vlastně absolutně černé těleso vypadá? Kirchhoff sám přišel s myšlenkovou realizací absolutně černého tělesa. Měla to být prázdná nádoba tvaru koule nebo kužele s malým vstupním otvorem s vyčerněnými stěnami. Možná se nechal inspirovat situací, kdy člověk stojí za slunného dne venku a dívá se malým otevřeným okénkem do místnosti. I kdyby byla místnost vymalována na bílo, zvenku se bude jevit jako temná. Prakticky všechno záření zvenku se totiž na stěnách místnosti pohltí a zpět už se takřka nic nedostane. Stejně je to u absolutně černého tělesa. Záření, které vnikne malým otvorem dovnitř, se po mnoha odrazech pohltí. Stěny absolutně černého tělesa pak budou vypadat jako by byly natřeny na černo.

Absolutně černé těleso tedy absorbuje veškeré záření zvenku. Množství pohlcené energie je ale v každém okamžiku stejné jako množství energie vyzářené. Po jisté době se uvnitř dutiny ustálí rovnováha mezi zářením a stěnami nádoby. Záření uvnitř dutiny je pak možné charakterizovat jako „plyn“ v tepelné rovnováze se stěnami nádoby. Jde o *rovnovážné tepelné záření*, jemuž přísluší určitá teplota. Emise tepelného záření je vlastní každému tělesu s teplotou větší než je absolutní nula (0 K). A absolutně černé těleso není výjimkou. Množství energie vyzářené jeho jednotkovou plochou za sekundu přitom závisí pouze na jeho teplotě! Materiál stěn ani tvar nádoby, která má absolutně černé těleso představovat nehraje žádnou roli.



Obrázek 6.17: Model absolutně černého tělesa. Převzato z Pokorný (2006).

V druhé polovině 19. století neměla fyzika v rukou ještě dostatečné nástroje na přesné teoretické zdůvodnění a odvození pozorovaných jevů. Řada tehdy publikovaných fyzikálních zákonů byla založena na pozorování, na empirii. To platí v plné míře i o zákonitostech záření absolutně černého tělesa. V roce 1879 odvodil na základě předchozích pokusů (zejména měření J. Tyndalla) slovinský fyzik Jožef Stefan závislost mezi intenzitou záření absolutně černého tělesa a jeho (termodynamickou) teplotou. Celkové množství energie  $F$  vyzářené jednotkou plochy absolutně černého tělesa za jednotku času je úměrné čtvrté mocnině teploty  $T$ . O pět let později tuto závislost odvodil Němec

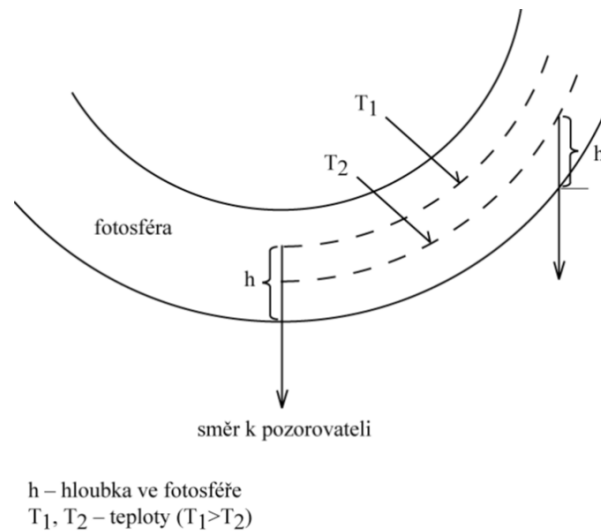
Ludwig Boltzmann s využitím termodynamiky a obecných předpokladů. Proto se vztah

$$F = \sigma T^4 \quad (6.4)$$

někdy označuje jako *Stefanův–Boltzmannův zákon*, někdy jen jako *Stefanův zákon*. Konstanta úměrnosti  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  je Stefanova–Boltzmannova konstanta. Protože uvažujeme zpravidla kulový zářič (o poloměru  $r$ ) zářící do všech stran, bude plocha emitující záření rovna povrchu zářiče, tedy  $4\pi r^2$ . Stefanův–Boltzmannův zákon se pak zapíše ve tvaru

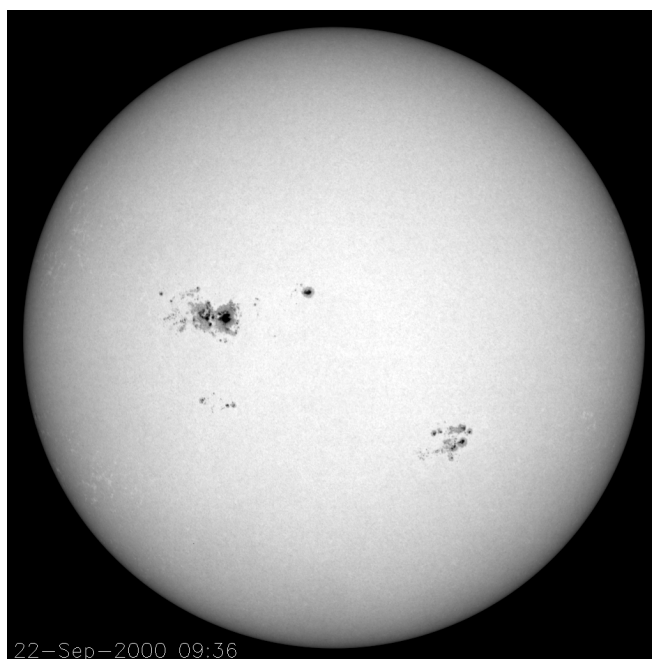
$$L = 4\pi r^2 \sigma T^4. \quad (6.5)$$

Jedním z důsledků Stefanova–Boltzmannova zákona je pozorované ztemnění okrajů slunečního disku (obr. 6.19). Záření, které k nám ze Slunce přichází, vzniká ve spodní vrstvě sluneční atmosféry, v tak zvané fotosféře. Teplota látky zde s rostoucí výškou (vzdáleností od středu Slunce) klesá. Jak je zřejmé z nákresu na obrázku 6.18, při pohledu doprostřed slunečního kotouče dohlédneme jen do jisté hloubky. Ta odpovídá tloušťce vrstvy plynu, přes kterou se ještě proderou fotony, které k nám odtud směřují. Jenže do stejné hloubky se „dostaneme“ i na okraji Slunce. Teplota těchto oblastí je však nižší, což se pro pozorovatele projeví tím, že okraje Slunce budou tmavší. Stejný efekt se projevuje nejen u Slunce, ale i u ostatních hvězd. Vzhledem k jejich úhlovým rozměrům na obloze ale není okrajové ztemnění přímo pozorovatelné. Je možné je zjistit nepřímo například rozborem přesných pozorování zákrytových dvojhvězd.



Obrázek 6.18: Schématické znázornění vzniku okrajové ztemnění. Převzato z Pokorný (2006).

Z termodynamických experimentů prováděných na sklonku 19. století těžil i další zákon. Sérií pokusů se mimo jiné zjistilo, že čím vyšší je teplota  $T$  absolutně černého tělesa, tím více vyzařuje. Jak celkově, tak i v jednotlivých vlnových délkách. To znamená, že pokud si množství vyzářené energie v závislosti na vlnové délce záření vynesete do grafu, křivky množství vyzářené energie se nikdy neprotínají (viz obr. 6.20). S teplotou absolutně černého tělesa se ale mění profil křivky. Zvýšíme-li teplotu  $T$  absolutně černého tělesa, zmenší se vlnová délka  $\lambda_{\text{max}}$ , na níž je vyzářeno maximum energie. Matematicky,



Obrázek 6.19: Okrajové ztemnění je u našeho Slunce jasně patrné. Snímek převzat z [http://sohowww.nascom.nasa.gov/hotshots/2000\\_09\\_22/](http://sohowww.nascom.nasa.gov/hotshots/2000_09_22/).

součin  $T\lambda_{\max}$  bude konstantní. Závislost odhalil Wilhelm Wien v roce 1893, proto také ve vztahu označovaném jako *Wienův posunovací zákon*

$$T\Delta\lambda_{\max} = b, \quad (6.6)$$

je konstanta úměrnosti  $b = 2.8977685(51) \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$  označována jako Wienova konstanta.<sup>19</sup> Dlužno ale říci, že Wien matematicky zformuloval něco, co vlastně prakticky každý z nás zná z vlastní zkušenosti. Chladná spirála elektrického ohřívače je tmavá. Když ale ohřívač zapneme, začne se barva spirály měnit – od temně rudé až po světle červenou. Teplejší rozžhavené železo má barvu červeno-žlutou. Žhavější Slunce žlutou. Čím vyšší je prostě teplota zářiče, tím jasnější je jeho barva. Mění se vlnová délka, na níž vyzařuje maximum energie.

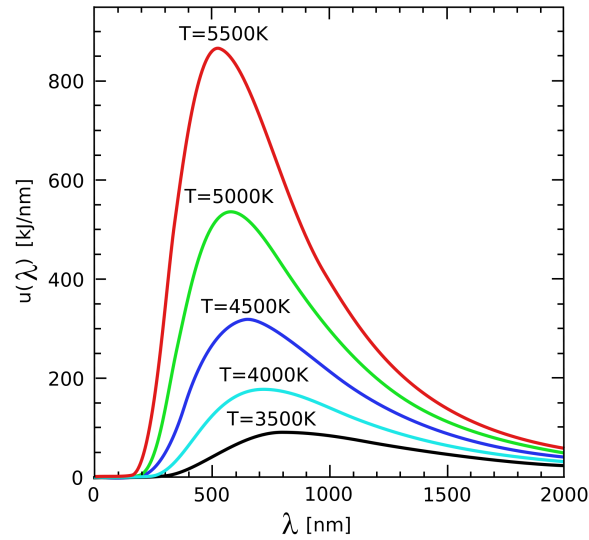
Wienův posunovací zákon nám vlastně umožňuje pouhým pohledem na noční oblohu posetou hvězdami odhadovat jeden z fyzikálních parametrů vzdálených hvězd – jejich povrchovou teplotu! Zatímco chladné hvězdy s povrchovou teplotou kolem 3 000 K budou mít načervenalý odstín, ty nejžhavější o teplotách desítek tisíc kelvinů budou svítit modrobíle.

Všechny tyto poznatky postupně směřovaly k jednotnému popisu závislosti intenzity záření absolutně černého tělesa na vlnové délce v celém rozsahu spektra. Vztah

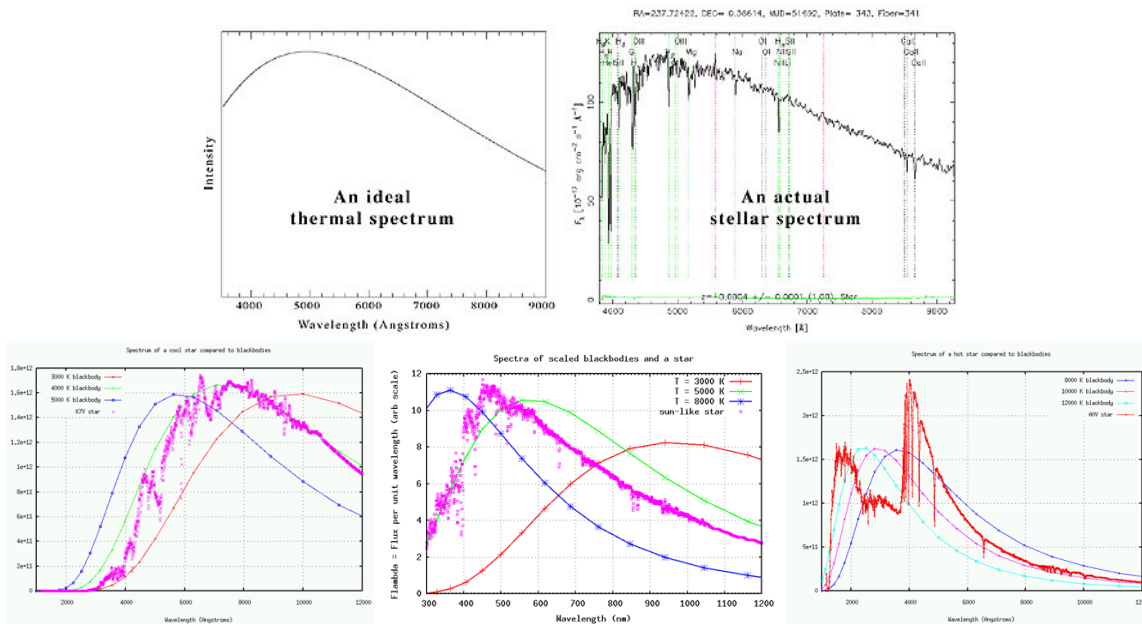
$$B_\nu(T) = \frac{2\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad \text{nebo} \quad B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (6.7)$$

odvodil až roku 1900 Max Planck. Dnes je proto závislost monochromatického jasu na

<sup>19</sup>W. Wien za toto zjištění a další práce v termodynamice dostal v roce 1911 Nobelovu cenu za fyziku.



Obrázek 6.20: Křivky množství vyzařené energie pro různé teploty. Převzato z wikipedie.



Obrázek 6.21: Nahoře: Spektrum absolutně černého tělesa ve srovnání s hvězdným spektrem. Průběh křivek se shoduje, ale jde o ideální případ. Dole: Reálná spektra hvězd – chladné (vlevo), podobné Slunci (uprostřed) a horké (vpravo) – ve srovnání s průběhem intenzity vyzařování pro absolutně černé těleso ve třech teplotách. Převzato z <http://spiff.rit.edu/classes/phys440/lectures/filters/filters.html>

kmitočtu či vlnové délce záření označována jako Planckův zákon. Význam objevu byl později oceněn udělením Nobelovy ceny za fyziku (1918).

Planckův zákon představuje jeden z pilířů moderní fyziky. Je univerzálním popisem záření absolutně černého tělesa. Ale je využitelný v praxi? Jde přece o popis záření ideálního tělesa a realita bývá od ideálů občas hodně vzdálená.

V astronomické praxi se Planckův zákon běžně používá, protože v prvním přiblížení je možné předpokládat, že hvězdy září jako absolutně černé těleso. Je to výhodné zejména proto, že vlastnosti absolutně černého tělesa lze poměrně snadno popsat. Je možné například zjistit povrchovou teplotu hvězd. Takto určená teplota se označuje jako *efektivní teplota*  $T_{\text{ef}}$  a je definována jako teplota vesmírného tělesa, jakou by mělo absolutně černé těleso se stejnými zářivým výkonem a stejnou teplotou, tedy teplota určená ze Stefanova-Boltzmannova zákona. Hvězdy ale jako absolutně černá tělesa nezáří (viz obrázek 6.21). Při podrobnějších studiích vlastností hvězd je zpravidla nutné přikročit k mnohem náročnějšímu popisu záření hvězdy a spočítat model jejich atmosféry.

## Doplňující literatura

Burbidge, G. R. 1956, ApJ, 124, 416

Kirchhoff, G., Annalen der Physik: 109, 275-301 (překlad F. Guthrie. The London, Edinburgh and Dublin philosophical magazine and journal of science (Taylor & Francis) 20, No. 130 (1860)

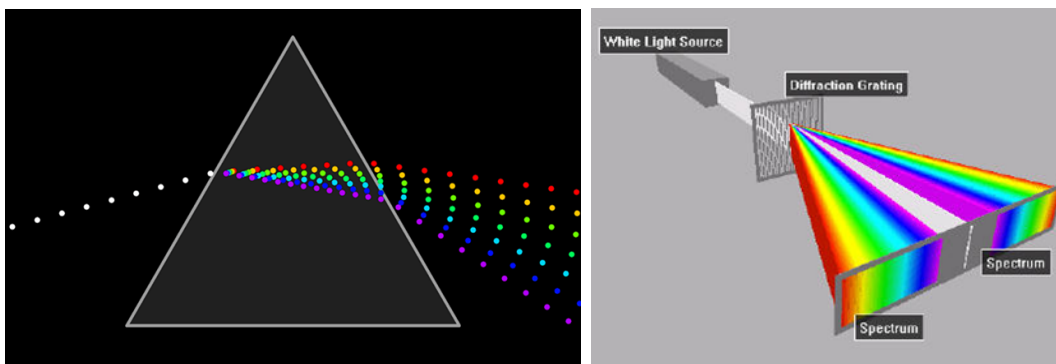
McSween, H. Y., Jr. 1999, Meteorites and their Parent Planets, by Harry Y. McSween, Jr, pp. 322. ISBN 0521587514. Cambridge, UK: Cambridge University Press, February 1999.,

Pokorný, Z., 2006, Vademecum - Váš průvodce vesmírem, Hvězdárna a planetárium M. Koperníka v Brně

Spurny, P., Haloda, J., & Borovicka, J. 2012, LPI Contributions, 1667, 6143

## 7 Spektroskopie

Nejkomplexnější informace o vzdálených vesmírných objektech získáváme z jejich spektra, rozložíme-li přicházející záření pomocí hranolu nebo optické mřížky. Ale začněme od začátku. Historie spektroskopie začíná v 17. století. Většinou se uvádí, že první, kdo rozložil sluneční světlo pomocí hranolu, byl roku 1665 proslulý Isaac Newton. Ve skutečnosti to byl již roku 1575 Franciscus Maurolicus. Newtona předstihl i český učenec Jan Marek Marci z Lanškrouna, který zkoumal vlastnosti barevných paprsků vycházejících z hranolu.<sup>1</sup> Po celá tisíciletí si lidé lámali hlavu s problémem, jak vznikají barvy. Počátkem novověku sice rozložili bílé světlo hranolem, správně vysvětlili duhu, ale fenomén vzniku barev zůstal nevyřešen. V roce 1802 objevil William Hyde Wollaston ve spektru Slunce sedm tmavých čar, které považoval za hranice mezi základními spektrálními barvami. O dvanáct let později ale německý optik a fyzik Joseph Fraunhofer sestavil spektroskop a s ním objevil, změřil a zapsal 574 tmavých čar (dnes Fraunhoferovy čáry) a Wollanstonovu hypotézu o hranicích barev vyvrátil. Dnes víme, že za barvu předmětů vděčíme odrazu světla. Jestliže má předmět modrou barvu, pohltí jeho povrch všechno světlo kromě jediného – světla o vlnové délce modrého světla, které odrazil. Bílé světlo je samozřejmě tvořeno všemi barvami, zastoupené jsou rovnoměrně všechny složky spektra, všechny barvy, které vidíme při rozkladu například hranolem. Bílý předmět je tedy takový, který odrazí většinu světla bez toho, aby některou složku (barvu) pohlcovao více než jinou. Černý předmět naopak většinu dopadajícího světla pohltí.<sup>2</sup>

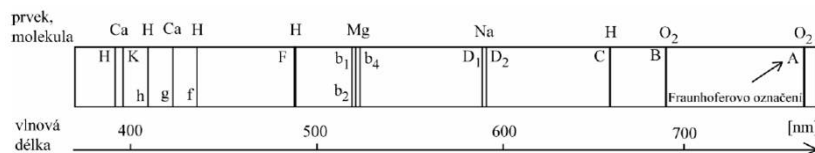


Obrázek 7.1: Rozklad bílého světla. Převzato z wikipedie a <http://h2physics.org>.

<sup>1</sup>Rektor Karlovy univerzity v Praze Jan Marek Marci byl znám ve své době pod různými přízvisky jako „pražský Hippokrates“, „český Galileo Galilei“, „český Platon“, „lanškrounský Archimedes“. Ve spektroskopii například rozložil bílé světlo hranolem na jednotlivé barvy a zkoumal vlastnosti jednotlivých světelných paprsků po dalším průchodu hranolem. Tato práce je například připisovaná až Newtonovi. Marci ale bohužel neznal a nepoužíval ve svých optických studiích tehdy již známý zákon lomu a nepokusil se (na rozdíl od Newtona) světlo rozložené hranolem opětovně spojit v bílé.

<sup>2</sup>Teorii barev se věnoval i věhlasný německý básník a prozaik Johann Wolfgang von Goethe, který o tom napsal v roce 1810 i pojednání „Teorie barev (Zur Farbenlehre)“.





Obrázek 7.2: Fraunhoferovy čáry ve slunečním spektru. Převzato z Pokorný (2006).

## 7.1 Dopplerův jev

25. května 1842 se v Praze konala schůze Královské české společnosti nauk, na níž vystoupil s přednáškou „O barevném světle dvojhvězd a některých jiných hvězd na obloze“ 1842 tehdejší profesor matematiky na pražské technické univerzitě, rakouský matematik a fyzik Christian Andreas Doppler. Popsal v ní chování světla, pokud se vůči sobě jeho zdroj a pozorovatel pohybují. Dopplerův jev patří mezi nejvýznamnější fyzikální jevy. Je využíván nejen v astronomii, ale v celé řadě v řadě vědních i technických oborů.

Záření vysílané nějakým zdrojem si můžeme představit jako řadu kulových vlnoploch, které se šíří do okolí zdroje. Je-li zdroj i příjemce v klidu, nepohybují se vůči sobě, pak doba mezi příchody vrcholů vln k pozorovateli se bude rovnat době mezi jejich odchody ze zdroje. Jestliže se ale bude vzdálenost mezi zdrojem a příjemcem zvětšovat, například v důsledku pohybu zdroje, pak doba mezi příchody po sobě následujících vrcholů vlny bude větší než doba mezi jejich odchody ze zdroje, protože druhý vrchol musí urazit delší dráhu než vrchol předchozí vlny. Pro pozorovatele to znamená, že registruje záření o delší vlnové délce, než kdyby byl zdroj v klidu. Samozřejmě se vlnová délka bude měnit i opačným způsobem. Pokud se vzájemná vzdálenost zdroje a příjemce zmenšuje, bude se zkracovat i pozorovaná vlnová délka záření.

Nechť tedy zdroj vysílá vlnoplochy s periodou  $T$ , a radiální rychlost zdroje vůči pozorovateli je  $v_r$ . Budeme uvažovat případ, kdy vzájemná vzdálenost zdroje a pozorovatele roste, tedy  $v_r > 0$ . Mezi vysláním dvou následujících vlnoploch (vrcholů vlny) dojde ke zvětšení vzdálenosti zdroj-pozorovatel o  $v_r \cdot T$ . Tuto vzdálenost překlene záření vysílané rychlostí světla  $c$  za čas  $v_r \cdot T/c$ . O tento čas tedy vzroste doba mezi příchody po sobě jdoucích vrcholů vlny k pozorovateli  $T' = T + v_r T/c$ . Vlnová délka vysílaného záření je  $\lambda = cT$ , zatímco vlnová délka přijímaného záření je  $\lambda' = cT'$ . Poměr vlnových délek vysílaného a přijímaného záření je pak

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = \frac{T'}{T} = 1 + \frac{v_r}{c}. \quad (7.1)$$

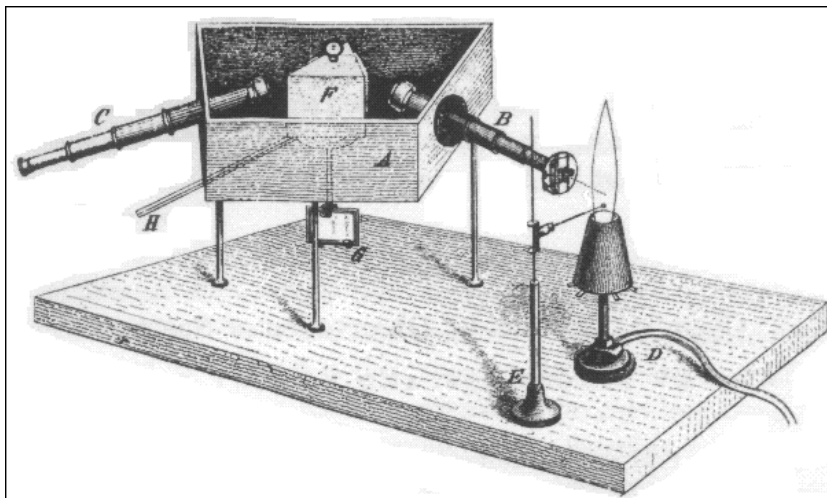
Ke stejnému vyjádření Dopplerova jevu dospějeme i za předpokladu, že se vzdálenost zdroje a pozorovatele zmenšuje, tedy  $v_r < 0$ .

Dopplerův jev má dalekosáhlé důsledky při zkoumání vesmíru. Umožňuje nám určit, zda se k nám vzdálené objekty nebo jejich části přibližují nebo vzdalují. Pokud se vzdalují, bude se vlnová délka jejich záření prodlužovat a jejich záření se bude posouvat více do červené oblasti spektra. Proto mluvíme o tzv. červeném nebo rudém posuvu. A opačně při přibližování objektu se jedná o modrý posuv.

## 7.2 Počátky astrofyziky

Na Fraunhoferovy spektroskopické výzkumy navázali v polovině 19. století Gustav Robert Kirchhoff a Robert Bunsen. Bunsen studoval charakteristické barvy zahřívaných prvků, ale nijak systematicky. Kirchhoff mu v létě 1859 zkusil vytvořit hranolová spektra těchto barev. Do října téhož roku pak zkonstruovali spektroskop (viz obr. 7.3), s nímž vlastně položili základy spektrální analýzy. Na základě mnoha experimentů odhalili dvě zákonitosti:

1. Jednotlivé prvky v plynném stavu mají spektrum složené z čar, jejichž počet a vlnové délky jsou za všech fyzikálních podmínek (teplota, hustota, tlak) vždy stejné, mění se jen výraznost čar.
2. Spektrální čáry plynu umístěného mezi zdrojem spojitého záření a pozorovatelem se jeví jako absorpční, jestliže je plyn chladnější než zdroj, nebo jako emisní, je-li plyn teplejší než zdroj.

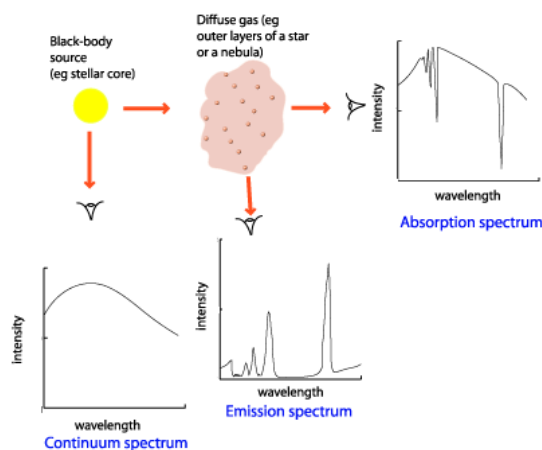


Obrázek 7.3: Spektroskop Kirchhoffa a Bunsena, D je Bunsenův hořák. Převzato z Kirchhoff & Bunsen (1860).

Na základě těchto zákonů byli schopni nejen odhalovat nové prvky na Zemi, ale detekovat je také ve slunečním spektru. Ukázali tak, že vzdálené světy hvězd jsou složeny ze stejných prvků jako se vyskytují zde na Zemi a že je možné zkoumat vlastnosti hvězd „na dálku“.<sup>3</sup> Tím položili základ astrofyziky. Už roku 1862 publikovali amatérský astronom William Huggins se svým sousedem, chemikem Williamem Allenem Millerem studii vybraných hvězdných spekter pomocí spektroskopu. V následujícím roce začal kněz Pietro Angelo Secchi<sup>4</sup> systematicky studovat hvězdná spektra a jako první se pokusil o jejich

<sup>3</sup>Za významné nezávislé potvrzení zákonů spektroskopie můžeme považovat objev druhého nejrozšířenějšího prvku ve vesmíru – hélia. V roce 1868 objevili nezávisle na sobě Angličan Norman Lockyer a francouzský astronom Jules Janssen při pozorování zatmění Slunce ve slunečním spektru čáry neznámého prvku. Švédští chemici Per Teodor Cleve a Nils Abraham Langlet jej v laboratoři na Zemi izolovali až roku 1895.

<sup>4</sup>Právě Secchi jako jeden z prvních zcela rozhodně tvrdil, že naše Slunce je hvězda.



Obrázek 7.4: Obrázek ukazuje, jak tentýž zdroj produkuje spojité spektrum (kontinuum) a čárová spektra emisní i absorpční. Převzato z Kaler (1989) a upraveno.

klasifikaci. Přibližně 4000 hvězdných spekter roztrídil do pěti kategorií. Přestože se jeho rozdělení neujalo a nepoužívá se, lze jej považovat za zakladatele spektrální klasifikace hvězd.

Už zmiňovaný William Huggins publikoval v roce 1867 práci, v níž na základě spektroskopických pozorování diskutuje, zda se sledované objekty pohybují od Země nebo k Zemi. Poprvé tak došlo k potvrzení a využití Dopplerova jevu ve hvězdné spektroskopii. Až do roku 1872 byly všechny spektroskopické studie hvězd prováděny pomocí spektroskopů. V tomto roce však vznikl první spektrogram hvězdy (mimo Slunce). Americký fyzik a astronom amatér Henry Draper pořídil první fotografický záznam spektra Vegy. Použití fotografie pro záznam spektra sledovaných objektů transformovalo spektroskop užívaný pouze „naživo“ pro přímé vizuální pozorování spekter na spektrograf<sup>5</sup>, který pozorované spektrum zaznamenával.

Na přelomu 19. a 20. století umožnilo právě použití fotografie provedení velkolepého projektu. Edward Pickering a „jeho ženy“ (viz obrázek 7.5), zejména Anthonia Mauryová a Annie Jump Cannonová popsaly na půl milionu hvězdných spekter! Na základě mnohonásobně většího vzorku spekter než měl Secchi, se pak zrodila nová klasifikace spekter hvězd (Maury & Pickering, 1897). Všechny výsledky byly v letech 1918-1924 publikovány v katalogu Henryho Drapera<sup>6</sup> (Cannon & Pickering, 1993).

## 7.3 Spektroskopie hvězd

Jednou z nejučinnějších metod zkoumání hvězd je spektroskopie. Záření hvězd zaznamenané v podobě spektrogramu nám přináší informace o rozdělení energie vyzařované hvězdou v závislosti na vlnové délce  $\lambda$  nebo frekvenci záření  $\nu$ . Právě popis funkce rozdělení energie ve spektru je jedním ze základních úkolů astrofyziky.

Spektrum hvězdy získáváme pomocí spektroskopu, resp. spektrografu rozkladem

<sup>5</sup>Poprvé byl termín spektrograf použit v roce 1884.

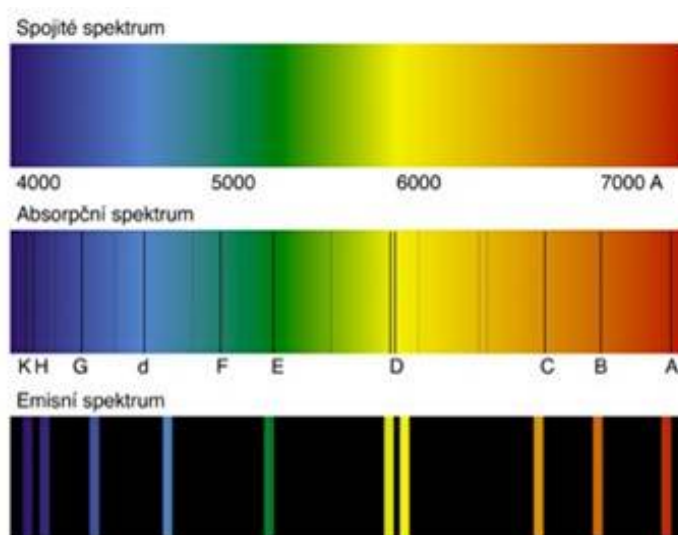
<sup>6</sup>Práce zpočátku těžila z Draperových výsledků a byla financována z jeho odkazu. Proto nese katalog jeho jméno. Data publikovaná v HD katalogu se používají dodnes.



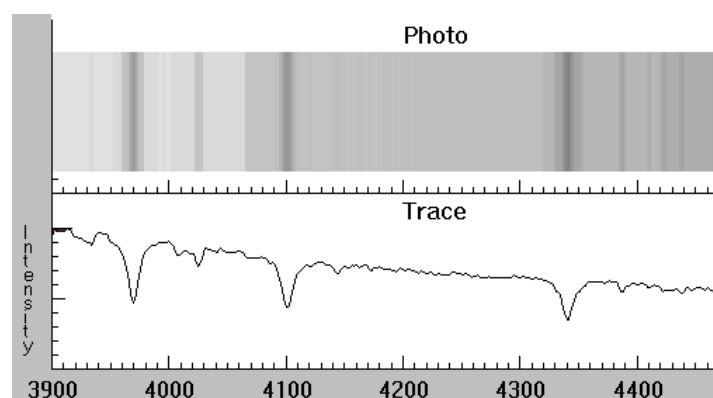
Obrázek 7.5: Fotografie zachycuje E. Pickeringa a jeho ženský tým na Harvard College Observatory 13. května 1913. Zdroj: Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics.

světla buď pomocí optického hranolu nebo spektrální mřížky – skleněné destičky, v níž je zpravidla až několik set rovnoběžných vrypů na jednom milimetru. Vzniklé spektrum je ve spektrografu zaznamenáno. Až do sklonku 20. století byla záznamovým médiem klasická fotografie, ale dnes už se spektrum zaznamenává elektronicky pomocí citlivých CCD kamer. Na snímku se objeví naexponovaný světlý proužek přes celý spektrogram představující zaznamenané spojité spektrum (kontinuum) a v něm lze nalézt tmavší (absorpční) čáry, případně i světlé (emisní) spektrální čáry (viz obr. 7.6 a 7.7).

V dolní části obrázku 7.7 jsou zřetelné absorpční spektrální čáry. Každý prvek, atom nebo molekula má svoje charakteristické skupiny spektrálních čar. Nejjednodušší soustavu čar má přirozeně vodík. Analýzou spektra objektu, hledáním skupin čar jednotlivých prvků, můžeme určovat složení těch vrstev pozorovaného objektu, odkud k nám záření přichází. Podoba spektra tedy nevypovídá nic o celkovém složení sledovaného objektu, hvězdy! U hvězd pomocí spektra můžeme studovat jen jejich atmosféry. Záření ale po cestě k nám prochází mezihvězdným prostředím, které vloží svůj otisk do spektra objektu, takže jej také můžeme studovat. Podle polohy spektrálních čar ve spektru, srovnáním s laboratorními spektry, můžeme určovat, zda se k nám objekt přibližuje nebo se naopak vzdaluje. Aplikujeme znalost Dopplerova jevu. Podle tvaru spektrálních čar pak lze studovat podmínky v místě vzniku záření – tlak, rychlost rotace hvězdy, přítomnost magnetického pole a další parametry. Různými postupy lze také vystopovat případné skvrny na povrchu hvězd, studovat hvězdný vítr, rozhodovat, zda má hvězda nějakého souputníka (jinou hvězdu, planetu). V posledních letech se pozorovací metody natolik zpřesnily, že dokonce už můžeme nejen odhalovat jinak skryté planety v cizích hvězdných soustavách, ale i studovat chemické složení exoplanetárních atmosfér.



Obrázek 7.6: Typy spekter. Spojité, absorpční, emisní. Převzato z <http://astronomia.zcu.cz>.



Obrázek 7.7: Horní část obrázku ukazuje fotografii hvězdného spektra v rozsahu 390 až 450 nm. Pro zpracování spektra je nutné proměřit zaznamenanou intenzitu v závislosti na vlnové délce. Dříve se takové měření provádělo ručně. Dnes je to záležitost softwaru, který projde digitální fotografií spektra od jednoho okraje k druhému a zaznamenané intenzity vynese do spektrografu v dolní části obrázku. Převzato z Projektu CLEA.

## 7.4 Spektrální klasifikace hvězd

Jak již víme, o první spektrální klasifikaci hvězd se pokusil Angelo Secchi. Využíval jen vlastní spektroskopická vizuální pozorování zhruba čtyř tisíc hvězd. Teprve užití fotografie a spektrografů počet sledovaných hvězd mnohonásobně zvýšilo. E. Pickering a jeho tým na Harvardské observatoři měl k dispozici už zhruba půl milionu hvězdných spekter. V prvním katalogu roku 1890 ještě použili jako základ Secchiho klasifikaci, ale s vlastním tříděním - typy A až N a P, O, Q. O sedm let později A. Mauryová ve svých 22 skupinách poprvé prohodila dva typy, dnešní B dala před A. V roce 1901 A. J. Cannonová revidovala předchozí sekvenci typů, a vyházela řadu písmen, tak, že vznikla dobře známá posloupnost O — B — A — F — G — K — M. V roce 1912 pak přidala

Tabulka 7.1: Spektrální třídy a povrchové teploty hvězd

Spektrální třída	Povrchová teplota hvězdy (přibližně)	Barva	Typičtí představitelé
O	30 000 – 50 000 K	modrá	Alnitak, Mintaka
B	11 000 – 30 000 K	modrobílá	Rigel, Spica, Regulus
A	7 500 – 11 000 K	bílomodrá	Sírius, Vega, Altair, Deneb
F	6 000 – 7 500 K	žlutobílá	Canopus, Prokyon, Algenib
G	5 000 – 6 000 K	žlutá	Slunce, Capella, Toliman
K	3 500 – 5 000 K	oranžová	Arkturus, Pollux, Aldebaran
M	3 000 – 3 500 K	červená	Betelgeuze, Antares, o Cet
Spektrální třída	Charakteristické čáry		
O	ionizované a neutrální helium, slabý vodík		
B	neutrální helium, silnější vodík		
A	silný vodík		
F	slabší čáry vodíku, ionizované kovy		
G	velmi slabý vodík, ionizované a neutrální kovy		
K	občas velmi slabý vodík, neutrální kovy, slabé molekulové pásy		
M	velmi málo nebo žádný vodík, neutrální kovy, silné molekulové pásy		
L	žádný vodík, pásy kovových hydridů, alkalických kovů a molekul		
T	velmi zřetelné spektrální pásy metanu		

ještě drobnější rozdělení jednotlivých typů na deset podtypů označených čísly 0 až 9 a toto rozdělení je dodnes základem spektrální klasifikace hvězd.

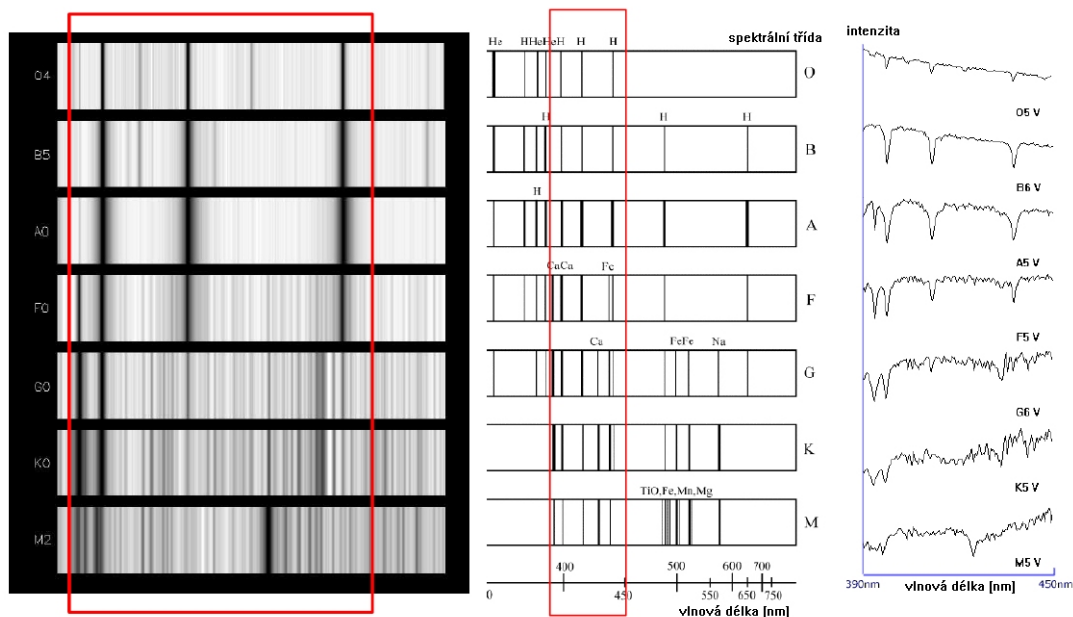
Koncem 19. století převládal názor, že spektrum hvězdy bude odrážet její celkové složení. A tak byl například Rigel zařazen mezi hvězdy héliové, které měly ve spektru nejvýraznější héliové čáry. Obdobně byly vytvořeny skupiny hvězd vodíkových (s Vegou), nebo železných, kam bylo zařazeno Slunce. V té době ale ještě nebylo známo, jak vlastně spektra hvězd vznikají. Dnes víme, že rozhodující pro vzhled spekter jsou fyzikální podmínky v místě vzniku záření. A klíčovým parametrem je teplota. V době vzniku Harvardské klasifikace nebylo ještě spojení spektrálních tříd s teplotou zřejmé. To prokázala až další z harvardských žen Cecílie Payne později Payne-Gaposhkinová (1925). Spektrální třídy v harvardské klasifikaci tedy představují teplotní škálu, kde nejteplejší hvězdy jsou spektrální třídy O a nejchladnější třídy M. Z tohoto poznatku vycházelo i nepřesné rozdělení hvězd na hvězdy rané a pozdní z počátku 20. století. Na základě chybné představy o vývoji hvězd, kdy má hvězda vzniknout jako žhavé a zářivé těleso, které pak už jen postupně chladne, zahušťuje se a pohasíná, byly spektrální třídy O, B, A označovány za rané a třídy K, M (někdy i F a G) naopak za pozdní. Přestože se takové označení občas objeví i dnes, je to chápáno už jen jako archaické označení skupiny horkých, resp. chladných hvězd. Pro jednotlivé spektrální třídy hvězd jsou charakteristické nejen teploty hvězdných atmosfér a jim odpovídající barvy hvězd, ale také převládající zastoupení čar určitých prvků ve spektrech (viz tabulka 7.1).

Protože, spektrální typy, respektive jejich posloupnost OBAFKGM, jak ji stanovila

Cannonová, se dost těžko pamatují, vznikla celá řada mnemotechnických pomůcek na jejich zapamatování. Posuďte sami:

Oh, Be A Fine Girl/Guy, Kiss Me  
 Only Boys Accepting Feminism Get Kissed Meaningfully  
 Only Bad Astronomers Forget Generally Known Mnemonics  
 Officially, Bill Always Felt Guilty Kissing Monica  
 Olga brečí a fňuká, Gustav krájí mrkev.

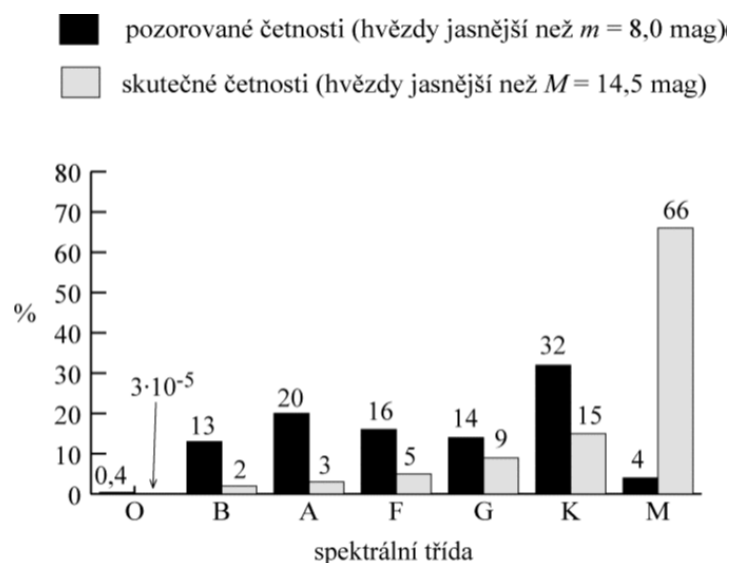
Možná vymyslíte trochu duchaplnější českou pomůcku. Těch anglických existují desítky<sup>7</sup>. V každém případě ale všechny pracují s původní verzí spektrální klasifikace. Jenže vývoj jde i zde kupředu. Původní sekvence byla rozšířena zejména do oblasti chladných objektů o spektrální typy L, T a Y. Mimo teplotní škálu spektrálních typů se pak uvádějí například typ W pro velmi zářivé hvězdy, nebo typy C, S pro obří uhlíkové hvězdy. Ke spektrální třídě hvězdy se někdy přidává doplňující označení, většinou malými písmeny, například „e“ značí výrazné emisní čáry (například B4e), „p“ zvláštní, pekulární spektrum hvězdy (např. A3p).



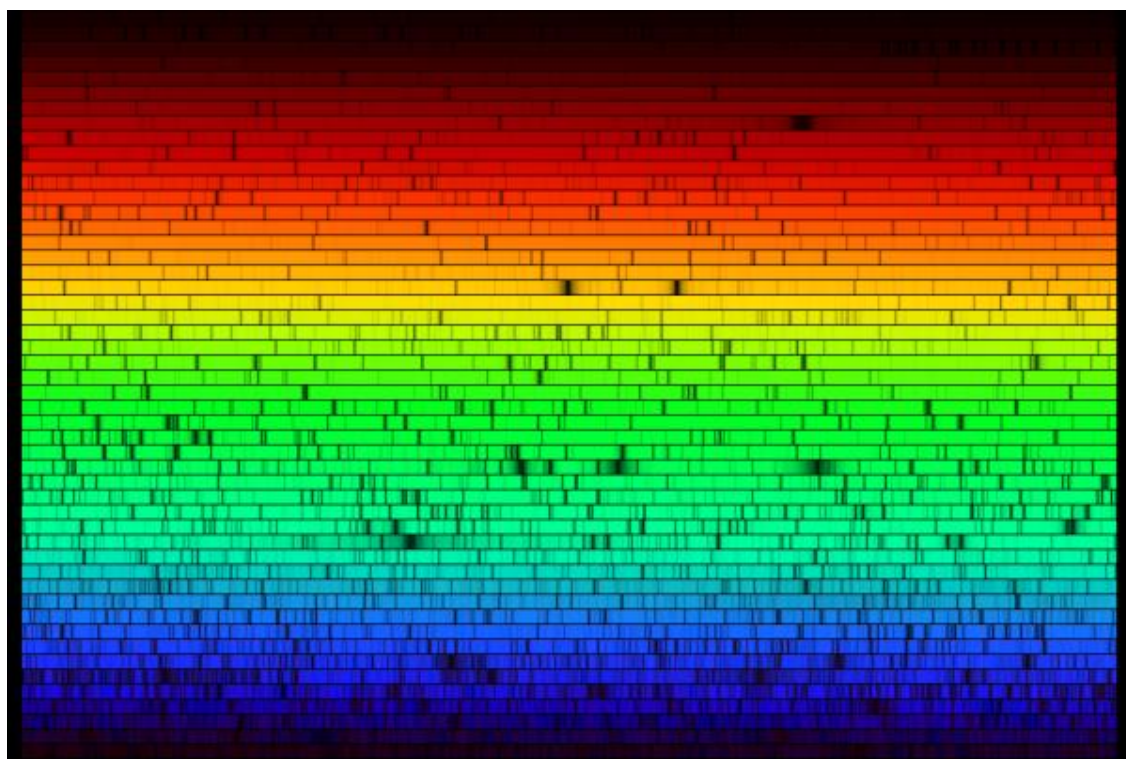
Obrázek 7.8: Harvardská spektrální klasifikace. Převzato z <http://cde.vwc.edu>, Pokorný (2006), CLEA Project a upraveno.

Přestože se dnes spektrální klasifikace běžně používá, může nám přinášet o okolním vesmíru i zkreslené informace. Jak je to možné? Na obrázku 7.9 jsou četnosti různých spektrálních tříd pro hvězdy s pozorovanou hvězdnou velikostí do 8 mag a skutečné četnosti, kdy byly do statistiky zahrnuty všechny hvězdy s absolutní hvězdnou velikostí do 14,5 mag. Je zřejmé, že mezi všemi hvězdami jsou nejčetnější chladné hvězdy spektrálního typu M, zatímco mezi nejjasnějšími hvězdami v okolí Slunce jsou nejvíce zastoupeny hvězdy K a není výraznějších rozdílů mezi třídami B, A, F, G.

<sup>7</sup><http://astro.wsu.edu/worthey/astro/html/mnemonic-trditional.html>,  
<http://www.astro.sunysb.edu/fwalter/AST101/mnemonic.html>



Obrázek 7.9: Četnosti různých spektrálních tříd. Převzato z Pokorný (2006).



Obrázek 7.10: Sluneční spektrum pořízené na McMath-Pierceově sluneční observatoři. Zdroj: Nigel Sharp (NOAO), FTS, NSO, KPNO, AURA, NSF. Astronomický snímek dne 29.6. 2003

## Doplňující literatura

- Cannon, A. J., & Pickering, E. C. 1993, VizieR Online Data Catalog, 3135, 0
- Doppler, Ch. A., 1842, Über das farbige Licht der Doppelsterne und einige andere Gestirne des Himmels. Praha



- Huggins, W., & Miller, W. A. 1862, Royal Society of London Proceedings Series I, 12, 444
- Huggins, W. 1867, Royal Society of London Proceedings Series I, 16, 382 (urther Observations on the Spectra of the Sun, and of Some of the Stars and Nebulae, with an Attempt to Determine Therefrom Whether These Bodies are Moving towards or from the Earth.)
- Kaler, J. B., 1989, Stars and their Spectra, Cambridge University Press, 1989 (revidované vyd. 1997)
- Kirchhoff, G., Bunsen, R. 1860, Chemical Analysis by Observation of Spectra, Annalen der Physik und der Chemie (Poggendorff), Vol. 110, pp. 161-189 (dated Heidelberg, 1860)
- Maury, A. C., & Pickering, E. C. 1897, Annals of Harvard College Observatory, 28, 1
- Payne, C. H., 1925, Stellar Atmospheres; A Contribution to the Observational Study of High Temperature in the Reversing Layers of Stars, Ph. D. Thesis, Radcliffe College
- Pokorný, Z., 2006, Vademecum - Váš průvodce vesmírem, Hvězdárna a planetárium M. Koperníka v Brně
- Štoll, I., 1996, Vesmír 75, 523,  
<http://www.vesmir.cz/clanek/jan-marek-marci-z-lanskrouna>

## 8 Fotometrie

Slovo „fotometrie“ vzniklo z řeckých slov *fotos*, což znamená světlo a *metron*, což značí míra nebo měřit. Je to tedy část fyziky, zabývající se měřením světla, přesněji řečeno zkoumáním hustoty světelného toku.<sup>1</sup>

Dalo by se s trochou nadsázky říci, že vlastně fotometrická měření patří k nejstarším fyzikálním měřením vůbec. Zcela nepochybně od chvíle, kdy člověk začal uvědoměle pozorovat noční oblohu s hvězdami, začal i porovnávat a určovat, která z hvězd je jasnější a která slabší. Nejstarší soubor fotometrických dat ale pochází až z roku 129 př.n.l. Tehdy Hipparchos dokončil svůj katalog. Na základě vlastních pozorování v něm uvedl nejen polohu 1080 hvězd v ekliptikálních souřadnicích, ale i to, jak jsou jasné a v jakém souhvězdí<sup>2</sup> se nacházejí. Kolem roku 150 našeho letopočtu vydal Claudios Ptolemaios jakousi astronomickou encyklopedii tehdejší doby *Almagest*. V ní mimo jiné uvádí i katalog 1025 hvězd. V podstatě se jedná o aktualizovaný Hipparchův katalog. Hvězdy jsou zde podle své jasnosti rozděleny do šesti skupin. Nejjasnější hvězdy byly v první skupině, nejslabší ve skupině šesté. Jak Hipparchos, tak i Ptolemaios věřili, že hvězdy jsou umístěny na sféře hvězd. Logicky jim vycházelo, že čím je hvězda jasnější, tím je větší. Rozdělení podle jasnosti tedy odpovídalo rozdělení podle velikosti, a proto jasnost vyjadřovali ve hvězdných velikostech. Dnes už samozřejmě dogma sféry hvězd padlo a víme, že jasnost hvězdy nemusí odpovídat její velikosti, nicméně název veličiny vyjadřující jasnost hvězdy, tzv. **hvězdná velikost** se používá dodnes. Jednotkou této veličiny je jedna magnituda. V kapitole 2 jsme uvedli, že při rozdílu hvězdných velikostí dvou hvězd 5 mag, je jedna hvězda je stokrát jasnější než druhá. Jak jsme k tomu dospěli? Z předchozího vyplývá, že to zavinili Hipparchos a Ptolemaios, ale pachatelem je Pogson.

### 8.1 Pogsonova rovnice

Když Hipparchos a Ptolemaios třídili hvězdy podle jasnosti do šesti skupin hvězdných velikostí, nevědomky se řídili zákonitostí, kterou až v 19. století popsali lékař E. H. Weber a psycholog G. Th. Fechner. Weberův-Fechnerův psychofyzický zákon říká, že při exponenciální změně podnětů, se pocity mění lineárně. Jinak řečeno, mění-li se fyzikální podněty působící na naše smysly řadou geometrickou, vnímáme jejich změnu v řadě aritmetické. Nebo ještě jinak, míra fyziologického vjemu je úměrná logaritmu míry jeho fyzikální příčiny. V praxi si lze platnost zákona snadno ověřit různými pokusy. Pro světlo lze například zinscenovat následující pokus. V místnosti nainstalujeme na strop dostatečný počet stejných žárovek. Určitý počet rozsvítíme a budeme sledovat osvětlení knihy na stole. Když rozsvítíme dvojnásobek žárovek, bude se čtenáři knihy zdát, že se osvětlení zvýšilo jen nepatrně a nikoli dvojnásobně. V důsledku Weberova-Fechnerova zákona budou rozdíly našich pocitů (vjemů) při pozorování hvězd stejné, pokud se hvězdy liší vždy o jednu třídu z Hipparchova, respektive Ptolemaiova katalogu. Veličinou, která působí naše vjemy při pozorování hvězd, je **jasnost** hvězd. Z hle-

<sup>1</sup>Obecnějším oborem je radiometrie, které zkoumá obecně hustotu záření v jakékoli oblasti spektra elektromagnetického záření.

<sup>2</sup>Hipparchos převzal názvy souhvězdí od Eudoxa.

diska fyzika se jedná o hustotu světelného toku, respektive o osvětlení<sup>3</sup>, které hvězda vyvolá v místě pozorování. Fyzikální jednotkou jasnosti je pak lumen na metr čtverečný ( $\text{lm}/\text{m}^2$ ), tedy 1 lux (lx). Vraťme se ale k aplikaci Weberova-Fechnerova zákona ve fotometrii. Matematicky ji lze zapsat ve tvaru

$$j_1/j_2 = j_2/j_3 = j_3/j_4 = \dots = \rho, \quad (8.1)$$

kde  $j_i$  jsou jasnosti  $i$ -té hvězdy a  $\rho$  kvocient geometrické řady. Almagest včetně Ptolemaiova katalogu hvězd byl svým způsobem biblí astronomie po dlouhá století. Další hvězdné katalogy začaly vznikat až v novověku. V 18. a 19. století používaly různé katalogy hvězd různé hodnoty  $\rho$  od 2,3 až po 2,8. V roce 1856 publikoval anglický pozorovatel Norman Pogson článek o jasnostech planetek (Pogson, 1856), v němž navrhl hodnotu  $\log \rho = 0,4$  (přesně), tedy  $\rho = 2,5118864\dots$  S touto hodnotou kvocientu lze zapsat tzv. **Pogsonovu rovnici** ve tvaru

$$j_m = j_n \rho^{(n-m)}, \text{ resp. } m - n = -2.5 \log \frac{j_m}{j_n}, \quad (8.2)$$

kde  $m, n$  jsou hvězdné velikosti v magnitudách a  $j_m, j_n$  jsou jasnosti hvězd. Tím Pogson jednoznačně převedl historický systém hvězdných velikostí do korektní matematické podoby. Hvězdnou velikost můžeme definovat úpravou Pogsonovy rovnice (8.2)

$$m = -2.5 \log \frac{j}{j_0}, \quad (8.3)$$

kde  $j_0$  je jasnost objektu s nulovou hvězdnou velikostí, který působí osvětlení  $2.54 \cdot 10^{-6}$  lx. Pogsonova rovnice, hvězdná velikost, magnituda a jasnost jsou jedny z nevýznamnějších pojmů v astronomii. Jejich zvládnutí je opravdu zásadní. Ale pozor na skryté záludnosti. Tak například, jak je hvězda jasná vyjadřujeme běžně nikoli pomocí jasnosti, ale pomocí hvězdných velikostí v magnitudách. Vzhledem k definici hvězdné velikosti je ale třeba si uvědomit, že zmenšuje-li se hvězdná velikost, jasnost objektu roste! Nejjasnější objekty naší oblohy mají tedy nejmenší hvězdnou velikost, která je dokonce záporná (viz tabulka 8.1). Dávejte si také pozor a nezaměňujte název veličiny (hvězdná velikost) s její jednotkou (magnituda). Bohužel nalezneme dnes stále mnoho případů nesprávného používání i u renomovaných autorů<sup>4</sup>. Teď už je také zřejmé tvrzení, kterým jsme v kapitole 2 termíny hvězdná velikost a magnituda uvedli: Pokud je jasnost hvězdy stokrát menší než jasnost jiného objektu, je rozdíl hvězdných velikostí přesně 5 magnitud. Z toho mimo jiné vyplývá, že rozdílem jasností dvou objektů lišících se o 1 mag je pátá odmocnina ze sta, to je 2,5118864...

Pogson odvodil vztah pro světlo, tedy pro vizuální obor spektra. Pogsonova rovnice ale platí zcela obecně i pro jiné části spektra. Místo jasností zde budou vystupovat obecně hustoty toku záření  $F$  a Pogsonova rovnice pro hvězdy 1 a 2 bude mít podobu

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \frac{F_1}{F_2}, \quad (8.4)$$

<sup>3</sup>Pro připomenutí fotometrických veličin je jejich souhrn uveden ve stručném přehledu v Appendixu.

<sup>4</sup>Připomeňme, že příklady správného a nesprávného použití pojmů magnituda a hvězdná velikost jsme uvedli v tabulce 2.1

Tabulka 8.1: Hvězdné velikosti objektů

Objekt	Hvězdná velikost
Slunce	-26,7 mag
Měsíc v úplňku	-12,7 mag
Venuše při největší jasnosti	-4,7 mag
Sírius	-1,5 mag
Vega	0,0 mag
Nejslabší hvězdy viditelné očima	6 mag
Nejslabší objekty pozorov. dalekohledem na Zemi	28 mag
Nejslabší objekty pozorov. kosmickým dalekohledem	30 mag

respektive

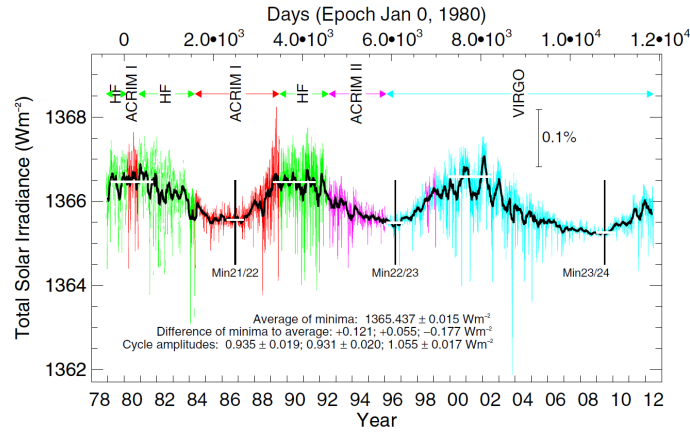
$$\frac{F_1}{F_2} = 10^{-0.4(m_1 - m_2)}. \quad (8.5)$$

Budeme-li ze spektra vybírat vždy jen určitý interval vlnových délek a studovat fotometrii objektu jen v této části spektra, bude naše informace o studovaném objektu značně neúplná. Celkový obrázek o zářivém výkonu objektu si uděláme až pokud vezmeme v úvahu celý rozsah spektra elektromagnetického záření. Jasnost hvězdy určená v celém rozsahu spektra označíme jako bolometrickou. K měření **bolometrické jasnosti** slouží velmi citlivé přístroje – bolometry. Jejich měření je založeno na změně vodivosti většinou zlatého nebo platinového proužku. Záření pohlcené proužkem zvýší jeho teplotu, sníží elektrický odpor a galvanometr naměří větší proud. Naměřený proud je vlastně mírou celkového dopadajícího záření. Pozorovaný zdroj vyzáří do svého okolí na všech vlnových délkách za 1 sekundu celkovou energii, kterou označujeme jako **zářivý výkon zdroje**  $L$ . Jeho hodnotu udáváme ve wattech. Jestliže do vzdálenosti  $r$  od zdroje záření umístíme kolmo na směr přicházejících paprsků plochu  $1 \text{ m}^2$ , proteče touto plochou za jednu sekundu množství energie  $F$ , která se rovná hustotě zářivého toku ve  $\text{W/m}^2$  a tedy bolometrické jasnosti. Pro zářivý výkon zdroje  $L$  pak lze psát

$$L = 4\pi r^2 F. \quad (8.6)$$

Je zřejmé, že bolometrická měření lze vykonávat jen mimo zemskou atmosféru, která blokuje určité oblasti elektromagnetického záření. To se samozřejmě týká i měření hustoty toku záření našeho Slunce. Měření prováděná na povrchu Země závisí na řadě faktorů, například denní, roční době, tedy výšce Slunce nad obzorem, povětrnostních podmínkách, stavu atmosféry. Meteorologové k takovým měřením používají pyranometr. Mohou zjistit množství slunečního záření za hodinu, den nebo celý rok pro danou lokalitu. Jestliže se oprostíme od všech pozemských vlivů a provedeme měření hustoty toku slunečního záření nad zemskou atmosférou, v kosmickém prostoru ve vzdálenosti 1 au od Slunce, získáme bolometrickou jasnost Slunce, které říkáme **sluneční konstanta**. Její střední hodnota  $K$  se udává přibližně  $1367 \text{ Wm}^{-2}$ . Skutečná hodnota kolísá v důsledku změn na Slunci, tzv. slunečního cyklu (viz kapitola o Slunci), ale i v důsledku eliptické trajektorie Země kolem Slunce. První měření sluneční konstanty ale nejsou omezena až na kosmický věk lidstva. Množství dopadající slunečního záření měřili na

zemském povrchu ve 30. letech 19. století Claude Pouillet nebo John Herschel. Kolem roku 1880 zkonstruoval Samuel Pierpont Langley první bolometr. Následovala další pozemská měření sluneční konstanty, jejichž autoři se vždy snažili (více či méně úspěšně) naměřené hodnoty opravit o vliv atmosféry. Pozemská měření vykazují oproti kosmickým odchylky a nepřesnosti zhruba 2 %. Nejnověji se měl měření sluneční konstanty věnovat satelit Glory, který startoval 4. března 2011. Bohužel pro technickou závadu se nedostal na oběžnou dráhu a družice v ceně 424 milionů dolarů skončila pravděpodobně někde v jižním Pacifiku.



Obrázek 8.1: Měření sluneční konstanty na družicích s využitím různých přístrojů v letech 1980-2012. Změny odpovídají jedenáctiletému cyklu aktivity Slunce. Zřetelné je prodloužení posledního minima sluneční činnosti. Převzato z World radiation Center (<http://www.pmodwrc.ch>).

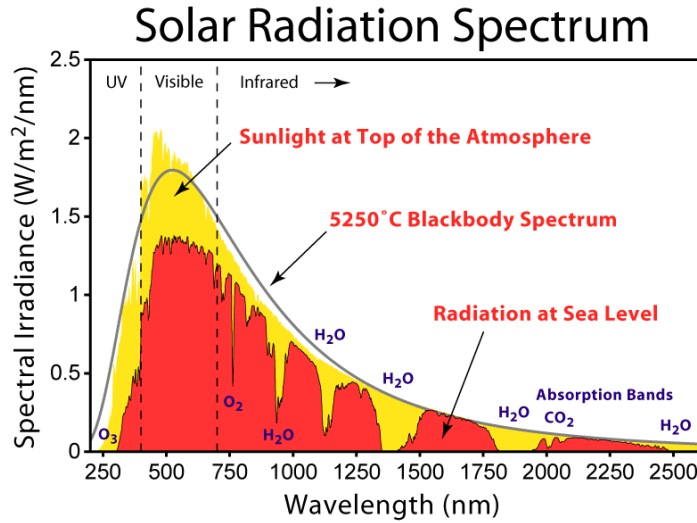
## 8.2 Absolutní jasnost, modul vzdálenosti

Zaznamenané jasnosti, ať již v určité části spektra nebo bolometrické, popisují pozorovanou jasnost, ale bohužel neumožňují porovnávat mezi sebou různé zdroje. Zjištěné hodnoty totiž závisejí na vzdálenosti zdroje. Abychom mohli jasnosti snadno poměřovat, umístíme myšlenkově všechny objekty do stejné nominální vzdálenosti, běžně je jí 10 parseků. Všechny objekty tak vlastně umístíme na pomyslnou sféru hvězd, jakou uvažovali naši předkové, jen s tím rozdílem, že známe, definujeme její rozměr. Jasnost, jakou by měla hvězda ze vzdálenosti 10 parseků označujeme jako **absolutní jasnost hvězdy**. Hvězda pozorovaná z nominální vzdálenosti 10 pc pak bude mít tzv. **absolutní hvězdnou velikost**. Vztah mezi pozorovanou hvězdnou velikostí  $m$  a absolutní hvězdnou velikostí  $M$  téhož objektu lze snadno odvodit. Do Pogsonovy rovnice.

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \frac{F_1}{F_2} \quad (8.7)$$

dosadíme jasnosti (hustoty zářivého toku)  $F$  ze vztahu 8.6. Pak

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \frac{\frac{L}{4\pi r_1^2}}{\frac{L}{4\pi r_2^2}}. \quad (8.8)$$



Obrázek 8.2: Spektrum slunečního záření na vrcholu zemské atmosféry a na mořské hladině ve srovnání se zářením absolutně černého tělesa o přibližně stejné teplotě (5525 K) jako sluneční povrch. Je patrné, jak jsou určité části slunečního záření v atmosféře pohlcovány. Dodatečné světlo je naopak výsledkem určitého přerozdělení způsobeného Rayleighovým rozptylem. Zdroj: Robert A. Rohde, Global Warming Art project.

Ale jedná se o jeden objekt se zářivým výkonem  $L$ , který budeme sledovat ze dvou vzdáleností. Řekněme, že  $r_2=10$  pc,  $r_1$  je nějaká obecná vzdálenost  $r$ . Pak  $m_1$  je pozorovaná hvězdná velikost  $m$  a  $m_2$  odpovídá absolutní hvězdné velikosti  $M$ . Po dosazení a úpravách dostaneme vztah

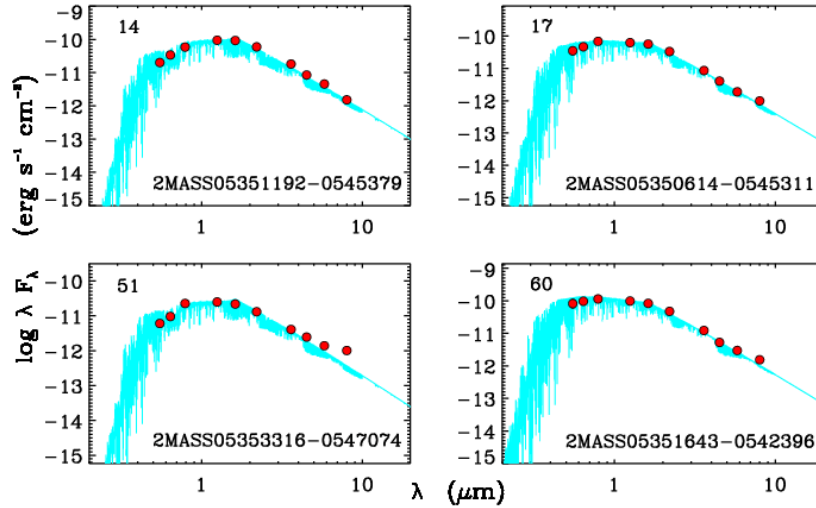
$$m - M = -5 \log \pi - 5 = 5 \log r - 5, \quad (8.9)$$

kde  $\pi$  je paralaxa hvězdy (v úhlových vteřinách) a  $r$  vzdálenost (v parsecích). Rozdíl ( $m-M$ ) označujeme jako **modul vzdálenosti**.

### 8.3 Barvy v astronomii

Jedním z hlavních úkolů astrofyziky je studovat průběh vyzářené energie v závislosti na vlnové délce nebo frekvenci záření kosmických objektů. Jenže pozorovat tyto objekty v celém rozsahu elektromagnetického spektra je, jak už víme, velmi náročné a na zemském povrchu v principu nerealizovatelné. Navíc většinou máme k dispozici jen vybavení pro fotometrii. Otázkou tedy je, zda vůbec můžeme požadovanou informaci o rozložení vyzařované energie studovaného objektu získat fotometrickým měřením ze zemského povrchu. A pokud ano, jak nejnázorněji to provést. Na obrázku 8.2 vidíme názorně, jak atmosféra pohlcuje určité části spektra. Na povrchu Země budeme tedy měřit jen v oblastech propustnosti atmosféry. Ty se ale mění podle aktuálních podmínek. Je tedy vhodné vymezit „okna propustnosti“ jiným způsobem a tak, aby nepodléhaly místním a časovým změnám. Využijeme sady fotometrických filtrů, které vymezují, propouštějí záření jen v přesně definovaných intervalech vlnových délek. V oblasti světla půjde

s trochou nadsázky o úseky odpovídající určitým barvám, proto se někdy mluví o fotometrických pozorováních provedených v určitých barvách. Jestliže budeme provádět fotometrická měření s použitím sady fotometrických filtrů, dostaneme jako výsledek sadu bodů, které nám pomohou celkem dobře celkovou závislost energie (vyzářené objektem) na vlnové délce záření zrekonstruovat (viz obrázek 8.3). Kvazibolometrická měření v celém rozsahu citlivosti přístroje, například CCD kamery jsou v tomto případě spíše na závadu.



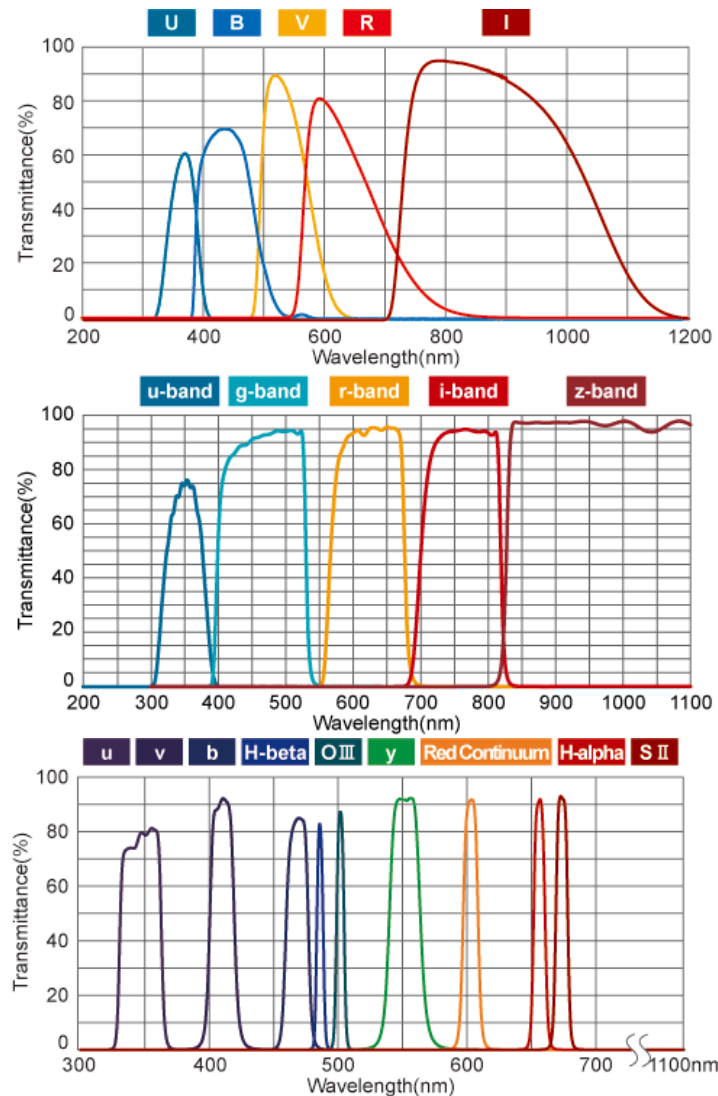
Obrázek 8.3: Rozložení energie ve spektru (SED) čtyř hvězd z katalogu 2MASS. Červené body představují výsledky fotometrických měření, světle modře je zobrazen uměle spočtené spektrum hvězd, které nejlépe odpovídá fotometrickým pozorováním. Zdroj: Frasca et al. (2009).

*Fotometrické filtry* propustí jen vymezenou část spektra, zbytek nemilosrdně pohltí. Ale každý filtr je definovaný nejen oblastí spektrální propustnosti, ale i tvarem funkce propustnosti (viz obrázek 8.4). V praxi se používají určité vhodně zvolené sady filtrů. Dnes je těchto sad filtrů, chcete-li fotometrických systémů přes dvě stě. První systém filtrů navrhli Johnson & Morgan (1953). Je typickým představitelem soustavy širokopásmových filtrů s oblastí propustnosti řádově desítky nanometrů. V dnešní době se používá doplněná verze. Původní systém filtrů *UBV*, kde v barvě *U* (ultraviolet) je maximum propustnosti pro vlnovou délku 365 nm, v *B* (blue) 440 nm a ve *V* (visual) 550 nm, byl doplněn filtry *R* (red) s maximem propustnosti pro vlnovou délku 700 nm a *I* (infrared) s maximem v 800 nm (viz obrázek 8.4). Hvězdné velikosti v jednotlivých barvách, oblastech spektra podléhají stejným zákonitostem jako hvězdná velikost vizuální. Pogsonova rovnice zde platí zcela analogicky. Rozdíly hvězdných velikostí téhož objektu zjištěných ve dvou různých filtrech označujeme jako **barevný index**, například barevný index  $(B - V) = m_B - m_V = M_B - M_V$ <sup>5</sup>.

Už jsme zmínili, že fotometrické filtry byly zavedeny jako náhražka spektroskopie. Jejich použitím ztratíme značnou část záření přicházejícího od pozorovaného objektu. Přednosti pozorování s filtry ale tento handicap předčí. Fotometrie provedená v několika

<sup>5</sup>Vždy se jedná o rozdíl hvězdné velikosti pro kratší vlnovou délku mínus hvězdná velikost téhož objektu pro větší vlnovou délku.

barvách nám pomůže určit, jak hvězda vyzařuje v určitých částech elektromagnetického spektra. Ale nejen to, některé barevné indexy vypovídají například o teplotě, hmotnosti hvězd, obsahu kovových prvků v jejich atmosférách apod. Například hodnota barevného indexu  $B - V$  vypovídá o tom, v jaké barvě hvězda nejvíce září, v jaké vlnové délce leží maximum vyzařované energie, respektive jaká je její povrchová teplota. Je třeba ale dávat pozor na to, že hvězdné velikosti klesají s narůstající jasností hvězd! To znamená, že hvězda s menším  $B - V$  indexem je modřejší než hvězda s vyšším indexem. Horké namodralé hvězdy budou mít barevný index  $B - V$  záporný, zatímco chladné červené kolem  $+1$  mag a větší.



Obrázek 8.4: Ukázka křivek propustnosti filtrů různých fotometrických systémů. Nahoře je nejběžnější, širokopásmový Johnsonův systém  $UBVRI$ . Uprostřed systém používaný pro přehlídkový projekt SDSS a dole několik úzkopásmových filtrů. Zdroj: <http://www.asahi-spectra.com>.

Barevný index objektu nezávisí na jeho vzdálenosti. Pro vzdálené objekty ale může být hodnota ovlivněna tzv. **mezihvězdnou extinkcí**, kdy je část záření pohlcena ma-



teriálem v mezihvězdném prostředí mezi zdrojem a námi. Mezihvězdná extinkce způsobí, že se nám pak objekty jeví červenější než stejné objekty v malé vzdálenosti od nás. Množství zčervenání je charakterizováno **barevným excesem**, rozdílem mezi pozorovaným a normálním barevným indexem, což je barevný index hvězdy bez vlivu extinkce. Například ve fotometrickém systému *UBV* je barevný exces

$$E_{B-V} = (B - V)_{\text{pozorovaný}} - (B - V)_{\text{skutečný}}. \quad (8.10)$$

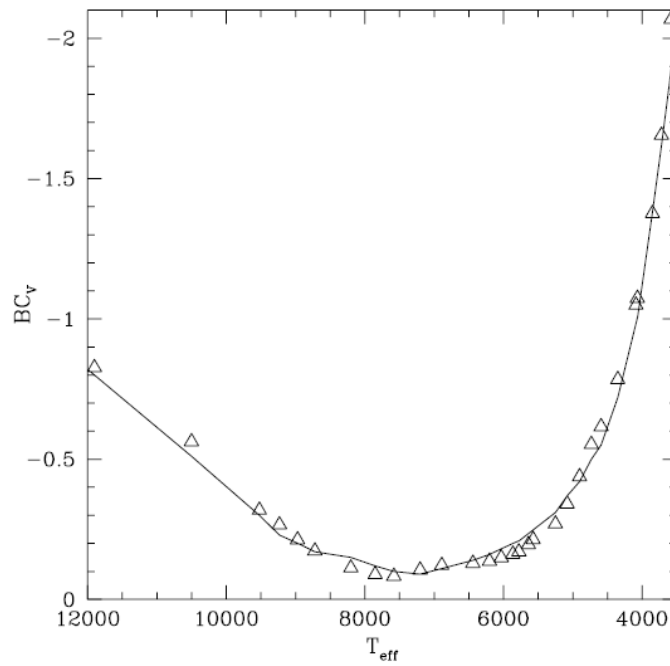
Pro korektní využití naměřených hodnot a jejich astrofyzikální interpretaci je nutné získaná měření opravit o mezihvězdnou extinkci. Oprava je nutná i v případě, kdy potřebujeme použít bolometrickou hvězdnou velikost, ale máme k dispozici jen hvězdnou velikost vizuální, tedy v barvě *V*. Pak uplatníme tzv. **bolometrickou korekci**, která je dána jako rozdíl bolometrické a vizuální hvězdné velikosti

$$BC = m_{\text{bol}} - m_{\text{viz}} = M_{\text{bol}} - M_{\text{viz}}. \quad (8.11)$$

Bolometrická korekce je přibližně nulová pro hvězdy spektrální třídy F ( $T_{\text{ef}} = 6\,800\text{ K}$ ). Všechny ostatní hvězdy jsou jasnější bolometricky než vizuálně. Bolometrická korekce je pak záporná! Ale pozor, většina autorů kreslí závislost bolometrické korekce na teplotě s obráceným chodem hodnot na ose *y*, stejně jako na převzatém obrázku 8.5. Pro některé typy hvězd nabývá korekce hodnoty i  $-4\text{ mag}$ , takže určitě není zanedbatelná! Ze vztahu 8.11 je navíc zřejmé, že stejná bolometrická korekce platí pro pozorované i absolutní hvězdné velikosti téhož objektu. Pokud se tedy dopracujeme až k absolutním bolometrickým hvězdným velikostem pozorovaných objektů, můžeme přímo poměřovat jejich zářivý výkon.

## Doplňující literatura

- Flower, P. J. 1996, ApJ, 469, 355  
 Frasca, A., Covino, E., Spezzi, L., et al. 2009, A&A, 508, 1313  
 Girardi, L., Bertelli, G., Bressan, A., et al. 2002, A&A, 391, 195  
 Johnson, H. L., Morgan, W.W., 1953, ApJ 117, 313  
 Lejeune, T., Cuisinier, F., & Buser, R. 1997, A&A Supl.S, 125, 229  
 Moro, D., Munari, U., 2000, A&A Suppl. 147, 361  
 Pogson, N. 1856, MNRAS, 17, 12  
 Schmidt-Kaler, Th., 1982, in: Landolt-Börstein, Neue Serie, Gruppe VI, Bd. 2b, Schaifers K., Voigt H.H. (eds.). Springer, Berlin Heidelberg New York, p. 14  
 Strömgren, B. 1956, Vistas in Astronomy 2, 1337  
 Schaefer, B. E. 2005, Journal for the History of Astronomy, 36, 167



Obrázek 8.5: Bolometrická korekce jako funkce efektivní teploty pro sadu spekter hvězd slunečního složení. Čára ukazuje empirickou závislost převzatou z Schmidt-Kaler (1982). Zdroj: Lejeune et al. (1997).

## 9 Optická astronomie

Optická astronomie se zabývá sledováním vesmírných objektů zejména ve vizuální oblasti spektra. Po celá tisíciletí byl základním přístrojem astronoma jeho zrak. Teprve v novověku začal člověk zrak „posilovat“ použitím čoček, dalekohledů a od 19. století i různých detektorů a záznamových zařízení. V současnosti se oblast optické astronomie mírně rozšířila. Stejně přístroje je možné využívat i na blízké infračervené a blízké ultrafialové záření, takže rozsah využívaných vlnových délek je zhruba 330 nm až 1  $\mu\text{m}$ . Většina pozorování je prováděna na zemském povrchu. Atmosférický oceán nad námi a našimi přístroji pozorování silně ovlivňuje a někdy dokonce znemožňuje. Proto se nejlepší observatoře staví vysoko v horách a nebo se umístí ještě výše – až do kosmického prostoru. Ale než se dostaneme ke kosmickým observatořím, je třeba porozumět fungování a základním principům i jednoduchých astronomických přístrojů.

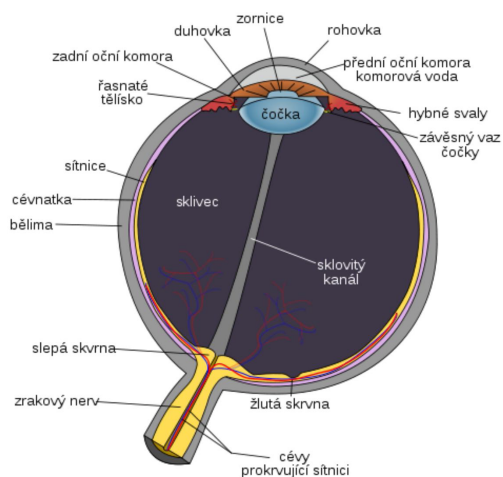
### 9.1 Astronomův nejcennější přístroj

Kdysi jsem položil dětem v planetáriu otázku: „Co pokládáte za nejcennější přístroj astronoma – a) dalekohled, b) počítač, c) něco jiného?“. Většina dětí odpověděla, že dalekohled, několik pak myslelo na počítač. Třetí možnost nezvolil nikdo. A přece. Odpověď c) je správně. Nejcennějším přístrojem astronoma je lidské oko!

I když většina odborníků odmítá ve svých pracech používat vizuální pozorování, tedy pozorování prováděná pouhými očima případně s pomocí dalekohledu, i oni jsou uchvázeni krásami nočního nebe posetého hvězdami, které jim zprostředkují jejich oči. Podívejme se nyní do útrob tohoto vynikajícího orgánu a prozradíme si, jak vlastně oko pracuje.

Oko má téměř kulový tvar (viz obrázek 9.1). V přední průhledné části se nachází rohovka a za ní duhovka, která reguluje množství světla dopadajícího do oka. Tmavý otvor uprostřed duhovky se nazývá zornice (zornička, panenka, pupila). Její průměr se mění podle intenzity osvětlení. Ve dne je jen 2 až 4 milimetry, v noci to může být až 9 milimetrů. Velikost zornice klesá s přibývajícím věkem. Jak na tom jste právě vy, si konec konců můžete změřit sami před zrcadlem. Za duhovkou je dvojnásobná oční čočka, jejíž ohnisková vzdálenost je přibližně 15 mm (přední ohnisko je 15.7 mm před rohovkou, zadní ohnisko 24.1 mm před sítnicí). Ostře vidí oko jen v rozmezí 1-2° kolem své optické osy. Po průchodu čočkou vstoupí paprsek do prostředí vyplněného sklivcem a dopadne na zadní plochu oka potaženou sítnicí. V ní jsou dva druhy světločivých buněk — čípky a tyčinky.<sup>1</sup> Asi 6,5 milionu čípků, které umožňují barevné vidění, je soustředěno v okolí optické osy čočky. Až 125 milionů podstatně citlivějších tyčinek pro černobílé vidění

<sup>1</sup>Výsledky řady výzkumu ukazují, že v sítnici jsou ještě třetí fotoreceptory, označované obvykle písmenem „C“. Jde o čidla, která člověku zajišťují řízení mnoha biorytmů, pravidelně se opakujících přibližně ve dvacetičtyřhodinovém (cirkadiánním) cyklu. Tento rytmus se vyvinul na základě pravidelného střídání světla a tmy v závislosti na otáčení Země kolem své osy. Vyznačuje se aktivní fází ve dne a klidovou fází v noci. Řídí se jím většina biorytmů, např. tělesná teplota, krevní tlak, tepová frekvence, látkový metabolismus, ladění organismu k práci či k odpočinku, ovlivňuje i imunitní, sexuální a další funkce (Habel, 2005). Také proto je velmi důležité bojovat proti světelnému znečištění, které vadí nejen při astronomických pozorováních, ale zejména může narušit cirkadiánní cyklus biologických pochodů člověka, což může vést ke zdravotním komplikacím a poškození zdraví.



Obrázek 9.1: Lidské oko. Převzato z <http://techmania.cz/edutorium>.

je rozmístěno dále od optické osy oční čočky, nejvíce je jich asi 20  $\mu\text{m}$  od ní. Čípky se uplatňují zejména při denním (fotopickém) vidění, zatímco tyčinky především při nočním (skotopickém) vidění (viz obrázek 9.3).

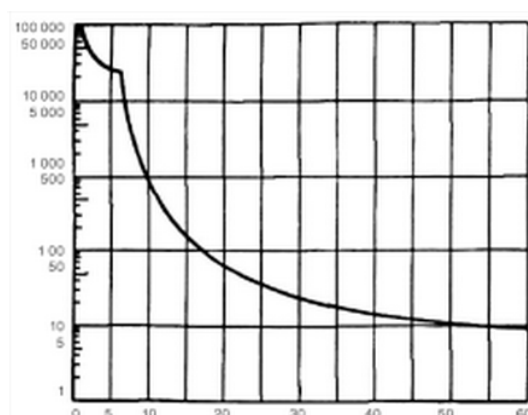
Oční svaly umístěné po stranách čočky ji deformují a mění tak její ohniskovou vzdálenost. Optická mohutnost oka je tvořena 42 dioptriemi rohovky a 19 až 28 dioptriemi čočky (podle akomodace oka). Bohužel schopnost akomodace, stejně jako propustnost oka klesá s věkem. Úhlové rozlišení běžného lidského oka je asi 1 oblouková minuta.<sup>2</sup> Stejnou měrou se při něm uplatňuje ohyb světla na zornici a vzájemná vzdálenost fotoreceptorů na sítnici. Nicméně k tomu, aby člověk viděl, je zapotřebí mít nejen zdravé oči, ale také soustavu nervů a mozek, který získaný signál zpracuje. Vidění je značně komplikovaný proces.

Na noční vizuální pozorování je třeba se řádně připravit. Abychom plně využili schopností oka, musí se na pozorování ve tmě adaptovat. Úplná adaptace trvá necvičenému oku až 60 min (viz obrázek 9.2), ale lze ji zrušit silným osvětlením už během pár sekund.<sup>3</sup> Pokud potřebujete při nočním pozorování posvítit například na poznámky do pozorovacího deníku, je třeba používat slabé červené světlo, které adaptaci příliš nenarušuje, protože tyčinky na červené světlo nejsou příliš citlivé. Maximum citlivosti pro noční vidění je kolem 510 nm. Přes den, kdy jsou aktivované čípky, je maximum citlivosti oka asi 555 nm (viz obrázek 9.3). Pokud by pozorovatel prováděl vizuální fotometrická pozorování, například odhady jasnosti proměnných hvězd, měl by se vyvarovat pozorování za soumraku, kdy se právě mění citlivost oka a Purkyňův jev<sup>4</sup> může negativně ovlivnit

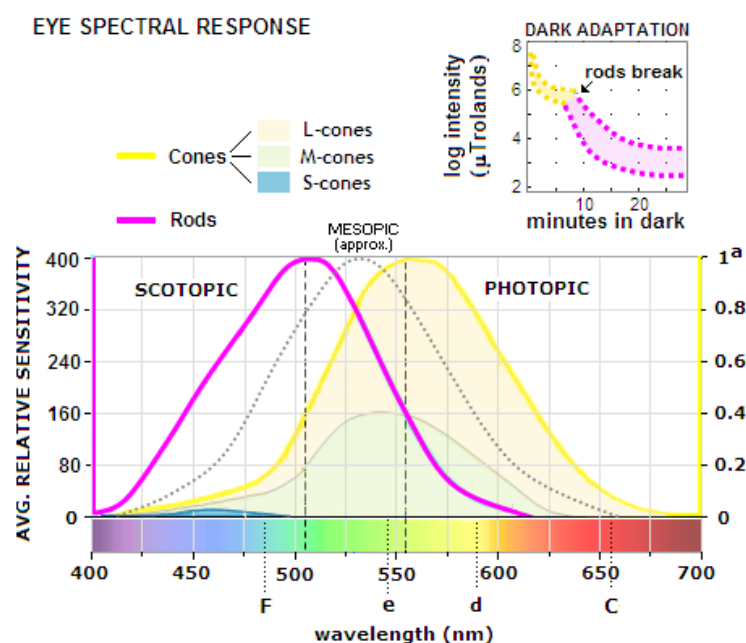
<sup>2</sup>Jsou ale známy i případy osob s podstatně větší rozlišovací schopností oka. Například se to traduje o matce německého matematika Carla Friedricha Gausse, která byla údajně schopna pozorovat fáze Venuše prostým okem. V druhé polovině 20. století působil v Brně astronom amatér dr. Vladimír Znojil, který byl rovněž vyhlášený svým pronikavým zrakem.

<sup>3</sup>Plné přizpůsobení očí ze tmy na světlo je rychlejší než ze světla na tmu, ale i tak trvá řádově minuty.

<sup>4</sup>Více o vlivu Purkyňova jevu a o vizuální fotometrii například v Zejda a kol. (1994).

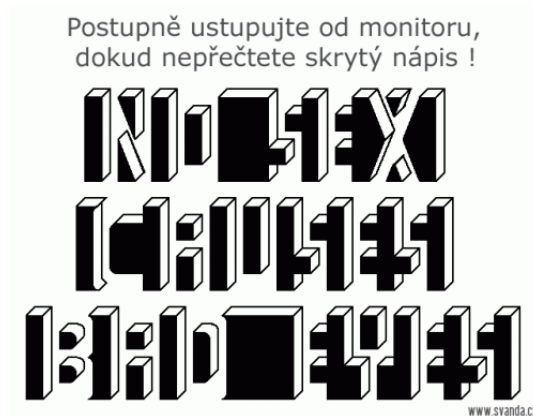


Obrázek 9.2: Typická křivka adaptace na tmu. Na ordinátě osvětlení testovací plochy v mikroluxech, na abscise trvání adaptace v minutách. Převzato z Boguszaková (2003).



Obrázek 9.3: Spektrální citlivost oka. Vrchol citlivosti čípků je 200krát nižší než vrchol citlivosti tyčinek. Vpravo nahoře: Za špatných světelných podmínek roste citlivost čípků 30krát až 100krát do zhruba 10 minut (čím větší je tma, tím rychleji předávají čípkové funkci tyčinkám). V okamžiku, kdy se dominantními receptory stanou tyčinky, zvýší se citlivost na 200krát až 1000krát vyšší hodnotu než byl vrchol citlivosti čípků během 20 minut (citlivosti a doby adaptace jsou velmi individuální). Převzato z <http://www.telescope-optics.net>.

výsledky pozorování. Jak jsme už uvedli, je noční vidění závislé zejména na činnosti tyčinek. Vzhledem k jejich rozmístění na sítnici, je vhodné při pozorování slabého objektu použít bočního (periferního) vidění. Nebudeme se dívat na sledovaný objekt přímo, ale trochu vedle něho. Je to do jisté míry věc cviku, podobně jako pozorování dale-



Obrázek 9.4: Optický klam.

kohledem. Necvičené oko neuvidí tolik podrobností například při pozorování Jupiteru, jako zkušený pozorovatel. Při již zmíněné vizuální fotometrii zjistí začínající pozorovatel změny hvězdné velikosti přibližně 0,1-0,2 mag, zatímco několik málo nejlepších pozorovatelů (například Otero, Hornoch, Dubovský) dosahují přesnosti až 0,02 mag. O kvalitě pozorovacích podmínek na daném stanovišti vypovídá i tak zvaná *mezni hvězdná velikost*, která vymezuje, jak slabé hvězdy pozorovatel mohl pouhýma očima v dané chvíli na daném místě pozorovat. U nás je to zcela výjimečně až 7 mag, ale ve městech se spoustou světel třeba i jen 2 až 3 mag.

Uvážíme-li denní i noční vidění, pak oko pracuje v rozsahu asi 30 mag, což značí poměr světelných toků  $1:10^{12}$ ! Pro detektory jako fotoelektrické fotometry nebo CCD kamery je to zatím nedostižné. Nicméně přesto se dnes vizuální pozorování používá už jen výjimečně a spíše při nedostatku jiných možností a na amatérské bázi. Kvalitní vizuální pozorování například proměnných hvězd, meteorických rojů, Slunce mohou ale i dnes přispět při studiu vesmíru.

I sebelepší vizuální pozorovatel je však někdy oklamán. Věci nejsou takové, jak na první pohled vypadají. Určitě znáte mnoho obrázků s optickými klamy podobných jako na obrázku 9.4. Často si ale neuvědomujeme, že to co vidíme, je klam. Vzpomeňte si, jak děti kreslí hvězdy. Jako cípaté. Ale proč, když víme, že jsou to kulatá tělesa? Odpověď najdete například v publikaci Mikulášek & Pokorný (1993).

Aby nám oči dobře sloužily, měli bychom se o ně patřičně starat. Rychlost stárnutí oka a zhoršení schopností akomodace, adaptace a i průhlednosti silně ovlivňuje okolní prostředí a náš životní styl. Kouření i nestřídmé požívání alkoholu snižuje citlivost sítnice. Vylepšit její kondici pomůže naopak podávání vitamínu A a dostatek kyslíku. V posledních letech jsou časté zprávy o narušení ozónové vrstvy v zemské atmosféře. Jedním z důsledků je, že i v našich zeměpisných šířkách je více UV záření. Je třeba si chránit oči tmavými brýlemi s UV filtrem, případně alespoň si oči clonit kloboukem, kšiltlem. Přemíra ultrafialového záření totiž působí šedý zákal a degeneraci žluté skvrny. Rozhodně bychom neměli opomíjet pravidelné kontroly u očního lékaře. Naše oči za tu trochu péče a pozornosti určitě stojí!

## 9.2 Prehistorie a historie dalekohledu

Astronomický dalekohled je v principu velmi jednoduchý přístroj. Jeden starší klasik dokonce prohlásil, že je to vlastně jen „z obou stran zasklená roura“. Tak jednoduché to ale zase není. Současné moderní přístroje jsou nejen zařízeními se špičkovou optikou, ale i mechanikou a elektronikou. Nové technologie navíc dokáží zvýšit účinnost práce dalekohledu. A ty největší dalekohledy patří spolu s urychlovači částic mezi největší fyzikální přístroje světa.

Vynález dalekohledu nepochybně způsobil doslova revoluci v astronomii a fyzice, ale také třeba ve filozofii. Jenže, kdy a kdo jej vlastně objevil? Po dlouhá léta jsme byli přesvědčováni, že objevitelem dalekohledu byl geniální italský učenec Galileo Galilei. Bohužel, není to pravda. Zkusme zapátrat a poodhalit alespoň trochu roušku tajemství, která první dalekohledy obestírá.

Předpokládejme, že pro vznik dalekohledu je nezbytným předpokladem, že vynálezce bude mít k dispozici průhledné skleněné čočky a bude mít jakési povědomí o zákonitostech optiky. Už v období egyptské Staré říše uměli řemeslníci brousit a leštit křišťál na výrobu šperků a lup. Dochovala se křišťálová čočka z doby kolem roku 3000 př.n.l., dnes ji najdete v Britském muzeu. Nejstarší písemné zmínky o čočkách („zapalujících sklíčkách“) nalezneme v antickém Řecku v dílech Aristofana (423 př. n. l.), Senecy mladšího nebo Plinia staršího (v 1. st. n.l.). První spis o optice, o zapalujících zrcadlech a čočkách, zákonu lomu, výpočtech tvarů optických ploch sepsal na konci desátého století perský matematik Ibn Sahl. Z arabského světa pochází i Alhazenova (Ibn al-Haythamova) „Kniha optiky“ z let 1011-1021, která obsahuje mimo jiné i popis „camery obscury“ se spojnou čočkou.

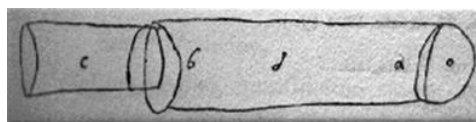
Už ve 12. století ale anglický učenec, profesor univerzity v Oxfordu biskup Robert Grosseteste napsal ve svém spisu *O duze*<sup>5</sup>: *„Tato část optiky, pokud je dobře pochopena, nám ukazuje, jak můžeme velmi vzdálené objekty zobrazit tak, aby vypadaly jako by byly umístěny velmi blízko, velké objekty v naší blízkosti jako by byly velmi malé, a také jak bychom mohli malé objekty, umístěné v určité vzdálenosti, zobrazit v jakékoli námi zvolené velikosti, což by nám umožnilo číst i ta nejmenší písmena na neuvěřitelné vzdálenosti nebo spočítat zrnka písku, semena nebo jakékoliv jiné miniaturní předměty.“* Ostatně o dalekohledu píše i jeho známější pokračovatel a žák Roger Bacon. Ve třináctém století vznikaly první brýle. Jsou zaznamenány v Itálii (Pisa, Benátky, Florencie), ale i v Číně. V polovině 14. století je výroba čoček už řemeslnou záležitostí. Nicméně další zprávy o dalekohledu se objeví až v 16. století. Astronom a matematik Thomas Digges v předmluvě k dílu *Pantometria* (1591) tvrdí, že jeho otec matematik, zeměměřič a vynálezce teodolitu Leonard Digges sestrojil (mezi roky 1540 až 1559) čočkový i zrcadlový dalekohled. Toto tvrzení dosvědčují i zprávy anglického učenice, alchymisty Johna Deea a popisy Diggesových optických pokusů, které nám zanechal William Bourne. Bohužel nákresy nebo modely dalekohledů se nedochovaly. Před koncem roku 1574 popisuje svůj dalekohled i turecký astronom Taqi al-Din Muhammad ibn Ma'ruf (Takiyuddin) a o dvanáct let později zmiňuje dalekohled i Giovanni Battista Della Porta.

Na počátku 17. století už začíná být historie dalekohledu hmatatelnější. 2. října 1608 podal holandský optik Hans Lippershey (Johann Lippershey nebo Lipperhey) žádost

<sup>5</sup>Celý text je k dispozici v latinském originále na <http://www.grosseteste.com/>.

o patentování dalekohledu – asi 50 cm dlouhé trubky, na jejíž jednom konci byla čočka vydutá a druhém vypuklá. Dalekohled zvětšoval třikrát až čtyřikrát. Lippershey však byl odmítnut. A důvod? Dalekohled už je znám! Parlament ale vybídl Lippersheye, aby zkonstruoval binokulární dalekohled pro námořnictvo a armádu. O dva týdny později ohlásil objev dalekohledu Jacob Metius z Alkmaru (Andriaanszoon). Je tu však ještě třetí osoba – Zacharias Jansen, který měl údajně prodávat dalekohledy na tradičních trzích v září roku 1608 ve Frankfurtu. Jeho prvenství je však sporné. Někteří autoři je totiž zpochybňují. Dochovalo se ale i svědectví Zachariova syna, který odpřísáhl, že Lippershey jeho otci vynález dalekohledu ukradl. V roce 1609 už se dalekohledy prodávaly na několika místech. V květnu toho roku se o dalekohledu dozvěděl i Galileo Galilei a do měsíce si jej sám zkonstruoval. Je tedy zřejmé, že Galileo určitě nebyl prvním vynálezcem dalekohledu<sup>6</sup>. A zřejmě nebyl ani prvním, kdo jej použil na astronomická pozorování. Podle svých záznamů provedl první astronomické pozorování dalekohledem Thomas Harriot v červenci 1609. Bohužel kromě jednoho krátkého spisku nepublikoval žádné knihy a tak jeho pozorování na dlouho upadlo v zapomnění. V srpnu 1609 předvedl Galileo svůj dalekohled benátským zákonodárcům a v říjnu provedl první záznamy o svých pozorováních Měsíce. V následujících měsících pozoroval čtyři největší měsíce Jupitera, fáze Venuše, hvězdy v Mléčné dráze a další. V roce 1611 Johannes Kepler popsal ve své „Dioptrice“ optické vlastnosti čoček a navrhl nový typ astronomického dalekohledu se dvěma konvexními (vypuklými) čočkami. Není ale známo, že by dalekohled sám vyrobil. Jsou zaznamenány až Keplerovské dalekohledy, které setrojili roku 1630 Christopher Scheiner a Antonín Maria Šírek (Schyrl, Schyrleus) z Reity.

V 17. století a počátkem 18. století se hlavními producenty astronomických dalekohledů stali tři italské optiky. Nejlepší jméno si udělal Giuseppe Campani, zejména díky Gianovi Domenicovi Cassinimu, který s jeho optikou objevil rudou skvrnu na Jupiteru. Jenže sklo čoček používaných v dalekohledech bylo velmi špatné kvality s barevnou a sférickou vadou (viz kapitola 9.4.4). Astronomové chtěli ale lepší a větší přístroje. Jenže před vývojem nového skla, zvýšením kvality čoček a vylepšením zrcadlových dalekohledů byla jen jedna cesta ke zlepšení tehdejších dalekohledů – prodloužení ohniskové vzdálenosti. A tak se stavěla opravdová monstra. Největším byl Heveliusův dalekohled s ohniskovou vzdáleností objektivu 45 metrů (viz obrázek 9.6) nebo jeho tzv. „vzdušný dalekohled“ (bez tubusu o délce 60 metrů).

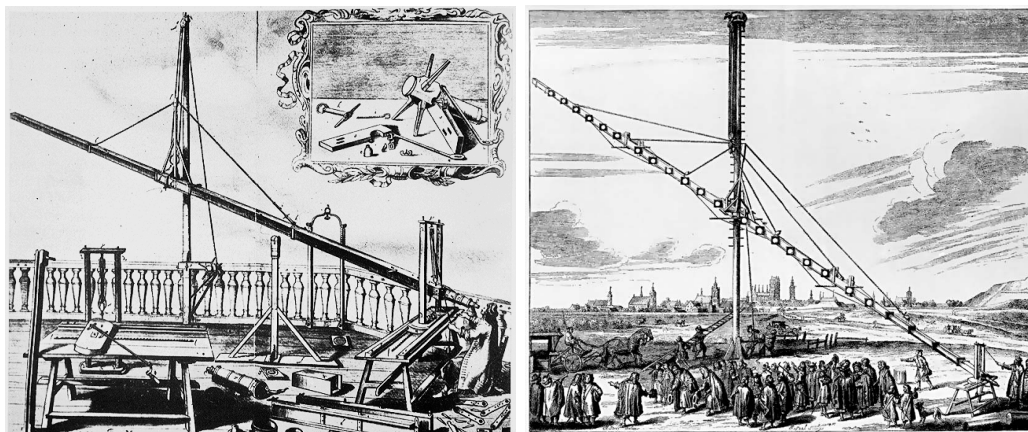


Obrázek 9.5: Nejstarší známý obrázek dalekohledu. Giovanni Battista Della Porta vložil tento náčrt do dopisu v srpnu 1609.

K výraznému zlepšení kvality čoček došlo až v 18. století, kdy bylo vylepšeno složení skla pro jejich výrobu a anglické firmy je začaly produkovat ve značném množství.

<sup>6</sup>Galileo svůj přístroj nazýval italsky „cannocchiale“, což značí kukátko dnes také námořní dalekohled, nebo latinsky „perspicillum“. Název „telescopium“ Galileovi navrhl po předvedení přístroje jeho přítel Federico Cesi v roce 1611.





Obrázek 9.6: Dalekohledy Johanna Hevelia o délce 60 a 140 stop. Autorem je sám Johannes Hevelius. Převzato z jeho knihy „Machina coelestis“ (1673).

Zcela jinou cestu ale představovala myšlenka využít jako objektivu odraznou plochu. Prvenství je připisováno Isaacu Newtonovi, který měl v roce 1668 sestrojít první funkční zrcadlový dalekohled s kovovým zrcadlem o průměru 3,25 cm. Nicméně o zrcadlovém dalekohledu se píše, jak jsme již uvedli, v souvislosti s Leonardem Diggesem už v polovině 16. století. Podle záznamů měl pokusy s takovým dalekohledem vykonávat také Niccolo Zucchi v roce 1616. James Gregory navrhl v knize „Optica Promota“ (1663) zrcadlový dalekohled, který měl uprostřed parabolického zrcadla otvor, kam směřovaly paprsky po odrazu od sekundárního dutého eliptického zrcátka. Podobné schéma bylo později objeveno ve spisech Bonaventury Cavalieriho (Lo Specchio Ustorio, 1632) a Marina Mersennea (l'Harmonie universalle, 1636). Bohužel výroba dalekohledu Gregoryho typu byla náročná a podařila se až roku 1674 Robertu Hookovi. Při pozorováních byl dokonce použitelný až dalekohled, který postavil roku 1721 John Hadley. Roku 1672 sestavil funkční dalekohled podobné konstrukce jako Gregoryho přístroj francouzský mnich Laurent Cassegrain. Dalekohled měl ale sekundární zrcátko vypuklé, hyperbolické. Za zmínku stojí i konstrukce dalekohledu Wiliama Herschela, který roku 1775 při konstrukci dalekohledu vynechal sekundární zrcátko, sklopil primární zrcadlo a okulár umístil na okraj tubusu.

Zrcadlové dalekohledy měly po svém zrodu problémy zejména s odrazivostí plochy zrcadla a tak se příliš nerozšířily. Zlom nastal až ve dvacátém století, kdy bylo kovové zrcadlo nahrazeno skleněným, potaženým tenkou vrstvou stříbra nebo hliníku. Později se ustoupilo od velkých skleněných monolitů a začaly se používat tenčí a menší pokovené „pláty“ skla a podobných materiálů, které tvoří mozaiková zrcadla.

### 9.3 Funkce dalekohledů a jejich typy

Dalekohled se stal nerozlučným spojencem astronoma. Vydobyl si výsadní postavení. Připomeňme si, jaké jsou jeho funkce a jak dalekohled vlastně pracuje.

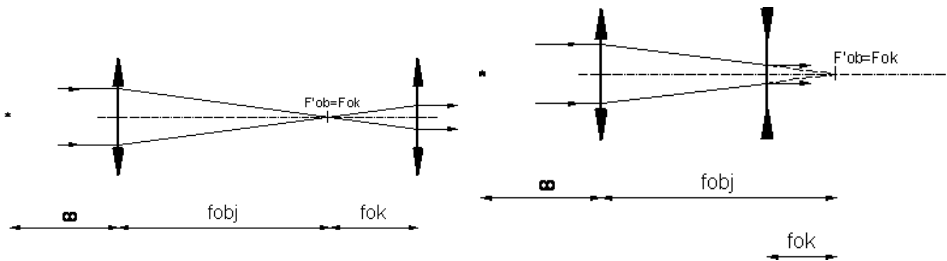
Čas od času lze v novinách v rubrice inzerátů narazit na inzerát, v němž je nabízen k prodeji hvězdářský dalekohled zvětšující třeba 150krát. Z takového inzerátu je okamžitě

zřejmé, že jej podával laik, který se v astronomii a dalekohledech vůbec nevyzná. Chybí tam přinejmenším jeden zásadní údaj, a to průměr dalekohledu. Právě průměr dalekohledu ovlivňuje jeho dvě zásadní vlastnosti. Dalekohled je vlastně sběrač světla. Budeme-li tedy lineárně zvětšovat průměr dalekohledu, poroste kvadraticky množství světla dalekohledem zachycené. Úkolem dalekohledu je tedy soustředit co největší množství zachyceného světla na detektor umístěný v jeho ohniskové rovině. Tím detektorem může být sítnice lidského oka, fotografická deska nebo elektronický čip. Druhou základní charakteristikou dalekohledu je úhlová rozlišovací schopnost. Meze rozlišovací schopnosti dalekohledu si později přiblížíme v kapitole 9.4.3. Obě vlastnosti platí pro všechny typy dalekohledů. Podle jejich konstrukce rozlišujeme dalekohledy:

- čočkové (refraktory),
- zrcadlové (reflektory),
- kombinované zrcadlo-čočkové (katadioptrické).

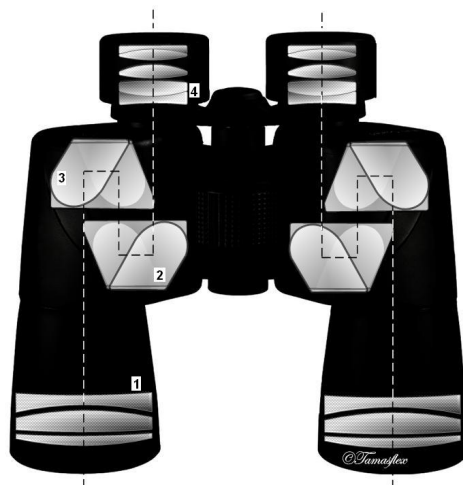
### 9.3.1 Čočkové dalekohledy (refraktory)

Objektivem čočkových dalekohledů je spojná čočka, případně soustava čoček, která tvoří ve výsledku spojnou čočku. Podle použitého okuláru rozlišujeme dva základní typy refraktorů. Starší, ale dnes méně využívaný, je dalekohled Galileův. Jeho okulárem je rozptylka, případně soustava čoček, která tvoří ve výsledku rozptylnou soustavu. V astronomii se už nepoužívá. Oproti Keplerově konstrukci dalekohledu se dvěma spojnými spijkami (na místě objektivu i okuláru) dává menší zorné pole i při stejných rozměrech a dosahuje se i menšího zvětšení. Obraz v Galileiově dalekohledu je vzpřímený. Vzhledem k tomu, že je obecně kratší než Keplerův dalekohled stejného průměru, používá se tam, kde je třeba malého přístroje a eventuálně i vzpřímeného obrazu jako například v hledáčku fotoaparátů nebo v divadelním kukátku. Pozor ale na jiný kompaktní přístroj se vzpřímeným obrazem. V tzv. triedru je vzpřímenost obrazu řešena pomocí dvojice trojbokých hranolů a úplného odrazu na jejich stěnách (viz obrázek 9.8).



Obrázek 9.7: Schémata Keplerova (vlevo) a Galileova dalekohledu. Autor: Z. Řehoř.

Keplerův dalekohled, jak už víme, využívá dvě spojně čočky, respektive soustavy čoček, které se ve výsledku jako spojky chovají. Objektivem je spojka s velkou ohniskovou vzdáleností  $f_{ob}$ . Spojka v okuláru má ohniskovou vzdálenost  $f_{ok} < f_{ob}$ . Obraz vzdáleného předmětu vytvořený v ohniskové rovině je převrácený, zmenšený a skutečný. Okulárem si pak tento obraz jako lupou prohlížíme. Výsledný obraz v Keplerově dalekohledu je tak stranově i výškově převrácený, což znamená otočený kolem optické osy o  $180^\circ$ .



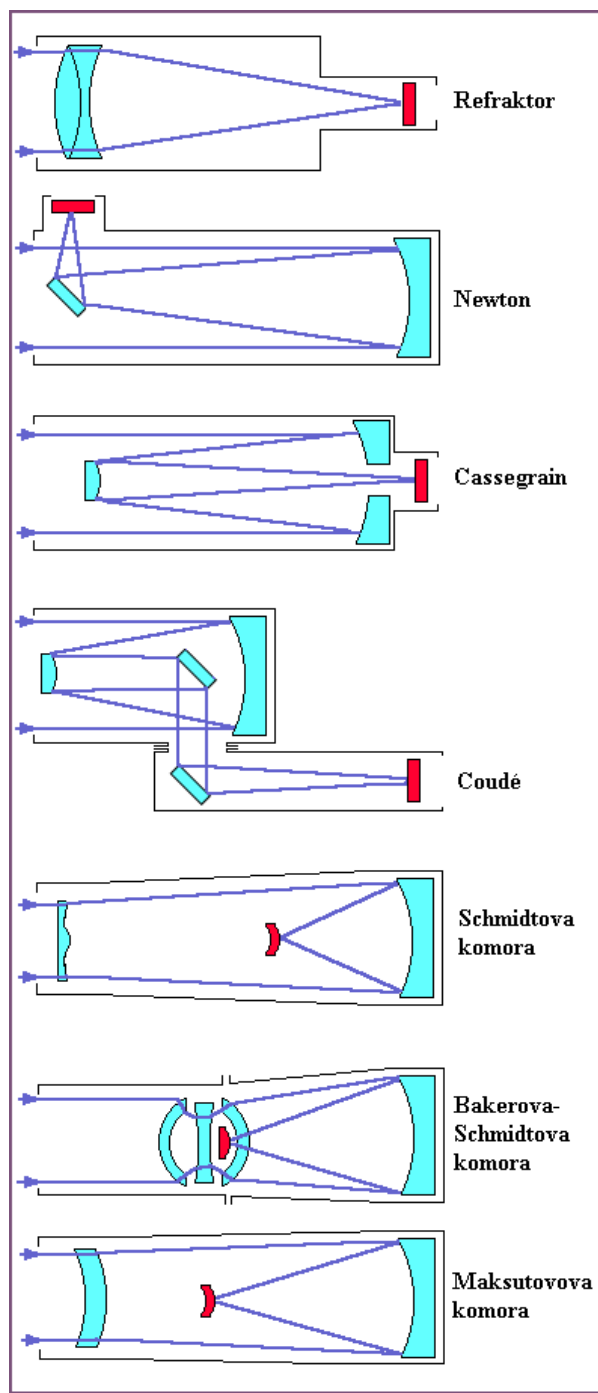
Obrázek 9.8: Schéma triedr. Převzato z wikipedie.

Čočkové dalekohledy najdete stále v nabídce prodejen dalekohledů. Současné refraktory mají už většinou zkorigované optické vady (viz kapitola 9.4.4), obraz je kvalitnější s větším kontrastem oproti zrcadlovým dalekohledům stejného průměru. Uplatní se jako výborné přístroje pro astrofotografii, ale jejich nevýhodou je vyšší pořizovací cena než u reflektorů. Na profesionálních observatořích se používají už jen jako pomocné dalekohledy. Jako hlavní přístroje už se prakticky nepoužívají, protože jsou příliš malé. Největší čočkový dalekohled v provozu byl dalekohled Yerkesovy observatoře s průměrem objektivu 102 cm. Největším zkonstruovaným refraktorem byl dalekohled vystavený na světové výstavě v Paříži roku 1900, který měl průměr 125 cm. Stavbě větších refraktorů brání gravitace a použitý materiál. Velké objektivy se deformují vlastní vahou i v důsledku změn teploty. A dalekohledy o průměru největších refraktorů patří dnes už spíše mezi malé dalekohledy.

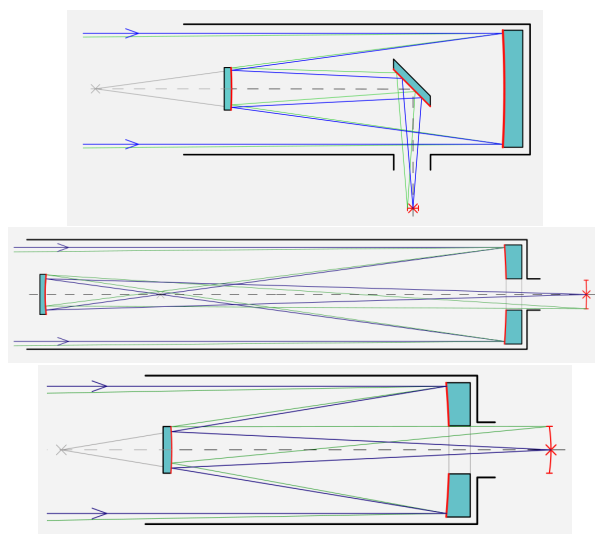
### 9.3.2 Zrcadlové dalekohledy (reflektory)

Nejstarší historii zrcadlových dalekohledů jsme si popsali výše. Jejich nástup rozhodně nebyl tak razantní, jak by se dalo očekávat. Dnes je situace jasná. Zrcadlové dalekohledy naprosto převážily nad refraktory. Výroba zrcadla je jednodušší a levnější než výroba čočky. Musíme přesně vybrousit jen jednu plochu. Nové materiály nahradily zejména u velkých přístrojů ve dvacátém století používané sklo. K pokovení se používá většinou hliníku spolu s ochrannou vrstvou, která prodlužuje životnost odrazné plochy. Reflektory také můžeme pozorovat blízké ultrafialové záření s vlnovou délkou kolem 300 nm, které čočky pohlcují. Výhodou je výborná kresba obrazu v optické ose a nulová barevná vada. Nevýhodou zrcadlových dalekohledů je naproti tomu obecně menší zorné pole. Nejběžněji používané reflektory jsou typu Newton a Cassegrain.

Dalekohled Newtonova typu má objektiv z jediného dutého paraboloidického zrcadla. Ohnisko se nachází uvnitř tubusu. Při pozorování by si pozorovatel clonil vlastním tělem, a proto je před ohnisko umístěno malé sekundární rovinné zrcátko skloněné k optické ose o  $45^\circ$ , které vyvede světlo ven z tubusu k okuláru. Dalekohledy tohoto typu jsou nejrozšířenější mezi astronomy amatéry, které zaujmou zejména jednoduchou výrobou



Obrázek 9.9: Schémata dalekohledů. Převzato z <http://web.quick.cz/frantabilek/>.



Obrázek 9.10: Schémata dalekohledů Nasmythova (nahore), Gregoryho (uprostřed) a Ritcheyho-Chrétiena (dole). Převzato z <http://en.wikipedia.org>.

a tak i příznivou cenou. Pro velké astronomické teleskopy se zpravidla využívají jiné konstrukce.

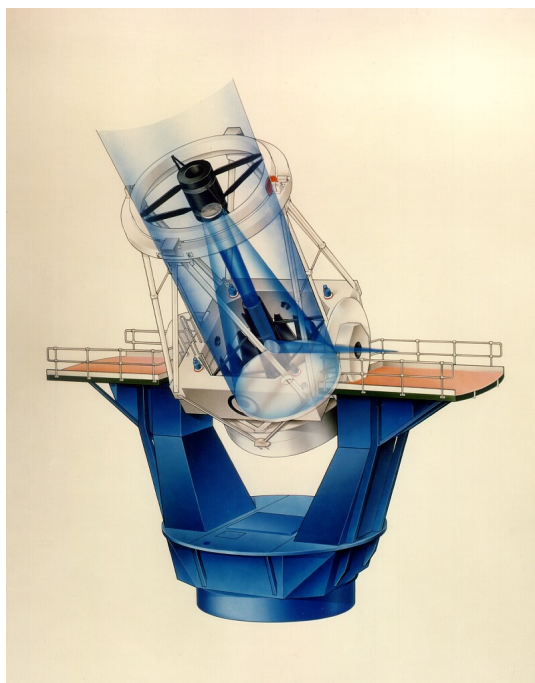
Velmi rozšířený je i systém Cassegrain, který je tvořen dvěma zrcadly. Primární má stejně jako Newtonův přístroj tvar rotačního paraboloidu ale se středovým otvorem, kterým paprsky po odrazu na sekundárním hyperboloidickém zrcátku vystupují z tubusu. Výhodou takového přístupu je prodloužení ohniskové vzdálenosti, ale při současném zkrácení tubusu dalekohledu a také snadná přístupnost ohniska za dalekohledem.

O podobném Gregoryho systému, který ale o několik let předběhl Cassegrainovo uspořádání, jsme se zmínili v historickém úvodu. Nevýhodou, která bránila jeho většímu rozšíření, je malá velikost zorného pole a větší délka dalekohledu. Je to důsledek toho, že paprsky po odrazu od primárního zrcadla projdou ohniskem a teprve poté se odrazí od sekundárního zrcátka a projdou otvorem v primárním zrcadle do okuláru.

Větší zrcadlové dalekohledy využívají zpravidla modifikací Cassegrainova systému. James Nasmyth přidal do soustavy další zrcátko (viz obrázek 9.10). Po odrazu od sekundárního zrcátka vyvádí další malé zrcátko světlo do boku ven z tubusu. Takové uspořádání je výhodné, protože můžete prostým překlopením zrcátka posílat paprsky do dvou různých detektorů umístěných po stranách dalekohledu.

Nejčastěji je však u moderních velkých teleskopů využíván systém Ritchey-Chretien<sup>7</sup>. Vynalezli jej v 10. letech 20. století astronomové George Willis Ritchey a Henri Chrétien. Primární zrcadlo má tvar rotačního hyperboloidu. Také sekundární zrcátko je hyperboloidické, ale vypuklé, což pomáhá zlepšit optické vlastnosti. Ritcheyův-Chrétienův systém nemá komu ani sférickou aberaci (viz kapitola 9.4.4).

<sup>7</sup>Čti „riči-krétién“



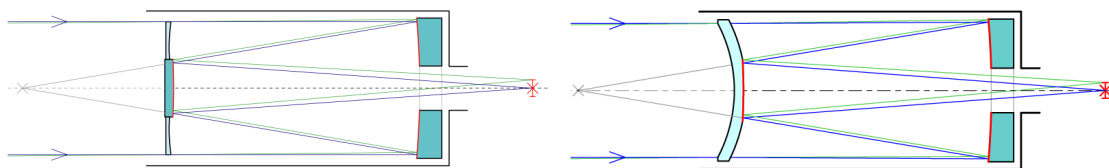
Obrázek 9.11: Kresba WHT (William Herschel Telescope) ukazuje cestu světla do Nasmythova ohniska, kde mohou být umístěny i rozměrné přístroje. Převzato z <http://www.ing.iac.es> (Isaac Newton Group of Telescopes, La Palma).

### 9.3.3 Kombinované dalekohledy

Ve dvacátém století byly refraktory postupně nahrazovány reflektory. Jejich hlavní nevýhodou však bylo malé zorné pole. Na fotografování větších oblastí oblohy je ale potřebný dalekohled s velkým užitečným zorným polem. S řešením přišel roku 1930 Bernhard Schmidt. Zkombinoval zrcadlový dalekohled s čočkovým. Schmidtův dalekohled (Schmidtova komora) používá jako objektiv sférické zrcadlo a chyby jeho zobrazení koriguje tenká skleněná korekční deska umístěná ve dvojnásobné ohniskové vzdálenosti před objektivem.

Výsledné zorné pole má několik stupňů. Bohužel je sklenuté, obraz se vytváří na sféře. Proto se při použití fotografické desky musí tvar desky přizpůsobit. Zakřivení obrazu je možné odstranit pomocí další čočky před fotografickou deskou a nebo pomocným konvexním zrcadlem (Bakerova-Schmidtova komora). Schmidtův dalekohled je poměrně rozšířený, vyznačuje se velkým relativním otvorem objektivu při velkém zorném poli a používá se výhradně na fotografování a nebo ve spojení se spektrografem. Schmidtovy fotografické komory sehrály významnou roli při pořizování přehlídkových snímků oblohy a v astronomickém výzkumu.

Jiný způsob odstranění sférické aberace kulového zrcadla navrhl v roce 1941 Dmitrij Dmitrijevič Maksutov. Maksutovův dalekohled má výhodu vysoké světelnosti, velkého zorného pole, malé délky tubusu s možností přímého pozorování. Nevýhodou je větší počet odrazných ploch a s tím spojená větší ztráta světla. Na docílení zmenšení ztrát světla odrazem se optické plochy pokrývají antireflexní vrstvou, která snižuje pro-



Obrázek 9.12: Schémata katadioptrických systémů Schmidt-Cassegrain (vlevo), Maksutov (vpravo). Převzato z <http://en.wikipedia.org>.

cento odraženého světla. Zajímavé je, že v roce 1941 si nechali různé varianty Schmidtova řešení patentovat nezávisle také Albert Bouwers, Kurt Penning a Dennis Gabor. Společným znakem všech těchto řešení bylo nahrazení asférické korekční desky prohnutou čočkou se soustřednými kulovými plochami, s mírně odlišnými poloměry (nulovou optickou mohutností), tzv. meniskem. Takové korekční členy jsou snazší na výrobu, i když jsou ve srovnání s korekčními deskami poměrně tlusté.

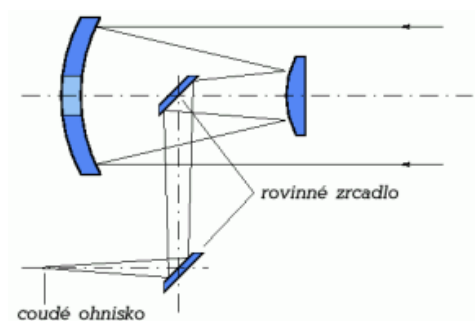
Později byly katadioptrické soustavy zkombinovány s tradičními systémy. Ne všechny se ale ujaly. Nejúspěšnější je Schmidtův-Cassegrainův dalekohled (SCT), který má na rozdíl od klasického „cassegraina“ kulové primární zrcadlo a korekční desku. Pro malé rozměry a rozumný poměr cena/výkon je velmi oblíben mezi amatérskými astronomy zejména ve Spojených státech.

### 9.3.4 Speciální dalekohledy

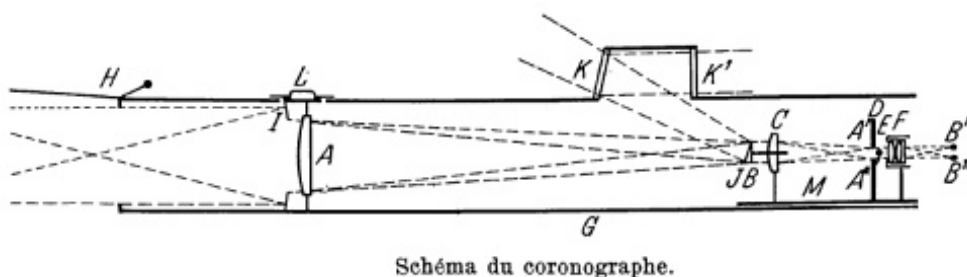
Zvláštním typem zrcadlových dalekohledů je systém coudé. Podobně jako Nasmythův systém řeší otázku, jak na dalekohled připevnit rozměrné a těžké přístroje, zejména spektrografy. Coudé řešení navrhl Arthur Cowper Ranyard. Název *coudé* pochází z francouzského „couder“, což značí zahrnout do pravého úhlu. Paprsky po odrazu od primárního zrcadla dopadají na sekundární zrcátko, s jehož pomocí, případně pomocí dalších zrcátek jsou vyvedeny ven z tubusu zpravidla do polární osy montáže dalekohledu. Tam se nachází ohnisko. Jeho poloha je stálá, nemění se se změnou polohy dalekohledu, takže je tam možné umístit i značně velký a těžký přístroj. Občas se tyto dalekohledy používají i na lidových hvězdárnách při pozorování pro veřejnost. Návštěvníci pak mohou sedět u dalekohledu na židli stále na stejném místě bez ohledu na tom, kam dalekohled právě míří.

Dosud jsme se zabývali přístroji používanými zejména na noční pozorování. Významnou a dosti specifickou skupinu astronomických dalekohledů ale představují i přístroje používané pro pozorování Slunce. Použití „tradičních“ dalekohledů na pozorování Slunce může být nebezpečné, ať již pro naše oči při vizuálním pozorování nebo pro citlivé detektory na dalekohledech. Nicméně sledování slunečních skvrn je nepochybně zajímavé a provedení takového pozorování by prostě mělo patřit k základní výbavě astronoma. Rozhodně bychom se ale měli vyvarovat pohledu na Slunce v dalekohledu bez speciálního vybavení. Nic jiného už bychom potom nemuseli vidět! Při vizuálním pozorování je nejbezpečnější využít tzv. projekce<sup>8</sup>. Obraz Slunce nesledujeme přímo v dalekohledu,

<sup>8</sup>Galileo Galilei pozoroval Slunce dalekohledem, jen když bylo těsně nad obzorem, ale i tak byla tato pozorování nepřijemná. Záhy objevil možnost pozorování projekcí a nadále už využíval tuto metodu.



Obrázek 9.13: Schéma dalekohledu coudé. Převzato z <http://stelweb.asu.cas.cz>.



Obrázek 9.14: Schéma původního Lyotova koronografu: C – clony, O – objektiv, P – pomocná čočka, I – interferenční filtr, Z – okulár. Obraz fotosféry se odráží od pláště clony do stran a dopadá na vyčerněné stěny tubusu, kde je absorbován. Kuželovitá clona K je upevněna v pomocné čočce, která přenáší její obraz do roviny tzv. Lyotovy clony L. Druhý objektiv O2, který se nachází za čočkou, znovu zobrazí rovinu okolo kuželovité clony, která vlastně představuje okolí Slunce těsně nad fotosférou. Tento druhý obraz přechází potom interferenčním filtrem do okuláru, nebo dopadá na citlivou fotografickou vrstvu. Zdroj:wikipedie.

ale promítneme si jej na bílé stínítko za dalekohled. Ani při nastavování dalekohledu není třeba (a nesmíme!) se dívat do dalekohledu. Stačí sledovat stín dalekohledu. Nezapomeňte ale zakrýt případné další dalekohledy na stejné montáži (hledáček a podobně). Pokud přece jen chceme pozorovat útvary na Slunci přímo, musíme mít speciální sluneční filtr na objektiv nebo okulár nebo použít tzv. helioskopický okulár. Jeho konstrukcí je celá řada (Zajonc , 2009), ale funkce je stejná. Před klasický okulár je vložen skleněný klín, který odráží většinu světla mimo okulár. Pro pohodlné a bezpečné pozorování Slunce stačí pouhých 5 % světla, které projde do okuláru.

Pro výzkum Slunce je důležité také pozorování svrchní vrstvy sluneční atmosféry, tzv. koróny i v době mimo sluneční zatmění. Sluneční kotouč je ale příliš zářivý a je třeba jej zaclonit. V roce 1930 sestrojil Bernard Lyot přístroj nazvaný *koronograf* (obrázek 9.14). Pokud je koronograf vybaven filtrem  $H\alpha$ , využívá se ke sledování slunečních protuberancí a nazývá se protuberanční dalekohled.<sup>9</sup>

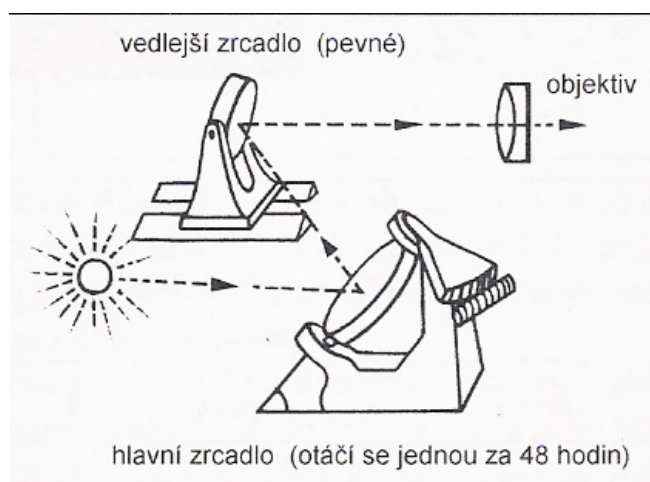
Jeho oslepnutí nebylo přímo způsobeno pozorováním Slunce, jak se traduje, ale došlo k němu až mnoho let po jeho prvních pozorováních Slunce.

<sup>9</sup>Podrobněji se slunečním útvarům budeme věnovat v kapitole o Slunci.





Obrázek 9.15: Sluneční dalekohledy. Vlevo metrový Švédský sluneční dalekohled na La Palma (Španělsko), vpravo 1.6m McMath-Pierce Telescope na Kitt Peaku (USA). Zdroj: <http://www.solarphysics.kva.se/>, <http://nsokp.nso.edu/mp/imagetab.html>.

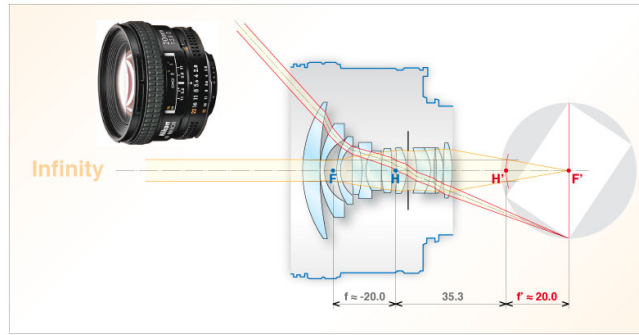


Obrázek 9.16: Schéma horizontálního celostatu. Převzato z Kleczek (2002).

Dnešní velké sluneční observatoře používají speciální *sluneční dalekohledy*, které mají velkou ohniskovou vzdálenost a jsou někdy instalovány vodorovně, svisle nebo šikmo (viz obrázek 9.15). Světlo Slunce do slunečních věží přivádí tzv. *celostat* (někdy také *coelostat* nebo *heliostat*), který tak nahrazuje otáčení dalekohledu. Vidíme jej na vrcholu švédské sluneční věže na obrázku 9.15 vlevo. Celostat tvoří dvě rovinná zrcadla (obrázek 9.16). Primární zrcadlo se otáčí rovnoměrně kolem světové osy jednou za 48 hodin. Od něj se odráží paprsky na pevné sekundární zrcadlo a po odrazu jsou namířeny do slunečního dalekohledu.

## 9.4 Charakteristiky a vady astronomických optických přístrojů

Nejdůležitější charakteristikou dalekohledu, kterou jsme zmiňovali už v úvodu kapitoly, je jeho průměr. Ten ovlivňuje další parametry dalekohledu, jako zvětšení, rozlišovací schopnost a podobně. Průměrem dalekohledu rozumíme průměr objektivu, tedy primární čočky nebo zrcadla. Někdy se také mluví o apertuře přístroje. Zpravidla se označuje  $D$ . Pro popis přístroje je důležitá i ohnisková vzdálenost objektivu  $f$ . U jednoduchého optického členu je to prostě vzdálenost ohniska od vrcholu optické plochy, respektive středu čočky. Pro fotografický objektiv tvořený soustavou čoček nebo složitější systém dalekohledu se používá tzv. efektivní ohnisková vzdálenost (viz obrázek 9.17), která je definována jako vzdálenost hlavního bodu optické soustavy (optického středu) od ohniska.



Obrázek 9.17: Efektivní ohnisková vzdálenost je dána vzdáleností  $H'F'$ . Převzato z [http://www.pierretoscani.com/echo\\_focal\\_length.html](http://www.pierretoscani.com/echo_focal_length.html).

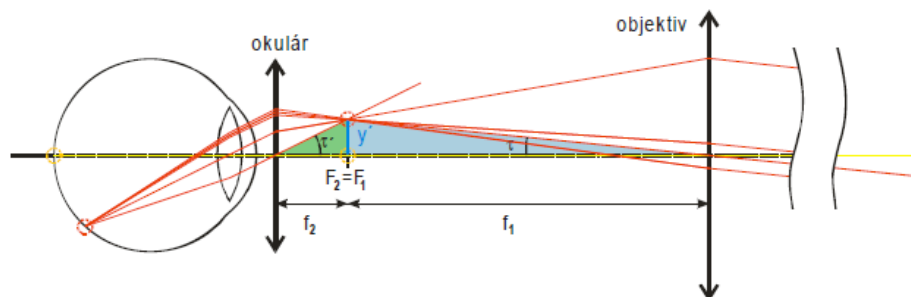
### 9.4.1 Zvětšení dalekohledu

Laickou veřejností nejvíce oceňovaným a doslova magickým parametrem dalekohledu je jeho zvětšení. Odhlédneme od toho, že to určitě nejdůležitější parametr dalekohledu není, ale jak jej vlastně určíme? Představte si, že budeme pozorovat vzdálený předmět, jehož obraz v ohniskové rovině má velikost  $y'$  (viz obrázek 9.18). Nechť  $\tau$  je zorný úhel, pod kterým vidíme předmět bez dalekohledu, a  $\tau'$  zorný úhel, pod kterým sledujeme okulárem obraz předmětu. Samozřejmě platí  $\tau' > \tau$  a z trojúhelníků na obrázku 9.18 lze psát

$$\frac{a}{f_{ob}} = \operatorname{tg}\tau = \tau; \quad \frac{y'}{f_{ok}} = \operatorname{tg}\tau' = \tau', \quad (9.1)$$

kde  $f_{ob}$  je ohnisková vzdálenost objektivu a  $f_{ok}$  ohnisková vzdálenost okuláru. Pak úhlové zvětšení dalekohledu  $z$  je

$$z = \frac{\operatorname{tg}\tau'}{\operatorname{tg}\tau} \Rightarrow z = \frac{f_{ob}}{f_{ok}}; \quad z = \frac{D}{D'}, \quad (9.2)$$



Obrázek 9.18: Schéma Keplera dalekohledu k odvození zvětšení dalekohledu. Autor M. Krynický. Převzato z [www.realisticky.cz](http://www.realisticky.cz).

kde  $D$ , respektive  $D'$  jsou vstupní a výstupní pupila dalekohledu neboli průměr objektivu a průměr okuláru<sup>10</sup>. Tento vztah jsme sice odvodili pro Keplerův dalekohled, ale je zcela obecný a platí pro všechny refraktory i reflektory.

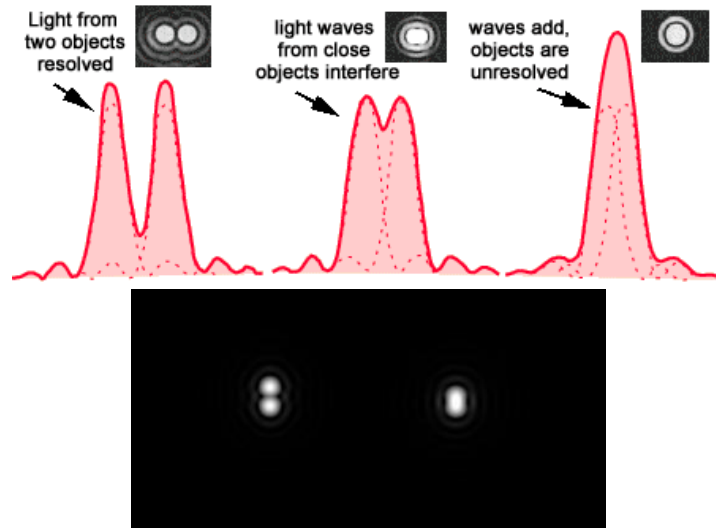
Výše uvedený vztah (9.2) může vést k takřka libovolným hodnotám zvětšení. V praxi však existují určité limity, které velikost možného zvětšení omezují, dané povahou světla, zemskou atmosférou i místními podmínkami jako je světelné znečištění. Běžně se udává, že zvětšení větší než je dvojnásobek průměru objektivu v milimetrech, nepřináší větší podrobnosti obrazu. Někdy se takové zvětšení označuje jako prázdné nebo jalové. Stále by se však mohlo zdát, že například brněnským univerzitním dalekohledem o průměru 600 mm bychom mohli s vhodným okulárem docílit zvětšení až 1200krát. Ale nesmíme zapomínat na ovzduší. Atmosféra a proudění vzduchu v ní nám umožní maximálně zhruba 700násobné zvětšení a při zhoršených podmínkách i menší. Na druhou stranu příliš slabé zvětšení za nevhodných podmínek zcela „skryje“ například různé mlhovinné objekty na přesvětlené obloze. Jako spodní hranice pro tzv. užitečné zvětšení se tedy pokládá zvětšení číselně rovné polovině průměru objektivu v milimetrech. O maximální zvětšení se budeme snažit při pozorování planet, Měsíce nebo dvojhvězd. Zvětšení dalekohledu, respektive použitý okulár je ale vhodné přizpůsobovat aktuální situaci. Největší užitečné zvětšení nemusí být vždy optimální.

### 9.4.2 Světelnost dalekohledu

Veličina *světelnost* má několik významů, několik různých definic. V následujícím textu budeme světelností dalekohledu rozumět poměr průměru objektivu  $D$  k jeho ohniskové vzdálenosti  $f$ . Takže, například dalekohled o průměru objektivu 20 cm a ohniskové vzdálenosti 2 m bude mít světelnost, 0,1, což ale zapisujeme zpravidla jako 1:10 nebo  $f/10$ .<sup>11</sup> Chceme-li pozorovat nebo fotografovat nějaký plošný objekt (mlhovinu, galaxii), potřebujeme dalekohled s velkou světelností nad asi 1:5 (tedy např. 1:4, 1:3). Matematika je zde jasná. Pokud zvětšíme průměr objektivu dvakrát, zvětší se množství zachyceného světla čtyřikrát. Jestliže ale zvětšíme na dvojnásobek ohniskovou vzdálenost,

<sup>10</sup>U přesnění nalezneme čtenář v kapitole 9.5.1 věnované okulárům.

<sup>11</sup>Fotografové označují tuto veličinu jako tzv. clonové číslo, optici jako tzv. *relativní otvor* a světelností chápou čtverec relativního otvoru, případně ještě vynásobený účinností přenosu světla optickou soustavou.



Obrázek 9.19: Nahoře: Rozlišení dvou bodových zdrojů. Dvě hvězdy lze rozlišit, pokud se jejich Airyho disky nepřekrývají (vlevo) nebo je alespoň vzdálenost středů Airyho disků větší než jejich poloměr (uprostřed). Převzato z <http://astronomy.swin.edu.au>. Dole: Rozlišovací schopnost dalekohledu (vlevo: Rayleighovo kritérium, vpravo: Dawesovo kritérium. Převzato z <http://posec.astro.cz/>.

roztáhne se obraz v ohniskové rovině na čtyřikrát větší plochu. Při stejném množství dopadajícího světla to znamená, že tam klesne hustota světelného toku, zmenší se „jasnost“ obrazu. Pro pozorování nebo měření hvězd nehraje světelnost až tak velkou roli, i když samozřejmě ovlivňuje velikost zorného pole a také vzdálenost pozorovaných hvězd v ohniskové rovině dalekohledu. Při pozorování hustých hvězdných polí by se nám při nevhodné světelnosti mohly obrazy hvězd na fotografii nebo čipu kamery překrývat.

### 9.4.3 Rozlišovací schopnost dalekohledu

V důsledku difrakce bude obraz bodového zdroje získaný dalekohledem obsahovat sadu soustředných světlých a tmavých ohybových proužků, jejichž intenzita se vzdáleností od středu klesá. Proužky jsou vlastně malým obrazem vstupního otvoru dalekohledu. Většinou je kruhový a jde tedy o kroužky. Ale pokud by byl vstupní otvor čtvercový, byly by proužky také čtvercové. V centru ohybového obrazu bodového zdroje je světlý disk. Tzv. Airyho disk je tím menší, čím je větší průměr objektivu. To znamená, že velikost Airyho disku je mírou rozlišovací schopnosti dalekohledu. Dva úhlově blízké bodové zdroje ještě rozlišíme, jestliže střed jednoho ohybového disku padne do prvního tmavého proužku druhého disku. Matematicky tuto limitní podmínku pro rozlišení zformuloval lord Rayleigh<sup>12</sup>

$$\sin \delta = \frac{1.220\lambda}{D}, \quad (9.3)$$

<sup>12</sup>Anglický astronom William Rutter Dawes zjišťoval rozlišovací schopnost dalekohledů experimentálně a odvodil i empirický vztah, proto se někdy rozlišovací schopnosti dalekohledů říká Dawesova mez. Dawes také zjistil, že za vynikajících podmínek a s výborným přístrojem lze rozlišit až o 8 procent těsnější bodové zdroje než udává Rayleighovo kritérium.

kde  $\delta$  je rozlišovací úhlová schopnost v radiánech,  $\lambda$  vlnová délka světla a  $D$  průměr objektivu v milimetrech. Pokud uvážíme, že oko je při nočním vidění nejcitlivější pro světlo o vlnové délce 500 nm, lze po dosazení psát pro malé úhly  $\delta$  v obloukových vteřinách

$$\delta = \frac{126}{D}, \quad (9.4)$$

kde průměr objektivu  $D$  i zde zadáváme v milimetrech.<sup>13</sup>

Největší český dalekohled, dvoumetr na Astronomickém ústavu AV ČR v Ondřejově má teoretickou rozlišovací schopnost  $\delta = 0,057''$ . Té bychom ale dosáhli jen mimo zemskou atmosféru. Ondřejovská observatoř mívá za nejlepších podmínek seeing až  $1''$ , takže teoretické rozlišovací meze tamní dalekohled ani zdaleka nedosáhne. Vždy platí, že reálná rozlišovací schopnost dalekohledu bude menší než teoretická, ale pozor – číselně  $\delta_{real} > \delta_{teor}$ . Musíme vzít v úvahu kvalitu dalekohledu, pozorovací podmínky, poměry jasností dvou objektů a další efekty.

Někdy je vhodné vyjádřit rozlišovací schopnost dalekohledu pomocí rozlišení  $\Delta$ , které udává velikost úhlu připadajícího na jednotku délky v ohniskové rovině. Běžně se udává v obloukových vteřinách na milimetr [ $''/\text{mm}$ ], při použití CCD kamer i v pixelech na mm. Pro malé úhly jej lze jej spočítat podle vztahu

$$\Delta['] = \frac{206265 \cdot s}{f}, \quad (9.5)$$

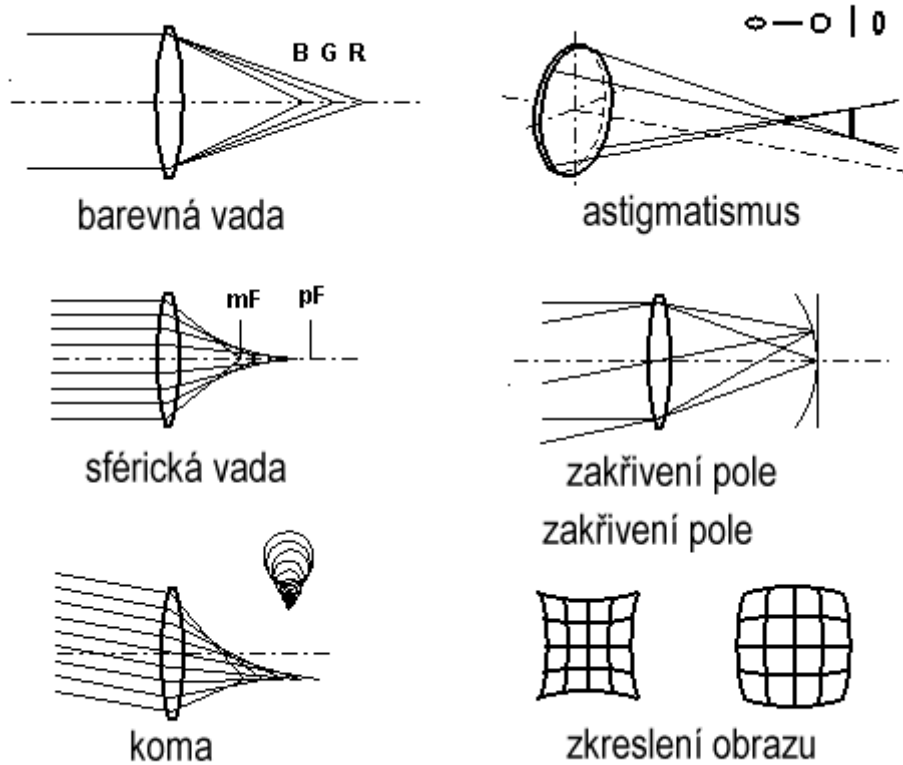
kde číselná konstanta v čitateli představuje počet úhlových vteřin v jednom radiánu,  $s$  je délka v ohniskové rovině dalekohledu a  $f$  ohnisková délka. Uživatelé CCD kamer tento vztah jistě ocení. Umožní jim spočítat, jak velká část hvězdné oblohy se vejde na CCD čip kamery nebo jaký úhel připadá na jeden pixel čipu.

#### 9.4.4 Optické vady dalekohledů

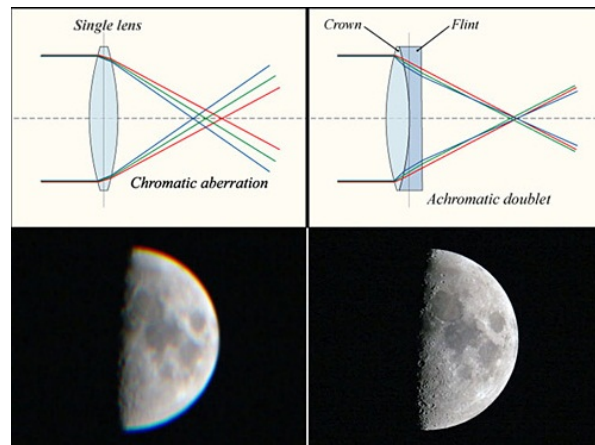
V ideálním případě by se měl bodový zdroj zobrazit jako bod a to ve všech barvách. Jak ale víme šedivá je teorie a zelený strom života. V podstatě každý optický přístroj má nějakou vadu, která je více či méně úspěšně korigována. Představíme si stručně jen hlavní optické vady. Detailně se jim budete věnovat v navazujících kurzech.

- **Barevná vada** – Každá barevná složka bílého světla se láme pod jiným úhlem. Jinak řečeno, index lomu skla čočky je různý pro každou barvu, závisí na vlnové délce. Ohniska kratších vlnových délek jsou blíže čočce, než ohniska delších vlnových délek. Pokud by měl dalekohled objektiv tvořený jen jednou čočkou, měl by velkou barevnou vadu. Proto jsou objektivy většinou tvořeny soustavou čoček z materiálů o různých indexech lomu. Objektiv složený ze dvou čoček o různých indexech lomu, který má společné ohnisko pro dvě vlnové délky ze vzdálenějších světelných oblastí spektra, se označuje jako *achromát*. Barevná vada je korigována, ale ne úplně. Společné ohnisko pro tři různé vlnové délky má *apochromát* tvořený třemi čočkami. Barevná vada je zde už nepostřehnutelná.

<sup>13</sup>Pokud zadáte vlnovou délku, na níž je oko nejvíce citlivé při denním vidění, dostanete vztah pro rozlišovací schopnost dalekohledu, který se občas objevuje v učebnicích  $\delta'' = 140/D$ .



Obrázek 9.20: Hlavní optické vady. Zdroj: <http://www.funsci.com>.



Obrázek 9.21: Levný dalekohled s jednoduchou čočkou vytváří rozmazaný obraz s okraji s falešnými barvami (vlevo). Galileoscope představuje kvalitnější achromát tvořený dvojitou čočkou. Ohnisko je společné pro modré a červené světlo, ohnisko zeleného světla je lehce posunuté. Zdroje: Schémata R. Caniatti/Wikipedia, snímky Měsíce R. Fienberg.

- **Kulová vada (sférická aberace)** (obrázek 9.20) je vada zobrazení předmětu, objektu kulovou čočkou nebo zrcadlem. Paprsky, které jsou dále od optické osy, se protínají na optické ose dříve, než paprsky bližší k optické ose. Vada se projevuje zejména u velkých kulových zrcadel, kde musí být opravena korekční deskou.
- **Koma (asymetrická vada)** (obr. 9.22, 9.20) – je způsobena rotační nesouměrností svazku zobrazovacích paprsků. Obraz bodu, který leží mimo optickou osu, není bodový, ale vypadá jako malá kometa s jasným jádrem. Velikost komy roste se vzdáleností od optické osy. Vada se dá odstranit komakorektorem.
- **Astigmatismus** (obr. 9.22, 9.20, 9.24) se podobá komě. Objevuje se u čočkových i zrcadlových systémů. Bod se zobrazuje jako malá eliptická ploška, která při změně vzdálenosti může přejít v úsečku. Vada je korigována u tzv. anastigmatů.
- **Zkreslení obrazu** (obr. 9.20) je jednou z možných deformací obrazu. Dochází k němu, pokud je zvětšení vnějších částí předmětu odlišné od zvětšení vnitřních částí. Podle tvaru zkreslení mluvíme o zkreslení poduškovitém nebo soudkovitém. Soustava, která nevykazuje žádné zkreslení obrazu, se označuje jako ortoskopická.

Na kvalitu zobrazení objektů nějakou optickou soustavou má vliv i rozptyl a absorpce světla při interakci (průchodu nebo odrazu) světla s každým optickým prvkem soustavy. Čím více optických členů soustava má, tím více se tyto členy mohou negativně projevat. Rozptylem vzniká tzv. parazitní světlo, které snižuje kontrast obrazu. Absorpce i rozptyl obecně zmenšují množství světla, které nakonec projde optickou soustavou. Protiopatření jsou zřejmá. Na lámavé prvky se nanáší antireflexní vrstvy a reflexní povrchy zrcadel, které časem oxidují a ztrácí odrazivost, je třeba pravidelně každé dva až tři roky obnovovat novým pokovením.

## 9.5 Příslušenství dalekohledů

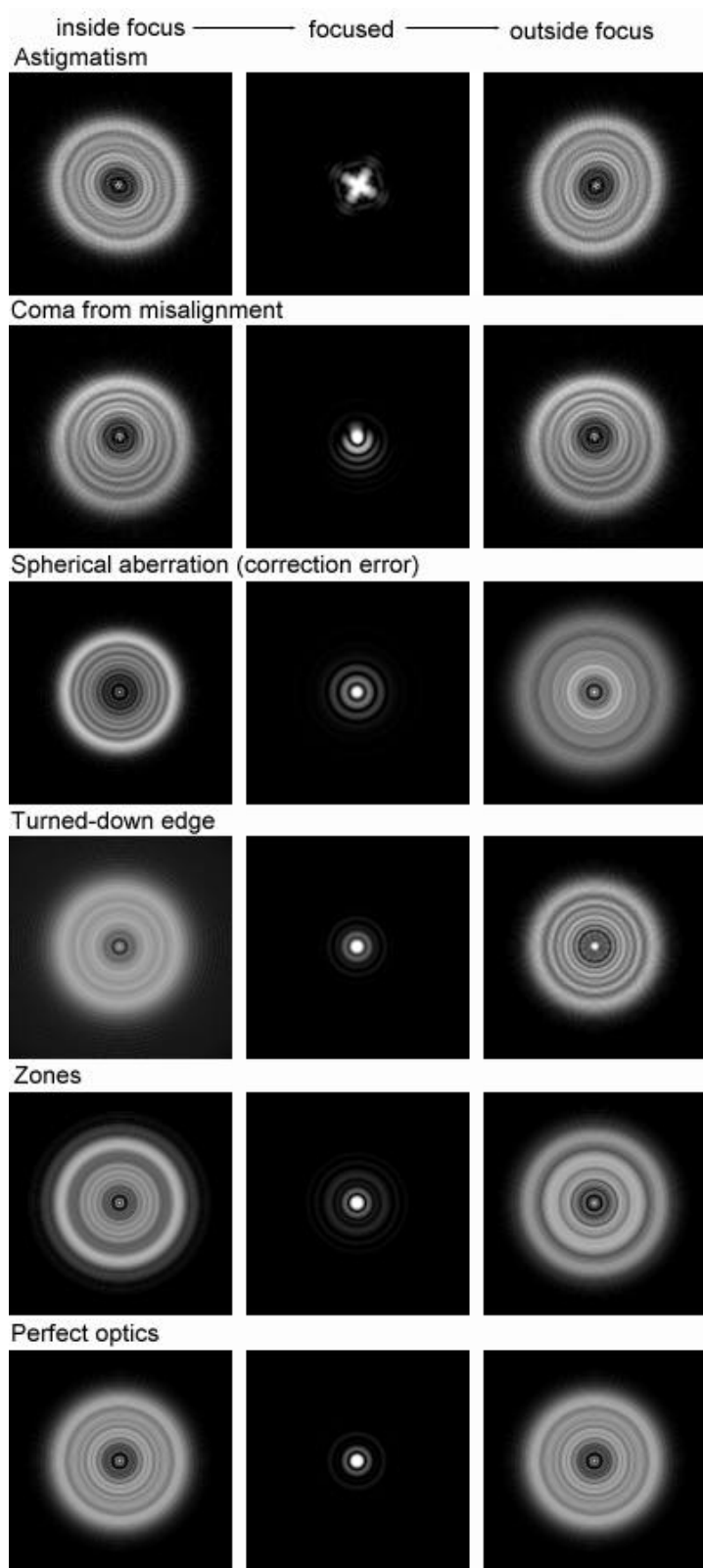
### 9.5.1 Okuláry

U prvních dalekohledů byl okulár tvořen jednoduchou rozptylkou nebo spojkou. Takové okuláry ale trpěly různými optickými vadami. Proto se v průběhu staletí snažili optici a astronomové okuláry vylepšit a vady odstranit. Výsledkem jsou dnes používané okuláry, které jsou většinou tvořeny celou soustavou čoček (viz obrázek 9.25). Princip činnosti ale zůstal stejný. Okulár slouží k prohlédnutí obrazu v ohniskové rovině dalekohledu. Pokud leží obraz před okulárem, jedná se o okulár pozitivní, kterým si obraz prohlížíme jako lupou. Pozitivní okulár tedy leží až za ohniskovou rovinou. Příkladem takového okuláru je okulár Ramsdenův. Naproti tomu u negativního okuláru leží ohnisko objektivu mezi sběrnou čočkou okuláru a okem. Příkladem je okulár Huygensův.

Okulár použitý při pozorování určuje velikost dosaženého zvětšení (viz kapitola 9.4.1, vztah 9.2)

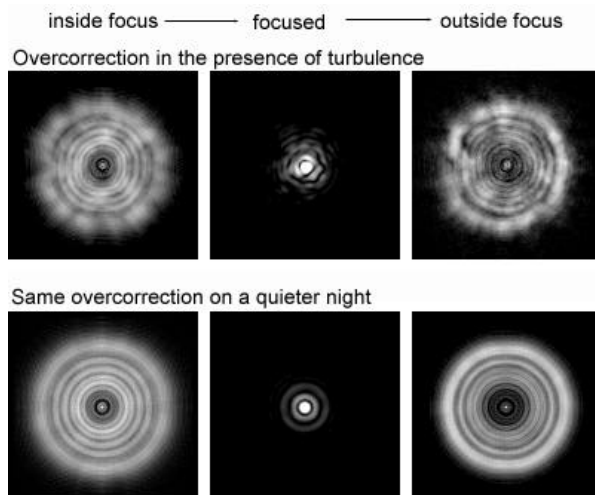
$$z = \frac{f_{ob}}{f_{ok}}, \quad (9.6)$$

kde  $f_{ob}$  je ohnisková vzdálenost objektivu a  $f_{ok}$  ohnisková vzdálenost okuláru. Zvětšení lze ale dle vztahu 9.2 vyjádřit také jako poměr vstupní a výstupní pupily dalekohledu.

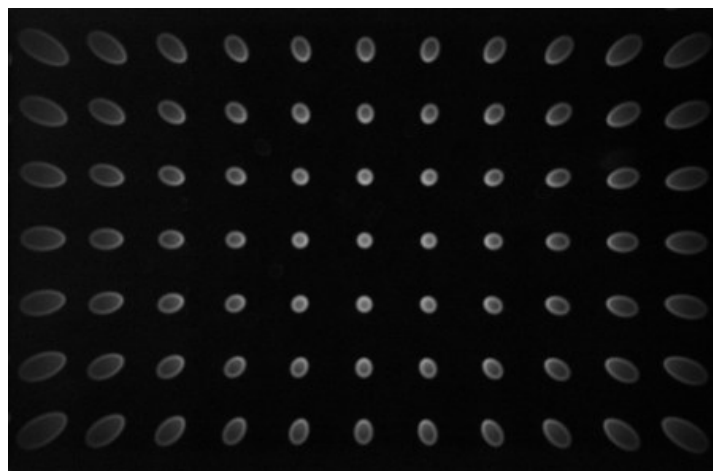


Obrázek 9.22: Některé vady objektivu. Zonální vada a podbroušené okraje odpovídají špatnému tvaru zrcadla. Převzato z <http://www.willbell.com>.





Obrázek 9.23: Vliv neklidu atmosféry na obraz hvězdy. Převzato z <http://www.willbell.com> .



Obrázek 9.24: Zklenutí pole a astigmatismus způsobuje změny velikosti a tvaru obrazu bodového zdroje (PSF) v závislosti na jeho poloze vůči optické ose objektivu. Převzato z <http://toothwalker.org/optics>.



Obrázek 9.25: Nejběžnější typy okulárů. Převzato z <http://posec.astro.cz>.

Výstupní pupilu dalekohledu a tedy okuláru lze snadno změřit. Když namíříme během dne na jasnou oblohu nebo obecně na jasnou plochu, můžeme v jisté vzdálenosti stínítka za okulárem pozorovat ostře ohraničený obraz kruhové plošky, výstupní pupilu. Její průměr by měl být při pozorování vždy menší než průměr  $d$  zorničky pozorovatele. To znamená, že pro dalekohled o průměru objektivu  $D$  (v milimetrech) a pozorovatele se zorničkou o průměru 6–7 mm je třeba použít takový okulár, abychom dostali zvětšení

$$z \geq \frac{d}{D} = 1,7D. \quad (9.7)$$

Důležitým údajem pro přípravu pozorování je znát velikost zorného pole dalekohledu, tedy vědět, jak velkou část hvězdné oblohy uvidíte při pohledu dalekohledem za použití daného okuláru. Zorné pole dalekohledu<sup>14</sup> závisí na použitém zvětšení  $z$  i zorném poli okuláru  $\vartheta$

$$\Theta = \frac{\vartheta}{z}. \quad (9.8)$$

Velikost zorného pole okuláru závisí na jeho typu od  $25^\circ - 50^\circ$  až  $55^\circ - 90^\circ$  pro širokouhlé okuláry.

### 9.5.2 Optické filtry

Přestože je zásadní snahou astronoma využít maximum přicházejícího záření, používají se někdy optické filtry, které naopak množství záření, respektive světla omezí. Důvodem může být například to, že pozorovaná hvězda je pro použitý detektor příliš jasná. Pak se použije tzv. neutrální filtr, který záření prošlé optickou soustavou zeslabí stejně pro všechny vlnové délky. Většinou je ale potřeba vybrat z dopadajícího záření určitou přesnou oblast spektra. Pokud má použitý filtr záření z vybraného intervalu vlnových délek propustit až na detektor, aby bylo možné změřit intenzitu toku záření, mluvíme

<sup>14</sup>Zorné pole dalekohledu se někdy označuje zkratkou FOV, z anglického „field of view“.

o fotometrických filtrech, s nimiž jsme se setkali v předchozí kapitole. Někdy ale naopak chceme zvolenou oblast spektra zcela potlačit, protože je důsledkem například rušivého městského světelného znečištění. Každý filtr tedy lze charakterizovat čtyřmi parametry, které všechny nabývají hodnot od nuly do jedné a jejich součet je roven jedné.

Transparentnost, propustnost (T) popisuje, kolik procent světla dané vlnové délky filtr propustí.

Absorpce, pohltivost (A) vyjadřuje velikost poměrné části světla pohlcené filtrem v jednotlivých vlnových délkách.

Reflexivita, odrazivost (R) zaznamenává, jaké množství dopadajícího světla se na filtru odrazí.

Rozptylnost (S - z anglického „scattering“) udává, jaká část světla se působením filtru rozptýlí.

O fotometrických filtrech jsme již hovořili, ale připomeňme ještě filtry pro vizuální pozorování a fotografii. Nejrozšířenější jsou sluneční filtry, které mají za úkol výrazně snížit intenzitu slunečního světla. Mohou se použít jak před objektivem tak společně s okulárem. Představují jednu ze základních pomůcek, pokud chceme pozorovat Slunce dalekohledem přímo. Zpravidla jde o reflexní filtry s vysokou odrazivostí, takže samotným filtrem projde jen malá část (řádově procenta) dopadajícího světla. Pozorování Měsíce za úplňku už lidské oko zvládne bez újmy, ale takové pozorování je poměrně nepříjemné. Měsíc je příliš jasný. Pro snížení jasů jsou vhodné měsíční filtry. Po snížení jasů je pak možné pozorovat i jemnější detaily měsíčního povrchu. Ke zvýraznění detailů na pozorovaných planetách jsou určeny barevné tzv. planetární filtry. Jenže Slunce, Měsíc, planety jsou jasné objekty. Mnoho astronomů amatérů se věnuje pozorování tzv. deep-sky objektů, tedy mlhovin, hvězdokup, galaxií. Využívají tzv. mlhovinové filtry, které propustí záření, na nichž tyto objekty nejvíce září a naopak pohltnou vše ostatní. O potlačení rozptýleného rušivého záření například sodíkových nebo rtuťových výbojek městského osvětlení se postarají filtry RLP (z anglického „reduction of light pollution“). Podobně pracují i filtry UHC, případně jejich speciální podtypy jako OIII, $H_{\beta}$  a podobně, ale obecně propouští užší část spektra než filtry RLP.

### 9.5.3 Detektory

Detektor stojí na konci cesty paprsků od objektu k pozorovateli. Detektorem může být i samotné oko pozorovatele. Lidský zrak je však dosti subjektivní detektor. Přesněji řečeno, lidský mozek zpracovává signál z očí často subjektivním způsobem pod vlivem nejrůznějších dojmů, nálad, znalostí či pocitů. Nám ale nyní půjde o detektory objektivní, tedy přístroje, kde je přicházející tok fotonů zachycen, proměřen. Uspořádání detektoru může být různé – od bodového až po plošné.<sup>15</sup> Bodový detektor může měřit v daném okamžiku jen jediný údaj, například jasnost jedné hvězdy v clonce fotometru. Řada bodových detektorů tvoří lineární detektor. V minulosti se takové detektory využívaly zejména pro záznam spekter. Nejrozšířenější jsou dnes plošné detektory – CCD prvky, u nichž je výstupem měření obrázek. V minulosti to byly fotografické desky, ale nezapomínejme, že naše oko, respektive jeho sítnice je také plošným detektorem.

<sup>15</sup>V neoptické astronomii dokonce pracujeme i s detektory trojrozměrnými.

Detektory se liší nejen stavbou, ale také dalšími parametry. Představme si některé z nich. Pro zachycení slabých zdrojů záření je u detektoru rozhodující tzv. **kvantová účinnost** QE<sup>16</sup>, která pro danou vlnovou délku ukazuje jaké procento z fotonů dopadajících na detektor je detektorem zaregistrováno. Jinak řečeno, jaká část z dopadajících fotonů je schopna vyprodukovat nějaké nosiče náboje. Kvantová účinnost je tedy elektrickou citlivostí detektoru na přicházející záření. Měří se v elektronech na foton a zpravidla se uvádí v procentech. Jak jsme uvedli, je třeba stanovovat kvantovou účinnost pro každou vlnovou délku. Její hodnota na vlnové délce dopadajícího záření závisí a tuto závislost označujeme jako **spektrální citlivost detektoru**. Počet zachycených fotonů se však mění nejen s vlnovou délkou dopadajícího záření, ale také s délkou expoziční doby. Tuto závislost odezvy detektoru na jeho osvětlení<sup>17</sup> označujeme jako **charakteristickou (senzitivitickou, gradační) křivku**. Pro fotometrii je nejvhodnější, pokud je její průběh co nejvíce lineární. Bohužel, například u fotografické emulze tomu tak obecně není. Posledním charakteristickým parametrem detektoru je **dynamický rozsah**, tedy poměr maximální hodnoty signálu detektoru k hodnotě šumu detektoru, který je detektorem generován i bez dopadajícího záření.<sup>18</sup>

### 9.5.3.1 Fotografie

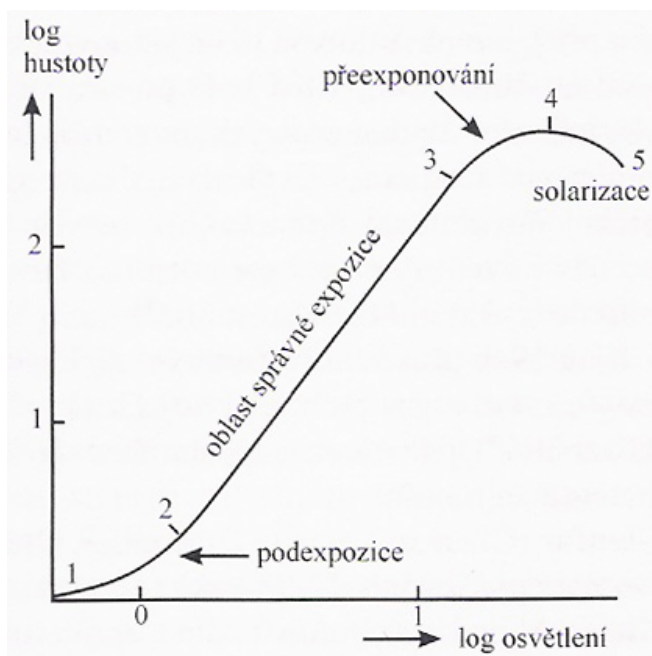
Nejstarší objektivní metodou zaznamenání světelného signálu je fotografie. V astronomii se začala používat od roku 1840, kdy 23.3. pořídil John William Draper první astrofotografii – snímek Měsíce. Nedlouho poté byly pořízeny první fotografické záznamy slunečního spektra. Úspěšnými fotografy byli Alexandre-Edmond Becquerel a opět J. W. Draper. První hvězdy (Vega) byly zachyceny na daguerotypii, kterou 17. 7. 1850 pořídili John Adams Whipple a George Phillips Bond. Posledně jmenovaný je také autorem prvního koloidního snímku hvězd, soustavy Alkora a Mizara, z 27. 4. 1857. Stále se však jednalo o snímky jasných hvězd. Teprve roku 1881 se podařilo Henry Drape- rovi pořídit snímek mlhoviny v Orionu, na níž byly zaznamenány hvězdy až do hvězdné velikosti 14.7 mag. Skutečný zlom, ale nastal v roce 1883, kdy Andrew Ainslie Com- mon po čtyřech letech pokusů získal dlouhými expozicemi na suchých fotografických deskách snímky mlhovin. Na snímcích zachycené hvězdy byly totiž slabší než ty, které bylo možné stejným dalekohledem pozorovat vizuálně (Hearnshaw, 1996). Po následující více než jedno století byla fotografická emulze nejrozšířenějším detektorem v astronomii. Na rozdíl od vizuálních pozorování, měla ta fotografická několik výhod. Fotografický záznam je trvalý a lze jej opakovaně vyhodnocovat. Navíc umožňoval při delších expo- zicích zachytit i podstatně slabší hvězdy než při vizuálním pozorování a to navzdory faktu, že kvantová účinnost fotografické emulze se pohybuje jen kolem 3 %, při zvýšení citlivosti maximálně 10 %.

Přestože se nosiče fotografické emulze v běžném životě měnily a velmi záhy se přešlo na pružné nosiče, filmy, v astronomii prakticky celou dobu převládaly skleněné desky. Důvod je nasnadě. Pružné filmy se mohly v ohniskové rovině dalekohledu prohýbat a obraz pak nemusel být dobře zaostřený.

<sup>16</sup>Zkratka QE vychází z anglického výrazu „quantum efficiency“.

<sup>17</sup>Pod pojmem osvětlení zde rozumíme součin dopadajícího toku záření a expoziční doby.

<sup>18</sup>V některých případech se hodnotí jen použitelný dynamický rozsah, tedy jen lineární oblast charakteristické křivky detektoru.



Obrázek 9.26: Charakteristická tzv. gradační křivka fotografické emulze. Je charakterizována sklonem (gradací) lineární části. Převzato z Kleczek, Velká encyklopedie vesmíru. Academia, Praha 2002.

Fotografická emulze je tvořena krystalky halogenidu stříbra. Jejich velikost ovlivňuje kvantovou účinnost emulze. Se zvětšujícími se krystalky se zvyšuje citlivost, ale tím i zrnitost snímku. Reakci emulze na dopadající záření popisuje veličina s několika názvy – denzita  $D$  (opacita nebo hustota zčernání<sup>19</sup>), která je definována jako dekadický logaritmus podílu světelného toku  $F_0$  před průchodem deskou ku světelnému toku po průchodu zkoumaným bodem desky  $F_z$ :

$$D = \log_{10} \left( \frac{F_0}{F_z} \right). \quad (9.9)$$

Z definice je zřejmé, že vždy  $D > 0$ , protože i čistá deska alespoň trochu pohlcuje procházející záření. Citlivost fotografické desky se liší i pro různé vlnové délky dopadajícího záření. Vhodným chemickým složením lze pokrýt celou optickou oblast spektra i s mírným přesahem, v rozmezí přibližně 250 nm až 900 nm. Obecně bývá citlivost větší v modré oblasti. Zásadním problémem fotografické emulze je ale nelineární průběh gradační křivky (obrázek 9.26). Pro fotometrii můžeme využít jen lineární část. I proto je výhodnější zavést tzv. Bakerovu denzitu (?)

$$D_B = \log_{10} \left[ \left( \frac{F_0}{F_z} \right)^\gamma - 1 \right], \quad (9.10)$$

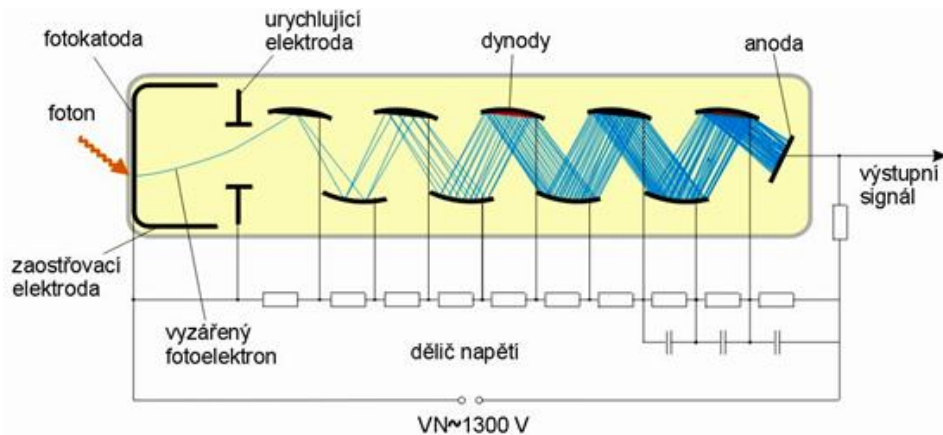
kde  $\gamma$  je experimentální konstanta. Závislost na osvětlení  $E$   $D_B = D_B(\log_{10} E)$  je totiž

<sup>19</sup>Označení „hustota zčernání“ je pozůstatkem z doby, kdy se reakce emulze (velikost zčernání) určovala prosvětlením desky s emulzí tenkým svazkem světla a měřením toku po průchodu deskou s emulzí.

blíží přímce než závislost  $D = D(\log_{10} E)$ . V dnešní době se klasická fotografie používá jen výjimečně. Fotografickou emulzi nahradily elektronické čipy.

### 9.5.3.2 Fotonásobiče a fotometry

Fotografie posunula astronomii na novou úroveň. Přesto tu byl jeden problém. A to zejména její nelinearita pro fotometrická měření. Proto se na konci 19. století objevovaly první snahy o přímé měření jasnosti hvězd. Na konci tohoto úsilí bylo měření jasnosti hvězd pomocí fotoelektrické fotometrie. Její vrcholné období spadá do 60. až 80. let minulého století. Základním přístrojem byl fotonásobič<sup>20</sup>, jehož činnost je založena na fotoelektrickém jevu. Na vstupní straně je trubice fotonásobiče opatřena fotokatodou. Jakmile dopadne na fotokatodu foton o energii vyšší než je výstupní práce elektronu, je uvolněn jeden nebo i více elektronů. Ty pak putují k řadě dynod, připojených postupně k vyššímu napětí než předchozí. Dynody mají speciální povrchovou úpravu, která usnadňuje uvolňování elektronů. Každý náraz elektronu z nich uvolní několik elektronů a ty pak putují k další dynodě, kde uvolní více elektronů atd. Během průchodu vakuovanou trubicí fotonásobiče se tak jejich počet zmnohonásobí a na anodu na konci trubice dopadá až desítmilionkrát více elektronů než bylo uvolněno fotony na katodě. Taková sprška elektronů způsobí na anodě proudový puls jednotek miliampér v délce asi 5 nanosekund.



Obrázek 9.27: Schéma fotonásobiče. Převzato z <http://fyzika.jreichl.com>.

Při měření jasnosti hvězd tak lze využitím fotonásobiče dosáhnout přesnosti milimagnitudy při časovém rozlišení milisekundy. Ve své době představovaly fotoelektrické fotometry s fotonásobiči nejpřesnější přístroje na měření jasnosti hvězd, zejména v kratších vlnových délkách světla. Na výsledky měření s fotoelektrickým fotometrem má ale vliv řada faktorů, které musíme vzít v úvahu již při samotném měření a následném zpracování. V anodách a dynodách lze zpravidla detekovat proud, který ale není vyvolán dopadajícím zářením pozorovaného objektu. Je způsoben tepelným pohybem atomů ve fotokatodě a dynodách, který uvolňuje elektrony. Tento tzv. temný proud lze snadno naměřit při zakrytém fotometru. Při měření jasnosti hvězdy musíme temný proud od

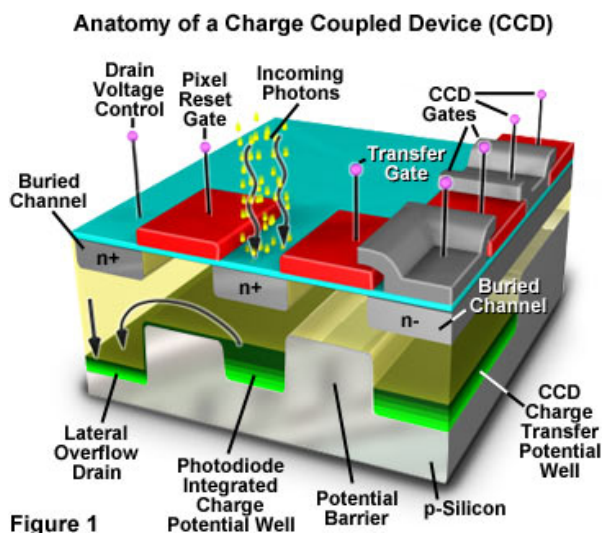
<sup>20</sup>V angličtině se užívá pro jeho označení výrazů photomultiplier, electron multiplier tube, PMT.

naměřeného signálu odečítat. Kromě temného proudu lze registrovat také příchody částic kosmického záření. Jejich střetnutí s fotokatodou totiž vyvolá záblesk Čerenkovova záření. Naštěstí je taková událost snadno odlišitelná od běžného měření, protože jde o proudový pulz asi stokrát silnější než běžně dávají fotony. Průběh měření s fotoelektrickým fotometrem a jeho výsledky ale ovlivňuje celá řada dalších faktorů: úhel dopadu světla na fotokatodu, jeho polarizace, orientace fotonásobiče v magnetickém poli Země, která se s otáčením dalekohledu za hvězdami mění atd. Pro přesné a správné vyhodnocení fotometrických měření je proto nezbytné provádět během noci několikrát také řadu kalibračních měření a jejich výsledky započítat při zpracování pozorování sledovaného objektu.

### 9.5.3.3 Na bázi křemíku

Relativně vysoká pořizovací cena, náročnost pozorování a zpracování a možnost pozorovat jen relativně jasné hvězdy byla příčinou toho, že fotoelektrická fotometrie byla v druhé polovině 20. století takřka výhradně záležitostí velkých profesionálních observatoří. Jakmile by se objevila jiná možnost fotometricky pozorovat vesmírné objekty, zřejmě by byla fotoelektrická fotometrie odeslána do výslužby. A taková situace na konci 20. století opravdu nastala.

Nejúčinnějším a nejrozšířenějším detektorem pro měření jasnosti hvězd se staly CCD kamery<sup>21</sup>. Oproti fotonásobičům představují CCD kamery zcela jinou dimenzi, a to doslova. Zatímco výsledkem fotoelektrického fotometru s fotonásobičem byl časový sled hodnot, u CCD získáváme jako výsledek dvourozměrný obrázek pozorované části hvězdné oblohy, dvourozměrnou matici hodnot naměřených intenzit. Základním elementem takové matice je jeden pixel.

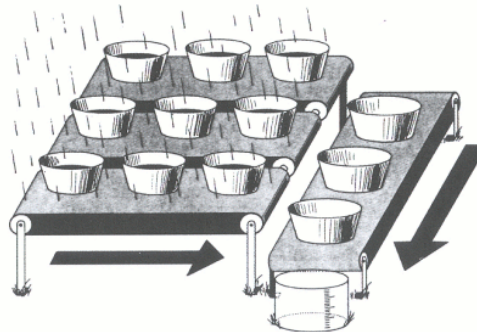


Obrázek 9.28: Anatomie CCD čipu. Převzato z <http://www.circuitstoday.com/2010>.

Myšlenka na takové využití křemíkového čipu se zrodila v hlavách dvou pracovníků

<sup>21</sup>Zkratka CCD vychází z anglického Charge Coupled Device

Bellových laboratořích v roce 1969. Willard Boyle a George E. Smith později za tento objev dostali Nobelovu cenu. První CCD kamera byla představena už v roce 1970 a o čtyři roky později se CCD kamery začaly sériově vyrábět. V astronomii byla CCD kamera poprvé použita v roce 1979 na metrovém dalekohledu observatoře na Kitt Peak, USA. Od té doby začala éra „křemíkové astronomie“. Jádrem CCD kamery je totiž čip s destičkou polovodičového materiálu, nejčastěji křemíku. Na povrchu čipu je rozmístěna soustava kladných elektrod, na spodní stranu je přivedeno záporné napětí (viz obrázek 9.28). Samotné lapání dopadajících fotonů pak opět využívá fotoelektrického jevu. Velmi zjednodušeně bychom si princip činnosti CCD čipu mohli představit na analogii zobrazené na obrázku 9.29. Dopadne-li na plochu čipu foton s dostatečnou energií, uvolní elektron(y), který spadne, případně spadnou, do nějaké nádobky. Po zvolené (expoziční) době se obsah jednotlivých nádobek spočítá a převede na intenzity. Je zřejmé, že jedna naše nádobka představuje jeden pixel ve výsledném CCD snímku. Pokud je zdroj fotonů příliš intenzivní, může být pomyslná nádobky s elektrony zaplněna a ty začnou přetékat do sousedních nádobek v jednom směru. Na snímku pak pozorujeme protažení obrazu jasných objektů, tzv. *blooming* (viz obrázek 9.30).

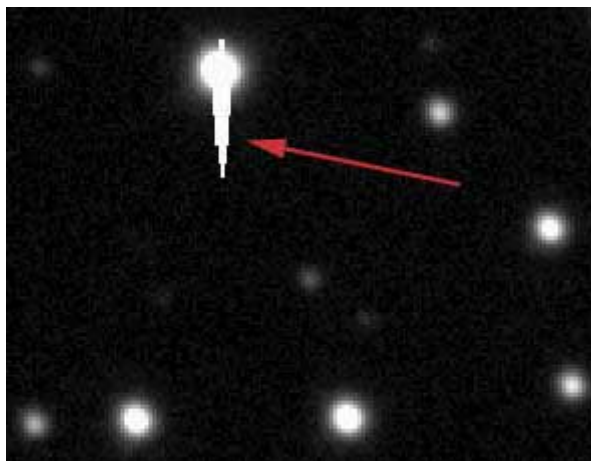


Obrázek 9.29: CCD čip můžeme přirovnat k sadě nádobek, které během deště měří množství srážek. Po dešti se nádobky posouvají na dopravníkových páscech k měřicí stanici. Voda shromážděná v každé nádobce je pak přelita do měřicí nádobky, množství je změřeno a na výstupu dostaneme údaj o množství vody v každé jedné nádobce. Převzato z Janesick & Blouke, *Sky and Telescope*, vol. 74, p. 238.

Po ukončení expozice se zavře závěrka kamery, na čip nedopadá žádné světlo a je třeba zjistit obsah jednotlivých nádobek, respektive změřit naakumulovaný náboj v každém pixelu. Podobně jako na obrázku 9.29 je třeba postupně přesouvat obsah pixelů na okraj čipu k tzv. registrům. Prakticky toho docílíme periodickou změnou napětí na anodách. Elektrony budou ve vlnách přesouvány do registrů, kde je pro každý pixel změřen příslušný náboj a převeden na číselnou hodnotu v jednotkách ADU (z angl. *analog-to-digital unit*).

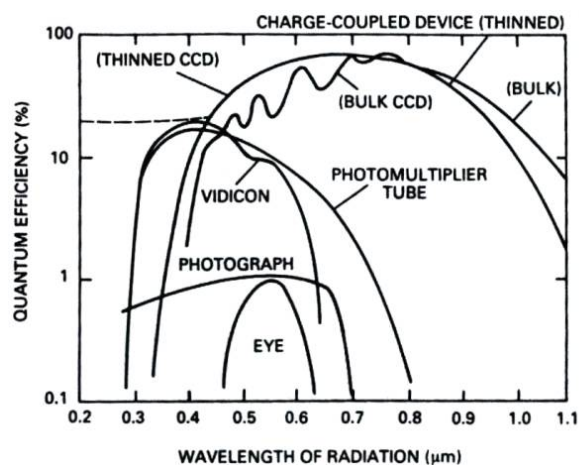
Přesnost CCD měření dosahuje u nejlevnějších kamer 0,01 mag, u těch nejlepších naopak až miliontiny magnitudy. Na rozdíl od fotometru nebo fotografie je u CCD kamer velmi vysoká kvantová účinnost, která může přesáhnout 90% (viz obrázek 9.31). Nicméně podobně jako u fotonásobiče se projevuje tepelný šum v podobě temného





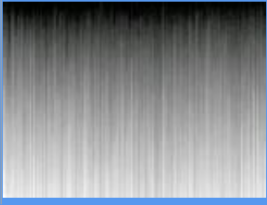



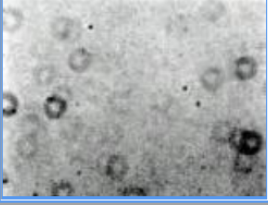

Obrázek 9.30: Blooming se projevuje charakteristickými „ocasky“ kolem jasných hvězd. Převzato z <http://www.ccd.com>.

proudu. Pro zlepšení citlivosti se čipy CCD kamer chladí Peltierovým článkem případně až tekutým dusíkem. Kromě šumu se ale projevuje pro každý jednotlivý pixel různá citlivost. Každý snímek objektu pořízený CCD kamerou je tak nutné kalibrovat. Celý proces kalibrace surového snímku pomocí korekčních snímků (bias, dark frame a flat field) označujeme jako redukci snímku a zásadním způsobem rozhoduje o přesnosti výsledné fotometrie nebo vzhledu astrofotografie. Navíc je vhodné pořizovat pro každý objekt alespoň dva snímky, aby bylo možné vyloučit případné chybové pixely nebo zaznamenání dopadu vysokoenergetického kosmického záření, tzv. kosmíky.



Obrázek 9.31: Srovnání kvantové účinnosti detektorů. Graf byl převzat z <http://www.astro.ljmu.ac.uk>.

Zavedení CCD techniky do pozorovatelské praxe má velké výhody. Cena CCD kamer poklesla, takže se rozšířily i mezi amatérské pozorovatele. Díky jejich citlivosti je možné nyní sledovat i slabší objekty, které byly do té doby měřitelné výhradně velkými profe-

	Frame	Data	Measured magnitude of RX Andromedae
Bias			10.0 +/- .4 Vmag
Dark			10.2 +/- .1 Vmag
Flat			10.25 +/- .05 Vmag

Obrázek 9.32: Ukázka vlivu použití kalibračních snímků na světlý snímek pole RX And. Převzato ze CCD Manual 2010, <http://www.aavso.org>.

sionálními dalekohledy. Na snímku je navíc najednou zachyceno více objektů. Výhodou CCD pozorování je také to, že snímky lze kompletně zpracovávat v počítači, uchovávat v archivech a následně znovu zpracovávat.

#### 9.5.4 Chytrá řešení

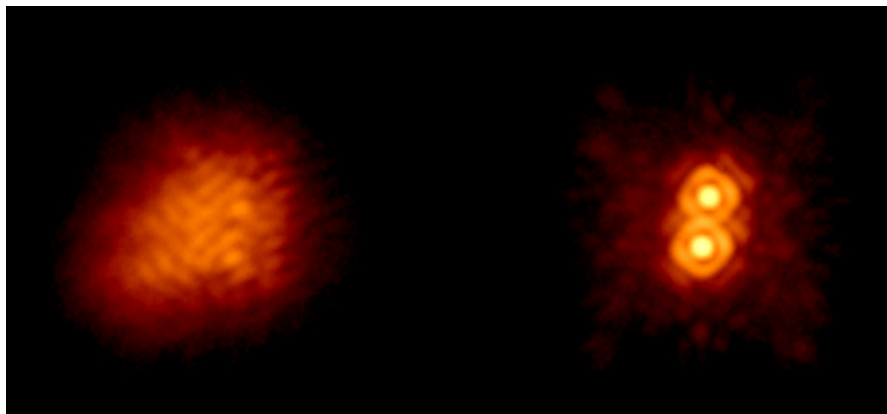
Přestože zavedení CCD kamer znamenalo opravdu revoluci v astronomii a výrazný pokrok ve zpracování obrazu, stále mají pozemské observatoře velký handicap oproti těm kosmickým. Zemská atmosféra, neklid v ovzduší zhoršují získaný obraz vesmírných objektů a zhoršují přesnost a kvalitu pozorování. Ale nejen neklid ovzduší, také zemská tíže hraje roli. Působí na různé části přístrojů. A zejména u těch velkých jsou některé části extrémně namáhány a časem dochází k jejich deformacím a tím následně i deformacím velkých zrcadlových ploch a zhoršení kvality obrazu. Astronomové spolu s techniky našli alespoň částečné řešení. Je jím aktivní a adaptivní optika.

Technologie aktivní optiky se používá od 80. let minulého století. Bez ní by v podstatě nebylo možné postavit a efektivně provozovat dalekohledy o průměru zrcadla větším než 8 metrů. Aktivní optika zhruba jedenkrát za sekundu aktivně kompenzuje tvar zrcadla, který se deformuje v důsledku větru, změny teploty nebo mechanického namáhání dalekohledu.

Oproti tomu adaptivní optika je zařízení, které koriguje vlivy atmosféry Země. S návrhem přišel už v roce 1953 H. W. Babcock, ale praktické realizace se nápad dočkal až v devadesátých letech 20. století. Co se vlastně děje například s obrazem hvězdy při průchodu

atmosférou? Pokud bychom hvězdu pozorovali mimo atmosféru, byl by její obraz v podstatě bodový. V atmosféře ale záření z hvězdy prochází různými vrstvami vzduchu s rozdílnou teplotou, rychlostí proudění, odlišnými pohyby. To vše způsobuje změny lomu paprsku na rozhraní vrstev vzduchu. Výsledný bodový obraz hvězdy se najednou rozmyje do skvrny a její velikost je dána pozorovacími podmínkami, tzv. seeingem. Adaptivní optika je tedy počítačově řízený systém, který vyhodnocuje aktuální stav atmosféry ve směru k pozorovanému objektu a stokrát až tisíckrát za sekundu upravuje tvar zrcadla. Zrcadla s tímto systémem jsou poměrně tenká podepřená zespolu řadou prvků, které mohou mechanickým tlakem tvar zrcadla měnit. Aby získal řídicí počítač informace o stavu ovzduší ve směru pozorování, je třeba mít v zorném poli referenční bod, o němž víme, jak by měl na snímku vypadat. Zpravidla to bývá umělá hvězda vytvořená laserem ve výšce 15 až 25 kilometrů.

Výsledkem použití aktivní a adaptivní optiky je zlepšení kvality obrazu. U největších pozemských přístrojů tak kvalita obrazu předčí i pozorování z Hubblova kosmického dalekohledu.



Obrázek 9.33: Dvojhvězda Iota Tau pozorovaná pomocí 5m Haleova dalekohledu na Mt. Palomaru. Vlevo je snímek dvojhvězdy bez použití adaptivní optiky. Vpravo už odhalené složky dvojhvězdy. Snímky získali Ch. Beichman a A. Tanner. Převzato z <http://www.astro.caltech.edu/palomar/AO/>.

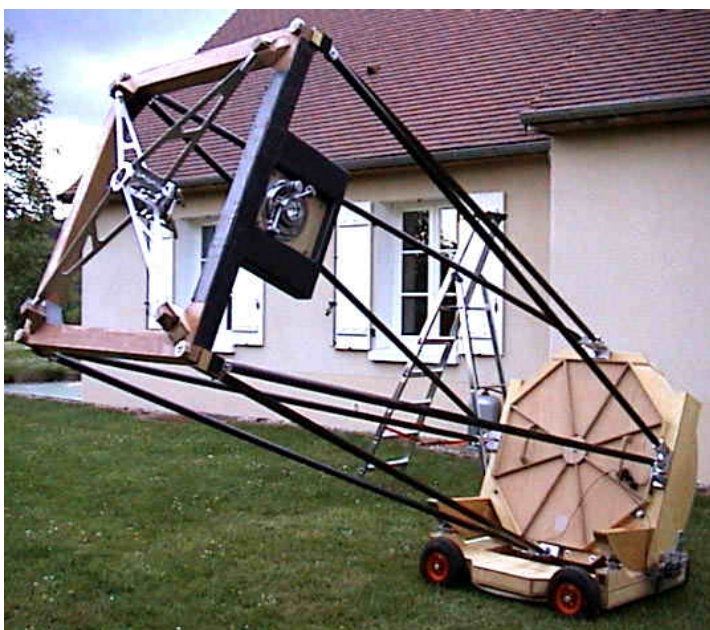
### 9.5.5 Montáže dalekohledů

Nedílnou součástí dalekohledu je montáž, která má několik funkcí. Předně má otáčením dalekohledu kolem dvou vzájemně kolmých os zajistit nastavení zvoleného objektu do zorného pole dalekohledu. Montáž má být dostatečně stabilní a tuhá, aby se dalekohled nechvěl a poskytoval klidný obraz, a případně také umožnil sledování objektu vyrovnáváním denního pohybu oblohy. Montáž často vymezuje i využití dalekohledu. Podle orientace os můžeme montáže rozdělit do dvou skupin:

- azimutální - jedna osa je svislá, druhá vodorovná,
- paralaktické - polární (světová) osa, deklinační osa.

Nejjednodušší je azimutální montáž. Polohu objektu nastavujete vlastně v obzorníkových souřadnicích. Výhody této montáže lze spatřovat v jednoduchosti a tedy nízké pořizovací ceně a ve snadném ovládní. Na druhou stranu pokud bychom chtěli sledovat pohyb objektu po obloze, museli bychom s dalekohledem na azimutální montáži hýbat současně v obou osách. Obraz objektu se navíc bude stáčet.

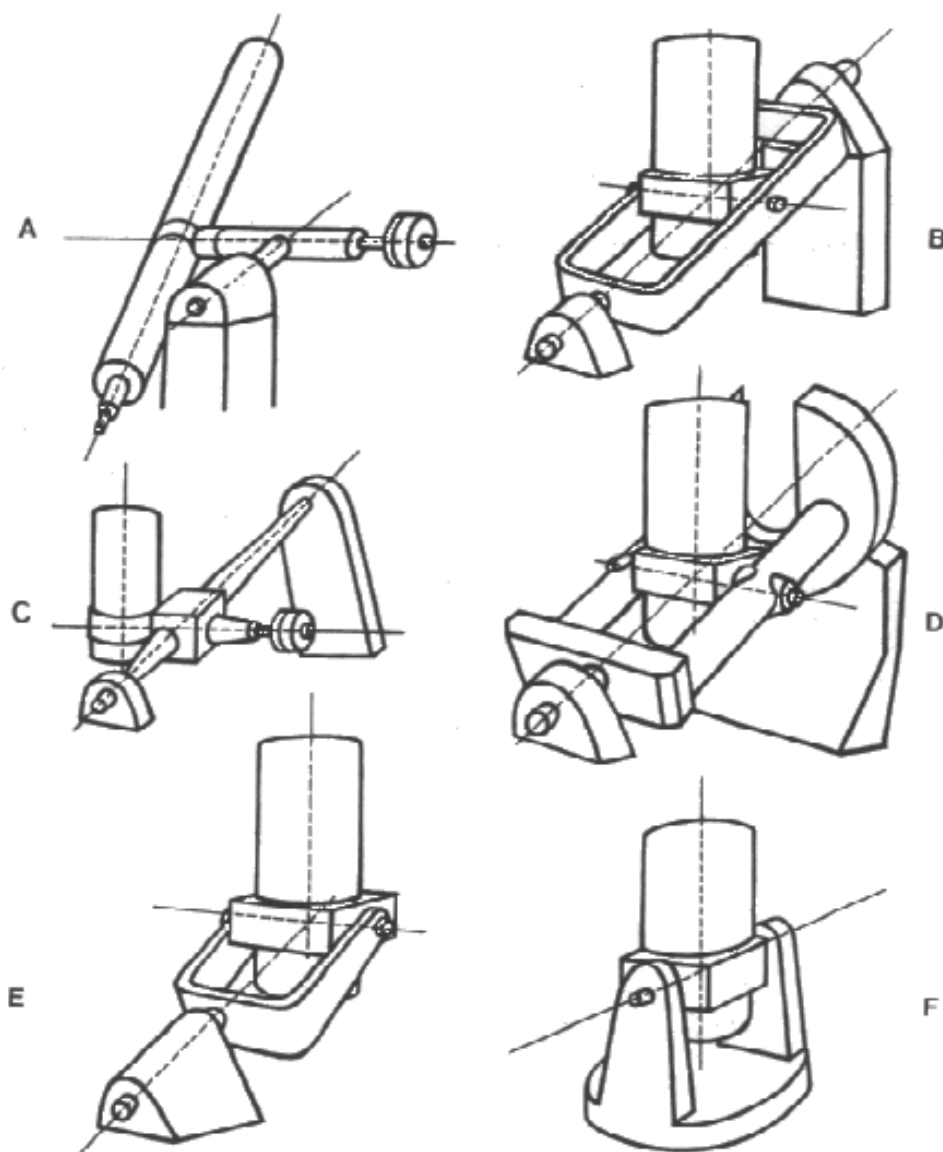
Příkladem azimutální montáže oblíbené zejména mezi amatérskými astronomy je Dobsonova montáž (viz obrázek 9.34). Je vhodná zejména pro dalekohledy typu Newton. Montáž je velmi nízká a tím i značně stabilní. Umožňuje pracovat i s velkými zrcadly. V jiném provedení by cena montáže byla i několikanásobně vyšší.



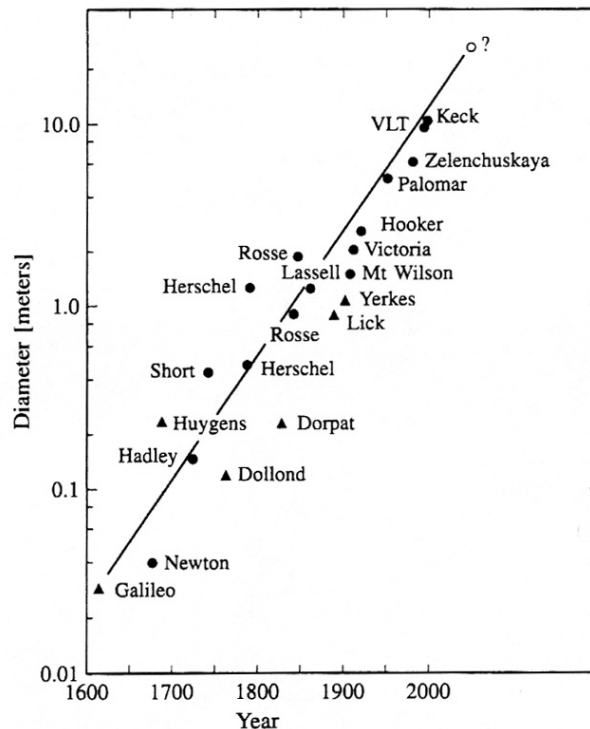
Obrázek 9.34: Dalekohled o průměru 800 mm na jednoduché azimutální montáži typu Dobson. Převzato z <http://www.astrosurf.com/altaz/800.htm>.

Další typ - paralaktická montáž, je již náročnější a dražší. Její náročnost spočívá v tom, že hlavní tzv. polární osa je rovnoběžná s rotační osou Země nebo chcete-li se světovou osou. Na druhou stranu, pro sledování objektu v průběhu noci stačí jen pohyb v jedné ose. Pro nastavení objektu tady lze využít rovníkové souřadnice. Můžeme se setkat s řadou různých provedení těchto montáží (viz obrázek 9.35). Nejběžnější je u nás německá montáž. Typické pro ni je protizávaží, které vyrovnává hmotnost tubusu dalekohledu. S tím přichází i jedna velká nevýhoda této montáže. Zpravidla není možné sledovat objekty od jejich východu až k jejich západu. Dalekohled se musí „vyhnout“ montáži a je nutné jej otočit v obou osách o  $180^\circ$ .

V současné době jsou i montáže poměrně malých dalekohledů určených pro astronomy amatéry nebo jen pro milovníky astronomie vybaveny motory na obou osách a minipočítačem se systémem GoTo, který zajistí nastavení dalekohledu na požadovaný objekt. To je jistě užitečné vybavení, ale člověk tak přichází o potěšení najít požadovaný objekt podle atlasů a map nebo prostě bloudit dalekými neznámými hlubinami hvězdné oblohy.



Obrázek 9.35: Montáže dalekohledů. A – E. Paralaktické montáže. A. Německá; B. Anglická rámová; C. Anglická osová; D. Podkovová; E. Vidlicová. F. Azimutální montáž. Převzato z Grygar, Horský, Mayer, Vesmír, MF, Praha 1979.



Obrázek 9.36: Vývoj velikosti dalekohledů s časem. Graf byl převzat z <http://www.astro.virginia.edu/class/oconnell/astr511>.

## 9.6 Největší observatoře a teleskopy světa

V minulosti se i velké profesionální observatoře stavěly poblíž velkých měst nebo přímo ve městech. Noční život měst nijak nevedl astronomickému pozorování. Dnes je ale situace zcela odlišná. Ve městech se staví planetária a případně jen malé hvězdárny pro veřejnost. Profesionální pracoviště byla donucena odejít v podstatě do vyhnanství. Stačí se podívat na mapu světelného znečištění. A když k tomu přidáte ještě znečištění ovzduší způsobené průmyslem, je zřejmé, že astronomové se museli přestěhovat do nejméně obydlených končin světa. Nové lokality velkých observatoří musí splňovat řadu požadavků, ale mezi ty s největší vahou patří:

- dostatečně temné nebe, tedy žádné nebo jen minimální světelné znečištění,
- klidné ovzduší (malý seeing, do 1"),
- nízká vzdušná vlhkost,
- velký počet jasných (fotometrických) nocí.

Výsledkem je, že nejlepší místa pro astronomické observatoře současnosti leží vysoko v horách, v pouštích, daleko od civilizace, například v horské oblasti Kanárských ostrovů, v jihovýchodní části Austrálie, v poušti Atacama v Chile, ve Skalnatých horách v americké Arizoně nebo vysoko na vrcholcích hor na Havaii. Tam najdeme také největší současné dalekohledy světa. Jejich aktuální přehled je v tabulce 9.1. Některé dalekohledy jsou

využívány jako součást interferometrického systému. Přehled těch nejvýkonnějších je uveden v tabulce 9.2.

Tabulka 9.1: Největší dalekohledy světa

Název	Efekt. průměr	Typ zrcadla	Stát / Partneri	Umístění	Rok výstavby
Large Binocular Telescope (LBT)	11.9 m	2x8.4 m	USA, Itálie, Německo	Mt. Graham Internat. Obs., USA	2004
Gran Telescopio Canarias (GTC)	10.4 m	36 částí	Španělsko (90%), Mexiko, USA	Kanárské ostrovy, Španělsko	2006/9
Keck 1	10 m	36 částí	USA	Mauna Kea, Hawaii, USA	1993
Keck 2	10 m	36 částí	USA	Mauna Kea, Hawaii, USA	1996
Southern African Large Tel. (SALT)	9.2 m	91 částí	Jižní Afrika, USA, UK, Německo, Polsko, Nový Zéland	SAAO, Jižní Afrika	2005
Hobby-Eberly Telescope (HET)	11x9.8 m	91 částí	USA, Německo	McDonald Observatory, USA	1997
Subaru (JNLT)	8.2 m	single	Japonsko	Mauna Kea, Hawaii, USA	1999
VLT UT1 (Antu)	8.2 m	single	země ESO, Chile	Paranal, Chile	1998
VLT UT2 (Kueyen)	8.2 m	single	země ESO, Chile	Paranal, Chile	1999
VLT UT3 (Melipal)	8.2 m	single	země ESO, Chile	Paranal, Chile	2000
VLT UT4 (Yepun)	8.2 m	single	země ESO, Chile	Paranal, Chile	2001
Gemini North (Gillett)	8.1 m	single	USA, UK, Kanada, Chile, Austrálie, Argentina, Brazílie	Mauna Kea, Hawaii, USA	1999
Gemini South	8.1 m	single	USA, UK, Kanada, Chile, Austrálie, Argentina, Brazílie	Cerro Pachón (CTIO), Chile	2001
MMT (1 x 6.5 M1)	6.5 m	Single	USA	F. L. Whipple Obs., USA	2000
Magellan 1 (Walter Baade)	6.5 m	plástev	USA	Las Campanas Obs., Chile	2000
Magellan 2 (Landon Clay)	6.5 m	plástev	USA	Las Campanas Obs., Chile	2002
BTA-6	6 m	single	SSSR/Rusko	Special Astroph. Obs., Rusko	1975
Large Zenith Telescope (LZT)	6 m	tekuté	Kanada, Francie, USA	Maple Ridge, Kanada	2003
Hale Telescope	5.08 m	single	USA	Palomar Observatory, USA	1948

Tabulka 9.2: Největší interferometry světa

Název	Nejdelší základna	Zrcadla	Plocha [m <sup>2</sup> ]	Equiv.	Poznámka
VLTI	200 m	4 x 8.2 m (VLT 1, 2, 3, & 4)	210	16	
Keck Interferometer	85 m	2 x 10 m (Keck 1 & 2)	152		
LBT (LBTI)	22.8*m	2 x 8.4	110	11.9	1 montáž dalekohledu*
CHARA array	330 m	6 x 1 m	2.45		
NPOI	437 m	6 siderostaty (optické)			opticky rozlišený Mizar

Poznámka: \*) Základna není redukována s pozorovacím úhlem.

Ještě na konci minulého století se za velký dalekohled obecně považoval teleskop o průměru větším než dva metry. Vždyť ondřejovský dvoumetr (Perkův dalekohled) patřil v době uvedení do provozu v roce 1967 mezi deset největších dalekohledů světa. Dnes se propadl do kategorie středních nebo dokonce i menších dalekohledů. Průměr největších dalekohledů se totiž zhruba každých 45 let zdvojnásobuje. Dnešní desetimetrový dalekohled sbírá světlo plochou  $4 \cdot 10^6$  krát větší než je plocha lidského oka. A v plánu jsou dalekohledy podstatně větší (viz tabulka 9.3). Je třeba si ale uvědomit, že s rostoucím průměrem přístroje roste i jeho pořizovací cena. Použitím stávajících technologií jsou náklady na stavbu dalekohledu úměrné  $D^{2.6}$ , kde  $D$  je průměr teleskopu.

Nejambicióznější je zatím ESO. Plán na stavbu dalekohledu o průměru 39.3 metru je již schválen<sup>22</sup>.

Tabulka 9.3: Dalekohledy ve výstavbě, se schválenou realizací, plánované.

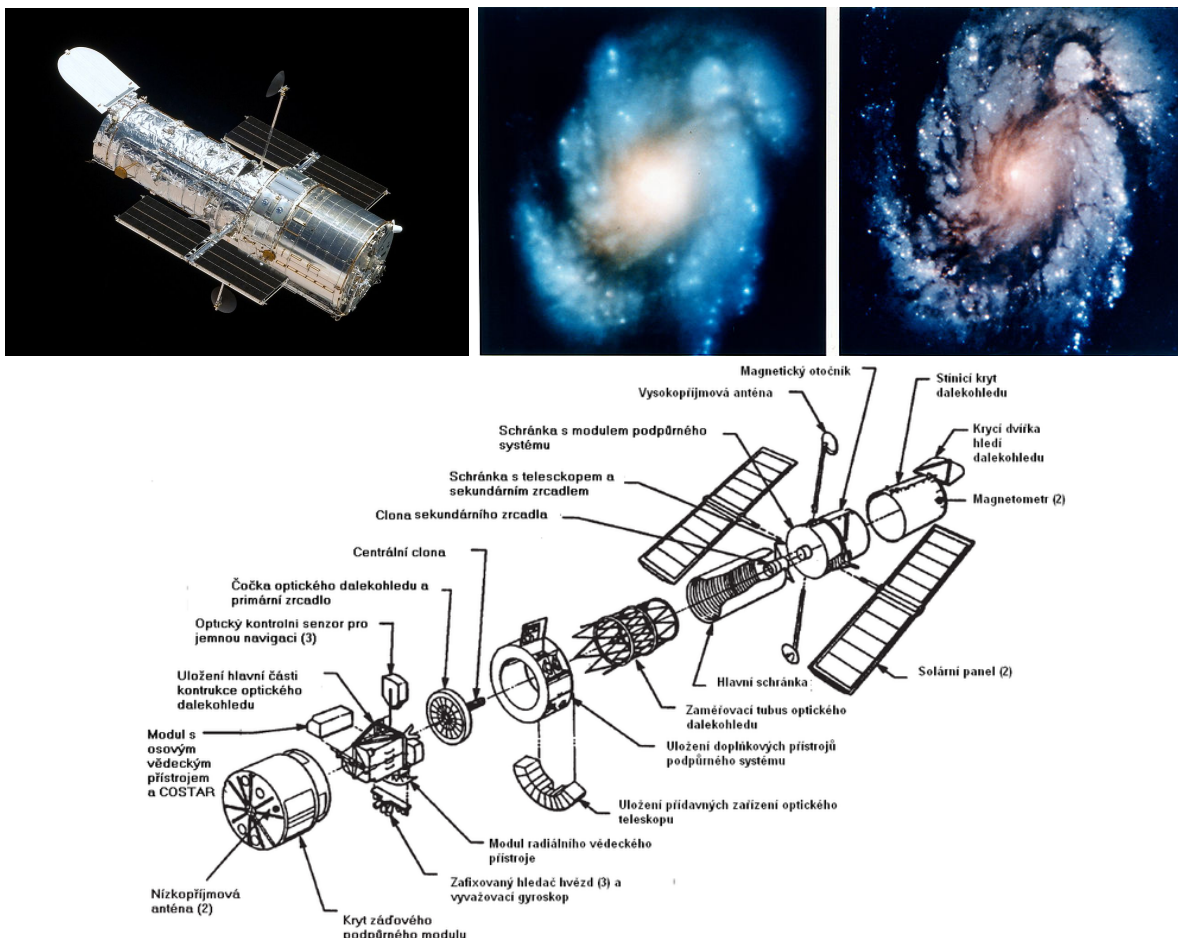
Název	Průměr [m]	Rok dokončení	Poznámka
Schválené projekty, ve výstavbě			
European Extremely Large Telescope	39.3 m		
Thirty Meter Telescope	30 m		
Giant Magellan Telescope	7x8.4 m zrcadel		= 24.5 m průměr
Large Synoptic Survey Telescope	8.4 m	(2015)	2015 první světlo
Pan-STARRS	4 x 1.8 m		1 už kompletní
Magdalena Ridge Observatory Telescope Array	10 x 1.4 m		
Advanced Technology Solar Telescope	4 m		
International Liquid Mirror Telescope	4 m		
HDRT	22m equiv.		
Plánované			
ALPACA telescope,	8 m		tekuté zrcadlo
Chinese Future Giant Telescope (CFGT)	30 m		
30m Ring Interferometric Telescope (RIT)	30m		Čína
Chinese Giant Solar Telescope (CGST)	ekviv. 8 m (5m)		Čína;IR a optický sluneční dalekohled

## 9.7 Kosmické observatoře

Pozemské observatoře mají své výhody i nevýhody. Ve srovnání s přístroji na družicích jsou dalekohledy srovnatelné velikosti podstatně levnější. Na druhou stranu je tu výrazné omezení působené zemskou atmosférou, která nám znemožňuje pozorovat v určitých oblastech spektra a v těch, kde nám pozorování umožní, nás doslova okrádá o část záření z vesmíru. Jedním z prvních, kdo si uvědomil výhody kosmické astronomické observatoře, byl Oberth (1923). Detailní rozbor možností připravil ale až Spitzer (1946). Ve svých návrzích pracoval s kosmickými dalekohledy o rozměrech 0,25 až 15 metrů a to v době, kdy lidstvo díky válečnému rozvoji raketové techniky jen nakouklo do kosmického prostoru při vrcholových fázích letu německých balistických raket V-2 ukořistěných po válce spojenci. Jedním z průkopníků v této oblasti byl R. Tousey, který 10. října 1946 zahájil éru kosmických pozorování astronomických objektů. Podařilo se mu získat ultrafialové spektrum Slunce spektrometrem umístěným v hlavici rakety V-2. Později, v šedesátých letech se Tousey v čele týmu zasloužil o sedm malých družic OSO (Orbiting Solar Observatory) pro výzkum Slunce. Ani Spitzer nezmizel ze scény, po nepochopení a výsměchu v poválečném období na své cíle nerezignoval. V roce 1958 navrhl pro NASA družicovou astronomickou observatoř OAO (Orbiting Astronomical Observatory) se zrcadlovým dalekohledem o průměru až 1,5 metru. Úspěšně nakonec pracovaly dvě OAO s dalekohledy o průměrech od 20 do 80 cm. Spitzer ale stále prosazoval realizaci velkého kosmického teleskopu. NASA o něm začala reálně uvažovat

<sup>22</sup>Ani tento projekt se neubráníl škrtům, původně zamýšlený teleskop měl mít průměr neuvěřitelných 100 metrů!





Obrázek 9.37: Hubbleův kosmický dalekohled. Základní data: tvar válce o délce 13 m, šířce 4,3 m a hmotnosti téměř 12 tun. Optický systém Ritchey-Chrétien (typ Cassegrain) s primárním zrcadlem 2,4 m, sekundárním zrcadlem 30 cm. Cena 1,5 mld dolarů. Na snímcích vpravo nahoře je možné srovnat obraz galaxie M100 před korekcí obrazu a po ní. Převzato z wikipedie.

v roce 1962. Průměr uvažovaného dalekohledu se zejména z finančních důvodů neustále zmenšoval, ale konečně byl projekt i za spoluúčasti Evropské kosmické agentury ESA v roce 1977 schválen. Dalekohled<sup>23</sup> o průměru primárního zrcadla 2,4 metru byl připraven k vypuštění v roce 1986. Havárie raketoplánu Challenger zpozdila vypuštění. Když se konečně v dubnu 1990 dostal Hubbleův kosmický dalekohled na oběžnou dráhu, ukázalo se, že hlavní zrcadlo bylo špatně vybroušeno s odchylkou několik tisíců milimetrů. Nepřesné vybroušení se podařilo korigovat zařízením COSTAR v roce 1993. Po několika opravách HST na oběžné dráze (poslední v roce 2009) by měl dalekohled pra-

<sup>23</sup>Dalekohled nejprve nesl označení LST – Large Space Telescope (Velký Kosmický Dalekohled), ale mnozí zkratku četli jako Lyman Spitzer Telescope. Proto se hledal jiný název a některé byly zajímavé. Například, pokud by dalekohled byl označen Velké Orbitální Zařízení, Great Orbital Device, pak by nad námi obíhal GOD („Bůh“). Nakonec byl zvolen název Hubble Space Telescope (HST), protože jeho hlavním úkolem mělo být upřesnění Hubbleovy konstanty.

covat nejméně do roku 2014. Jeho význam pro astronomii je zcela zásadní. Dokládá to i počet článků využívajících dat z HST v recenzovaných časopisech, který v roce 2011 překročil 10 000! Data i nádherné snímky jsou k dispozici na několika internetových serverech, například <http://www.nasa.gov/hubble/>, <http://hubble.nasa.gov/>, <http://hubblesite.org/>, <http://www.spacetelescope.org/>.

Nástupcem HST se má za několik let stát JWST (James Webb Space Telescope) se zrcadlem o velikosti 6,5 metru, který má pracovat zejména v oblasti dlouhovlnného infračerveného spektra. Nicméně kosmický výzkum nelze omezit jen na jeden nebo dva satelity. V uplynulých desetiletích bylo do vesmíru vysláno několik desítek astronomických družic. Mezi nejznámější patří astrometrická družice Hipparcos, případně fotometrické družice MOST, CoRoT či Kepler. Velkým projektem následujících let bude družice GAIA s dvěma zrcadly 1,45 m x 0,5 m. V týmu, který se připravuje na zpracování výsledků této družice, jsou i čeští astronomové.

Kosmické družice ale nejsou omezeny jen na optickou oblast, naopak. Pracují ve všech částech spektra elektromagnetického záření. Výběr těch nejvýznamnějších je uveden v tabulce 9.4.

## Doplňující literatura

- Boguszaková, J. 2003, Světlo, No. 4, online: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=23169](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=23169)
- Habel, J. 2005, Světlo, No. 5, str. 53
- Hearnshaw, J. B. 1996, The Measurement of Starlight: Two Centuries of Astronomical Photometry, Cambridge University Press
- Kleczek, J. 2002, Velká encyklopedie vesmíru, Academia Praha, 582 str.
- Mikulášek, Z., Pokorný, Z., 1993, Záludné otázky z astronomie, díl 2., Rovnost, Brno
- Oberth, H. 1923, v "Die Rakete zu den Planetenräumen" (Raketou k planetám)
- Spitzer, L. jr. 1946, Astronomical Advantages of Extra-terrestrial Observatories (Výhody mimozemské observatoře pro astronomii)
- Zajonc, I., 2009, Teleskopie, 11. díl, <http://www.astro.cz/clanek/tisk/3554>
- Zamarovský, P., 2009, Pokroky matematiky, fyziky a astronomie 54, č. 2, 94
- Zejda, M., a kol. 1994, Pozorování proměnných hvězd I, HaP MK Brno

Tabulka 9.4: Přehled nejvýznamnějších astronomických družic

Název	Vzlet	Stát/organizace	Obor záření
Ariel 1	26. 4. 1962	Velká Británie	X U
Ariel 2	27. 3. 1964	Velká Británie	R
Explorer 38/RAE-1	4. 7. 1968	USA	R
OAO-2	7. 12. 1968	USA	U
Interkosmos 1	14. 10. 1969	Interkosmos (ČSSR)	X U
Explorer 42/Uhuru/SAS-1	19. 12. 1970	USA	X
TD-1A	12. 3. 1972	ESA	G X U
OAO-3	21. 8. 1972	USA, Velká Británie	X U
Explorer 48/SAS-2	15. 11. 1972	USA	G
Explorer 49/RAE-2	10. 6. 1973	USA	R
HEAO-1	12. 8. 1977	USA	G
IUE	26. 1. 1978	USA, ESA	U
HEAO-2	13. 11. 1978	USA	X
Hakucho	21. 2. 1979	Japonsko	X
HEAO-3	20. 9. 1979	USA	G
Tenma	20. 2. 1981	Japonsko	X
Astron-1	23. 3. 1983	SSSR	U
Exosat	26. 8. 1983	ESA	X
IRAS	26. 1. 1986	USA, Nizozemsko	I
Ginga	5. 2. 1987	Japonsko	X
Hipparcos	8. 8. 1989	ESA	V
COBE	18. 11. 1989	USA	M
Granat	1. 12. 1989	SSSR	G
CGRO	5. 4. 1990	USA	G
HST	24. 4. 1990	USA	U V I
Rosat	1. 6. 1990	Německo	X
Gamma	11. 7. 1990	SSSR	G
SARA	17. 7. 1991	Francie	R
EUVE	6. 2. 1992	USA	U
Eureca	31. 7. 1992	ESA	X
Asuka	20. 2. 1993	Japonsko	X
Alexis	25. 5. 1993	USA	X
IRTS-SFU	18. 3. 1995	Japonsko	I
ISO	17. 11. 1995	ESA	I
SOHO	2. 12. 1995	USA, ESA	U V
RXTE	30. 12. 1995	USA	X
BeppoSAX	30. 4. 1996	Itálie	X
SWAS	5. 12. 1998	USA	M
WIRE	4. 3. 1999	USA	I
FUSE	24. 6. 1999	USA	U
Chandra	23. 7. 1999	USA	X
Newton XMM	10. 12. 1999	ESA	X
HETE-2	9. 10. 2000	USA	G X
WMAP	30. 6. 2001	USA	M
Hinode	22. 9. 2002	Japonsko	X U V
Integral	17. 10. 2002	Rusko, ESA	G
CHIPSat	12. 1. 2003	USA	U
GALEX	28. 4. 2003	USA	U
MOST	30. 6. 2003	Kanada	U V
Spitzer	25. 8. 2003	USA	I
Swift	20. 11. 2004	USA	G X U V
Suzaku	10. 7. 2005	Japonsko	X
Akari	21. 2. 2006	Japonsko	I
CoRoT	27. 12. 2006	Francie	U V
Kepler	7. 3. 2009	USA	V
Herschel	14. 5. 2009	ESA	I
Planck	14. 5. 2009	ESA	R

Poznámky: Spektrální obory: G – gama záření; X – rentgenové (X) záření; - U – ultrafialové záření; V – viditelné záření, I – infračervené záření+ M – mikrovlnné záření; R – rádiové záření. Tabulka byla převzata z <http://technet.idnes.cz> a upravena.

## 10 Neoptická astronomie

V kapitole o zdrojích našich informací o okolním vesmíru jsme připomněli, že kromě tradiční optické části elektromagnetického spektra můžeme využívat pro studium vesmíru i další části spektra jako infračervenou, rádiovou, ultrafialovou, rentgenovou, případně oblast záření gama. Ale nejen to. Významnou roli hraje i částicová astrofyzika a její detektory, například detektory neutrin, kosmického záření nebo také detekce gravitačních vln. V této kapitole se zaměříme právě na tuto neoptickou astronomii. Protože pro většinu oblastí elektromagnetického spektra kromě části optické, je atmosféra hůře prostopustná nebo neprostopustná, je rozvoj neoptické astronomie spojen ve značné míře s rozvojem kosmonautiky a vypouštěním speciálních kosmických astronomických observatoří.

Tabulka 10.1: Oblasti spektra elektromagnetického záření.

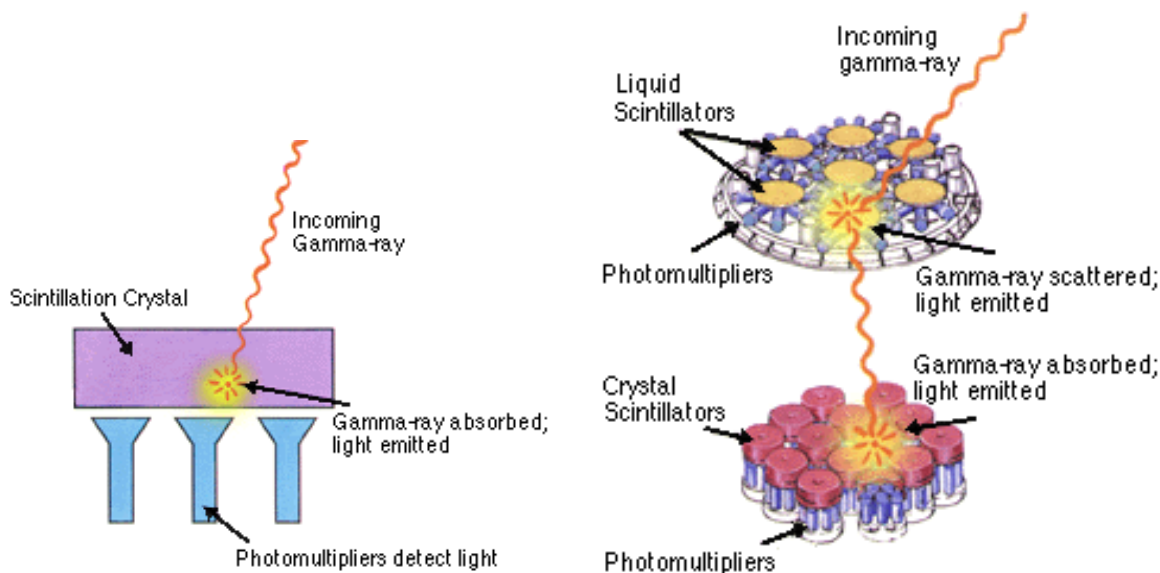
Gama	< 0,01 nm
Rentgenová	0,01 nm – 50 nm
Ultrafialová	50 nm – 380 nm
Optická	380 nm – 760 nm
Infračervená	760 nm – 0,3 mm
Mikrovlnná	0,3 mm – 1 m
Rádiová	1m – 100 km

### 10.1 Astronomie gama záření

Počátky astronomie gama záření spadají do šedesátých let minulého století. První vysokoenergetické fotony gama záření byly registrovány zařízením pro jejich detekci na palubě družice Explorer 11 v roce 1961. V 60. a 70. letech minulého století vrcholila studená válka mezi světovými mocnostmi a tak se do vesmíru vysílaly družice, které měly pomocí detektorů gama záření monitorovat pokusné jaderné výbuchy na zemi. To byl případ i družic Vela. Ukázalo se však, že zaznamenávají mnohem častěji záblesk záření gama pocházející z vesmíru než ze zemského povrchu. Tak byly odhaleny zcela nové jevy jako gama záblesky<sup>1</sup>, o jejichž povaze se vedou spory dodnes. Jisté však je, že takové výrony vysoce energetických částic doprovázejí největší kataklyzmata ve vesmíru jako výbuch supernov, hypernov, vznik černých děr, pád hmoty do černé díry, splynutí neutronových hvězd, reakce hmoty s antihmotou a podobně. Pro pochopení těchto jevů je nezbytné mít k dispozici dostatek pozorovacích dat. Proto bylo do kosmu na přelomu 20. a 21. století vysláno několik gama observatoří, například CGRO (Compton Gamma-Ray Observatory), BeppoSAX (1996), INTEGRAL (2002), Swift (2004), GLAST a další.

Protože gama fotony mají mnohonásobně vyšší energii než fotony světla, je jejich samotné pozorování nebo chcete-li detekce složitý proces. Můžeme je registrovat

<sup>1</sup>V literatuře se setkáte také se zkráceným označením GRB vycházejícím z anglického gamma ray burst.

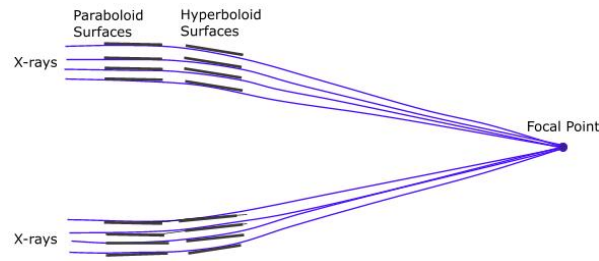


Obrázek 10.1: Scintillator Image. Diagram of a Compton Scatter Telescope. Převzato z [http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/how\\_11/gamma\\_detectors.html](http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/how_11/gamma_detectors.html).

prostřednictvím efektů, které způsobí při dopadu na vhodně zvolenou látku. Přitom paleta těchto efektů je docela široká. Foton gama záření s energiemi v rozmezí 100 keV až 10 MeV může při srážce s elektronem způsobit fotoelektrický jev, Comptonův rozptyl nebo fotoionizaci posunutím elektronu na vyšší energetickou hladinu. Výsledkem je světelný záblesk, který lze monitorovat scintilačním detektorem (viz obrázek 10.1 vlevo). Při vyšších energiích dopadajícího fotonu gama záření (až přibližně do 10 GeV) dochází k transformaci energie a k vytvoření páru elektron-positron. Takový efekt je možno zachytit v tzv. jiskrové komoře (viz obrázek 10.1 vpravo) a s rozlišovací schopností zhruba  $1^\circ$  lze určit i polohu zdroje záření. Pro detekci fotonů gama záření s nejvyššími energiemi lze využít i optické dalekohledy. Takové fotony vytvoří vysoko nad zemí v atmosféře dvojici elektron-positron s vysokou energií. Ta stačí při jejich průchodu atmosférou na vznik elektromagnetické spršky, v níž se střídá emise sekundárních fotonů gama záření a materializace. Celý proces je doprovázen vznikem Čerenkovova záření, které lze v noci zachytit optickými dalekohledy jako světelný záblesk. Specializovaných observatoří a optických dalekohledů na taková pozorování je celá řada, například H.E.S.S., VERITAS, MAGIC, CANGAROO III nebo HEGRA.

## 10.2 Rentgenová astronomie

Objev paprsků X, jak se rentgenovému záření také říká, sice spadá do konce 19. století. V análech dějin fyziky se uvádí rok 1895 a objevitel W. C. Röntgen. Počátky rentgenové astronomie jsou ale tamtéž popsány až po druhé světové válce. Zemská atmosféra rentgenové záření vesmírných zdrojů v rozmezí vlnových délek 8 nm až 8 pm, frekvencí od přibližně 50 PHz do 50 EHz a energií zhruba 0,12 až 120 keV vůbec ne-



Obrázek 10.2: Schéma rentgenového dalekohledu Wolterovy konstrukce. Rentgenové záření fokusováno pomocí několika sousedních rotačních parabolických a hyperbolických ploch vložených do sebe. Převzato z <http://ixo.gsfc.nasa.gov/images/science>.

propouští.<sup>23</sup> Měření v rentgenovém oboru spektra je tak nutné provádět ve vysokých hladinách zemské atmosféry, ale nejlépe až nad ní v kosmickém prostoru.

První rentgenová pozorování vesmíru využívala vrcholu trajektorie raket, ale pozorování trvalo jen několik minut. K vynesení detektorů (Geigerových-Müllerových počítaců) do vyšších vrstev atmosféry se využívalo i atmosférických balónů. Při podobných experimentech bylo možné zjišťovat jen intenzitu přicházejícího rentgenového záření. Pro získání přesnějších údajů byl zkonstruován rentgenový dalekohled. Jeho konstrukce je dosti náročná, protože rentgenové paprsky se téměř nelámou a odráží se jen pod úhlem dopadu větším než  $85^\circ$ . Odrážné plochy jsou proto opatřeny tenkou vrstvou kovu s vysokou elektronovou hustotou jako nikl, zlato, platina nebo iridium. Hladkost jejich povrchu je 1 nm. Prakticky u všech rentgenových dalekohledů se používá Wolterovy konstrukce (viz obrázek 10.2). I když se nám ale podaří rentgenové záření soustředit na malou plošku, není možné jej podobně jako u gama záření detekovat přímo. Do ohniska rentgenového dalekohledu se umístí luminiscenční destička a za ni CCD kamera, která pozoruje světélkování desky po dopadu částic rentgenového záření.

V posledních desetiletích byla vypuštěna řada úspěšných rentgenových družic jako například Uhuru, ROSAT, INTEGRAL, Chandra nebo XMM Newton. Jejich dalekohledy zkoumaly celou škálu zdrojů rentgenové záření, od našeho Slunce, rentgenových dvojhvězd až vzdálené rentgenové galaxie, aktivní galaktická jádra, kvasary nebo kupy galaxií a další. O těchto objektech bude pojednáno později.

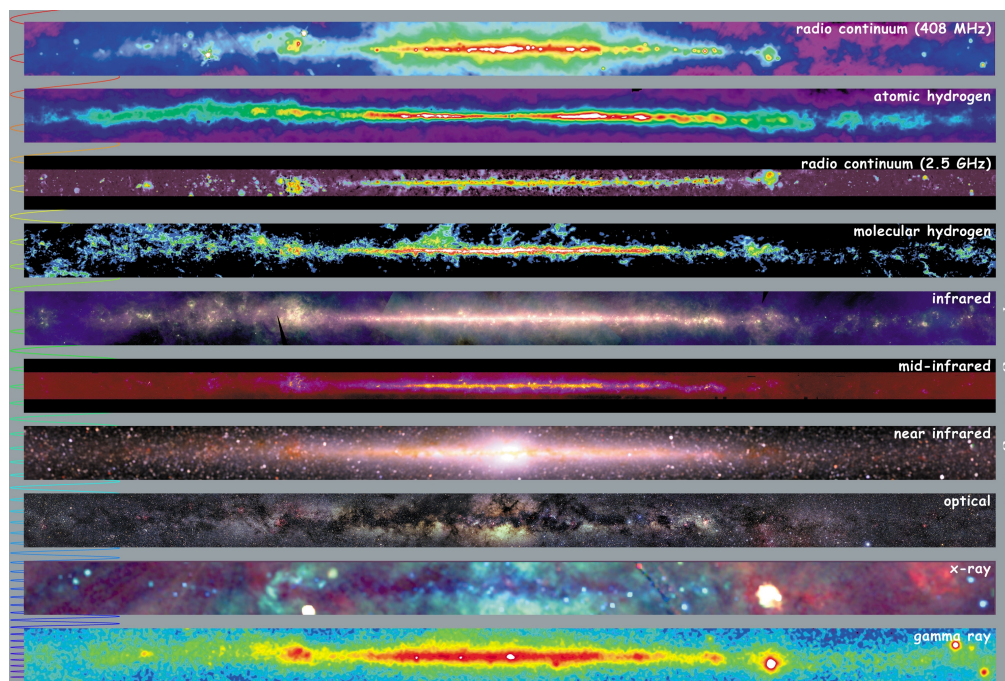
<sup>22</sup>Rentgenové záření mezi 10 nm až 0.1 nm (kolem 0,12 až 12 keV) označujeme jako měkké (v angličtině soft X-rays) a v intervalu 0.1 nm až 0.01 nm (od zhruba 12 do 120 keV) jako tvrdé rentgenové záření (hard X-rays).

<sup>23</sup>Rentgenové záření je v elektromagnetickém spektru vymezeno ultrafialovým zářením a na straně vyšších energií gama zářením. Právě hranice mezi rentgenovým a gama zářením byla nedávno nově definována. Ve starších publikacích knihách se jako hranice mezi nimi uvádí vlnová délka  $10^{-11}$  m. Objevy nových zdrojů rentgenového a gama záření ale vedly k precizaci definice. Nově rozlišujeme tyto druhy záření podle jejich původu. Zatímco zdrojem gama záření je jádro, rentgenové paprsky jsou vyzařovány elektrony mimo jádro.

## 10.3 Ultrafialová astronomie

Astronomie využívající oblast elektromagnetického záření přibližně mezi 10 až 320 nm se označuje jako ultrafialová. V blízké UV oblasti je sice možné pozorovat i z pozemských vysokohorských observatoří, případně využít balóny, ale těžiště práce leží na družicových observatořích. Pomineme-li počáteční krátkodobé experimenty, pak skutečným tahounem této oblasti astronomie byla družice IUE (International Ultraviolet Explorer), která byla aktivní na oběžné dráze v letech 1978-1996. Z pozdějších významných zdrojů UV dat jmenujme EUVE (Extreme Ultraviolet Explorer), přístroje HST nebo družice FUSE či GALEX.

Ultrafialová astronomie je velmi důležitá součást zkoumání vesmíru. Většina hvězd jsou relativně chladné objekty, které nejvíce září v optické části spektra. V UV oblasti se nejvíce projevují horké mladé nebo naopak staré hvězdy. Rozborem UV pozorování můžeme zjišťovat chemické složení, hustoty a teploty těchto objektů (respektive jejich povrchových vrstev), mezihvězdného materiálu, ale také získávat informace o vývoji naší i dalších galaxií.



Obrázek 10.3: Snímky pásu Mléčné dráhy (části hvězdné oblohy do vzdálenosti  $10^\circ$  od roviny Galaxie) v různých oblastech spektra elektromagnetického záření. Zdroj: NASA.

## 10.4 Infračervená astronomie

Infračervená astronomie využívá dvou faktů. Infračervená oblast spektra (v intervalu 0.75 až 300 mikrometrů) sousedí s optickou oblastí, takže je možné v principu pro pozorování využívat i optické dalekohledy. Zemská atmosféra navíc propouští v několika

oknech infračervené záření, takže je možné pozorovat v této oblasti spektra i na zemském povrchu. Ale věc není tak snadná, jak by se mohla zdát. Dostatečně citlivý detektor infračerveného záření pro sledování hvězd se podařilo vyvinout až počátkem 20. století. Skutečné počátky praktické infračervené astronomie ale spadají až do prvních let po druhé světové válce. Kromě jiných těžkostí je totiž nezbytné se vyrovnat s požadavkem na dostatečné chlazení měřící aparatury, aby její vlastní teplo nepůsobilo při měření rušivě. Na druhou stranu je možné pro infračervená pozorování v blízké IR oblasti použít stejné dalekohledy jako pro pozorování v optické oblasti spektra. Pro vzdálenější infračervenou oblast spektra se pak používají speciální dalekohledy (jako například James Clerk Maxwell Telescope na Mauna Kea na Havaji).

Obecně pro infračervená pozorování platí, že je nutné odstěhovat příslušné dalekohledy na vysoko položená místa s malou relativní vlhkostí nebo je umístit na palubu družic. Při pozemských pozorováních totiž vadí vodní pára v zemské atmosféře i samotná atmosféra, která v infračervené oblasti také vyzařuje. Mezi nejlepší místa pro infračervenou astronomii tak patří například Mauna Kea Observatory (4205 m n. m.), ALMA (5000 m n.m.) v chilské poušti Atacama či observatoře v Antarktidě. Dnes už existují i významné přehlídkové projekty v infračervené oblasti spektra, jako například 2MASS<sup>4</sup>.

Z kosmických projektů infračervené astronomie jmenujme alespoň družice IRAS, ISO nebo AKARI a satelity a přístroje nové generace jako HST/NICMOS, SIRTf (Space Infrared Telescope Facility), dnes Spitzer Space Telescope, NGST (Next Generation Space Telescope) a nejnověji Herschel Space Observatory s dosud největším zrcadlem ve vesmíru o průměru 3.5 metru.

Infračervené observatoře se zaměřují na studium chladnějších vesmírných objektů. Družice IRAS například detekovala v okolí ekliptiky meziplanetární prach, který odráží infračervené záření Slunce. Studují se ale i prachové disky v okolí hvězd, plynoprachová mračna v oblastech vzniku hvězd a další. Studium těchto útvarů v infračervené oblasti spektra je možné zkoumat vznik a vývoj hvězd, vznik planetárních soustav, strukturu a evoluci galaxií, včetně té naší. Zaměříme-li se na objekty Sluneční soustavy, je možné určovat chemické složení atmosfér a povrchů těles Sluneční soustavy, včetně planet, komet a měsíců planet. Důležitou součástí výzkumu je i studium složení a chemie vesmíru. V létě roku 2011 například družice Herschel definitivně potvrdila výskyt molekul kyslíku ve vesmíru. Na podzim téhož roku byly oznámeny dva významné objevy satelitu Herschel. V kometě Hartley 2 se naměřilo velké množství deuteria, které podporuje myšlenku, že většina vody se na Zemi dostala prostřednictvím komet (Cowen, 2011). Tuto teorii podpořil vzápětí i další důležitý objev významného množství chladných vodních par v akrečních discích mladých hvězd, které mohou pomoci při vzniku komet - nositelé vody vnitřním planetám planetárních soustav (HSO, 2011).

---

<sup>4</sup>Přehlídka *Two Micron All Sky Survey* využívá dva robotické dalekohledy - jeden na Mt. Hopkins, USA a druhý na CTIO, Chile. Oba pozorují ve filtrech *J* (1.25  $\mu\text{m}$ ), *H* (1.65  $\mu\text{m}$ ) a *Ks* (2.17  $\mu\text{m}$ ). Bližší informace a data lze nalézt na <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/>



## 10.5 Radioastronomie

Nejvýznamnější oblastí neoptické astronomie je radioastronomie. Tuto kapitolu astronomie otevřel v roce 1931 americký fyzik českého původu Karl Guthe Jansky vlastně náhodou. Původně hledal pro firmu Bell možné zdroje rádiových poruch. Odhalil ale rádiové signály přicházející ze středu naší Galaxie, od zdroje dnes označovaného jako Sgr A. První parabolickou anténu sestrojil v roce 1937 amatérský zájemce o astronomii a rádio Američan Grote Reber. Velký rozvoj rádiové techniky je spojen s obdobím druhé světové války. Po ní se začaly rozvíjet i astronomické aplikace.

Velkou výhodou radioastronomie je její nezávislost na počasí a denní či noční době. Naproti tomu výsledek měření je třeba nejdříve vizualizovat, nevidíme jej přímo jako třeba v optické astronomii. Podle způsobu využití rádiových vln můžeme radioastronomii rozdělit na:

- pasivní, která jen analyzuje pasivně přijímané rádiové vlny z vesmíru. Tímto způsobem lze studovat jak tělesa Sluneční soustavy (např. Slunce, Jupiter), tak i hvězdy, dvojhvězdy, mlhoviny, zbytky supernov, planetární mlhoviny, molekulová oblaka nebo galaxie, galaktická jádra i vzdálené kvazary.
- aktivní (radarová astronomie). Rádiový signál nejprve vyšle směrem ke studovanému objektu a po odrazu od cíle jej přijímá a analyzuje. Takový postup je ale velmi silně omezen na Zemi a její nejbližší okolí, takže mezi studovanými objekty jsou polární záře, meteory, zemská atmosféra, přesněji zemská ionosféra, Slunce, Měsíc, Merkur, Venuše nebo blízké planety.

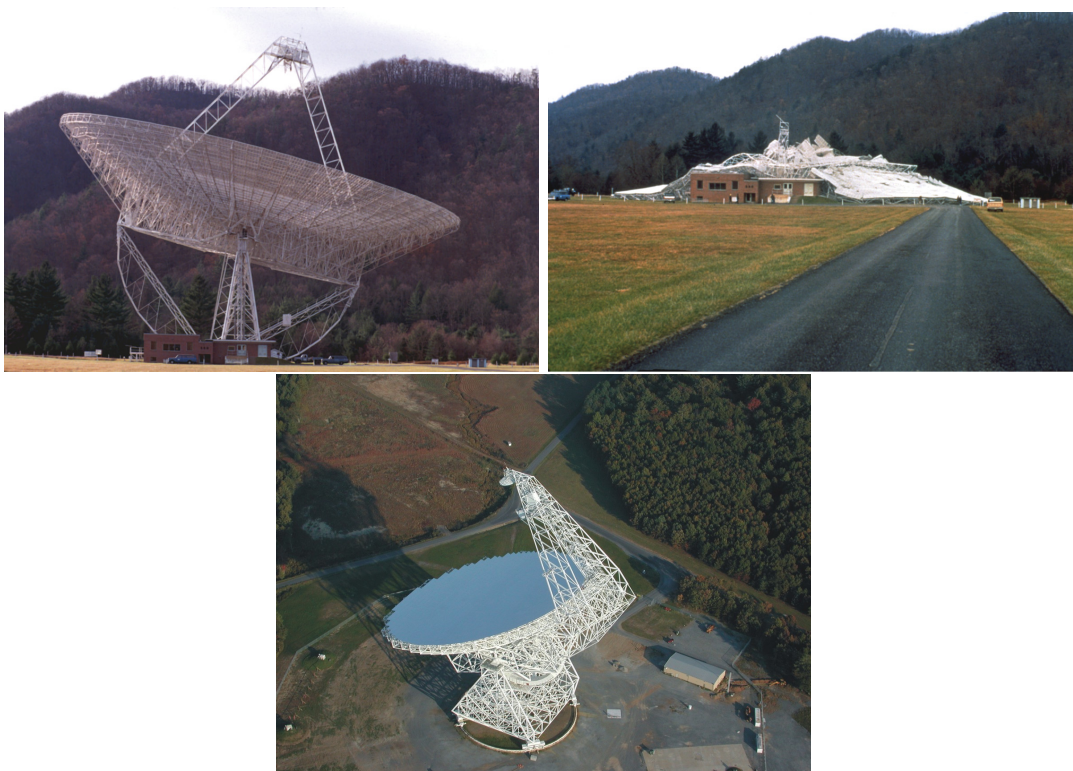
Základními přístroji jsou radioteleskopy, rádiové interferometry, spektrografy a radary. Rozlišovací schopnost radioteleskopů je dána vztahem (10.1).

$$\sin \delta = \frac{1.220\lambda}{D}, \quad (10.1)$$

kde  $\delta$  je v radiánech. Vezmeme-li v úvahu, že vlnová délka rádiového záření propouštěného zemskou atmosférou jsou řádově metry, je možné vyrobit i velké radioteleskopy. Zpravidla se vyžaduje, aby odchytky anténní plochy od ideálního tvaru nepřesáhly desetinu vlnové délky přijímaného záření. Proto zde stačí i jen centimetrová přesnost. Největší plně pohyblivé radioteleskopy jsou Robert C. Byrd Green Bank Telescope<sup>5</sup> (součást National Radio Astronomy Observatory, USA) s anténou 100 × 110 metrů a 100metrový radioteleskop v Effelsbergu (Německo). Největší nepohyblivá celistvá anténa má průměr 305 metrů a nachází se v Arecibu na Portoriku. Ve výstavbě je ale radioteleskop FAST na jihovýchodě Číny, který má mít průměr 500 metrů. Největší samostatný radioteleskop světa RATAN 600 o průměru 576 m pracuje v Rusku. Je ale sestaven z 895 panelů po obvodu kruhu, takže efektivně odpovídá rozměru radioteleskopu v Arecibu.

V roce 1946 vyvinuli Martin Ryle, Joseph Lade Pawsey a Ruby Payne-Scottová rádiovou interferometrii. Její princip spočívá ve složení signálu detekovaného ve stejném čase různými anténami s cílem zvýšit úhlové rozlišení. Rádiové interferometry přitom mohou sestávat z různých antén. Mohou to být soustavy klasických parabolických antén

<sup>5</sup>Tento radioteleskop nahradil předchozí 90m anténu, která se vlastní vahou zborčila 15.11.1988.



Obrázek 10.4: Nahoře: Původní velký radioteleskop v NRAO, Green Bank, 15. listopadu 1988 a vpravo následující den, po zhroucení. Dole: Zničený radioteleskop nahradil Robert C. Byrd Green Bank Telescope. Foto: Richard Porcas, NRAO.

jako například One-Mile Telescope na MRAO (Mullard Radio Astronomy Observatory) v Cambridge nebo se jedná o pole jednorozměrných antén jako je Molonglo Observatory Synthesis Telescope v Austrálii nebo dvojrozměrné pole nesměrových dipólů podobné těm, pomocí nichž byly v Cambridge objeveny pulsary.

Rozlišovací schopnost celé sestavy interferometru je stejná, jakou by měla jediná anténa s průměrem shodným se vzdáleností dílčích antén.

Největší radiové interferometry

VLA (Very Large Array v Novém Mexiku, USA) - 27 antén, každá o průměru 25 metrů (Y ramena o délce 21 km), maximální délka základny 36 km,

VLBA (Very Long Baseline Array) - 10 teleskopů o průměru 25 m, základna až 8611 km!,

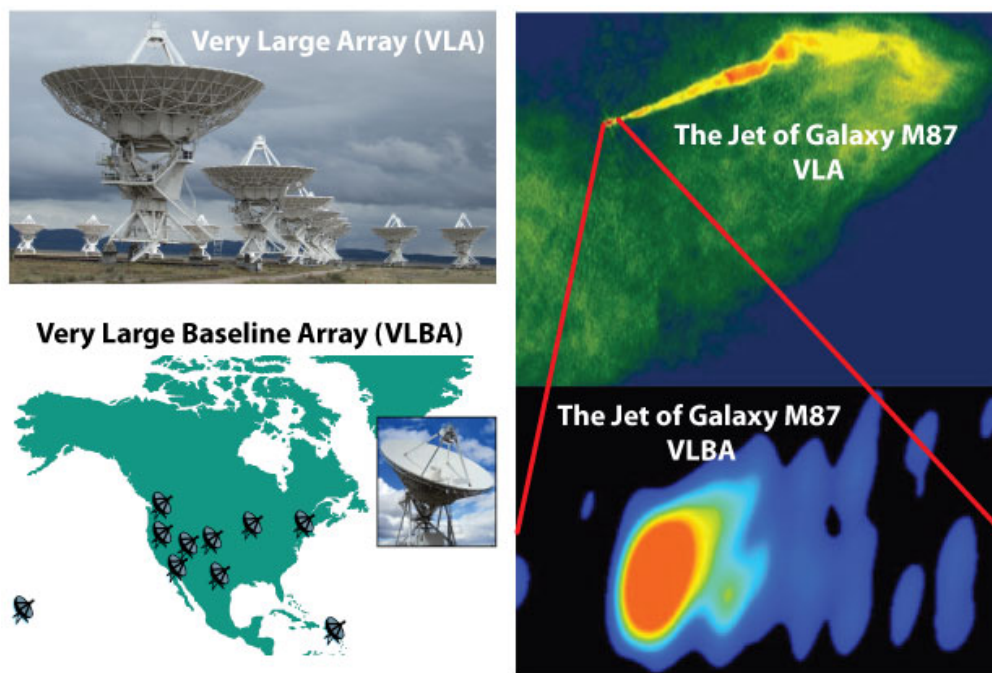
VLBI (Very Long Base Interferometry) - propojení různých radioteleskopů a jejich soustav po světě a dokonce i na družicích,

ALMA (Atacama Large Millimeter Array) - 66 antén o průměru 12 m a 7 m; největší astronomický projekt současnosti. V částečném provozu od roku 2010, inaugurace v březnu 2013.

Square Kilometre Array (SKA) - v květnu 2012 byl schválen ambiciózní projekt největšího projektu rádiové astronomie v historii. Soustavy antén v Jižní Africe, Austrálii a na Novém Zélandu mají být plně funkční v roce 2024.



Obrázek 10.5: Vlevo: Radioteleskop v Arecibu. Zdroj: <http://www.naic.edu>. Vpravo Ruský radioteleskop RATAN 600. Zdroj: <http://space-memorial.narod.ru/astro2/kajdanovskij.html>



Obrázek 10.6: Radioteleskopy použité v interferometrické soustavě VLA, respektive VLBA s porovnáním výsledků, rozlišení při pozorování výtrysku z galaxie M87. Zdroj: <http://www.erau.edu/>.

## 10.6 Částicová astronomie

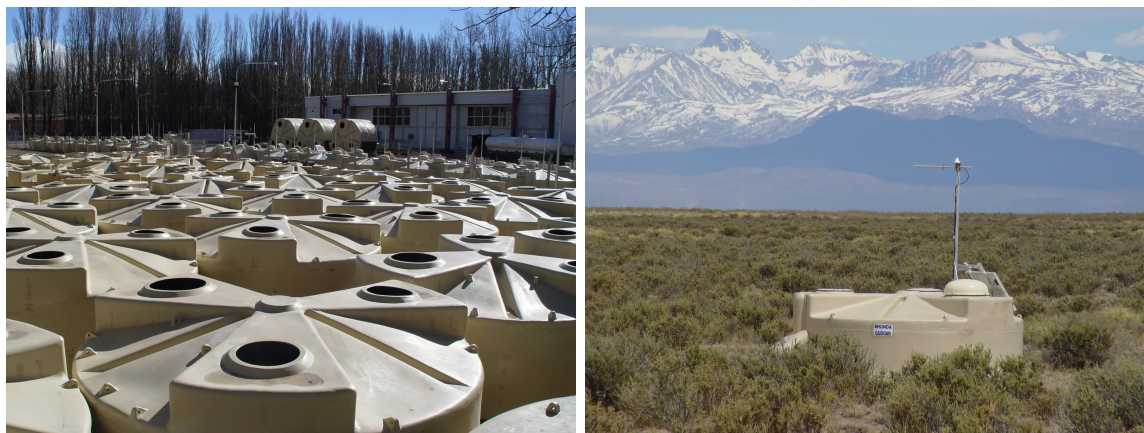
Odvětví astronomie a astrofyziky zabývající se částicemi, respektive informacemi, které nám z vesmíru přinášejí proudy částic, je relativně nová disciplína. Do začátku 50.

let 20. století bylo takovým zásadním zdrojem informací kosmické záření, tedy proud nabitých částic s vysokou energií přicházejících z hlubin vesmíru. S postupným rozvojem detekčních metod se rozšiřovalo i spektrum částic, které jsme schopni detekovat. Dnes se částicová astrofyzika věnuje nejen kosmickému záření, ale také neutrinům nebo částicím  $\gamma$  záření, případně detekci gravitačních vln.

Všechny případy si ale vyžádaly nové přístupy a konstrukce nových typů detektorů. Pozemní observatoře, detektory, antény se většinou přesunuly do hlubin země a rozměry se podstatně zvětšily, aby byly schopné detekovat i velmi slabé signály jako v případě gravitačních vln nebo velmi malý počet částic (neutrin či částic s velmi vysokou energií).

### 10.6.1 Kosmické záření

Jak už jsme uvedli v kapitole 6, je původ kosmického záření zatím nejasný. Tím spíše mají vědci zájem na detekci těchto částic a studiu jejich vlastností. Největším projektem je v tomto smyslu mezinárodní Observatoř Pierra Augera budovaná v Argentině. Observatoř má být schopna detekovat částice kosmického záření s ultravysokou energií nad  $10^{20}$  eV<sup>6</sup>. Podle teoretických předpokladů má dopadnout jedna taková částice na  $1 \text{ km}^2$  za jedno století. Proto jsou detektory Observatoře Pierra Augera rozmístěny na ploše větší než  $3000 \text{ km}^2$ . 1600 tanků s vodou slouží jako detektory Čerenkovova záření, které vzniká při průchodu vysoce energetické částice vodou. Na observatoři jsou dále speciální fluorescenční dalekohledy, radioteleskopy. Část získaných dat je okamžitě k dispozici všem zájemcům na adrese <http://auger.colostate.edu/ED/>.



Obrázek 10.7: Observatoř Pierra Augera. Vlevo: Tanky na vodu při přípravě. Vpravo: Jeden z tanků na vodu už zapuštěný do země a připravený k činnosti. Zdroj: <http://www.auger.org>.

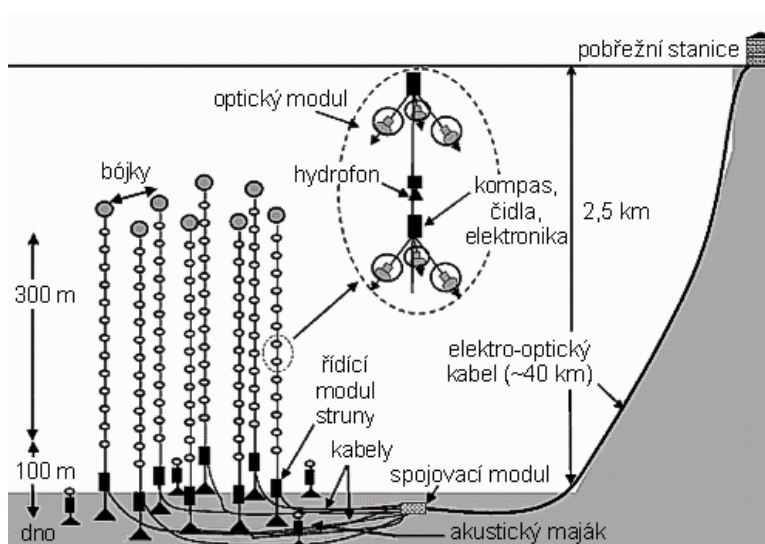
### 10.6.2 Neutrinová astronomie

O profilu neutrin jsme se stručně zmínili v kapitole 6. Vzhledem k jejich vlastnostem je jejich detekce a studium velice obtížné. Kosmickými zdroji neutrin, jejich šířením kos-

<sup>6</sup>Pro srovnání jde o energii, jakou má tenisový míček při rychlosti 80 km/h.

mickým prostředím a možnostmi detekce se zabývá neutrinová astronomie. Přes svou velkou náročnost se ale nepochybně vyplatí, protože nám na rozdíl od jiných metod umožní nahlédnout doslova do hvězdné kuchyně, až do hlubokého nitra hvězd. Existenci neutrina předpověděl Wolfgang Pauli roku 1931, ale experimentálně se jej podařilo prokázat až o čtvrt století později (Cowan et al., 1956).

Později byly prokázány odlišné formy neutrin – elektronové, mionové a tauonové. Poslední až na počátku tohoto tisíciletí. Problémem je totiž jejich velmi malý průřez. Prakticky bez odporu prochází látkou. Podle různých odhadů projde naším tělem za dobu života až  $10^{24}$  slunečních neutrin, z nichž jsou zachycena jen jedno nebo dvě neutrina. Dosud jediná potvrzená mimozemská neutrina pochází ze Slunce a supernovy SN1987A.



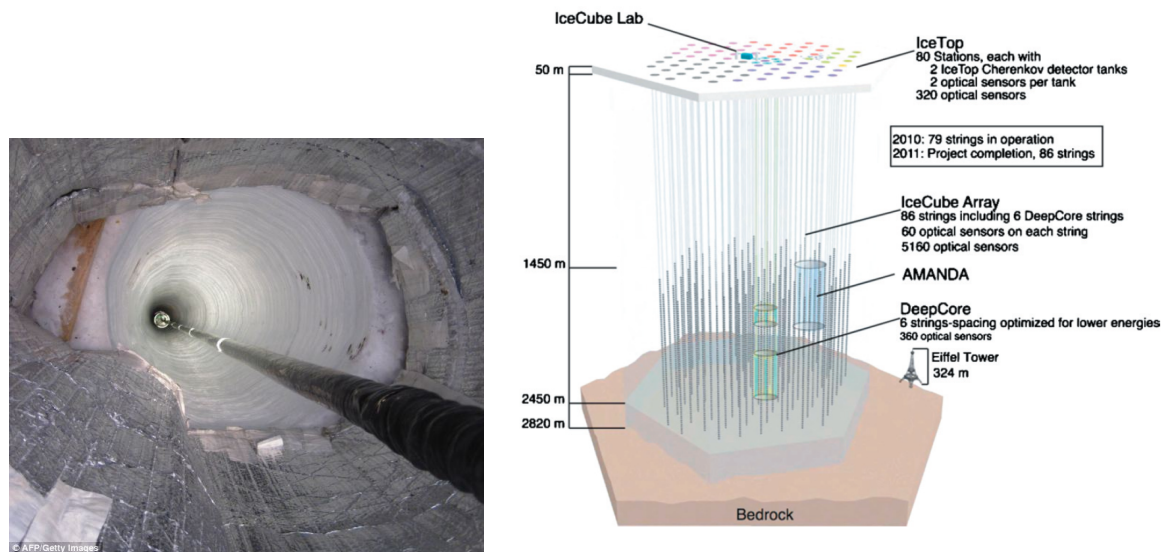
Obrázek 10.8: Schéma neutrinového vodního detektoru projektu ANTARES. Převzato z <http://www.aldebaran.cz>.

K jejich detekci se využívá toho, že velmi slabě interagují s některými látkami a přitom vzniká Čerenkovovo záření, které následně detekujeme. Nejznámější a nejstarší jsou observatoře Sudbury Neutrino Observatory v Kanadě a japonský projekt Superkamiokande. Kanadský projekt<sup>7</sup> využívá nádrž s jednou kilotunou těžké vody v hloubce 2 kilometry pod zemí. Japonci v projektu Superkamiokande<sup>8</sup> používají v jednom kilometru pod zemí nádrž s průměrem 41 metrů obsahující 50 kilotun superčisté vody. Stěny nádrže jsou pokryty 11 146 fotonásobiči. Na přelomu 80. a 90. let minulého století byly spuštěny experimenty využívající jako detekční tekutiny gálium. Jedná se o projekt Sovětsko-Americký Galiový Experiment SAGE umístěný v Rusku a evropský GALLEX v Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) v Itálii. V posledních letech bylo spuštěno několik projektů, které využívají přirozené nádrže. V rámci podmořských experimentů jako ANTARES, DUMAND, NESTOR, NEMO se do hloubky až několika kilometrů umístí na lanech řetězce senzorů (viz obrázek 10.8), které zaznamenávají případnou reakci

<sup>7</sup><http://www.sno.phy.queensu.ca/>

<sup>8</sup><http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html>

neutrino s prostředím. Připravuje se ambiciózní projekt KM3NeT. Senzory v něm budou ve Středozemním moři rozmístěny v objemu  $1 \text{ km}^3$ . Na podobném principu jsou založeny i projekty AMANDA nebo The IceCube Neutrino Observatory (prostě „Ledová kostka“ IceCube). Do antarktického ledu je vyhloubena série děr, do nichž jsou až do hloubky 2450 metrů umístěny fotonásobiče.



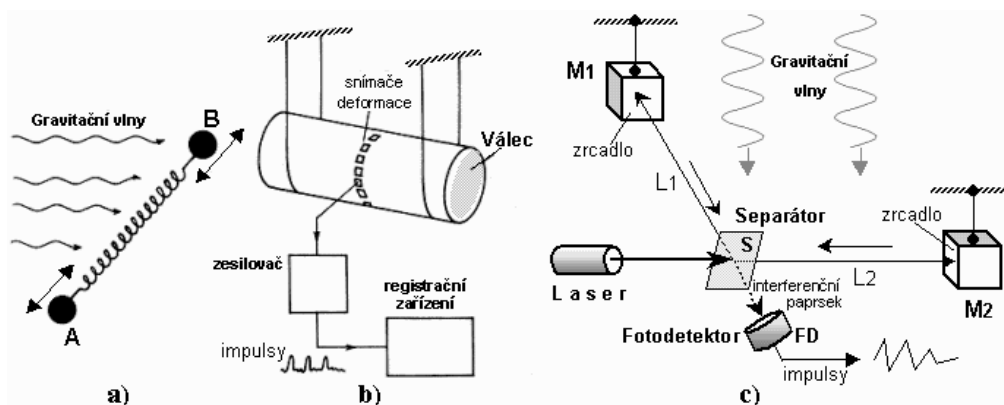
Obrázek 10.9: Vlevo: Vkládání řetězce detektorů do jednoho z otvorů v ledu v poli IceCube poblíž základny na jižním pólu. Vpravo: Schéma pole detektorů IceCube. Převzato z <http://www.dailymail.co.uk>.

### 10.6.3 Gravitační vlny

Astronomie gravitačních vln se snaží zachytit gravitační vlny. Jejich existenci předpověděl Albert Einstein v obecné teorii relativity. Velmi zjednodušeně řečeno má jít o chvilkové deformace prostoročasu v důsledku rychlých změn gravitačního pole. Tímto způsobem by se tedy měly projevovat děje probíhající u neutronových hvězd, černých děr, při výbuchu supernovy nebo hypernovy či krátce po velkém třesku.

Gravitační vlny byly zatím potvrzeny jen nepřímou. Interpretovalo se tak zkracování oběžné doby binárních pulsarů, například PSR 1913+16. V roce 1972 ohlásil J. Weber úspěšnou detekci gravitačních vln, ale jeho výsledky byly rozporuplné a nebyly přijaty (více například v Ullmann (1986)). Šlo ale o první detektory gravitačních vln (obrázek 10.10b) v podobě několika zavěšených hliníkových válců o průměru 66 cm a délce 153 cm. Deformace válce působené nárazem gravitačních vln měla detekovat série piezoelektrických článků.

V současné době je v činnosti několik detektorů gravitačních vln, které využívají interferometrická měření (obrázek 10.10c). Při průchodu gravitační vlny by se totiž měla měnit vzdálenost mezi sledovanými tělesy. Čím delší jsou ramena interferometru, tím snáze by měla být vlna zaregistrována. Největším detektorem gravitačních vln je dnes



Obrázek 10.10: Způsoby detekce gravitačních vln. a) Nejjednodušší rezonanční detektor - harmonický oscilátor tvořený dvěma tělesy A a B spojenými pružinou. b) Weberův rezonanční detektor tvořený masivním (pružným) válcem, v němž gravitační vlny vyvolávají kmity. Pomocí vhodných snímačů deformace jsou tyto mechanické kmity převáděny na elektrické signály. c) Interferometrický detektor. Převzato z <http://astronuklfyzika.cz/Gravitace2-7.htm>.

americký LIGO (Laser Interferometer Gravitational wave Observatory). V Evropě mu sekundují experimenty VIRGO a GEO a v Japonsku TAMA. Bohužel stále s negativním výsledkem.

Na rok 2011 se plánovalo vypuštění interferometrických družic LISA s rameny interferometru několik milionů km. Bohužel společný projekt NASA a ESA byl z americké strany pozastaven pro nedostatek financí. ESA projekt přepracovala a pod názvem eLISA/NGO evolved Laser Interferometer Space Antenna/New Gravitational Wave Observatory) v něm pokračuje. Vypuštění je plánováno na rok 2014. Družice eLISA/NGO (jedna mateřská a dvě dceřinné) by měly měřit v rozsahu 0.1 mHz až 100 mHz, takže by měly postihnout uvažované silné zdroje gravitačních vln. Vzdálenost družic bude řádově milionů kilometrů, takže vytvoří první Michelsonův interferometr ve vesmíru.

## Doplňující literatura

- Baker, A. E. 1925 Proc. R. Soc. Edinburgh 45, 166  
 Bessell, M. S. 1990, PASP 102, 1181  
 Cousins, A.W.J., 1976, MNRAS 81, 25  
 Cowan, C. L., Jr., Reines, F., Harrison, F. B., Kruse, H. W., & McGuire, A. D. 1956, Science, 124, 103  
 Cowen, R. 2011, October 5, "Comets take pole position as water bearers". Nature. doi:10.1038/news.2011.579  
 Johnson, H. L., 1965, ApJ 141, 923  
 Johnson, H. L., Morgan, W.W., 1953, ApJ 117, 313  
 Harmanec, P. 2010, AST007.pdf - učební texty  
 Hearnshaw, J. B. 1996, Cambridge University Press

- Herschel Space Observatory 2011, "Herschel Finds Oceans of Water in Disk of Nearby Star" (Press release). October 20, 2011. ID nhsc2011-018
- Moro, D., Munari, U., 2000, A&A Suppl. **147**, 361
- Oberth, H. 1923, v "Die Rakete zu den Planetenräumen" (Raketou k planetám)
- Reichhardt, T. 2003, Nature 421, 308-309
- Řehoř, Z. 2012, <http://astro.posec.cz>, část Teorie
- Spitzer, L. jr. 1946, Astronomical Advantages of Extra-terrestrial Observatory (Výhody mimozemské observatoře pro astronomii)
- Young, A. T., Irvine, W. M. 1967, Astron. Journal 72, 945–950
- Ullmann, V. 1986, Gravitace, černé díry a fyzika prostoročasu, ČAS ČSAV Ostrava 1986
- Vítek, A., Pacner, K. 2008, Jak lidstvo otvíralo okno do vesmíru. Exkluzivní seriál o dobývání kosmu. [http://technet.idnes.cz/jak-lidstvo-otviralo-okno-do-vesmiru-exkluzivni-serial-o-dobyvani-kosmu-1qg-/tec-vesmir.aspx?c=A071231\\_192624\\_tec-vesmir\\_vse](http://technet.idnes.cz/jak-lidstvo-otviralo-okno-do-vesmiru-exkluzivni-serial-o-dobyvani-kosmu-1qg-/tec-vesmir.aspx?c=A071231_192624_tec-vesmir_vse)
- Zajonc, I. 2012, Teleskopie, <http://www.jiast.cz/category/teleskopie>



## 11 Sluneční soustava - přehled

Sluneční soustava představuje naše nejbližší vesmírné okolí. Jednotlivé skupiny těles ve Sluneční soustavě a úkazy spojené s postavením Slunce, Měsíce a planet jsme si představili v kapitole 5. Pojd'me se ještě jednou podívat na tělesa naší Sluneční soustavy. Tentokrát nás budou zajímat představy o organizaci Sluneční soustavy, popis pohybu jejích těles a podíváme se trochu blíže i na jednotlivé planety.

### 11.1 Inventura ve Sluneční soustavě

Dominantním tělesem Sluneční soustavy je její centrální hvězda - Slunce, která v sobě skrývá 99,87 % veškeré hmoty Sluneční soustavy. Své výsadní postavení ztratí Slunce snad jen v jednom případě. Z celkového momentu hybnosti Sluneční soustavy totiž na Slunce připadají jen zhruba 2 procenta! Sluneční soustavu lze charakterizovat také jako poměrně plochý útvar v rovině ekliptiky. Připomeňme, že rovinu ekliptiky vymezuje pohyb Země kolem Slunce nebo pohyb Slunce po hvězdné obloze, záleží na zvolené vztažné soustavě. V každém případě jsou trajektorie všech osmi planet takřka kruhové a leží téměř v jedné rovině (rovině ekliptiky). Navíc rotace většiny planet souhlasí se směrem oběhu kolem Slunce a směrem rotace Slunce. Výjimkou je jen Uran, který má osu rotace prakticky v rovině ekliptiky.

Jak už víme, měla Sluneční soustava do srpna 2006 devět planet, které byly definovány výčtem. Kromě Slunce a těchto devíti planet zde byla i malá tělesa Sluneční soustavy jako planetky (dříve též asteroidy), komety nebo měsíce planet. S rozvojem pozorovací techniky ale začala jak na běžícím pásu přibývat další tělesa srovnatelná velikostí s planetami jak v naší Sluneční soustavě, tak i mimo ni, u jiných sluncí. Exekutiva IAU se pokusila o řešení a alespoň ve Sluneční soustavě tělesa jednoznačně roztrdit a definovat. Od roku 2006 tedy máme oficiálně ve Sluneční soustavě mateřskou hvězdu (Slunce), osm planet (Merkur, Venuše, Země, Mars, Jupiter, Saturn, Uran, Neptun) a trpasličí planety (například Ceres, Pluto, Makemake, Eris, Haumea). Definice planety a trpasličí planety Sluneční soustavy jsme uvedli v kapitole 5. Bohužel tyto definice jsou skutečně platné pouze pro naši Sluneční soustavu a nelze je rozšířit i na extrasolární planety. Kromě nové kategorie trpasličích planet se objevily i další pojmy, které ve starších publikacích nenajdete. V červnu 2008 byla přijata rezoluce IAU, která definuje plutoid jako trpasličí planetu, která obíhá za drahou Neptuna. Jméno nyní získá plutoid s absolutní hvězdnou velikostí<sup>1</sup> větší než +1 mag. V současnosti jsou známy čtyři plutoidy Pluto, Eris, Makemake, Haumea. Plutoidy patří mezi tzv. transneptunická tělesa (TNO). Jsou to objekty v naší Sluneční soustavě, obíhající za drahou Neptunu ve vzdálenostech 30 až 50 au od Slunce. Odhaduje se, že takových těles o průměru nad 100 km je více než 70 tisíc. Prozatím jsou všechny považovány za planetky, včetně Pluta i s Charonem. Pluto není mezi transneptunickými objekty zcela výjimečné, i další mají své průvodce. Mezi transneptunickými objekty můžeme ještě vyčlenit dvě skupiny objektů. První z nich jsou tzv. plutina. Vyskytují se na vnitřní straně tzv. Kuiperova pásu a jejich oběžná doba je v rezonanci 2:3 s oběžnou dobou Neptunu. To znamená, že

<sup>1</sup>U těles Sluneční soustavy se jako absolutní hvězdná velikost označuje hvězdná velikost objektu ze vzdálenosti 1 au pozorovaného pod fázovým úhlem (Slunce-těleso-Země) nula.

na 2 oběhy plutina připadají 3 oběhy Neptuna. Do této skupiny těles řadíme například Pluto, Charon, Ixion, Orcus, Huya. Druhou skupinou mezi transneptunickými objekty jsou tak zvaná kubewana<sup>2</sup>. Jedná se o objekty Kuiperova pásu na trajektoriích s malou excentricitou pod 0,15 a s velkými poloosami v rozpětí od 41,8 do 48 au. Prvním byl objekt 1992 QB1, největším Makemake, dále sem můžeme zařadit Quaoar, Varuna, Chaos, Logos a další.

Další objekty Sluneční soustavy jako například komety, meteoroidy už našťastí žádná změna zařazení v poslední době nepostihla.

## 11.2 Vývoj Sluneční soustavy

Jaká tělesa se vyskytují v naší Sluneční soustavě již tedy víme. Ale kde se tady vzala? Jak vznikla? Mají nějaké společné rysy? Jak se na nich podepsal zatímní vývoj? To jsou otázky, které se pokusíme velmi stručně zodpovědět v následujících řádcích.

### 11.2.1 Vznik Sluneční soustavy

Historie Slunce a Sluneční soustavy se začala psát před 4,568 miliardami let (Bouvier & Wadhwa, 2010). Od 18. století byla všeobecně přijímána tzv. mlhovinná teorie vzniku Sluneční soustavy, na jejímž vzniku se podíleli zejména Emanuel Swedenborg, Immanuel Kant a Pierre-Simon Laplace. Vytvořený model ale musel být několikrát pozměněn, zejména po začátku kosmické éry na konci 50. let minulého století a pak po objevu planet mimo Sluneční soustavu na přelomu 20. a 21. století. Ukázalo se, že některé cizí planetární soustavy jsou velmi odlišné a při jejich vzniku a formování se musely nutně uplatnit i další, jiné efekty než při vzniku Sluneční soustavy. Tato korekce dosud trvá a některé otázky vzniku planet a jejich vlastností nejsou dosud vyřešeny.

Nějakým zásahem, impulsem zvenčí, pravděpodobně výbuchem blízké supernovy, se část obřího molekulového mraku začala smršťovat. Kolabující mlhovina se v důsledku zákona zachování hybnosti roztáčela a začala se zplošťovat. Během prvních 100 000 let se vytvořil centrální horký zárodek budoucího Slunce a kolem něj protoplanetární disk o průměru přibližně 200 au<sup>3</sup>. Během následujících 50 milionů let zárodek centrální hvězdy narostl a ohřál se natolik, že se v něm zapálily jaderné reakce - vzniklo Slunce. A zatím, v okolí probíhala divoká akrece látky. Částice prachu v okolí Slunce tvořily shluky s rozměry řádově stovky metrů a ty se dále spojovaly a vytvářely zárodky planet, tzv. planetesimály. I ty se dále srážely a spojovaly až daly vzniknout planetám. Vnitřní planety byly vytvořeny z látek s vysokým bodem tání jako kovy a křemičitany. Jejich vnitřní struktura (a podobně i struktura velkých měsíců planet) má tři části s různou hustotou - kůru, plášť a jádro. V době vzniku byly vnitřní planety stále vnořeny do zbytků původního prachoplynného disku a jejich interakce s materiálem disku určila i jejich trajektorie ve vznikající Sluneční soustavě. Velké plynné planety (Jupiter, Saturn, Uran a Neptun) vznikly ve vzdálenosti, kde již i prchavé látky mohly zůstat v pevném stavu. Mohly tak ke stavbě svého jádra využít ledových materiálů, kterých bylo všude

<sup>2</sup>Prazvláštní jméno kubewano (cubewano) je odvozeno z označení prvního takového tělesa 1992 QB1.

<sup>3</sup>Pro připomenutí a srovnání, nejvzdálenější planeta od Slunce Neptun obíhá ve vzdálenosti zhruba 30 au od Slunce.

okolo velké množství. Během několika milionů let narostly až na hmotnost čtyř Zemí a začaly přitahovat a zachycovat z okolí vodík a hélium. Tento proces byl ukončen po 3 až 10 milionech let po zapálení reakcí v nitru Slunce, protože následný velmi intenzivní hvězdný vítr vyfoukal ze Sluneční soustavy všechen zbylý materiál zárodečného mračna (Lin, 2008; Elmegreen, 1979). Podle různých odhadů mohlo jít o hmotu srovnatelnou s hmotností Slunce.

Tyto představy dostaly trhlinu s objevem planet o velikosti a konstituci Jupiteru v těsné blízkosti mateřské hvězdy, kde by případně měla být menší a hustší tělesa. Po podrobnějších propočtech se navíc ukázalo, že Uran a Neptun jsou nyní v takových oblastech Sluneční soustavy, že jejich vznik na této trajektorii je velmi nepravděpodobný. Po hvězdné vichřici v úvodních miliónech let po vzniku Slunce by tam totiž nezbylo dost materiálu na jejich vznik. Předpokládá se, že vznikly společně s Jupiterem a Saturnem někde v jejich blízkosti a poté migrovali až na dnešní místo. Asi před 4 miliardami let se planety Jupiter a Saturn dostaly do rezonance 2:1 (Levison et al., 2008). Konfigurace, kdy na dva oběhy Jupiteru připadal jeden oběh Saturnu, ale dokázala vytlačit Uran a Neptun za trajektorie Jupiteru a Saturnu a naopak mnoho malých ledových těles z vnějších oblastí bylo vychýleno z jejich trajektorie a dostalo se do blízkosti Jupiteru, který je svým gravitačním prakem vystřeloval na značně eliptické dráhy v různých směrech. Tato tělesa pak zformovala tzv. Oortův oblak (Levison et al., 2008).

Vnitřní planety neměnily své trajektorie ve Sluneční soustavě tak dramaticky jako velké planety, ale migrace velkých planet zasáhla i do jejich života. Pravděpodobně totiž vychýlila mnoho drobných těles ve Sluneční soustavě a ta se dostala do kolizního kurzu s planetami. Před 4 miliardami let tak nastalo tzv. období velkého bombardování, které trvalo až zhruba 500-600 miliónů let. Na povrchu řady planet nebo jejich družic lze vidět následky dodnes. Na Měsíci vznikly velké kruhové pánve, které byly vyplněny podpovrchovou čedičovou lávou. Tak vznikla dnešní měsíční moře. Velké kruhové pánve můžeme vidět i na Merkuru (Caloris Planitia) nebo na Marsu (Hellas). I po skončení intenzivního bombardování se ale stále Sluneční soustavou potuluje dostatek projektilů, které mohou Zemi smrtelně zranit.

### 11.2.2 Stopy předchozího vývoje na tváři planet

Nejsilněji se na podobě planet podepsaly dva procesy, které probíhaly hned v raných stádiích Sluneční soustavy. Při vzniku planet docházelo k diferenciaci látky podle hustoty a následně byly planety vystaveny intenzivnímu bombardování. Některé navíc prodělaly apokalyptickou srážku s jiným tělesem. Týká se to přímo naší Země. Srážka Prazemě s planetou o velikosti zhruba dnešního Marsu zásadně pozměnila svrchní vrstvy Prazemě a z vyvrženého materiálu časem vznikl Měsíc, který měl na další vývoj Země a života na ní zcela zásadní vliv.

Podle složení a vnitřní stavby rozdělujeme planety Sluneční soustavy do dvou skupin.

- podobné Zemi (terestrické) - Jsou tvořeny převážně ze sloučenin a prvků železa, křemíku, hořčíku, hliníku a vápníku. Nacházejí se ve vnitřní části Sluneční soustavy. Patří sem Merkur, Venuše, Země, Mars. Typickým znakem těchto planet je i to, že nemají původní atmosféru. Protože vznikaly příliš blízko Slunci, byla jejich prvotní atmosféra odvanuta při hvězdné vichřici krátce po zrodu Slunce.

Jejich současná, druhotná atmosféra byla dotvořena do dnešní podoby v důsledku geologických a u Země i biologických procesů.

- planetární (plynní) obři (planety typu Jupiter) ve vnější části Sluneční soustavy - Jupiter, Saturn, Uran a Neptun. Mají zhruba desetkrát větší průměr než terestrické planety a jsou tvořeny převážně vodíkem a heliem. U Uranu a Neptunu navíc nalezneme i uhlík, dusík a kyslík. Někdy se proto používá označení obří planety jen pro Jupiter a Saturn a velké pro Uran a Neptun. Nemají v podstatě pevný povrch. Atmosféra plynule přechází ve vlastní těleso planety. Atmosféra je navíc původní.

Na povrchu terestrických planet a velkých družic jako náš Měsíc jsou dodnes zřejmé stopy intenzivního bombardování z počátku Sluneční soustavy i etapy vulkanismu v podobě sopek, sopečných sopouchů, impaktních kráterů, velkých dopadových pánví, prasklin a v případě Země i pevninských desek.



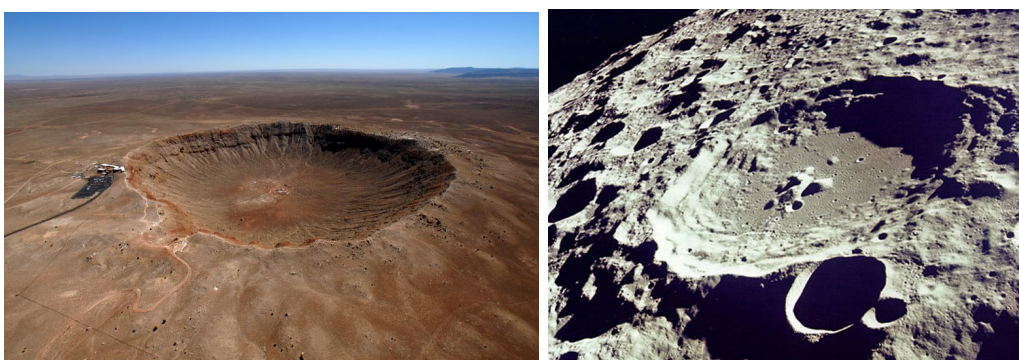
Obrázek 11.1: Sopky na Zemi (vlevo), na Venuši (uprostřed), na Jupiterově měsíci Io (vpravo). Zdroj: BBC, NASA.

### Vulkanismus

U planet zemského typu lze najít projevy působení žhavého magmatu. Pokud se jedná o hlubinné působení, mluvíme o magmatismu. Více na očích jsou samozřejmě důsledky sopečné (vulkanické) činnosti, kdy se magma dostane až na povrch. U Země, Měsíce nebo Merkuru jde o bazaltový (čedičový) vulkanismus. V důsledku rozsáhlých opakovaných výlevů lávy vznikaly bazaltové plošiny (měsíční moře, hladké plošiny na Merкуру nebo oceánská kůra na Zemi. Na Venuši (v oblasti Beta Regio), Marsu (například Olympus Mons), ale i na Zemi (na Havajských ostrovech) se pak setkáme se štítovými sopkami. Některé jsou opravdu mohutné. Největší sopka Sluneční soustavy Olympus Mons (Nix Olympica) na Marsu má průměr základny 624 km a vrcholový kráter o průměru 85 km naleznete ve výšce 27 km (nad nulovou nadmořskou výškou). Pro srovnání – velikostí

největší pozemská sopka Mauna Kea na Havaji, se vypíná nad mořskou hladinu jen 4205 m, ale od 120km základny na dně oceánu je vysoká pouze 10205 m.

Zcela jiný typ vulkanismu byl objeven u velkých měsíců planet. Na měsíci Ió je v důsledku slapových sil Jupiteru aktivních hned několik sopek, které produkují proudy lávy a výtrysky, sloupce síry a oxidu siřičitého vysoké stovky kilometrů. Na Saturnových měsících Enceladus a Titan byly sondou Cassini-Huygens objeveny ledové gejzíry a například 1500m vysoká hora, z jejíhož jícnu vytéká materiál podobně jako lávové proudy. Na Tritonu u planety Neptun pak vulkány chrlí do tamní atmosféry tekutý dusík, prach nebo metan. Také tyto vulkány a gejzíry pozměňují tvář jejich domovských těles.



Obrázek 11.2: Impaktní krátery. Vlevo: Barringeův kráter v Arizoně, USA. Vpravo: Měsíční kráter Daedalus. Zdroj: National Geographic, NASA.

### Impakty

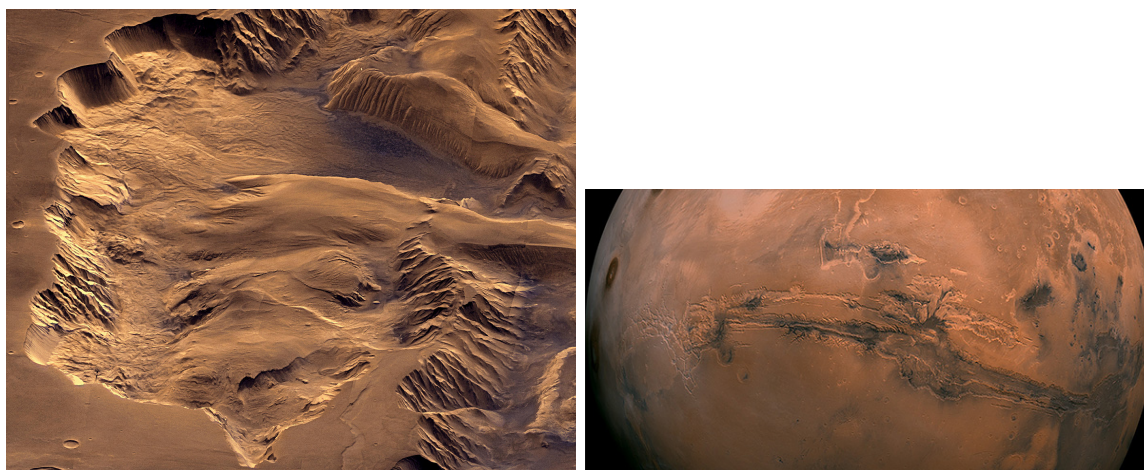
Zcela zásadní vliv na podobu některých těles Sluneční soustavy mají impaktní krátery. Většina z těch, které hyzdí povrch planet nebo velkých měsíců, vznikla v období intenzivního bombardování, ale vznikají i dnes. Na Zemi a dalších tělesech s intenzivním geologickým vývojem a hustou atmosférou jsou stopy po dopadu cizího tělesa poměrně brzy zahlazeny. Patrné zůstávají jen relativně čerstvé krátery, staré jen milión až 10 miliónů let<sup>4</sup>.

Prohlížíme-li si impaktní krátery na různých tělesech, možná nás napadne, jak je možné, že jejich tvar je takřka vždy kruhový. Projektily, který kráter způsobily, ale přilétaly obecně z různých směrů a s různou rychlostí. A když hodíte velký kámen šikmo k zemskému povrchu, rozryje zeminu a zůstane oválná stopa. Vysvětlení je však celkem prosté. Tělesa dopadající z kosmu mají obrovskou kinetickou energii. Například na povrch Měsíce dopadají s rychlostí desítek kilometrů za sekundu. Při dopadu se jejich kinetická energie ve zlomcích sekundy přemění na teplo. Roztaven je jak vlastní projektil, tak i horniny v místě dopadu. Materiál je nejprve stlačen a následně vyvržen do výše. Jde doslova o výbuch, po němž materiál padá zpět na povrch a vytváří kruhové valy. Nepravidelné krátery vznikají například v místech tektonických poruch, případně pokud dopadající těleso letí téměř tečně k povrchu.

<sup>4</sup>Seznam impaktních kráterů na zemi nalezneme například na [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_impact\\_craters\\_on\\_Earth](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_impact_craters_on_Earth)

## Praskliny

Tektonické<sup>5</sup> pochody jsou velice rozmanité, každá planeta či větší družice má svůj vlastní „tektonický styl“. Na Venuši jsou tektonické procesy velmi úzce spojeny se sopečnou činností. Na Marsu najdeme velmi rozsáhlé příkopy a údolí (Valles Marineris), které na první pohled vypadají jako obří jizvy na povrchu planety. Na Měsíci najdeme poměrně jednoduchou tektoniku v podobě soustavy trhlin a zlomů vzniklých jednak slapovými silami a jednak smršťováním lávové výplně moří při vzniku impaktních pánví a velkých kráterů. Nejsložitější je tektonika planety Země. Je dosud jediným známým tělesem s deskovou tektonikou. Tucet velkých litosférických desek se od sebe na některých místech vzdaluje, někde naopak do sebe narážejí. Právě na rozhraní desek můžeme pozorovat velkou seismickou a vulkanickou aktivitu.



Obrázek 11.3: Údolí Marineru (Valles Marineris) na Marsu. Zdroj: NASA.

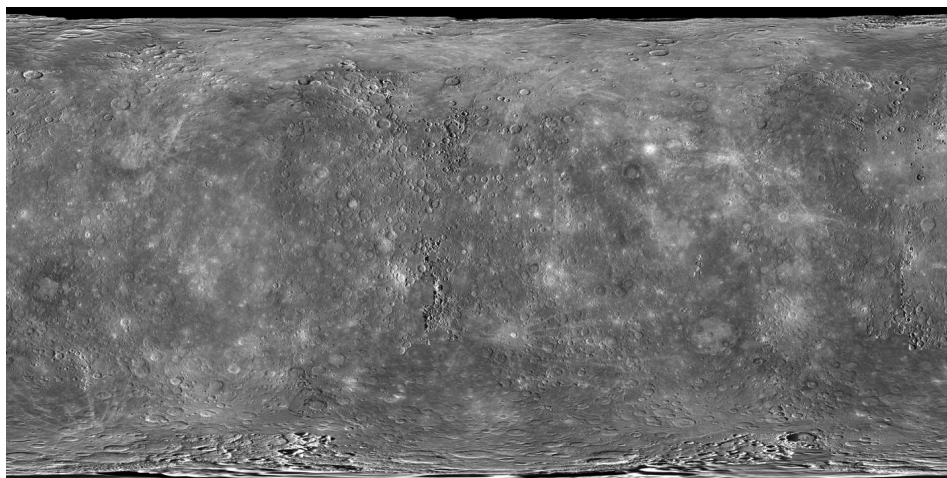
## 11.3 Základní informace o planetách

### 11.3.1 Merkur ☿

Planeta Merkur má hned několik „nej“, například obíhá nejbližší ke Slunci nebo je nejmenší z planet Sluneční soustavy. Dokonce je menší než některé měsíce velkých planet. Oběžná doba je nejkratší. Jeden oběh trvá jen 87,969 dne. Trajektorie Merkuru má největší výstřednost (46 - 70·10<sup>6</sup> km) ze všech planet Sluneční soustavy a nejmenší sklon rotační osy vůči rovině ekliptiky. Navíc se přímka apsid stáčí o 43" za století. Tento efekt vysvětlil až Albert Einstein pomocí obecné teorie relativity.

Merkur se otáčí kolem své osy jednou za zhruba dvě třetiny doby oběhu kolem Slunce. Za dva oběhy kolem Slunce se planeta vůči němu třikrát otočí. Povrch Merkuru je vystaven velkému střídání teplot od -173 °C až +427 °C. Na první pohled vypadá podobně jako měsíční povrch, ale nenalezneme na něm útvary podobné měsíčním mořím. Povrch je poset většinou impaktními krátery, nalezneme zde i charakteristické obloukovité

<sup>5</sup>Tektonika je část geologie, zabývající se poruchami zemské kůry, eventuálně kůry dalších těles ve Sluneční soustavě.



Obrázek 11.4: Složený snímek povrchu Merkuru na základě pozorování sondy Messenger v roce 2012. Před startem této sondy bylo známo jen 45 % povrchu planety. Zdroj: <http://photojournal.jpl.nasa.gov>.

zlomy (relativně strmé příkopy v délce až stovky kilometrů). Nejvýraznějším útvarem je pánev Caloris (Pánev horka) – systém šesti prstencových valů (nejvýraznější o průměru 1340 km) s unikátním dnem, kde jsou praskliny či horské hřbety, vybíhající ze středu nebo vyskytující se v soustředných prstencích.

Podrobnosti o Merkuru a jeho povrchu nám přinesly zejména kosmické sondy Mariner 10 (1974 - 1975), který prozkoumal 45 % povrchu, a zejména nově sonda Messenger, která u Merkuru pracuje od roku 2008. Primární fáze činnosti sondy skončila v roce 2012. Mezi nejvýznamnější objevy sondy patří detekce vodního ledu na dně kráterů v oblasti severního pólu Merkuru. Další mise se chystají už na rok 2013.

Ze Země je Merkur pozorovatelný jen velmi obtížně, za soumraku. Často zaniká v záři Slunce. V dalekohledu jsou vidět fáze planety. Velmi zřídka lze pozorovat přechod Merkuru přes sluneční disk. V příštích dvaceti letech nastanou jen takové události jen třikrát v letech 2016, 2019 a 2032.

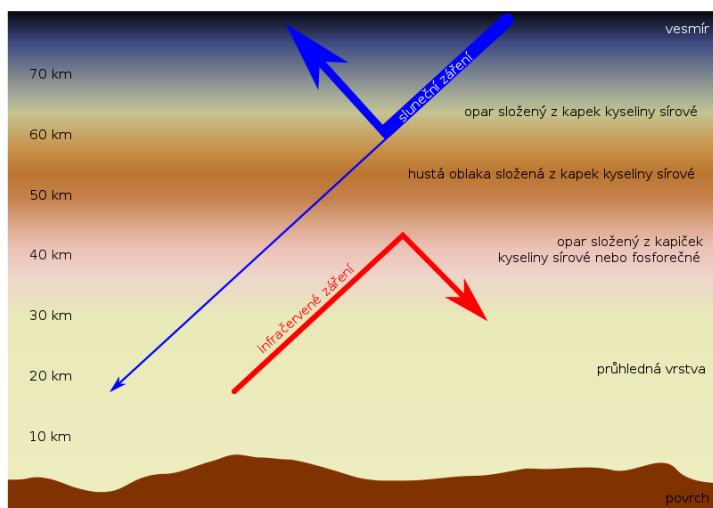


Obrázek 11.5: Snímek povrchu planety Venuše pořízené sondou Veněra 14 v roce 1982. Zdroj: [http://www.mentallandscape.com/C\\_CatalogVenus.htm](http://www.mentallandscape.com/C_CatalogVenus.htm).

### 11.3.2 Venuše ♀

O Venuši se často říká, že je sestrou země. Vždyť je přibližně stejně veliká. Ale rozdíly tu jsou. A veliké! Trajektorie Venuše má nejmenší excentricitu z planet. Kolem Slunce

oběhne jednou za 224,7 pozemského dne, ale kolem své osy se otočí za 243,0 dní. Jak už víme, je po Slunci a Měsíci třetím nejjasnějším kosmickým objektem na naší obloze. Může dosáhnout hvězdné velikosti až  $-4,6$  mag a na večerní nebo ranní obloze<sup>6</sup> se opravdu mnohdy třpytí jako drahokam. V dalekohledu ale uvidíme jen fáze planety. Detaily povrchu totiž zakrývá hustá vrstva oblačnosti 45 až 60 km nad povrchem v masivní atmosféře tvořené téměř výhradně oxidem uhličitým  $\text{CO}_2$ . Teprve s rozvojem radarové techniky a díky kosmickým sondám jsme mohli nahlédnout pod atmosférickou pokličku a zjistit, co se skrývá na Venušině povrchu. V rámci sovětského kosmického programu Venuša bylo v letech 1961-1983 k Venuši vypuštěno 16 sond. Jen některé se ale dokázaly vypořádat s tamními podmínkami, teplotou až  $500\text{ }^\circ\text{C}$ , tlakem více než devadesátkrát větším než na povrchu Země, agresivními kapičkami kyseliny sírové v ovzduší, a odeslat dosud jediné záběry přímo z povrchu (obrázek 11.5).



Obrázek 11.6: Skleníkový jev je na Venuši příčinou tamních extrémních podmínek. Zdroj: wikipedia.

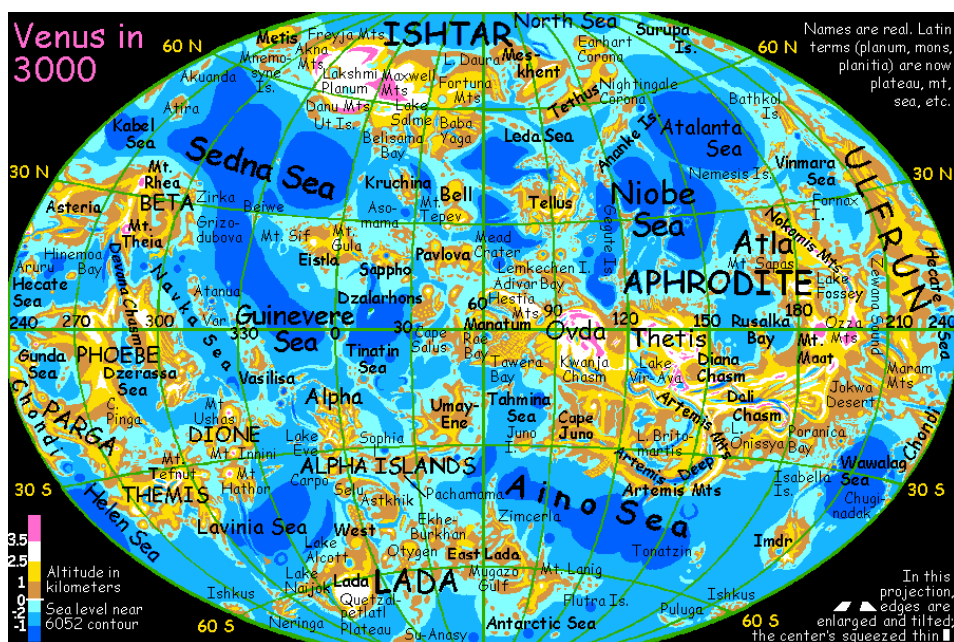
První mapa povrchu byla zhotovena teprve v 90. letech 20. století v rámci amerického projektu Magellan. Radarové mapování ukázalo stopy silné sopečné aktivity. Zhruba 85 % povrchu je sopečného původu. Největší sopky jsou štítové (podobné jako ty havajské na Zemi) a mají základny až 1000 km v průměru. Nejvyšší vrcholky Maxwellova pohoří sahají až do výšky přibližně 11 kilometrů. Zdá se, že povrch planety je relativně mladý – jen asi půl miliardy let.

### 11.3.3 Země ☿

Naše domovská planeta je zatím jediná, na níž byl potvrzen život. S poloměrem 6378 kilometrů a hmotností  $6 \cdot 10^{24}$  kg je největší z terestrických planet ve Sluneční soustavě. Kolem Slunce obíhá po téměř kruhové trajektorii. Společnost jí dělá souputník Měsíc a velké množství drobných umělých družic. Má oproti ostatním planetám velmi specifické složení atmosféry. V důsledku fotosyntézy v ní převažuje dusík a kyslík. Oxidu uhličitého je naopak poměrně málo.

<sup>6</sup>Maximální elongace od Slunce je  $45^\circ$  až  $47^\circ$ .



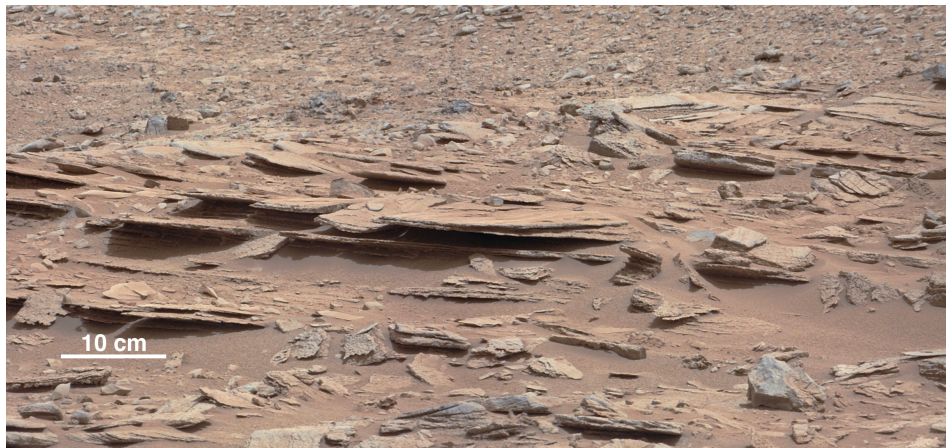


Obrázek 11.7: Mapa Venuše. Zdroj: <http://www.worlddreambank.org/>.

Země vznikla před zhruba 4.6 miliardami let. Krátce poté získala i dnešní Měsíc. Ten výrazně zasáhl do dalších osudů naší Země. Především dlouhodobě stabilizoval zemskou osu a pravděpodobně také díky slapovým silám, přílivu a odlivu také napomohl přechodu života z moří na souši. Nicméně, zcela zásadní je pro zemi a život na ní centrální hvězda Sluneční soustavy. Osud Země určuje Slunce. Také v budoucnosti tomu tak bude. Za 700 milionů let vzroste výkon Slunce o skoro 10 %. Větší dávky záření způsobí ohřátí Země, oceány se vypařují, planeta se zahalí do mraků a dostaví se silný skleníkový jev, který nadále zvyšuje teplotu na 40 až 80 °C. Organismy, které ještě nevymřely, se vracejí do oceánů. Za 1,5 miliardy let od současnosti se výkon Slunce zvýší o třetinu. Pozemské oceány se zcela vypaří, uniklý oxid uhličitý se postará o překotný skleníkový jev. Atmosférický tlak dosáhne 60ti násobek dnešního a teplota se dostane přes 200 °C. Země se stane mrtvou planetou. Za sedm miliard let Slunce dospěje ke konci své životní dráhy, promění se v červenou obří hvězdu, která bude sahat až do vzdálenosti jedné astronomické jednotky od jeho středu. Jeho zářivý výkon se zvýší tisíckrát, ale současně intenzivním slunečním větrem klesne jeho hmotnost. Gravitační sevření Slunce se trochu uvolní a Země se odsune do vzdálenosti zhruba 1,7 au. Na rozdíl od Merkura se sice z horké náruče Slunce zachrání, ale ztratí atmosféru a jeví povrch se doslova bude tavit. Za další tři miliardy let se Slunce změní v bílého trpaslíka. Naše Země sice přečkala celý životní cyklus Slunce, ale stalo se z ní chladné, mrtvé těleso, které v temnotě, bez zdrojů energie obíhá kolem velmi, velmi zvolna chladnoucího Slunce.

Do vývoje Země ale může výrazně zasáhnout ještě jeden činitel – člověk. Zhruba od poloviny 20. století disponuje lidstvo zdroji energie, které jsou srovnatelné s energiemi velkých přírodních procesů jako zemětřesení, tsunami, obří vulkanické erupce. Současný arzenál jaderných zbraní může Zemi a život na ní zcela zničit. Ale nemusí jít o použití zbraní. Člověk Zemi pozvolna, ale o to více systematictěji. Znečištění vody, půdy nebo ovzduší už někde nabývá katastrofálních rozměrů. Je jen na nás, zda budou na zemi moci

žit i budoucí generace lidí. Budoucnost Země, alespoň ta velmi blízká z astronomického hlediska, není ve hvězdách ale v lidech.



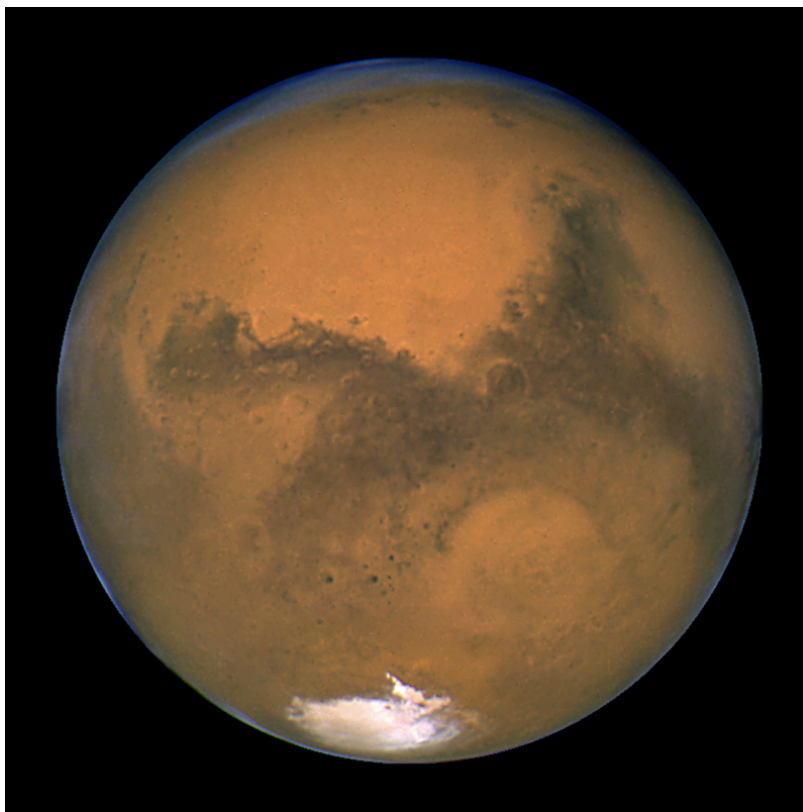
Obrázek 11.8: Detail povrchu Marsu v kráteru Gale na záběrech z vozítka Curiosity. Zdroj: NASA.

### 11.3.4 Mars ♂

Čtvrtá planeta Sluneční soustavy Mars je sice menší než Země, přesto nejpodobnější. Jedná se o další planetu zemského (terestrického) typu, což znamená, že má pevný povrch pokrytý impaktními krátery, vysokými sopkami, hlubokými kaňony a dalšími útvary. I ze Země jsou menším dalekohledem viditelné polární čepičky. Jejich horní část je tvořené oxidem uhličitým a dolní vodou. Voda se na Marsu vyskytuje i ve stále zmrzlé půdě (permafrostu). V minulosti byla na povrchu i voda v tekutém stavu. Kromě bílých polárních čepiček je ale povrch Marsu spíše červenavý. Vděčí za to písku a prachu s oxidem železitým.

Na povrchu můžeme najít pánve jako rozsáhlé, zhruba kruhové plošiny. Největší z nich je Hellas o průměru 1600 km a hloubce 6 km. V kůře Marsu jsou obří praskliny. Valles Marineris (Údolí Marinerů) představuje celý komplex údolí s délkou 5000 km, šířkou až 240 km a hloubkou až 8 km. Ale najdeme zde i největší sopky ve Sluneční soustavě. V oblasti Tharsis se nachází štítová sopka Olympus Mons se základnou 540 km, která ční do výšky 26 km nad okolí. Pohled na povrch je ale občas zastřen mohutnými písečnými bouřemi globálního charakteru. Ve výšce 6, respektive 20 tisíc kilometrů nad povrchem planety krouží dvě přirozené družice nepravidelného tvaru, pojmenované Phobos a Deimos.

Mars oběhne kolem Slunce za 1.9 pozemského roku. Jedna otočka kolem osy trvá o něco déle než jeden pozemský den. Rotační osa je přitom k rovině ekliptiky skloněna je o trochu více než ta zemská. Střídání dnů a nocí a konec konců i ročních období je tedy velmi podobné jako na Zemi. Také proto se Mars stal ve fantazii lidí to správnou planetou, kde by měl být život mimo Zemi. Život na Marsu a Marťané se objevovali nejen na stránkách vědeckofantastické literatury, ale i v seriózním tisku. Giovanni Schiaparelli v roce 1877 zakreslil do svých map útvary, tzv. kanály, které následně rozpoutaly vášnivou debatu o jejich vystavění Marťany. Později se ukázalo, že šlo jen o optický



Obrázek 11.9: Mars na snímku HST v době velké opozice 27. 8. 2003. Zdroj: NASA.

klam. Šance na objev života na Marsu měl posílit objev údajných fosilních mikroorganismů v meteoritu z Marsu ALH84001. Pravdou je, že existují i další náznaky, že život na Marsu, byť v jednoduché formě mohl existovat. Byly objeveny důkazy potvrzující přítomnost tekoucí vody. Navíc bylo v atmosféře zjištěno více metanu než se očekávalo vzhledem k jeho rychlému rozpadu. Dnes je Mars poměrně chladná, suchá, nehostinná pustina. V první miliardě let po svém vzniku zde ale bylo v důsledku sopečné činnosti teplo a vlhko. Hustá atmosféra z oxidu uhličitého díky silnému skleníkovému efektu dále přispívala k udržování příhodné teploty pro existenci vody v tekutém stavu. Pravděpodobně zde docházelo k lijákům i sněhovým bouřím, tekly zde řeky a vytvářela se i jezera a moře. Asi před 3,8 miliardy roků však prvotní sopečná činnost skončila. Koncentrace  $\text{CO}_2$  klesla a postupně docházelo k řidnutí atmosféry, slábnutí skleníkového jevu a chladnutí povrchu. Voda na povrchu zamrzla nebo sublimovala a Mars se zvolna dostal do dnešní podoby. Jestli se v době příhodných podmínek nějaký život na planetě rozvinul zatím nevíme. Na definitivní potvrzení života na Marsu si prostě budeme ještě muset počkat.

Výzkum Marsu je byl a je velmi intenzivní. K žádnému jinému tělesu se nevydalo tolik sond. Jmenujme alespoň Mars, Viking, Pathfinder, Mars Explorer, Mars Express, Mars Orbiter, Mars Exploration Rover (vozítka Spirit a Opportunity), Mars Reconnaissance Orbiter, Phoenix, Mars Science Laboratory (vozítko Curiosity) a další. Na druhou stranu musíme dodat, že také celá řada projektů zde skončila neúspěchem.



Obrázek 11.10: Mapa povrchových partií Jupitera z pozorování sondy Cassini v prosinci roku 2000. Zdroj: <http://photojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/PIA07782.jpg>.

### 11.3.5 Jupiter ♃

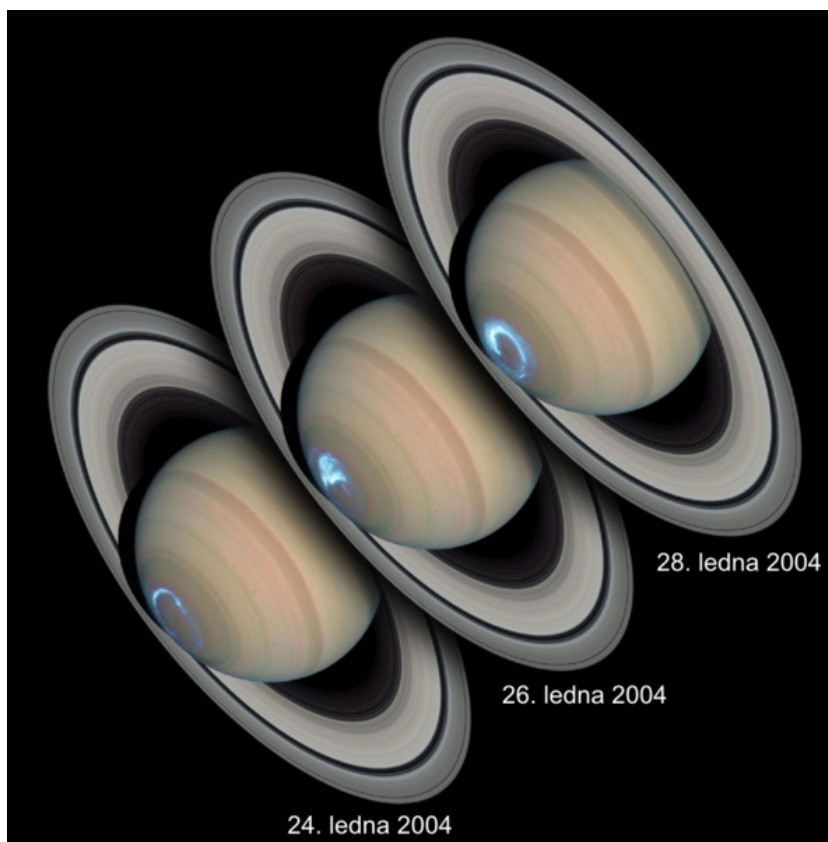
Největší planetou Sluneční soustavy je Jupiter. Tato obří planeta se stala prototypem obřích planet nejen ve Sluneční soustavě, ale pro všechny planetární soustavy. Ve Sluneční soustavě zastupuje Jupiter tzv. plynné obry. Jupiter má hmotnost zhruba jedné tisícině hmotnosti Slunce a oběhne kolem Slunce jednou za 11 let.

Planeta je složena zejména z vodíku a hélia s příměsí metanu a čpavku. V jejím jádru je vodík pod vysokým tlakem v tekutém stavu. Chová se tak podobně jako kov a mimo jiné generuje poměrně silné magnetické pole. Jupiter nemá pevný povrch. Zpovzdálí vidíme jen svrchní vrstvy atmosféry, která má složitou strukturu se světlými a tmavými pásy. Pásy jsou poměrně stabilní, podobně jako největší vírový útvar tzv. velká rudá skvrna. V pásech jsou ale vidět drobné, rychle se měnící turbulence, které jsou vlastně známkou místních bouří. V okolí planety byly objeveny slabé prachové prstence. Najdeme zde i bohatou rodinu<sup>7</sup> vlastních měsíců, které se pohybují v silném radiačním poli. Největší z nich jsou čtyři velké tzv. galileovské družice Io, Europa, Ganymed a Callisto, velikostí srovnatelné s naším Měsícem.

S průzkumem Jupitera „zblízka“ začala dvojice sond Pioneer 10 a 11 v letech 1973 až 1974. Od té doby se u Jupiteru pohybovaly zejména družice Voyager 1 a 2 (v roce 1979) a pak sondy Cassini a zejména sonda Galileo v roce 1995, která kolem Jupiteru obíhala 8 let. Nejnovější data poslala na Zemi v roce 2007 sonda New Horizons, která prolétala kolem na své cestě k Plutu.

Ze Země je Jupiter pozorován jako čtvrtý nejjasnější kosmický objekt na obloze. V optimálních podmínkách dosahuje jeho hvězdná velikost až -2.8 mag. V minulosti byl často pozorován amatérskými pozorovateli, kteří sledovali vývoj pásových struktur ve svrchních vrstvách atmosféry.

<sup>7</sup>K 1. lednu 2013 bylo známo 67 měsíců Jupiteru. Aktuální stav je možné nalézt na <http://www.dtm.ciw.edu/users/sheppard/satellites/>.



Obrázek 11.11: Polární záře na Saturnu. Trojice snímků vznikla kombinací snímků v ultrafialovém a viditelném spektru, přičemž ultrafialové záběry vznikly v lednu 2004 za pomoci Hubbleova vesmírného dalekohledu a viditelné až v březnu téhož roku. Zdroj: NASA, ESA.

### 11.3.6 Saturn $\eta$

Saturn spolu s jasnými prstenci je považována za nejfotogeničtější planetu. Prstence nalezneme sice i u dalších plynných obrů, ale ty Saturnovy jsou určitě nejkrásnější. Jsou to shluky částic s velikostí od mikroskopických prachových zrnků až po bloky skal. Ze Země jsou pozorovatelné jako soustava několika prstenců s mezerami, ale bližší pohled, který nám zprostředkovaly kosmické sondy, odhalil úžasnou strukturu podobnou povrchu gramofonové desky, ale jsou zde i výstředné prstence, loukotě či uzlíky. Dvakrát za dobu oběhu Saturnu kolem Slunce (29,46 pozemského roku) se prstence skloní tak, že Země leží v jejich rovině. Protože jsou ty prstence velmi tenké, přestanou být ze Země pozorovatelné a Saturn se na chvíli odhalí. Jenže podobně jako u Jupitera nemá Saturn pevný povrch. Vidíme jen hustou vodíkovou atmosféru, která postupně přechází do pláště. V atmosféře není vidět tolik detailů jako u Jupitera, ale proudění plynů je tam mnohem rychlejší a dosahuje až 500 m/s. Zajímavostí Saturnu je zcela určitě jeho průměrná hustota zhruba  $0,69 \text{ kg/m}^3$ . Střední hustotu menší než je hustota vody nemá žádná jiná planeta Sluneční soustavy.

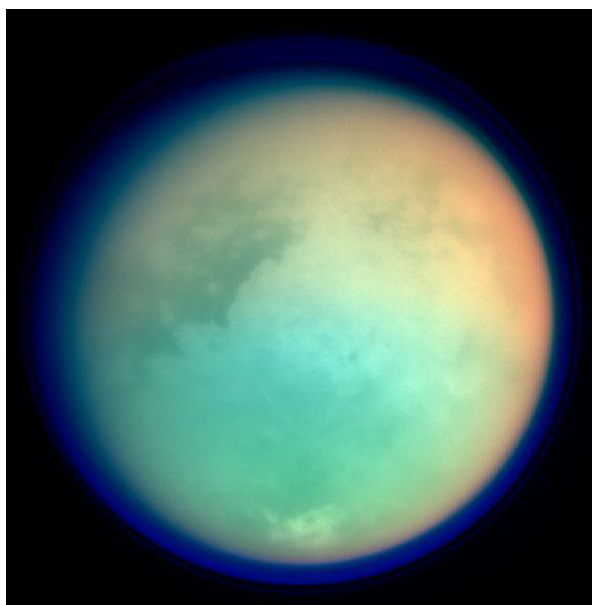
Při pozorování ze Země je i v malých dalekohledech vidět prstence obepínající nažloutlý kotouček. Vedle prstenců tu ale obíhá kolem planety i početná rodina měsíců<sup>8</sup>.

<sup>8</sup>K 1. lednu 2013 bylo známo 62 měsíců Saturnu. Aktuální stav je možné nalézt na <http://www>.



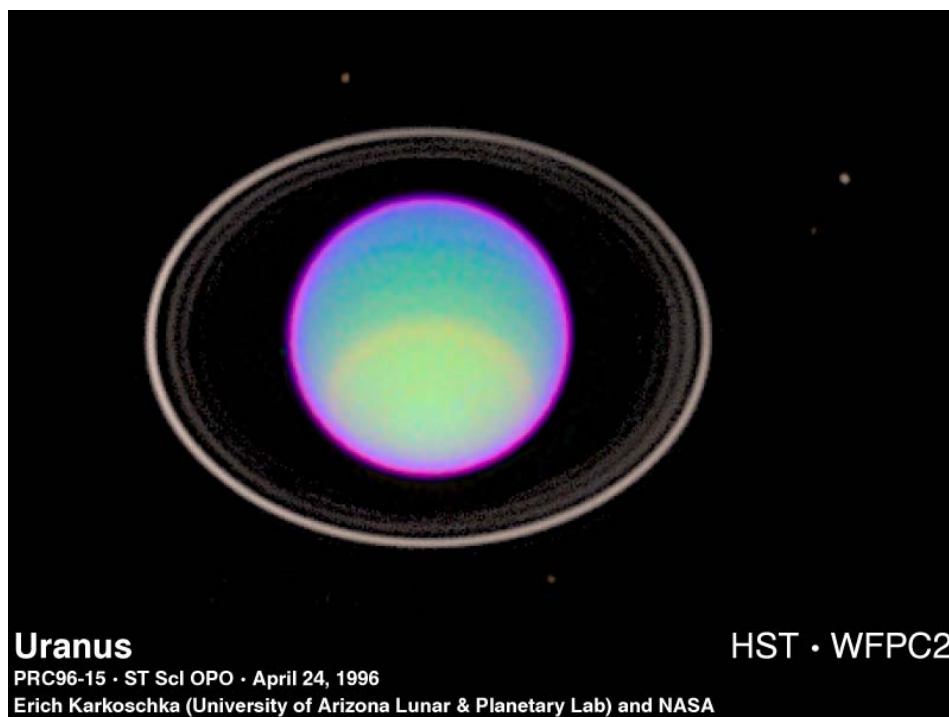
Obrázek 11.12: Panoramatický pohled na prstence Saturnu. Širší, šedý prsteneček je prsteneček A. Z vnitřní strany ho vymezuje Cassiniho dělení, největší mezera mezi Saturnovými prstenci. Za ní se nachází široký prsteneček B, potom tenčí a tmavší prsteneček C a nejvnitřnější je prsteneček D. Zdroj: wikipedia.

Ten největší z nich – Titan je znám už od roku 1655 a jako jediný měsíc ve Sluneční soustavě má hustou atmosféru. Navíc na jeho povrchu objevila sonda Cassini-Huygens skutečná jezera, moře vyplněná tekutinou, pravděpodobně metanem nebo etanem. Velice zajímavý z hlediska astrobiologie je i měsíc Enceladus, na jehož povrch je voda v kapalném stavu.



Obrázek 11.13: Složený snímek Titanu (v infračervené a ultrafialové barvě) pořízený sondou Cassini 26. října 2004. Zdroj: <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA06139>.

Zejména kvůli možnému výskytu života se chystá hned několik kosmických sond, které by měly navázat na dřívější výzkumníky – sondy Pioneer 11, Voyager 1 a 2 a zejména sondu Cassini-Huygens. Ta dorazila k Saturnu v roce 2004. Její modul Huygens pak v počátku roku 2005 dokonce přistál na povrchu Titanu. Sonda je stále aktivní. Její mise byla dvakrát prodloužena a nyní by měla sbírat data (už pod jiným názvem) na oběžné dráze Saturnu až do roku 2017.



Obrázek 11.14: Obrázek ve falešných barvách byl složen z několika expozičních pořízených 3. července 1995 na HST. Prstence byly uměle zjasněny, aby byla patrná jejich struktura, ve skutečnosti jsou velmi tmavé. Zdroj: NASA.

### 11.3.7 Uran ♂

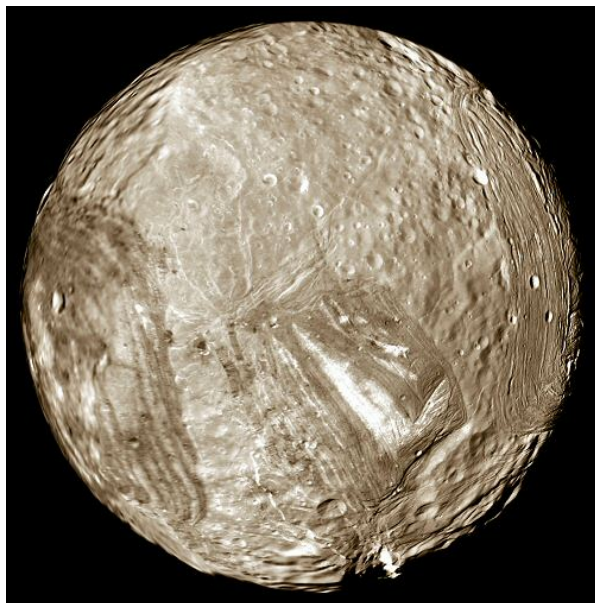
Uran je možné za výjimečných podmínek pozorovat i pouhými očima na noční obloze. Ale protože je na hranici viditelnosti, starověcí hvězdáři jeho planetární povahu neodhalili. Objevil jej až 13. března 1781 William Herschel.

Stavbou a složením řadíme Uran mezi plynné obry, ale s Neptunem také mezi tzv. ledové obry. Uran složen z ledu a kamení, je tvořen zejména vodíkem a héliem, ale jsou zde i výrazné příměsi ale vody, čpavku či metanu se stopami uhlovodíků. Atmosféra je vůbec nejchladnější v celé Sluneční soustavě – jen kolem 49 K. V horních vrstvách atmosféry se vyskytuje metan, který pohlcuje červené světlo a způsobuje modré zabarvení planety. Atmosféra rotuje rychleji než jádro planety, větrné proudy v atmosféře mají diferenciální rotaci a pohybují se rychlostí až 900 km/h. Osa rotace má k rovině ekliptiky největší sklon ze všech planet, takže Uran se jakoby kutálí ve své dráze kolem Slunce, které oběhne jednou za 83.4 let.

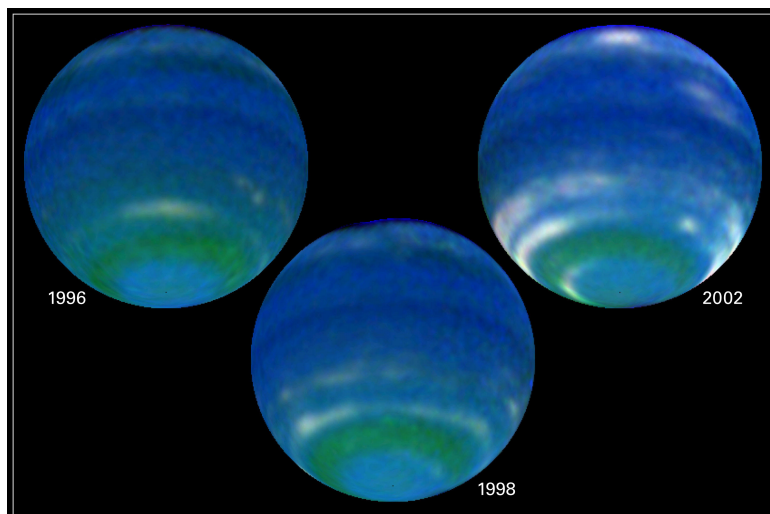
Přestože k možnosti existence prstenců se vyjadřoval už Herschel, byly Uranovy prstence objeveny až 10. března 1977 při pozorování zákrytu hvězdy SAO 158678 (Elliot et al., 1977). Objev následně potvrdila jediná sonda, která kolem Uranu prolétala, Voyager 2 v roce 1986. Průzkum Uranu je tedy zatím postaven na údajích z této sondy a pozorování z pozemských či kosmických observatoří operujících v blízkosti Země. I tak byla například zjištěna početná skupina měsíců Uranu<sup>9</sup>. nejzajímavější z nich je zřejmě

<sup>9</sup>K 1. lednu 2013 bylo známo 27 měsíců Uranu. Aktuální stav je možné nalézt na <http://www.dtm.ciw.edu/users/sheppard/satellites/>.

Miranda, která má na povrchu hluboké šrámy (viz obrázek 11.15).



Obrázek 11.15: Uranova družice Miranda na snímku pořízeném sondou Voyager 2 v roce 1986. Zdroj: NASA.



Obrázek 11.16: Vývoj oblačnosti na jižní polokouli Neptunu na záběrech HST v oblasti viditelného a blízkého infračerveného záření. Zdroj: NASA.

### 11.3.8 Neptun ♆

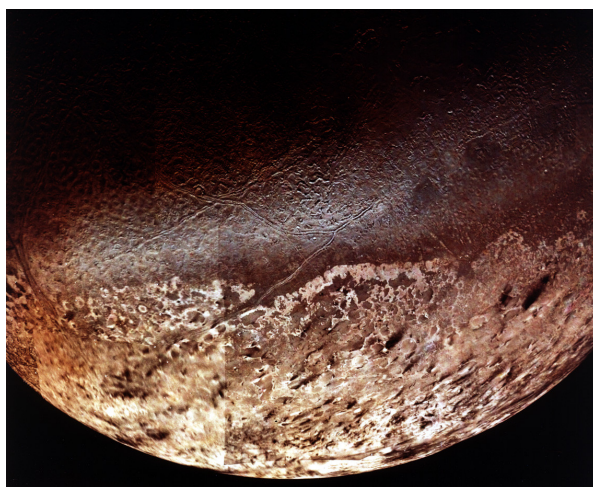
Neptun je osmou a nejvzdálenější planetou Sluneční soustavy. Kolem Slunce oběhne jednou za téměř 165 let. Od svého objevu 23. září 1846 tak zvládl dokončit jen jediný oběh. Polohu planety v roce 1846 vypočítal francouzský astronom a matematik Urbain



Le Verrier a na základě těchto výpočtů ji Johann Gottfried Galle a jeho asistent Heinrich Louis d'Arrest z berlínské hvězdárny objevili (?). Hvězdná velikost Neptuna je přibližně 7,8 mag, takže je pozorovatelný už malým dalekohledem, triedrem. Vlastně vidíme jen jeho svrchní vrstvy podobně jako u ostatních plynných obrů. V atmosféře jsou při pozorování velkými přístroji, HST nebo na snímcích ze sondy Voyager 2 zřetelné útvary, cyklony, anticyklony. Najdeme zde i útvar podobný rudé skvrně na Jupiteru. Modrá barva Neptunu je způsobena přítomností metanu v atmosféře. Neptun se podobá Uranu, například složením atmosféry nebo stavbou vlastního tělesa. Proto jsou někdy tyto dvě planety označovány jako tzv. ledoví obři.

Sonda Voyager 2, která kolem Neptunu prolétla v roce 1989, poslala sice detailní záběry, ale byly to opravdu jen momentky ze života planety. Ve druhé polovině 90. let minulého století se výzkumu Neptunu věnoval Hubbleův kosmický dalekohled a nově infračervený dalekohled na palubě družice Spitzer.

V okolí Neptunu byly v roce 1984 objeveny z observatoře La Silla v Chile části prstenců (Haefner et al., 1985), které o 5 let později potvrdila pozorování sondy Voyager. V okolí Neptunu se potuluje také několik měsíců<sup>10</sup>. Největší z nich Triton je zhruba pětinové velikosti Země byl objeven jen 17 dní po objevu vlastní planety. S teplotou 45 K (-228 °C) patří k nejchladnějším světům ve Sluneční soustavě.



Obrázek 11.17: Povrch největšího Neptunova měsíce – Tritonu. Zdroj: NASA.

## 11.4 Malá tělesa Sluneční soustavy

### 11.4.1 Trpasličí planety

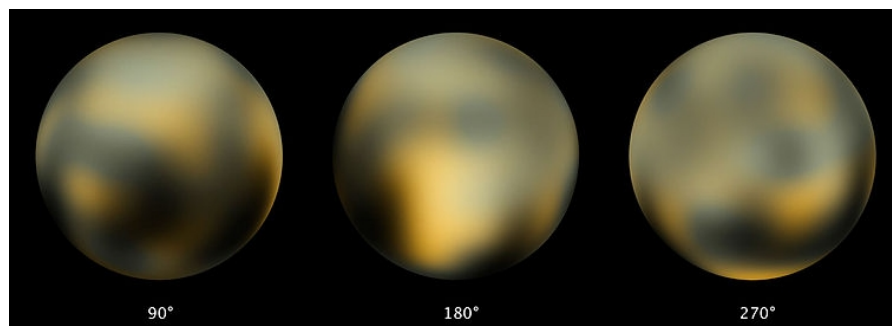
#### Pluto

Pluto objevil 18. února 1930 Clyde W. Tombaugh na Lowellově observatoři v USA. Tři čtvrtě století měl status planety, ale jak víme, je nyní (od roku 2006) řazen mezi trpasličí planety a plutoidy. V roce 1978 byl objeven největší měsíc Pluta - Charon. Protože

<sup>10</sup>K 1. lednu 2013 bylo známo 13 měsíců Neptunu. Aktuální stav je možné nalézt na <http://www.dtm.ciw.edu/users/sheppard/satellites/>.

hmotný střed této dvojice leží vně těles na jejich spojnici. Mluví se někdy i o binární soustavě Pluto-Charon. Poznávání Pluta bylo dosud omezeno jen na vzdálený průzkum z pozemských nebo orbitálních observatoří jako například HST. Od roku 2006 k němu ale míří první sonda New Horizons, která by ke svému cíli měla dorazit v roce 2015. Dosavadní výsledky ukazují, že svými rozměry, stavbou, trajektorií a zřejmě i vznikem patří Pluto mezi tělesa Kuiperova pásu. Povrch Pluta je velmi chladný, v průměru jen 43 K (-230 °C). Protože má velmi výstřednou trajektorii, dochází na jeho povrchu k výraznému kolísání teplot a k opakovanému zahřívání a ochlazování povrchu. Podobně jako u komet tak zde poblíž přísluní vzniká plynný obal sublimací zmrzlých plynů, zejména dusíku, oxidu uhličitého a metanu. Ve větších vzdálenostech od Slunce se pak obal postupně ztrácí.

Kolem Pluta obíhá pět měsíců. Kromě již zmíněného Charonu ještě Nix, Hydra a dosud bezejmenné satelity P4 a P5, jejichž objevy byly oznámeny v letech 2011 a 2012. Zcela zásadní nové poznatky jsou očekávány zejména od sondy New Horizons. Uvidíme v roce 2015.



Obrázek 11.18: Povrch trpasličí planety Pluto na snímcích z HST. Zdroj: NASA.

### Ceres, Eris, Makemake, Haumea a další

Ceres je z dosud uznaných trpasličích planet jediná z pásu mezi Marsem a Jupiterem. Nejedná se ale o místo jejího vzniku. Jako jeden z mála objektů z této oblasti má přibližně kulový tvar. Údajů o vlastním tělese máme dosud jen poskrovnu. V roce 2015 by však měla k Cereře měla doputovat sonda Dawn.

Eris objevili v roce 2003 M. Brown, C. Trujillo a D. L. Rabinowitz. Je větší než Pluto. V žebříčku hmotností těles Sluneční soustavy zaujímá místo hned po osmi planetách. Také proto byla krátce (do roku 2006) označována jako desátá planeta Sluneční soustavy. Obíhá po velmi excentrické trajektorii ( $e=0.44$ ), která je navíc silně skloněná k rovině ekliptiky ( $44^\circ$ ). Afélium leží ve vzdálenosti přibližně 97 au, což z Eris a jejího měsíce Dysnomia činí (s výjimkou několika komet) jedno z nejvzdálenějších známých těles Sluneční soustavy.

Makemake je po Plutu a Eris třetí největší trpasličí planetou. Objevil ji v březnu 2005 stejný tým jako Eris. Její trajektorie není ani tak excentrická ani nemá takový sklon k rovině ekliptiky jako Eris. Jméno je převzato z mytologie Velikonočního ostrova. Také proto je správná výslovnost make-make a nikoli anglické mejkmejnk.

Haumea byla objevena v roce 2005 a na první pohled zaujme především její silně zploštělý tvar 1960x1518x996 km, který je zřejmě důsledkem rychlé rotace. Jednu otočku dokončí za méně než 4 hodiny. Krátce po objevu byly zjištěny i dva měsíce, které kolem ní krouží.



Obrázek 11.19: Jedna z nejbližších blízkozemních planetek – Eros. Zdroj: NASA.

### 11.4.2 Planetky

Ve Sluneční soustavě jsme si už ukázali a popsali Slunce, planety, trpasličí planety, ale zbývá ještě obrovský počet drobných těles - planetek a jader komet. Jsou menší než trpasličí planety. Jejich hmota většinou nebyla tak velká, aby získaly kulovitý tvar. Za planetky se většinou označují objekty větší než 100 metrů. Ty menší se označují jako meteoroidy. Přestože je celková hmotnost planetek, jader komet velmi malá, mají obrovský význam. Jsou totiž nositeli informací z doby formování Sluneční soustavy. Jejich průzkum nám může pomoci pochopit, jak vlastně tento kout vesmíru vznikl a jak se utvářel do dnešní podoby. Ale co je ještě důležitější - řada z těchto těles nás totiž může potenciálně ohrozit. Jejich srážka se Zemí by byla pro život na naší planetě zničující.

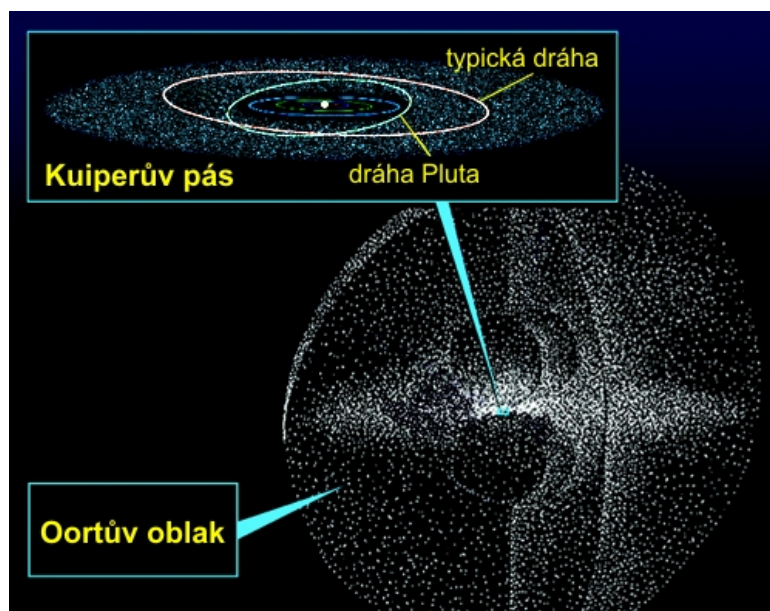
Číslem jedna v seznamu planetek je Ceres. Jak již víme objevil ji 1. ledna 1801 Giuseppe Piazzi. Nicméně po objevu a to až do roku 1851 byla považována za planetu. Od roku 2006 zase patří mezi trpasličí planety. Pomyslnou královnou planetek je tak Pallas, objevená H. W. Olbersem v březnu 1802. V současné době je evidováno 598 461 (stav k prosinci 2012) a z toho 17 573 planetek získalo své definitivní pojmenování.<sup>11</sup>

Planetky se vyskytují ve Sluneční soustavě zejména ve třech oblastech. Nejbližší k nám je oblast mezi trajektoriemi Marsu a Jupiteru. Mluví se často o pásu planetek. Další oblastí výskytu je prostor za trajektorií Neptunu. Souhrnně se tato tělesa označují

<sup>11</sup>Aktuální čísla jsou k dispozici na <http://www.minorplanetcenter.net>.

jako transneptunická (TNO) a místo jejich výskytu za tzv. Kuiperův pás<sup>12</sup>. Tyto objekty se často v důsledku uvolňování plynů z povrchu proměňují z planetky na jádra komet a zase zpět podobně jako jsme to poznali u Pluta. Třetí oblastí výskytu planetek a jader komet je tzv. Oortův oblak<sup>13</sup> doslova na periférii Sluneční soustavy, ve vzdálenosti zhruba 50 000 au.

Rozdělením planetek do skupin například podle oblastí výskytu a jejich fyzickými charakteristikami se budete zabývat v dalších kurzech.



Obrázek 11.20: Kuiperův pás a Oortův oblak. Zdroj: NASA.

### 11.4.3 Komety

Velmi stručně jsme si komety představili v kapitole 5. Jádra komet jsou největšími tuláky Sluneční soustavy. V podstatě můžeme rozlišit komety krátkoperiodické s dobou oběhu kratší než 200 let a dlouhoperiodické. Nejkratší známou oběžnou periodu 3,3 roku má Enckeova kometa. Samozřejmě existují i komety jednonávratové, jejichž trajektorie jsou parabolické nebo hyperbolické. Díky sondám SOHO a STEREO jsme byli 1. 10. 2011 dokonce svědky zániku komety, která dopadla přímo na Slunce.

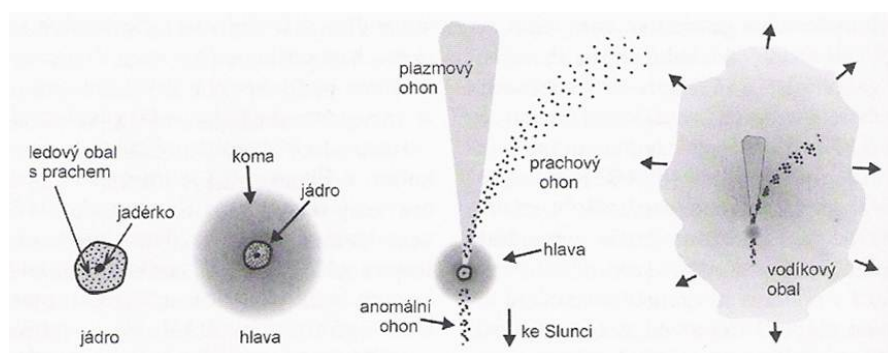
Těleso komety je v principu tvořeno jádrem, komou a jedním nebo i více ohony (viz obrázek 11.21). Jádro je poměrně malý útvar, slepenec zmrzlých plynů a hornin o rozměrech 100 metrů až 10 kilometrů. Samotné jádro je ze Země přímo nepozorovatelné. Když se jádro komety přiblíží ke Slunci, začnou se z něj uvolňovat částice plynu a prachu, které utvoří hlavu komety, tzv. komu<sup>14</sup>. Její rozměry mohou být opravdu

<sup>12</sup>O existenci planetek za drahou Neptunu uvažoval Gerard Kuiper [k(h)a,jpr] již v roce 1951. První takové těleso ale objevili až 30. srpna 1992 David Jewitt a Jane Luuová.

<sup>13</sup>Hypotézu o existenci oblaku poprvé publikoval Jan Hendrik Oort v roce 1950, nicméně první předpověď o jeho existenci pochází z roku 1932 od Ernsta Öpika. Proto se někdy oblak označuje jako Öpikův-Oortův.

<sup>14</sup>Slovo *koma* pochází z latiny, kde „coma“ značí kšticí, hřívu

úctyhodné. Mohou být dokonce větší než Slunce. Posledním důkazem takové obří komy byla kometa 17P/Holmes v roce 2007 (Hopkin, 2007) na obrázku 5.29 vpravo. Jak se kometa přibližuje stále více ke Slunci, strhává proud slunečních částic, sluneční vítr částice komy a vytváří se ohon(y) komety. V principu mohou vzniknout ve směru od Slunce dva ohony - prachový a iontový (plazmový). Lehčí částice z komy, ionty vytvoří ohon, který je přímý a míří na opačnou stranu od Slunce. Naproti tomu těžší prachové částice vytvářejí zahnutý ohon, který kometa při svém pohybu jakoby nechává za sebou. Oba ohony byly krásně pozorovatelné u jasné komety Hale-Bopp, jak je patrné na obrázku 5.29 vlevo. Ohony komet mohou dosáhnout délky až několika astronomických jednotek.



Obrázek 11.21: Schéma komety.

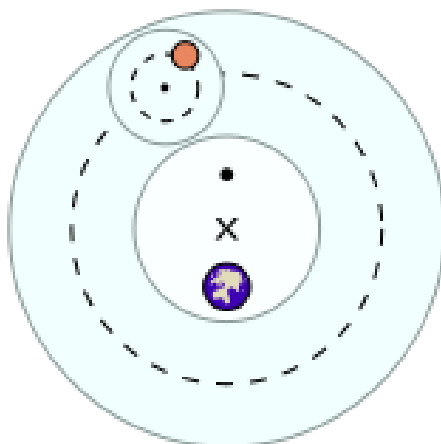
## 11.5 Modely Sluneční soustavy

Už starověcí astronomové, jakmile odlišili planety od hvězd, se snažili uspořádat okolní vesmír. Dát mu nějaký řád a vymezit v něm místo pro Slunce, Měsíc, Zemi, další známé planety a hvězdy. Jednotlivé představy uspořádání kosmu se lišily zejména v postavení Země a Slunce. Hlavní názorové proudy vymezují představy geocentrismu a heliocentrismu.

### 11.5.1 Geocentrický model

Převažujícím názorem ve starověké astronomii různých kultur byl geocentrismus, tedy přesvědčení, že Země je středem vesmíru a kolem tohoto středu obíhá Měsíc, Slunce a všechny zbylé planety. Nad nimi se pak tkví nehybná a neměnná sféra hvězd. Nejznámějším zastáncem geocentrického modelu je Klaudios Ptolemaios (římský občan Egypta řecké národnosti). Jednoduché uspořádání ale neodpovídalo pozorováním. Ptolemaios proto planety v modelu umístil na obvod epicyklu, jehož střed obíhal současně po obvodě většího kruhu, tzv. deferentu se středem v Zemi. Vhodnou volbou poloměrů obou kružnic pak bylo možné počítat polohy planet s přesností v mezích pozorovacích chyb tehdejší astronomie. Ptolemaios není autorem teorie epicyklů, ta pochází už z období před Hipparchem. Jejich použitím se ale nepodařilo vysvětlit všechny nerovnoměrnosti v pohybech planet. Ptolemaiovým řešením bylo vychýlit Zemi ze středu deferentu, který se pak označoval jako excentrický deferent nebo excentr, a navíc dodal tzv. ekvant (viz

obrázek 11.22). Teorii epicyklů s ekvantem zpochybnili až perští astronomové ve 13. století nebo Mikuláš Koperník, ale vyvrátil ji až Johannes Kepler.



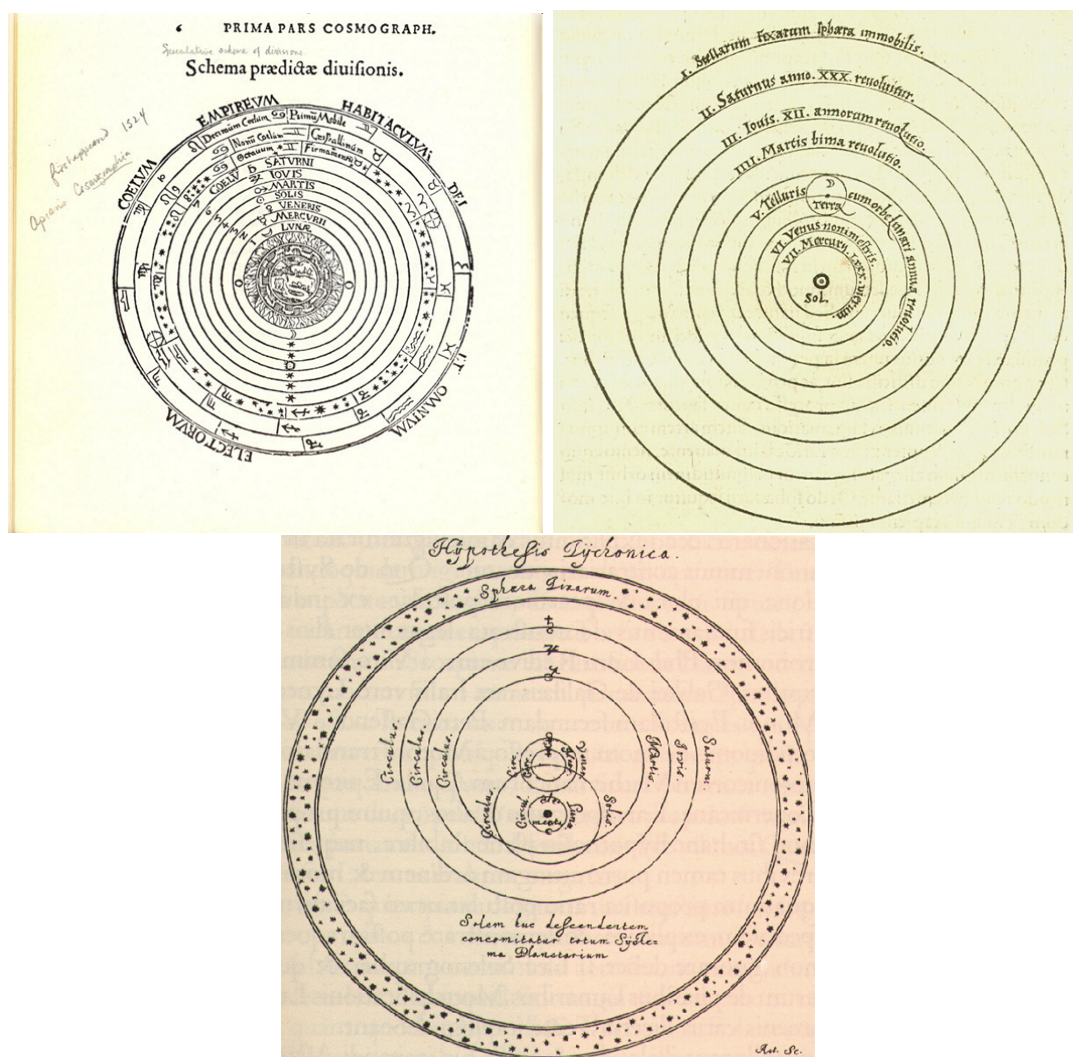
Obrázek 11.22: Ptolemaiov model Sluneční soustavy. Planeta obíhá kolem Země na epicyklu (malá čárkovaná kružnice) a deferentu (velká čárkovaná kružnice). Země je umístěná excentricky a na protější straně vůči uvažovanému středu soustavy (x) je ekvant (černý bod). Planeta, respektive střed epicyklu, pak obíhá vůči ekvantu s konstantní rychlostí. Zdroj: wikipedia.

### 11.5.2 Heliocentrický model

Nejčastěji je model uspořádání světa se středem ve Slunci spojován se jménem Mikuláše Koperníka. Myšlenka takového uspořádání se však objevuje podstatně dříve. První propagátory heliocentrické teorie najdeme mezi pythágoorejci v 5. až 4. století př.n.l. Také Aristarchos ze Sámu se kolem r. 280 př.n.l. jasně vyslovil pro heliocentrismus. Najdeme jej i u indického astronoma Aryabhaty v 5. století, u arabských učenců v 10. až 11. století a tak dále.

Pronikání myšlenky heliocentrismu bylo ztěžováno zejména postojem katolické církve. Pro ni bylo jasným božím záměrem, že přece Země a lidé na ní jsou středem vesmíru. Odlišné názory byly ostře potlačovány a knihy hlásající heliocentrismus byly církví oficiálně zakázány. Například Koperníkovy spisy katolická církev vyňala ze seznamu zakázaných děl až roku 1835! Mikuláš Koperník tedy rozhodně neměl snadnou pozici. V jeho době ale uzrál čas na reformu a on byl jejím nejhlasilitějším propagátorem. Ve spise *De revolutionibus* představil Koperník heliocentrismus formou diskuse o filozofických dopadech takového uspořádání. Nicméně pro podporu svých tvrzení použil řadu astronomických pozorování té doby a sestavil tabulky, které umožňovaly vypočítat minulé i budoucí polohy hvězd a planet. Dlužno dodat, že jeho výpočty nedávaly lepší výsledky než Ptolemaiov geocentrický model. Na druhou stranu, heliocentrismus řešil třeba retrográdní pohyb planet po hvězdné obloze.

Heliocentrický model bojoval nejen s odporem církve, ale s mnoha předsudky. Po dlouhou dobu panoval mezi lidmi názor, že pokud by se Země otáčela a zároveň pohybovala kolem Slunce, lidé a předměty by musely spadnout. Kdyby se navíc takto pohybovala, musel by takový pohyb přece být cítit. Žádné drncání, chvění, drkotání se ale ne-



Obrázek 11.23: Modely Sluneční soustavy. Vlevo nahoře geocentrická soustava, vpravo nahoře heliocentrická a dole smíšený systém Tycha Brahe.

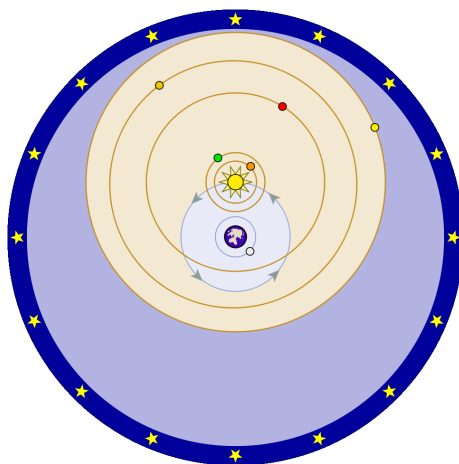
koná. A vůbec - geocentrický názor byl do značné míry egocentrický a tedy přirozenější. Solidní pozorovatelskou námitku proti heliocentrismu, ale vyslovil už Archimédes. Pokud Země obíhá kolem Slunce, měli bychom přece pozorovat paralaxu hvězd. Vyvrátit se ji podařilo až dva tisíce let po Archimédovi. V 19. století se díky zlepšení astronomických přístrojů podařilo pozorovat paralaxu u řady hvězd.

Heliocentrismus ale už v 17. století významně rozvinuli Galileo, Kepler a Newton. S pomocí prvních dalekohledů sledovali mimo jiné fáze Venuše a to není možné v geocentrické soustavě. Tam se totiž Venuše pohybuje vždy mezi Zemí a Sluncem, takže nikdy nevidíme zcela osvětlený kotouček této planety.

### 11.5.3 Tychoův kompromis

Tycho Brahe se na konci 16. století pokusil zachránit výsadní postavení Země v modelu uspořádání světa. Jak sám zapsal, snažil se spojit matematické výhody Kopernikovského

systému a filozofické a „fyzikální“ výhody modelu Ptolemaiovského. Tychonova kompromisní soustava zachovala centrální postavení Země, kolem níž obíhaly Měsíc a Slunce. Kolem této trojice pak obíhaly ostatní planety (viz obrázek 11.24).



Obrázek 11.24: Tychonův model Sluneční soustavy. Objekty na bledě modré dráze (Měsíc a Slunce) obíhá kolem Země. Objekty na oranžové trajektorii (Merkur, Venuše, Mars, Jupiter a Saturn) obíhají kolem Slunce. Kolem nich je otáčející se sféra hvězd. Zdroj: wikipedia.

Tychonův model se největšího uznání dočkal v 17. století. Významní katoličtí astronomové včetně Clavia totiž nebyli spokojeni s ptolemaiovským systémem. Použití dalekohledu a pozorování fází Venuše jasně ukázalo, že tento systém není správný. Pokud nechtěli přistoupit na heliocentrismus, stal se pro ně Tychonův systém jediným východiskem. Dodejme, že i v tomto modelu bude Venuše ukazovat všechny fáze.

\* \* \*

Dodejme, že v dnešní době chápeme všechny výše uvedené modely jako náhledy na uspořádání Sluneční soustavy, nikoli celého světa, kosmu. Z tohoto pohledu není ani „vítězná“ heliocentrická teorie správná. Už Giordano Bruno poukázal na to, že Slunce není středem vesmíru, ale jen jednou z mnoha hvězd. Později, v průběhu 18. a 19. století už Slunce výsadní postavení ztratilo definitivně. Ale ani kdybychom zůstali ve Sluneční soustavě, nemůžeme ztotožnit střed soustavy se středem Slunce. Bodem, kolem něhož obíhají planety, je přece hmotný střed Sluneční soustavy a ten leží mimo Slunce.

## 11.6 Keplerovy zákony

Po Koperníkovi se významně na prosazení heliocentrického názoru podíleli Johannes Kepler a Isaac Newton. Kepler přispěl popisem pohybu planet a Newton zdůvodněním



pohybu planet. Dokážete ale říci, co bylo dříve? Popis příčiny pohybu nebo „jen“ popis pohybu?

Po smrti Tychona Brahe, nejlepšího pozorovatele té doby se Kepler dostal k jeho pozorováním poloh Marsu. Jejich rozbořením dospěl k poznání obecných zákonitostí pohybu planet ve Sluneční soustavě. Tyto empirické poznatky formuloval v roce 1609 ve spisu *Astronomia Nova* jako své první dva zákony<sup>15</sup>. Třetí zákon publikoval Kepler až v roce 1618 ve spisu *Harmonices Mundi*. Ale teprve o několik desetiletí později v roce 1687 Isaac Newton ve slavném spisu *Philosophia Naturalis Principia Mathematica* popisuje účinky gravitace a formuluje gravitační zákon<sup>16</sup>.

- První Keplerův zákon popisuje trajektorie planet:

**Planety se pohybují po elipsách (málo odlišných od kružnic), v jejichž jednom (společném) ohnisku se nachází Slunce.**

Tuto zákonitost pohybu planet odhalil Kepler na základě rozboru četných Braheho pozorování Marsu. Kepler znal dobu oběhu Marsu 687 dní a věděl, že se po jejich uplynutí se Mars vrátí přesně do téhož místa dráhy. A totéž věděl také u Země a znázornil si její polohu den po dni. Když byla Země v bodě  $Z_1$  (viz obrázek 11.25), našel Kepler v záznamech pozorování Tychona Braheho, že Mars se promítal do polohy  $h_2$ . Za jeden oběh (687 dní) se Mars vrátil do původní polohy, ale Země byla v té době v bodě  $Z_2$ . Mars se tedy promítal do polohy  $h_1$ . Skutečnou polohu Marsu pak už bylo snadné určit jako průsečík obou směrů. Stejným postupem nakonec dostal Kepler i další body trajektorie Marsu, aby nakonec zjistil, že se jedná o elipsu.

Z prvního zákona vyplývá, že centrálním tělesem naší planetární soustavy je Slunce. Geocentrický pohled včetně Tychonova kompromisního modelu neodpovídají pozorováním. Výstřednost trajektorií není velká, takže v prvním přiblížení lze trajektorii planety považovat za kruhovou. Navíc leží v rovině, která obsahuje Slunce a jejíž poloha v prostoru (vůči vzdáleným hvězdám) je stálá. Oběžné roviny jednotlivých planet se ale mohou lišit.

- Druhý zákon sice Kepler také publikoval v díle *Astronomia Nova*, ale znal jej už roku 1602, je tedy historicky nejstarší z trojice. Obsah tvrzení lze formulovat různě. Například:

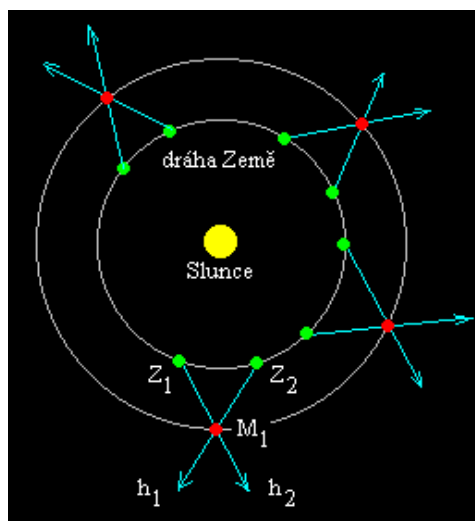
**Plocha opsaná průvodičem planety za jednotku času je stálá.**

Připomeňme, že průvodič je spojnice planety a Slunce. Důsledky zákona jsou poměrně rozsáhlé. Pokud se planeta pohybuje po elipse, jde o pohyb nerovnoměrný. Planeta se pohybuje nejrychleji v přísluní (perihelu) a nejpomaleji v odsluní (v afelu)<sup>17</sup>. Z toho mimo jiné vyplývá, že léto a zima nejsou stejně na Zemi dlouhé. Protože Země prochází přísluním počátkem ledna, je naše „česká“ zima kratší než naše

<sup>15</sup>Prvním, kdo tato tvrzení označil za Keplerovy zákony, byl francouzský básník a filozof Voltaire ve spisu *Eléments de la philosophie de Newton* z roku 1738.

<sup>16</sup>Robert Hooke publikoval základy gravitační teorie ve spisu *System of the World*, který vyšel v 60. letech 17. století. Hooke proto později Newtona obvinil z plagiátorství.

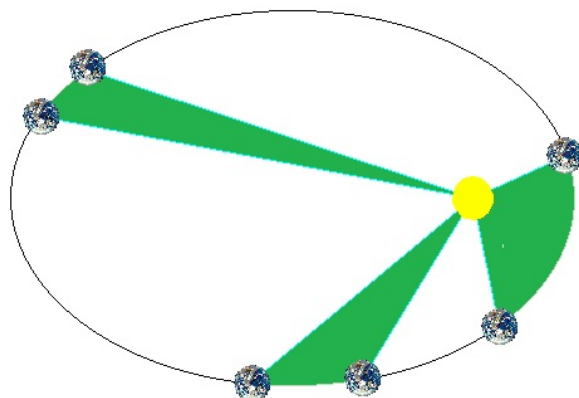
<sup>17</sup>Označení bodů trajektorie nejbližších a nejvzdálenějších k centrálnímu tělesu pro různé případy včetně připomenutí geometrie elipsy najdete v příloze C.



Obrázek 11.25: Princip, jakým Kepler odvodil zákonitost o podobě trajektorie planet. Autor: Ota Kéhar.

léto nebo zima u protinožců. Díky tomuto zákonu je také možné jednoznačně odpovédět na trochu záludnou otázku, která noc na Zemi je nejdelší. Asi vás napadne, že jde o noc polární, ale v souladu výše řečeným je nejdelší jižní polární noc.

Můžeme se ale také na věc dívat z pohledu fyzika. Každá planeta má určitou potenciální a kinetickou energii. Jejich součet je konstantní, protože během oběhu kolem Slunce planeta energii nijak neztrácí. Potenciální energie je dána vzdáleností od Slunce a klesá, když se planeta přibližuje ke Slunci. Současně s poklesem potenciální energie ale roste energie kinetická, což znamená, že se planeta zrychluje ve své dráze. A to je přesně stejný závěr, jaký vyplývá z druhého Keplerova zákona.



Obrázek 11.26: Druhý Keplerův zákon. Převzato z <http://astronomia.zcu.cz>.

- Třetí Keplerův zákon se někdy označuje jako harmonický. Kepler jej hledal usilovně po řadu let. Ke správnému výsledku dospěl teprve 15. května 1618.

**Poměr druhých mocnin oběžných dob libovolných dvou planet je roven poměru třetích mocnin velkých poloos jejich drah.**

Takovéto vyjádření vztahu mezi oběžnou dobou a poloosou planet platí ale jen za předpokladu, že hmotnost centrálního tělesa, v tomto případě tedy našeho Slunce, je mnohem větší než hmotnosti planet. Matematicky lze výše uvedené znění 3. Keplerova zákona zapsat

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}, \quad (11.1)$$

kde  $T_1, T_2$  jsou oběžné doby planet a  $a_1, a_2$  velké poloosy jejich trajektorií. Ekvivalentní je ale také zápis

$$T^2 \propto a^3, \text{ tedy } T^2 = ka^3 \quad (11.2)$$

kde  $k$  je konstanta úměrnosti. Hodnota konstanty  $k$  je samozřejmě stejná pro všechna tělesa (planety) a závisí na volbě použitých jednotek. Pokud budeme vyjadřovat oběžnou dobu v rocích a délku velké poloosy trajektorie v astronomických jednotkách, pak bude mít konstanta  $k$  sympatickou hodnotu 1. Třetí Keplerův zákon platí ale zcela obecně, nejen pro planety obíhající kolem Slunce, ale také například pro družice obíhající kolem Země. Pokud ale nebude splněna podmínka, že centrální těleso má mnohem větší hmotnost než sledované těleso, musíme použít přesné vyjádření 3. Keplerova zákona

$$\frac{P^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{(M + m)G}, \quad (11.3)$$

kde  $M$  je hmotnost centrálního tělesa,  $m$  hmotnost obíhajícího satelitu,  $P$  jeho oběžná doba,  $a$  velká poloosa jeho trajektorie a  $G$  gravitační konstanta.

## Doplňující literatura

- Bouvier, A., Wadhwa, M. 2010, The age of the Solar System redefined by the oldest Pb-Pb age of a meteoritic inclusion, *Nature Geoscience* 3, 637-641  
 Elliot, J. L., Dunham, E., & Mink, D. 1977, *Nature*, 267, 328  
 Elmegreen, B. G. 1979, *A&A* 80, 77  
 Galle, J. G. 1846, *MNRAS*, 7, 153  
 Haefner, R., Manfroid, J., & Bouchet, P. 1985, *The Messenger*, 42, 10  
 Hopkin, M., 2007, *Nature*, doi:10.1038/news.2007.261  
 Levison, H. F., Morbidelli, A., Van Laerhoven, C., Gomes, R., & Tsiganis, K. 2008, *Icarus*, 196, 258  
 Lin, D. N. C. 2008, *Scientific American* 298, 50-59

## 12 Exoplanety



Obrázek 12.1: Možný vzhled povrchu planety CoRot 7b podle Rona Millera.

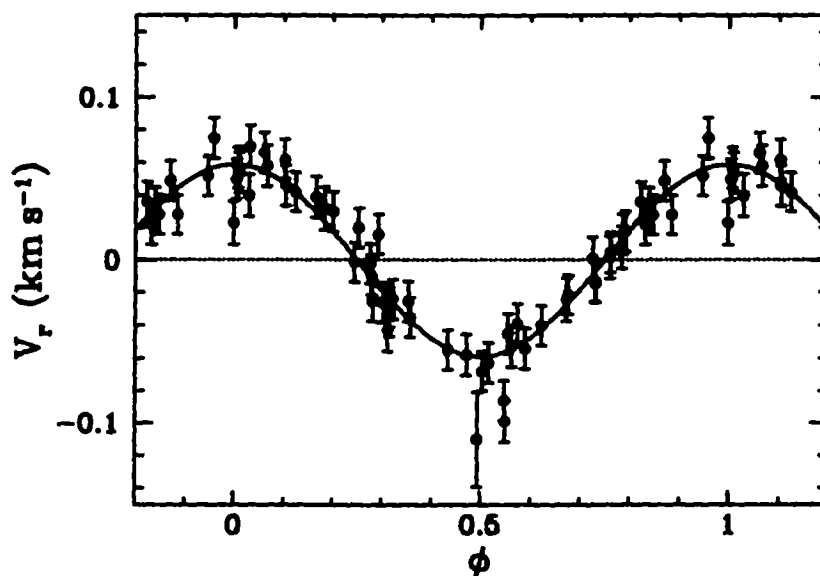
Po většinu 20. století se v astronomických učebnicích kapitoly o planetách týkaly jen planet naší Sluneční soustavy. Planety mimo solární systém, tzv. extrasolární nebo i zkráceně exoplanety, zůstávaly jen v rovině hypotetické. Pravda, uvažovalo se o nich už v antice. Někteří antičtí myslitelé neviděli důvod, proč by světy podobné našemu nemohly existovat jinde ve vesmíru. Na konci 16. století italský filozof Giordano Bruno zaplatil na tehdejší dobu odvážná tvrzení životem. Mimo jiné tvrdil, že Slunce není středem vesmíru, ale jen jednou z mnoha hvězd v nekonečném vesmíru, v němž existuje nekonečně mnoho sluncí s planetami, které mohou být i obydlené. Poznámku o jiných planetárních soustavách, které se řídí stejnými zákony gravitace, najdeme i v díle Isaca Newtona *General Scholium* (1713). První náznaky potvrzení existence planet mimo Sluneční soustavu přicházejí v polovině 19. století z měření vlastních pohybů hvězd, například v roce 1855 W. S. Jacob z Madraske observatoře poukázal na možné planetární těleso u dvojhvězdy 70 Ophiuchi. Později Peter van Kamp ohlásil dokonce několik objevů planet obíhajících kolem Barnardovy hvězdy. Všechna tato měření jsou však dnes považována za chybná. V roce 1988 publikovali kanadští astronomové B. Campbell, G. A. H. Walker a S. Yang výsledky měření radiální rychlosti hvězdy  $\gamma$  Cephei, které ukazovaly na existenci exoplanety. Definitivního potvrzení se objev dočkal až roku 2003. Prvními skutečně potvrzenými exoplanetami se tak stala dvojice objevená v roce 1992 Alexandrem Wolszczanem a Dalem Frailem, obíhající kolem pulsaru PSR 1257+12.<sup>1</sup> Přesto v řadě moderních učebnic najdete jako první objevenou exoplanetu až tu, jejíž

<sup>1</sup>Přes prvotní nedůvěru, jak se mohou planety vyskytovat u pulsaru, se dnes všeobecně soudí, že se tyto „pulsarové planety“ zformovaly buď z pozůstatků supernovy, ze které pulsar vznikl, nebo se jedná o kamenná jádra, které zbyla z plyných obrů po výbuchu supernovy a postupně klesla na novou orbitu.

objev ohlásili 6. října 1995 Michel Mayor a Didier Queloz z Ženevské univerzity (viz obrázek 12.2). Jejich exoplaneta totiž obíhá kolem běžné hvězdy hlavní posloupnosti (viz kapitola ??) 51 Pegasi vzdálené od Země 50 ly.

Od té doby se hon na exoplanety stal hitem. Roste počet prací, které se věnují exoplanetám, roste počet jejich pozemských pozorování. Velmi významnou roli hrají i vesmírné observatoře, jejichž jedním z hlavních úkolů je objevování a studium exoplanet. Jmenujme alespoň dvě družice - CoRoT a KEPLER. Soustředěným úsilím astronomické obce bylo do konce roku 2012 objeveno 673 extrasolárních planetárních soustav s 854 exoplanetami<sup>2</sup>.

Výzkum exoplanet je dnes opravdu jedním z nejrychleji se rozvíjejících odvětví astronomie a už mnohokrát se stalo, že jsme byli novými objevy nuceni výrazně pozměnit naše dosavadní představy.



Obrázek 12.2: Měření radiální rychlosti hvězdy 51 Pegasi v období duben 1994 až prosinec 1995. Křivka značí kruhovou trajektorii s periodou 4,2293 dne. Amplituda změn radiální rychlosti je 59 m/s. Převzato z článku Mayor, M.; Queloz, D.; *A search for substellar companions to solar-type stars via precise Doppler measurements: a first Jupiter mass companion detected* publikovaném v roce 1996 ve sborníku ASP Conference Series 109, str. 35.

## 12.1 Co je (exo)planeta?

S objevy nových planetárních světů samozřejmě vyvstala nutnost definovat precizně, co je to planeta. V minulosti se definice planety většinou odbyla výčtem, prostě se uvádělo, že planetou je Merkur, Venuše, Země, Mars, Jupiter, Saturn, Uran, Neptun, Pluto. Jenže s objevy velkých transneptunických těles a planet mimo Sluneční soustavu přestala taková jednoduchá definice platit. V roce 2006 byla, jak víme z předchozí kapitoly, přijata rezoluce Valného shromáždění Mezinárodní astronomické unie, která

<sup>2</sup>Aktuální počet objevených exoplanet lze zjistit na <http://www.exoplanet.eu>

definuje planetu jako objekt obíhající kolem Slunce s hmotností dostatečnou, aby gravitace napomohla vytvoření přibližně kulového tvaru (je v tzv. hydrostatické rovnováze), který není satelitem a v oblasti své trajektorie je dominantní. Jak je vidět, definice se netýká extrasolárních planet, pro něž se dosud užívá provizorní pracovní definice z let 2001 a 2003. Exoplanetou je objekt splňující následující kritéria:

- Hmotnost objektu je pod limitem pro termonukleární fúzi deuteria. Podle současných modelů je to 13 hmotností Jupitera ( $M_J = 1,9 \cdot 10^{27}$  kg) pro objekt slunečního složení<sup>3</sup>. Pro minimální hmotnost/velikost objektu platí stejné pravidlo jako v naší Sluneční soustavě.
- Objekt obíhá hvězdu nebo pozůstatek po hvězdě a nezáleží na tom, jak vznikl.
- Objekt, který překročí limitní hmotnost pro termonukleární fúzi deuteria, se nazývá „*hnědý trpaslík*“ bez ohledu na to, jak vznikl a kde se nachází.
- Volně plující objekty v mladých hvězdokupách s hmotnostmi pod hranicí termonukleární fúze deuteria nejsou planety, ale „*hnědí podtrpaslíci*“ (v angličtině „sub-brown dwarfs“).

Je zřejmé, že takovéto vymezení obsahu pojmu exoplaneta je nedostačující a bude třeba přijmout precizní definici. Modely jsou spočteny jen pro sluneční složení objektu. Řada autorů ale například připouští i exoplanety o hmotnosti až 20  $M_J$ , pokud má hvězda ještě jiného planetárního průvodce. A nesmíme zapomenout ani na objev bludných planet (na jaře roku 2011) – objektů planetární hmotnosti volně se potulujících naší Galaxií.

Jak byly objevovány další a další exoplanety, byly postupně tříděny do různých skupin, kde měřítkem byly většinou planety naší Sluneční soustavy. V literatuře o exoplanetách se dnes setkáte s následujícími pojmy:

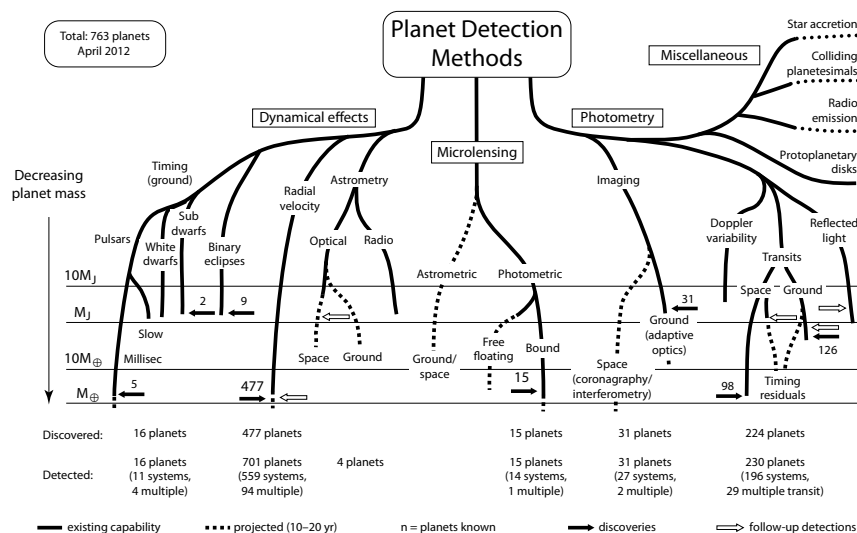
- *horcí jupiteři* – planety s hmotností porovnatelnou s Jupiterem nebo větší. Velmi malá vzdálenost od mateřské hvězdy (do 0,1 au) má za následek vysokou teplotu povrchu až 1000 °C. Mají nejspíše plynnou atmosféru. Zatím nejsou plně v souladu s teorií vzniku planet.
- *excentričtí exojupiteři* – tělesa s velice protáhlou trajektorií, která spíše připomíná dráhy krátkoperiodických komet. Zatím není zcela jasné, jak nečekaně velké hodnoty excentricit objasnit.
- *exoneptuni* – planety s hmotností od 10 do 25  $M_Z$  (hmotností Země). Objemově zde dominuje obálka z vodíku a hélia, ale hmotnost udávají hmotnější prvky.
- *superzemě* – především kamenné světy s rozměry značně přesahující Zemi, ale nepřesahující hmotnost 10  $M_Z$ , nebo poloměr 1,75  $R_Z$ .
- *terestrické planety* – kamenné planety zemského typu, s definovaným povrchem a hmotností menší než 5 až 10  $M_Z$  obíhající hvězdu slunečního typu.
- *exozemě* (v zónách života) – planety velikosti Země obíhající kolem mateřské hvězdy ve vzdálenosti, která by mohla zajistit přítomnost vody v kapalném stavu

<sup>3</sup>Se stejnou metalicitou (obsahem kovů) jako u Slunce – viz kapitola o Slunci

na povrchu planety. Jejich výzkum je branou k úvahám o možnostech života a rozvoji astrobiologie. Mezi dosud objevené exozemě patří například exoplanety objevené u hvězdy Gliese 581 (kamenná planeta asi 1,5krát větší než Země), COROT-7b (zhruba dvakrát větší než Země), planeta u hvězdy KOI 500 (poloměr  $1,3 R_Z$ ) nebo planety Kepler 20e, Kepler 42b,d, které jsou dokonce menší než Země.

- bludné planety<sup>4</sup> – objeveny na jaře 2011. Neobíhají kolem žádné hvězdy, ale volně se pohybují prostorem. Z původního místa vzniku byly vyvrženy díky gravitačním interakcím s ostatními planetami – svými „sourozenci“.

Výše uvedené termíny jsou sice neoficiální, ale běžně užívané. Oficiální je však systém značení exoplanet. Za označení hvězdy se vždy přidá malé písmeno latinské abecedy, přičemž se začíná od „b“ (například 51 Pegasi b). Označení hvězdy přitom vychází z nějakého hvězdného katalogu (HD katalog, Bayerův katalog a jiné) nebo jde o pořadové číslo v rámci projektu například KOI (pro hvězdy pozorované družicí Kepler) a podobně. Písmeno „a“ je vyhrazeno pro mateřskou hvězdu planetární soustavy, ale běžně se neužívá. Pokud má soustava více planet, pokračuje se dále přidělováním písmen c, d, e ... Písmena se přiřazují planetám v pořadí dle doby objevu, nikoli podle velikosti nebo vzdálenosti od mateřské hvězdy. Pro některé exoplanety se užívají i jména, například HD 209458b se někdy označuje Osiris nebo 51 Pegasi b se říká Bellerophon. Jedná se ale jen o neoficiální pojmenování. Mezinárodní astronomická unie po diskusi odmítla přidělování vlastních jmen exoplanetám.



Obrázek 12.3: Diagram metod detekce exoplanet. Stav k dubnu 2012. Převzato z <http://www.exoplanet.eu>.

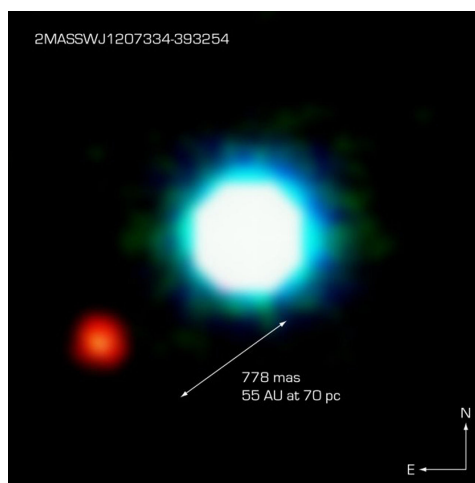
<sup>4</sup>V angličtině pro ně dosud neexistuje jednoznačný název, používá se označení jako rogue planet, interstellar planet, nomad planet, free-floating planet, orphan planet.

## 12.2 Přehled metod pro detekci exoplanet

Jak jsme již uvedli, že výzkum exoplanet rychle se rozvíjejícím odvětvím astronomie. Počet metod, které jsou schopny odhalit planety obíhající kolem vzdálené hvězdy, je už velké množství. Ty nejznámější jsou zobrazeny na diagramu M. Perrymana na obrázku 12.3. V dalším textu si postupně si přiblížíme ty neúspěšnější.

### 12.2.1 Přímé zobrazování

V astronomických knihách minulého století a starších se zcela běžně setkáváme s tvrzením, že přímé pozorování planet obíhajících jiné hvězdy než naše Slunce není možné. Důvody jsou zřejmé. Planety, jak je známe ze Sluneční soustavy, září většinou jen odraženým světlem slunečním. Mezi centrální hvězdou a planetou je tak velký rozdíl jasností. Navíc se bude jednat o vzdálené světy, takže jejich úhlová vzdálenost od centrální hvězdy bude velmi malá. Pokud bychom například Jupitera nechali obíhat kolem k Slunci nejbližší hvězdy Proxima Centauri ve stejné vzdálenosti, v jaké obíhá kolem Slunce (780 milionů kilometrů, asi 5,2 au), pak by planeta byla úhlově vzdálena od mateřské hvězdy jen 4" a její hvězdná velikost by byla o 12 mag větší než hvězdy. Nicméně vývoj přístrojové techniky jde kupředu opravdu mílovými kroky. Chauvin et al. (2004) pozorovali pomocí 8.2m Velmi velkého dalekohledu VLT Yepun (Very Large Telescope) planetu obíhající hnědého trpaslíka 2M1207 v souhvězdí Hydry (viz obrázek 12.4). Soustava je od nás vzdálena 53 pc. Planeta 2M1207b má hmotnost přibližně 4 hmotnosti Jupitera a obíhá kolem centrálního tělesa ve vzdálenosti 46 au. Jde o první objevenou exoplanetu obíhající kolem hnědého trpaslíka. Na počátku roku 2013 bylo přímým zobrazením objeveno 28 planetárních soustav s 32 planetami.<sup>5</sup>



Obrázek 12.4: Hnědý trpaslík 2M1207 (ve středu) a jeho planeta (červený objekt). Obrázek vznikl složením tří snímků ve filtrech blízké infračervené oblasti spektra H, K, L. Planeta je od mateřské hvězdy vzdálena jen 0.778". Zdroj: ESO PR Photo 14a/05.

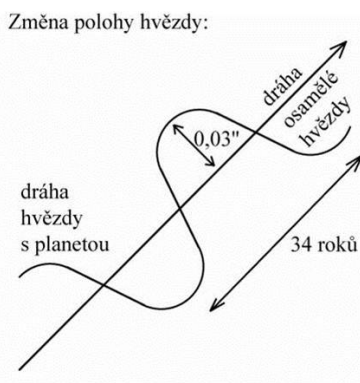
<sup>5</sup>Pro aktuální údaje navštivte <http://www.exoplanet.eu>



### 12.2.2 Astrometrie

Podoba hvězdné oblohy se na první pohled nemění. Při detailním zkoumání se ale ukáže, že se hvězdy přece jen velmi, velmi zvolna na hvězdné obloze pohybují. Tento pohyb je důsledkem jejich pohybu prostorem a my jej označujeme jako tzv. vlastní pohyb. Podobu uskupení hvězd na naší obloze takové vlastní pohyby hvězd ovlivní až za tisíce nebo desítky tisíc let. Vždyť hvězda s největším vlastním pohybem se posune o zhruba  $10''$  za rok. Měříme-li polohu hvězd velmi přesně, zjistíme, že některé hvězdy se neposunují po hvězdné obloze přímočaře, ale jejich pohyb je zvlněný. Tak byly také objeveny tzv. bílí trpaslíci, malé horké hvězdy obíhající velké souputníky, jako například Sírius B v roce 1862. Jenže planety jsou méně hmotné než hvězdy. Jejich gravitační působení na mateřskou hvězdu bude tedy podstatně slabší než v případě zmíněných bílých trpaslíků. Pokud by například byl hledanou planetou Jupiter obíhající hvězdu Proxima Centauri ve vzdálenosti 780 miliónů kilometrů, pak by se poloha Proximy vychylovala o  $\pm 0,03''$  každých 34 let, jak ukazuje obrázek 12.5. Potřebujeme tedy nejen velmi přesná astrometrická měření, ale také prováděná po delší dobu. Legendární družice Hipparcos sice změnila pozice více jak 100 000 hvězd s přesností na jednu tisícinu obloukové vteřiny, ale doba měření byla příliš krátká. Na jaro 2013 se chystá vypuštění družice GAIA, která má určovat polohu hvězd s přesností na jednu stotisícinu obloukové vteřiny u hvězd do 13 mag. Pro objev exoplanety by pak stačil i kratší čas.

Astrometrická metoda bude vhodná pro objevy zejména velkých, hmotných planet obíhajících kolem relativně málo hmotných hvězd. To se také potvrdilo, když Pravdo & Shaklan (2009) po mnoholetém úsilí astrometricky detekovali první exoplanetu obíhající kolem chladného trpaslíka VB10.



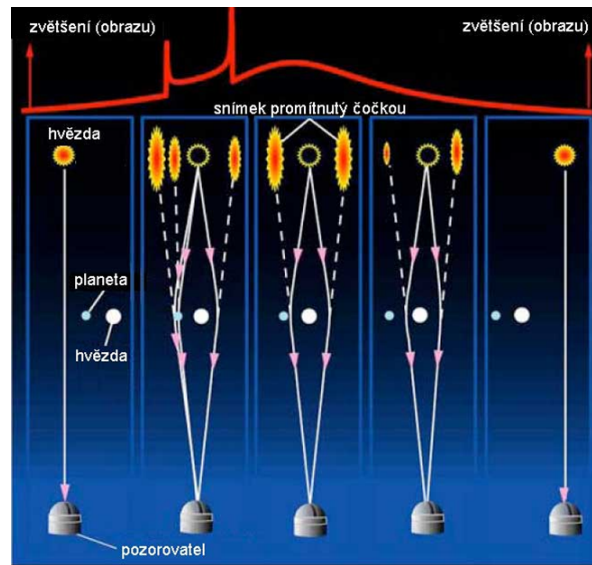
Obrázek 12.5: Možnosti astrometrické detekce exoplanet. Převzato z Pokorný (2006).

### 12.2.3 Gravitační mikročochky

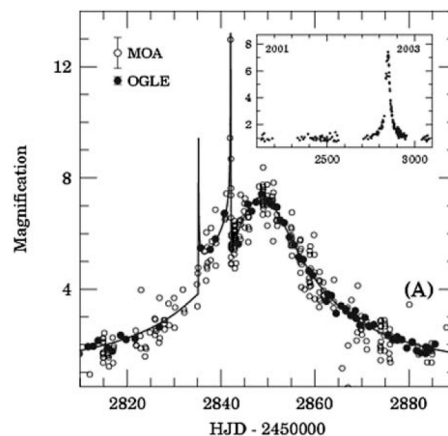
V hledání exoplanet nám pomáhá i Einsteinova obecná teorie relativity. Podle ní jsou totiž paprsky procházející v okolí velmi hmotných objektů zakřiveny. Pokud tedy budeme sledovat velmi vzdálený objekt a mezi ním a námi bude procházet nějaké velmi hmotné těleso, dojde ke zjasnění vzdáleného objektu. Pokud kolem objektu, který hraje roli

čočky,<sup>6</sup> navíc obíhá nějaká planeta, může se na křivce zjasnění objevit ještě další velmi krátké zjasnění, jak je vidět na obrázku 12.7.

Úskalím metody je ale to, že doba zjasnění záleží na hmotnosti čočkujícího objektu a je obecně velmi krátká. Navíc je to neopakovatelná událost. Takže pravděpodobnost, že něco takového u vybrané hvězdy zaregistrujete je velmi malá. Přesto se to už podařilo. Od první práce (Bond et al., 2004) je k počátku roku 2013 známo už 18 exoplanet objevených tímto způsobem a dokonce dvě planetární soustavy (Han et al., 2013).

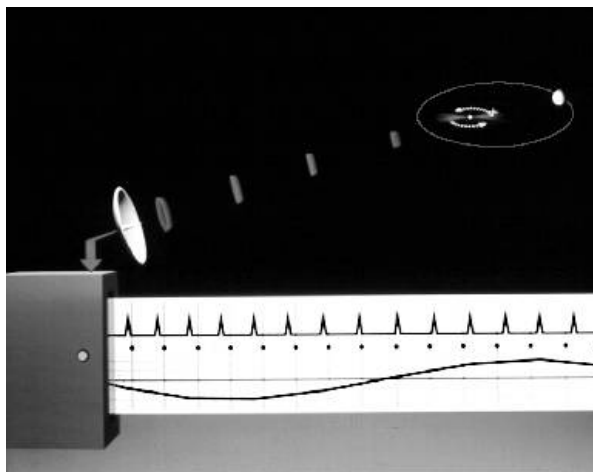


Obrázek 12.6: Ilustrace metody gravitační mikročocky v detekci exoplanet. Převzato z <http://astronomia.zcu.cz>.



Obrázek 12.7: Pozorování planety gravitační mikročockou v projektu OGLE (Bond et al., 2004). Vložený obrázek ukazuje všechna měření hvězdy z projektu OGLE v letech 2001 až 2003. Hlavní obrázek ukazuje bližší pohled na data z roku 2003 ze dvou projektů OGLE a MOA.

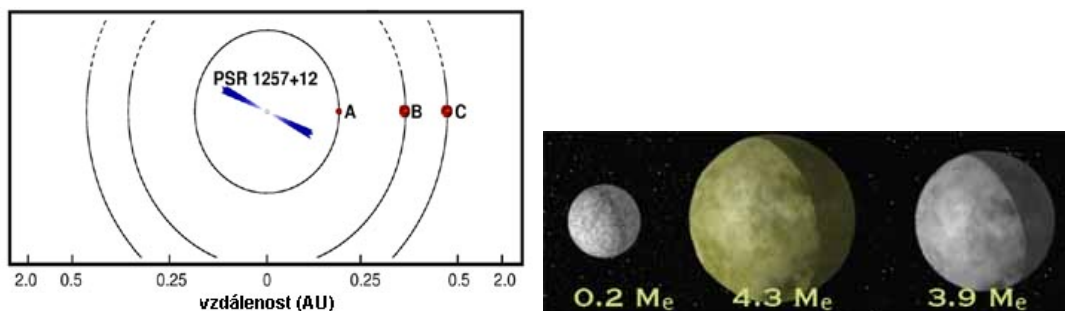
<sup>6</sup>Pokud je objektem, který dle obecné teorie relativity způsobuje zakřivení paprsků, galaxie, mluvíme o gravitační čočce. V případě hvězdy, nebo dokonce menšího objektu, mluvíme o mikročocke.



Obrázek 12.8: Princip metody zpoždování záblesků pulsarů. Zachycený signál z pulsaru je zpracován například od grafické podoby uvedené ve spodní části obrázku. Časy naměřených hodnot se liší od očekávaných (černé tečky). Z těchto časových rozdílů vznikla křivka úplně dole, která poukazuje na těleso obíhající kolem pulsaru. Převzato z <http://astronomia.zcu.cz>.

### 12.2.4 Zpoždování záblesků pulsarů

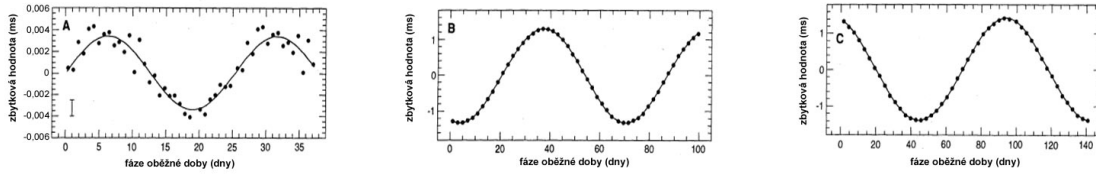
Vzpomenete si na historii objevování exoplanet? První detekci exoplanety, dokonce hned systému exoplanet učinili Wolszczan a Frail v roce 1992 v okolí pulsaru<sup>7</sup> PSR 1257+12. Jenže o jejich objevu silně pochybovalo. Krátce před tím byl jeden takový objev odvolán a navíc nebylo zřejmé, jak mohou mít pulsary nějaké planety. Dnes už jejich objev nejen potvrzen, ale přibýly i další planety u pulsarů. Jejich detekce vychází z jednoduchého principu. Planeta obíhající kolem pulsaru na něj gravitačně působí a tak dochází ke zpoždování nebo zrychlování jednotlivých velmi rychlých záblesků, jak vidíme na obrázku 12.10. Metoda analýzy zpoždování záblesků pulsarů<sup>8</sup> vedla zatím k potvrzeným objevům pěti planet. Několik dalších kandidátů přitom čeká na potvrzení.



Obrázek 12.9: Pulsar PSR 1257+12 a jeho planetární soustava. Převzato z <http://astronomia.zcu.cz>.

<sup>7</sup>Pulsarů se budeme věnovat v druhé části kurzu Základů astronomie. V této chvíli se spokojíme s konstatováním, že pulsary jsou několikakilometrové kompaktní hvězdy, které se dokáží otočit kolem své osy i tisíckrát za sekundu. Do prostoru vysílají intenzivní záření v úzkých kuželích, které pokud jsou vhodně orientovány, způsobují milisekundové záblesky.

<sup>8</sup>V anglicky psané literatuře se používá termínu „Pulsar timing“.

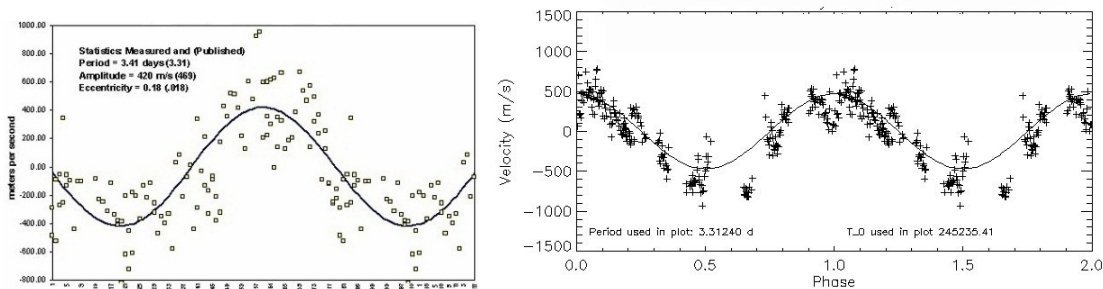


Obrázek 12.10: Zbytkové hodnoty času z měření pulsaru PSR 1257+12, na kterých je vidět vliv oběžných dob 25,34 dne (planeta A), 66,54 dne (planeta B) a 98,22 dne (planeta C). Pozorování bylo prováděno po dobu 3 let. Na každém snímku je vliv ostatních dvou planet odfiltrován. Pro planetu A je na snímku zřetelná nejistota výsledku důsledkem digitálního zpracování signálu. Pro planety B a C jsou nejistoty nepostřehnutelné. Převzato z <http://astronomia.zcu.cz>

## 12.2.5 Radiální rychlosti

Na projevech gravitačního působení planety na mateřskou hvězdu je založeno několik metod. Ale nejúspěšnější je metoda měření změn radiální rychlosti mateřské hvězdy. Pomocí velmi citlivého spektrografu zkoumáme posunu čar ve spektru mateřské hvězdy způsobený Dopplerovým jevem. Jak planeta obíhá kolem mateřské hvězdy, periodicky přispívá k její radiální rychlosti, pravidelně ji zvětšuje a zmenšuje. Tyto změny jsou velmi malé. Například změny radiální rychlosti našeho Slunce způsobené Jupiterem se pro vzdáleného pozorovatele projevují příspěvkem 12,5 m/s a naše Země přidává jen 0,1 m/s. Od přelomu 80. a 90. let minulého století se několik týmů astronomů pokoušelo o detekci těchto změn radiální rychlosti vytipovaných hvězd. Počáteční přesnost určení radiální rychlosti hvězd byla kolem 15 m/s, dnes nejlepším přístrojem v tomto směru je HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher) na observatoři ESO La Silla v Chile s efektivní přesností zhruba 0,3 m/s ale zlepšování dále pokračuje. Cílem je přesnost zhruba 0,01 m/s.

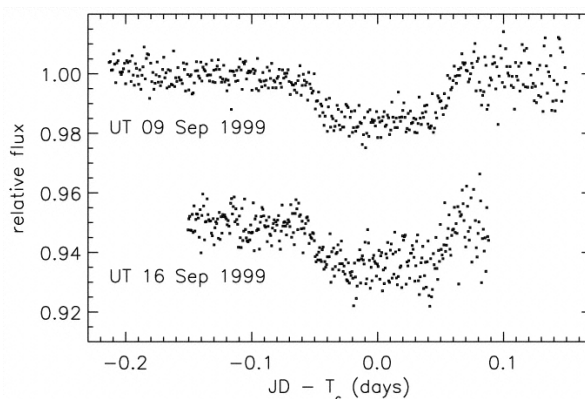
První exoplaneta (mimo těch pulsarových) byla objevena právě metodou měření radiálních rychlostí u hvězdy 51 Pegasi (viz obrázek 12.2). Na počátku roku 2013 bylo touto metodou objeveno 389 planetárních systémů s 503 planetami. Pozoruhodné je to, že k tomuto číslu nyní přispívají už i amatérští astronomové (viz obrázek 12.11).



Obrázek 12.11: Křivka radiálních rychlostí hvězdy  $\tau$  Boo jasně ukazuje přítomnost exoplanety. Měření byla provedena skupina amatérských astronomů v letech 2000 (obrázek vlevo) a 2004. Převzato z <http://www.spectrashift.com>.

### 12.2.6 Transity

Několik předchozích metod využívalo pro detekci exoplanet jejich gravitační působení na mateřskou hvězdu. Následující metoda ale využívá úplně jiný efekt. Pokud máme štěstí a oběžná rovina exoplanety je skloněná, že zorný paprsek ze Země leží v této rovině, pak exoplaneta během oběhu kolem mateřské hvězdy přechází přes disk hvězdy nebo se za něj celá schová. Přechod temného kotoučku planety přes zářivý disk hvězdy způsobí maličký pokles jasnosti hvězdy zhruba na úrovni jednoho procenta. Pokles hvězdné velikosti centrální hvězdy takového systému můžeme měřit v milimagnitudách. Po objevu prvních exoplanety 51 Pegasi b začal závod, kdo objeví jako první transituující exoplanetu. V roce 1999 uspěly hned dva týmy. Oba sledovaly hvězdu HD 209458, u níž byla již exoplaneta objevena z křivky radiálních rychlostí a oba poslaly výsledky do stejné redakce. Charbonneau et al. (2000) poslali sice článek o den později, ale jejich pozorování zachycují transity v září 1999 (viz obrázek 12.12), zatímco Henry et al. (2000) měřili hvězdu až v listopadu téhož roku.

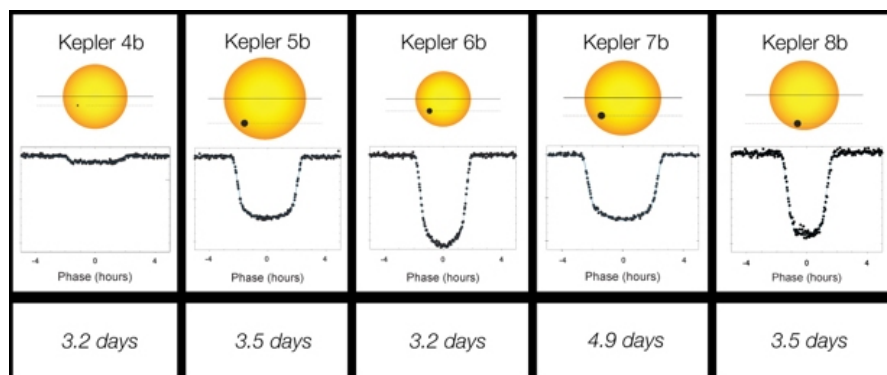


Obrázek 12.12: První zaznamenané transity exoplanety HD 209458 b. Zdroj: Charbonneau et al. (2000).

Od té doby se na měření transitů vrhli i amatérští pozorovatelé. Dokonce už jsou zaznamenány transity exoplanet pomocí digitálních fotoaparátů. Pozorovatelé s menšími přístroji sice nemohou konkurovat velkým dalekohledům nebo kosmickým družicím v přesnosti, ale jejich monitorování velkého množství exoplanet umožní zpřesnění jejich oběžné doby. Do těchto aktivit se velmi významně zapojila i Sekce proměnných hvězd a exoplanet České astronomické společnosti. Její databáze transitů ETD (Exoplanet Transit Database) je celosvětově uznávána a využívána například i odborníky NASA.<sup>9</sup> Ve světě existuje řada projektů, zaměřených na hledání exoplanet tímto způsobem, například HAT (Hungarian-made Automated Telescope), TrES (The Transatlantic Exoplanet Survey), WASP (The Wide Area Search for Planets) a další. Počátkem roku 2013 je potvrzen objev 236 planetárních soustav s 291 planetou. Nicméně nejvýkonnějším dodavatelem nových objevů jsou nyní družice, zejména satelit KEPLER. Ke konci roku 2012 už zaznamenala události podobné transitům exoplanet u zhruba 18 tisíc hvězd. Z nich více než dva tisíce jsou pravděpodobně opravdu soustavy s exoplanetou.

<sup>9</sup>Více na stránkách Sekce proměnných hvězd a exoplanet <http://var2.astro.cz>, respektive jejich projektu TRESKA zaměřeného na transituující exoplanety <http://var2.astro.cz/tresca/index.php>.

V současné době je tedy největším „lovcem“ exoplanet družice KEPLER. Hledání exoplanet tvoří podstatnou část náplně také u družice COROT. Připravují se i další specializované družice pro hledání a studium exoplanet jako TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite), Cheops (CHaracterising ExOPlanets Satellite), FINESSE (Fast INfrared Exoplanet Spectroscopic Survey Explorer), New Worlds Mission, EXCEDE (EXoplanetary Circumstellar Environments and Disk Explorer). Řada podobných projektů byla ale pro nedostatek peněz zrušena. Budoucnost nám ukáže.



Obrázek 12.13: Ukázka transitů pěti exoplanet pozorovaných družicí KEPLER. Zdroj: NASA.

## Doplňující literatura

- Bond, I. A., Udalski, A., Jaroszyński, M., et al. 2004, ApJ Letters 606, L155  
 Han, C., Udalski, A., Choi, J.-Y., et al. 2013, ApJ Letters 762, L28  
 Henry, G. W., Marcy, G. W., Butler, R. P., & Vogt, S. S. 2000, ApJ Letters 529, L41  
 Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., & Mayor, M. 2000, ApJ Letters, 529, L45  
 Chauvin, G., Lagrange, A.-M., Dumas, C., et al. 2004, A&A 425, L29  
 Pokorný, Z., 2006, Vademecum - Váš průvodce vesmírem, Hvězdárna a planetárium M. Koperníka v Brně  
 Pravdo, S. H., & Shaklan, S. B. 2009, ApJ 700, 623

## 13 Jsou tam?

Před několika staletími se za myšlenky o mimozemském životě ve vesmíru upalovalo. Před několika desítkami let byly snahy o výzkum mimozemského života spíše brány jako výstřelek. Dnes je astrobiologie jako věda o vzniku, vývoji, rozšíření a budoucnosti života ve vesmíru jednou z nejrychleji se rozvíjejících vědních disciplín astronomie. Jde o multidisciplinární vědní obor, který spojuje poznatky z chemie, fyziky, biologie, molekulární biologie, ekologie, geografie či geologie. Astrobiologie pracuje s hypotézami, které se odvíjí od našich současných poznatků a pro jejich testování používá řadu vyspělých technologií. Základní cíle astrobiologie zformulované v dokumentu *NASA Astrobiology Roadmap*<sup>1</sup> (Des Marais et al., 2008) lze shrnout do následujících bodů:

- vznik života, mechanismy a podmínky
- původ života na Zemi
- výskyt života ve vesmíru a jeho hledání

Jestliže se budeme zajímat o výskyt života ve vesmíru, měli bychom nejdříve definovat, co vlastně život je. V roce 1944 publikoval Erwin Schrödinger sborník svých přednášek s názvem *What is Life?* (Co je život?). Formuloval v ní dvě základní myšlenky, které ovlivnily generace přírodovědců. První z nich je hypotéza, že hmotnými nositeli genetické informace v živých organismech jsou složité molekuly. V těchto strukturách má každý atom nebo skupina atomů svůj význam. Jejich uspořádání není ani zcela chaotické, ani se nudně neopakuje jako nějaká periodická struktura. Schrödinger proto tyto uvažované nositele genetické informace označuje termínem „aperiodický krystal“. Druhou často zmiňovanou myšlenkou je teze, že hlavním cílem metabolismu není výměna látek či získávání energie, ale to, že se organismus „zbavuje entropie“, kterou během své existence nutně produkuje. Schrödingerovy myšlenky v 50. letech minulého století výrazně pomohly k nalezení genetických molekul. DNA byla sice známa od roku 1869, ale její role v reprodukci a její šroubovicový tvar objevili až Watson & Crick (1953).

V roce 2002 americký biolog a biochemik Stuart Kauffman popsal život jako „fyzikální soustavu schopnou vlastní reprodukce a vykonání alespoň jednoho termodynamického pracovního cyklu“. Později vydal D. Schulze-Makuch, s L. N. Irwinem knihu (2008), v níž definuje život jako systém tvořený vázaným prostředím v termodynamické nerovnováze s okolím, schopný transformovat energii za účelem snížení entropie, a schopný uchovávat a přenášet informaci. V roce prvního vydání jejich knihy přišla s definicí života i NASA, která jako život označuje chemický systém schopný Darwinovské evoluce. Obecně lze tedy říci, že za živé označujeme systémy, které:

- jsou časově a prostorově ohraničené,
- otevřené – vyměňují s okolím energii, látky a informace,
- hmotné a jednotného chemického základu – především sloučeniny uhlíku (nukleové kyseliny a proteiny),
- mají vysokou organizovanost – nízká entropie,
- mají schopnost - samostatné existence, - samostatné údržby, - samostatné reprodukce, - vývoje.

Jako základní jednotku všech živých soustav chápeme buňku.

<sup>1</sup><https://astrobiology.nasa.gov/roadmap/>

## 13.1 Vznik života

Otázce vzniku života se věnovali lidé od nepaměti. Jde o složitou vědecko-filozoficko-náboženskou otázku, která není dodnes uspokojivě vyřešena. Až do poloviny 18. století mezi učenci převládala naivní abiogeneze, tedy názor, že určité formy života vznikají spontánně z neživé hmoty. Tehdy Francouzská akademie věd vypsala cenu pro toho, kdo otázku vzniku života vyřeší. Získal ji ale až Louis Pasteur v 60. letech 19. století. Charles Darwin v roce 1871 napsal, že první život mohl začít v „malém jezírku, ve kterém byla spousta amoniaku a fosforečnanů, světla, tepla, elektřiny, atd., takže mohly vzniknout bílkoviny, které potom podléhaly dalším změnám“.

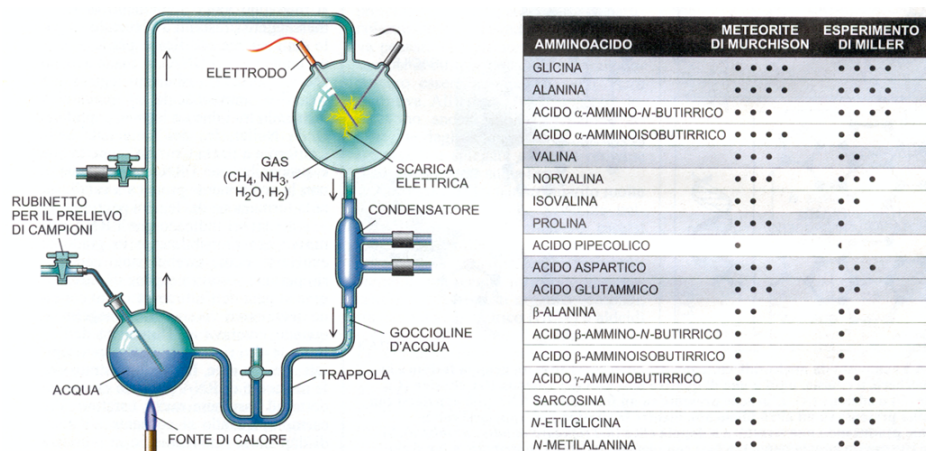
V 19. a 20. století vědci oprášili myšlenku řeckého filozofa Anaxágora z r. 450 př.n.l., že život se na Zemi mohl dostat z vesmíru v podobě tzv. panspermie. Ve své době ji obhajovali například H. von Helmholtz nebo W. Thompson (lord Kelvin). Teorii panspermie rozpracoval na počátku 20. století švédský nositel Nobelovy ceny, fyzik a chemik Svante Arrhenius a později další nositel Nobelovy ceny, spoluobjevitel struktury DNA F. Crick. Nové objevy ukazují, že přinejmenším některé organické molekuly nezbytné pro vznik a rozvoj života, se opravdu mohly dostat na Zemi z vesmíru.

Ve 20. letech minulého století publikovali nezávisle Brit John Burdon Sanderson Haldane a Rus Alexandr Ivanovič Oparin teorie o postupném vzniku organických molekul z jednoduchých anorganických látek, které se vyskytovaly na mladé Zemi. Oparin předpokládal, že organické molekuly se díky silným deštům dostávaly do vody, kde se kvůli periodickému vysychání mohly v menších kalužích koncentrovat. Tak mohla vznikat ona známá „prebiotická polévka“. Teorii ověřili praktickým pokusem Stanley Miller a Harold Urey v roce 1952 (viz obrázek 13.1). Jejich zjištění (Miller, 1953; Miller & Urey, 1959) vyvolala řadu dalších experimentů. Například v letech 1959–1960 získal Sidney Fox experimentální potvrzení, že za teplot kolem 170°C a vysokého tlaku mohou samovolně vznikat řetězce až o 200 aminokyselinách. Dokonce i nový rozbor vzorků původního Millerova experimentu po jeho smrti odhalil více aminokyselin, než on sám uváděl (Lazcano & Bada, 2004).

V současnosti se vědci shodují, že na počátku musely mít i nejjednodušší živé buňky tři atributy: alespoň vnější obal (membránu), fungující metabolismus a zajištěný způsob přenosu genetické informace. Existence a role všech tří je víceméně prokázaná, ale jejich posloupnost zřejmá není. Moderní teorie popisující vznik života na Zemi se tak liší zejména podle důrazu kladeného na jednotlivé atributy:

1. teorie upřednostňující genetický kód sází na „nahé“ geny, které až později získaly vlastnosti buňky;
2. teorie preferující metabolismus pracují se shluky organických molekul bez membrány, schopných vytvářet série chemických reakcí;
3. teorie preferující membránu operují s různými molekulami, které zejména ve vodním prostředí samovolně tvoří struktury pohlcující různé molekuly a také genetický kód.





Obrázek 13.1: Aparatura, v níž Miller a Urey simulovali podmínky na Prazemi. V atmosféře z vodíku, metanu a čpavku vznikly s pomocí elektrických výbojů za několik dní značné aminokyseliny a organické sloučeniny (stejně objeveny i v Murchinsonském meteoritu). Zdroj: <http://www.bionat.unipi.it>.

## 13.2 Život ve vesmíru z pohledu astronoma

Vědci zkoumající vznik a vývoj života ve vesmíru už před mnoha lety vymezili tzv. mrtvé zóny ve vesmíru, tedy oblasti, kde podle nich život nemůže vzniknout a i kdyby tam byl importován, nemůže se tam ani udržet. Jedná se například o místa s nedostatkem těžších prvků s obrovskou intenzitou záření a podobně. Mrtvé zóny tedy budeme hledat v okolí prvních hvězd vzniklých po velkém třesku, v eliptických galaxiích, v malých galaxiích, v kvasarech, v centrálních oblastech galaxií, v okolí magnetarů, supernov a podobně. Nicméně v posledních letech jsou naše představy stále více konfrontovány s novými objevy (astro)biologů přímo zde na Zemi.

Studium tzv. extremofilních organismů, které přežívají v extrémních podmínkách, velmi často vedly ke korekci našich představ o životě ve vesmíru a ke zmenšení pomyslných mrtvých zón. Posuďte sami. Byly nalezeny organismy, které žijí za teplot až 121°C, bez kyslíku, při tlaku desítek až stovek MPa, v prostředí s pH -0.06 až 10.5, které jsou schopny fotosyntézy v teplotách -20°C až +75°C nebo takové, které přežily několikaletý pobyt v kosmickém prostoru. Byly objeveny mikroorganismy, které přežívaly v chladicích nádobách jaderných reaktorů. Jedním z takových neuvěřitelně nezdolných tvorečků je želvuška (viz obrázek 13.2), která vydrží dávky radioaktivního záření až 15 000 Gy<sup>2</sup>. Pro srovnání uveďme, že pro člověka je smrtelná dávka už 5 Gy.

Astrobiologové se dnes shodují, že pro život jsou nezbytné následující podmínky:

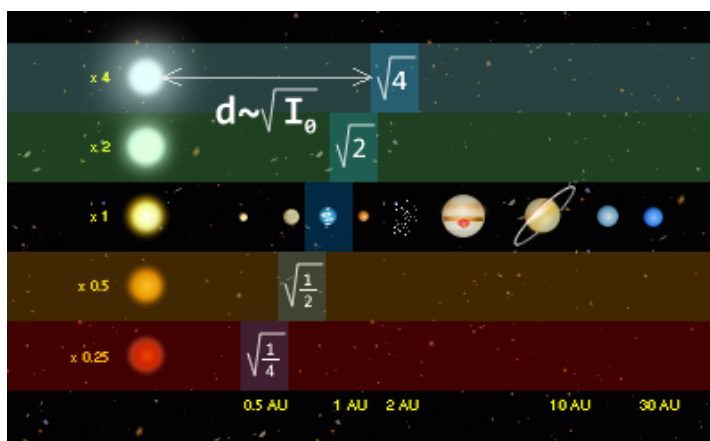
- existence vody v tekutém stavu (dlouhodobá);
- existence vody ve všech skupenstvích;
- vhodná teplota a tlak;
- desková tektonika.

<sup>2</sup>Jeden gray je jednotkou absorbované dávky, která je definována jako poměr střední energie předané ionizujícím zářením látce o jisté hmotnosti. Fyzikální rozměr 1 Gy = 1 [J/kg].



Obrázek 13.2: Želvušky jsou miniaturní členovci (maximálně 1,5 milimetru velcí). V Česku žije několik desítek druhů. Nejrozšířenější je medvíďátko obecné. Zdroj: <http://www.ekonom.cz>.

Zejména existence vody ve všech třech skupenstvích vymezuje teplotní a tlakové podmínky na povrchu planet. Pro dosažení vhodných zejména teplotních podmínek je nutné, aby planeta byla v optimální vzdálenosti od své mateřské hvězdy. Taková vhodná vzdálenost je vymezena tzv. zónou života<sup>3</sup>. Na obrázku 13.3 jsou vymezeny zóny života pro hvězdy s různým zářivým výkonem ve srovnání se Sluncem. V naší Sluneční soustavě je v zóně života jen Země. Venuše je příliš blízko u Slunce a Mars už příliš daleko. Naše hledání života ve vesmíru se tedy soustřeďuje na exoplanety v zónách života a takových už byla zejména díky sondě Kepler objevena celá řada.



Obrázek 13.3: Zóny života podle zářivého výkonu hvězdy. Zdroj: wikipedia.

### 13.3 Četnost života ve vesmíru - Drakeova rovnice

Několik desetiletí před objevem první exoplanety v listopadu 1961 diskutovalo na radioastronomické observatoři v americkém Green Banku jedenáct vědců o hledání mimo-

<sup>3</sup>V angličtině se používá termínu „habitable zone“, případně „life supporting zone“.

zemských civilizací (projektu SETI<sup>4</sup>). Nadšený zastánce mimozemského života Frank Drake ve svém příspěvku seznámil přítomné, jak lze jednoduše odhadnout počet civilizací žijících v současné době v naší Galaxii. Základní myšlenka je opravdu jednoduchá. Pro vznik vyspělé civilizace je třeba splnění řady podmínek a jejich pravděpodobnost označíme číselně na škále od 0 (nenastanou nikdy) až po 1 (bude splněno vždy). Výsledná pravděpodobnost je pak dána jako součin pravděpodobností jednotlivých nezávislých okolností. Vznikla tak známá Drakeova rovnice vyjadřující pravděpodobnost výskytu civilizací podobných naší v Galaxii

$$N = R_* f_p n_e f_l f_i f_c L, \quad (13.1)$$

kde:

$N$  – předpokládaný výsledek, počet vyspělých inteligentních civilizací schopných mezihvězdné komunikace

$R_*$  – označení přírůstku počtu hvězd v Galaxii za určité období (6 – 40; 10 za rok)

$f_p$  – podíl hvězd, které mají planetární systémy (0,1 – 0,5; 0,5)

$n_e$  – průměrná hodnota počtu planet v planetárním systému, na kterých panují vhodné podmínky pro život (0,5 – 2,5; 2)

$f_l$  – podíl planet, na kterých se život skutečně vyvine (0,01 – 1; 1)

$f_i$  – poměr z předchozího, kde se dospělo až k inteligentní formě života ( $10^{-7}$  – 1; 0,01)

$f_c$  – podíl inteligentních forem života, které dosáhly schopnosti aktivní mezihvězdné komunikace (0,01 – 0,1; 0,01)

$L$  – odhad délky existence inteligentní životní formy schopné mezihvězdné komunikace (100 –  $10^9$ ; 10000 let)

Samotný výpočet je skutečně triviální, ale odhad jednotlivých činitelů rozhodně triviální není. A tady právě je největší slabina Drakovy rovnice. Jednotlivé parametry se vzájemně ovlivňují a jejich odhady jsou velmi nejisté a diskutabilní. Řada parametrů se u různých autorů liší i o několik řádů (například v (Bhattacharya & Raha, 2012)). Existuje sice řada modifikací této rovnice, ale žádná z nich neřeší výše zmíněný nedostatek. Kritiku Drakovy rovnice velmi trefně shrnul autor vědecko-fantastické literatury Michael Crichton během své přednášky na Caltechu v roce 2003: „Problém spočívá v tom, že žádný z těch členů není znám a většinou jej dokonce ani není možné odhadnout. Jediný způsob, jak s tou rovnicí pracovat, je vyplnit ji odhady. [...] Výsledkem je, že Drakeova rovnice může mít jakoukoli hodnotu od mnoha miliard po nulu. Výraz, který může mít jakoukoli hodnotu, neznamená nic. Přesně řečeno, Drakeova rovnice skutečně nemá smysl...“.

### 13.3.1 Život na Zemi – typický vzorek?

Současné výsledky ukazují, že život na Zemi mohl vznikat už v době před 4.4 miliardami let. Podmínky nebyly pro organismy příliš příznivé, ale objevy extremofilních organismů z poslední doby ukazují, že byly pro život přijatelné. Dříve se jako časová hranice vzniku života uvažoval konec intenzivního bombardování před přibližně 3.8 až 4.0

<sup>4</sup>Akronym SETI vznikl z anglického názvu projektu „Search for Extra-Terrestrial Intelligence“, tedy Hledání mimozemské inteligence.

miliardami let. Meteority dopadající na zemský povrch mohly být velmi ničivé, ale nikoli fatální. Převládá názor, že působily spíše lokálně a v žádném případě nezasáhly celou planetu. Naopak, dopadající tělesa mohla působit pozitivně, mohla vytvářet specifická vhodnější prostředí nebo přinášet na Zemi již hotové organické sloučeniny, které mohly posloužit i jako stavební kameny pro vznik života. V roce 2011 splaskla další mediální bublina. Michael Callahan s kolektivem spoluautorů s velkou slávou tvrdil, že „život přišel z vesmíru“. Toto sdělení bylo ale založeno jen na tom, že ve 3 z 12 uhlíkatých chondritů našli vzácné dusíkaté sloučeniny, které mohou sloužit jako základy pro nukleové kyseliny. Nedávno ohlásily hned dva týmy objev mikrofosilií ve vápencích starých 3,4 miliardy let z oblasti Strelley Pool v Západní Austrálii (Wacey et al., 2011). Zástupci obou týmů v článku tvrdí, že se poučili z řady předchozích omylů a že se jedná skutečně o zbytky dávných buněk a nikoliv neživé struktury. Nicméně zásadní otázka, zda život vznikl na Zemi nebo zda byl na naši planetu zavlečen z kosmu, zůstává stále nezodpovězena. A kdoví, zda bude v budoucnu vyřešena. Jisté je, že „dodávky z vesmíru“ přispěly ke vzniku a rozvoji života na Zemi a možná i zcela zásadním způsobem.

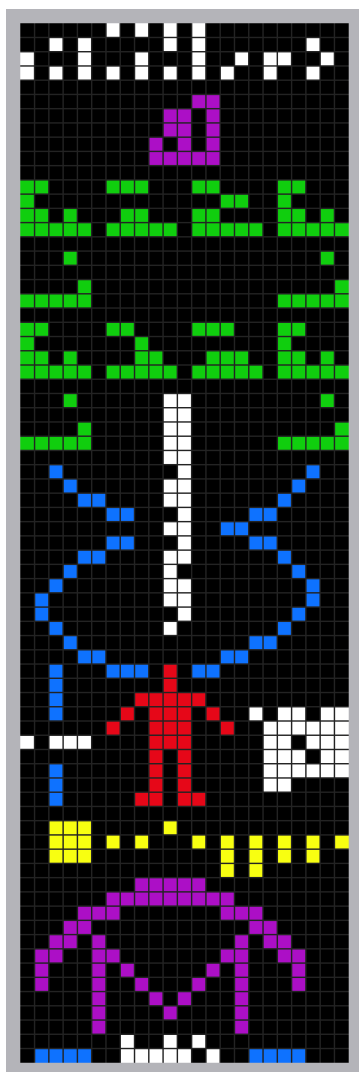
Dnes tedy na Zemi rozvinutý život je. Ale je takový život vůbec detekovatelný z kosmu? Pokud by se nějaká civilizace vydala na průzkum vesmíru a měla pro testování jen naši současnou techniku, odhalila by vůbec život na zemi? Takovou otázku si položili vědci na konci 80. let minulého století. V prosinci roku 1990 provedli test se sondou Galileo. Získané výsledky potvrdily, že je možné i s tehdejší technikou odhalit pomocí kosmických sond život. Sonda Galileo tak na cestě k Jupiteru prakticky demonstrovala možnost sond při hledání inteligentního života ve vesmíru (Šklovskij & Sagan, 1966).

## 13.4 Hledání mimozemského života

Jsou-li ve vesmíru inteligentní bytosti, jak s námi budou komunikovat? Cocconi & Morrison (1959) v článku „Pátrání po mezihvězdném spojení“ se domnívali, že mimozemské civilizace by měly znát frekvenci neutrálního vodíku 1420 MHz (vlnová délka 21 cm) a na ní také nejpravděpodobněji vysílat. Následujícího roku se Frank Drake o takovou komunikaci pokusil pomocí radioteleskopu o průměru 25 metrů na observatoři Green Bank ve Virginii. První projekt SETI nazval Ozma a v jeho rámci zkoumal rádiové vlny od hvězd  $\tau$  Cet a  $\epsilon$  Eri. Během 150 hodin pozorování ale nic zajímavého neobjevil. Projekt ale inspiroval i další pracoviště k podobným pokusům. V 60. letech minulého století se do povědomí široké veřejnosti dostaly dvě knihy od významných vědců věnované otázkám mimozemských civilizací. V roce 1962 vydal Josif S. Šklovskij průkopnickou knihu *Vselennaja, žizň, razum* (Vesmír, život, rozum), kterou později Carl Sagan doplnil a jako spoluautor vydal pod názvem *Intelligent Life in the Universe* (Inteligentní život ve vesmíru). V roce 1966 se kniha stala bestsellerem.

V roce 1971 se konalo v Bjurakanu (Arménie) mezinárodní symposium věnované mimozemským civilizacím. Jednání se účastnili nejen astronomové, ale i biologové, radiotechnici, lingvisté. Závěry široké mezioborové diskuse však byly spíše pesimistické. Optimismus 60. let se vytratil. Přesto se v hledání mimozemských civilizací pokračovalo. V roce 1974 dokonce začal projekt CETI (Communication with extra-terrestrial intelligence), který se snažil přímo o komunikaci s mimozemšťany. Z 305m

radioteleskopu v Arecibu byla směrem do kulové hvězdokupy M13 odeslána symbolická zpráva o Sluneční soustavě, Zemi a lidstvu, kterou připravili Frank Drake a Carl Sagan (viz obrázek 13.4).



Obrázek 13.4: Grafické znázornění zprávy odvyšlávané radioteleskopem v Arecibu. Zdroj: wikipedia.

Dosud nejsilnější a nejjasnější signál v rámci projektů SETI byl zachycen 15. srpna 1977 při rutinním monitoringu na radioteleskopu Ohijské státní univerzity. Během 72 sekund signál vzrostl 30krát nad úroveň šumu a pak se opět ztratil. Profesor Jerry R. Ehman byl natolik šokován zaznamenaným signálem, že na registrační pás papíru signál označil a připsal nadšené WOW! Dnes je toto pozorování známo právě jako WOW signál. Bohužel další pátrání po zdroji bylo marné.

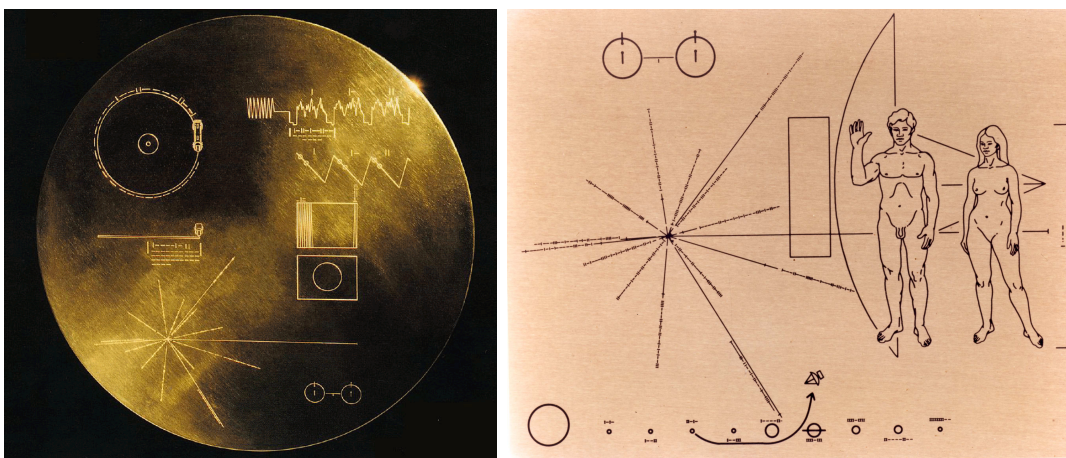
V roce 1984 vznikl Institut SETI, oficiálně podporovaný NASA, který řídil několik projektů hledání mimozemského života - například projekty Phoenix nebo SERENDIP. Bohužel v dnešní době nemá NASA na provoz ústavu peníze a ten je financován ze soukromých zdrojů. Nejštědřejším sponzorem je spoluzakladatel firmy Microsoft Paul Allen. Jeho jméno nese Allen Telescope Array, které se buduje od roku 2007 v Hat Creek Radio Observatory při University of California at Berkeley (470 km severovýchodně od San Franciska). Projekt s původním označením One Hectare Telescope (1hT) je ve skluzu kvůli potížím s financemi. V roce 2012 je z plánovaných 350 antén v provozu jen 42. Po dokončení ale půjde o unikátní velmi citlivý přístroj s obrovským frekvenčním rozsahem (0,5–11,2 GHz) i rozsahem plošným (17krát lepší než VLA). Má být využíván jak pro projekty SETI, tak i pro radioastronomii.

Od roku 1990 probíhal na Harvardově univerzitě v USA projekt META, v jehož rámci bylo sledováno osm miliónů rádiových kanálů. Z dalších projektů jmenujme META II (Southern SETI), který využívá dvě 30m antény Argentinského radioastronomického institutu u Buenos Aires. V roce 1994 byla založena nezisková organizace SETI league, Inc., která od roku 1996, aktivně monitoruje hvězdné nebe. Nadační projektu Argus, který zahrnuje síť zejména amatérských radioteleskopů, představuje první projekt, který má soustavně monitorovat celou hvězdnou oblohu v reálném čase!

Všechny projekty hledání mimozemského vysílání jsou ale nesmírně náročné. Je třeba analyzovat milióny vysílacích kanálů. V roce 1999 proto David Gedye společně s Craigem Kasnoffem navrhli projekt SETI@home. Zapojit se může každý uživatel počítače připojeného na internet. V době, kdy na počítači běží jen šetřič obrazovky se spustí program na analýzu malého vzorku dat, který je automaticky stažen z příslušného ser-

veru. Po skončení analýzy program sám odešle výsledky a stáhne další balíček dat pro analýzu. Mnoho stolních počítačů a laptopů tak dohromady svým výkonem může konkurovat superpočítačům. Od roku 2005 byl projekt přesunut a běží jako součást BOINC (Berkeley Open Infrastructure for Network Computing).

Jiný, podstatně pomalejší způsob komunikace s někým „tam venku“ představují poselství na palubě kosmických sond Pioneer 10, 11 a Voyager 1 a 2. Sondy Pioneer, které vystartovaly v letech 1972, resp. 1973 nesou na palubě plaketu se obrázkovými a kódovanými informacemi o lidech a místě startu sondy. V současné době už s nimi nemáme spojení. To sondy Voyager 1 a 2 startovaly jen o několik let později v roce 1977, ale jsou stále aktivní. Řídicí středisko na zemi s nimi stále komunikuje. Na palubě mají měděnou pozlacenou gramofonovou desku se záznamy 115 obrázků, 55 pozdravů v různých jazycích (včetně češtiny), 35 různých přírodních i umělých zvuků a 27 záznamů hudby.<sup>5</sup>



Obrázek 13.5: Vlevo: Gramofonová deska, kterou na palubě nese sonda Voyager. Vpravo: Plaketa na palubě sondy Pioneer 10. Zdroj: wikipedia.

### 13.4.1 Život ve Sluneční soustavě

Projekty zmíněné v předchozí kapitole se zaměřují na hledání života ve vzdálenějším vesmíru, ale nemůže být život podstatně blíže, někde doslova za humny, ještě ve Sluneční soustavě?

Přehled těles, kde by ve Sluneční soustavě mohl být život začneme překvapivě Venuší. Současné podmínky na povrchu přítomnost života v podstatě vylučují. Schulze-Makuch et al. (2002) publikovali práci o možném životě v oblačných vrstvách Venuše. Některé údaje sond Veněra, Pioneer Venus a Magellan (zvláště ve složení vodních kapek v mracích) je možné vysvětlit přítomností mikroorganismů. Kromě toho se v myšlenkách vraťme do minulosti planety. Před čtyřmi miliardami let byl zářivý výkon Slunce o 40 % menší, takže Venuše měla optimální podmínky pro existenci tekuté vody a mohl tam tedy být i život. A co jestli se během dlouhého období přizpůsobil a přestěhoval do vhodné, obyvatelné zóny v atmosféře Venuše?

<sup>5</sup>Zvuky na desce na sondě Voyager jsou dostupné na <http://re-lab.net/welcome/>.

Další místem a zřejmě nejčastěji zmiňovaným v souvislosti s mimozemským životem je planeta Mars. O kanálech, tvářích na povrchu Marsu toho bylo napsáno opravdu mnoho. Vždy šlo ale o hru světla a stínu. Žádní Marťani nám vzkaz tímto způsobem neposílají. Příímý průzkum zaměřený na hledání života provedly sondy Viking v roce 2004. Nic zásadního ale neobjevily. V roce 2003 byl v atmosféře Marsu odhalen metan, který byl detekován jak pozemskými dalekohledy tak sondou Mars Express. Problém je v tom, že je v neočekávaně velkém množství a zdá se, že je aktivně doplňován. Může být známkou toho, že je zde přítomen živý organismus, ale je možné jeho přítomnost vysvětlit i různými geologickými procesy.

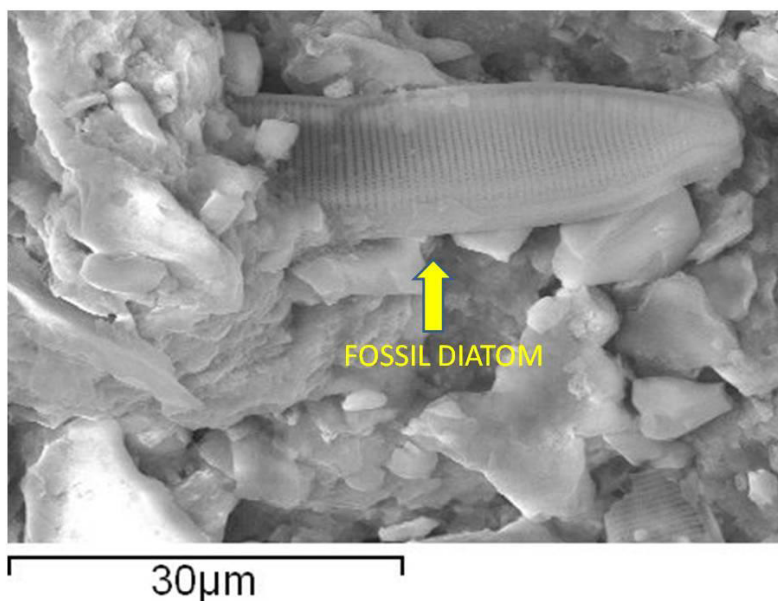
V každém případě je dnes už zřejmé, že v minulosti byla na povrchu Marsu tekoucí voda a planeta byla obklopena podstatně hustší atmosférou než dnes. To by sice přálo životu na Marsu, ale jen po omezenou dobu a navíc by zřejmě záření ze Slunce nestačilo. Musely tu být i jiné zdroje energie, například vulkanismus.

Mars se v zóně života nacházel alespoň někdy v minulosti, ale co když půjdeme ještě dále od Slunce? Máme šanci najít u některých dalších objektů podmínky vhodné pro život? Rozhodně to nebudou zbylé planety Sluneční soustavy – plynní obři. Ale možná překvapivě najdeme vhodné podmínky na jejich satelitech. Zatímní výsledky z kosmických sond ukazují, že zejména trojice Europa, Titan a Enceladus vypadají docela nadějně. Na Jupiterově měsíci Europa se kapalná voda vyskytuje pravděpodobně pod vnější ledovou kůrou. Nejspíše je ohřívána sopečnými průduchy na mořském dně, ale hlavním zdrojem tepla je pravděpodobně energie tzv. přílivové oteplování. Také u Saturnova Měsíce Enceladu je vodní oceán pod ledovou krustou. Sonda Cassini tam detekovala množství látek, které jsou základním předpokladem pro vznik života. Velmi slibným kandidátem na život ve Sluneční soustavě je největší měsíc Saturnu, Titan. Podmínky na něm jsou podobné těm, které panovaly v minulosti na Zemi. Na povrchu bylo objeveno první kapalně jezero mimo Zemi (asi etanu a/nebo metanu) a podzemní oceán z kapalné vody a čpavku.

Je ale možné, že se život nachází i na jiných místech. Konec konců i extremofilní organismy na Zemi vědce několikrát velice překvapily místem svého výskytu. V několika meteoritech (například Murchison a Jefremovka) byly nalezeny fosilní bakterie. Poslední takový případ se stal na sklonku roku 2012 (29.12.), kdy byl pozorován dopad meteoritu u města Polonnaruwa na Srí Lance. Následný rozbor meteoritu ukázal fosilní řasy (?). Pokud se zcela vyloučí kontaminace, pak půjde o jeden ze stěžejních důkazů výše zmíněné teorie panspermie.

## 13.5 Kontakt s mimozemšťany

Otázka návštěvy Země vesmírnými hosty a kontakt s mimozemšťany byl v oblasti sci-fi zpracován mnohokrát. Najdou se i díla, která se tváří jako literatura faktu, ale ve skutečnosti jde o umně zmanipulovaná fakta nebo podvrhy, jakými se prezentuje například Erich von Däniken. Zajímavý příspěvek na téma návštěvy mimozemšťanů přednesl ruský premiér Medvědev, který po oficiálním rozhovoru v televizním studiu na konci roku 2012 prohlásil: „Spolu s jaderným kufříkem s tajnými kódy dostává prezident taky speciální, přísně tajnou složku. V ní jsou informace o mimozemšťanech, kteří navštívili naši planetu. K tomu ještě patří zpráva od nejtajnějších složek, které



Obrázek 13.6: Meteorit od města Polonnaruwa z 28.12.1012. Oválná žebrovitá struktura vklíněna do kamene označená „fossil diatom“ představuje fosilní řasy. Převzato z Wickramasinghe et al. (2013).

kontrolují mimozemšťany na našem území. Tyhle složky prezident dostává s jaderným kufríkem. Když mu končí období, předává je novému prezidentovi. . . Více podrobností k tomuto tématu získáte v dobře známém historickém dokumentárním filmu Muži v černém. Nemůžu vám říct, kolik mimozemšťanů je mezi námi, protože by to mohlo vyvolat paniku“. Na záznamu je jasně slyšet vážný hlas Medvědova i hlasitý smích novinářů.

V každém případě se úřady návštěvou mimozemšťanů skutečně oficiálně zabývají. I pouhé zachycení signálu mimozemské civilizace by mohlo mít na celé lidstvo zásadní dopad. Zatím jsme jedineční, ale co až tuto gloriolu božích dětí ztratíme. Většina obyvatel Země se hlásí k nějakému náboženství, ale jak se postaví církve ke zprávám nebo dokonce návštěvě mimozemšťanů nevíme. Celosvětová autorita – Organizace světových národů OSN ale už dokonce vybrala pro případné setkání velvyslankyni. Je jí současná ředitelka Úřadu pro vztahy s vnějším vesmírem (UNOOSA) malajská astrofyzička Mazlan Othmanová<sup>6</sup>.

Případný kontakt s mimozemským životem, ale nemusí být pro pozemšťany jen přínosem. I mimozemský život na nejnižší úrovni může mít pro pozemský život zcela katastrofální následky. Případná mimozemská infekce by mohla lidstvo i vyhladit. Pokud budeme zvažovat o inteligentním životě, pak je nutné předpokládat, že civilizace schopná vyslat posádku na mezihvězdný let bude podstatně rozvinutější než ta naše a doufejme, že i mírumilovnější. Mimozemští predátoři by mohli lidi zotročit nebo i zcela zlikvidovat. Vzpomeňme jen na historii lidskou. Když se v minulosti setkávali vyspělejší národy s těmi zaostalými, skončilo to pro ty méně rozvinuté tragicky. Je tedy otázkou, zda

<sup>6</sup>Zajímavostí je, že z osmi ředitelů, kteří stojí v čele úřadu byli dva Češi Luboš Perek a Vladimír Kopal.



máme mimozemské civilizace sami aktivně vyhledávat. Jeden z největších myslitelů současnosti, S. Hawking se domnívá, že nikoli.

## 13.6 Domněnka o vzácné Zemi

Ve dvacátém století převládal názor, že Země je typickou kamennou planetou v typické planetární soustavě v nevýznamném místě jedné běžné spirální galaxie s příčkou. Prostě, ve směrech „šedý průměr“. Teorie průměrnosti nebo také tzv. Koperníkovský princip, jak se takému tvrzení říkalo mělo své velké zastánce v již zmíněném Francisu Drakevi a známém astronomovi a popularizátorovi Carlu Saganovi. Jenže v roce 2000 vyšla kniha geologa paleontologa Petera Warda a astronoma a astrobiologa Donalda E. Brownleeho s názvem *Rare Earth: Why Complex Life Is Uncommon in the Universe*, tedy Vzácná Země: Proč není komplexní život ve vesmíru běžný. Najdeme zde několik zásadních tvrzení. Autoři se domnívají, že život ve své nejjednodušší podobě (jako jsou mikroby nebo jejich obdoba) může být ve vesmíru rozšířený poměrně hojně. Na druhou stranu komplexní život, tedy vyšší rostliny a živočichové, se dle nich vyskytuje velmi zřídka a pravděpodobně také jen na krátkou dobu. Vyházejí z přesvědčení, že planety, na kterých by takový rozvinutý život mohl vzniknout a dále se vyvíjet, jsou ve vesmíru velice vzácné, což znamená, že život na Zemi je důsledkem nepravděpodobné kombinace astrofyzikálních a geologických podmínek a okolností. Dokonce se také pokusili o odhad, kolik planet s komplexním životem existuje v naší Galaxii. Jejich rovnice velmi připomíná tu Drakeovu a výsledky mají stejnou vypovídací hodnotu, totiž žádnou. Domněnka o vzácné Zemi je zajímavým příspěvkem do diskuse o životě ve vesmíru. Mohla by být i odpovědí na Fermiho paradox, který volně přeloženo říká: „Jestliže existují cizí civilizace, tak kde sakra jsou?“. Domněnka o vzácné Zemi je ale opravdu jen domněnka, která je sice založena na mnoha poznatcích soudobé astrofyziky, geologie, biologie a dalších věd, ale není to rozhodně bezesporná, definitivní teorie. Řešení Fermiho paradoxu tak vědci zatím hledají. Zdá se, že existují dvě možnosti. Buď mimozemšťané existují, ale na Zemi nebyli dosud zjištěni, protože nepodnikají cesty vesmírem nebo o jiné civilizace nemají zájem a nebo mimozemšťané neexistují, a proto nebyly na Zemi zjištěny stopy jejich přítomnosti. Jaké řešení je pravdivé a zda vůbec tento paradox existuje ukáže až čas.

## Doplňující literatura

- Bhattacharya A.B, Raha B. 2012, Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research, Vol. 1, No. 4, 551
- Cocconi, G., & Morrison, P. 1959, Nature 184, 844
- Des Marais, D. J., Nuth, J. A., III., Allamandola, L. J., et al. 2008, Astrobiology, 8, 715
- Kopecký, V. Jr. 2012, Kurz astrobiologie, MFF UK, Praha
- Lazcano, A., Bada, J. L. 2004, "The 1953 Stanley L. Miller Experiment: Fifty Years of Prebiotic Organic Chemistry". Origins of Life and Evolution of Biospheres 33(3), 235–242
- Miller, S. L. 1953, Science 117(3046), 528

- Miller, S. L., Urey, H. C. 1959, *Science* 130(3370), 245
- Sagan, C., Thompson, W. R., Carlson, R., Gurnett, D., & Hord, C. 1993, *Nature* 365, 715
- Schulze-Makuch, D., Irwin, L. N., & Irwin, T. 2002, *Exo-Astrobiology*, 518, 247
- Schulze-Makuch, D., & Irwin, L. N. 2008, *Life in the Universe: Expectations and Constraints*, *Advances in Astrobiology and Biogeophysics*. ISBN 978-3-540-76816-6. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008,
- Šklovskij, I. S. 1962, vydavatelství AV SSSR, Moskva, 239 str. (poslední 7. vydání v r. 2006 v časopise *Ekologie a život*)
- Šklovskii, I. S., & Sagan, C. 1966, *Intelligent life in the universe*. Autorizovaný překlad Paula Fern. San Francisco: Holden-Day, 1966
- Watson J.D., Crick F.H.C., 1953, *Nature* 171, No. 4356, s. 737–738
- Wacey, D., Kilburn, M. R., Saunders, M., Cliff, J. & Brasier, M. D. 2011, *Nature Geoscience* 4, 698-702
- Wickramasinghe, N.C., Wallis, J., Wallis, D.H., Samaranayake, A. 2013, *Journal of Cosmology*, 21, No. 37 (10 January 2013)

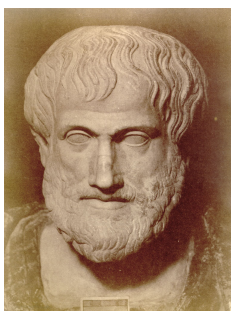
## 14 Rejstřík osob



**Argelander**, Friedrich Wilhelm August (22.3.1799 Memel, Prusko (dnes Klaipėda, Litva) - 17.2.1875) – pruský astronom (otec Fin, matka Němka), Besselův žák. Vypracoval (spolu s Krügerem a Schönfeldem) rozsáhlý katalog hvězd Bonner Durchmusterung, studoval pohyby hvězd a určil pohyb Slunce mezi nimi. Systematicky studoval proměnné hvězdy, vypracoval metodu na jejich pozorování a navrhl systém jejich označování.



**Albertus Magnus** (Svatý Albert Veliký, Albert z Böllstadtu) (1193 nebo 1206/1207 Lauingen – 15.11.1280 Kolín nad Rýnem, Německo) – jeden z nejvýznamnějších středověkých učenců a německých představitelů vrcholné scholastiky, zabýval se studiem filozofie, teologie i přírodních věd. Pro svoji všestrannost byl nazýván „doktor universalis“. Patří mezi učitele církve a je patronem vědců a studentů přírodních věd.



**Aristotelés** ze Stageiry (384 př. n. l. Stageira, Chalkidiki, Řecko - 322 př. n. l. Euboia) – filosof vrcholného období řecké filosofie, nejvýznamnější žák Platonův a vychovatel Alexandra Makedonského. Jeho rozsáhlé encyklopedické dílo položilo základy mnoha věd.



**Aristarchos** ze Samu (\*asi 320 – +250 př. n. l.) – řecký matematik a astronom, tvůrce heliocentrického modelu vesmíru (ve středu soustavy leží nehybné Slunce, kolem něj obíhají Země a planety. Z velikosti zemského stínu na Měsíci při zatmění vyvodil, že Slunce musí být mnohem větší než Země. A poprvé se také pokusil měřením zjistit, jaký doopravdy je vzájemný poměr velikostí Země, Měsíce a Slunce. Tvrdil, že vesmír je nekonečný a hvězdy jsou jiná Slunce. Aristarchos byl obžalován z bezbožnosti. Jeho model byl zamítnut a posléze na dlouho zapomenut.



**Biermann**, Ludwig Franz Benedikt (13.3.1907 - 12.1.1986) – významně přispěl k teorii konvekce ve hvězdných nitrech před tím, než byl znám zdroj energie hvězd. Modeloval sluneční chromosféru a korónu. Jeho studie kometárních ohonů vedla k úspěšné predikci slunečního větru a vodíkových hal kolem komet. Fyziku plazmatu a studium magnetického pole ve Sluneční soustavě a v Galaxii.



**Boltzmann,** (20.2.1844 Vídeň, 5.9.1906 Tybein u Triestu, Rakousko-Uhersko (dnes Duino, Itálie; sebevražda) – rakouský fyzik, zakladatel statistické fyziky. Průkopník termodynamiky, popsal entropii jako mikroskopickou veličinu. Byl také zastáncem atomistické představy. Zformuloval tzv. Maxwellovo-Boltzmannovo rozdělení. Roku 1877 připojil Boltzmannovu konstantu  $k$ . Jeho slavná rovnice popisuje mj. schopnost každého plynu zaujmout během doby stav rovnoměrně rozdělené energie. Jako první použil statistickou metodu pro popis tepelného záření. Roku 1884 odvodil tzv. Stefanův-Boltzmannův zákon (speciální případ Planckova zákona) popisující část tepelného spektra těles.



**Bouguer,** Pierre (16. 2. 1698 Croisic – 15.8. 1758 Paříž) - francouzský matematik a astronom. Byl také hydrograf, astronom a architekt. Je znám také jako "otec námořní architektury". Vynalezl fotometr, heliometr a objevil metacentrum (průsečík vztlakové síly plovoucího tělesa osou plování).



**Bouillaud,** Ismail (nebo Boulliau, případně v latině Bullialdus) (28. 9. 1605 Loudun - 25. 11. 1694 Paříž) – francouzský knihovník, astronom a kněz, amatérský matematik. Navrhl před Newtonem pro gravitační zákon velikost síly nepřímo úměrnou na čtverci vzdálenosti.



**Boyle,** Willard Sterling (19.8.1924 Amherst, Nova Scotia - 7.5.2011 Wallace, Nova Scotia) - kanadský fyzik a spoluvynálezce CCD. Byl oceněn čtvrtinovým podílem Nobelovy ceny za fyziku za „vynález zobrazovacího polovodičového obvodu - senzoru CCD“ v roce 2009.



**Brahe,** Tycho; původním jménem Tyge Ottesen Brahe, nesprávně též Tycho de Brahe (14.12.1546, Knudstrup, Dánsko – 24.10.1601, Praha) – význačný dánský astronom, astrolog a alchymista. Je považován za nejlepšího a nejpřesnějšího pozorovatele hvězdné oblohy, jenž byl překonán až šedesát let po vynalezení dalekohledu.



**Brewster,** Sir David (11.12.1781 – 10.2.1868) – skotský vědec, vynálezce a spisovatel. Byl i farmaceut a právník. Zajímal se o polarizaci světla. Vynalezl kaleidoskop. Vylepšil stereoskop.



**Bruno** Giordano, původně Fillipo Bruno, též Nolan nebo Nolanus (1548, Nola u Neapole – 17. února 1600, Řím) byl nejen filozofem, ale též spisovatelem (básníkem a komediografem), astronomem a zabýval se také mnemotechnikou.



**Bunsen,** Robert Wilhelm Eberhard (31.3.1811 Göttingen – 16.8.1899 Heidelberg) – německý chemik. Vynalezl či zlepšil mnoho laboratorních přístrojů, například fotometr, spektroskop. Stal se zakladatelem analýzy plynů a německé fyzikální chemie. V roce 1841 objevil elektrochemickou baterii. Později založil jodometrii, vyvinul Bunsenův kahan (1855), výzkumem třaskavého chlorového plynu založil vědeckou fotochemii. Společně s Gustavem Kirchhoffem rozvinul spektrální analýzu. Pomocí spektrální analýzy v letech 1860 – 1861 objevili dva nové chemické prvky (cesium a rubidium).



**Cannonová,** Annie Jump (11.12.1863 Dover, Delaware, USA – 13.4.1941 Cambridge, Massachusetts, USA) – americká astronomka. V roce 1896 začala pracovat u Pickeringa na Harvard-College-Observatorium. Podařilo se jí, s použitím výsledků Nettie Farrarové, Flemingové a Mauryové, zařadit spektrální linie hvězd do tříd O, B, A, F, G, K, M. vymyslela i mnemotechnickou pomůcku Oh, Be A Fine Girl - Kiss Me!. Vydala také katalog proměnných hvězd.

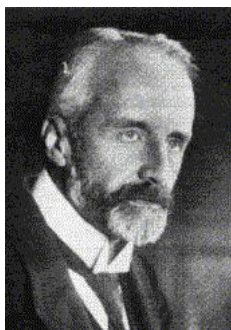
**Ču Kong** (11. st. př.n.l.) - čínský vědec, určil poměrně přesně úhel sklonu ekliptiky k rovníku.



**Doppler**, Christian Andreas (29.11.1803 Salzburg, Rakousko – 17.3.1853 Benátky, Itálie) – význačný rakouský fyzik a matematik. Je po něm pojmenován Dopplerův jev. V roce 1835 se Doppler stal profesorem matematiky na reálce v Praze a v roce 1836 konal na technice nepovinné přednášky z vyšší matematiky. V roce 1842 publikoval v *Abhandlungen der königliche böhmischen Gessellschaft der Wissenschaften* práci *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels*, ve které je popsán jev známý dnes pod jeho jménem.



**Draper**, Henry (7.3.1837, Prince Edward County, Virginia, USA - 20. 11.1882, New York, USA) – americký fyzik a astronom amatér, člen Národní AV USA (1877). Nejznámější jsou jeho průkopnické práce z oblasti astrofotografie a spektrografie. Získal první fotografii spektra hvězdy Vega a je po něm nazván katalog hvězdných spekter Henry Draper Catalogue.



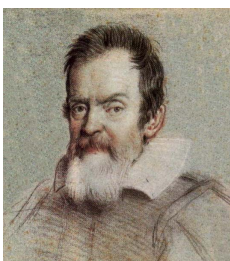
**Eberhard**, Gustav; \*1867 - †1940 – německý astronom na observatoři v Postupimi. Zabýval se astrofyzikou, spektroskopií a fotografickou fotogrammetrií. Objevil přítomnost čár K a H ve slunečním spektru, známku aktivity na povrchu hvězdy. Byl po něm pojmenován fotografický efekt.



**Fabricius**, David nebo David Faber, David Goldschmidt)(9.3.1564, Esens - 7.5.1617, Osteel) – německý teolog, dva velké objevy udělal se svým synem, Johannes Fabricius (1587-1615). Objevil první periodickou proměnnou hvězdu Miru Ceti v srpnu 1596. Pozoroval sluneční skvrny a předpokládali, že se Slunce otáčí kolem své osy.



**Fraunhofer**, Joseph von - (6.3.1787 Straubing - 7.6.1826 Mnichov, Německo) – německý optik, fyzik a astronom; 11. dítě chudého skláře, do 14 let negramotný! Zakladatel spektrální analýzy. Uskutečnil mnoho důležitých objevů v optice. Jeden z nejlepších odborníků na výrobu skla pro optické přístroje. Konstruoval optické přístroje. Objevil ve spektrech vesmírných objektů tmavé čáry, které se dnes nazývají jeho jménem.



**Galileo Galilei** (15.2.1564, Pisa – 8.1.1642, Arcetri) – toskánský astronom, filosof a fyzik těsně spjatý s vědeckou revolucí. Mezi jeho úspěchy řadíme vylepšení dalekohledu, rozmanitá astronomická pozorování, první z Newtonových zákonů pohybu a účinnou podporu Koperníka. Často je uváděn jako „otec moderní astronomie“, „otec moderní fyziky“ a dokonce „otec vědy“. Jeho experimentální činnost je obecně považována za důležitý doplněk spisů Francise Bacona, jimiž byla založena moderní vědecká metoda. Galileovo dílo je považováno za nejvýznamnější průlom od dob Aristotelových. Navíc jeho konflikt s římskokatolickou církví je brán jako nejvýznamnější příklad počátečního konfliktu náboženství a svobodné mysli, zvláště vědou v západní společnosti.



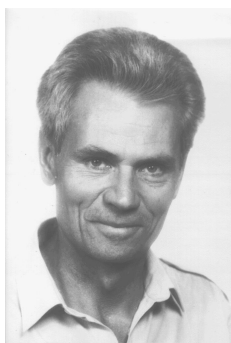
**Goodricke**, John (17.9.1764 Groningen, Nizozemsko - 20.4.1786 York, hrabství Yorkshire, Anglie) – holandsko-anglický amatérský astronom. V r. 1782 pozoroval proměnnou hvězdu Algol ( $\beta$  Persei) a vysvětlil správně její proměnnost jako důsledek zakrývání složek dvojhvězdy. Objevil i další proměnné hvězdy, např. v roce 1784 proměnnost  $\delta$  Cephei. Goodricke byl od 5 let zcela hluchý. Astronomických úspěchů dosáhl s učitelem a přítelem Edwardem Pigottem.



**Hájek z Hájku**, Tadeáš, latinským jménem Thaddaeus Hagecius ab Hayek či Thaddeus Nemicus; \*1.12.1525 Praha – †1.9.1600 Praha) – český astronom, matematik, renesanční přírodovědec a osobní lékař císaře Rudolfa II. Hájek jako první uveřejnil v tisku způsob, jak určit polohu hvězd stanovením přesné doby jejich průchodu poledníkem. Roku 1572 uveřejnil svá pozorování supernovy SN1572, které spolu s Brahem správně interpretoval jako pozorování objektu ve sféře hvězd, čímž pomohl rozbít dosud platné Aristotelovské teze o neměnnosti sféry hvězd.



**Halley**, Edmond, čti [hæli] ; \*8.11.1656 Haggerston, Shoreditch, Anglie - †14.1.1742 Greenwich – anglický astronom, geofyzik, matematik, meteorolog a fyzik. Královský astronom. Věnoval se mj. gravitaci, magnetismu, pozorování Měsíce. Analyzoval historické záznamy o kometách a zjistil, že ve čtyřech případech šlo o totéž těleso. Předpověděl návrat komety, dnes označované jako Halleyova.



**Harmanec**, Petr; \*1942 Kolín – významný český stelární astronom, odborník na dvojhvězdy, fotometrická a spektroskopická pozorování a jejich zpracování. Zabývá se horkými hvězdami a hvězdami se závojem.



**Haro**, Guillermo; \*21.3.1913 Mexico City - †26.4.1988 Mexico City – mexický učenec, vystudovaný právník a filozof, „astronom srdcem“. Pracoval na Observatorio Astrofísico de Tonantzintla, kde se věnoval zejména pozorování. Objevil řadu planetárních mlhovin, hvězd typu T Tauri, supernovu, 10 nov a nezávisle pak objekty dnes nazývané Herbigovy-Harovy.



**Hayashi**, Chushiro; \*25.7.1920 Kjóto - †28.2.2010 Kjóto, Japonsko – japonský astrofyzik. Spočítal modely vznikajících hvězd. Je po něm pojmenována vývojová dráha hvězdy v HR diagramu a mez, pro velikost stabilní hvězdy o dané hmotnosti. Věnoval se i nukleosyntézi po velkém třesku nebo studiu hnědých trpaslíků. .

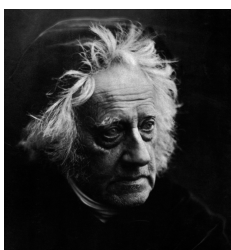


**Herbig**, George Howard; \*2.1.1920 – americký astrofyzik. Věnuje se studiu mladých hvězd, tvorby hvězd a mezihvězdné látky. Objevil a studoval mnoho objektů s  $H_{\alpha}$  emisí, hvězd typu T Tauri a pekulárních hvězd. Nezávisle na Harovi objevil plynné proudy spojené s mladými hvězdami, které se dnes označují jako Herbigovy-Harovy objekty. Herbig také ukázal, že abundance lithia je spojena s věkem mladých hvězd a studoval rychlosti rotace hvězd různých spektrálních typů.





**Herschel**, Sir Frederick William, někdy též v původní podobě Friedrich Wilhelm; \*15.11.1738 Hannover (dnes Německo) - †25.8.1822 Slough, tehdy hrabství Buckinghamshire, dnes Berkshire, Spojené království – jeden z nejúspěšnějších astronomů všech dob a nejlepších konstruktérů zrcadlových dalekohledů své doby. Také fyzik a hudebník. R. 1781 objevil planetu Uran a několik měsíců velkých planet, řadu mlhovin a také proměnnost hvězdy  $\alpha$  Her. Sestavil katalogy mlhovin a dvojhvězd.



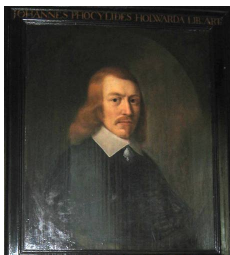
**Herschel**, Sir John Frederick William; \*7.3.1792 Slough, tehdy Buckinghamshire, dnes Berkshire, Spojené království – 11.5.1871 Hawkhurst, Kent, Spojené království – anglický astronom, matematik, chemik a průkopník fotografování. Dokončil práci svého otce Williama Herschela na katalogizaci severní hvězdné oblohy a rozšířil ji o katalog objektů nacházejících se na jižní hvězdné obloze. Objevil 525 mlhovin a hvězdokup a 3300 dvojhvězd. Svými pokusy k objevu ustalování fotografií nebo k objevu kyanotypie. Použil také pravděpodobně jako první názvy „fotografie“, „negativ“ a „pozitiv“, „snímek“.



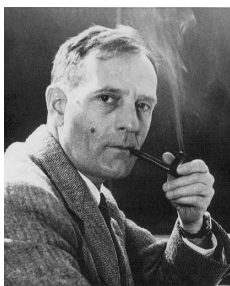
**Hertzsprung**, Ejnar; \*8.10.1873 Frederiksberg, Kodaň, Dánsko - †21.10.1967 Roskilde, Dánsko – chemik a astronom. Zjistil, že ze změny šířek spektrálních čar lze usuzovat na typ hvězdy (trpaslík, obr, hvězda hlavní posloupnosti), které vedly k vytvoření známého diagramu. Jako první kalibroval závislost perioda-svitivost pro cefeidy a použil ji pro určení vzdálenosti k Malému Magellanovu mračnu. Určil vlastní pohyby, hvězdné velikosti, barevné indexy pro tisíce hvězd v Plejádách a změřil kolem jednoho milionu pozic dvojhvězd na fotografických deskách.



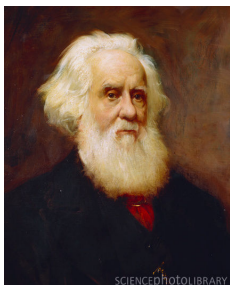
**Hipparchos**, \*asi 190 př.n.l. Nikaia v Bithýnii – †asi 125 př.n.l. – jeden z největších antických astronomů. Zvýšil přesnost pozorování, vynalezl přístroje pro měření výšky hvězd, určil sklon zemské osy k rovině ekliptiky, přesně délku slunečního roku, precesi, vzdálenost Měsíce od Země. Sestavil katalog 1 080 hvězd začleněných do 49 souhvězdí a rozdělil hvězdy podle jasnosti do 6 velikostí. K určování jasnosti hvězd zavedl stupnici hvězdných velikostí používanou dodnes.



**Holwarda,** John Phocylides (též Jan Fokkens, Johannes Fokkes Holwarda, Jan Fokkes van Holwerd, Johann Phocylides; \*1618 Holward - †22.1.1651 – friský astronom, fyzik a filosof. Známy je zejména znovuobjevením proměnnosti Míry Ceti a určením délky cyklu její proměnnosti na 330 dní. Byl výrazným zastáncem a průkopníkem atomismu.



**Hubble,** Edwin Powell; \*20.11.1889 Marshfield – †28.9.1953 San Marino, Kalifornie, USA – americký astronom. Od r. 1919 pracoval na Mount Wilson Observatory v Kalifornii až do konce života. Věnoval se především studiu mlhovin, galaxií. Sestavil jejich klasifikaci. Největším objevem byla přímá úměrnost mezi rychlostí, s jakou se galaxie vzdalují a jejich vzdáleností (Hubbleův zákon). Konstanta úměrnosti se nazývá Hubbleova konstanta.



**Huggins,** Sir William; \*7.2.1824 Cornhill, Middlesex – †12.5.1910 – anglický astronom známý zejména pro svoji průkopnickou práci v astronomické spektroskopii. Na své soukromé observatoři prováděl se svou ženou, astronomkou Margaret Lindsay rozsáhlá spektroskopická pozorování různých objektů. Jako první rozlišil podle spekter mlhoviny a galaxie. Huggins se také intenzivně věnoval fotografické práci.



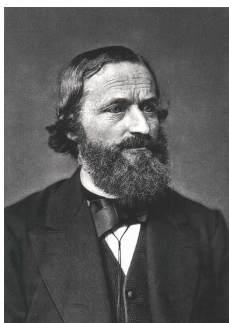
**Jeans,** Sir James Hopwood; \*11.9.1877 Ormskirk, Lancashire, Anglie - †16.9.1946 Dorking, Surrey, Anglie – britský fyzik, astronom a matematik. Měl široké pole zájmů, publikoval knihy o dynamické teorii plynů (1904), teoretické mechanice (1906) a o matematické teorii elektřiny a magnetismu (1908). Zabýval se kvantovou fyzikou, teorií záření (Rayleighův-Jeansův zákon), teorií vývoje hvězd, vývoje vesmíru. Vypracoval hypotézu vzniku Sluneční soustavy.



**Johnson,** Harold Lester; \*17.4.1921 Denver, Colorado, USA - †2.4.1980 Mexico City – americký astronom. Jeho jméno je spojeno se zavedením širokopásmového systému fotometrických filtrů *UBV* (někdy označovaného jako Johnsonův nebo Johnsonův-Morganův systém) v roce 1953. Později systém rozšířil do infračervené oblasti. Stal se jedním ze zakladatelů IR astronomie. Provedl velmi mnoho přesných fotometrických měření.

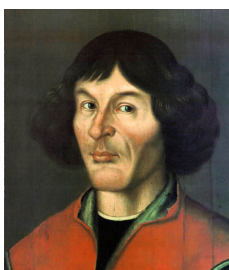


**Kepler, Johannes** (1571 – 1630) byl německý matematik, astrolog a astronom. Především ve starší české literatuře se používá i počestěná forma jeho křestního jména (Jan Kepler). Několik let působil v Praze na dvoře císaře Rudolfa II. V Praze také formuloval dva ze tří Keplerových zákonů.

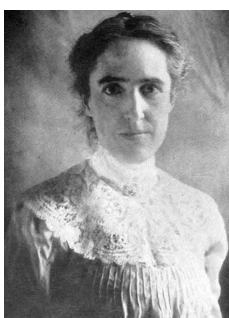


**Kirchhoff, Gustav Robert**; 12.3.1824 Königsberg, Prusko, nyní Kaliningrad, Rusko - 17.10.1887 Berlín – německý fyzik, který se zabýval především elektřinou, spektroskopií a zářením zahřátých objektů. Vymyslel termín záření „černého tělesa“. Formulací zákonů spektroskopie (s Bunsenem) položil základy astrofyziky.

**Kidinn** (2. pol. 6. st.př.n.l.) - babylonský učenec, který mimo jiné tvrdil, že rychlost pohybu planet je nerovnoměrná, ale během roku postupně roste a pak zase klesá.



**Koperník, Mikuláš** (19.2.1473 Toruň – 24. května 1543, Frombork) byl astronom, matematik, právník, stratég a lékař, římskokatolický duchovní a tvůrce heliocentrické (sluncestředné) teorie.



**Leavittová, Henrietta Swan**, čti *levitová*; \*4.7.1868 Lancaster, Massachusetts– †12.12.1921 Cambridge, Massachusetts – americká astronomka. Na observatoři Harvard College Observatory v Massachusetts objevila na deskách Malého Magellanova mračna přes dva a půl tisíce proměnných hvězd. Z nich 16 později označila jako cefeidy a stanovila vztahu mezi periodou jejich světelných změn a průměrnou svítivostí.



**Lummer**, Otto Richard; \*17.7.1860 Gera, Německo – †5.7.1925 Breslau – německý fyzik. Věnoval se zejména optice a tepelnému záření. Lummerova zjištění vedla spolu s jinými M. Plancka v r. 1900 ke konceptu Planckova zákona záření absolutně černého tělesa a základů kvantové hypotézy.



**Maunder**, Edward Walter (12.4.1851 Londýn – 21.3.1928 Londýn) – anglický astronom známý jeho studii slunečních skvrn a slunečního magnetického cyklu, které vedly ke zjištění, že v období let 1645 – 1715 bylo Slunce v období dlouhého minima činnosti (Maunderovo minimum). Jeho graf rozmístění slunečních skvrn v závislosti na fázi sluneční činnosti je známý jako motýlkový diagram.



**Montanari**, Geminiano; \*1.6.1633 Modena – †13.10.1687 Padova – byl italský astronom, výrobce čoček, ekonom a zastánce experimentálních vědeckých metod. V r. 1667 pozoroval změny jasnosti Algotu.



**Morgan**, William Wilson; 3.1.1906 - 21.6.1994 – americký astronom. Studoval klasifikace hvězd a galaxií. Spolu P.Keenanem vyvinul systém pro klasifikaci hvězd pomocí jejich spekter. Vyvinul i několik morfologických systémů klasifikace galaxií. Podílel se zavedení širokopásmového fotometrického systému UBV.

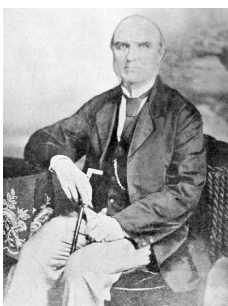


**Paczyński**, Bohdan; \*8.2.1940 Wilno, Polsko (nyní Vilnius, Litva) - †19.4.2007 – Po pozorovacích studiích polarizace a absorpce v Galaxii a u proměnných hvězd se zabýval vývojem hvězd a akrečními disky v těsných dvojhvězdách. Zdroje  $\gamma$  záblesků „odsunul“ do kosmologických vzdáleností. Vypracoval teorii hypernov. Navrhl využívat gravitační mikročochky pro detekci kompaktních objektů v galaktickém halu. Vedl dva přehlídkové projekty - OGLE a ASAS.

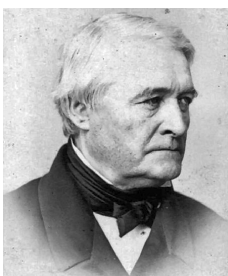
**Pigott, Edward**; \*1753 asi Whitton, Middlesex – 27.6.1825 Bath, Anglie – anglický astronom. Objevil proměnnost  $\eta$  Aql, mlhovinu M64 a velkou kometu 1783. Později pracoval se sousedem a přítelem J. Goodrickem. Sestavil první „katalog“ 12 tehdy známých proměnných hvězd.



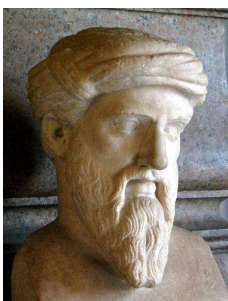
**Planck, Max Karl Ernst Ludwig**; \*23.4.1858 Kiel - †4.10.1947 Göttingen – německý teoretický fyzik. Zakladatel kvantové fyziky. R. 1900 publikoval zákon popisující záření absolutně černého tělesa (dnes Planckův zákon).



**Pogson, Norman Robert** (1829-1891) – středoškolské vzdělání, pozorovatel na různých observatořích, od. r. 1860 žil v Madrásu (Indie), 1854 – katalog tehdy známých prom. hvězd, 1857 – Pogsonova rovnice, objevil R Cyg a 18 dalších prom. hvězd, Pogsonova metoda pozorování



**Pouillet, Claude-Servais-Mathias**; \*16.2.1790 Cuzance, Doubs, Francie - †1868, Francie – francouzský fyzik. Navrhl galvanometri. V letech 1837-8 nezávisle na Johnu F. W. Herschelovi provedl první kvantitativní měření tepla vyzářeného Sluncem a na jeho základě odhadl teplotu Slunce.



**Pythagoras** ze Samu (také Pýthagorás (okolo 570 př. n. l. ostrov Samos – po 510 př. n. l. Krotón v jižní Itálii) byl legendární řecký filosof, matematik a astronom. Byl také veřejně činný, ale údaje o něm se často rozcházejí. Z jeho díla (pokud nějaké napsal) se nic nezachovalo, založil však velmi významnou školu a výklady i legendy jeho následovníků překryly jeho původní myšlenky, takže se velmi obtížně rekonstruují. Pythagorejská tradice měla velký vliv na Platóna, byla živá v novoplatónismu, v renesanci a v různých – často fantastických - podobách žije i dnes.



**Rayleigh** lord, John William Strutt, 3. baron Rayleigh; \*12.11.1842 – †30.6.1919 – vědecky důkladný a přesný anglický fyzik. Zjistil anomálii hustoty dusíku izolovaného z atmosféry, kterou publikoval na svých přednáškách. Tato anomálie zaujala Williama Ramsaye a spolu s Rayleighem objevil argon (Nobelova cena za fyziku 1904) a další vzácné plyny. Zabýval se také akustikou, optickým a elektromagnetickým rozptylem světla, je objevitelem jednoho z vyzařovacích zákonů. Zajímal se i o metafyziku, telekinezi apod.



**Russell**, Henry Norris; \*25.10.1877 Oyster Bay, New York, USA - †18.2.1957 Princeton, New Jersey, USA – americký astronom. Společně s Ejnarem Hertzsprungem vyvinuli Hertzsprungův–Russellův diagram (1910). V r. 1923 společně s F. Saundersem popsal spin-orbitální vazbu. Věnoval se vývoji hvězd, popularizoval spojení mezi obry a trpaslíky ve světě hvězd. S H. Shapleyem analyzoval světelné křivky zákrytových dvojhvězd.



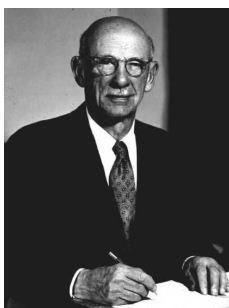
**Secchi**, otec Pietro Angelo; \*29.6.1818 Reggio Emilia – †26.2.1878 Řím – italský astronom. Byl průkopníkem astronomické spektroskopie a jedním z prvních vědců, kteří rozhodně považovali Slunce za hvězdu.



**Shapley**, Harlow; \*2.11.1885 - † 20.10.1972 – americký astronom. V r. 1918 použil cefeidy k určení velikosti naší Galaxie a stanovení pozici Slunce v ní. V r. 1953 navrhl teorii „pásu tekuté vody“, nyní známých jako zóny života. Věnoval se i studiu dvojhvězd.



**Spörer**, Friederich Wilhelm Gustav; \*23.10.1822 Berlín – †7.7.1895 Gießen – německý astronom. Zabýval se slunečními skvrnami a cykly sluneční aktivity. Spörer jako první zmiňuje delší období slunečního minima v letech 1645 - 1715 (tzv. Maunderovo minimum). Jako Sörerovo se označuje minimum aktivity Slunce 1420-1570.



**Stebbins, Joel**; \*30.7.1878 - †16.3.1966 – americký astronom. Jeden z průkopníků fotoelektrické fotometrie. Spolu s kolegy, zejména s Albertem Whitfordem použil novou techniku k výzkumu zejména zákrytových dvojhvězd, zčervenání světla hvězd mezihvězdným prachem, barevné indexy galaxií, různé typy proměnných hvězd.



**Stefan, Jozef**, někde Joseph, čti [jozef štefán]; \*24.3.1835 ves St. Peter (slovinsky Sveti Peter) u Klagenfurtu, tehdejší Rakousko-Uhersko, dnes Rakousko - †7.1.1893 Wien, Rakousko – slovinský fyzik (oba rodiče byli Slovinci), matematik a básník. Zabýval se kinetickou teorií plynů a hydrodynamikou. V roce 1879 objevil závislost energie záření absolutně černého tělesa na jeho absolutní teplotě.

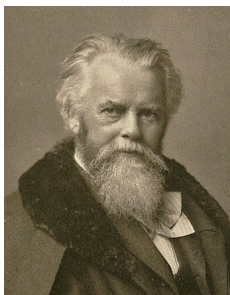


**Strömgen, Bengt Georg Daniel**; \*21.1.1908 Gothenburg – †4.7.1987 – dánský astronom a astrofyzik. Zjistil, že chemické složení hvězd je mnohem rozdílnější než se dříve myslelo. Na konci 30. let minulého století zjistil, že hvězdy jsou zhruba ze 70 % z vodíku a 27 % z hélia. Před 2. světovou válkou objevil tzv. Strömgenovy sféry – velké mezihvězdné obálky ionizovaného vodíku kolem hvězd. V 50. a 60. letech se zabýval fotoelektrickou fotometrií a zavedl nový čtyřbarevný fotometrický systém, zmaný nyní pod jeho jménem.

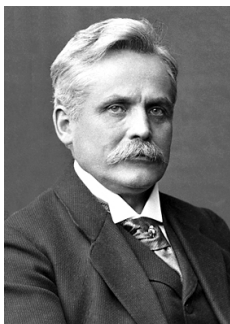
**Ši Šen** - 4. st. př. n. l. – v Číně vznikl nejstarší atlas komet. Tzv. Hedvábná kniha byla objevena v roce 1973. Ve stejném období vytvořil (možná s kolektivem spolupracovníků) i první známý hvězdný katalog obsahující polohy několika set hvězd.



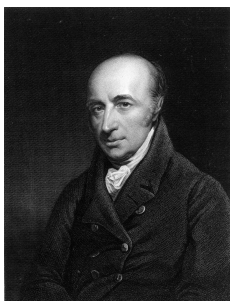
**Thalés**, z Milétu; \*okolo 624 př. n. l. Milétos – †okolo 548 př. n. l. – předsókratovský filosof, geometr a astronom. Byl pokládán za zakladatele řecké filosofie (zahrnovala také matematiku a vědy). Z jeho díla se zachovaly pouze zlomky. Připisuje se mu řada objevů v geometrii (například Thaletova věta), v astronomii a v kosmologii. S Pythagorem spekulovali, že Země je koule.



**Vogel,** Hermann Wilhelm; \*26.3.1834 - †17.12.1898 – německý fotochemik a fotograf, který hrál klíčovou roli ve vývoji praktické fotografie. Nezávisle na E.Ch.Pickeringovi objevil spektroskopické dvojhvězdy.



**Wien,** Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz; \*13.1.1864, Primorsk, Kaliningradská oblast, Rusko, tehdy Fischhausen, východní Prusko - †30.8.1928 Mnichov, Německo – německý fyzik. V r. 1893 odvodil z existujících teorií tepla a elektromagnetismu tzv. Wienův posunovací zákon. Za práci o tepelném záření dostal v roce 1911 Nobelovu cenu za fyziku.



**Wollaston,** William Hyde; \*6.8.1766, East Dereham, Spojené království – †22.12.1828 Chislehurst, Spojené království – anglický chemik a fyzik. Objevil palladium a rhodium. Rozvinul postup získávání platiny z rudy. Při zkoumání slunečního spektra objevil tmavé Fraunhoferovy čáry. Vynalezl optické zařízení zvané *camera lucida*, které umožňuje přesné kreslení tvarů předmětů.



## A Appendix: Vývoj astronomie

Tabulka A.1: Vývoj astronomie. Tabulka byla převzata z <http://geneze.info/astroonomie>

DATAČE	OBJEV, VYNÁLEZ	AUTOR (event. lokalita)
cca 5000 př.n.l.	gnomon	homo sapiens sapiens
4226 př.n.l.	zaveden první kalendář na světě	Egypt
cca 3300 př.n.l.	zpráva o zatmění Měsíce ve Střední Americe	Mayové
cca 3000 př.n.l.	první knihovny s astronomickými, matematickými a lékařskými spisy	Egypt
cca 3000 př.n.l.	používání slunečních (den) a vodních (noc) hodin	Egypt
(?)2782 př.n.l.	sluneční kalendář	Egypt
2700-2400 př.n.l.	budování pyramid (obnášelo znalosti z astronomie (přesné zaměření podle světových stran) a geometrie)	Egypt
2461 př.n.l.	zaznamenána konjunktce planet	Čína
2296 př.n.l.	první záznam katalogu pozorovaných komet	Čína
2137 př.n.l.	vypočítáno zatmění Slunce a Měsíce	Čína
<2000 př.n.l.	teorie pohybu Slunce, Měsíce a planet (model 8 sfér)	Mezopotámie
1900 př.n.l.	využití astronomických jevů ke stavbě první primitivní "observatoře"	Stonehenge (Anglie)
1361 př.n.l.	první doklad o pozorování zatmění Měsíce (viz též r. 2461, 2137 a 1216 př.n.l.)	Čína
cca 1300 př.n.l.	používání kalendáře vycházejícího z délky slunečního roku 365,25 dní a délky lunárního měsíce 29,5 dne	Čína
cca 1250 př.n.l.	znalost 12 souhvězdí zvěrokruhu; základy jejich symbolů se zachovaly dodnes	Mezopotámie
1217 př.n.l.	dochován zápis (na kosti) s předpovědí počasí	Čína
1216 př.n.l.	doložené pozorování zatmění Slunce (předpokládá se však, že pozorovali zatmění Slunce a Měsíce již koncem 3. tis. př.n.l.)	Čína
12. stol.př.n.l.	doložena knihovna vládcy Tiglata (1115-1093 př.n.l.); existovala ještě v 7. stol.př.n.l. při chrámu boha Aššura	Asýrie
11. stol.př.n.l.	údajně vypočítán sklon ekliptiky k rovině rovníku	Ču Kong
cca 1000 př.n.l.	první posvátné brahmánské knihy Vědy, v nichž se objevují i začátky vědeckých poznatků	Indie

8. stol.př.n.l.	pravidelná astronomická pozorování, především Slunce a Měsíce, vedla ke stanovení period jejich zatmění a k upřesnění lunárního kalendáře (na tato pozorování se odvolával často i Ptolemaios; vznik těchto pozorování podnítilo vysvětlení astronomických jevů - meteory a komety kvůli zvýšené náboženské mystice a astrologických zájmů)	Řecko
8. stol.př.n.l.	svitkové knihy ťüan - používání hedvábí jako materiálu na psaní	Čína
19.3. 721 př.n.l.	první zpráva o zatmění měsíce	Mezopotámie
cca 700 př.n.l.	vodní hodiny	Čína
7. stol.př.n.l.	knihovna asyrského krále Aššurbanipala obsahovala velké množství prepisů starších textů až z doby okolo r. 1900 př.n.l. - např. astronomický opis (originál z doby Chammurapiho) obsahuje základní fakta z deskriptivní astronomie (východ a západ hvězd, pohyby planet, poznatky o Slunci, Měsíci i planetách, délka dne v jednotlivých ročních obdobích, seznamy stálic)	Mezopotámie
cca 680 př.n.l.	vypočtena střední délka synodického měsíce: 29 dní 12 hodin 44 minut a 7,5 s (tato hodnota se od dnešní liší v řádech sekund); sledování pohybu nebeských těles s velkou přesností: úhly s přesností na 6 min a časové úseky na 3/4 min; pozorování vzájemného postavení Měsíce a Slunce - určení délky periody (tzv. saros) ve které se opakují určité vzájemné postavení v ekliptice	Mezopotámie
18.5. 603 př.n.l.	v Egyptě pozorováno velké zatmění Slunce, na jeho základě a při znalosti periodicity slunečních zatmění, předpovězeno zatmění na r. 585 př.n.l.	Thalés z Milétu
6. stol.př.n.l.	nejstarší soukromé knihovny - Polykratova a knihovna Peisistratovců - soubory papyrusových svitků (lat. volumen) uložené v hliněných pouzdrech (lat. capsula) a svázané pergameny (lat. codices)	Řecko
6. stol.př.n.l.	nejstarší soukromé knihovny - knihovna Euripidova - soubory papyrusových svitků (lat. volumen) uložené v hliněných pouzdrech (lat. capsula) a svázané pergameny (lat. codices)	Řecko
6. stol.př.n.l.	nejstarší známá řecká mapa sestavená na základě vlastních cest (opravena Hekataiosem z Milétu)	Anaximandros z Milétu
585 př.n.l.	učení o Zemi jako desce, plovoucí ve vodách oceánu	Thalés z Milétu
28.5. 585 př.n.l.	dochází k předpovězenému zatmění Slunce z r. 603 př.n.l.	Thalés z Milétu

cca 550 př.n.l.	v knize Periégésis (Cesty po světě) popsán celý tehdy známý (Řekům) svět; doplněn mapou	Hekataios Milétu	z
4. stol.př.n.l.	znalost nepravidelnosti zdánlivého pohybu planet	Platón	
4. stol.př.n.l.	geocentrický model pohybu planet Slunce a Měsíce se vzájemnou závislostí pohybu jednotlivých sfér	Eudoxos	
4. stol.př.n.l.	katalog hvězd, obsahující kolem 800 objektů	Čína	
4. stol.př.n.l.	knihy Ken-Š' sing-ting (Základy určování hvězd)	Čína	
4. stol.př.n.l.	nejstarší soukromé knihovny - knihovna Aristotelova - soubory papyrusových svitků (lat. volumen) uložené v hliněných pouzdrech (lat. capsula) a svázané pergameny (lat. codices)	Řecko	
kolem 350 př.n.l.	zevšeobecnění empirické kosmologie a vytvoření geocentrického modelu s oblastí sublunární (vyplňují ji 4 elementy: oheň, vzduch, voda a země) mezi Zemí a Měsícem a sférou supralunární (vyplněna éterem) nad sférou Měsíce	Aristoteles	
320 př.n.l.	vytvořena nová mapa známého světa (na základě poznatků helenistických vojenských výpadů)	Dikaiarchos Messény	z
3. stol.př.n.l.	nejstarší soukromé knihovny - sbírka alexandrijského Museionu - soubory papyrusových svitků (lat. volumen) uložené v hliněných pouzdrech (lat. capsula) a svázané pergameny (lat. codices)	Řecko	
3. stol.př.n.l.	veřejné sluneční hodiny; zdokonalení klepsydry (vodní hodiny)	Řecko	
3. stol.př.n.l.	vrchol řecké kartografie - tzv. Eratostenova mapa	Eratosthenes	
3. stol.př.n.l.	vytvořen princip stupňového měření Země; na jeho základě a na základě změřené vzdálenosti mezi Alexandrií a Asuánem byla stanovena délka zemského poledníku, s pomocí přístroje skafé (bylo jím možno určit výšku Slunce ?) na 252000 stadiónů - podle Pliniova odhadu bylo použito tzv. egyptského stadiónu o délce 157,7 m, pak by se chyba pohybovala v řádech několika set km, tzn. méně než 1% (!) - stadión: délková míra v antice; bylo užíváno několik variant - egyptský - 157,7 m; olympijský - 192,3 m; atický - 177,6 m; aiginskooatický - 164 m a iónský - 210 m	Eratosthenes	
1. pol. stol.př.n.l.	3. myšlenka o oběhu Země kolem Slunce – heliocentrické uspořádání vesmíru (autor předpokládal, že průměr Slunce je sedminásobkem průměru Země a vzdálenost Země - Slunce je dvanáctinásobkem vzdálenosti Země - Měsíc; jeho teorie neměla však odezvu a převládla teorie Ptolemaiovy soustavy)	Aristarchos Samu	ze

238 př.n.l., 7.3.	výnosem Ptolemaia III. byl zaveden k 365 dním roku pro každý čtvrtý rok jeden den navíc - přestupný rok	Egypt
2. stol.př.n.l.	vypočítána délka slunečního roku s přesností na 6 minut, sklon ekliptiky k rovníku, precese jarního bodu, měsíční paralaxa, excentricita sluneční dráhy aj.	Hipparchos z Nikae
140 - 86 př.n.l.	reformace kalendáře	Čína
134 př.n.l.	první katalog souhvězdí, který obsahoval 800 objektů; později jej Ptolemaios rozšířil o dalších 200 hvězd jednalo se fakticky o katalog hvězd, které byly rozděleny do 48 souhvězdí	Hipparchos z Nikae
46 př.n.l.	reformace římského občanského kalendáře; tento rok, který napravoval chyby předchozích kalendářů měl 445 dní a nazýval se "annus confusionis"; od r. 45 př.n.l. měl rok 365 dní a každý čtvrtý byl přestupný s délkou 366 dní; r. 44 př.n.l. byl nový kalendář na památku Julia Caesara nazván kalendářem juliánským	Řecko
2. pol. stol.př.n.l. 0 - 500	1. dílo "Geógrafiké" (Zeměpis) obsahoval popis tehdy známého světa	Strabón
2. stol.n.l.	spis Ling sien (Složení vesmíru), kde uvádí, že Měsíc má tvar koule a nemá vlastní světlo	Čang-Cheng
2. stol.n.l.	geocentrický model	Ptolemaios
2. stol.n.l.	popis jevu astronomická refrakce	Ptolemaios
102	údajně vynalezen způsob výroby papíru ze stromové kůry či konopí; tento způsob se rozšířil do Koreje (kolem 600), Japonska (610) a r. 751 je doložen v Samarkandě	Cchaj-Lun
137	Almagest – katalog souhvězdí	Ptolemaios
500 - 1000		
7. stol.	rozšíření vodních hodin v Evropě, nejdříve v Anglii a v Irsku	Evropa
kolem 628	spis Brahma-sphuta-siddhanta (Pravé Brahmovo učení) - 20 kapitol astronomických, aritmetických i geometrických pojednání	Brahmagupta
682	astronomové z města Tikal stanovili, že 149 lunárních měsíců tvoří 4400 dní, čímž určili délku synodického měsíce na 29,53020 dní (dnešní měření: 29,53059); podobně pak určili délku tropického roku na 365,2420 dní (dnes: 365,2422)	Mayové

7. - 8. stol.	speciální konfigurace náboženských staveb, odpovídající astronomickým pozorováním; kalendářní výpočty astronomických jevů sahajících až do doby před 400 mil. lety	Mayové (vrchol jejich kultury)
7. - 8. stol.	spis Computus, kde jsou obsaženy výpočty církevního kalendáře, souvisejícího s periodicitou astronomických jevů, dále je zde uveden úplný popis počítání na prstech do miliónu	Beda Venerabilis
8. stol. 725	názor na měnící se vzdálenost mezi hvězdami realizace myšlenky (od Liou Čou) změřit stupeň poledníku	Čína Nan Kung-Šao
konec 8. stol.	změření obvod Země; k tomuto účelu uskutečnili měření šířkového stupně a zjištěná délka se rovnala $56 \frac{2}{3}$ arabským mílím, což odpovídá 113,04 km a tedy obvod Země 40700 km	al-Chvárizmí
8.-15. stol.	tzv. "zídži"- sbírky tabulek pro astronomy a geografy; obsahovaly popisy kalendářů, souhrny chronologických historických dat, trigonometrické tabulky, katalogy hvězd a astronomické tabulky	Arabský poloostrov
882-910	v té době nejpřesnější astronomická měření; vydání "Knihy o hvězdovědě", ve které byly opraveny mnohé nepřesnosti od Ptolemaia a objevil se v ní termín sinus a začalo se počítat s trigonometrickými funkcemi a jejich vzájemnými vztahy; byla zde uvedena též tabulka pro hodnoty kotangens (doceněno až r. 1533 v díle Regiomantana)	al-Battání
10. stol.	sextant (přístroj pro astronomické měření) s poloměrem 58 stop (= cca 17 m)	Bagdád
přelom 10. a 11. stol.	velmi přesné astronomické zeměpisné měření - stanoven úhel sklonu ekliptiky k rovníku (odchylka v řádech sekund); vypočítán poloměr (6490 km) a obvod (41550 km) Země, popsány změny barev Měsíce při jeho zatmění, sluneční korónu při jeho zatmění; myšlenka pohybu Země okolo Slunce	al-Bírúní
1000 - 1500 1054, 4.7.	zaznamenán výbuch supernovy, která položila základ dnešní Krabí mlhovině, v dnešním souhvězdí Býka (na observatoři Kai-Feng); pozorovali ji čínští astronomové a Indiáni kmene Navaho	Yang Wei-t

pol. 13. stol.	náhodný objev astronomického kompendia "Libros de saber de astronomia", psané španělsky, které shrnovalo kompilaci z mnohých astronomických rozprav; populárními se staly především tzv. Alfonzinské tabulky, které byly sestaveny na základě tabulek astronoma al-Zarkálího (též Azrachel)	král Alfons X.
1310	spis "Lucidator astronomiae"- nebeská tělesa nejsou upevněna na sférách, ale pohybují se volně v prostoru	Pietro d'Abano
1344-1351 po 1400	astronomický orloj (Padova) katalog hvězd a tabulka pohybu planet, která se vyznačuje velkou přesností	Jacopo Dondi Ulugh-beg
15.stol. po 1450	změřena vzdálenost Měsíce upřesnění tzv. Alfonzinských astronomických tabulek (pol. 13. stol.) a trigonometrických tabulek Almagestu	Georg Peurbach
1500 - 2006		
16.stol.	změřena vzdálenost Slunce	
1542	heliocentrický model pohybu planet, mezi které je počítána také Země	M.Kopernik
1543	vyšly knihy "Šest knih o oběžných pohybech v drahách nebeských těles"	M.Kopernik
1572	pozorování nové hvězdy v souhvězdí Kasiopeji	Tadeáš Hájek z Hájku
1576	počátek budování hvězdárny na ostrově Hven, zvaná Uraniborg	T. de Brahe
1581	začala se měřit inklinace	R. Norman
1582	přijat nový kalendář, který opravil starý juliánský - po 4. říjnu následoval 15. říjen; byl přijat katolickou církví za papeže Gregora XIII. - proto "gregoriánský kalendář"	Evropa
1584	teorie nekonečnosti vesmíru a světů; uznání heliocentrismu	G.Bruno
1588	kompromisní systém planet - okolo Země obíhá Slunce o kolem Slunce planety	T. de Brahe
1572, 11.11.	supernova v souhv. Kasiopeja - tzv. Tychonova hvězda	T.de Brahe
1596	objevena první proměnná hvězda (Mira Ceti v souhv. Velryby)	D.Fabircius
přelom 16. a 17. stol.	heliocentrický model II.	T.Brahe, J.Kepler
1603	hvězdný atlas Uranometria	J.Bayer
1609	zkonstruován dalekohled	G.Galilei
1609	první dva Keplerovy zákony	J.Kepler

1609-1610	pozorování oblohy dalekohledem: rozpoznáno složení Mléčné dráhy, objeveny Jupiterovy měsíce, fáze Venuše aj.	G.Galilei
1616	odsouzení a zavrnutí heliocentrismu katolickou církví a celého Koperníkova díla	Evropa
1618	formulce třetího Keplerova zákona pohybu planet	J.Kepler
1632	důkaz pravdivosti heliocentrického modelu; publikován zákon volného pádu; formulce principu nezávislosti pohybů (tzv. Galileiho princip)	G.Galilei
1635	prvně pozorována hvězda dalekohledem za dne - Arcturos v souhvězdí Honáka	
1636	vyšla první mapa Měsíce	Peiresco
1638	objev prvé periodické hvězdy (Mira Ceti)	
1655	objeven Saturnův prstenec a jeho měsíc (Titan)	Huygens
1668	dílo o kometách, obsahující měření paralaxy komet z let 1652 a 1664, čímž bylo dokázáno, že se nejedná o meteority v zemské atmosféře	J.Hevelius
1672	změřena paralaxa Slunce a stanovena jeho vzdálenost na 140 miliónů kilometrů (správně: 150.000.000 km)	G.D.Cassini, J.Richer
1669	počátky měření poledníkového stupně, což umožnilo v 18. stol.měření Země, které dokazuje sploštění Země na pólech	J. Piccard
1676	na základě pozorování Jupiterových měsíců stanovení rychlosti a konečnosti rychlosti světla (viz r. 1725)	O.Roemer
1681-1682	na základě Newtonovy gravitační teorie vypočítány dráhy známých komet a určeny opětovné návraty (později nazvána autorovým jménem - Halleyova kometa)	E.Halley
poč. 18.stol.	objeveny spirální mlhoviny	
poč. 18.stol.	předpověď periodicity komet	E.Halley
18. stol.	intenzivní studium nebeských těles - spřesňování výpočtů pohybu těles planetární soustavy	J.L.Lagrange, P.S.Laplace
18. stol.	předpoklad, že Země je chladnoucí Slunce	W.Melle
1717	objeven vlastní pohyb hvězd	E.Halley
1718	rozpoznán vlastní pohyb stálic (viz r. 1756) - - Arcturos v souhvězdí Honáka - důkaz, že nejsou hvězdy stálicemi	E.Halley
1725	vydány (po smrti autora) výsledky měření poloh hvězd v Greenwichské observatoři; první moderní katalog obsahuje polohy 2852 hvězd s přesností 10''	J.Flamsteed
1736	francouzské výpravy do Laponska a Peru - měření délky zemského poledníku	

1747	objevena tzv. nutace zemské osy (perioda 19 let) - nepravidelnosti v precesním pohybu zemské osy	J.Bradley
1748	vysvětleny příčiny precese	d'Alembert
1750	vysvětleno složení Mléčné dráhy	T.Wright
1752	určena denní paralaxa Měsíce (57'), z čehož vy- plynulo, že je Měsíc od Země vzdálen 60 zemských poloměrů	měřili: N.L.Lacaille (mys Dobré naděje) a J.Lalande (Berlín)
1754	vyslovena hypotéza o vzniku planetární soustavy; ke stejné hypotéze dospěl později Laplace (viz r. 1796); nazývá se Kantova-Laplaceova nebulární te- orie	I.Kant
1756	známo 57 hvězd s vlastním pohybem	viz r. 1718
1757	zkonstruován první achromatický objektiv daleko- hledu	J.Dollond
1759	návrat komety, jejíž dráha bylo propočítána	E.Halley
1762	publikovány tabulky pohybu Měsíce	J.Mayer
1762	uveřejněn katalog 10000 hvězd	N.L.Lacaille
1771	katalog mlhovin	Ch.Messier
1779	objevena planetární mlhovina	Darquier
1781	objevena planeta Uran	W.Herschel
1782	hvězda Algol definována jako zákrytová dvojhvězda (pozorování pravidelných změn jasu)	J.Goodricke
1783	objev vlastního pohybu Slunce	W.Herschel
1784	sestaven Messierův katalog mlhovin	
1784	vypracován katalog 711 dvojhvězd	W.Herschel
1788	nalezeno řešení pro tzv. restringovaný problém (tři tělesa, z nichž má jedno zanedbatelnou hmotnost)	J.Lagrange
1793, 24.11.	vyšel oficiální dekret, který zaváděl "revoluční ka- lendář"- čas byl decimalizován: měsíc se dělil na desetidenní cykly (decades) ... podobný systém se používal ve starém Egyptě, ve Francii byl však motiv čistě politický (opustit tradiční náboženské sváteční dny); v září 1805 byl pro svůj absolutní neúspěch zrušen Napoleonem a oficiálně se obnovil sedmidenní týden	Francie
1796	hypotéza o vzniku planetární soustavy; ke stejné hypotéze dospěl již r. 1754 I.Kant; nazývá se Kantova-Laplaceova nebulární teorie	I.Kant
1801	objevena planetka Ceres	G.Piazzi
1827	publikován katalog dvojhvězd, obsahující 3112 ob- jektů, z nichž jich 2343 objevil sám autor	V.J.Struve



1836	započato s měřením svítivosti hvězd; systematické pozorování jižní oblohy (1834-1838)	J.F.Herschel
1837	poprvé změřena vzdálenost hvězdy (61 Cygni v souhvězdí Labutě)	F.Bessel
1838	poprvé změřen vlastní pohyb hvězd rozbořením měření paralaxy	F.W.Bessel, V.J.Struve
1839	založeny hvězdárny - Pulkov (ČR) a Harvard College (USA)	
1839	na základě tvaru Země a jejího pohybu byl podán důkaz, že tloušťka pevné zemské kůry musí být 1/4 průměru Země	V.Hopkins
1840	měřením paralaxy hvězdy ? Centauri zjištěna vzdálenost čtyř světelných let - nejbližší známá hvězda	T.Henderson, T. Mac Lear
1842	použití fotografie ke studiu slunečního spektra - objev Fraunhofferových čar také v ultrafialovém záření; objeveny sluneční protuberance	A.H.Becquerel, J.W.Draper
1842	změřena radiální rychlost hvězd	A.Fizeau
1845	prezentován názor, že mlhovina M 51 v souhvězdí Honící psi má spirálovitou strukturu	W.P.Rosse
1846	na základě nepravidelnosti v pohybu Uranu byla vypočítána poloha a dráha další planety - Neptun (objevil jej J.Galle)	U.Verrier (vypočítal)
1850	pořízena první daguerrotypie Měsíce	W.C.Bond
1850	první fotografický snímek v astronomii (hvězda Vega)	J.A.Whipple
1851	při zatmění Slunce byla poprvé vyfotografována sluneční koróna	A.L.Busch
1855-1862	vydán katalog 324188 hvězd a r. 1886 byl doplněn o dalších 133000 hvězd	Bonnská hvězdárna
1858	poprvé vyfotografovány sluneční protuberance	A.L.Busch
1862	v blízkosti Síria objevena slabá hvězda, která způsobuje padesátiletou periodicitu v pohybu Síria; tato nová hvězda odpovídala pozorováním F.W.Bessela z r. 1834	A.Clark
1864	pomocí spektroskopie prokázán plynný charakter některých mlhovin (autor je také zakladatelem spektroskopie hvězd)	W.Huggins
1868	určena vlnová délka asi stovky čar slunečního spektra	A.J.Angström
1872	začíná vycházet časopis Vesmír	Praha
1875	počátky soustavného fotografického mapování oblohy	B.A.Gould
1887	na základě analýzy spekter různých hvězd byla formulována teorie o teplotách hvězd a tím i o jejich vývojovém stupni	J.N.Lockyer

1888	sestaven New General Catalogue (NGC)	J.E.Dreyer
1889	objev spektrální dvojhvězdy (Mizar)	
1889-1890	měření zeměpisné šířky v Berlíně, Postupimi a v Praze byl dokázán pohyb zemského pólu a o rok později byly objeveny dvě jeho periody - 12 a 14 měsíců	S.C.Chandler
1890	objevy spektroskopické dvojhvězdy (Harvard)	E.Ch.Pickering
1892	stanovena rychlost Slunce vzhledem k nejbližší hvězdě na $v = 18,5$ km/s (dnes se udává hodnota 19,5 km/s)	P.Kempf
1898	začala se budovat hvězdárna v Ondřejově	bratři Fričovi
20.stol.	relativistický model	A.Einstein
1905	domněnka, že je nutno rozlišovat mezi hvězdami tzv. obry a trpaslíky (viz 1913)	R.Hertzsprung
1905	určena teplota Slunce	W.Wien
1908	vyslovena tzv. panspermická hypotéza vzniku života - tlak světelného záření proudícího vesmírem může unášet zárodky života mezi nebeskými tělesy	S.A.Arrhenius
1908	změřeno magnetické pole Slunce	G.E.Hale
1913	definován tzv. Hertzsprung-Russelův diagram; potvrzena Hertzsprungova domněnka o existenci obrů a trpaslíků mezi hvězdami a odvozena závislost mezi svítivostí hvězd a spektrální třídou	H.N.Russel
1913	objeveno kosmické záření	V.F.Hess
1916	kulová souměrná nerotující hvězda	K.Schwarzschild
1917	model vesmíru de Sitterův	W.de Sitter
1919	zatmění Slunce - potvrzení teorie relativity	A.Eddington
kolem 1920	rozpoznány cizí galaxie	
1920	díky ionizační teorii byly objasněny spektroskopické odlišnosti světla "obrů" a "trpaslíků" související s hustotou hvězd (menší pro obry)	M.N.Saha
1920	změřeny rozměry Galaxie	
1922	model uzavřeného vesmíru	A.Friedmann
1922	model rozpínajícího se vesmíru, založen na relativistické kosmologii; o tento model se opírá teorie "velkého třesku", vysvětlující vznik vesmíru	
1924	model otevřeného vesmíru	A.Friedmann
1926	kompaktifikace rozměrů vesmíru	O.Klein
1927	model otevřeného vesmíru (dopracován)	G.Lemaitre

1929	zjištěno, že posuvy čar ve spektrech galaxií směrem k červenému konci (červený posuv), které byly vyloženy podle Dopplerova principu radiálním pohybem, jsou úměrné vzdálenosti objektů; tímto zjištěním byly podloženy modely rozpínajícího se vesmíru	E.P.Hubble
1930	změřeny vzdálenosti blízkých galaxií	
1930	objeveno Pluto	C.Tombaugh
1931	publikována hypotéza o vzniku sluneční soustavy vytrhnutím sluneční hmoty (slapu) působením přitažlivosti jiné hvězdy	J.H.Jeans
1932	model otevřeného vesmíru (kritický)	A.Einstein, W. de Sitter
kolem 1935	skrytá hmota (předpověď)	F.Zwicky
kolem 1935	model oscilujícího vesmíru	
1936	efekt gravitační čočky	A.Einstein, R.Mandl
1937	postaven první radioteleskop	G.Reber
1938	objeveno, že kosmické záření na Zem dopadá převážně v podobě rozsáhlých spršek	P.Auger
1943	objevy tzv. Seyfertovy galaxie	C.K.Seyfert
1946	počátek radarové astronomie, když se podařilo zachytit ozvěnu radiových signálů od povrchu Měsíce (r. 1959 byl získán radiový odraz od Slunce)	
1946	první ultrafialový snímek Slunce pořízený upravenou raketou V-2	
1947	teorie hvězdných asociací, která je důležitá při řešení otázek vzniku hvězd	V.A.Ambarcumjan
1948	objeven pátý měsíc Uranu a druhý měsíc Neptunu	G.P.Kuiper
1948	propočítán časový počátek vesmíru	G.Gamow
1949	důkaz kosmického rentgenového záření (pomocí raket)	H.Friedmann
1949	získány infračervené fotografie jádra naší Galaxie a byl zjištěn jeho eliptický tvar s průměrem cca 1200 pc	D.A.Kaliňak, V.Krasovskij, V.B.Nikonov
1950	změřeny vzdálenosti slabých galaxií	
1951	de facto vznikl nový obor radioastronomie na základě objevu spektrální čáry neutrálního vodíku na vlně 21 cm; od této doby lze měřit frekvenční posuvy, a tudíž rychlosti přibližování či vzdalování mezihvězdných mračen	
1952	hypotéza o vzniku hvězd z nestacionárního stavu ve vláknech mlhoviny, které se rozpadají a vytvářejí turbulentní shluky, ze kterých se postupně vytváří hutné těleso	V.G.Fesenkov

1952	zjištěno (při zatmění Slunce), že délka radiové vlny je tím větší, čím vyšší vrstva koróny je zdrojem rádiového záření	B.M.Čičačev, V.V.Vitkevič
1954	od r. 1936 do 1954 bylo prozkoumáno na 700 mlhovin (celkem přes 800) a bylo dokázáno, že jsou všechny uspořádány stejným způsobem a mají tutéž hustotu jako tehdy známé soustavy	
1956	publikována tzv. solární hypotéza vzniku sluneční soustavy - sjednotila evoluční stelární teorii s planetární: Slunce i planety vznikly z protohvězdy, která zmenšila svůj objem asi na milióntinu původního	G.P.Kuiper
1956	pozorováno hnízdo galaxií ve vzdálenosti 55 Mpc a bylo potvrzeno rozpínání vesmíru, a to rychlostí 55 km/s na 1 Mpc	W.A.Baum
1957	ve vnější koróně Slunce bylo objeveno pravidelné magnetické pole radiálního směru, které ovlivňuje dynamiku fyzikálních procesů probíhajících v této oblasti kosmického prostoru; při studiu byly využity zdroje rádiového záření v Krabí mlhovině při jejím zákrytu Sluncem	V.V.Vitkevič, B.N.Panovkin
1957	teorie vzniku těžších prvků ve vesmíru	Geoffrey a Eleanor Burbidge, W.Fowler, F.Hoyle
1957	4.10.; první umělá družice Země - Sputnik 1 (SSSR)	
1958	biologický princip I.	G.M.Idlis
1958	na základě pozorování výronů plynů na Měsíci byla vyslovena hypotéza o jeho vulkanické činnosti; při spektroskopickém pozorování kráteru Aristarchos a Alfonz (1955-1966) bylo dokázáno, že oblak dýmu z kráteru Alfonz je analogický s dýmem kamčatských vulkánů	N.A.Kozyrev
1959	sestrojen první (rtg) dalekohled k pozorování rentgenového záření z kosmu	R.Giacconi
1959	1.4.; první průlet okolo Měsíce - Luna 1 (SSSR);	
1959	13.9.; Luna 2 jako první zasáhla Měsíc;	
1959	7.10.; Luna 3 jako první sonda vyfotografovala odvrácenou stranu Měsíce	
kolem 1960	zjištěno horké jádro Měsíce díky objevenému výronu tepla z jeho jádra - vyzařování rádiových vln	V.S.Tropickij, V.D.Krotikov

1960	projekt OZMA - radioteleskop s průměrem 26 m se pokoušel zachytit signály předpokládaných vyspělých entit u hvězd v souhvězdí Velryby (tau) a Eridanus (epsilon) - observatoř Green Bank	F.Drake
1960	formulována problematika mimozemské biologie a prosazen její název - exobiologie	J.Lederberg
1960	4.1.; první meteorologická družice - Tiros 1 (USA);	
1960	11.8.; první návrat umělého tělesa z dráhy - Discoverer 13 (USA);	
1960	20.8.; první návrat živých tvorů z vesmíru (SSSR)	
1960	první snímky Slunce v rentgenovém spektru elmg. záření	
po r. 1960	tzv. mezihvězdné prázdno	
1961	biologický princip II.	R.Dicke
1961	experimentální důkaz (při úplném zatmění Slunce), že kosmický prach není ve vesmíru rozptýlený homogenně, ale díky gravitační síle je soustředěný v oblacích různých rozměrů v řádu 8 úhlových vteřin; objev je důležitý pro hypotézy o vzniku hvězdných soustav	S.M.Poloskov, A.J.Mikirov
1961, 12.4.	na palubě kosmické lodi Vostok 1 startoval z Bajkonuru (Rusko) první člověk do vesmíru - J.Gagarin; let trval 1 hodinu 48 minut a stav bez tíže 75 minut	
1962	objeven první rentgenový zdroj mimo Slunenčí soustavu - Scorpius X-1	R.Giacconi
1962	14.12.; první úspěšný průlet automatu kolem Venuše - Mariner 2 (USA)	
1963	objeveny kvazary	M.Schmidt
1964	první snímky Měsíce s vysokým rozlišením - Ranger 7 (USA)	
1965	18.3.; první výstup člověka ve skafandru do vesmíru - A.Leonov (SSSR)	
1965	15.7.; první úspěšný průzkum Marsu automatem - Mariner 4 (USA)	
1965	15.12.; první setkání dvou pilotovaných lodí - Gemini 7 a 6 (USA)	
1965	objeveno spojitě radiové záření kosmického pozadí (teoreticky zdůvodnil prof. Dick)	
1965	počátek radioastronomie v infračerveném spektru	
1966	3.2.; první měkké přistání na povrchu Měsíce - Luna 9 (SSSR)	
1966	16.3.; první spojení dvou těles ve vesmíru - Gemini 8 a GATV-8 (USA)	
1966	3.4.; první umělá družice Měsíce - Luna 10 (SSSR)	

1968	objev Nova Vulpeculae a Nova Delphini	G.Alcock
1968	(pravděpodobně) zachyceny gravitační vlny, pocházející z jádra naší Galaxie	
1968	poprvé použit termín černá díra	J.Wheeler
1968	24.12.; první lidé okolo Měsíce - Apollo 8 (USA)	
1968	vypuštěna umělá družice OAO-2, měřící ultrafialové záření nebeských těles	
1968-1969	v pozůstatcích supernov objeveny pulsary - zdroje rádiových vln, rychle rotující neutronové hvězdy	J.Bellová, A.Hewish
1969	20.7.; první lidé na povrchu Měsíce - N.Armstrong a B.Aldrin - USA	
1969	objevena první organická sloučenina v mezihvězdném prostoru (detekce čar formaldehydu)	
1970	na Měsíci zaregistrovány 14 otřesů způsobených jeho tektonickou činností - Apollo 12 (USA)	
1970	změřeny vzdálenosti kvasarů	
1971	k Marsu vypuštěny sondy Mars 1,2 a 3, které se staly jeho družicemi; Mars 3 přistál měkkce na povrchu a byly zjištěny mnohá fyzikální fakta, např. teplotní anomálie	
1971	experimentální důkaz emise neutrin ze Slunce	R.Davis
1972	k Jupiteru vyslána sonda Pioneer 10, která později opustila naši soustavu a nese s sebou zlatou destičku s množstvím informací o Zemi i o jejích obyvatelích - pro případ jejího zachycení mimozemskou civilizací	
1972	k Venuši vyslána sonda Venera 8, kde také 22.7. přistála	
1973	antropický princip	B.Carter
1973	objeveny zábleskové zdroje záření gama	družice Vela
1973	4.12.; první měření Jupitera během průletu sondy Pioneer 10 (USA)	
1974	29.3.; první měření Merkuru během průletu sondy Mariner 10 (USA)	
1976	20.7.; první měření na povrchu Marsu - Viking 1 (USA)	
1978	vytvořena dokonalejší a citlivější rtg observatoř na družici, tzv. Einsteinova laboratoř - HEAO-2	R.Giacconi
1979	gravitátory	
1979	1.9.; první měření Saturnu během průletu sondy Pioneer 11 (USA)	
1981	teorie inflace vesmíru	A.Guth
1986	první měření Uranu během průletu sondy Voyager 2 (USA)	
1989	24.8.; první měření Neptunu během průletu sondy Voyager 2 (USA)	

1989	18.12.; vypuštěna družice COBE	
1990	24.4.; vypuštěn Hubbleův teleskop	
1993	inflační teorie (potvrzení)	družice COBE
1995	trigonometricky určené vzdálenosti cca 10 tisíc hvězd (vzdálených do 150 ly)	
1997	trigonometricky určené paralaxy cca 100 tisíc hvězd (vzdálených až 600 ly)	družice Hipparcos
1999	vypuštěna družice Chandra	
2002	vypuštěna družice Integral	
2006. 19.01.	vypuštěna družice New Horizons	více zde

## B Appendix: Fotometrické pojmy

### B.1 Slovníček pojmů z fotometrie

**steradián** (srad) – prostorový úhel, který s vrcholem ve středu koule vytíná na povrchu této koule plochu s obsahem rovným druhé mocnině poloměru koule.

**zářivý tok** – výkon přenášený zářením, které prochází v určitém místě prostoru danou plochou [1 W]

**hustota zářivého toku** – zářivý tok plochou/průmět té plochy do směru kolmého na směr šíření záření [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

**zářivost** (bodového zdroje světla v daném směru) – část zářivého toku vycházející ze zdroje v daném směru do malého prostorového úhlu dělený velikostí tohoto prostorového úhlu [1 W/srad]

**svítivost** (bodového zdroje světla v daném směru) – část svět. toku ze zdroje v daném směru do malého prostorového úhlu dělený velikostí tohoto prostorového úhlu;

**kandela** (1 cd) – jednotka svítivosti, (základní jednotka SI) = svítivost v daném směru zdroje, který vysílá monochromatické záření frekvence  $540 \cdot 10^{12}$  Hz a jehož zářivost v tomto směru činí  $(1/683)$  W/srad

**jas** – svítivost plošky povrchu zdroje ve směru pozorování/kolmý průmět této plošky do tohoto směru. [ $1 \text{ cd}/\text{m}^2$ ]

**světelný tok** – charakterizuje intenzitu zrakového vjemu lidského oka, který je vyvolán zářivým tokem;

**lumen** (1 lm) – jednotka světelného toku; bodový světelný zdroj vysílá do prostorového úhlu 1 srad světelný tok 1 lumenu, je-li svítivost tohoto zdroje (ve všech směrech) rovna 1 cd.

**hustota světelného toku** – světelný tok plochou/průmět této plochy do směru kolmého na směr šíření světla [ $\text{lm}/\text{m}^2$ ]

(intenzita) **osvětlení** – svět. tok dopadající na sledovanou plošku povrchu/velikost této plošky; 1 lux (lx) – jednotka osvětlení; 1 lux je osvětlení plochy, na jejíž každý  $\text{m}^2$  dopadá rovnoměrně rozložený svět. tok 1 lm

Tabulka C.1: Speciální označení některých apsid

centrální těleso	bod V1	bod V3
Slunce	perihel	afel
Země	perigeum	apogeum
hvězda	periastron	apastron
obecně	předpona peri-	předpona ap- (apo-, apa-),

## C Appendix: Kuželosečky

Elipsa = množina bodů M, které mají od dvou daných bodů F1 a F2 – tzv. ohnisek elipsy – konstantní součet vzdáleností rovný  $2a$  (a je velká poloosa elipsy)

$$F1M + MF2 = 2a$$

O ... střed elipsy, V1, V3 ... hlavní vrcholy, V2, V4 ... vedlejší vrcholy  
vrcholy elipsy = apsidy, spojnice vrcholů – přímka apsid

Velká osa elipsy = přímka, procházející oběma ohnisky = délka úsečky V1V3

velká poloosa elipsy = polovina V1V3.

Vzdálenost  $OV1 = OV3 = a$  ... velká poloosa,  $OV2 = OV4 = b$  ... malá poloosa,

$OF1 = OF2 = e$  ... výstřednost,

$OF1/OV1 = \varepsilon$  ... číselná výstřednost (numerická excentricita)

Mezní případ elipsy - kružnice,  $F1 = F2 = O$ , výstřednost elipsy  $e = OF1 = OF2 = 0$

namísto výstřednosti  $e$ , definované výše, tzv. číselná výstřednost (numerická excentricita)  $\varepsilon = OF1/OV1$ .

## D Apendix: Metody měření vzdáleností ve vesmíru

**triangulační metoda** - současné měření směrů ze 2 stanovišť => rozdíl směrů = paralaxa => paralaxa + vzdálenost stanovišť => vzdálenost stanoviště - místa na Zemi, Země v různých časech, objekty Sluneční soust.

**radiolokace** - ve Sluneční soustavě; měření doby mezi vysláním a příjmem rádiového impulsu (rychlost =  $c$ ) => vzdálenost „terče“

**cefeidy** – objekty v Galaxii i cizích galaxiích

**standardní svíčky** – supernovy, zákrytové dvojhvězdy – vzdálenosti galaktické

**Hubblův vztah** – 1929 Edwin Hubble - rychlost vzdalování objektů v je úměrná vzdálenosti  $r$  Hubblův vztah  $v = H \cdot r$ ,  $H$  = Hubblova konstanta. Platí pouze ve světě galaxií!



## E Appendix: Výslovnost latinských slov

Pracovním jazykem astronoma je dnes angličtina, v níž je publikována naprostá většina všech článků a moderních výsledků. Ale přesto se každý adept astronomie setká i se starobyloou latinou. Latinské názvy souhvězdí by měli správně vyslovovat prostě všichni. Pravidla latinské výslovnosti jsou rozsáhlá a pro hlubší seznámení doporučujeme učebnici latiny. Tady nám postačí jen rychlokurz. Souhláska *c* se před *e*, *ae*, *oe*, *i*, *y* vyslovuje jako české *c*, tedy Cygnus [cy-], Atlas Coeli [cé-]. Jinak se vyslovuje jako *k*: Carina [ka-], Crux [kr-]. Dvojhlasiku *ph* čteme jako *f*: Cepheus [-efe-]. *D*, *t*, *n* se vyslovují vždy tvrdě: Canis [-ny-], *s* čteme vždy jako *s*: Mensa, Perseus.

## F Appendix: Řecká abeceda

V tabulce uvádíme znaky řecké abecedy, jejich český a anglický název a výslovnost v angličtině. Některé velké znaky se jako označení veličin nepoužívají.

$\alpha$	<i>A</i>	alfa	alpha	[ˈælfə]
$\beta$	<i>B</i>	beta	beta	[ˈbi:tə]
$\gamma$	$\Gamma$	gama	gamma	[ˈgæmə]
$\delta$	$\Delta$	delta	delta	[ˈdeltə]
$\epsilon$	<i>E</i>	epsilon	epsilon	[epˈsailən]
$\zeta$	<i>Z</i>	dzéta	zeta	[ˈzi:tə]
$\eta$	<i>H</i>	éta	eta	[ˈi:tə]
$\vartheta$	$\Theta$	théta	theta	[ˈθ i:tə]
$\iota$	<i>I</i>	iota	iota	[aiˈoutə]
$\kappa$	<i>K</i>	kapa	kappa	[ˈkæpə]
$\lambda$	$\Lambda$	lambda	lambda	[ˈlæmdə]
$\mu$	<i>M</i>	mí	mu	[mju:,mu:]
$\nu$	<i>N</i>	ný	nu	[nju:,nu:]
$\xi$	$\Xi$	xí	xi	[gzai, zai]
$o$	<i>O</i>	omikron	omicron	[ouˈmaikrən]
$\varpi$	$\Pi$	pí	pi	[pai]
$\varrho$	<i>P</i>	ró	rho	[rou]
$\sigma$	$\Sigma$	sigma	sigma	[ˈsigmə]
$\tau$	<i>T</i>	tau	tau	[tau,to:]
$\upsilon$	<i>Y</i>	ypsilon	upsilon	[ju:pˈsailən]
$\varphi$	$\Phi$	fí	phi	[fai]
$\chi$	<i>X</i>	chí	chi	[kai]
$\psi$	$\Psi$	psí	psi	[psai,sai]
$\omega$	$\Omega$	omega	omega	[ˈoumigə]