

Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity  
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Miloslav Zejda

## Základy astronomie

Skripta – verze 0.18  
9. ledna 2018

Brno 2018



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

# Obsah

<b>Základy astronomie 1</b>	<b>10</b>
<b>1 Historický úvod</b>	<b>12</b>
1.1 Vznik a význam astronomie . . . . .	12
1.2 Mezníky v dějinách astronomie . . . . .	14
<b>Základy astronomie 1</b>	
<b>2 Základní pojmy v astronomii</b>	<b>24</b>
2.1 Obloha a hvězdná obloha . . . . .	24
2.2 Jak je to jasné? . . . . .	28
2.3 Jednotky hmotnosti, výkonu . . . . .	28
2.4 Vesmírné dálavy . . . . .	30
2.4.1 Astronomické délkové jednotky . . . . .	31
2.4.2 Vzdálenosti ve vesmíru . . . . .	32
<b>3 Souřadnicové soustavy v astronomii</b>	<b>38</b>
3.1 Obzorníková soustava souřadnic . . . . .	41
3.2 Rovníková soustava souřadnic . . . . .	42
3.3 A přece se mění . . . . .	44
<b>4 Čas</b>	<b>48</b>
4.1 Jednotky času . . . . .	48
4.2 Měření času . . . . .	49
4.2.1 Časy v astronomii . . . . .	53
4.3 Doba rotace a doba oběhu . . . . .	56
4.3.1 Den . . . . .	56
4.3.2 Hvězdný čas . . . . .	58
4.3.3 Místní a pásmový čas . . . . .	59
4.3.4 Rok . . . . .	61
4.4 Kalendáře . . . . .	62
<b>5 Hvězdné objekty noční oblohy</b>	<b>66</b>
5.1 Hvězdy a souhvězdí . . . . .	66
5.1.1 Hvězdné mapy a atlasy . . . . .	72
5.1.2 Označování hvězd . . . . .	74
5.1.3 Dvojhvězdy . . . . .	75
5.1.4 Proměnné hvězdy . . . . .	76
5.2 „Nehvězdné“ objekty ze světa hvězd . . . . .	78
5.2.1 Hvězdokupy . . . . .	80
5.2.2 Mlhoviny . . . . .	82
5.3 Naše a cizí galaxie . . . . .	85
5.4 Atmosférické vlivy na astronomická pozorování . . . . .	87

5.4.1	Vlivy při pozorování . . . . .	87
5.4.2	Seeing . . . . .	88
5.4.3	Světelné znečištění . . . . .	89
<b>6</b>	<b>Vesmírní sousedé na obloze</b>	<b>93</b>
6.1	Slunce . . . . .	93
6.1.1	Slunce na obloze . . . . .	95
6.1.2	Slunce na hvězdné obloze . . . . .	97
6.2	Měsíc . . . . .	98
6.2.1	Siderický a synodický měsíc . . . . .	99
6.2.2	Fáze Měsíce . . . . .	100
6.2.3	Měsíční tvář . . . . .	103
6.3	Kosmické divadlo – zatmění . . . . .	106
6.3.1	Zatmění Měsíce . . . . .	107
6.3.2	Zatmění Slunce . . . . .	109
6.3.3	Četnost a pozorovatelnost zatmění . . . . .	111
6.4	Planety, trpasličí planety . . . . .	113
6.4.1	Pozorování planet . . . . .	115
6.4.2	Tanec planet . . . . .	117
6.4.3	Aspekty . . . . .	119
6.5	Planetky . . . . .	120
6.6	Kometry . . . . .	120
6.7	Meteoroidy, meteory, meteority . . . . .	121
6.8	Umělé družice . . . . .	124
<b>7</b>	<b>Informace z vesmíru</b>	<b>127</b>
7.1	Meteority . . . . .	127
7.2	Dovoz vzorků . . . . .	129
7.3	Kosmický vítr aneb „nálety“ částic . . . . .	131
7.3.1	Kosmické záření . . . . .	131
7.3.2	Sluneční vítr . . . . .	132
7.3.3	Neutrino . . . . .	133
7.3.4	Gravitační vlny . . . . .	133
7.4	Elektromagnetické záření . . . . .	134
7.4.1	Okna do vesmíru . . . . .	136
7.4.2	Jak tělesa září? . . . . .	138
7.4.3	Záření absolutně černého tělesa . . . . .	141
<b>8</b>	<b>Spektroskopie</b>	<b>147</b>
8.1	Počátky astrofyziky . . . . .	148
8.2	Spektroskopie hvězd . . . . .	151
8.3	Spektrální klasifikace hvězd . . . . .	153

<b>9 Fotometrie</b>	<b>157</b>
9.1 Pogsonova rovnice . . . . .	157
9.2 Absolutní jasnost, modul vzdálenosti . . . . .	160
9.3 Barvy v astronomii . . . . .	161
<b>10 Optická astronomie – přístroje</b>	<b>166</b>
10.1 Oko – nejcennější přístroj astronoma . . . . .	166
10.2 Prehistorie a historie dalekohledu . . . . .	170
10.3 Funkce dalekohledů a jejich typy . . . . .	172
10.3.1 Čočkové dalekohledy (refraktory) . . . . .	173
10.3.2 Zrcadlové dalekohledy (reflektory) . . . . .	174
10.3.3 Kombinované dalekohledy . . . . .	176
10.3.4 Speciální dalekohledy . . . . .	177
10.4 Charakteristiky a vady astronomických optických přístrojů . . . . .	178
10.4.1 Zvětšení dalekohledu . . . . .	179
10.4.2 Světelnost dalekohledu . . . . .	180
10.4.3 Rozlišovací schopnost dalekohledu . . . . .	181
10.4.4 Optické vady dalekohledů . . . . .	182
10.5 Příslušenství dalekohledů . . . . .	184
10.5.1 Okuláry . . . . .	184
10.5.2 Optické filtry . . . . .	186
10.5.3 Detektory . . . . .	186
10.5.4 Aktivní a adaptivní optika . . . . .	187
10.5.5 Montáže dalekohledů . . . . .	188
10.6 Největší observatoře a teleskopy světa . . . . .	190
10.7 Kosmické observatoře . . . . .	192
<b>11 Neoptická astronomie</b>	<b>197</b>
11.1 Astronomie gama záření . . . . .	197
11.2 Rentgenová astronomie . . . . .	198
11.3 Ultrafialová astronomie . . . . .	199
11.4 Infračervená astronomie . . . . .	200
11.5 Radioastronomie . . . . .	201
11.6 Částicová astronomie . . . . .	205
11.6.1 Kosmické záření . . . . .	205
11.6.2 Neutrinová astronomie . . . . .	205
11.6.3 Gravitační vlny . . . . .	207
<b>12 Sluneční soustava – přehled</b>	<b>210</b>
12.1 Inventura ve Sluneční soustavě . . . . .	210
12.2 Vývoj Sluneční soustavy . . . . .	211
12.2.1 Vznik Sluneční soustavy . . . . .	211
12.2.2 Stopy předchozího vývoje na tváři planet . . . . .	213
12.3 Základní informace o planetách . . . . .	216
12.3.1 Merkur ☿ . . . . .	216
12.3.2 Venuše ♀ . . . . .	217

12.3.3	Země $\oplus$ . . . . .	219
12.3.4	Mars $\♂$ . . . . .	220
12.3.5	Jupiter $\♃$ . . . . .	223
12.3.6	Saturn $\♄$ . . . . .	225
12.3.7	Uran $\♅$ . . . . .	226
12.3.8	Neptun $\♆$ . . . . .	227
12.4	Malá tělesa Sluneční soustavy . . . . .	228
12.4.1	Trpasličí planety . . . . .	228
12.4.2	Měsíce planet . . . . .	231
12.4.2.1	Země: Měsíc . . . . .	231
12.4.2.2	Mars: Phobos a Deimos . . . . .	231
12.4.2.3	Rodina družic Jupitera . . . . .	232
12.4.2.4	Měsíce Saturna . . . . .	232
12.4.2.5	Společníci Uranu . . . . .	233
12.4.2.6	Neptunovy měsíce . . . . .	233
12.4.3	Planetky . . . . .	234
12.4.4	Komety . . . . .	235
12.5	Modely Sluneční soustavy . . . . .	236
12.5.1	Geocentrický model . . . . .	237
12.5.2	Heliocentrický model . . . . .	238
12.5.3	Tychonův kompromis . . . . .	239
12.6	Keplerovy zákony . . . . .	239
<b>13</b>	<b>Exoplanety</b> . . . . .	<b>243</b>
13.1	Co je (exo)planeta? . . . . .	244
13.2	Exoplanety ve dvojhvězdách . . . . .	247
13.3	Přehled metod pro detekci exoplanet . . . . .	248
13.3.1	Přímé zobrazování . . . . .	248
13.3.2	Astrometrie . . . . .	248
13.3.3	Gravitační mikročočky . . . . .	249
13.3.4	Zpoždování záblesků pulsarů . . . . .	251
13.3.5	Radiální rychlosti . . . . .	251
13.3.6	Transity . . . . .	252
13.3.7	TTV,ETV . . . . .	254
<b>14</b>	<b>Život ve vesmíru</b> . . . . .	<b>257</b>
14.1	Vznik života . . . . .	258
14.2	Život ve vesmíru z pohledu astronoma . . . . .	259
14.3	Četnost života ve vesmíru – Drakeova rovnice . . . . .	260
14.3.1	Život na Zemi – typický vzorek? . . . . .	262
14.4	Hledání mimozemského života . . . . .	262
14.4.1	Život ve Sluneční soustavě . . . . .	264
14.5	Kontakt s mimozemšťany . . . . .	266
14.6	Domněnka o vzácné Zemi . . . . .	267

## Základy astronomie 2 269

### Základy astronomie 2

<b>15 Hvězdy zpovzdáli</b>	<b>271</b>
15.1 Fotometrie . . . . .	271
15.1.1 Vizuální fotometrie . . . . .	271
15.1.1.1 Fotografie . . . . .	273
15.1.1.2 Fotonásobiče a fotometry . . . . .	274
15.1.1.3 Na bázi křemíku – CCD čipy . . . . .	275
15.1.2 Fotografická fotometrie . . . . .	279
15.1.3 Fotoelektrická fotometrie . . . . .	280
15.1.4 CCD fotometrie . . . . .	281
15.2 Astronomická interferometrie . . . . .	283
15.3 Spektroskopie . . . . .	285
15.4 Dvojhvězdné studnice informací . . . . .	287
15.4.1 Vizuální dvojhvězdy . . . . .	287
15.4.2 Astrometrické dvojhvězdy . . . . .	289
15.4.3 Spektroskopické dvojhvězdy . . . . .	289
15.4.4 Zákrytové dvojhvězdy . . . . .	290
15.5 Hvězdný diagram . . . . .	294
15.5.1 Historie . . . . .	295
15.5.2 Podoby HRD . . . . .	296
15.5.3 Barevný diagram . . . . .	302
<b>16 Hvězdy zblízka</b>	<b>305</b>
16.1 Svítící koule . . . . .	305
16.2 Modely hvězd . . . . .	306
16.3 Anatomie hvězdy . . . . .	309
16.3.1 Nitro hvězdy . . . . .	309
16.3.2 Atmosféra hvězdy . . . . .	311
16.4 Proč hvězdy září? . . . . .	312
16.5 Jaderné reakce v nitru hvězd . . . . .	314
16.5.1 Proton-protonový řetězec (p-p řetězec) . . . . .	314
16.5.2 CNO (uhlíkový) cyklus . . . . .	315
16.5.3 $3\alpha$ proces . . . . .	317
16.6 Přenos tepla . . . . .	318
16.6.1 Přenos energie zářením (zářivou difúzí) . . . . .	319
16.6.2 Konvekce . . . . .	319
16.6.3 Přenos tepla vedením . . . . .	320
16.6.4 Proud neutrin . . . . .	321

---

<b>17 Slunce jako vzorová hvězda</b>	<b>323</b>
17.1 Chemické složení Slunce . . . . .	323
17.2 Model Slunce . . . . .	324
17.3 Sluneční atmosféra a projevy aktivity Slunce . . . . .	327
17.4 Projevy aktivity Slunce . . . . .	330
17.4.1 Sluneční skvrny . . . . .	331
17.4.2 Granulace (zrnitost) . . . . .	333
17.4.3 Fakule (pochodně) . . . . .	333
17.4.4 Erupce . . . . .	333
17.4.5 Sluncetřesení . . . . .	334
17.4.6 Flokule a spikule . . . . .	335
17.4.7 Protuberance . . . . .	335
17.4.8 Koróna . . . . .	335
17.4.9 Sluneční vítr . . . . .	336
17.5 Heliosféra . . . . .	338
<b>18 Zrození, život a skon hvězd</b>	<b>341</b>
18.1 Mezihvězdná látka . . . . .	341
18.2 Akt zrození aneb 7 kroků ke vzniku hvězdy . . . . .	343
18.2.1 Vznik protohvězdy . . . . .	345
18.2.2 Od protohvězdy k hvězdě hlavní posloupnosti . . . . .	349
18.3 Protohvězdy rozdílné hmotnosti . . . . .	351
18.3.1 Protohvězdy s nadváhou . . . . .	352
18.3.2 Subtilní protohvězdy . . . . .	352
18.3.3 Objekty pod míru . . . . .	353
18.4 Hvězdy na hlavní posloupnosti . . . . .	354
18.5 Vývoj hvězd po opuštění hlavní posloupnosti . . . . .	356
18.6 Závěrečná stadia vývoje hvězd . . . . .	357
18.7 Konečný osud hvězd . . . . .	358
18.7.1 Stabilní řešení - chladnoucí trpaslíci . . . . .	358
18.7.2 Nestabilní řešení - supernovy, hypernovy . . . . .	359
18.8 Zvláštnosti vývoje těsných dvojhvězd . . . . .	361
18.8.1 Novy . . . . .	364
<b>19 Hvězdná uskupení</b>	<b>367</b>
19.1 Málopočetné skupiny hvězd – hvězdné soustavy (multiple stars) . . . . .	367
19.1.1 Dvojhvězdy . . . . .	369
19.2 Hvězdokupy . . . . .	370
19.2.1 Kulové hvězdokupy . . . . .	371
19.2.2 Otevřené hvězdokupy . . . . .	371
19.2.3 Hybridní? - zvláštní? . . . . .	373
19.2.4 Hvězdné asociace . . . . .	374

<b>20 Galaxie a galaxie</b>	<b>376</b>
20.1 Naše Galaxie se představuje . . . . .	376
20.1.1 Historie výzkumu . . . . .	377
20.1.2 Velká debata . . . . .	378
20.1.3 Galaktická souřadnicová soustava . . . . .	379
20.1.4 Anatomie naší Galaxie . . . . .	379
20.1.4.1 Disková a plochá složka . . . . .	381
20.1.4.2 Jádro Galaxie . . . . .	382
20.1.5 Rotace Galaxie . . . . .	384
20.2 V říši galaxií . . . . .	385
20.2.0.1 Spirální galaxie . . . . .	388
20.2.0.2 Eliptické galaxie . . . . .	389
20.2.0.3 Čočkovité galaxie . . . . .	389
20.2.0.4 Nepravidelné galaxie . . . . .	390
20.3 Aktivní galaxie - AGN . . . . .	392
20.3.1 Typy aktivních galaxií . . . . .	394
20.3.1.1 Seyfertovy galaxie . . . . .	395
20.3.1.2 Kvasary . . . . .	395
20.3.1.3 Rádiové galaxie (radiogalaxie) . . . . .	396
20.3.1.4 Nový typ AGN . . . . .	397
20.4 Kanibalismus galaxií . . . . .	397
<b>21 Velkorozměrové struktury ve vesmíru</b>	<b>399</b>
21.1 Vesmír velkých měřítek . . . . .	399
21.2 Kupy galaxií . . . . .	399
21.3 Velké struktury . . . . .	401
21.3.1 Větší než nadkupy . . . . .	401
<b>22 Kosmologie</b>	<b>403</b>
22.1 První představy a první paradoxy . . . . .	403
22.2 Newtonův model vesmíru . . . . .	406
22.3 Standardní model . . . . .	407
22.3.1 Geometrie vesmíru . . . . .	408
22.4 Rozpínání vesmíru a Hubblův vztah . . . . .	409
22.5 Rozpínání vesmíru . . . . .	411
22.5.1 Rozpínání vesmíru - tam a zpět . . . . .	412
22.5.2 Důkazy teorie velkého třesku . . . . .	412
22.5.2.1 Reliktní záření . . . . .	413
22.5.3 Problémy standardního modelu . . . . .	416
22.6 Modely vesmíru . . . . .	417
22.7 Jak starý je vesmír? . . . . .	417
22.8 Vývoj vesmíru . . . . .	418
22.8.1 Velmi raný vesmír . . . . .	418
22.8.2 Raný vesmír . . . . .	418
22.8.3 Temný věk . . . . .	421
22.8.4 Vytváření struktur . . . . .	422



---

22.9	Výhled do budoucnosti . . . . .	423
22.10	V jakém vesmíru žijeme? . . . . .	425
22.11	Pozorovací kosmologie . . . . .	425
22.11.1	Současná pozorovací kosmologie . . . . .	425
22.11.1.1	Akcelerující vesmír . . . . .	425
22.11.1.2	Červený posun - přehlídkové projekty . . . . .	426
22.11.1.3	Reliktní záření . . . . .	426
22.11.1.4	Současný vesmír . . . . .	429
22.11.1.5	Velikost fluktuací . . . . .	430
22.11.1.6	Baryonové akustické oscilace . . . . .	430
22.11.2	Plánovaná pozorování . . . . .	430
22.12	Jiné pohledy na vývoj vesmíru . . . . .	431
22.13	Mnohovesmír . . . . .	432
<b>23</b>	<b>Nebezpečí z kosmu</b>	<b>433</b>
23.1	Střet Země s cizím tělesem . . . . .	433
23.1.1	Srážka s planetkou, kometou . . . . .	433
23.1.2	Kolize Země s černou dírou . . . . .	437
23.2	Slunce . . . . .	438
23.3	Přemíra záření . . . . .	438
23.3.1	Výbuch blízké supernovy . . . . .	438
23.3.2	Záblesky $\gamma$ záření . . . . .	439
23.4	Černá díra za humny . . . . .	440
23.5	Kontakt s mimozemským životem . . . . .	440
<b>24</b>	<b>Rejstřík osob</b>	<b>442</b>
<b>A</b>	<b>Appendix: Vývoj astronomie</b>	<b>459</b>
<b>B</b>	<b>Appendix: Fotometrické pojmy</b>	<b>473</b>
B.1	Slovníček pojmů z fotometrie . . . . .	473
<b>C</b>	<b>Appendix: Kuželosečky</b>	<b>474</b>
<b>D</b>	<b>Appendix: Metody měření vzdáleností ve vesmíru</b>	<b>474</b>
<b>E</b>	<b>Appendix: Výslovnost latinských slov</b>	<b>475</b>
<b>F</b>	<b>Appendix: Řecká abeceda</b>	<b>475</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 přešla 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 klademe do doby asi před 6000 lety. Jde o nejstarší vědu, astronomie je 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>

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 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.

Astronomie jako jediná věda hledá zákonitosti a popisuje (periodické) děje na obloze. Její význam tkví především v tom, že naučila lidi analytickému přístupu – sledovat dění kolem sebe, hledat v něm určitý řád, vysvětlovat skutečnosti známé z minulosti

<sup>1</sup>Ještě dnes si 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 v historickém kontextu.

a předpovídat skutečnosti nové. Ukázala, že pozorování nejen astronomických jevů, ale obecně přírodních úkazů je cenné a smysluplné a stojí za to je uchovávat i pro další generace. Na základní otázky jako proč se střídá den a noc, jak vznikají roční období, jak a proč se mění délka noci nebo vzhled Měsíce, jeho fáze, lidé odpověděli už dávno. Je ale smutné, že i dnes s odpověďmi zápolí nejen laici, ale i někteří zájemci o fyziku, astronomii a astrofyziku.

Pozorování nebeských těles položilo základy kalendáře a měření času. Pozorované periodické jevy (střídání dne a noci, fáze Měsíce a další) se staly prvotními etalony časových škál. Z takového pozorování periodických jevů vychází i zjištění staroegyptských učenců, že heliaktický<sup>2</sup> východ hvězdy Sírius 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 poznatcích označit za strategické. Sloužily jak dobyvatelům, válečníkům, tak i objevitelům a obchodníkům.

V dnešní době není třeba při cestách používat orientaci podle hvězd nebo měření sextantem, ale moderní družicové systémy orientaci podle hvězd využívají a podklady opět poskytli astronomové. V současnosti přispívají astronomové také k řešení dalších problémů. Ukazuje se například, že je velmi důležité sledovat aktivitu Slunce. Zvýšená aktivita Slunce s výronem částic směrem k Zemi může znamenat vážné ohrožení společlivého fungování 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. To je ovšem záležitost budoucnosti. Mohli bychom ale poukázat na jiný výsledek astronomického výzkumu, který dnes lidé používají zcela běžně každý den. Zkratku WiFi<sup>3</sup> dnes zná skoro každý jako „bezdrátové připojení k internetu“. Méně už je známo, že jde o označení pro několik standardů IEEE 802.11 popisujících bezdrátovou komunikaci v počítačových sítích. A jen odborníci vědí, že pro správnou funkci WiFi jsou nutné metody, které byly původně vyvinuty pro radioastronomii (Hamaker et al., 1977) a v roce 1996 na ně získal patent John O’Sullivan a jeho tým z australské vědecké agentury CSIRO.

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,

---

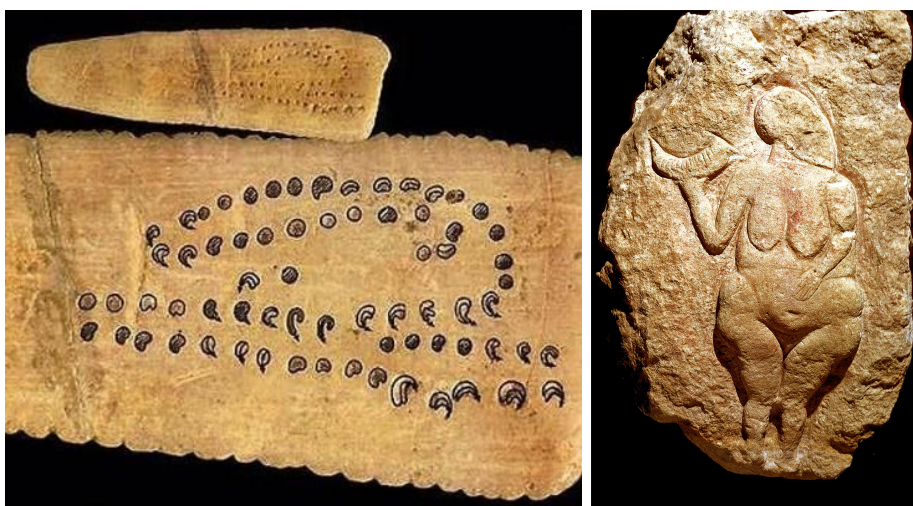
<sup>2</sup>Heliaktický východ označuje takový východ, kdy lze dané těleso poprvé během roku spatřit před východem Slunce na ranní obloze.

<sup>3</sup>Také Wi-fi, Wi-Fi, wi-fi, wifi, Wireless LAN, WLAN. Původně označení Wi-Fi nemělo nic znamenat, ale později se z něj stala slovní hříčka „wireless fidelity“ (bezdrátová věrnost) k známému Hi-Fi (high fidelity – vysoká věrnost).

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 například Johannes Kepler je zřejmé z následujících ukázek:

*„Astrologie si nezasluhuje, aby jí člověk věnoval svou pozornost, avšak lidé žijí v klamné 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.“*



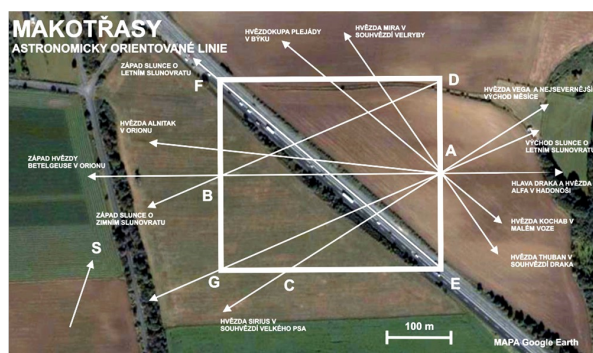
Obrázek 1.2: Ukázky starověkých předmětů s astronomickými motivy. Vlevo: nejstarší lunární kalendář na kosti nalezené v Abri Blanchard (Francie). Stáří se odhaduje až na 34 tisíc let. Vpravo Lausselská Venuše. Na srpku Měsíce je 13 zářezů, což má odpovídat 13 měsíčním/menstruačním cyklům během slunečního roku. Stáří zhruba 25 tisíc let. Zdroj: <https://sservi.nasa.gov/articles/oldest-lunar-calendars/>, <http://donsmaps.com/lacornevenus.html>.

## 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.

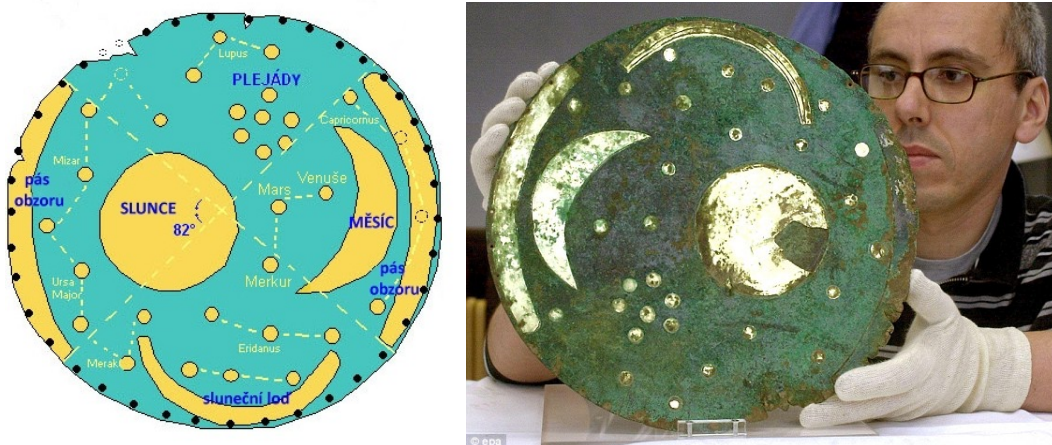
- 32 tisíc let př.n.l. – nejstarší lunární kalendář (obrázek 1.2).
- 11.-9. tisíciletí př.n.l. – soustava staveb a kamenných kruhů v jihovýchodním Turecku. Část mohla sloužit i jako svatyně a observatoř. Místo není dosud plně prozkoumáno.

- 5. tisíciletí př.n.l. – předpokládá se nejstarší použití gnómonu, jednoduchého astronomického přístroje, jímž se podle délky a směru jeho stínu měří poloha Slunce a tím i čas.
- 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 pocházejí 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.
- 3340 př.n.l. – nastalo úplné zatmění Slunce, které je vytesáno do kamenné stěny u irského Loughcrew.
- 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.
- 3. tisíciletí př.n.l. – k měření času používají v Egyptě sluneční hodiny.
- 3000-2000 př.n.l. – v Číně určena délka roku na 365,25 dne.
- 2697 př.n.l. – 2. 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 prý skončila smrtí astronomů. Legenda říká, že 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, střílením. Tentokrát ale bylo jen dílem náhody a štěstí, že drak Slunce nesežral celé, a tak byli astronomové potrestáni.
- kolem 2000 př.n.l. – první slunečně-měsíční kalendáře v Egyptě a Mezopotámii.
- poč. 2. tis. př.n.l. – první teorie pohybu Slunce, Měsíce a planet. Babylónští astronomové využili geocentrickou představu. Tam také poprvé vykreslili souhvězdí.
- 1900 př.n.l. – vznikla svatyně a observatoř Stonehenge v Anglii.



Obrázek 1.4: Disk z Nebry. Památka na astronomii doby bronzové. Byl vyroben mezi roky 2100 až 1700 př.n.l. a později několikrát upravován. Jde o jedno z nejstarších vyobrazení oblohy s astronomickými objekty. Je jednou z památek UNESCO v programu Paměť světa. Zdroje: <http://www.celticnz.co.nz/NebraSunDisk/NebraSunDisk.htm> (schéma; upraveno), <http://www.dailymail.co.uk/>.



Obrázek 1.5: 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 Klaudios Ptolemaios. Výsledkem měření bylo zpřesnění délky roku, délky měsíčního cyklu, objev periody saros, s níž se opakují zatmění Měsíce a Slunce, a další.
- 6. st. př.n.l. – Pythagoras a Tháles z Miletu spekulují, že Země je kulatá.
- 585 př.n.l. – Tháles z Milétu předpověděl zatmění Slunce.
- 2. pol. 6. st. př.n.l. – babylonský učenec Kidinnu tvrdil, že rychlost pohybu planet je nerovnoměrná, během roku postupně roste a pak zase klesá.
- 530 př.n.l. – vznik pythagorejského spolku; stoupenci (např. Filoláos z Krotonu) 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 ale převzal i mnohem starší záznamy. Tzv. Hedvábná kniha byla objevena v roce 1973. Ve stejném období vytvořili Ši Šen (Shi Shenfu) a jeho kolegové Kan Te a Wu Xian i první známý hvězdný katalog Ken-Š'sing-ting (Základy určování hvězd) obsahující polohy několika set hvězd.



- 4. st. př.n.l. – Platón znal nepravidelnosti v pozorovaném pohybu planet. Eudoxos z Knidu vytvořil geocentrický model pohybu planet, Slunce a Měsíce.
- 340 př.n.l. – Aristotelés ze Stageiry sepsal knihu „O nebi“, kde shrnul a zobecnil tehdejší empirické kosmologické poznatky. Vytvořil geocentrický systém rozdělený na dvě části, otáčející se sféry. Sublunární sféru včetně Země tvoří čtyři elementy (oheň, voda, vzduch, země) a neměnnou supralunární sféru vyplněnou éterem pak Slunce, Měsíc, planety a hvězdy.
- kolem 280 př.n.l. – Aristarchos ze Sámu předpokládal, že Země obíhá kolem Slunce (heliocentrismus); první odhad vzdálenosti Země – Slunce a Země – Měsíc.
- kolem 240 př.n.l. – Eratosthenés z Kyrény změřil obvod Země.
- kolem 130 př.n.l. – Hipparchos z Níkaie objevil precesi a sestavil první (evropský) katalog hvězd, v němž je zhruba 1 000 nejjasnějších hvězd.
- 1. st. př.n.l. – Titus Lucretius Carus obhajoval atomismus. Mimo jiné 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).

- 
- 1.1. roku 1 n.l. - počátek našeho letopočtu.
  - kolem 140 n.l. – Klaudios Ptolemaios publikoval propracovanou teorii geocentrismu ve velkolepém spisu *Megalé Syntaxis* (*Almagest*).



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.

- 2. st. – čínský astronom Čang-Cheng (Zhang Heng) uvádí ve spisu *Ling sien* (*Složení vesmíru*), že Měsíc má tvar koule a nemá vlastní světlo.
- 682 – Mayští astronomové z města Tikal (dnešní Guatemala) určili délku synodického měsíce na 29,53020 dní (dnešní měření: 29,53059 dne); podobně pak určili délku tropického roku na 365,2420 dní (dnes: 365,2422 dne).

- konec 8. st. – al-Chvárizmí (al-Chorezmí) určil obvod Země na 40 700 km.
- 882-910 – al-Battání (Albatenius) 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 (Aliboron) provedl velmi přesná astronomická a zeměpisná měření a stanovil úhel sklonu ekliptiky k rovníku s odchylkou v řádu obloukových vteřin. Vypočítal rozměry Země. Předpokládal pohyb Země okolo Slunce.
- 1054 – zaznamenán výbuch supernovy v centru dnešní Krabí mlhoviny.



Obrázek 1.7: Středověká ilustrace z rukopisu z doby 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/>.

- 1542 – Mikuláš Koperník prezentoval heliocentrický model pohybu planet včetně Země.
- 1572 – Tadeáš Hájek z Hájku, Tycho Brahe a další pozorovali supernovu v souhvězdí Kasiopeji a z její paralaxy odvodili, že se nachází za sférou Měsíce.
- 1582 – papež Řehoř XIII. zavedl reformu kalendáře.
- 1584 – Giordano Bruno zveřejnil teorii nekonečnosti vesmíru a světů, obhajoval heliocentrismus.
- 1596 – David Fabricius objevil proměnnost hvězdy Mira (omikron) Ceti.
- 1603 – Johann Bayer vytvořil hvězdný atlas Uranometria.
- 1609 – Galileo Galilei a Thomas Harriot jako první použili dalekohledy v astronomii.



Obrázek 1.8: Práce na observatoři Taqi al-Dina na konci 16. století. Obrázek k epické básni Shahinshah-nama, kterou napsal 'Al ad-Din Mansur-Shirazi. Zdroj: <http://www.muslimheritage.com>.



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

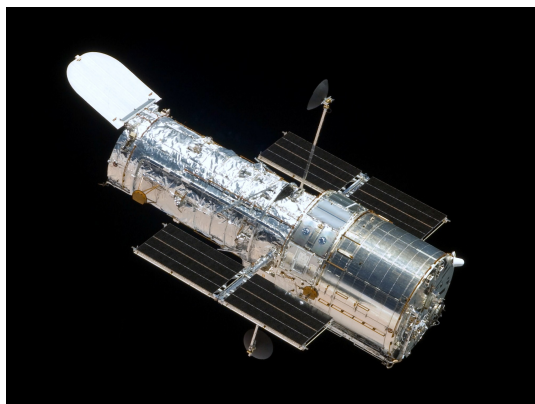
- poč. 17. století – přelomová událost – uvědomění si vztažných soustav a vzájemných přechodů mezi nimi (Keplerův Měsíční sen).
- 1609 – Johannes Kepler formuloval první dva zákony pohybu planet.
- 1618 – Johannes Kepler formuloval třetí zákon pohybu planet.
- 1632 – Galileo Galilei dokázal pravdivost heliocentrického modelu a formuloval princip nezávislosti pohybů.
- 1668 – Jan Heweliusz publikoval spis o kometách s měřeními paralax komet z let 1652 a 1664. Tím prokázal, že se nejednalo o meteory v zemské atmosféře.
- 1672 – Giovanni Domenico Cassini a Jean Richer změřili paralaxu Slunce a určili jeho vzdálenost na 140 miliónů kilometrů (dnes: 149 597 870 700 m).
- 1676 – Ole Rømer určil na základě pozorování Jupiterových měsíců konečnost rychlosti světla.

- 1717 – Edmund Halley objevil vlastní pohyb hvězd a dokázal tak, že hvězdy nejsou stálicemi.
- 1725 – posmrtně vyšly výsledky měření poloh hvězd v Greenwichské observatoři Johna Flamsteeda, což lze považovat za první moderní katalog 2 852 hvězd.
- 1771 – Charles Messier sestavil katalog mlhovin.
- 1781 – William Herschel objevil planetu Uran.
- 1782 – John Goodricke znovuobjevil proměnnost Algolu a správně ji interpretoval jako zákryty dvojice hvězd.
- 1801 – Giuseppe Piazzi objevil planetku (dnes trpasličí planetu) Ceres.
- 1814 – Joseph von Fraunhofer objevil systém temných absorpčních čar ve slunečním spektru.
- 1837 – Friedrich Wilhelm Bessel poprvé změřil vzdálenost hvězdy 61 Cygni.
- 1840 – John William Draper získal první astrofotografii, snímek Měsíce.
- 1842 – Christian 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 Urbain Le Verrier polohu a dráhu planety Neptun. Tu posléze objevil Johann Galle a Heinrich d'Arrest
- 1850 – John Adams Whipple a William Cranch Bond získali první fotografii (daguerotypii) hvězdy (Vega).
- 60. léta 19. st. – Robert Bunsen a Gustav Kirchhoff formulovali zákony spektrální analýzy. Studium spekter hvězd, objev hélia na Slunci a potvrzení jeho výskytu na Zemi vedly ke vzniku astrofyziky.
- 1872 – Henry Draper pořídil první snímek spektra hvězdy (Vega).
- 1900 – Max Planck publikoval zákon popisující záření absolutně černého tělesa.
- 1905 – Albert Einstein publikoval speciální teorii relativity, postuloval konstantní rychlost světla.
- 1911, 1913 – Ejnar Hertzsprung a Henry Norris Russell prezentují tzv. Hertzsprungův-Russellův diagram.
- 1913 – Victor Francis Hess objevil kosmické záření.
- 1915 – Albert Einstein publikoval obecnou teorii relativity, známou také jako teorii gravitace.
- 1919 – Arthur Eddington na základě pozorování zatmění Slunce potvrdil platnost teorie relativity.
- 1929 – Edwin Hubble formuloval zákon vzdalování galaxií. Zjistil, že rychlost vzdalování je úměrná jejich vzdálenosti.
- 1930 – Clyde Tombaugh objevil Pluto, do roku 2006 označované jako devátá planeta Sluneční soustavy, dnes trpasličí planeta.
- 1937 – Grote Reber postavil první radioteleskop.
- 1946 – počátek radarové astronomie. Podařilo se zachytit ozvěnu rádiových signálů od povrchu Měsíce.



Obrázek 1.10: Edwin Hubble u Hookerova 2,5m dalekohledu na observatoři Mt. Wilson. Zdroj: S. Mais, <http://www.soteoria.hpg.ig.com.br/Hubble/page1.htm>.

- 1948 – George Gamow prezentoval teorii velkého třesku.
- 1957 – start první umělé družice Země, Sputniku 1 (SSSR).
- 1959 – Riccardo Giacconi sestrojil první rentgenovský dalekohled k pozorování rentgenového záření z kosmu.
- 1962 – založena Evropská jižní observatoř (ESO)
- 1962 – Riccardo Giacconi objevil první rentgenový zdroj mimo Sluneční soustavu – Scorpius X-1.
- 1965 – Arno Allan Penzias a Robert Woodrow Wilson objevili spojité rádiové záření kosmického pozadí (reliktní záření).
- 1968 – John Archibald Wheeler poprvé použil termín „černá díra“.
- 1968-1969 – Jocelyn Bellová (Burnellová) a Antony Hewish objevili pulsary.
- 1969 – američtí astronauti Neil Armstrong a Edwin (Buzz) Aldrin se jako první lidé procházeli po povrchu Měsíce.
- 1969 – Willard S. Boyle and George E. Smith vynalezli CCD detektor. V r. 2009 obdrželi za tento objev Nobelovu cenu za fyziku.
- 1973 – Brandon Carter prezentoval antropický princip.
- 1973 – americké špionážní družice Vela objevily zábleskové zdroje záření  $\gamma$ .
- 1979 – první použití CCD prvku jako detektoru na observatoři Kitt Peak, USA.
- 1981 – Alan Guth publikoval teorii inflačního modelu vesmíru.
- 1987 – objev a následný výzkum supernovy SN1987A.
- 1989 – družice COBE a v pozdějších letech i družice WMAP a Planck zjistily anizotropii reliktním záření a změřily jeho spektrum. Vedoucí experimentu na COBE John Mather a George Smoot dostali za tuto práci Nobelovu cenu za fyziku v roce 2006.
- 1990 – vypuštěn Hubbleův kosmický teleskop.



Obrázek 1.11: Hubblův kosmický dalekohled (HST) z raketoplánu Atlantis během 4. servisní mise v roce 2009. Zdroj: <http://spaceflight.nasa.gov/>.

- 1992 – po Plutu a Charonu objeveno první trans-neptunické těleso 1992 QB<sub>1</sub>, nyní označené pořadovým číslem 15760.
- 1995 – Michel Mayor a Didier Queloz objevili první planety mimo Sluneční soustavu obíhající hvězdu slunečního typu 51 Peg (Helvetios), pojmenované v roce 2015 jako Dimidium.
- 1997 – publikována měření družice Hipparcos, která trigonometricky určila paralaxy zhruba 100 tisíc hvězd (vzdálených až 600 ly).
- 1998 – dva týmy zveřejnily výsledky několikaletého výzkumu, v němž odhalily zrychlování rozpínání vesmíru. Saul Perlmutter, Brian Schmidt a Adam Riess za ten výsledek obdrželi Nobelovu cenu za fyziku v roce 2011.
- 1998 – Takaaki Kajita prezentoval objev oscilací neutrin, které na přelomu let 2001/2002 potvrdil Arthur B. McDonald. Oba obdrželi Nobelovu cenu za fyziku v roce 2015.
- 1999-2000 – do provozu uvedena čtveřice dalekohledů VLT (Very Large Telescope) Evropské jižní observatoře, každý o průměru 8,2 m, na hoře Paranal v Chile.
- 2001 – start družice WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), která v následujících letech přinesla velké množství dat podporujících standardní kosmologický model vesmíru.
- 2006 – Na valném shromáždění Mezinárodní astronomické unie byla přijata definice planety a trpasličí planety. Pluto bylo přerazeno mezi trpasličí planety.
- 2008 – dokončena mezinárodní Observatoř Pierra Augera.
- 2008 – potvrzena existence supermasivní černé díry v centru naší Galaxie.
- 2013 – na Měsíci přistála čínská sonda Čchang-e 3, jejíž součástí byl i malý dalekohled LUT. Jde o první dlouhodobě pracující astronomickou observatoř na povrchu Měsíce.
- 2014 – začala výstavba dalekohledu E-ELT s průměrem zrcadla 39 m. První světlo je plánováno na rok 2024.
- 2014 – první potvrzená detekce organických molekul na Marsu.
- 2015 – družice Kepler objevila první exoplanetu velikosti Země v zóně života.

- 2015 – první přímá detekce gravitačních vln na observatoři LIGO.
- 2016 – publikována první sada měření z družice GAIA.
- 2016 – v Číně dokončen největší radioteleskop na světě (FAST) o průměru 500 m.

## Použitá a doplňující 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
- Grün, M., 1990, *Je astrologie věda?* Horizont, Praha 1990
- Grygar, J., 2003, Soumrak astrologie? *Zpravodaj Sisyfos* 9, č. 2-3, str. 1
- Hamaker, J. P., Osullivan, J. D., & Noordam, J. E. 1977, *Journal of the Optical Society of America* (1917-1983), 67, 1122
- 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
- Kleczek, J. 2002, *Velká encyklopedie vesmíru*, Academia Praha, 582 str.
- Vanýsek, V., 1998, Co nám může říci astrologie? v: *Věda kontra iracionalita* (vyd. J. Heřt a L. Pekárek); Academia, Praha, str. 9 - 35

## 2 Základní pojmy v astronomii

Na začátku 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 většinou zůstáváme po zbytek života. Učebnice pro základní i střední školy a dokonce ani vysokoškolská skripta žádnou definici oblohy neobsahují. Jak tedy tento pojem definovat?

Začněme od sebe, 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**. Velikost samotného pozorovatele, natož vzdálenost mezi jeho očima můžeme v této chvíli zanedbat a považovat za jediný bod, který je skutečně počátkem polopřímek, směrů. Tyto polopřímky (směry) mohou mířit do okolní krajiny nebo nad ni. Krajinu, která nás obklopuje, kterou obhlédneme, obzíráme, nazveme **obzorem**. Do našeho obzoru patří nejen přírodní výtvoř v našem okolí – kopce, hory, údolí, ale samozřejmě také lidské výtvoř – 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 sleduje východ Slunce z vrcholu hory, vysoké rozhledny nebo třeba ze střechy mrakodrapu Burdž Chalífa<sup>1</sup>. V okamžiku, kdy má pozorovatel na špičce mrakodrapu Slunce nad obzorem, skočí dolů (samozřejmě s padákem) a může za chvíli pozorovat východ Slunce během téhož dne a na stejném místě (stejných zeměpisných souřadnicích) podobně. 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. Obhlédne 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

<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.





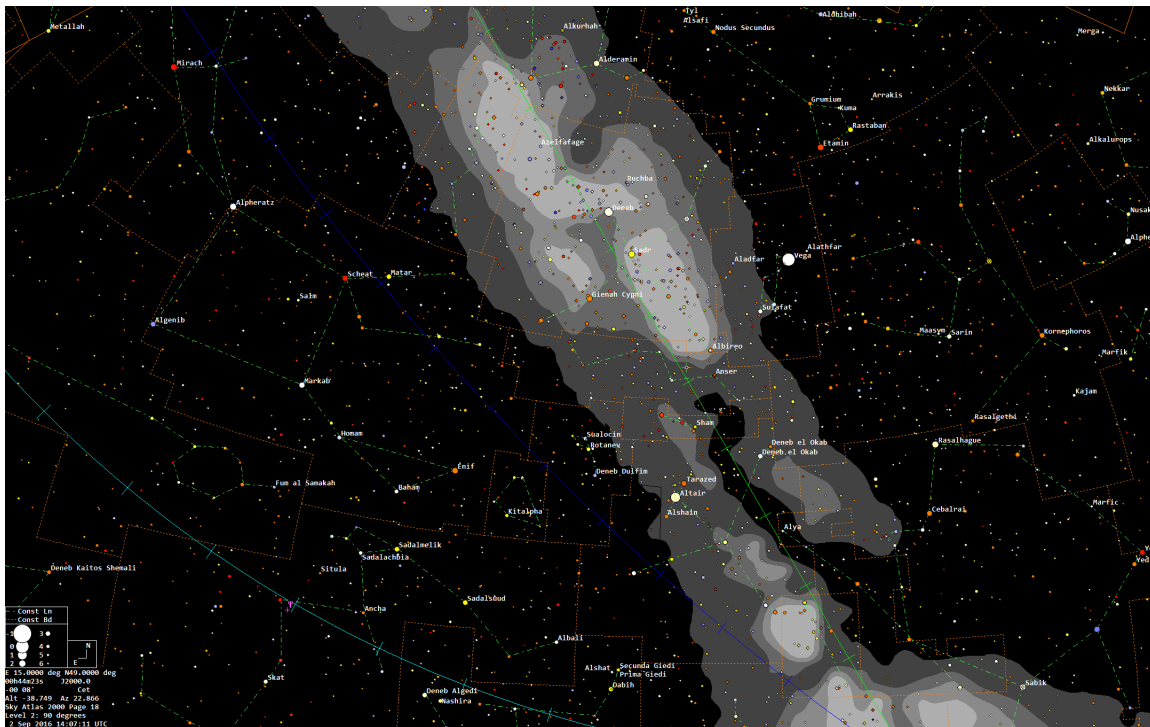
Obrázek 2.1: Obloha s objekty pozemskými (letadlo, mraky) i kosmickými (Měsíc, Venuše, Jupiter). Foto: Michael Wilson. <http://apod.nasa.gov/apod/ap050913.html>.

pro naše účely dostačující, nicméně zájemce o přesnou definici oblohy odkazují na práci Hollan (1993).

Na obloze můžeme pozorovat spoustu úkazů, jevů a nejrůznějších těles – východy a západy Slunce, Měsíce, planet, hvězd, občas nějakou kometu, ale 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, pak 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 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 niž 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

<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. Pěkný přehled, co vše může být UFO lze najít na <http://www.toptenz.net/top-10-common-explanations-for-ufos.php>.

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 i popis jejich 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 z programu Guide 9.

Zůstaňme ještě na Zemi. Naše vztažná soustava bude spojena s pozorovacím stanovištěm na povrchu Země. Z něj vidíme Slunce, ale i Měsíc nebo planety 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. Pokud vztáhneme souřadný systém ke středu Slunce, pak ekliptika je rovina oběžné dráhy Země kolem Slunce. Ostatní planety a Měsíc neobíhají kolem Slunce přesně v rovině ekliptiky ale roviny jejich oběžných trajektorií se od roviny ekliptiky mírně odchyľují. U Měsíce je tato odchylka přibližně  $5^\circ$ . V důsledku toho bude při pozorování ze Země Měsíc pozorovatelný v pásu  $\pm 5^\circ$  severně nebo jižně od roviny ekliptiky.



Obrázek 2.3: Pohyb Měsíce na obloze a hvězdné obloze. Připraveno s užitím programu Stellarium.

V několika výše uvedených rádcích jsme měnili vztažnou 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 stanoviště na povrchu Země. Zatím se jednalo jen o myšlenkové přechody bez výpočtů, ale obecně můžeme konstatovat, že právě takovéto úvahy, změny vztažných soustav a přechody mezi nimi patří k nejnáročnějším částem základů 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°. 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 5.1.

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

## 2.2 Jak je to jasné?

Když už se člověk pokochá krásami noční oblohy, většinou ho napadne, jak to, co vidí, nějak roztřídit, 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 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 evropský 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 popíší. Dnes k tomu slouží veličina nazvaná **hvězdná velikost**, jejíž jednotkou je 1 magnituda [mag]. Se skutečnou velikostí, rozměry hvězdy to ovšem nijak nesouvisí.<sup>4</sup> Přesnou matematickou definici a také důkladnější popis uvedeme později, pro nedočkavce v kapitole 9.1. 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.

## 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 mezinárodní soustavy SI<sup>5</sup>. 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

<sup>4</sup>Ve starověku byly dle Aristotelova učení hvězdy umístěny na sféru a byly tak od Země stejně daleko. Pak zcela logicky, čím je hvězda jasnější, tím musí být větší. Základní předpoklad stejné vzdálenosti všech hvězd od pozorovatele byl však chybný.

<sup>5</sup>SI je zkratka z francouzského *Le Système International d'Unités*, což znamená mezinárodně domluvená soustava jednotek fyzikálních veličin. Definici jednotek a uchování případných etalonů zajišťuje Mezinárodní úřad pro míry a váhy (Bureau International des Poids et Mesures) v Sèvres ve Francii. Nejvyšším „úřadem“ v tomto směru je v České republice Český metrologický institut se sídlem v Brně.

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 magnitud	věž velká asi 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

50 mikrogramů. Proto se uvažuje o zavedení definice jednoho kilogramu pomocí pevné hodnoty Planckovy konstanty.



Obrázek 2.4: Jedna z kopií mezinárodního vzoru kilogramu 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 nejčastěji vyjadřuje hmotnost těles pomocí hmotnosti Slunce. Pro menší tělesa než Slunce, planety a jejich měsíce se používá jako jednotka hmotnosti hmotnost Jupitera, případně hmotnost Země (viz tabulka 2.2).

Valné shromáždění Mezinárodní astronomické unie (IAU) v roce 2015 přijalo rezoluci B3<sup>6</sup>, která doporučuje používat při vyjádřeních rozměrů, hmotností, teplot nebo zářivých

<sup>6</sup>[https://astronomy2015.org/sites/default/files/IAU\\_XXIX\\_GA\\_Final\\_Resolutions\\_B1-B4.pdf](https://astronomy2015.org/sites/default/files/IAU_XXIX_GA_Final_Resolutions_B1-B4.pdf).

Tabulka 2.2: Nominální hodnoty pro vybrané charakteristiky Slunce a planet dle rezoluce B3 (IAU 2015). Hodnota gravitační konstanty  $G = 6,67408 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$  převzata z CODATA 2015 (Mohr et al., 2015).

Slunce	
poloměr	$1 \mathcal{R}_{\odot}^{\text{N}} = 6,957 \cdot 10^8 \text{ m}$
sluneční konstanta	$1 \mathcal{S}_{\odot}^{\text{N}} = 1361 \text{ W m}^{-2}$
zářivý výkon	$1 \mathcal{L}_{\odot}^{\text{N}} = 3,828 \cdot 10^{26} \text{ W}$
povrchová teplota	$1 \mathcal{T}_{\text{eff}\odot}^{\text{N}} = 5772 \text{ K}$
součin gravitační konstanty a hmotnosti	$1 \mathcal{GM}_{\odot}^{\text{N}} = 1,3271244 \cdot 10^{20} \text{ m}^3\text{s}^{-2}$
hmotnost (při výše dané G)	$1 M_{\odot} = 1,9891 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
planety	
rovníkový poloměr Země	$1 \mathcal{R}_{eE}^{\text{N}} = 6,3781 \cdot 10^6 \text{ m}$
polární poloměr Země	$1 \mathcal{R}_{pE}^{\text{N}} = 6,3568 \cdot 10^6 \text{ m}$
rovníkový poloměr Jupitera	$1 \mathcal{R}_{eJ}^{\text{N}} = 7,1492 \cdot 10^7 \text{ m}$
polární poloměr Jupitera	$1 \mathcal{R}_{pJ}^{\text{N}} = 6,6854 \cdot 10^7 \text{ m}$
součin gravitační konstanty a hmotnosti Země	$1 \mathcal{GM}_E^{\text{N}} = 3,986004 \cdot 10^{14} \text{ m}^3\text{s}^{-2}$
součin gravitační konstanty a hmotnosti Jupitera	$1 \mathcal{GM}_J^{\text{N}} = 1,2668653 \cdot 10^{17} \text{ m}^3\text{s}^{-2}$
hmotnost Země (při výše dané G)	$1 M_Z = 5,9736 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
hmotnost Jupitera (při výše dané G)	$1 M_J = 1,899 \cdot 10^{27} \text{ kg}$

výkonů hvězd a planet tzv. nominální hodnoty Slunce, Jupitera nebo Země (tabulka 2.2). Zásady nového přístupu se zdůvodněním změn jsou k uvedeny v samotné rezoluci, případně v článcích Harmanec & Prša (2011) a Prša & Harmanec (2012). Pokud je potřebné někde vyjádřit hmotnost v kilogramech, pak by měla být vyjádřena v podobě  $(GM)_{\text{objekt}}/G$ , kde hodnota gravitační konstanty  $G$  by měla být převzata z oficiálního zdroje, například z publikace Mezinárodního výboru pro vědu, Komise pro data a technologie CODATA<sup>7</sup> (Mohr et al., 2015). Revize jednotek SI se očekává v roce 2018.

Měření hmotnosti kosmických objektů se nejčastěji provádí s pomocí gravitačního zákona a Keplerových zákonů. Pokud jsou hvězdy složkami dvojhvězdného páru, je možné určit jejich hmotnost s velkou přesností. Jiné metody například pomocí empirických vztahů různých veličin, takovou přesnost nedosahují.

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 a tzv. nominálním zářivým výkonem (viz tabulka 2.2).

## 2.4 Vesmírné dálavy

Velká čísla jako by v astronomii neměla konce. Jejich „redukci“ vhodnými jednotkami hmotnosti, zářivého výkonu jsme vyřešili. Ale co vzdálenost? Vzdálenosti ve vesmíru jsou

<sup>7</sup>International Council for Science: Committee on Data for Science and Technology

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 jednotkou soustavy SI pro délku je 1 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 uznává 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 AU, 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>8</sup>. Přesná hodnota je  $1 \text{ ly (sv.r.)} = 63\,241 \text{ au} = 9\,460\,730\,472\,580\,800 \text{ m}$ . 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 kytka na římse.  
Mít navíc pár světelných let,  
tak vzdám se tepla tvých dlaní.*

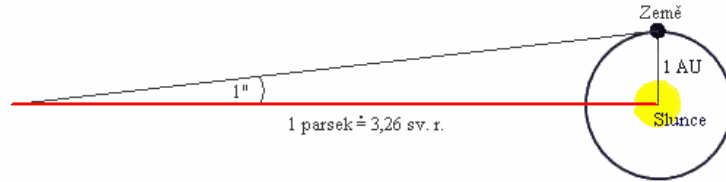
Ale podobných příkladů jistě najdete celou řadu.

**Parsek** (pc)<sup>9</sup> je jako nejdelší 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>10</sup> objektu, vzdáleného

<sup>8</sup>Dle definice je v tomto případě uvažován tzv. juliánský rok, který má délku 365,25 dne.

<sup>9</sup>Slovo *parsek*, v angl. originále *parsec* vzniklo složením části slov **paralaxa** a **sekunda**, tedy v originále **parallax** a **second**.

<sup>10</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.



Obrázek 2.5: K definici parseku. Zdroj: <http://hvezdy.astro.cz>.

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

$$\pi = \frac{1}{r}. \quad (2.1)$$

Velikost parseku lze psát  $1 \text{ pc} = 3,262 \text{ ly} = 206\,264,806 \text{ au} = 3,0856776 \cdot 10^{16} \text{ m}$ . Používá se zejména ve hvězdné a galaktické astronomii. Ale ani parsek nestačí, takže se běžně setkáme i s násobky kiloparsek (kpc), megaparsek (Mpc) a gigaparsek (Gpc).

### 2.4.2 Vzdálenosti ve vesmíru

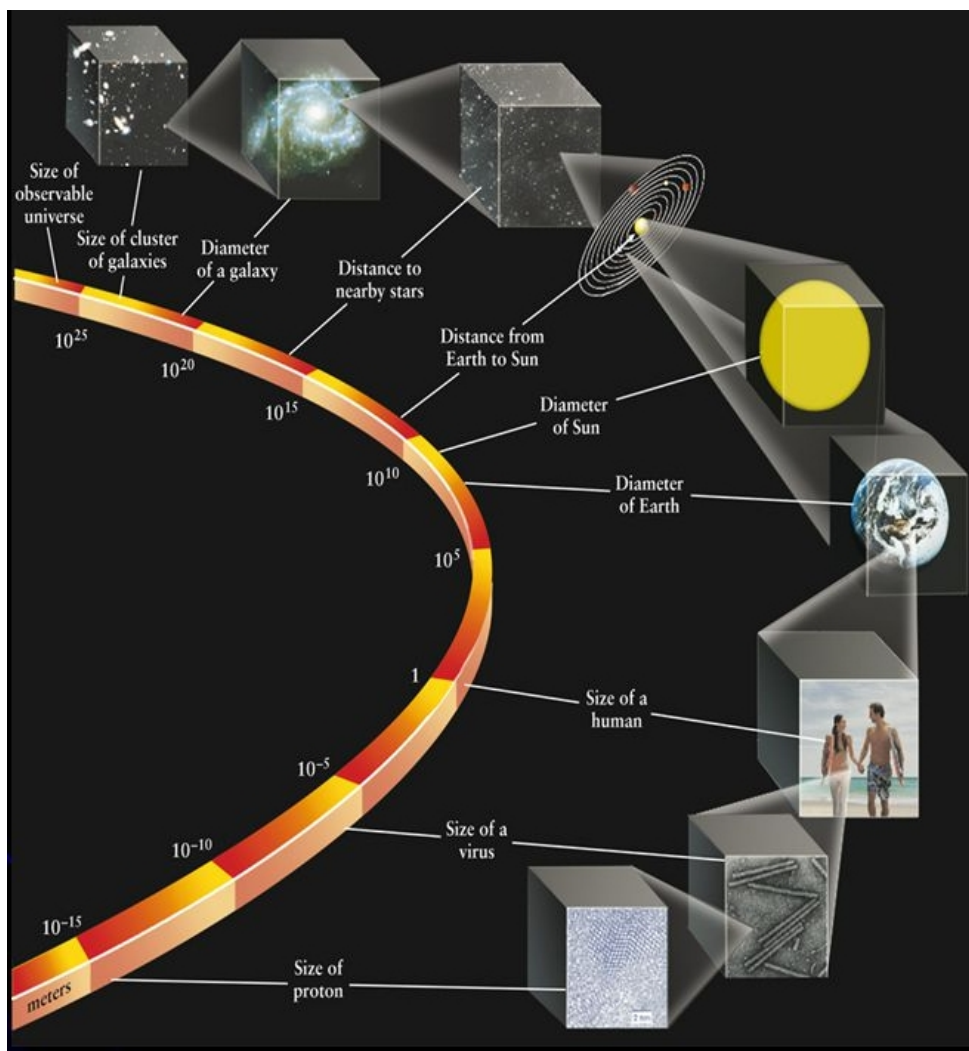
Představte si, že stojíte v nádherné krajině někde na Zemi. Při pozorování okolí má běžný člověk k dispozici dvojici očí, vzdálených od sebe 7 až 8 centimetrů. To znamená, že přibližně do vzdálenosti 30 až 50 metrů je paralaxa pozorovaných objektů dostatečně velká, aby člověk vnímal své okolí prostorově. Odhadovat vzdálenosti v okolní krajině, tedy k objektům obzoru<sup>11</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<sup>12</sup>, zeměměřičské vybavení (teodolit, nivelační tyče), dálkoměry, nebo to můžeme prostě změřit metrem. Jak ale odhadovat, měřit vzdálenosti ve vesmíru? Vždyť jsou obrovské. A výše uvedené metody známé ze Země použít nemůžeme.

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. Jenže, přímá měření vzdáleností lze úspěšně realizovat jen pro blízké objekty (např. pomocí triangulace nebo radiolokace).

<sup>11</sup>Připomínám, že obzor jsme si definovali jako krajinu kolem nás, kterou obhlížíme, včetně všech staveb, předmětů a objektů, které se v ní nacházejí.

<sup>12</sup>Global Positioning System, česky Globální polohovací systém, zkráceně GPS, je celosvětový družicový polohový systém provozovaný Ministerstvem obrany Spojených států amerických. Ruskou obdobou je systém GLONASS. Připravuje se evropský systém Galileo (plánovaný plný provoz od r. 2020) a čínský Beidou (globální verze pod jménem COMPASS zhruba od r. 2020).





Obrázek 2.6: Velikosti objektů a vzdálenosti ve vesmíru. Převzato z prezentace Neil F. Comins, William J. Kaufmann III, *Discovering the Universe*.

Pro vzdálenější objekty můžeme použít kvalifikovaný odhad vzdáleností. Zde ovšem 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>13</sup> v zemské atmosféře nebo mezihvězdném prostředí. Pro správné určení vzdálenosti je však třeba brát podobné efekty v úvahu.

Ve vesmíru tedy nelze spoléhat na prosté 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. Máme k dispozici celou řadu metod, kde jedna metoda navazuje na jinou. Mluvíme pak o tzv. „žebříčku kosmických vzdáleností“. Zásadním úskalím je zde to, jedna metoda vlastně slouží ke kalibraci metody následující. Pak stačí chyba v jedné metodě a změní se celá škála zmíněného žebříku. V následujícím přehledu si uveďme velmi stručně jen ty nejvýznamnější metody určování vzdáleností ve vesmíru.

<sup>13</sup>Slovo extinkce pochází z latinského *extinctio*, značící zničení nebo zánik.

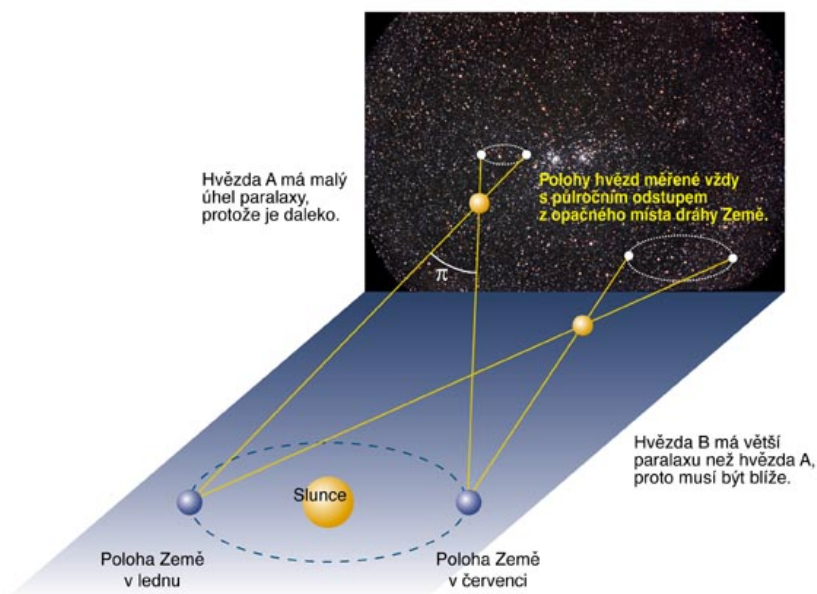


Obrázek 2.7: a) V krajině na Zemi lze odhadovat vzdálenosti podle známých skutečností. Zdroj: <http://mail.vukoz.cz>. b) Na Měsíci nejsou pro odhad vzdálenosti k dispozici srovnávací předměty (budovy, patníky, sloupy elektrického vedení apod.) ani „zamlžení“ vzdálených objektů vlivem ovzduší. Zdroj: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

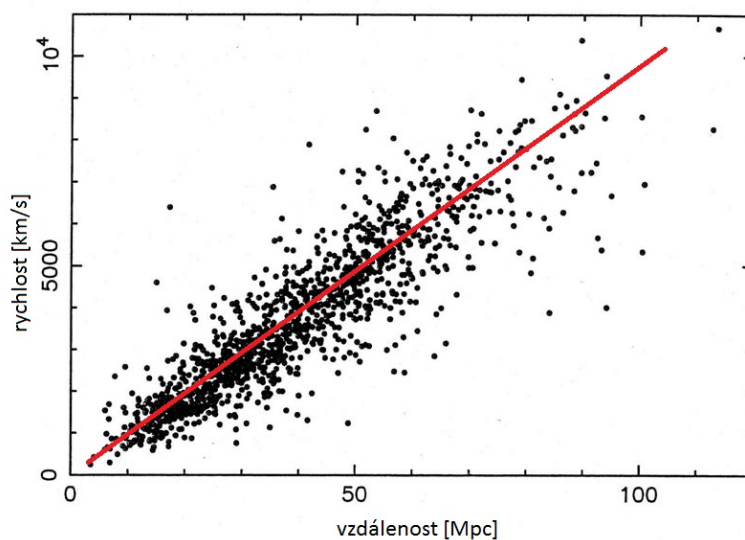
### Metody měření vzdáleností

- *Radiolokace* využívá měření doby mezi odesláním a příjmem rádiového impulsu. Objekt, jehož vzdálenost takto měříme, musí mít jednak schopnost odrážet rádiové impulsy a jednak dostatečný úhlový průměr. Používá se pro objekty ve Sluneční soustavě, protože pro větší vzdálenosti jsou pomyslné „terče“ příliš (úhlově) malé.
- *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. Nejpřesnější měření paralaxy poskytuje nyní družice GAIA. Na jejich základě je možné určovat vzdálenosti hvězd v okolí Sluneční soustavy s přesností 0,001 % a vzdálenosti hvězd poblíž centra naší Galaxie (přibližně 30 000 ly daleko) s přesností do 20 %.
- *Cefeidy* představují jakési majáky ve vesmíru. Jedná se o hvězdy, které mění pravidelně svou jasnost. Tyto změny lze na Zemi poměrně snadno pozorovat a s pomocí jejich periody opakování lze stanovit zářivý výkon hvězdy. Z pozorované jasnosti a určeného zářivého výkonu je pak možné zjistit vzdálenost. Cefeid 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 se jako standardní svíčky označují supernovy typu Ia. Mělo se za to, že k explozím těchto supernov dochází jen jediným způsobem a bývá tak uvolněno vždy přibližně stejné množství energie. V posledních letech však byl potvrzen i jiný původ těchto výbuchů, což vede k větší nejistotě určení vzdáleností. Jako standardní svíčky se 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  $r$  od nás a rychlostí jeho vzdalování  $v$  (viz obrázek 2.9). V roce 1929 ji odhalil E. Hubble a matematicky zapsal jako  $v = H \cdot r$ , kde  $H$  je Hubbleova konstanta. Platnost vztahu a jeho použití je ale omezeno jen na svět galaxií!



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



Obrázek 2.9: Závislost rychlosti vzdalování galaxií na jejich vzdálenosti od nás pro 1355 galaxií. Proložená přímka značí Hubbleův zákon. Převzato z Liddle (2005).

Tabulka 2.3: Typické velikosti a vzdálenosti objektů.

Část škály	Rozměr [m]	Jednotka	Příklad	Popis	Zdroj
Planckova délka	$10^{-35}$	$\ell_P$	$1,616 \cdot 10^{-35}$	v současnosti nejmenší smysluplná míra	1
Subatomární	$10^{-24}$	ym (yoktometr)	20 ym	efektivní rozměr 1 MeV neutrina	2,3
	$10^{-21}$	zm (zepto-)	7 zm	efektivní rozměr neutrina vysoké energie	2,3
	$10^{-18}$	am (atto-)		horní limit velikosti kvarků	
Atomová			850 am	rozměr protonu	5
	$10^{-15}$	fm (femto-)	2,818 fm	rozměr klasického elektronu	1
	$10^{-12}$	pm (piko-)	25–225 pm	rozměry atomů prvků (od vodíku po césium)	5
Buněčná	$10^{-9}$	nm (nano-)	2 nm	průměr šroubovice DNA	6
	$10^{-7}$		100–150 nm	virus HIV	7
Lidská	$10^{-7}$		400–700 nm	vlnová délka světla	
	$10^{-6}$	$\mu\text{m}$ (mikro-)	mikrony	velikost bakterií, červených krvinek, pixelů v astronomických CCD kamerách	8 9
	$10^{-4}$		42–95 $\mu\text{m}$	průměrná tloušťka lidského vlasu	10
	$10^{-3}$	mm (mili-)	2,55 mm	tloušťka mincí 10, 20 a 50 Kč	11
	$10^{-2}$	cm (centi-)	2,54 cm	1 palec (inch)	
			4 cm	průměr pingpongového míčku	12
	$10^{-1}$	dm (deci-)	2,2 dm	průměr fotbalového míče	13
	$10^0$	m	1,7 m	průměrná výška člověka	8
	$10^1$	dam (deka-)	6,35 dam	výška Petřínské rozhledny v Praze	14
	$10^2$	hm (hekto-)	3 hm	výška Eiffelovy věže (bez antény)	8
	$10^3$	km (kilo-)	1,609 km	délka (anglické) statutární míle	8
			8,848 km	výška nejvyšší hory světa Mt. Everest	8
Astronomická	$10^4$		10,994 km	nejhlubší místo oceánů, Mariánský příkop	15
			42,195 km	délka maratónského běhu	
			desítky km	průměry neutronových hvězd	
	$10^5$		111 km	1 stupeň zeměpisné šířky (délky na rovníku)	
			209 km	vzdálenost mezi sídly primátora Prahy a Brna	
	$10^6$	Mm (mega-)	6 378 km	rovníkový poloměr Země	
	$10^7$		40 075 km	rovníkový obvod Země	
	$10^8$		384 000 km	střední vzdálenost Země – Měsíc	
			695 700 km	poloměr Slunce	
	$10^9$	Gm (giga-)			
	$10^{10}$		17,99 Gm	velikost 1 světelné minuty	
	$10^{11}$		$\approx 150$ Gm	1 astronomická jednotka	
$10^{12}$	Tm (tera-)	1,4 Tm	vzdálenost Saturnu od Slunce		
		1,19 Tm	poloměr hvězdy UY Sct		
$10^{13}$		12–15 Tm	hranice heliosféry		
		20,5 Tm	vzdálenost sondy Voyager 1 od Slunce	18	
$10^{15}$	Pm (peta-)	9,46 Pm	1 světelný rok		
$10^{16}$		30,86 Pm	1 parsek		
		40,17 Pm	vzdálenost Slunce k nejbližší hvězdě Proxima Cen	19	
		674 Pm	velikost rádiové bubliny vytvořené TV vysíláním		
$10^{18}$	Em (exa-)	1,45 Em	vzdálenost ke hvězdokupě Hyády	20	
$10^{19}$		19 Em	tloušťka tenkého disku naší Galaxie	21	
$10^{20}$		950 Em	dolní mez průměru disku Galaxie	22	
$10^{21}$	Zm (zetta-)	1,54 Zm	vzdálenost ke galaxii Velké Magellanovo mračno	23	
$10^{24}$	Ym (yotta-)	1,9 Ym	průměr místní nadkupy galaxií	8	
$10^{26}$		880 Ym	průměr viditelného vesmíru	8	

Tabulka byla převzata z anglické verze wikipedie [https://en.wikipedia.org/wiki/Orders\\_of\\_magnitude\\_\(length\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Orders_of_magnitude_(length)) a upravena. Zdroje: 1 – Mohr et al. (2015), 2 – Cowan et al. (1956), 3 – Reines & Cowan (1956), 4 – Pohl et al. (2010), 5 – Zumdahl (2002), 6 – Potaman & Sinden (2000), 7 – <http://bionumbers.hms.harvard.edu/>, 8 – <https://cs.wikipedia.org>, 9 – <http://gxccd.com/>, 10 – <http://www.vlasy.cz/>, 11 – <http://www.cnb.cz/>, 12 – <http://www.pingpong.cz/>, 13 – <http://www.fifa.com/>, 14 – <http://www.prague.eu/>, 15 – <http://technet.idnes.cz/>, 16 – Arroyo-Torres et al. (2013), 17 – <http://solarsystem.nasa.gov/>, 18 – <http://live-counter.com/where-is-voyager-1/>, 19 – citetlurie, 20 – McArthur et al. (2011), 21 – Rix & Bovy (2013), 22 – Xu et al. (2015), 23 – Pietrzyński et al. (2013).

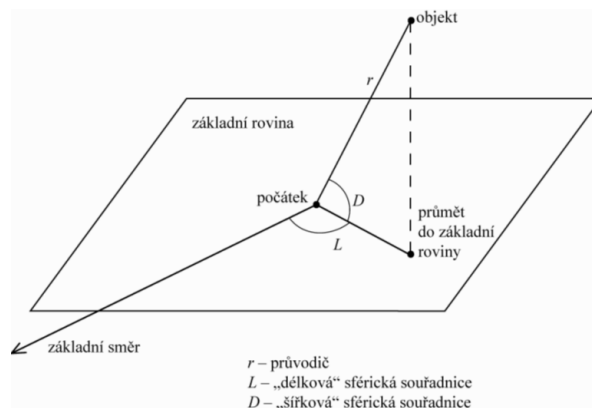
## Použitá a doplňující literatura

- Arroyo-Torres, B., Wittkowski, M., Marcaide, J. M., & Hauschildt, P. H. 2013, *A&A*, 554, A76
- Cowan, Jr., C. L., Reines, F., Harrison, F. B., Kruse, H. W., and McGuire, A. D. 1956, "Detection of the Free Neutrino: A Confirmation", *Science* 124, 103
- 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)
- Kleczek, J. 2002, *Velká encyklopedie vesmíru*, Academia Praha, 582 str.
- Lurie, J. C., Henry, T. J., Jao, W.-C., et al. 2014, *Astronomical Journal*, 148, 91
- McArthur, B. E., Benedict, G. F., Harrison, T. E., & van Altena, W. 2011, *AJ*, 141, 172
- Mohr, P. J., Newell, D. B., Taylor, B. N. 2015, *CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2014*, arXiv:1507.07956v1
- Pietrzyński, G., Graczyk, D., Gieren, W., et al. 2013, *Nature*, 495, 76
- Pohl, R., Antognini, A., Nez, F., et al. 2010, *Nature* 466, 213
- Pokorný, Z., 2006, *Vademecum – Váš průvodce vesmírem*, Hvězdárna a planetárium M. Koperníka v Brně
- Potaman, V. N., Sinden, R. R. 2000, *DNA: Alternative Conformations and Biology: Landes Bioscience, Madame Curie Bioscience Database*
- Prša, A., & Harmanec, P. 2012, *IAU Symposium*, 282, 339
- Liddle, A., 2015, *An Introduction to Modern Cosmology*, 3. vydání, Wiley Academic
- Reines, F., Cowan, Jr., C. L. 1956, "The Neutrino", *Nature* 178, 446
- Rix, H.-W., & Bovy, J. 2013, *The Astronomy and Astrophysics Review*, 21, 61
- Xu, Y., Newberg, H. J., Carlin, J. L., et al. 2015, *ApJ*, 801, 105
- Zumdahl, S.S. 2002, *Introductory Chemistry: A Foundation*, 5th ed., Houghton Mifflin. ISBN 0-618-34342-3.

### 3 Souřadnicové soustavy v astronomii

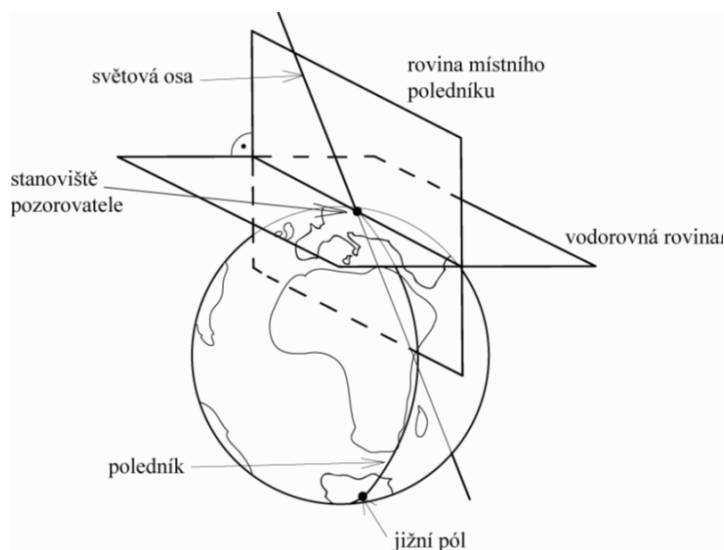
Jednou ze základních úloh astronomie je určení polohy objektu na obloze a hvězdné obloze. Vždyť právě taková měření byla u zrodu časomíry a později posloužila i při určování polohy pozorovatele na zemském povrchu. Starověký velekněz určoval polohu objektů na obloze například pomocí menhirů ve starobyklých svatyních. Pozorování prováděl vždy 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 s vysokou přesností. Je zřejmé, že přesné určení polohy a času dnes rozhodně není jednoduchou úlohou. Navíc je důležité zvolit správnou vztaznou soustavu, vybrat správný souřadný systém pro danou úlohu, případně přejít z jednoho systému do druhého.

Polohy objektů na obloze i hvězdné obloze budeme určovat pomocí směrů, respektive úhlů mezi dvěma směry. Většinou jsou objekty umístěny na nebeskou sféru – pomyslnou kouli o jistém blíže nespécifikovaném poloměru. Polohu objektu pak udávají soustavy sférických souřadnic. V minulosti byly sférické souřadnice definovány výhradně pomocí nebeské sféry. 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, či 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> (obrázek 3.1). Pokud bude počátek soustavy souřadnic souhlasit s polohou pozorovatele, mluvíme o *topocentrické soustavě souřadnic*. Pokud počátek vztáhneme například ke středu Země nebo Slunce, mluvíme o *geocentrické*, respektive *heliocentrické* soustavě.



Obrázek 3.1: Obecné základy souřadného systému. Převzato z Pokorný (2006).

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



Obrázek 3.2: Zavedení souřadného systému. Převzato z Pokorný (2006).

Počátkem soustavy souřadnic prochází *základní rovina* dané soustavy a na ni kolmá přímka, jejíž dvě polopřímky představují směry k protilehlým pólům. Základní rovinou může být rovina rovníku, vodorovná rovina v místě pozorování, rovina ekliptiky a podobně. Směr od počátku k objektu spolu s polopřímkou počátek - - pól 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.

Postupně bylo zavedeno několik soustav astronomických souřadnic a jejich názvy už napovídají, co bude pro každou jednu z nich základní rovinou:

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

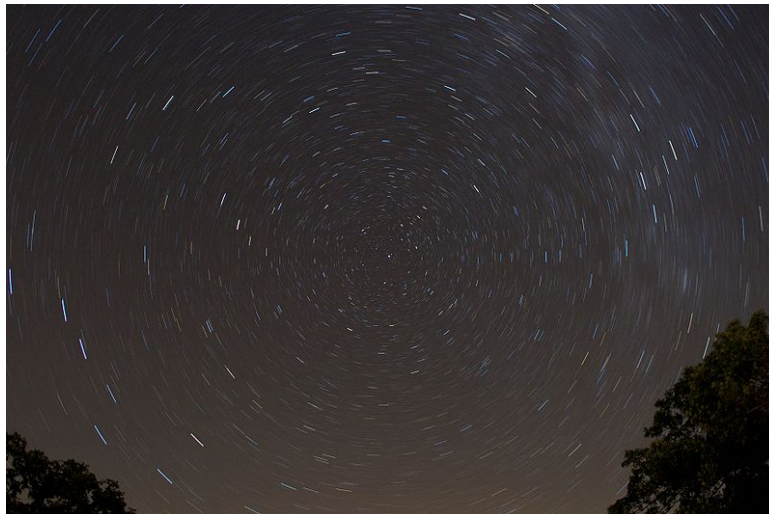
Ale zkusme se nejprve vrátit zpět k učivu zeměpisu a přírodovědy na základních školách, kde jsme se seznamovali se zeměpisnými souřadnicemi. Soustava zeměpisných souřadnic má počátek ve středu Země. Její základní rovinou je rovina zemského rovníku. Základním směrem v této rovině je směr k poledníku procházejícímu anglickou observatoří Greenwich. Polohu libovolného místa na povrchu Země je nyní možné definovat pomocí dvou souřadnic – zeměpisné délky a zeměpisné šířky<sup>2</sup>. Třetí prostorová souřadnice, vzdálenost od středu Země, nebo chcete-li výška nad stanovenou nulovou

<sup>2</sup>Jedinou výjimkou jsou zemské póly, kde si vystačíme s jedinou souřadnicí.

Tabulka 3.1: Souřadnicové soustavy.

soustava	„pól“ soustavy	„rovník“ soustavy	směr, který určuje základní poledník	délková souřadnice	šířková souřadnice	orientace
zeměpisná	severní zem. pól	zemský rovník	severní	zeměpisná délka	zeměpisná šířka	pravo- točivá (P)
obzorníková	zenit	vodorovná rovina	jižní	azimut	(úhlová) výška	levo- točivá (L)
rovníková 1	severní svět. pól	světový rovník	jarní bod	hodinový úhel	deklinace	L
rovníková 2	severní svět. pól	světový rovník	jarní bod	rektascenze	deklinace	P
ekliptikální	sever.pól ekliptiky	ekliptika	jarní bod	ekliptikální délka	ekliptikální šířka	P

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 3.1 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 severní „pól“ (viz tabulka 3.1) 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.



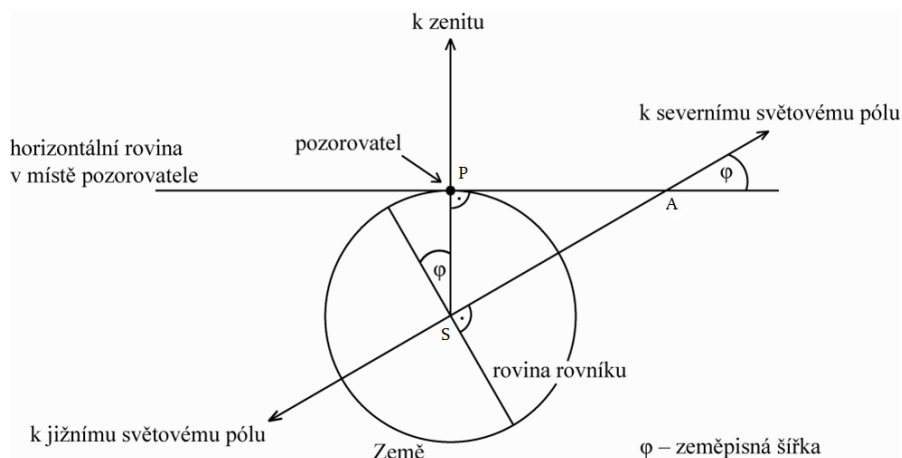
Obrázek 3.3: Hvězdná obloha v okolí severního světového pólu. Znalci hvězdné oblohy jistě neuje Velký vůz nebo hvězdy v souhvězdí Kasiopeja. Převzato z <http://planetarium.ipisd.org>.



## 3.1 Obzorníková soustava souřadnic

Hned první soustava astronomických souřadnic je trochu zvláštní. Na rozdíl od ostatních v tabulce 3.1 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. 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 (viz obrázek 3.6). Základním směrem v této rovině je pak směr jižní. Délková souřadnice – **azimut**<sup>3</sup> se značí  $A$ , udává se v rozmezí od  $0^\circ$  do  $360^\circ$  a měří se ve směru chodu hodinových ručiček. 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 3.3 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 3.4. 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 pólu a k němu kolmou rovinou rovníku. V místě pozorování nakreslíme vodorovnou rovinu a k ní kolmý směr – zenit. Vznikne tak trojúhelník PSA. Úhel  $\angle SPA$  je pravý, úhel  $\angle PSA$  má velikost  $90^\circ - \varphi$ , kde  $\varphi$  je zeměpisná šířka pozorovacího stanoviště  $P$ . Při zachování součtu vnitřních úhlů trojúhelníku  $180^\circ$  připadá na zbývajících úhel  $\angle PAS$  hodnota  $\varphi$ . Ze shodnosti vrcholových úhlů je zřejmé, že i úhlová výška severního pólu nabývá stejné hodnoty  $\varphi$ . A protože světová osa je s tou zemskou rovnoběžná a prochází místem pozorování  $P$ , bude v bodě  $P$  svírat světová osa s vodorovnou rovinou také úhel  $\varphi$ . Můžeme si ale pomoci i kratší úvahou a selským rozumem. Pokud se bude pozorova-

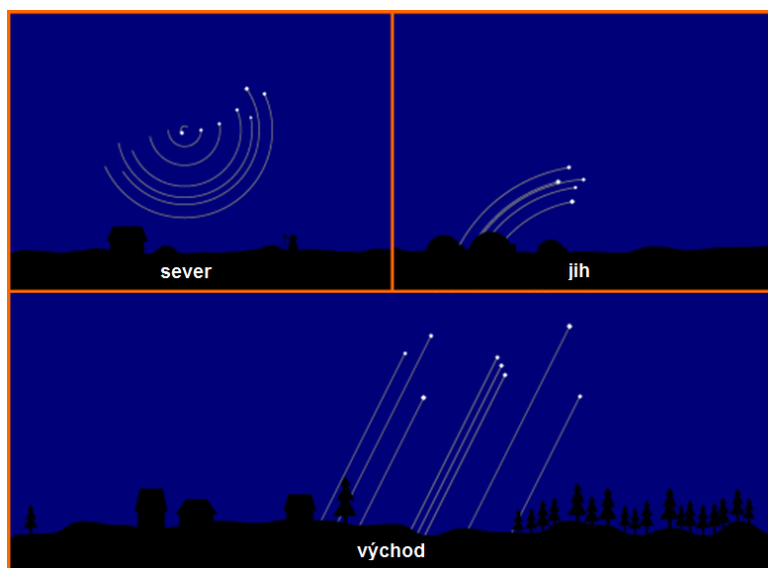


Obrázek 3.4: Odvození závislosti úhlové výšky Polárky na zeměpisné šířce pozorovacího stanoviště.

<sup>3</sup>Původ slova azimut vychází z arabského „as-samt“, což značí „cesta slunce“.

tel 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.

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 3.5). Takovým objektům se říká obtočnové, cirkumpolární. Hvězdy poblíž jižního světového pólu jako například Jižní kříž na obrázku 3.5, budou v Hongkongu pozorovatelné jen krátce nad jižním obzorem. Jejich dráha po obloze bude mít podobu půlkružnic kolem jižního směru. Hvězdy z oblasti rovníku, na obrázku 3.5 jde o hvězdy z Orionu, budou vycházet nad východním obzorem, pohybovat se od východu přes jih směrem k západu, kde budou za západním obzorem zapadat.



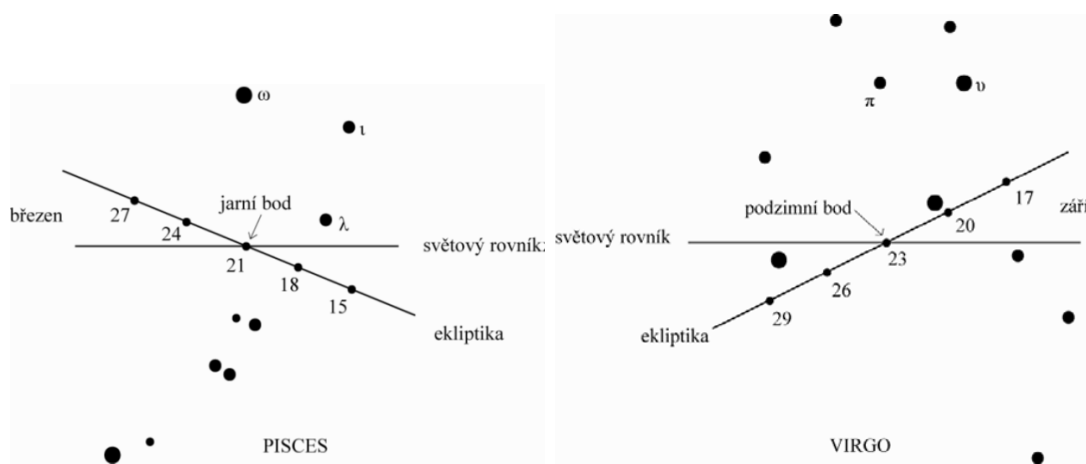
Obrázek 3.5: Pohyby hvězd na obloze – pro hvězdy z okolí severního a jižního světového pólu a pro východní obzor (pro Hongkong  $22^\circ$  s.z.š. a  $114^\circ$  v.z.d.). Převzato z webu Hongkongské univerzity.

## 3.2 Rovníková soustava souřadnic

Nejběžnější soustava souřadnic používaná v astronomii je rovníková soustava druhého typu<sup>4</sup>. Používá se pro určení nebo popis polohy objektu na hvězdné obloze. Její základní rovinou je rovina světového rovníku (viz tabulka 3.1). Základním směrem je **jarní bod**, společná polopřímka roviny světového rovníku a roviny ekliptiky. V jarním bodě se nachází Slunce přesně v okamžik rovníkové rovnodennosti. V okamžiku podzimní rovnodennosti

<sup>4</sup>Dále v textu budeme používat jen spojení rovníkové souřadnice. Pokud půjde o rovníkové souřadnice prvního druhu bude to výslovně uvedeno.

se naopak nachází opačným směrem, v podzimním bodě. Od jarního bodu měříme ve směru proti chodu hodinových ručiček délkovou souřadnici. Označujeme ji **rektascenze**<sup>5</sup>  $\alpha$  a vyjadřujeme buď ve stupních, v rozmezí od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ , nebo v časově-úhlové míře v hodinách, minutách a sekundách. 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 tomto případě v exponentu:  $1^h = 360^\circ/24 = 15^\circ$ ,  $1^m = 15'$ ,  $1^s = 15''$ .<sup>6</sup> Šířkovou souřadnicí je v obou rovníkových soustavách souřadnic **deklinace**<sup>7</sup>  $\delta$ , která se udává ve stupních v rozmezí  $-90^\circ$  až  $+90^\circ$ .



Obrázek 3.6: 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, Měsíc ale i Slunce<sup>8</sup> se přece pohybují na hvězdné obloze, vůči hvězdnému pozadí, takže jejich rovníkové souřadnice se budou měnit, u Měsíce viditelně i v průběhu jediné noci.

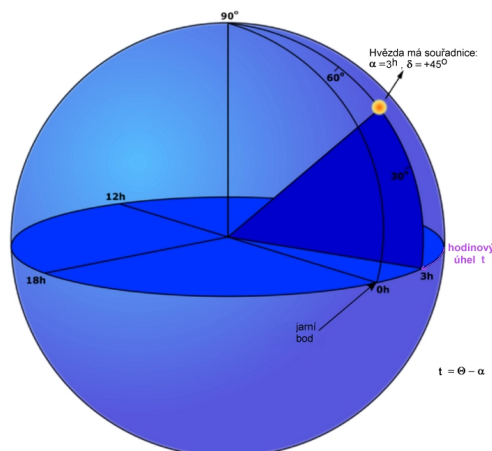
Pro úplnost bychom měli představit i rovníkové souřadnice prvního typu. Jejich základní rovinou je také rovina světového rovníku. Základní směr je ale tentokrát dán pomocí roviny místního poledníku. Zatímco šířková souřadnice, deklinace  $\delta$  je stejná jako pro druhý typ rovníkových souřadnic, délková souřadnice se jmenuje **hodinový úhel**. Označuje se  $t$ , případně  $HA$  (z anglického „hour angle“). Zásadní rozdíl oproti

<sup>5</sup>Slovo *rektascenze* má původ v latině, jde o složeninu z *rectus* (rovný, přímý) a *ascensio* (výstup).

<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.

<sup>7</sup>Pojem *deklinace* vychází z latinského *declinatio* = odkloňovat, uchylovat.

<sup>8</sup>Zatímco u planet a Měsíce můžeme jejich pohyb vůči hvězdnému pozadí sledovat přímo, protože vidíme na obloze i tu hvězdnou kulisu, u Slunce si musíme vypomoci. Jeho polohu a pohyb vůči hvězdnému pozadí lze sledovat například během úplných zatmění Slunce a nebo pomocí družic.



Obrázek 3.7: Rovníkové souřadnice. Převzato z <http://lco.global> a upraveno.

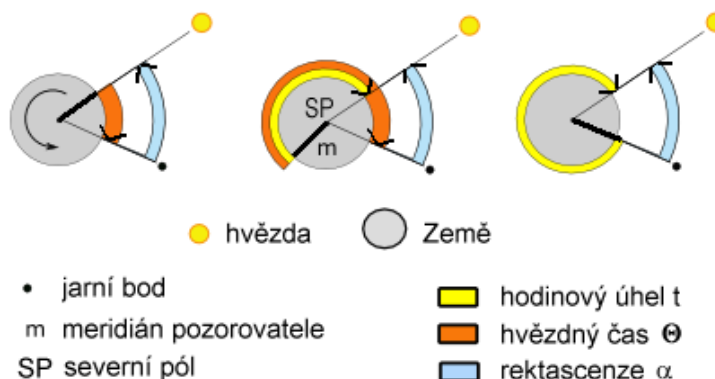
rektascenzi spočívá v tom, že se měří opačným směrem a mění se průběžně s časem! Hodinový úhel je definován jako úhel mezi rovinou deklinační kružnice místního poledníku a rovinou deklinační kružnice objektu (viz obrázek 3.7) a vyjadřuje se podobně jako rektascenze v úhlové nebo časově-úhlové míře. Mezi rektascenzí  $\alpha$  a hodinovým úhlem  $t$  lze psát vztah

$$t = \Theta - \alpha, \quad (3.1)$$

kde  $\Theta$  je tzv. místní hvězdný čas odvozený z rotace Země vůči hvězdám (viz kapitola 4). Graficky je závislost zobrazena na obrázku 3.8. 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, že právě kulminují objekty s rektascenzí  $\alpha = 1^h$ . Toho často využívají pozorovatelé, kterým hodinový úhel dává aktuální 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  $30^\circ$  západním směrem. Záporná hodnota hodinového úhlu znamená, že se daný objekt teprve blíží k meridiánu a je od něj v této chvíli východním směrem.

### 3.3 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



Obrázek 3.8: Vlevo: Hvězda v kulminaci na místním poledníku pozorovatele (hodinový úhel  $t = 0^h$ ), takže  $\alpha = \Theta$ . Vpravo: Jarní bod je v kulminaci na místním poledníku  $m$  (hvězdný čas  $\Theta = 0^h$ ) (Kladné úhly:  $\alpha$ , proti směru otáčení hodinových ručiček;  $t$  a  $\Theta$ , ve směru hodinových ručiček). Převzato z wikipedia; autor Francisco Javier Blanco González.

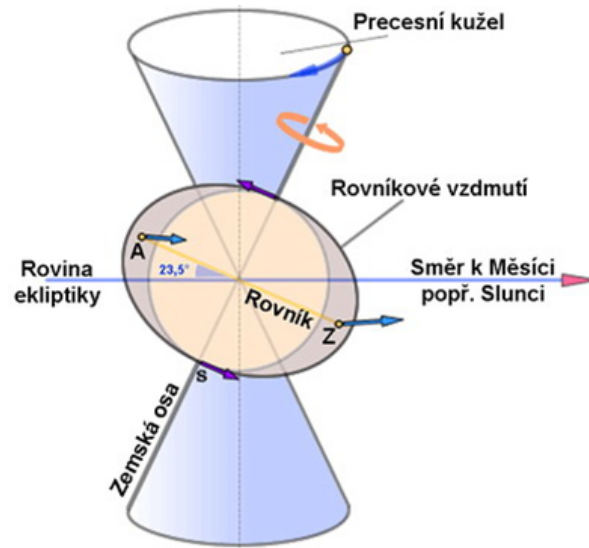
desítkách tisíc let. Takovou simulaci pro známé uskupení Velkého vozu ukazuje obrázek 3.9.



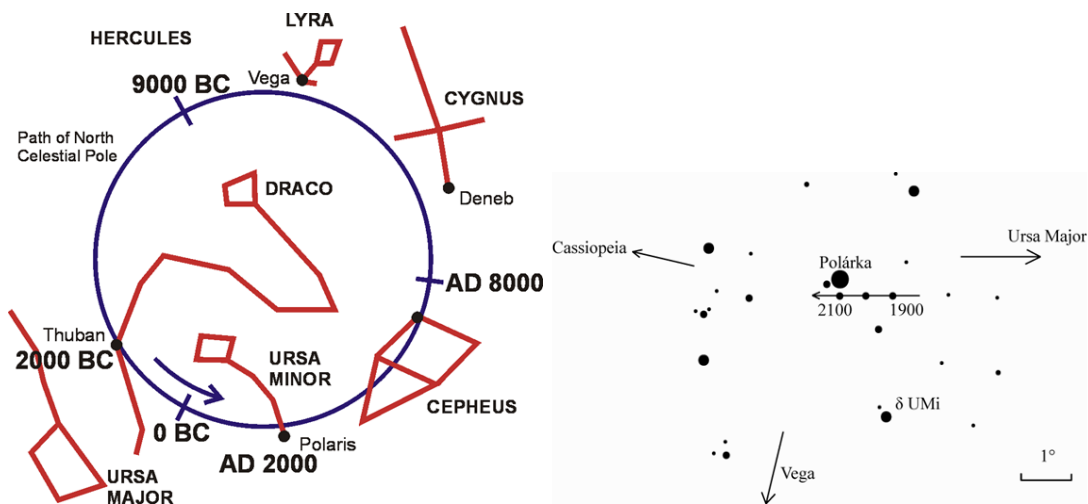
Obrázek 3.9: Změna podoby Velkého vozu (skupiny sedmi jasných hvězd ze souhvězdí Velké medvědice): dnes (vlevo), za 50 000 let a za 100 000 let (vpravo). Převzato z webu <http://astronomia.zcu.cz>.

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 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 rovině ekliptiky o zhruba  $0,5''/\text{rok}$ . Jarní bod se tak posouvá po ekliptice o  $50,26''/\text{rok}$  proti směru pohybu Slunce. Podrobně tento trend popsal Hipparchos už kolem roku 125 př.n.l. K pohybu zemské osy dochází v důsledku působení planet Sluneční soustavy, Slunce a zejména Měsíce. Nejvíce ji ovlivňuje 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 3.10). Jeden cyklus dokončí za tzv. platónský rok, což je přibližně 25 800 let. Precesní pohyb zemské osy samozřejmě vede i ke stáčení roviny rovníku a tím i k posunu jarního a podzimního bodu po ekliptice.



Obrázek 3.10: Precese. Převzato z <http://naske.blog.cz/0911/cely-zemepis-od-zacatku-roku>.



Obrázek 3.11: Precesní pohyb severního světového pólu. Převzato z wikipedia (vlevo), Pokorný (2006) (vpravo).

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 lety, v době vzniku prvních slunečně-měsíčních kalendářů v Egyptě a Mezopotámii, to byla hvězda Thuban (obrázek 3.11).

## Použitá a doplňující literatura

- Kleczek, J. 2002, Velká encyklopedie vesmíru, Academia Praha, 582 str.  
 Pokorný, Z., 2006, Vademecum - Váš průvodce vesmírem, Hvězdárna a planetárium M. Koperníka v Brně.

- Příhoda, P., 2000, Průvodce astronomií, 1. vyd., Praha, Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy, 2000, 247 str.
- Široký, J., Široká, M., 1973, Základy astronomie v příkladech, 2. vydání SPN Praha, 160 str.
- Šolc, M., Švestka, J., Vanýsek, V., 1983, Fyzika hvězd a vesmíru, SPN Praha, 280 str.
- Wolf, M., Hollan, J., Mánek, J., Polechová, P., Šilhán, J., Vanýsek, V., Vondrák, J., Znojil, V., 1992, Astronomická příručka. Academia Praha, 200 str.

## 4 Čas

„Nemám čas.“ Jedno z nejběžněji používaných úsloví naší uspěchané doby. Ale co je to vlastně „čas“? Komici Jan Werich s Miroslavem Horníčkem skončili debatu o čase výrokem, že čas si vymysleli lidi, aby 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 opřenou o názory celých generací filozofů. Podle Aristotela vzniká čas počítáním pravidelných pohybů nebo dějů, například střídáním dne a noci. Immanuel 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: „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 otázku času astronomové spolu s fyziky.

### 4.1 Jednotky času

Základní jednotkou času je v soustavě SI **sekunda**<sup>2</sup> (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<sup>3</sup>. Počet otoček Země během jednoho jejího oběhu 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:  $1 a_j = 365,25$  dne, tedy  $3,155\,76 \cdot 10^7$  s. Pro nejdelší časové škály, v nichž vyjadřujeme například stáří hvězd, galaxií nebo i celého vesmíru, pak používáme

<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 sedmdesátíka je to přece jen jedna sedmdesátina života.

<sup>2</sup>V běžné řeči se často používá pro vyjádření času vteřina. To je ovšem špatně! Užívání jednotek SI v České republice nařizuje zákon 505/1990 Sb. a vyhláška 264/2000 Sb. Základní neznalost v tomto směru bohužel velmi často prokazují i sportovní komentátoři a novináři vůbec.

<sup>3</sup>V dalším výkladu budeme striktně odlišovat otočku (kolem osy) a oběh (okolo nějakého tělesa).





Obrázek 4.1: 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. Zdroj: <http://www.ilovebrno.cz>.

násobky tohoto roku – milióny nebo miliardy let, které někdy zkráceně zapisujeme Myr, Gyr.<sup>4</sup>

## 4.2 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 a vědy, rostly požadavky na přesnost určování času. Počátkem 21. století došli lidé až k neuvěřitelně přesným měřením. V roce 2011 byla dosažena přesnost měření času, 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 náš život a život i dalších forem života na Zemi je závislý na Slunci, na střídání světla a tmy. Naše „biologické hodiny“ jsou sladěny s otáčením Země vůči Slunci.

<sup>4</sup>Nejkratší smysluplný časový úsek nám vymezuje Planckův čas, tedy doba, kterou potřebuje foton ve vakuu pro překonání tzv. Planckovy délky (přibližně  $1,6 \cdot 10^{-35}$  metru). 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  $t_P = 5,391\,16(13) \cdot 10^{-44}$  s (Mohr et al., 2015).

Od délky jedné otočky Země je stanovena v soustavě jednotek SI délka jednoho dne, takže  $1 \text{ d} = 24 \text{ h} = 1\,440 \text{ min} = 86\,400 \text{ s}$ . 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 můžeme vystopovat ve starověkém Egyptě. 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. Dnes ale víme, že Egypťané pro odpočítávání času v noci používali západ určených význačných hvězd a těch bylo celkem 36 na celé nebeské sféře. Na večerní a ranní soumrak připadly 3 a 3 hvězdy a na dobu temné noci 12 hvězd. Je třeba si ale uvědomit, že egyptské hodiny byly jinak dlouhé v létě a jinak v zimě. S rozdělením dne na 24 stejně dlouhých hodin přišel Hipparchos, který navrhl používat jednu hodinu takové délky jakou mají hodiny v den rovnodennosti.<sup>5</sup>

Délka a dělení dne je 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 koncem starého dne a počátkem nového je půlnoc, pochází z Německa.

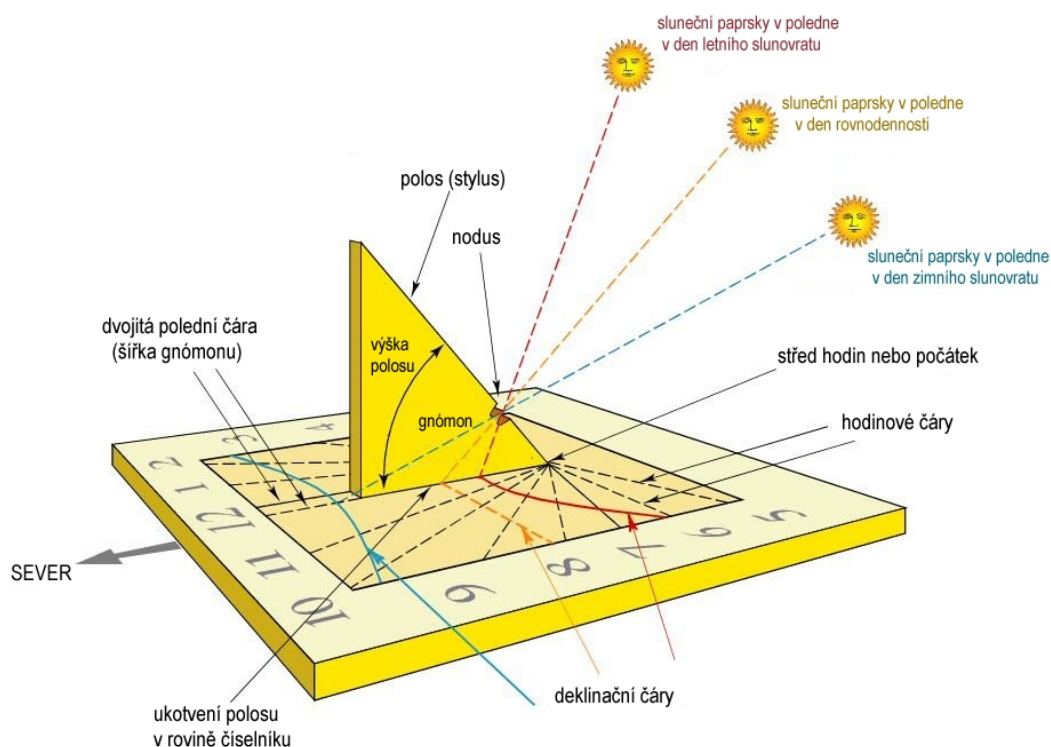


Obrázek 4.2: Část vykopávek chrámu v tureckém Göbekli Tepe. Zdroj: <http://www.perceptions.couk.com/westward.html>.

<sup>5</sup>Dělení hodin na 60 minut bylo převzato od babylonských učenců, resp. Sumerů a pochází z doby kolem 2000 př.n.l.

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 pohyb Slunce po obloze vlastně úplně přesně rovnoměrný není<sup>6</sup>. Stačilo k tomu v principu velmi jednoduché zařízení, v podstatě jen svislá tyč – **gnómon**. Čas je odměřován podle pohybu stínu, který tyč vrhá na zemi. V principu může být gnómonem i tyč vodorovná nebo šikmá vůči vodorovné rovině, nejlépe rovnoběžná s rotační osou Země. V takovém případě je vlastně gnómon ukazatelem slunečních hodin.

Bohužel nevíme, kdy člověk objevil tento způsob měření času. Nejstarší gnómony lze datovat do období zhruba 5 000 let před naším letopočtem. V Evropě je řada míst, kde byly buď přímo nalezeny prastaré gnómony nebo se jedná o velmi staré observatoře – jako například na hoře Bého severně od francouzské 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 gnómon se používaly kolem 3 500 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.

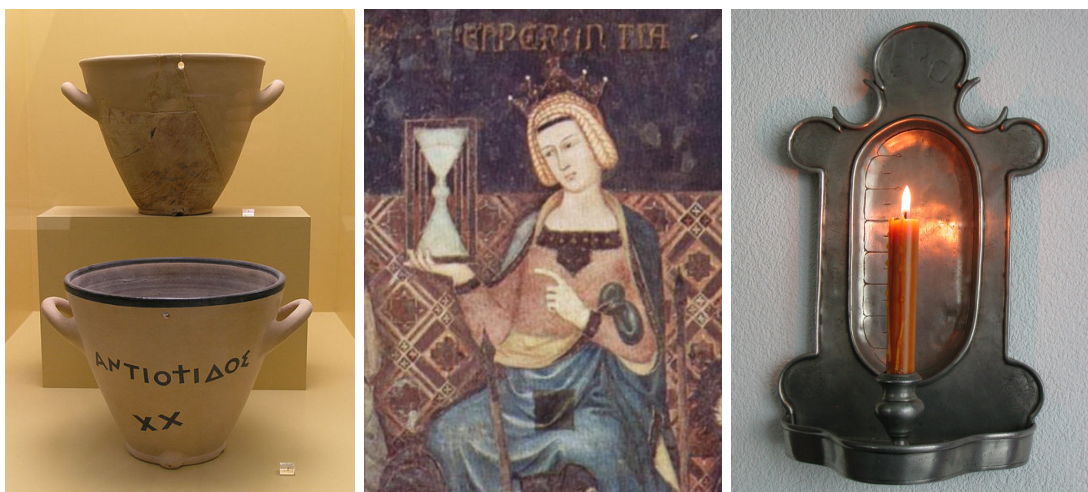


Obrázek 4.3: Schéma vodorovných slunečních hodin pro severní polokouli. Na jižní polokouli jde číselník proti směru hodinových ručiček. Převzato z webu British Sundial Society a upraveno.

<sup>6</sup>O pohybu Slunce po obloze se čtenář dozví více až v dalších kapitolách.

V psaných záznamech se objevuje popis gnómonu 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 gnómonem Anaximandros kolem roku 560 př.n.l., který se o něm zmiňuje jako o babylonském nástroji. Řekové měření času pomocí Slunce dále rozvinuli. Zhruba do prvního století našeho letopočtu je pak datován objev tzv. **polosu**, ukazatele slunečních hodin, který je rovnoběžný s rotační osou Země (obrázek 4.3). Zajímavostí je, že jeden z nejstarších psaných záznamů o slunečních hodinách obsahuje i bible. Český katalog slunečních hodin, který mapuje jejich výskyt na území bývalého Československa, sestavili Brož a kol. (2005)<sup>7</sup>.

Kromě Slunce se využívalo k měření času i pozemských živlů – vody, země i ohně. Vodní hodiny, tzv. klepsydry (obrázek 4.4 vlevo) se poprvé objevily v 16.-14. 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 italské Sieně (obrázek 4.4 uprostřed). Ani první použití ohně pro měření času není jasné. První zmínku o tzv. svíčkových hodinách (obrázek 4.4 vpravo) lze najít v čínské básni od básníka You Jiangu z roku 520 n.l.. Podobné hodiny se hojně používaly v Japonsku do počátku 10. století a do pozdějších dob v arabských zemích.



Obrázek 4.4: Vlevo: Klepsydra, vodní hodiny: rekonstrukce jílového originálu z konce 5. století př.n.l. uložená v aténském muzeu. Uprostřed: První zobrazení přesýpacích hodin. Detail Lorenzettiho fresky. Vpravo: Svíčkové hodiny. Zdroj: wikipedie.

Všechny výše uvedené metody měření času měly i přes velmi důmyslná vylepšení poměrně 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>8</sup> až do Galileiho objevu využití kyvadla se používal tzv. lihýř. Takové hodiny

<sup>7</sup>Aktuální verzi katalogu lze nalézt na <http://astro.mff.cuni.cz/mira/sh/sh.php>.

<sup>8</sup>Spekuluje se o tom, že mechanické hodiny vznikly v raném středověku, například se traduje, že

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>9</sup>. V téže roce Huygens vynalezl i setrvačku (tzv. nepokoj) pro mechanické hodiny, kterou si nechal o dvacet let později patentovat<sup>10</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 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. Warren A. Morrison a Joseph 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 Louis Essen a Jack 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>11</sup>. Nejpřesnější časový standard nyní poskytují atomové hodiny na bázi cesia 133, označované NIST-F2, které dosahují relativní přesnosti  $1,5 \cdot 10^{-15}$ . Už se ale testují kvantové nebo optické hodiny, které by mohly dosáhnout relativní přesnosti  $10^{-18}$  (Bloom et al., 2014). Atomové hodiny se používají ke kontrole a kalibraci všech hodin a vědeckých a navigačních přístrojů.

### 4.2.1 Časy v astronomii

Astronomové nezřídka 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 – tzv. pasážník, který se mohl pohybovat jen v rovině meridiánu (viz obrázek 4.5). Dnes se pro měření času používá interferometrických pozorování VLBI<sup>12</sup> velmi vzdálených objektů zvaných

---

podobné hodiny zkonstruoval budoucí papež Silvestr II. První zřejmou zmínku o mechanických hodinách nalezneme v Božské komedii Dante Alighierioho, 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.

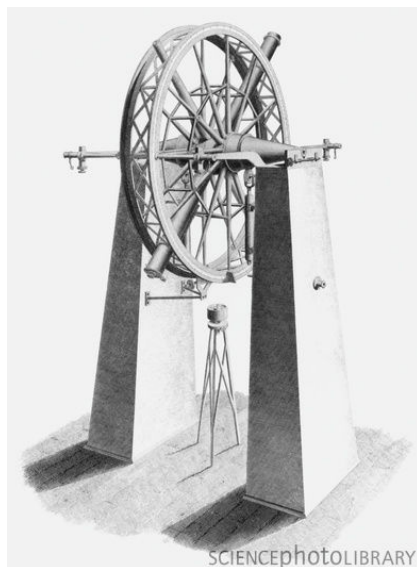
<sup>9</sup>Sestrojení hodin oznámil krátkou zprávou v roce 1657 a podrobně popsal v díle *Horologium oscillatorium* v roce 1673.

<sup>10</sup>Nezávisle na Huygensovi vynalezl setrvačku i Robert Hooke.

<sup>11</sup>Jedna sekunda je v SI od roku 1967 definována jako doba trvání 9 192 631 770 kmitů atomů cesia. Do té doby byla charakterizována jako 1/86 400 středního slunečního dne (viz kapitola 4.3.1).

<sup>12</sup>Interferometrická pozorování jsou založena na skládání signálů (optických, rádiových) z více přístrojů (dalekohledů, radioteleskopů). Přesným složením signálů z jednotlivých členů interferometru

kvasary. Dosahuje se přesnosti řádově až milisekundy a je tak možné sledovat i drobné změny v délce jednotlivých otoček Země.



Obrázek 4.5: První pasáží 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.

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 (označený též GMT) začínal dle staré tradice o 12 hodin později, tedy v poledne. Nepřesnosti a zmatky, které z toho vycházely, měly být ukončeny až 1. ledna 1925, kdy byla pro čas astronomický doporučena zkratka GMAT (Greenwich Mean Astronomical Time, Greenwichský střední astronomický čas). O tři roky později Mezinárodní astronomická unie zcela opustila časy GMT a GMAT a zavedla termín „Universal Time“ UT (světový čas), v němž den pro občanské i astronomické účely začíná o půlnoci (McCarthy & Seidelmann, 2009, str. 10–11).

Světový čas UT dnes existuje v různých verzích. Nejvíce se užívá čas UT1, který je stejný pro celou zeměkouli a definuje skutečný rotační úhel Země vůči pevné vztažné soustavě (dané velmi vzdálenými objekty). Jeho nepřesnost je  $\pm 3$  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>13</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

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 (z anglického Very Long Baseline Interferometry), tedy Interferometr s velmi dlouhou základnou.

<sup>13</sup>Oficiálně byl takto označen až roku 1967.

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 2016 vloženo 27! 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.

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 země 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 spletitá.

V roce 1583, rok po zásadní reformě kalendáře provedené Řehořem XIII., popsal francouzský učenec Joseph Justus Scaliger velký časový cyklus o délce 7 980 let. S jeho pomocí chtěl popsat veškeré historické události, a proto šel do minulosti před všechny známé, 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>14</sup> datování počítají průběžně jednotlivé dny. K polední 1. ledna 2016 jich bylo už 2 457 389. Scaligerovy myšlenky se chopil John Herschel a roku 1849 navrhl využití juliánského datování v astronomii (Herschel, 1849). V roce 1884 se po zavedení nultého světového časového standardu posunul začátek astronomického dne v juliánském datování na 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 naopak 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

$$\begin{aligned}
 JD &= 1461 \cdot [R + 4800 + (M - 14)/12]/4 \\
 &+ 367 \cdot [M - 2 - 12 \cdot ((M - 14)/12)]/12 \\
 &- 3 \cdot [(R + 4900 + (M - 14)/12)/100]/4 + D - 32075.
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

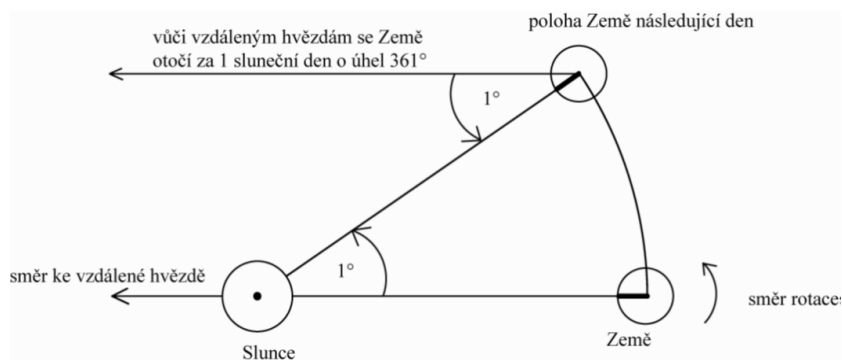
Poznamenejme, že na zlomky dne se převedou také údaje o hodinách, minutách, případně sekundách.

<sup>14</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.

## 4.3 Doba rotace a doba oběhu

### 4.3.1 Den

Zatímco délka jednoho dne je přímo definována v soustavě jednotek SI (viz kapitola 4.1), 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 a jeden rok zase jednomu 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 nutné 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.



Obrázek 4.6: Sluneční a hvězdný den. Převzato z Pokorný (2006).

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  $360^\circ$  vůči hvězdám, je pak definován jako doba mezi dvěma po sobě následujícími horními kulminacemi<sup>15</sup> jarního bodu<sup>16</sup>. Naproti tomu jeden **sluneční den** odpovídá délce otočky Země měřené vůči Slunci. Pokud budeme vycházet z měření polohy 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 4.6). 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.

<sup>15</sup>Slovo kulminace znamená „vrcholit“, 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>16</sup>Ani jarní bod není stabilní, ale v důsledku precese se zvolna posouvá. Hvězdný den kratší je o 0,009 s než doba otočky Země o  $360^\circ$  (měřeno vůči hvězdám), což odpovídá právě hodnotě denního posunu jarního bodu.



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 (podle druhého Keplerova zákona) nerovnoměrně (viz kapitola 12.6). 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, a tedy na pozemské obloze, také nerovnoměrně. Proto se v astronomii zavádí tzv. střední Slunce, a hned dokonce dvě. **První střední Slunce** se pohybuje rovnoměrně po ekliptice. Tak by se pohybovalo skutečné Slunce v případě kruhové oběžné dráhy Země. První střední Slunce se s pravým Sluncem 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 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  $E$  mezi průchody pravého Slunce (PS) a druhého středního Slunce (SS2) meridiánem se označují jako **časová rovnice**

$$E = PS - SS2. \quad (4.2)$$

Z výše uvedeného vyplývá, že 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 4.7.

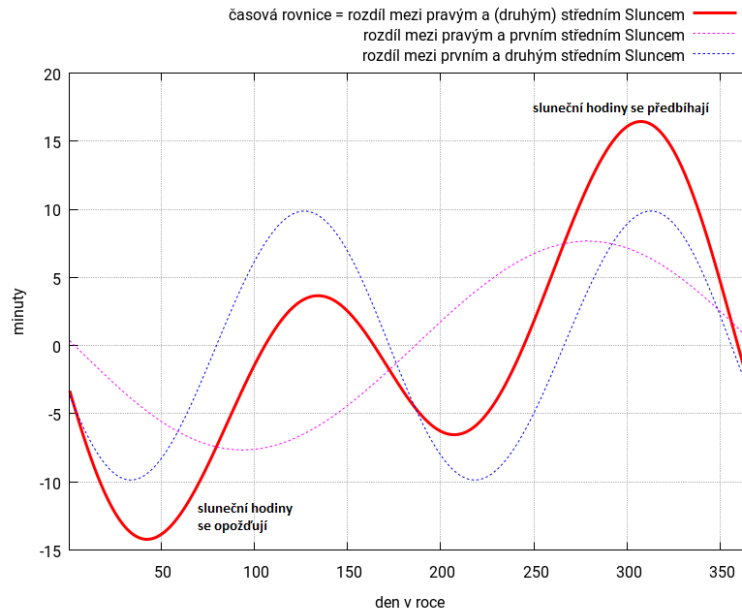
Podobná situace jako na Zemi samozřejmě nastává i u ostatních planet. Naše úvahy tak můžeme zobecnit. Pokud se někde hovoří o rotaci planety bez bližšího udání, má se většinou na mysli doba rotace vůči hvězdám, tedy tzv. střední siderická<sup>17</sup> doba rotace, siderický den  $D_*$ . Na druhé straně délku dne na té které planetě charakterizujeme podle doby rotace vůči centrální hvězdě, hovoříme o tzv. synodickém<sup>18</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

$$\frac{P}{D_*} - \frac{P}{D} = 1 \quad \text{nebo} \quad \frac{1}{D} = \frac{1}{D_*} - \frac{1}{P}. \quad (4.3)$$

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

<sup>17</sup>Slovo *siderický* vychází z latinského označení hvězdy (*sidus*) a znamená tedy „hvězdný“.

<sup>18</sup>Původní význam řeckého slova *synodos* můžeme vyjádřit jako schůzku, shromáždění, soutok, společnost. Přeneseně v astronomii pak pod pojmem *synodický* rozumíme takový, jaký nastane při určitém postavení zúčastněných kosmických těles.



Obrázek 4.7: Časová rovnice. Převzato z <http://kalendar.beda.cz> a upraveno.

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

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{D_*} + \frac{1}{P}. \quad (4.4)$$

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.

### 4.3.2 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>19</sup>

$$T = (JD_0 - 2451545,0)/36525, \quad (4.5)$$

kde  $JD_0$  je juliánské datum pro nejbližší předcházející půlnoc světového času (UT). Pro stejnou půlnoc spočítáme hvězdný čas na nultém poledníku (v Greenwichi)  $S_0$ . Pro

<sup>19</sup>Připomeňme, že 1 juliánský rok dle definice IAU je roven 365,25 dne.

běžné použití postačí členy aproximace do třetí mocniny času  $T$ :

$$S_0 = 6,697374558 + 2400,05133691T + 0,000025862T^2 - 0,0000000017T^3. \quad (4.6)$$

Čas  $t$  v daném dni, který uběhl od pólnoci (UT), vyjádříme v hodinách a zeměpisnou délku  $l$  místa ve stupních a spočítáme výsledný místní hvězdný čas  $S$  dle vztahu

$$S = S_0 + 1,0027379093t + l/15. \quad (4.7)$$

Výsledný čas  $S$  případně zmenšíme o celistvý násobek 24 hodin, tak aby  $0 \leq S \leq 24$ . 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!

### 4.3.3 Místní a pásmový čas

Každému místu na Zemi přísluší místní „sluneční“ čas, který je platný pro zeměpisný poledník, procházející daným místem. Rozdíl takových místních časů dvou stanovišť pak odpovídá rozdílu 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>20</sup> železniční dopravy se objevil nový problém. Na železničních křižovatkách, kde se setkávaly důležité dálkové trasy, musely být zvláštní hodiny pro každou trať. Časy na nich odpovídaly časům výchozích stanic. A tak například na nádraží v Pittsburghu, v americké Pensylvánii (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>21</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 Greenwichského 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

<sup>20</sup>Chápáno z pohledu tehdejších cestovatelů. Z dnešního pohledu nás rychlost tehdejších strojů příliš neohromí.

<sup>21</sup>Zajímavé je, že první popis pásmových časů publikoval v knize „Miranda“ italský politik, astronom a matematik Quirico Filopanti (vlastním jménem Giuseppe Barilli) v roce 1858.

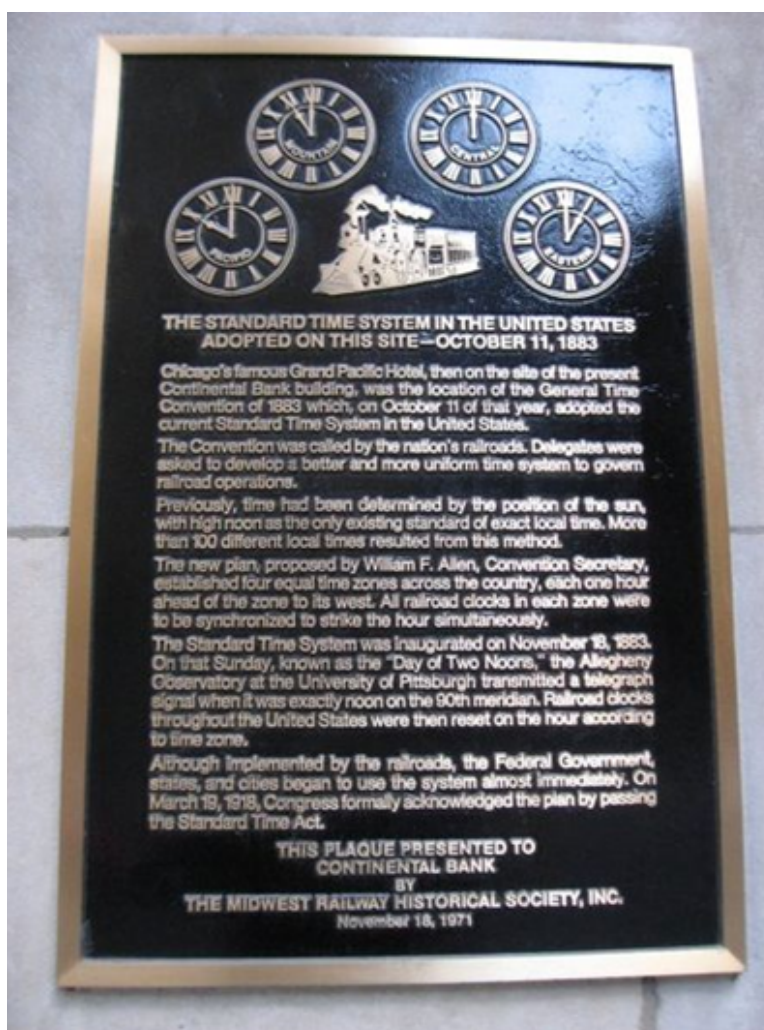
na území pěti časových pásem. Ty byly používány do roku 1949. Dnes mají v celé Číně jednotný čas.

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>22</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 sousedního pásma ležícího východně od nás. V období, kdy 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 4.8: Časová pásma. Zdroj: <http://www.svetcest.cz/storage>.

<sup>22</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.



Obrázek 4.9: Pamětní deska připomínající dohodu o používání času na železnici v Severní Americe z roku 1883 (Railway General Time Convention). Zdroj: wikipedia.

#### 4.3.4 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 nejen rok, se 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>23</sup>, což je doba mezi dvěma po sobě následujícími průchody pravého Slunce, přesněji středu jeho disku, jarním bodem. Jeho délka je zhruba 365,242 2 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 mění v důsledku precesního pohybu<sup>24</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 vztažena. Střední tropický rok k 1. lednu 2000 byl například 365,242 189 7 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  $146\,097/400 = 365 + 97/400 = 365,242\,5$  dní (Seidelmann, 1992, str. 576-581). Pro vyjádření délky tropického roku v časově odlehlejších okamžiku lze použít následující vztah

$$rok_{\text{trop}} = 365,2421896698 - 6,15359 \cdot 10^{-6}T - 7,29 \cdot 10^{-10}T^2 + 2,64 \cdot 10^{-10}T^3, \quad (4.8)$$

kde  $T$  je juliánské století 36 525 dní, kde každý den má 86 400 s dle definice v SI. Čas  $T$  je měřený od 1. 1. 2000 (McCarthy & Seidelmann, 2009, str. 18).

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

## 4.4 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 třeba 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 nebo měsíc jsou odvozeny z pohybu Měsíce a jeho fáze 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

<sup>23</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.

<sup>24</sup>Detailněji je o něm pojednáno v kapitole 3.3.

s juliánským kalendářem tento rok. Každý čtvrtý rok, když je letopočet 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 a používá se 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 zvláštně.

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 matematikou, 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 rovníkennostmi) 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.<sup>25</sup> 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 v Dánsku nebo na severu Německa gregoriánský kalendář akceptovali až k roku 1700, konzervativní Anglie teprve roku 1752 a v Rusku byl přijat až roku 1918<sup>26</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.

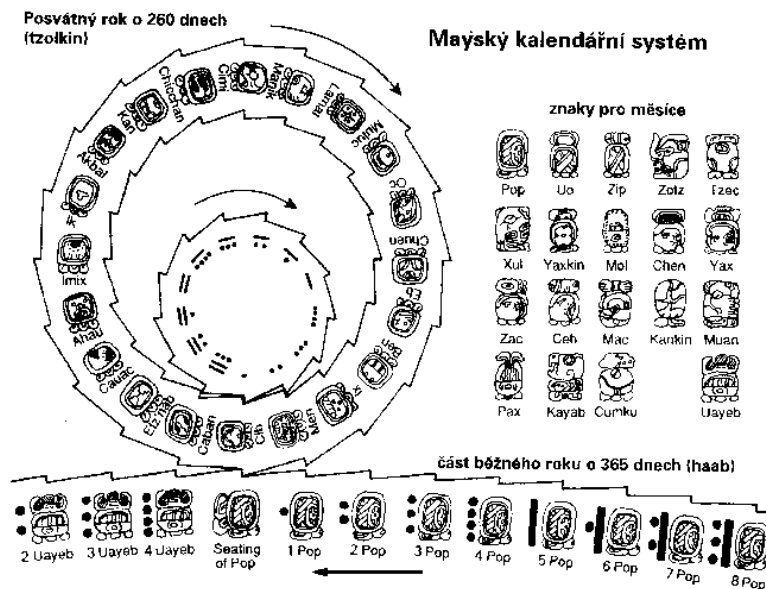
<sup>25</sup>Podrobný přehled zavádění reformy kalendáře lze najít na <http://www.tondering.dk/claus/cal/gregorian.php#country>.

<sup>26</sup>Pozdní přijetí gregoriánské reformy také stojí za zdánlivou chybou, díky níž je ruská komunistická revoluce ze 7. listopadu 1917 označována jako Velká říjnová socialistická revoluce. Mimochodem ruská pravoslavná církev gregoriánskou reformu dosud nepřijala a tak se pravoslavné Vánoce začínají slavit až 6. – 7. ledna.

Jeho vznik byl zpočátku vynucen zemědělstvím, stanovením období záplav pomocí heliaktického východu Síría. 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 mluvilo 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. Nejdelsí z nich tzv. alautun má délku 63 081 429 let! Počátek mayského kalendáře 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).



Obrázek 4.10: Každý den v roce má v mayském kalendáři své jméno složené z několika částí. Jméno pro konkrétní 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).

*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>27</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.

Nejmladším kalendářem z našeho stručného přehledu je *kalendář islámský*. Jedná se o čistě měsíční (lunární) kalendář. Zavedl jej chalífa<sup>28</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

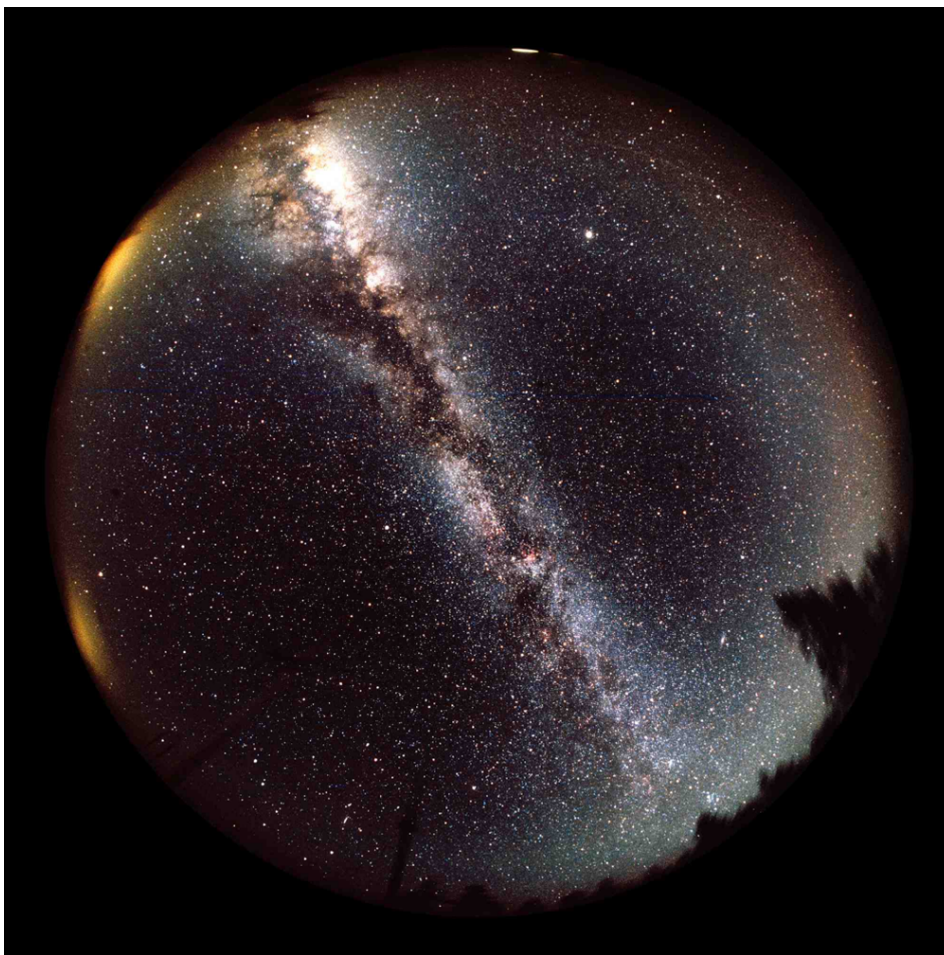
- Bloom, B. J., Nicholson, T. L., Williams, J. R., et al. 2014, *Nature*, 506, 71
- Böhm, V., Böhm, B. 2004, *Vesmír* 83, říjen 2004, 568 - 573
- Brosche, P., Sündermann, J., eds., 1990, *Earth's rotation from eons to days : proceedings of a workshop held at the Centre for Interdisciplinary Research (ZiF) of the University of Bielefeld, FRG, September 26–30, 1988*. Berlin: Springer-Verlag.
- Brož, M., Nosek, M., Trebichavský, J., Pecinová D., 2005, *Sluneční hodiny na pevných stanovištích*, 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.
- Kleczek, J. 2002, *Velká encyklopedie vesmíru*, Academia Praha, 582 str.
- Klokočník, J., Kostecký, 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, ISBN: 978-3-527-40780-4.
- Michal, S., 1980, *Hodiny*. Praha: SNTL 1980
- Mohr, P. J., Newell, D. B., Taylor, B. N. 2015, *CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2014*, arXiv:1507.07956v1
- 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, *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, by P. Kenneth Seidelmann. University Science Books, ISBN 0-935702-68-7, 752 str.

<sup>27</sup>Ze slova „šabat“ je odvozeno české označení „sobota“.

<sup>28</sup>Chalífa, kalif byl nejvyšším islámským duchovním (imámem) a do poloviny 13. století i světským vládcem.

## 5 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.

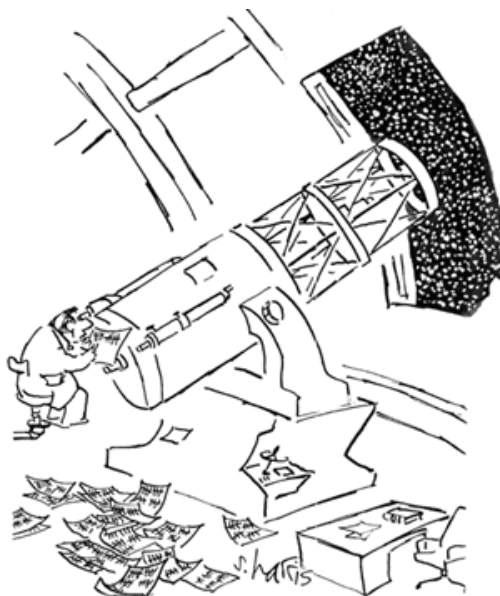


Obrázek 5.1: Hvězdné nebe. Zdroj: <http://mgpc3.as.arizona.edu/images>.

### 5.1 Hvězdy a souhvězdí

Řekne-li se astronom, většina lidí si řekne, to je ten, co má něco společného s hvězdami. Pokud si nespletli astronoma, hvězdáře s astrologem, tvůrcem a vykladačem horoskopů, představí si člověka, který v noci pozoruje hvězdy dalekohledem a ve dne spí. Skutečnost je dnes zcela jiná. Astronom 21. století tak 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<sup>1</sup>, udržované pohromadě vlastní gravitací, o hmotnostech v rozmezí hmotnosti  $0,013 M_{\odot}$  až stovky hmotností Slunce. Spodní hranice hmotnosti odpovídá hmotnosti 13 planet Jupiter ( $13 M_J$ ) 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 později. Nyní se zaměříme na pozorování světa hvězd.



Obrázek 5.2: 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 jako na obrázku 5.2 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 čtverečních. 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 samotná brání ve výhledu. Na obloze nad sebou tak můžeme za ideálních podmínek vidět jen asi dva až tři tisíce hvězd. Jedna hvězda pozorovatelná prostýma očima připadá na plochu téměř čtyřiceti měsíčních úplňků. A jak je to tedy s těmi myriádami? Je to vlastně optický klam. Při pohledu na hvězdnou oblohu nás přitahují jasné hvězdy, oči přejíždějí, doslova poskakují z jedné na druhou a mozek to vyhodnotí tak, že je tam těch hvězd plno. Jenže taková situace nastává v ideálních podmínkách. Ve městech

<sup>1</sup>Podrobněji bude o této substanti pojednáno později, až se budeme věnovat stavbě hvězd.

s rušivým osvětlením a znečištěným ovzduším a za svitu Měsíce je situace ještě mnohem horší. Tam už mnohde můžeme hvězdy pozorovatelné na obloze pouhýma očima počítat jen na desítky!

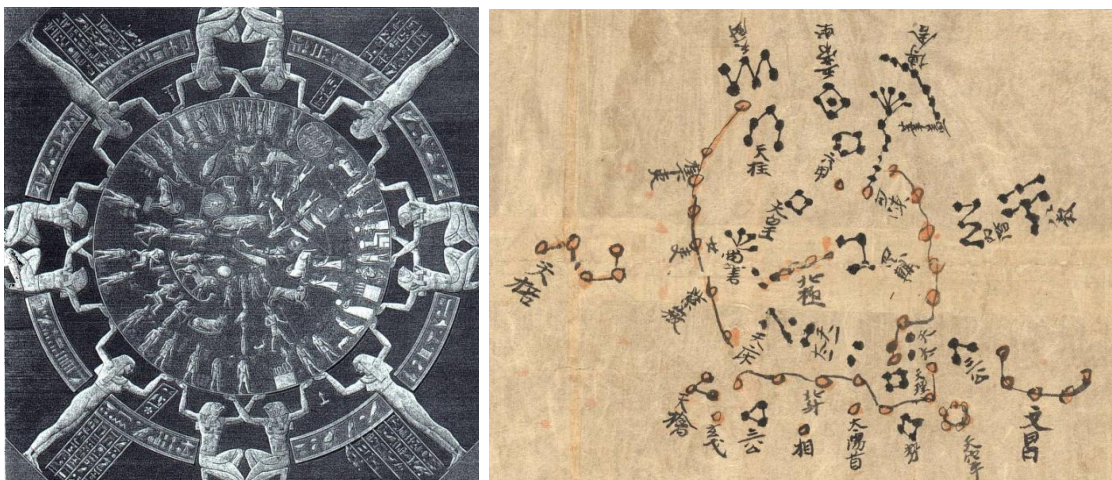
Samozřejmě se situace promění, když si pomůžeme dalekohledem. Malým binokulárním dalekohledem, tzv. triedrem můžeme pozorovat za dobrých podmínek až 200 000 hvězd. Se zvětšujícími se dalekohledy se zvětšuje i počet pozorovatelných hvězd, a to až o několik řádů. Otázkou ale je, proč jsou odhady laiků tak nadsazené, přemrštěné. Zřejmě hraje roli několik faktorů. Hvězdy na obloze jsou rozmístěny nepravidelně, nevidíme žádné referenční body, čáry, hranice. A nepochybně záleží 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. 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 řadu tisíciletí (viz obrázek 5.3).



Obrázek 5.3: První vyobrazení souhvězdí v jeskyni Lascaux (jižní Francie) z doby před 17 300 lety! (Rappenglück, 1996). Zdroj: <http://www.iau.org>.

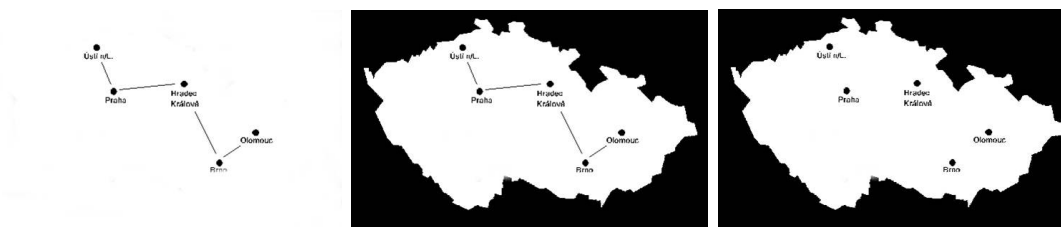
Těmto pomyslným obrazcům na hvězdném nebi se dříve říkalo souhvězdí. Každá kultura měla různá souhvězdí. Například čínská starobylá souhvězdí jsou obecně menší než ta evropská a představují jiné objekty (viz obrázek 5.4). Dnes se pro takové skupiny hvězd na hvězdném nebi užívá označení **asterismus**. 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, které 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



Obrázek 5.4: Vlevo: Souhvězdí, jak jsou vyobrazena na reliéfu v chrámu bohyně Hathor v egyptské Dendeře 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>

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.



Obrázek 5.5: 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.

O nové definici souhvězdí jednala první tři valná shromáždění IAU v letech 1922, 1925 a 1928. Na posledně uvedeném byly schváleny přesné hranice pro všech 88 souhvězdí (viz tabulka 5.1) podle návrhu, který dle zadání IAU vypracoval Eugène-Joseph Delporte. Tiskem vyšla souhrnná práce včetně tabulek a mapek o něco později (Delporte, 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 dala vznik oficiálním souhvězdím, je také označujeme jako asterismy.

Tabulka 5.1: 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	Aquilae	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	Kasiopeja	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	Honicí 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	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 záď	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 trojúhelník	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

---

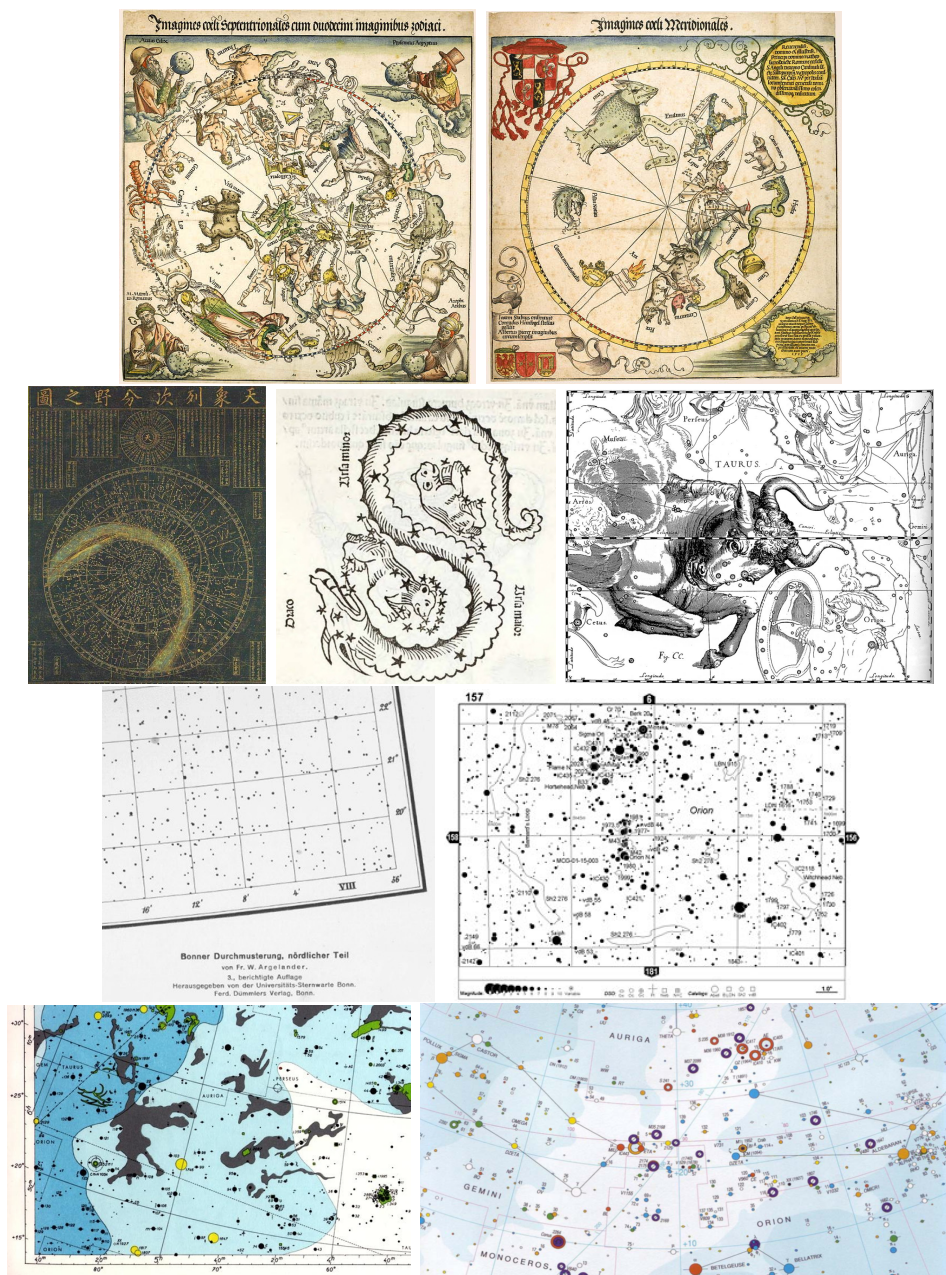
### 5.1.1 Hvězdné mapy a atlasy

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 Senenmuta z období vlády královny Hatšepsut v 15. století př.n.l. Do prvního století před náš letopočet se klade i vznik hvězdného atlasu *Poeticon astronomicon*, jehož autorem by měl být Gaius Julius Hyginus. V daleké Číně vznikl v 7. století n.l. již zmiňovaný Dunghuangský hvězdný atlas (obrázek 5.4 vpravo). 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>2</sup> tabulek v roce 1603 Johann Bayer. Známy 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 katalogizovat všechny pozorovatelné, zaznamenané hvězdy. 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. V této kategorii lze najít i řadu online atlasů jako například <http://sky-map.org/>, <http://www.skymaponline.net/>, <https://www.google.com/sky/>. Většina z nich používá jako základní zdroj dat Guide Star Catalogue (GSC) vytvořený pro podporu Hubbleova 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 s dostupnými daty v nejrůznějších hvězdných katalogích, představuje služba Aladin dostupná na <http://aladin.u-strasbg.fr/>.

<sup>2</sup>Rudolfské tabulky obsahovaly Keplerův katalog hvězd z roku 1627, připravený s využitím některých pozorovacích dat Tycho Braheho. Tabulky nesou jméno císaře Rudolfa II.





Obrázek 5.6: Ukázky hvězdných map a atlasů. Nahoře: Severní a jižní hvězdná obloha Albrechta Dürera z r. 1515 (Ridpath, 1988). Níže zleva: Kamenná korejská mapa Cheonsang Yeolcha Bunyajido z r. 1395, uprostřed ukázka z Poeticon Astronomicum (Hyginus 1. st.př.n.l.) (dvě ukázky převzaty z cz.pinterest.com), Firmamentum Sobiescanum sive Uranometria (Hevelius 1693). Níže vlevo: Bonner Durchmusterung (Argelander 1859-1903), vpravo: Sky Atlas (Tirion, 1981). Dole zleva: Atlas Coeli (Bečvář, 1962) a mapa hvězdné oblohy (Hlad a kol, 1998).

### 5.1.2 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>3</sup>. Johann Bayer si při tvorbě atlasu počátkem 17. století uvědomil potřebu označení dalších hvězd, nejen těch se jmény, a začal hvězdy v daném souhvězdí označovat malými písmeny řecké abecedy<sup>4</sup> spolu s latinským názvem souhvězdí v 2. pádu. Jeho označení se používá dodnes, ale místo názvu souhvězdí se většinou užívá jen třípísmenná zkratka 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 další hvězdy v daném souhvězdí používat latinskou abecedu, nejdříve malá písmena a po nich i ta velká. Toto značení se však už příliš nevyužívá. 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 atd. 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.

Hvězdy se dnes 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 přehledovými projekty jako 2MASS, ASAS, OGLE a dalších. Příklad různých 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 Friedrich Wilhelm August 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

<sup>3</sup>Pěkný přehled o moderním názvosloví hvězd a jeho původu lze najít v Kunitzsch & Smart (1986, 2006).

<sup>4</sup>Jak vidíte, je znalost řecké abecedy pro astronoma nezbytná. Najdete ji v příloze F.

přece musí stačit. Jenže záhy se ukázalo, že je to málo. Pokračovalo se tedy zdvojením písmen, 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. Proměnných hvězd je v některých souhvězdích už dnes známo mnoho tisíc<sup>5</sup>, Argelander tedy velmi silně situaci podcenil.

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

Stručný popis pojmenování 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 různá alternativní jména a označení hvězdy a postará se tak, abyste se v džungli hvězdných názvů neztratili. Názornou ukázkou synonym označení jediné proměnné hvězdy VY Draconis uvádíme na následujících řádcích.

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	

### 5.1.3 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, ve stejné vzdálenosti od Země. Znamená to, že ne všechny pozorované dvojice jsou skutečnými gravitačně vázanými hvězdnými páry. Některé dvojice vznikly prostou projekcí. Složky takové dvojice se nalézají takřka ve stejném směru od nás, ale mohou být 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. Mnoho studií určuje výskyt fyzických dvojhvězd vždy jen v určité skupině hvězd a tak jsou celkové výsledky dost zkreslené. V každém případě představují hvězdné páry významné procento hvězdné populace.

Pokud je možné pozorovat pouhýma očima nebo v dalekohledu obě složky takové fyzické dvojhvězdy, označujeme ji jako **vizuální dvojhvězda**. Příkladem je Mizar

<sup>5</sup>Aktuální katalog proměnných hvězd lze najít na <https://www.aavso.org/vsx/>.

Tabulka 5.2: Vybrané dvojhvězdy pro pozorování.

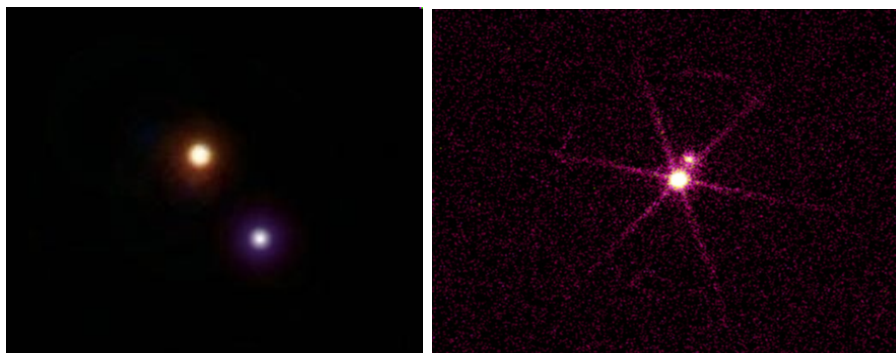
Označení	Jméno	Typ	Barvy	Hv. velikosti[mag]	Úhlová vzdálenost	Rozlišení
ζ UMa + + 80 UMa	Mizar a Alcor	viz	obě bílé	2,4+4,0	11,8'	O
ζ UMa	Mizar	viz	obě bílé	2,4+4,0	14,4''	D
α Cap	Algiedi	opt	obě žluté	4,2+3,6	6,4'	O
ε Lyr	"Double double"	viz	všechny bílé	(4,7+6,2)+ +(5,1+5,5)	(2,6'')-3,5'- -(2,3'')	O
β Cyg	Albireo	opt	oranžová a modrá	3,1+5,1	34,3''	T
α Cen	Toliman	viz	obě bílé	-0,01+1,34	2'' až 22''	D
α CVn	Cor Caroli	viz	obě bílé	2,9+5,6	19,3''	D
θ Ori	Trapez	viz	všechny bílé	5,4+6,8+ +8,0+6,3	19'' až 9''	D
γ And	Alamak	viz	oranžová a modrozelená	2,13+4,84	9,6''	D
γ Ari	Mesarthim	viz	obě bílé	4,58+4,64	7,61''	D
γ Leo	Algieba	viz	oranž. a žlutá	2,28+3,51	4,24''	D
α 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

Poznámky k tabulce: O - rozlišení pouhýma očima, T - rozlišení v triedru, D - dalekohledem.

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 dvojici „posvítili“, nestačili se divit. Postupně vyšlo najevo, že jde o složitý vícehvězdný systém tvořený dokonce šesti hvězdami. Třináct vybraných dvojhvězd a vícenásobných soustav pro pozorování okem a v malém dalekohledu je uvedeno v tabulce 5.2.

### 5.1.4 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 tedy tkví v průchodu světla hvězd zemským ovzduším, přesněji řečeno jde o změny lomu světla procházejícího daným směrem zemskou atmosférou. 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 od řekněme tisícín magnitudy až po 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 čtyři sta tisíc proměnných hvězd



Obrázek 5.7: Ukázky dvojhvězd: vlevo Albireo (snímek Georgey Lilley), vpravo Sirius v rentgenovém oboru (28. 10. 1999 družice Chandra, NASA/SAO/CXC).

a hvězd podezřelých z proměnnosti, které jsou uvedeny v katalogu VSX (Watson et al., 2016). Katalog proměnných hvězd s definitivním označením (viz kapitola 5.1.2) nazvaný *Generální katalog proměnných hvězd* (GCVS) obsahuje k roku 2016 téměř 50 000 proměnných hvězd (Samus et al., 2014).

V takovém množství proměnných hvězd lze najít řadu skupin hvězd se společnými vlastnostmi i charakterem změn jasnosti. Typů proměnných hvězd je 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.

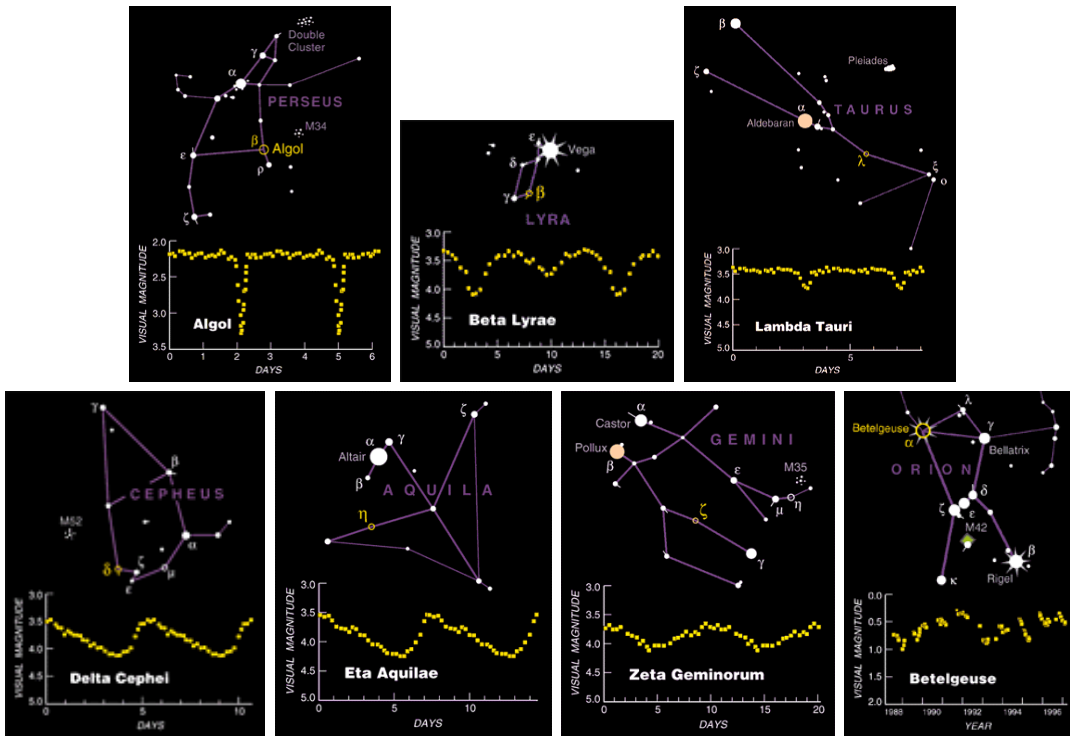
U **geometrických proměnných hvězd** (angl. *extrinsic variable stars*) je pozorovaná změna jasnosti vyvolaná změnou geometrie hvězdy nebo soustavy hvězd. Například jde o rotující proměnné hvězdy, které mají na svém povrchu jednu nebo více skvrn a jak rotují, natáčejí k nám jasnější nebo temnější stranu, 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. Většinou jde o 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 zcela nebo částečně zakrývají. Při zákrytu pak místo plného společného světla obou hvězd pozorujeme jen záření z jedné hvězdy a z nezakryté části druhé hvězdy. V každém případě dojde k poklesu celkové jasnosti. Podobně se projevuje i přechod planety přes disk mateřské hvězdy, jen pozorovaný pokles jasnosti se zpravidla projeví změnou hvězdné velikosti menší než několik setin magnitudy.

Ke geometrickým proměnným objektům můžeme počítat i takové, kde jsou změny jasnosti způsobené (mikro)čočkováním. Při něm se mezi námi a pozorovaným vzdáleným objektem nachází jiný objekt, který svým gravitačním polem zakřivuje paprsky od zdroje podobně jako spojná čočka. Gravitační čočkou mohou být různé objekty od hvězd po galaxie a kvasary. V případě hvězdných čoček mluvíme o mikročočkách.

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 tím 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 zčásti nebo úplně rozmetají do okolního prostoru.

Řadu řekněme dnes již klasických proměnných hvězd můžeme pozorovat na noční obloze i pouhýma očima bez dalekohledu. Jsou to například zákrytové dvojhvězdy  $\beta$  Per (Algol) a  $\beta$  Lyr (Sheliak) nebo pulsující proměnné hvězdy  $\alpha$  Cep (Mira) nebo  $\delta$  Cep. Proměnná je třeba i Polárka, ale u ní nejsou změny jasnosti příliš dobře patrné. Na obrázku 5.8 je uvedeno několik jasných proměnných hvězd s vyznačením jejich polohy v mateřském souhvězdí a také pozorovanou světelnou křivkou.



Obrázek 5.8: Světelné křivky a mapky pro několik nejjasnějších proměnných hvězd na naší obloze. Převzato z <http://www.skyandtelescope.com>.

## 5.2 „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>6</sup> v roce 1654. Obsahoval 40 položek. Minimálně 19 z nich byly reálné a prokazatelně mlhovinné objekty,

<sup>6</sup>Někde též Giovan Battista Odierna.



Obrázek 5.9: Objekty Messierova katalogu. Zdroj: <http://prancer.physics.louisville.edu/>.

kteřé bylo možné si splést s kometami. Hodiernova práce předznamenala Messierův katalog, bohužel 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 (tabulka 5.2). 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 Louis Emil Dreyer<sup>7</sup>. 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 (tiskem až 1910), které obsahovaly 5 386 objektů.

<sup>7</sup>Narodil se v Kodani jako Johan Ludvig Emil Dreyer.

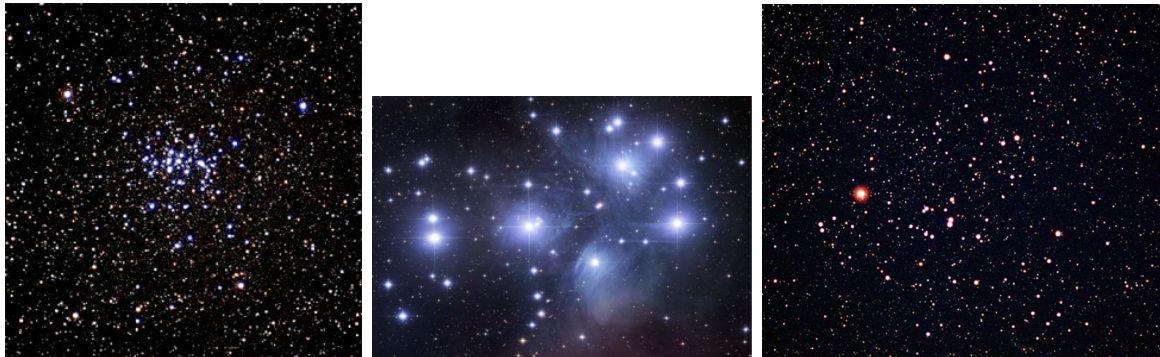
Tabulka 5.3: Zajímavé otevřené hvězdokupy pro pozorování.

Označení	Jméno	Souhvězdí	Celková hvězdná velikost [mag]	Úhlové rozměry	Viditelnost	
M44	Praesepe (Jesličky)	Cnc	3,1	70'	O	
M67		Cnc	6,9	25'	D	
M39		Cyg	4,6	30'	T	
M11		Divoká kachna	Sct	5,8	13'	T,D
M23			Sgr	5,5	30'	T
M25			Sgr	4,6	30'	T
M52			Cas	6,9	15'	D
NGC 457			Cas	6,4	20'	D
NGC 7789			Cas	6,7	25'	D
NGC 869,884		$\chi$ , $h$ ; dvojitá	Per	4,3+4,4	30'+30'	O
M45	Plejády (Kuřátka)		Tau	1,2	120'	O
M35		Hyády	Tau	0,5	330'	O
M36	Gem		5,0	25'	T	
M37	Aur		6,0	10'	D	
M38	Aur		5,6	14'	D	
M41	Aur		6,4	20'	D	
		CMi	4,5	40'	T	

Poznámky k tabulce: Viditelnost O - pouhýma očima, T - v triedru, D - v dalekohledu.

### 5.2.1 Hvězdokupy

Messier při svém pátrání po mlhavých objektech zaznamenával i zvláštní seskupení hvězd. 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, liší se svým vzhledem. Zatímco **kulové hvězdokupy** mají 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 5.10: Otevřené hvězdokupy. Zleva Jesličky (M44), Plejády (M45) a Hyády.



Zřejmě nejstarší vyobrazení otevřené hvězdokupy můžeme najít na známém disku z Nebry (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 zaměřil 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 v naší Galaxii zhruba 2100 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 rádech 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 5.3).



Obrázek 5.11: Nejjasnější kulová hvězdokupa na hvězdné obloze  $\omega$  Centauri (NGC 5139) a detail její centrální oblasti z HST. Převzato z <http://heritage.stsci.edu>.

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 hvězdné obloze. Příkladem je uskupení Collinder 285, které obsahuje hvězdy Velkého vozu a hvězdy od souhvězdí Kefeia až po Jižní trojúhelník.

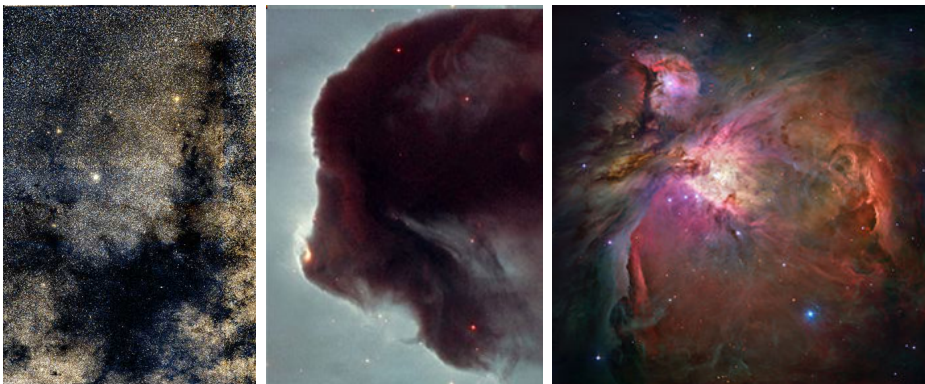
Nejstarší pozorování kulové hvězdokupy je připisováno německému amatérskému astronomovi. Johann Abraham Ihle objevil v roce 1665 ve Střelci objekt M22 (Sharp, 2006). Následovaly další objevy – Edmond Halley objevil v roce 1677  $\omega$  Centauri a roku

Tabulka 5.4: Zajímavé kulové hvězdokupy pro pozorování.

Označení	Souhvězdí	Hv. velikost [mag]	Úhlové rozměry	Viditelnost
M3	CVn	6,2	18'	T,D
M13	Her	5,8	20'	O,T
M22	Sgr	5,1	32'	T
M4	Sco	5,9	26'	D
M15	Peg	6,2	18'	T,D
M2	Aqr	6,3	16'	D
M5	Cnc	6,6	23'	D
$\omega$ Centauri	Cen	3,9	36,3'	O,N

Poznámky k tabulce: Viditelnost: O - pouhýma očima, T - v triedru, D - v dalekohledu, N - z České republiky nepozorovatelná.

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 Messierovi při pozorování kulové hvězdokupy M4. 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. Další lze najít v tabulce 5.4.



Obrázek 5.12: Mlhoviny tvořené mezihvězdným materiálem. Zleva: Temná mlhovina Dýmka v souhvězdí Hadonoše, temná mlhovina Koňská hlava (IC 434) v Orionu a emisní mlhovina M42 v Orionu. V centru mlhoviny M42 můžeme navíc pozorovat hvězdokupu Trapez. Zdroj: <http://www.atlasoftheuniverse.com/>, Hubble Heritage.

### 5.2.2 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. Ukazuje, že jde o rozsáhlé

Tabulka 5.5: Zajímavé mlhoviny na pozorování.

Označení	Jméno	Souhvězdí	Typ	Úhlové rozměry	Hv. velikost [mag]	Viditelnost
M57	Prstencová	Lyr	PN	230'' × 230''	8,8	D
M27	Činka (Dumbell)	Vul	PN	8,0' × 5,6'	7,5	D
M42	Mlhovina v Orionu	Ori	RN,EN	65' × 60'	4,0	O,T
NGC2023	Košská hlava	Ori	DN	8' × 6'		D
M1	Krabí	Tau	SR,EN	420'' × 290''	8,4	D
M76	Malá činka	Per	PN	2,7' × 1,8'	10,1	D
NGC1499	Kalifornia	Per	EN	2,5°	6,0	D
NGC2237–39	Rozeta	Mon	EN	1,3°	9,0	D
NGC3242	Jupiterův duch	Hya	PN	45'' × 36''	7,7	T,D
NGC7023	Kosatec (Iris)	Cep	RN	18'	7,0	T,D
M97	Soví	UMa	PN	3,4' × 3,3'	9,9	D
NGC7000	Severní Amerika	Cyg	EN	120' × 100'	4	T
NGC6960	Řasy	Cyg	EN	3°	5,0	D
NGC7293	Helix	Aqr	PN	20'	7,6	D
NGC3372	eta Car	Car	PN	120'	3,0	O,N
	Uhelný pytel	Cru	DN	7° × 5°		O,N

Poznámky k tabulce: Typ: DN - temná mlhovina, PN - planetární mlhovina, SR - pozůstatek po supernově, RN - reflexní mlhovina, EN - emisní mlhovina. Viditelnost: O - pouhýma očima, T - v triedru, D - v dalekohledu, N - z České republiky nepozorovatelná.

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>8</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.

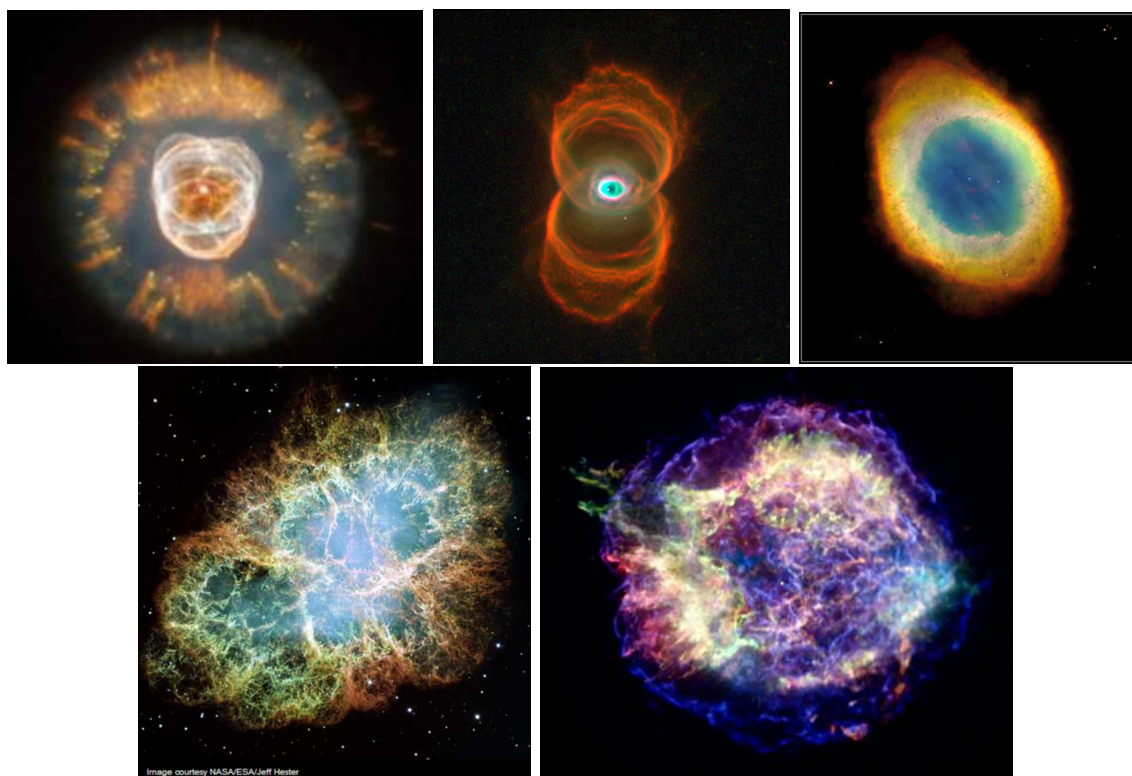
Nejen samotné mlhoviny ale i rozptýlená mezihvězdná látka vydatně pohlcuje procházející světlo, a tak jsou všechny objekty, nacházející se za ní, výrazně utlumeny. Zeslabování světla, neboli v tomto případě **mezihvězdná extinkce** je samozřejmě největší ve směru do centra naší hvězdné soustavy, naší Galaxie. Tam jde ve vizuálním oboru až o 30 magnitud!

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 medvědicí a Lvem, který nebyl spojen s nějakou hvězdou. Abd al-Rahman al-Sufi v 10. století 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 této ml-

<sup>8</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>.

hových pak uskutečnil až roku 1659 Christian Huygens<sup>9</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 (obrázek 5.12 vpravo nahoře) nebo tzv. Uhelný pytel, kterého si pozorovatel snadno povšimne 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 M42 v Orionu (obrázek 5.12 dole).



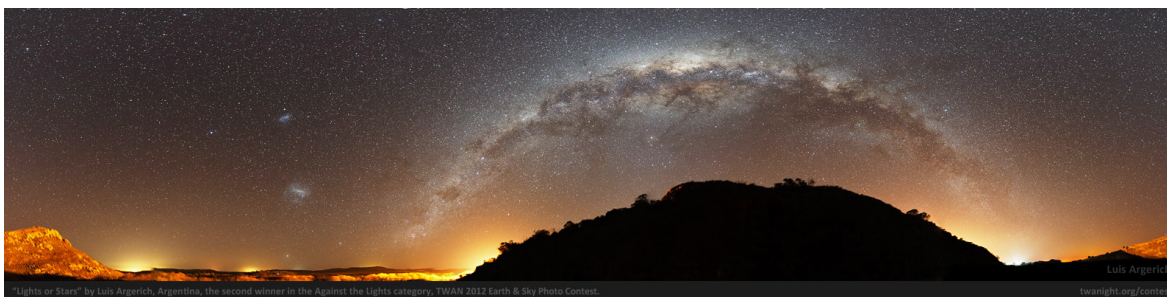
Obrázek 5.13: V horní řadě snímků jsou planetární mlhoviny, zleva Eskymák (NGC 2392), Kočičí oko (NGC 6543) a Prstencová mlhovina (M57) v Lyře a v dolní řadě Krabí mlhovina (M1) v Býku a pozůstatek supernovy v souhvězdí Kasiopeji. Zdroj: Hubble Heritage.

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. Hvězdy mohou v určitých fázích svého vývoje vytvářet mlhoviny a ty se tak nacházejí v jejich bezprostředním okolí nebo na místě, kde byl dříve jejich původce. K takovým mlhovinám patří tzv. **planetární mlhoviny** a pozůstatky po výbuchu supernovy<sup>10</sup>. Kataklyzmickým výbuchem supernovy končí život velmi hmotné hvězdy nebo v něj může vyústit soužití dvou hvězd. Hvězda při něm může být doslova rozervána na

<sup>9</sup>Huygens se také domníval, že právě on objevil mlhovinnou povahu tohoto objektu.

<sup>10</sup>V anglické literatuře se tento typ objektů označuje SNR – supernova remnants.

kusy a postupně se rozplynout do okolí v podobě mlhoviny. To se roku 1054 stalo i supernově, která dala vzniknout dnešní Krabí mlhovině (obrázek 5.13). 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 (obrázek 5.13 vpravo nahoře).



Obrázek 5.14: Okouzlující pás Mléčné dráhy. V levé části snímku Luise Argeriche jsou vidět dva malé mlhavé obláčky – Magellanova mračna. Zdroj: <http://www.luisargerich.com>.

## 5.3 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 (Herkules), který byl ale jen smrtelným polobohem. Aby Zeus zajistil Héraklovi nesmrtelnost přiložil jej tajně k prsu své ženy Héry, aby se napil mléka nesmrtelnosti a stal se 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 170-200 miliard (Gott et al., 2005). 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 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>11</sup>. Prvním, kdo rozlišil Mléčnou

<sup>11</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“.

dráhu na jednotlivé hvězdy a zjistil tak její podstatu, byl Galileo Galilei. V roce 1610 popsal svá zjištění v díle *Hvězdný posel* (*Sidereus Nuncius*).



Obrázek 5.15: Galaxie zleva M31 v Andromedě (autor: Christof Angerer), M51 Vírová v Honicích psech (zdroj: STScI, NASA) a dole Velký Magellanův oblak (autor: Stéphane Guisard).

Vzdálené galaxie se odlišují vzhledem a tvarem. Nejběžnější jsou galaxie, v nichž se hvězdy seskupují do spirál, případně spirál s příčkou (viz obrázek 5.15). Můžeme se ale setkat i s eliptickými nebo zcela nepravidelnými galaxiemi. Konec konců nepravidelné

Tabulka 5.6: Pozorovatelné galaxie.

Označení	Jméno	Souhvězdí	Hvězdná velikost [mag]	Úhlové rozměry	Viditelnost
M104	Sombrero	Vir	9,0	8,7' × 3,5'	D
M81	Bodeho galaxie	UMa	7,9	26,9' × 14,1'	D
M82	Doutník	UMa	8,41	11,2' × 4,3'	D
M51	Vírová	CVn	8,40	10,8' × 6,6'	D
M31	gal. v Andromedě	And	4,36	190' × 63'	O,T
M33	gal. v Trojúhelníku	Tri	5,72	70,8' × 41,7'	T,D
M94		Tri	8,99	11,2' × 9,1'	D
SMC	Malé Magellanovo mračno	Tuc,Hya	2,7	5°20' × 3°5'	O,N
LMC	Velké Magellanovo mračno	Dor,Men	0,9	10.75° × 9.17°	O,N
NGC253	Sochař (Silver Coin)	ScI	8,0	27,5' × 6,8'	D,N

Poznámky k tabulce: Viditelnost: O - pouhýma očima, T - v triedru, D - v dalekohledu, N - z České republiky nepozorovatelná.

jsou i dvě cizí galaxie, které jsou nejjasnější na naší hvězdné obloze, ale bohužel pozorovatelné jen v jižních zeměpisných šířkách – Velké a Malé Magellanovo mračno<sup>12</sup> (obrázek 5.14). 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 medvědici a další.

## 5.4 Atmosférické vlivy na astronomická pozorování

Pozorovatel na zemském povrchu má dosti nesnadnou úlohu. Svá pozorování provádí na dně vzdušného oceánu. Zemská atmosféra nejen určuje co je a co 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 7.4.1.

### 5.4.1 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>13</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 rostoucí délkou dráhy světelného paprsku daného objektu atmosférou, tzv. vzdušnou hmotou. Velikost vzdušné hmoty  $X$  lze obecně aproximovat jednoduchým vztahem

$$X = \sec z = \frac{1}{\cos z}, \quad (5.1)$$

kde  $z$  je zenitová vzdálenost objektu, jinak řečeno doplněk úhlové výšky objektu do  $90^\circ$ . Nejmenší (rovna jedné) je samozřejmě v zenitu. Pozorovanou hvězdnou velikost hvězdy lze opravit o vliv extinkce podle vztahu

$$m_0 = m - kX, \quad (5.2)$$

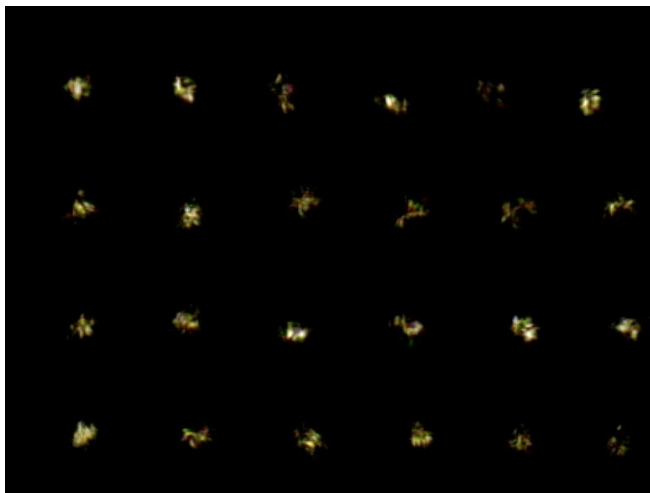
kde  $m_0$  je hvězdná velikost, jakou by měl pozorovaný objekt mimo zemskou atmosféru,  $m$  pozorovaná hvězdná velikost a  $k$  tzv. extinkční koeficient. V praxi bývá tato korekce prováděna pro jednotlivé barvy, v nichž byl objekt pozorován, a vyžaduje použití přesnějších vztahů než 5.1 a 5.2.

K extinkci přispívají i drobné kapičky vodní páry v ovzduší, ale jen v určitých oblastech spektra. 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

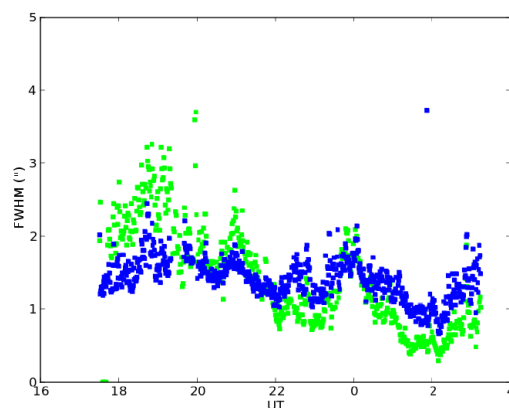
<sup>12</sup>V češtině se používá i označení Malý a Velký Magellanův oblak. V angličtině Small and Large Magellanic Clouds, ve zkratkách SMC a LMC.

<sup>13</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.

přecházet oblohou právě ve směru našeho pozorování a tak ovlivňovat kvalitu našeho pohledu do vesmíru a znehodnocovat případná měření jasnosti.



Obrázek 5.16: 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/>.



Obrázek 5.17: 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. Barevně jsou odlišeny různé metody měření.

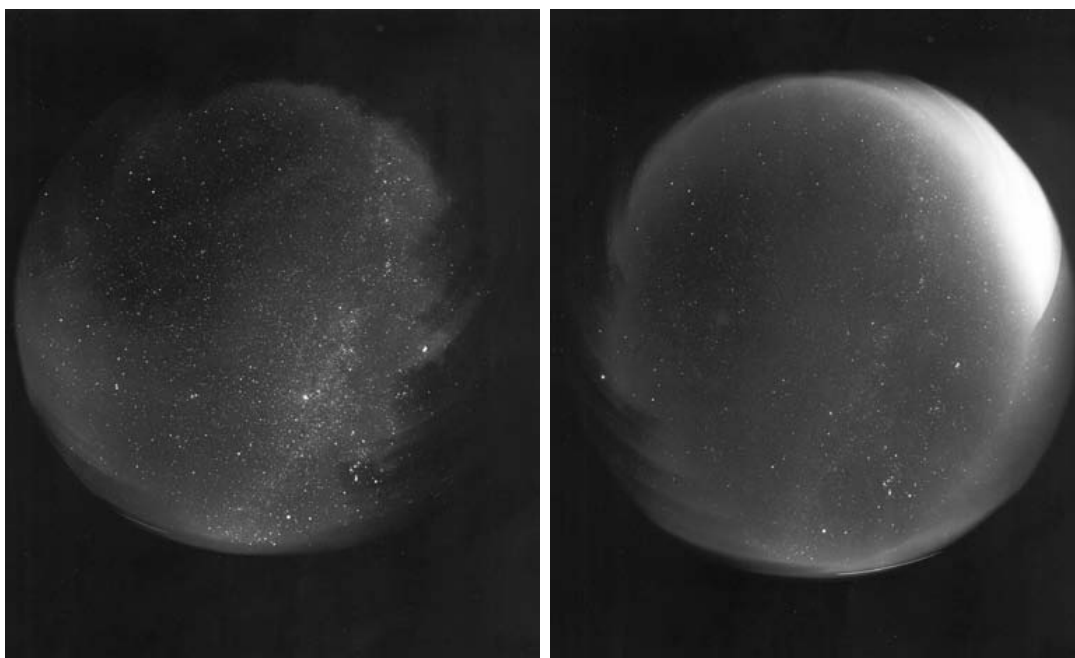
### 5.4.2 Seeing

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 5.16). Místo ideálního, bodového obrazu tak dostaneme obraz rozmazaný do kotoučků. Jejich velikost určuje tzv. **seeing**<sup>14</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 5.17.

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



Obrázek 5.18: Fotografie byly pořízeny tzv. celooblohovou kamerou na Astronomickém ústavu AV ČR v Ondřejově. Vlevo: Snímek z roku 1977 zachycuje výrazně více hvězd na tmavší obloze. Vpravo: Snímek z roku 2004 – po 27 letech je zřetelně vidět světelné znečištění. Oba snímky jsou shodně orientovány. Převzato z letáku České astronomické společnosti „Proč se zabývat světelným znečištěním?“.

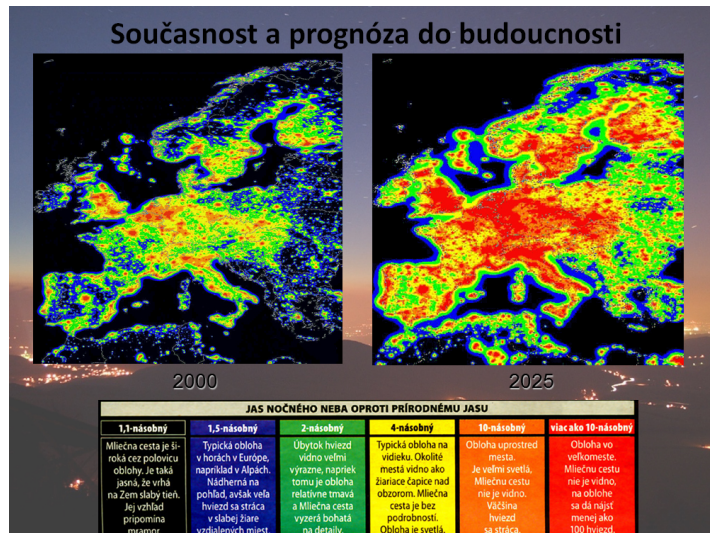
### 5.4.3 Světelné znečištění

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 blíže polárních oblastí 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

<sup>14</sup>Velikost obrazu hvězd na snímcích se vyjadřuje pomocí veličiny FWHM z anglického *full width at half maximum*. Jedná se tedy o úhlový rozměr obrazu hvězdu v poloviční úrovni signálu.

vzdálenost. Pod pojem **světelné znečištění** ale zahrnujeme veškeré světlo přidané do nočního prostředí, které může někoho obtěžovat nebo někomu vadit. K většímu rušivému efektu přispívá i množství prachu v ovzduší, na němž se světlo rozptyluje. Zvýšené koncentrace prachu jsou většinou spojeny s městy, průmyslovou výrobou, tedy tam, kde najdeme i ony rušivé světelné zdroje.<sup>15</sup>

Na první pohled by se mohlo zdát, že světelné znečištění vadí jen hvězdářům, ale tak to rozhodně není. Ono 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 tato nesprávně navržená svítidla svítit více, což znamená více elektrické energie a větší náklady na provoz. Je zřejmé, že pokud v některých oblastech doslova měníme noc v den, narušujeme přirozené biorytmy přírody, zvířat a také nás samotných. Naše vnitřní hodiny jsou silně synchronizovány s přirozeným střídáním dne a noci a důsledky narušení těchto cirkadiálních cyklů mohou být vážné – od nespavosti, neurologických potíží až po vznik rakoviny.



Obrázek 5.19: Světelné znečištění v Evropě. Srovnání stavu v r. 2000 s prognózou pro rok 2025. Převzato z webu ČAS.

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 5.18, kde je zachycena změna situace v okolí naší největší astronomické observatoře v Ondřejově (30 km od Prahy). A neradostné jsou i pohledy z kosmu (obrázek 5.19). Nicméně hnutí za temné noční nebe přece jen sílí a má za sebou i první úspěchy – legislativní změny v zákonech několika zemí, vznik přírodních oblastí tmavé oblohy a další (více na <http://www.astro.cz/znecesteni> nebo <http://www.darksky.org/>). Bohužel, nové „ekonomické“ zdroje světla a jejich dostupnost celou situaci ve světelném znečištění rychlým tempem zhoršují.

<sup>15</sup>Občas se i do České republiky dostane písečný prach ze Sahary. Pokud se nacházíte blíže Sahary i v pustině, můžete sledovat, jak prach v ovzduší výrazně ovlivňuje pozorovací podmínky. Slunce pak třeba neuvídněte zapadat, ale mizet i 20° nad rovinatým obzorem.

## Použitá a 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, 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, Délimination scientifique des constellations (tables et cartes). Cambridge, IAU, at the University press.
- 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/>
- Dreyer, J. L. E. 1888, Memoirs of the Royal Astronomical Society, 49, 1
- Dreyer, J. L. E. 1895, Memoirs of the Royal Astronomical Society, 51, 185
- Dreyer, J. L. E. 1910, Memoirs of the Royal Astronomical Society, 59, 105
- Dušek, J., 2005, Nebeský cestopis, Computer Press, Brno, 164 str.
- Gott, J. R., III, Jurić, M., Schlegel, D., et al. 2005, ApJ, 624, 463
- 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. Praha 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. 2002, Velká encyklopedie vesmíru, Academia Praha, 582 str.

- Kleczek, J. 2007, "Naše souhvězdí", Albatros, Praha, CD-ROM
- Kunitzsch, P., & Smart, T. 1986, Wiesbaden: Harrassowitz, 2. vydání 2006
- Messier, Ch. 1781, *Connoissance des Temps* for 1784, p. 227-267, 227
- 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
- Rappenglück, M. A., 1996, The Pleiades in the "Salle des Taureaux", Grotte de Lascaux (France). Does a Rock Picture in the Cave of Lascaux Show the Open Star Cluster of the Pleiades at the Magdalénien Era, ca. 15.300 B.C.? *Actas del IV Congreso de la SEAC/Proceedings of the IVth SEAC Meeting "Astronomy and Culture"*. C. Jaschek and F. Atrio Barandela (eds.). Salamanca, 1996, pp. 217-225.
- 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. 2014, *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. 2016, *VizieR Online Data Catalog*, 1, 2027

## 6 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 z hlediska astronomických vzdáleností jsou velmi blízko. Řadu těchto objektů je možné spatřit i pouhýmá očima, 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 6.1: Slunce s žirafami. Zdroj: <http://www.obrazyramy.cz>.

### 6.1 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 Slunce centrálním tělesem naší Sluneční soustavy, naší mateřskou hvězdou. Slunce je tedy hvězda<sup>1</sup>, a ne ledajaká hvězda. Rozhodně to není běžná tuctová hvězda, jak se nám občas snaží namluvit některé populární publikace. Zkusme porovnat Slunce se stovkou nejjasnějších hvězd naší oblohy. Jen jediná má

<sup>1</sup>Pozor na jednoduchou ale docela záladnou 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 6.1: Srovnání parametrů Slunce a průměrné hvězdy naší Galaxie.

Parametry	Slunce (nominální hodnoty)	„typické“ hvězdy
poloměr R	$1 \mathcal{R}_{\odot}^N = 6,957 \cdot 10^8 \text{ m}$	$1/5 \mathcal{R}_{\odot}^N$
hmotnost M	$1 M_{\odot} = 1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$	$1/6 M_{\odot}$
zářivý výkon L	$1 \mathcal{L}_{\odot}^N = 3,828 \cdot 10^{26} \text{ W}$	$1/250 \mathcal{L}_{\odot}^N$

Poznámka: Hodnota  $1 M_{\odot}$  vychází z nominální hodnoty  $1 \mathcal{GM}_{\odot}^N = 1,3271244 \cdot 10^{20} \text{ m}^3\text{s}^{-2}$  (viz tabulka 2.2).

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.

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 6.1. Náš předchozí příklad je ale velmi důležitý i z jiného hlediska. V astronomii hrají významnou roli výběrové efekty, které leckdy mohou zcela zastírat pravý stav věcí. Při posuzování nejrůznějších astronomických jevů ve vesmíru je tedy 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 činí přibližně 5 770 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  $3,84 \cdot 10^{26} \text{ J}$ . Jen pro představu, celková energie uvolněná ze Slunce za jednu sekundu je miliónkrát větší než celosvětová produkce energie za celý rok 2014, kdy lidé na Zemi spotřebovali energii řádově  $4 \cdot 10^{20} \text{ J}$  (IEA, 2016)<sup>2</sup>.

Známe-li vzdálenost a velikost našeho Slunce, snadno spočítáme úhlový průměr Slunce. Na obloze můžeme 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 dale-

<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  $10^{15} - 10^{18} \text{ J}$ . Při poslední kataklyzmatické události, dopadu meteoritu na Yucatánský poloostrov, který následně způsobil vymření dinosaurů před 65 miliony lety, se uvolnila energie řádově  $10^{23} \text{ J}$ .

<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, ale mluvíme o tzv. diferenciální rotaci.

kohledu 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 k vážnému poškození zraku! Rozhodně nedejte na radu jisté léčitelky, 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 jedině to, že vám jeden neduh (poškození očí) přibude.

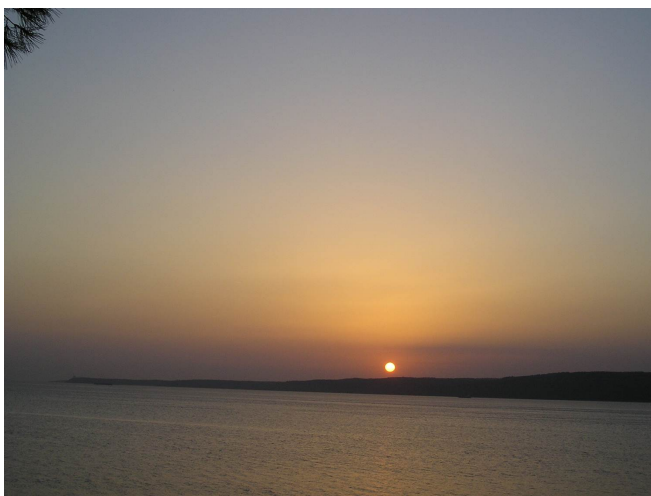
### 6.1.1 Slunce na obloze

Zaměříme se 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 v České republice na 50. stupni severní zeměpisné šířky. Situace by tedy 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 je s poznatky každodenního života. Nemusíme řešit složité úlohy, počítat sluneční hodiny a podobně. Co třeba takový vysloveně letní „problém“. Chci umístit na pláži lehátko do stínu pod slunečnick tak, abych ho nemusel často posouvat. Potřebuji vlastně „jen“ vědět, že na severní polokouli se Slunce posouvá po obloze zleva doprava. Pak mohu odhadnout směr a velikost stínu třeba za hodinu, za dvě.

Po létu a letních prázdninách přichází v září školní rok. Začneme tedy popis pohybů Slunce na obloze 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 o celý den nebo jeho několikahodinový úsek. Takže pokud by ráno Slunce vycházelo v okamžiku podzimní rovnodennosti přesně na východě, večer bude sice zapadat západním směrem, ale ne přesně na západě. Místo západu Slunce se posune o kousíček směrem na jih od západního směru. V poledne nalezneme na naší zeměpisné šířce Slunce jižním směrem na úhlové výšce zhruba  $40^\circ$ . 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?

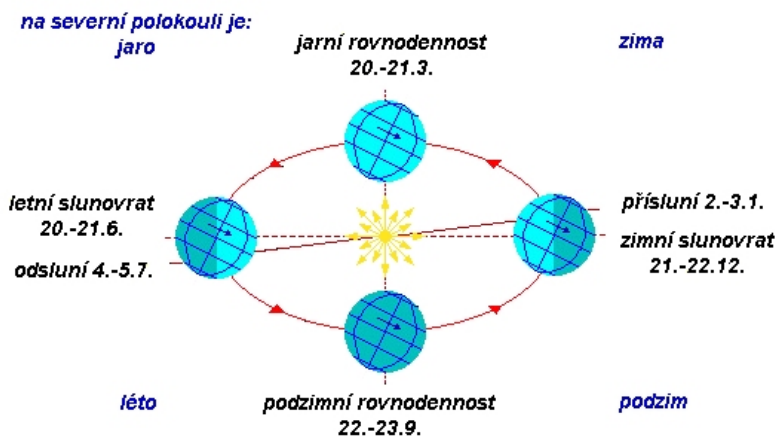
K tomu nás dovede snadná úvaha: Slunce se přece po obloze pohybuje v průběhu roku zhruba stejně rychle. Tento pohyb Slunce po obloze je dán otáčením Země kolem své osy a ta nezávisí na ročním období. V zimě, resp. na astronomickém počátku zimy, je Slunce nad obzorem nebo přesněji nad vodorovnou rovinou 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 půl roku později (21. června) v den letního slunovratu Slunce vystoupá v poledne až do úhlové výšky  $63^\circ$ . Je nad vodorovnou rovinou od rána od 4 hodin 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 6.2: 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 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  $10^\circ$ . Totéž platí i pro oblasti Arktidy za 60. stupněm severní zeměpisné šířky. V těchto oblastech dochází ke splnutí večerního soumraku s ranním svítáním. Nastávají tzv. bílé noci, kterými je proslavený například ruský Petrohrad. Pokud bychom se ještě více přiblížili 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.





Obrázek 6.3: Střídání ročních období. Původní zdroj: <http://www.observatory.cz/>.

### 6.1.2 Slunce na hvězdné obloze

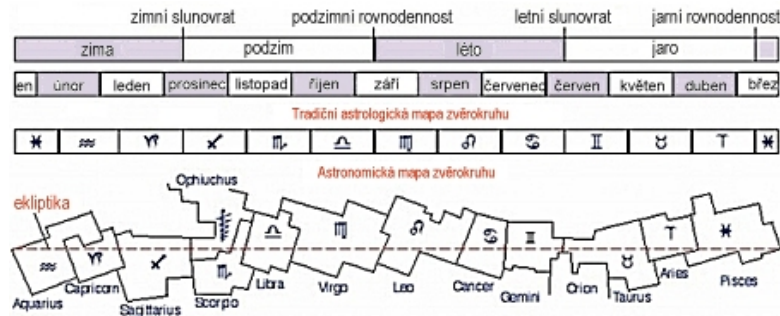
V předchozí části jsme prošli polohy Slunce na obloze během slunovratů a obou rovnodenností. Ale proč vlastně dochází ke střídání ročních období? Velmi častá odpověď, že jde o důsledek oběhu Země kolem Slunce, ale nestačí! I ve Sluneční soustavě nalezneme planety, které obíhají kolem Slunce a přesto na nich žádná roční období nejsou. Tou druhou, nezbytnou podmínkou je totiž sklon zemské osy k rovině oběhu Země kolem Slunce (viz obrázek 6.3).

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 s rotující 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 6.4). Slunce postupně prochází souhvězdími Beran, Býk, Blíženci, Rak, Lev, Panna, Váhy, Štír, Střelec, Kozoroh, Vodnář, Ryby. Tím třináctým souhvězdím je Hadonoš mezi Štírem a Střelcem. Nicméně Hadonoš se dostal do této společnosti až při definici dnešních podob souhvězdí a není proto zařazován mezi dvanáctku vyvolených zvířetníkových souhvězdí, která posloužila také pro vznik dvanácti tzv. znamení zvěrokruhu. Když se pozorně podíváte na obrázek 6.4 povšimnete si, že shodné značky souhvězdí a astrologických znamení jsou posunuty. Chyba to ale není. V kapitole 3.3 jsme stručně popsali precesi zemské osy. V jejím důsledku se posouvá po ekliptice jarní bod, takže se pomalu rozchází astro-

<sup>4</sup>Podrobněji jsme se této problematice věnovali v kapitole 4.3.1.

nomická souhvězdí s astrologickými znameními. O  $30^\circ$ , jednu dvanáctinu kruhu a tedy jedno znamení, se jarní bod posune za zhruba dvě tisíciletí.



Obrázek 6.4: Mapa ekliptikálních souhvězdí ve srovnání s astrologickými znameními. Zdroj: Saint René Descartes University.

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 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.

## 6.2 Měsíc



Obrázek 6.5: Měsíc v úplňku nad obzorem. Zdroj: <http://www.nies.ch>.

Druhým nejjasnějším objektem oblohy po Slunci je náš Měsíc. Není ale vždy jen tím druhým, patří mu nejedno prvenství. Je to k nám nejbližší kosmické těleso. První a zatím jediné kosmické těleso (mimo Zemi samozřejmě), po němž 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 činí asi 3 500 km, což je zhruba čtvrtina průměru Země. Na pozemské obloze 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.

Pro Zemi a život na ní 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, ono střídání podob Měsíce dalo 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 (obrázek 6.6), který žije v korálových útesech teplého pásma Tichého oceánu.<sup>5</sup>



Obrázek 6.6: 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 této a podobných knihách lze mimo jiné najít:

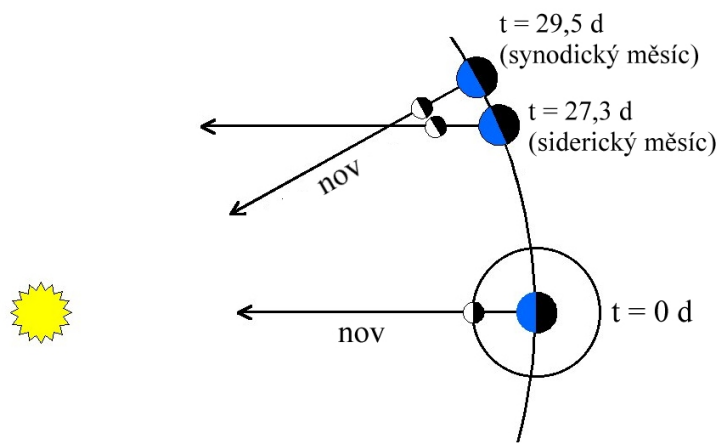
- „Obnažte svá řadra pod noční oblohou při přibývajícím Měsíci – podporuje to jejich růst.“
- „Nehnojte na zahradě při dorůstajícím Měsíci – země v té době špatně přijímá tekutiny.“
- „Posaďte se za úplňku holou zadnicí do čerstvě vyorané brázdy – zbavíte se tak hemeroidů.“

### 6.2.1 Siderický a synodický měsíc

Při stanovení délky jedné otočky Země kolem její osy, délky jednoho dne, je nutné uvést v jaké vztahné soustavě se vlastně pohybujeme, tedy vůči čemu to otáčení měříme. A stejné je to i s oběhem Měsíce kolem Země a jeho rotací. Pokud tento oběh vztáhneme ke hvězdám, hvězdné obloze, mluvíme 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° za den, tedy více než půl stupně za hodinu. Ale 0,5° je úhlový rozměr Měsíce, takže Měsíc se zhruba za

<sup>5</sup>K rozmnožování červa Palolo 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.

hodinu posune o svůj úhlový průměr. Je-li poblíž Měsíce na obloze nějaká jasnější hvězda nebo více hvězd, určitě si jeho pohybu 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 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.



Obrázek 6.7: Synodický a siderický měsíc. Zdroj: <http://www.astronomy.ohio-state.edu/>.

Jenže délka kalendářního měsíce je spíše 30 nebo 31 dní a doba mezi dvěma po sobě následujícími úplňky je 29 a půl dne. Takže siderický měsíc je z tohoto pohledu krátký. Už v úvodu jsme ale upozorňovali na nutnost správné volby vztahné soustavy. Zatímco siderický měsíc je dán oběhem Měsíce vůči hvězdám, střídání fází Měsíce odpovídá tzv. **synodickému měsíci**, kdy pohyb Měsíce vztáhneme ke Slunci. 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. Aby Měsíc zaujal stejnou pozici vůči Zemi a Slunci, musí ještě „korigovat“ tuto změnu polohy Země (viz obrázek 6.7).

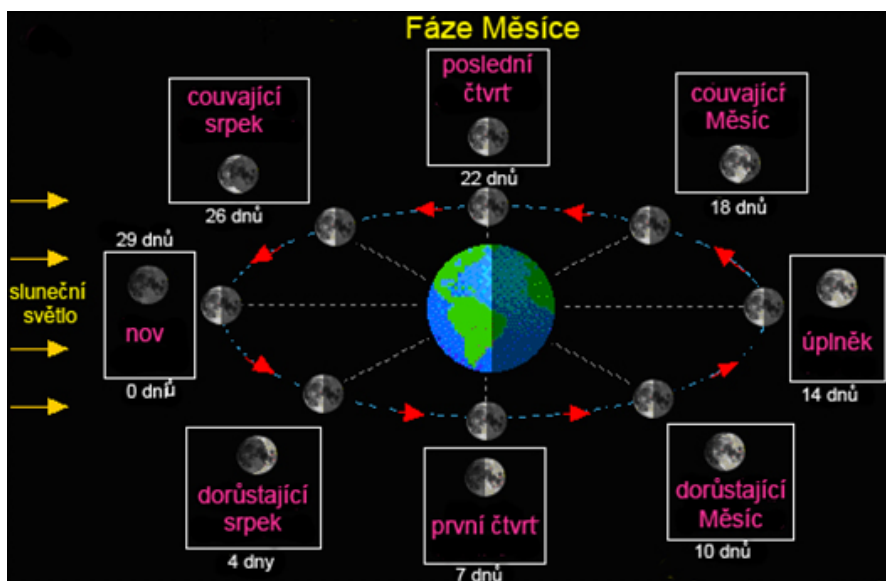
## 6.2.2 Fáze Měsíce

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 a tento sluneční reflektor mění svou polohu vůči Zemi a Měsíci. Můžeme vidět nasvětlenou celou měsíční polokouli přivrácenou k Zemi, měsíční

úplněk. Tehdy Slunce svítí na Měsíc zpoza Země, ale tak, že Země nepřekáží slunečním paprskům a ty pak osvětlují celou polokouli Měsíce přivrácenou v té chvíli k Zemi i Slunci. Pro pozorovatele na Měsíci by to znamenalo, že Země a Slunce budou na měsíční obloze nad sebou.

Pokud naopak Slunce svítí Měsíci „na záda“ při pohledu ze Země, nedopadá na k Zemi přivrácenou stranu Měsíce sluneční světlo. Navíc je Měsíc pro pozorovatele na Zemi na obloze ve dne spolu se Sluncem, je přezářen a proto není Měsíc na obloze pozorovatelný. Nastal měsíční nov. Pro měsíčníka na povrchu Měsíce na straně přivrácené k Zemi by v té chvíli došlo k zemskému úplňku, viděl by celý kotouč Země.

Názorně je situace vidět na obrázku 6.8. Jenže, pokud by Měsíc obíhal kolem Země přesně v rovině ekliptiky, pak by vlastně Měsíc musel při novu 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  $5^\circ$ , 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.



Obrázek 6.8: Vznik fází Měsíce. Zdroj: <http://leccos.com>.

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 tabulce 6.2. Pokud 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.

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

Tabulka 6.2: Měsíční fáze.

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

také, že couvá, má tvar písmene *C*. Slunce je vždy na obloze tím směrem od Měsíce, kde je jeho „zaoblený“ okraj, takže při ubývajícím Měsíci je to od něj směrem 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.

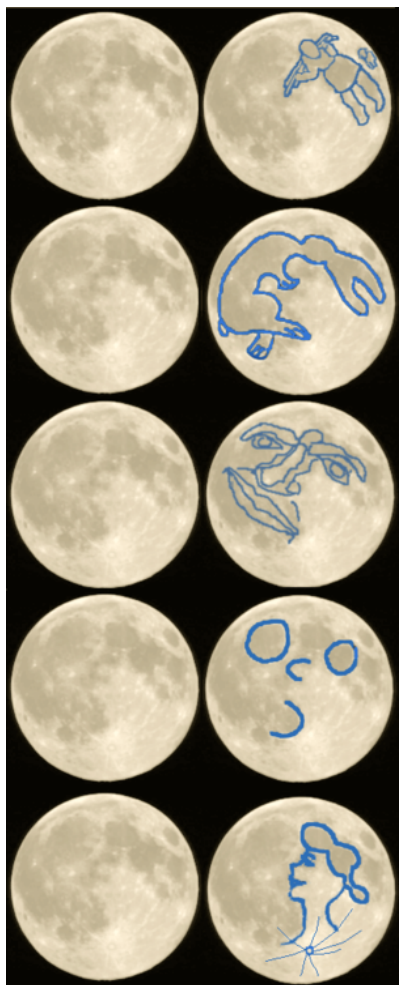


Obrázek 6.9: Fáze Měsíce. Foto: A. Cidado.

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*.<sup>6</sup>

<sup>6</sup>Stáří Měsíce v dané lunaci lze samozřejmě vyjádřit i pomocí prosté fáze v matematickém smyslu slova, tedy podílu času uplynulého od počátku poslední lunace k délce lunace (synodického měsíce). Tato fáze nabývá hodnoty od nuly do jedné.

### 6.2.3 Měsíční tvář



Obrázek 6.10: Tvář Měsíce podle různých představ. Zdroj: <http://www.catherinesvehla.com>.

Člověk sleduje Měsíc od nepaměti. Dalo by se s nadšázkou 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 6.10). Nám však nyní půjde o víc. 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. Na první pohled si všimneme výrazného rozdílu mezi (k Zemi) přivrácenou a odvrácenou stranou Měsíce (obrázek 6.11). Zatímco na přivrácené straně je celá řada tmavých ploch, tzv. **měsíčních moří**, na odvrácené straně prakticky žádná nejsou. Na přivrácené straně 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>7</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 nejrůznějších měsíčních zákoutí 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 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 (viz obrázek 6.12).

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

<sup>7</sup>Stopy vody v pevném skupenství zaznamenaly indická sonda Chandrayaan-1 a americká sonda LCROSS v roce 2009.



Obrázek 6.11: Přivrácená a odvrácená strana Měsíce. Zdroj: <http://cs.wikipedia.org>.

jihozápad až západ od Moře nepokojů leží Moře klidu, na jehož jižním okraji poprvé v 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>8</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 od 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); Rühl (1991); Gabzdyl (1997, 2002, 2006).

<sup>8</sup>Na Měsíci najdete celkem dvacet moří a jeden oceán, takže náš výčet zde není úplný. Ale moře, která jsme neuvedli, jsou méně významná a hůře pozorovatelná.



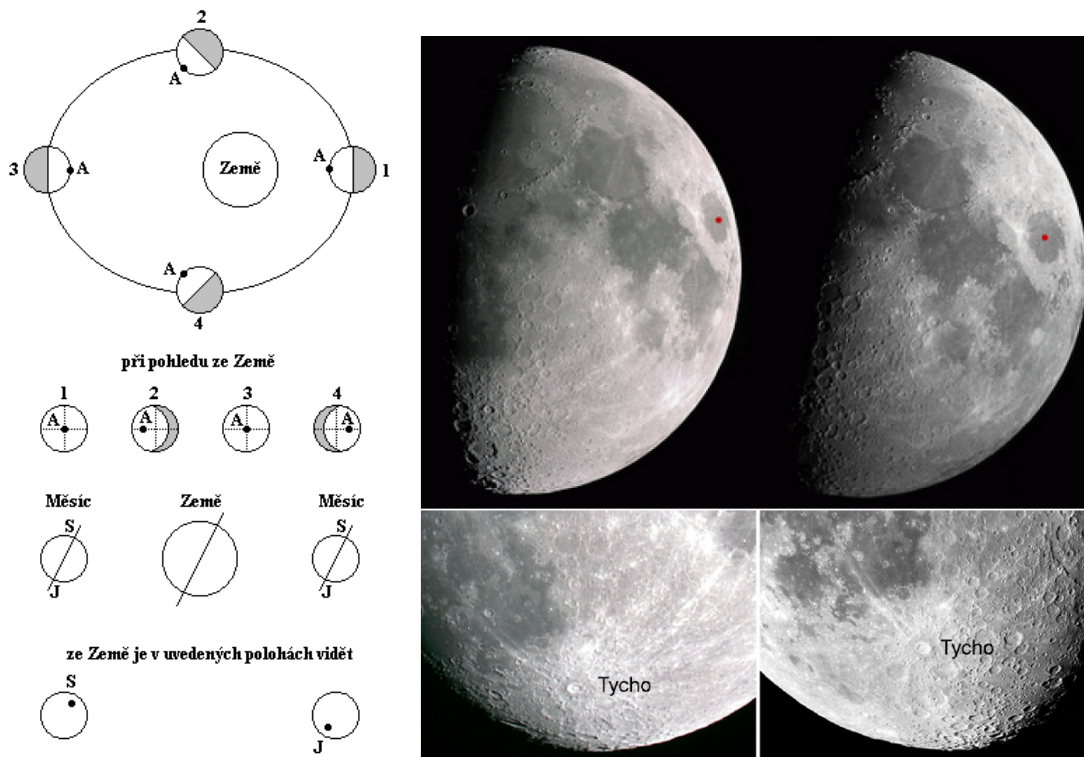


Obrázek 6.12: Mapa přivrácené strany Měsíce. Zdroj: Sky Publishing Corp.

Už jsme několikrát zmínili, že Měsíc k nám přivrací stále stejnou polokouli. 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 nastává nejen u dvojice Země – Měsíc. Stejný efekt najdeme i jinde ve Sluneční soustavě (např. soustava Pluto – Charon) 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 díky tzv. **libracím** můžeme postupně, v průběhu času pozorovat až 59 % měsíčního povrchu (obrázek 6.13). K těmto „výkyvům“ dochází jak v délce, tak i v šířce a jsou docela dobře pozorovatelné. 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  $3,60^\circ$  do  $6,69^\circ$ . 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 pozorovat žádné východy a západy Země. Díky libracím ale je možné zhruba z jedné sedminy 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.



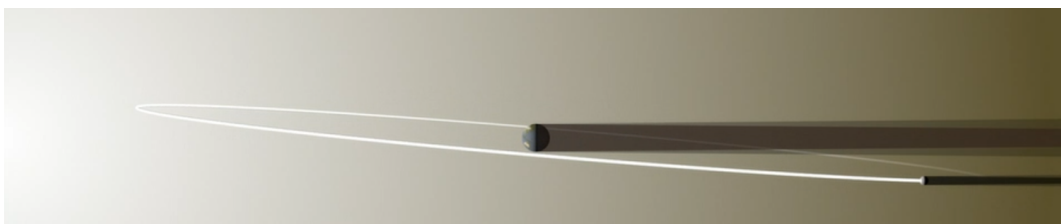
Obrázek 6.13: Vlevo: Schématické znázornění librace Měsíce. Zdroj: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1008-rotace-mesice>. Vpravo nahoře: librace v délce, dobře patrná podle červeného bodu v Moři nepokojů. Zdroj: Steve Schimmrich. Vpravo dole: librace v šířce. Výborným orientačním bodem je kráter Tycho. Zdroj: John Chumack (vlevo), Frank Barrett (vpravo).

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

### 6.3.1 Zatmění Měsíce

Slunce ozařuje Zemi, která vrhá do prostoru kuželovitý stín (obrázek 6.14). Jestliže do tohoto stínu vstoupí Měsíc, jinak řečeno, jestliže se Měsíc dostane na polopřímku Slunce – Země, nastane zatmění Měsíce. Vstoupí-li náš souputník jen do tzv. polostínu (viz obrázek 6.15), nastane jen polostínové zatmění Měsíce. Pokud nevstoupí do plného zemského stínu celý, ale jen do něj „nakoukne“, hovoříme o částečném zatmění Měsíce. Rozdíl mezi úplným a polostínovým zatměním si také můžeme vysvětlit, pokud si představíme, že jsme se vydali na Měsíc a budeme sledovat dění z měsíčního povrchu. Během úplného pozemského zatmění Měsíce, jeho úplné fáze, je celý Měsíc schovaný v plném zemském stínu. Z povrchu Měsíce nemůžeme Slunce pozorovat, je zakryto Zemí, uvidíme tedy úplné zatmění Slunce. Na měsíční obloze bude temný kotouč Země se zářivým prstencem atmosféry, v níž se lámou a rozptylují sluneční paprsky. To samozřejmě platí i v době částečného zatmění Měsíce, pokud budeme stát na místě, které už vstoupilo do plného zemského stínu. Když bude Měsíc nebo alespoň to naše pozorovací stanoviště na povrchu Měsíce v polostínu Země, uvidíme z Měsíce částečné zatmění Slunce.



Obrázek 6.14: Země a Měsíc nasvětlené Sluncem (za levým okrajem obrázku) vrhají do prostoru stíny. Zdroj: NASA.



Obrázek 6.15: Vznik tří podob zatmění Měsíce. Zdroj: ČAS.

Je zřejmé, že to, jakou částí zemského stínu Měsíc prochází, určuje i délku zatmění. Zemský stín má délku zhruba 1,4 milionu kilometrů a v dráze Měsíce je široký přibližně 9 000 km. Nejdelší zatmění může trvat až 6 hodin, při tom úplná fáze až téměř dvě hodiny<sup>9</sup>. 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 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 (například za velké oblačnosti, při zaprášení po 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.



Obrázek 6.16: Tři snímky z konce fáze úplného zatmění Měsíce 24. 10. 2004 (začíná fáze částečného zatmění). Autor S.P. Merrill. Zdroj: <http://www.pbbase.com/>.

je Měsíc v úplňku, a navíc se nachází poblíž tzv. uzlu své dráhy, což je průsečík jeho oběžné dráhy s rovinou ekliptiky. Spojnice dvou uzlů se nazývá uzlová přímka. Oběžná dráha Měsíce se pomalu stáčí, takže se stáčí i uzlová přímka, což způsobuje, že do roka 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 6.3.

Pokud by Měsíc obíhal naši Zemi v rovině ekliptiky, pak by při každém úplňku došlo také k zatmění Měsíce. Zatmění Měsíce by se tedy opakovala s periodou jednoho synodického měsíce. Rovina oběžné trajektorie Měsíce je ale skloněna vůči rovině oběžné dráhy Země kolem Slunce o přibližně  $5^\circ$ . To znamená, že v době většiny úplňků je Měsíc dost daleko pod nebo nad rovinou ekliptiky, aby se vyhnul zemskému stínu. K zatmění Měsíce může dojít jen tehdy, když

<sup>9</sup>Nejdelší zatmění nastalo roku 318 n.l. Celé včetně polostínové fáze trvalo 374,1 minut, z toho částečné zatmění 236,0 minut a úplná fáze 106,6 min (<http://eclipse.gsfc.nasa.gov/lunar.html>).

Tabulka 6.3: Zatmění Měsíce v letech 2018-2030.

Datum	Typ	Délka [h:mm]	Viditelnost	Max. ČR
27. července 2018	úplné	Č 3:55; Ú 1:43	téměř celý průběh, večer	0,89
21. ledna 2019	úplné	Č 3:17; Ú 1:02	téměř celý průběh, ráno	0,258
16. července 2019	částečné	Č 2:58	celý průběh, večer	–
10. ledna 2020	polostínové *	–	celý průběh, večer	–
5. června 2020	polostínové *	–	při východu Měsíce	–
16. května 2022	úplné **	Č 3:27; Ú 1:25	po západu Měsíce	–
28. října 2023	částečné	Č 1:17	celý průběh, večer	–
18. září 2024	částečné	Č 1:03	celý průběh, ráno	–
14. března 2025	úplné **	Č 3:38; Ú 1:05	po západu Měsíce	–
7. září 2025	úplné	Č 3:29; Ú <b>1:22</b>	při východu Měsíce	0,8
28. srpna 2026	částečné	Č 3:18	při západu Měsíce	–
21. února 2027	polostínové *	–	celý průběh, po půlnoci	–
12. ledna 2028	částečné	Č 0:56	celý průběh, ráno	–
6. července 2028	částečné	Č 2:21	při východu Měsíce	–
31. prosince 2028	úplné	Č 3:29; Ú <b>1:11</b>	téměř celý průběh, večer	0,744
26. června 2029	úplné	Č 3:40; Ú <b>1:42</b>	při (a po) západu Měsíce	0,182
20. prosince 2029	úplné	Č 3:33; Ú <b>0:54</b>	celý průběh, před půlnocí	0,988
15. června 2030	částečné	Č 2:24	při východu Měsíce	–
9. prosince 2030	polostínové *	–	celý průběh, před půlnocí	–

Poznámky k tabulce: \* – polostínové zatmění není většinou pouhým okem pozorovatelné; \*\* – z našeho území spatříme jen částečnou fázi, úplná nastane pod obzorem. Délka zatmění udává dobu (v hodinách a minutách), po kterou je Měsíc ponořen v plném zemském stínu celý nebo alespoň zčásti (Č). Pokud v průběhu úkazu nastává i úplné (Ú) zatmění, je uvedena i jeho délka. Nastává-li úplné zatmění v České republice nad obzorem, je tento údaj uveden tučně, a sloupec Max. ČR udává čas maximální fáze úplného zatmění v České republice (údaj je uveden ve středoevropském čase). Převzato z [www.astro.cz](http://www.astro.cz).

### 6.3.2 Zatmění Slunce

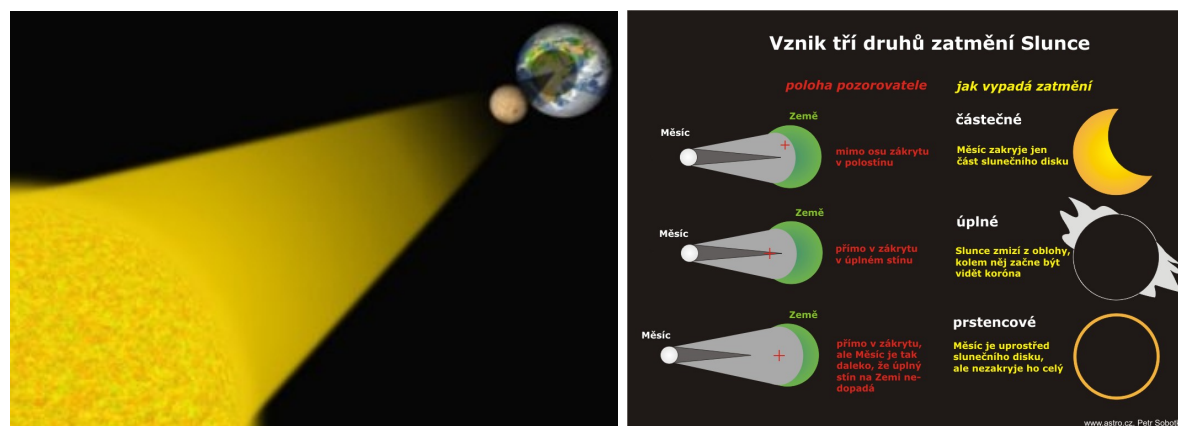
Zatímco zatmění Měsíce by se dalo přirovnat k úspěšnému poměrně často opakovanému představení, zatmění Slunce je vždy hitem sezóny. Můžete si přečíst úžasná líčení zatmění Slunce, jako například to od rakouského spisovatele Adalberta Stiftera<sup>10</sup> (1842), můžete vidět spoustu fotografií, filmů 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.

Zprávy o pozorovaných zatměních Slunce patří mezi nejstarší astronomické záznamy vůbec.<sup>11</sup> S jedním historickým zatměním se pojí i známá legenda. Podle ní měli být v roce 2136 př.n.l.<sup>12</sup> dva astronomové kvůli zatmění Slunce popraveni. Tehdy se věřilo, že zatmění způsobuje zlý drak, který žere Slunce. Astronomové měli na zatmění upozorňovat předem, aby bylo možné zlého draka dostatečným hlukem a šípy zahnat. Jenže

<sup>10</sup>Rodný dům Adalberta Stiftera najdete v Horní Plané na Šumavě.

<sup>11</sup>Poměrně nedávno bylo ověřeno, že nejstarší dosud známý záznam o zatmění Slunce se nachází v Irsku v lokalitě Loughcrew Cairns a mělo by ukazovat zatmění z roku 3340 př.n.l. Podrobnosti na <http://www.astronomy.ca/3340eclipse/>.

<sup>12</sup>O přesném datování tohoto zatmění se vedou spory. Některé zdroje uvádějí 2134 př.n.l., některé dokonce 2159 př.n.l.



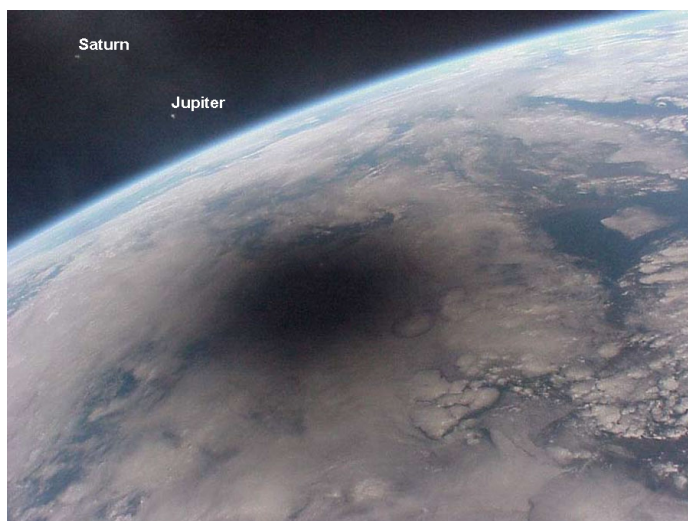
Obrázek 6.17: Schéma vzniku a možné podoby zatmění Slunce. Zdroj: ČAS.

nešťastní astronomové Ho a Hsi příliš holdovali alkoholu a tak varování před zatměním nevydali.<sup>13</sup> Dnes už víme, že tím pomyslným žroutem 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 6.17). 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 (obrázek 6.18), ale Země není nehybná, rotuje a tak stín putuje po zemském povrchu a vytváří tzv. **pás totality**. Pás je široký až zhruba 250 kilometrů a dlouhý i několik tisíc kilometrů. Právě a jen z tohoto pásu je možné zatmění Slunce pozorovat jako úplné. Do oblasti kolem pásu totality dopadá měsíční polostín (viz obrázek 6.17). Odtud je možné pozorovat zatmění Slunce jako částečné. 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 plný měsíční stín příliš krátký a nedosáhne až na Zemi. V takové situaci můžeme pozorovat prstencové zatmění Slunce (viz obrázek 6.19). Velmi vzácně nastává zatmění hybridní, kdy z některých míst na Zemi je vidět zatmění úplné a z některých jen jako prstencové.

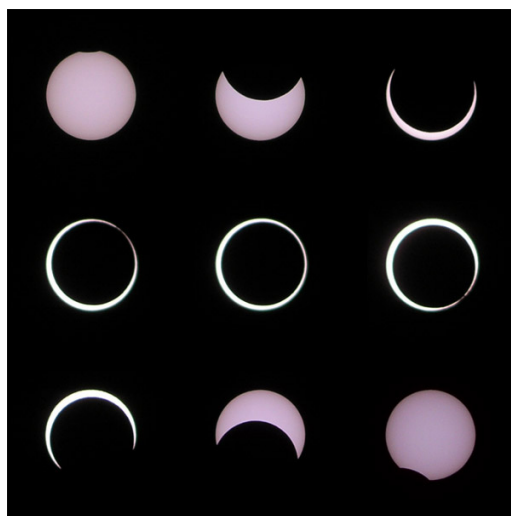
Z výše uvedeného je zřejmé, že šance, že například Brno bude v pásu totality pro nějaké sluneční zatmění, je poměrně malá. Pokud tedy chceme úplné zatmění vidět živě, musíme se vydat na dalekou cestu anebo si počkat na rok 2135, kdy bude úplné zatmění Slunce pozorovatelné z území České republiky. Z Brna 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 době úplné fáze úplného zatmění Slunce, trvající až 7 a půl minuty, je sluneční 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, matematik a astronom Miloslav Druckmüller (2016), viz například obrázek 6.20.

<sup>13</sup>Ve staré čínské literatuře se uvádí Hsi-Ho jako jediná mytologická postava, která je někdy matkou, jindy jako vozka slunečního vozu (Littmann, Espenak & Willcox, 2009).



Obrázek 6.18: 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 6.19: Průběh prstencového zatmění Slunce v roce 2005 v Tunisku. Zdroj: J. Polák.

### 6.3.3 Četnost a pozorovatelnost zatmění

Zatímco první zmínky o pozorování zatmění Slunce a Měsíce jsou stará několik tisíc let, skutečných předpovědí jsme se dočkali až mnohem později. Už jsme zmiňovali legendu o nešťastných čínských císařských astronomech z 22. století před naším letopočtem, kteří povinnost zvěstovat zatmění Slunce zanedbali. V 7. století př.n.l. objevili Chaldejci v Babylonii, že sled slunečních a měsíčních zatmění se opakuje s periodou, kterou nazvali **saros**. Trvá 6585 dní, přesněji 18 let 11 dnů 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. Zatmění Slunce jsou tedy častější a tak by se mohlo zdát, že máte větší šanci pozorovat právě zatmění Slunce, ale není to tak. Z jednoho místa na Zemi

Tabulka 6.4: Sluneční zatmění v letech 2018-2030.

Datum	Svět			Česká republika		
	Max. Délka	Typ	Viditelnost	Velikost	Max.	Výška
2.7.2019	19:24:07	4:33	Ú Tichý oceán, Chile, Argentina	–	–	–
26.12.2019	5:18:53	3:39	P Saúdská Arábie, Indie, Sumatra, Borneo	–	–	–
21.6.2020	6:41:15	0:38	P centrální Afrika, jižní Asie, Čína, západní Pacifik	–	–	–
14.12.2020	16:14:39	2:10	Ú Tichý oceán, Chile, Argentina, Atlantický oceán	–	–	–
10.6.2021	10:43:06	3:51	P severní Kanada, Grónsko, severovýchodní Rusko	16,90%	12:38	62,7°
4.12.2021	7:34:38	1:54	Ú Antarktida	–	–	–
25.10.2022	11:01:19	–	Č Evropa, SV Afrika, Střední Východ, Z Asie	42,10%	12:17	27,6°
20.4.2023	4:17:55	1:16	H Indický oceán, Indonésie, Austrálie, Papua Nová Guinea, západní Pacifik	–	–	–
14.10.2023	18:00:40	5:17	P západ USA, centrální Amerika, Kolumbie, Brazílie	–	–	–
8.4.2024	18:18:29	4:28	Ú střední Pacifik, Mexiko, USA, Kanada, Severní ledový oceán	–	–	–
2.10.2024	18:46:13	7:25	P centrální a jihovýchodní Pacifik, Chile, Argentina	–	–	–
29.3.2025	10:48:36	–	Č SZ Afrika, Evropa, S Rusko	19,10%	12:18	43,5°
17.2.2026	12:13:05	2:20	P Antarktida	–	–	–
12.8.2026	17:47:05	2:18	Ú Arktida, Grónsko, Island, Španělsko	88,50%	20:11	1,0°
6.2.2027	16:00:47	7:51	P jižní Pacifik, Chile, Argentina, Uruguay, Atlantský oceán, Pobřeží slonoviny, Ghana, Togo, Benin	–	–	–
2.8.2027	10:07:49	6:23	Ú Maroko, Španělsko, Alžírsko, Libye, Egypt, Saúdská Arábie, Jemen, Somálsko	51,60%	11:15	50,8°
26.1.2028	15:08:58	10:27	P Ekvádor, Peru, Brazílie, Surinam, Atlantský oceán, Španělsko, Portugalsko	–	–	–
22.7.2028	2:56:39	5:10	Ú Indický oceán, Austrálie, Nový Zéland	–	–	–
12.6.2029	4:06:13	–	Č Arktida, Skandinávie, Aljaška, S Asie, S Kanada	13,30%	4:53	–00,5°
1.6.2030	6:29:13	5:21	P Alžírsko, Tunisko, Řecko, Turecko, Rusko, S Čína, Japonsko	71,00%	7:17	19,7°
25.11.2030	6:51:37	3:44	Ú Jižní Afrika (Botswana), Indický oceán, Austrálie	–	–	–

Poznámky k tabulce: V prvním sloupci je uveden čas okamžiku maxima zatmění v UT. Typ zatmění: Ú - úplné, P - prstencové, H - hybridní, Č - částečné. Velikost udává velikost maximální fáze zatmění v procentech slunečního průměru. Max. pro Českou republiku značí čas okamžiku maxima zatmění v SEČ/SELČ dle aktuálně platného času. Výška udává úhlovou výšku Slunce v době maximální fáze zatmění. Převzato z [www.astro.cz](http://www.astro.cz).

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 a určil, kdy k zatmění dojde, nicméně skutečnost, že jej také v místě svého pobytu pozoroval byla, 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 3 159 je úplných, 3 810 částečných a 3 967 polostínových.





Obrázek 6.20: 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 a Vojtech Rušin.

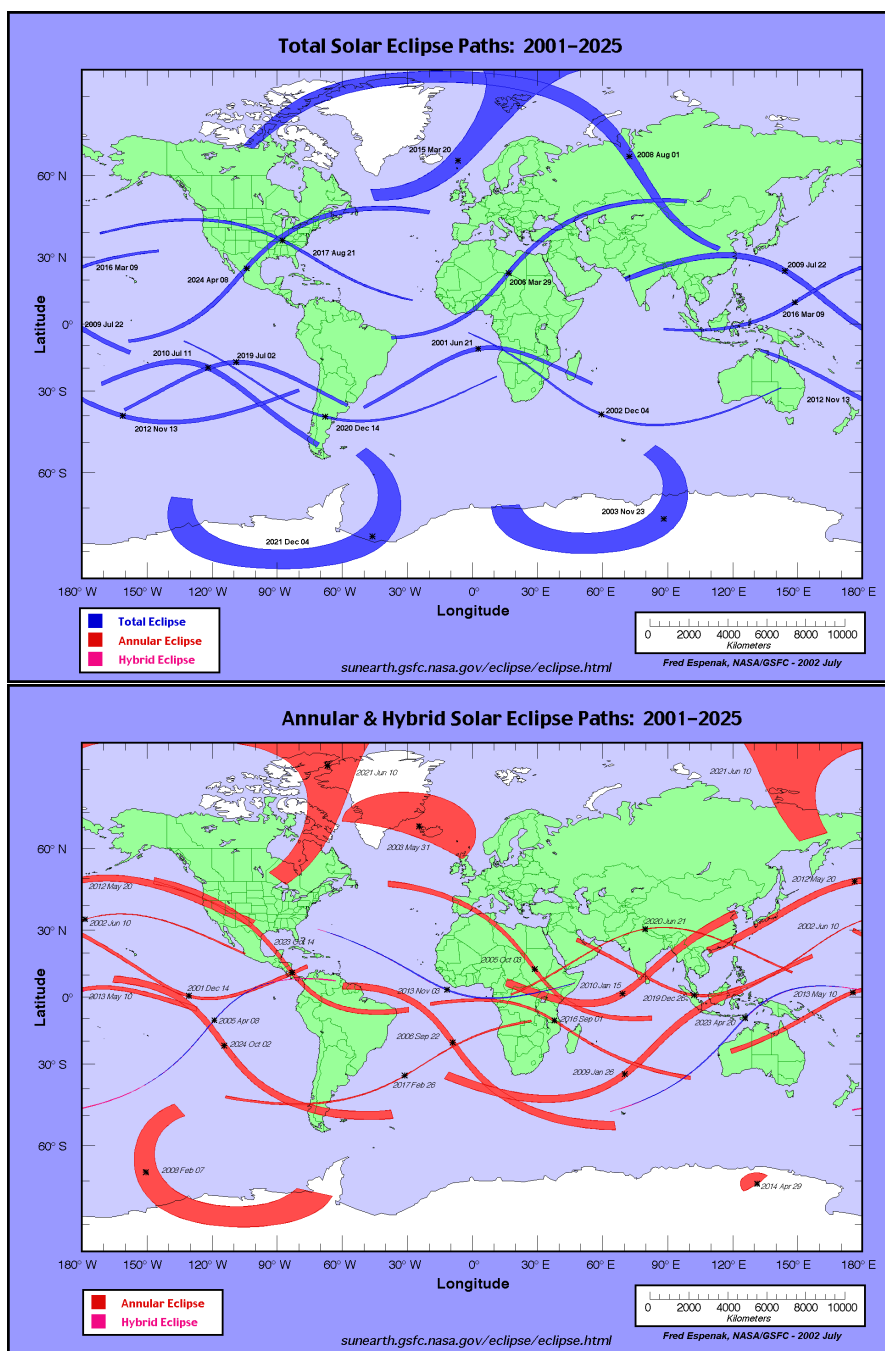
## 6.4 Planety, trpasličí planety

Po Slunci a Měsíci jsou dalšími pravidelně pozorovanými nejjasnějšími objekty na obloze planety. Slovo *planeta* pochází z řeckého „planétés“, což znamená tulák nebo kolem bloudící. Docela pěkně to vystihuje podstatu pohybu planet na hvězdné obloze, kde jakoby bloudí mezi hvězdami v okolí ekliptiky. Přestože už dlouho bylo astronomům jasné, že ve vesmíru kolem jiných hvězd než Slunce také obíhají tělesa jako naše planety ve Sluneční soustavě<sup>14</sup>, 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: Merkur, Venuše, Země, Mars, Jupiter, Saturn, Uran, Neptun, Pluto. S objevy planet mimo Sluneční soustavu, tzv. **extrasolárních planet**, **exoplanet** a zejména s objevy **transneptunických těles** vně trajektorie Neptuna se situace změnila. Některá z těchto nově objevených těles dokonce soupeřila s Plutem svými rozměry. Znamenalo by to, že seznam známých planet by se musel s každým novým objevem podobných těles stále rozrůstat. Jenže se ukázalo, že definovat planetu 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.

<sup>14</sup>Vzhledem k tomu, že planety obíhají i kolem jiných hvězd, jiných sluncí, budeme pro označení naší planetární soustavy používat označení Sluneční soustava s velkým počátečním S. Je to stejná situace jako při pojmenování našeho Měsíce nebo naší Galaxie.



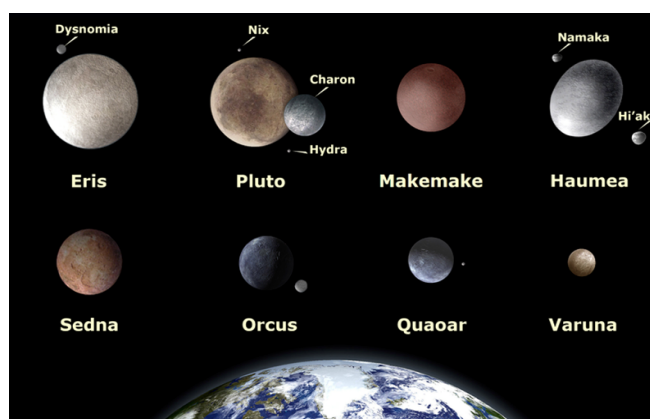
Obrázek 6.21: Pásky, odkud jsou pozorovatelná úplná, prstencová a hybridní zatmění Slunce. Zdroj: F. Espenak, NASA.

Jaký je ale zásadní nedostatek? Definice se týká jen naší Sluneční soustavy! Otázku exoplanet vůbec neřeší.<sup>15</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 dle (IAU, 2006) definovány takto: Trpasličí planeta je objekt Sluneční soustavy podobný planetě, který:

<sup>15</sup>Používanou, běžně akceptovanou, ale nepřliš přesnou definici exoplanety uvedeme v kapitole 13.

- 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.

Oficiálně je mezi trpasličí planety zařazeno (k říjnu 2016) pět objektů: Ceres, Pluto, Makemake, Eris, Haumea. Horkými kandidáty jsou Orcus, Quaoar, Sedna, Salacia, (225088)2007 OR<sub>10</sub> a (307261)2002 MS<sub>4</sub> a v budoucnu nepochybně přibudou další, zejména velká transneptunická tělesa.<sup>16</sup>



Obrázek 6.22: Trpasličí planety a kandidáti.

### 6.4.1 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>17</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.

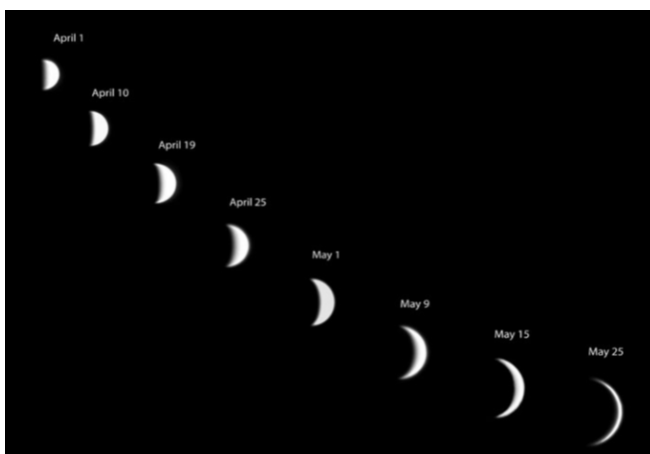
Planety se ale od jasných hvězd odlišují také tím, že svítí klidnějším, stálým světlem, zatímco obrazy hvězd se mihotají, podléhají scintilaci. Důvod je zřejmý. Planety vidíme

<sup>16</sup>Mike Brown na svém webu (Brown, 2016) uváděl v říjnu 2016, že dalších 5 objektů jsou téměř jistě trpasličí planety, dalších 20 objektů jsou trpasličí planety velmi pravděpodobně a následujících 45 objektů pravděpodobně. Na seznamů kandidátů bylo ještě 620 dalších objektů, které by mohly být v budoucnu označeny za trpasličí planety.

<sup>17</sup>Traduje se, že Johannes Kepler planetu Merkur nikdy v životě neviděl.

prostýma očima jako světelné body podobně jako hvězdy. Jenže hvězdy jsou skutečně 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 monitorovat 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 v dalekohledech pozorovat. U Venuše si povšimněte jejích fází (viz obrázek 6.23). Jejich pozorování v minulosti přispělo k odmítnutí geocentrického modelu uspořádání naší Sluneční soustavy (viz kapitola 12.5). 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, osvítí předměty natolik, že vrhají stín.



Obrázek 6.23: Fáze Venuše v dubnu a květnu 2004. Foto: John Rummel.

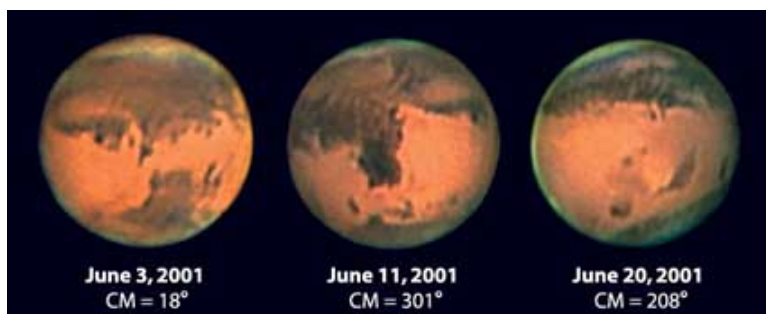
Vnější planety, tedy vzdálenější od Slunce než Země, mohou být pozorovatelné i celou noc. Na Marsu jsou pozorovatelné světlé a tmavé skvrny (obrázek 6.24). Pozorovatelé s připojením na internet mohou využít applet Mars Profiler<sup>18</sup> na stránkách časopisu Sky&Telescope, který ukazuje jakou část povrchu Marsu můžete právě vidět ve vašem dalekohledu.

Jupiter zaujme především pásovou strukturou pozorovaných vnějších vrstev (obrázek 6.25) a pak soustavou měsíců, z nichž čtyři největší, tzv. Galileovské družice Io, Europa, Ganymed a Callisto, jsou dobře pozorovatelné i menšími přístroji.

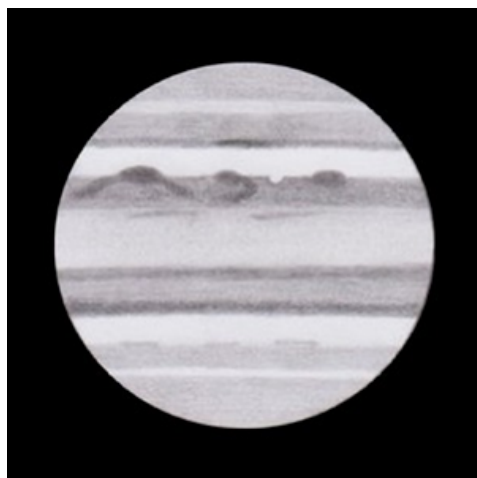
Poslední z prostým okem viditelných planet, Saturn, je krasavec. Jeho prstence jsou v dalekohledu opravdu nádherné. Vidět je i největší Saturnův měsíc Titan.

Uran a Neptun jsou sice planety větší než naše Země, ale jsou od nás velmi daleko, takže při pozorování běžnými dalekohledy o průměru kolem 20 cm je uvidíme jen jako

<sup>18</sup><http://www.skyandtelescope.com/observing/objects/javascript/mars>.



Obrázek 6.24: 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 filtr. CM označuje délku centrálního meridiánu Marsu. Jih je nahoře. Nápadná tmavá skvrna poblíže středu na snímku z 11. června je Syrtis Major.



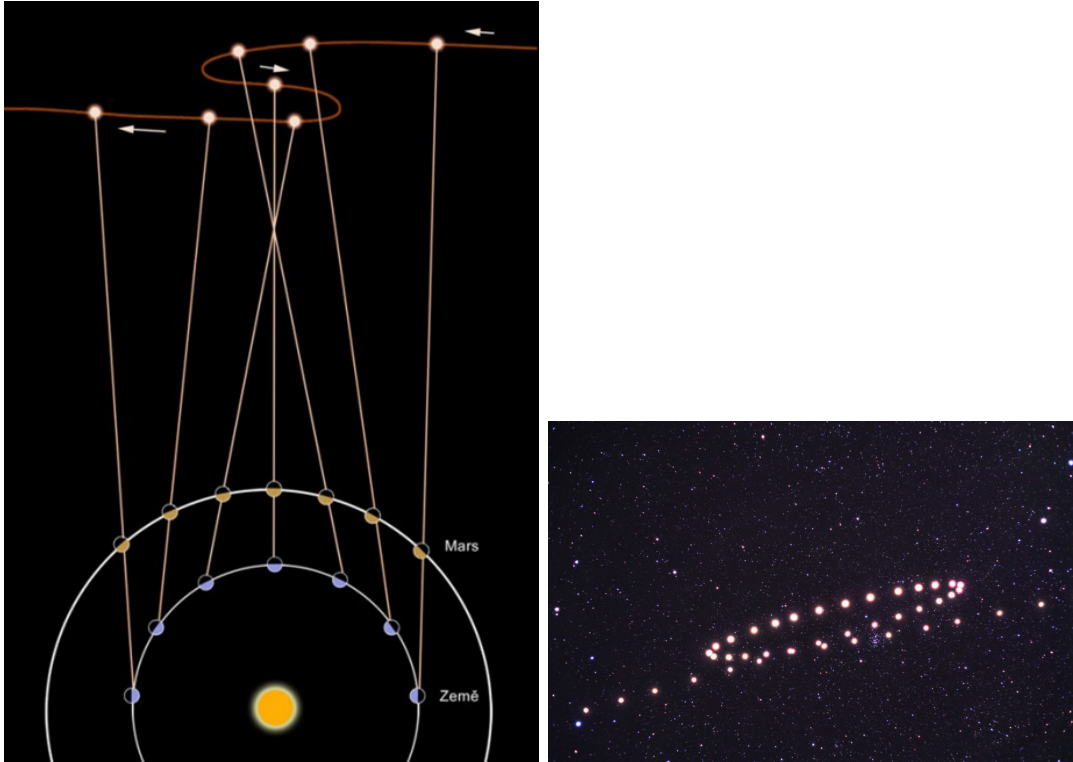
Obrázek 6.25: Kresba Jupitera Petra Skláře. 15. 8. 2009, refraktor 102/1000, zv. 166x, 250x, seeing 8-9/10, čas 22:50 - 23:05 UT (jih dole, západ vlevo). Převzato z <http://www.astro.cz>.

nazelenalý, resp. namodralý malý kotouček. Chceme-li vidět detaily, musíme použít větší dalekohled nebo se přesunout od dalekohledu k počítači a k archivu snímků kosmických sond.

### 6.4.2 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 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 6.26.



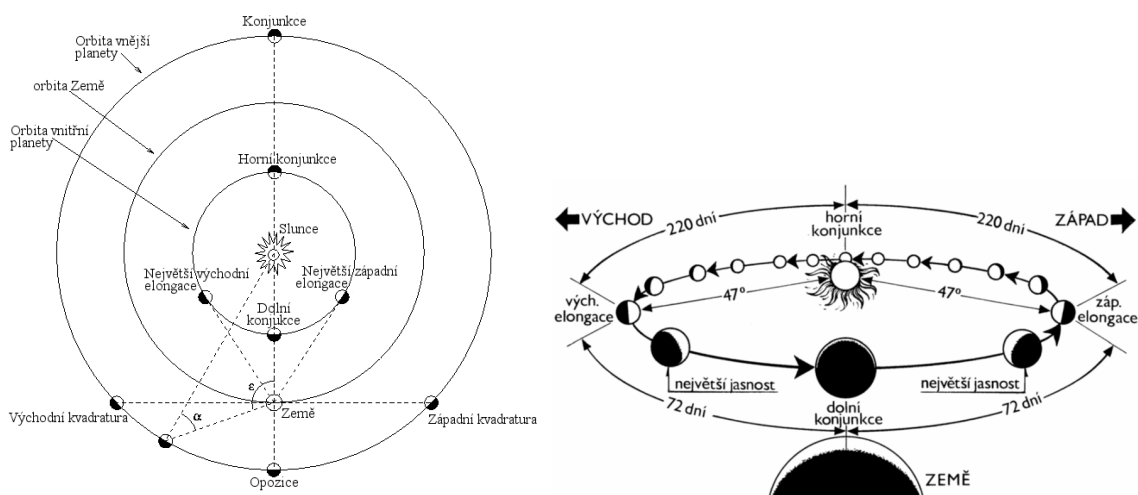
Obrázek 6.26: Vlevo: schematický náčrt vzniku smyček planet na hvězdné obloze. Převzato z Astronomického koutku. Autor: Ota Kéhar. Vpravo: Smyčka planety Mars v souhvězdí Raka v období říjen 2009 až květen 2010. Foto Tunc Tezel.

V kapitole 4.3.1 jsme si všimli 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 vztáhnout opět ke hvězdám. Takovou oběžnou dobu, za kterou se planeta dostane na stejné místo na hvězdné obloze, označíme jako **siderická oběžná doba**  $P$ . 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 kterou bude planeta opět stejným směrem od Země jako je Slunce. V tom případě hovoříme o **synodické oběžné době**  $S$ . 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  $P$  urazí za jeden den úhlovou vzdálenost  $360^\circ/P$ . Jejich vzájemná úhlová vzdálenost od nějakého počátečního postavení se bude měnit o  $|360^\circ/P_Z - 360^\circ/P|$ . Za synodickou oběžnou dobu  $S$  tento rozdíl naroste na  $360^\circ$ . Jednoduchou úpravou pak dostaneme

$$\left| \frac{1}{P_Z} - \frac{1}{P} \right| = \frac{1}{S}. \quad (6.1)$$

### 6.4.3 Aspekty

Pro určování synodických oběžných dob planet se zpravidla používá jistá významná poloha planety vůči Slunci a Zemi, tzv. **aspekt**. Jinak řečeno aspekt je postavení planety, kdy její **elongace**<sup>19</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>20</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>21</sup>. Z obrázku 6.27 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  $48$  stupňů<sup>22</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 přívlastek 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.



Obrázek 6.27: Aspekty. Zdroj: wikipedia, Příhoda (2000).

<sup>19</sup>Termín pochází z latinského *elongatio*, což znamená prodlužovat.

<sup>20</sup>Slovo konjunkce vychází opět z latiny, kde *coniunctio* znamená spojení.

<sup>21</sup>Slovo „opozice“ asi není třeba představovat. Slyšíme jej každý den v politických zprávách, ale samotný termín vychází z latiny, kde *oppositus* má význam „naproti postavený“.

<sup>22</sup>Rozmezí je uváděno proto, že se oběžná trajektorie planet stáčí a maximální elongace se v průběhu času mění.

Tabulka 6.5: Některé z významných konjunkcí v následujících letech (vzdálené od Slunce více než  $20^\circ$ . Zdroj: wikipedia.

Datum a čas	Planety	Poloha vůči Slunci
5. října 2017	Venuše 13' severně od Marsu	$23,4^\circ$ západně
7. ledna 2018	Mars 13' jižně od Jupitera	$58,8^\circ$ západně
21. prosince 2018	Merkur 52' severně od Jupitera	$20,1^\circ$ západně
19. června 2019	Merkur 14' severně od Marsu	$24,4^\circ$ východně

## 6.5 Planetky

Ve Sluneční soustavě se kromě planet a trpasličích planet nacházejí i menší objekty, kterým říkáme planetky<sup>23</sup>. První planetku Ceres objevil 1. ledna 1801 Giuseppe Piazzi<sup>24</sup>. Od roku 2006 a již zmíněné definice planet a trpasličích planet se Ceres přesunula do kategorie trpasličích planet. Mezi planetky nyní řadíme malá tělesa větší než zhruba 100 metrů<sup>25</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 Slunci blíže než naše planeta.

Pozorování planetek se v České republice věnují zejména dva týmy odborníků. Podílejí se jednak na jejich monitorování, při němž objevují nové planetky a určují nebo zpřesňují trajektorie těch známých (skupina na observatoři na Kletci), a jednak studují vlastnosti planetek, například z toho, jak se mění jejich jasnost v důsledku rotace jejich nepravidelného těla (pracovníci Astronomického ústavu AV ČR v Ondřejově). Malými dalekohledy může být ale pozorovatelný jen malý zlomek z celkového počtu známých planetek.<sup>26</sup>

## 6.6 Komety

Mezi nejpůsobivější kosmické objekty pozorovatelné na naší obloze nepochybně patří komety<sup>27</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 měla zvěstovat 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.

<sup>23</sup>Při objevech prvních planetek se předpokládalo, že jde o planety. Záhy se však zjistilo, že jsou to tělesa příliš malá a začala být označována v angličtině „minor planet“. Odtud český termín planetka. Stále se ale můžeme setkat i se staršími názvy asteroid (hvězdě podobný), planetoid (těleso podobné planetě).

<sup>24</sup>Podle planetky byl později pojmenován prvek cer (cerium).

<sup>25</sup>Menší tělesa se označují jako meteoroidy.

<sup>26</sup>Podrobnější informace k pozorovatelnosti planetek malými dalekohledy uvádí například Petr Scheirich na <http://sajri.astronomy.cz/mapky/mapky.php>

<sup>27</sup>Původ slova *kometa* lze hledat v řečtině, kde „kométés“ znamená dlouhovlasý.



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 (plazmový) ohon namířený od Slunce, jako v případě komety Hale-Bopp při jejím posledním průletu kolem Slunce v roce 1997 (viz obrázek 6.28 vlevo). Některé komety mají ohon nevýrazný, ale mohou se pochlubit obřím prachoplynovým obalem kolem svého jádra, tzv. **kómou**. Tou největší, dosud zaznamenanou se pyšnila kometa 17P/Holmes, jejíž kóma v listopadu 2007 svou velikostí nakrátko předčila i Slunce! V roce 2014 byla objevena kometa, která neměla ohon vůbec žádný. Jde o první bezocasou kometu. Proto je někdy označována jako Manská kometa (anglicky comet Manx) podle rasy bezocasých koček.

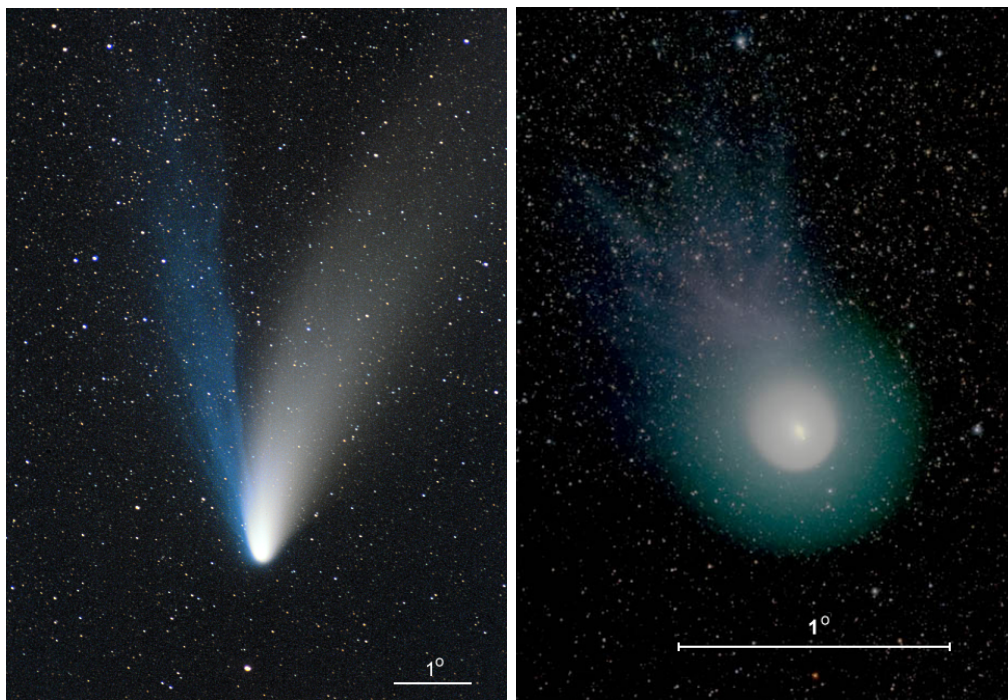
Nicméně běžné komety ohon a kómu mají. Ty slabší připomínají v dalekohledu mlhovinu. Objevit takovou kometu vyžadovalo dříve velkou trpělivost a jistou dávku štěstí. Nejúspěšnější lovci komet jsou Robert McNaught, který má na svém kontě dosud 82 objevů (stav k létu 2016) a Gene a Carolyn Shoemakerovi 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. Kometa SOHO s pořadovým číslem 3000 byla objevena v září 2015. V červnu 2016 už seznam obsahoval 3168 komet. Ale komety se nyní nalézají i na snímcích v rámci různých přehlídkových projektů, například LINEAR nebo Catalina Sky Survey mají už na svém kontě stovky objevených komet.

## 6.7 Meteoroidy, meteory, meteority

Drobná tělíska, 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>28</sup>. Drouboučkových milimetrových meteoroidů 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 tehdy 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 6.30). Jedná se o první případ, kdy bylo těleso pozorováno před vstupem do zemské atmosféry jako meteoroid, byl zaznamenán jeho

<sup>28</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 soustavě za planetky.



Obrázek 6.28: Vlevo: Kometa Hale-Bopp s modrým plynovým a nažloutlým prašným ohonem. Foto: Miloslav Druckmüller, 2. 4. 1997. Vpravo: Kometa 17P/Holmes s obří komou. Foto: AnnMarie Jones (5. 11. 2007).

průlet atmosférou jako meteor, jeho výbuch a následně byly nalezeny úlomky, které dopadly až na zemi jako meteority. Jeden z posledních případů nečekaného setkání s poslem z vesmíru je z 15. února 2013, kdy vlétlo do atmosféry těleso o rozměrech 15 až 17 metrů a odhadované hmotnosti mezi 7 až 10 tisíc tun. Těleso vybuchlo ve výšce 50 až 30 km nad zemským povrchem nad Čeljabinskem v Rusku. Tlaková vlna vyrazila skla v oknech v okruhu 100 kilometrů a připsala si na účet také zranění více než tisíce lidí.

Pozorovat na obloze takový úkaz je ale něco zcela mimořádného. Většina meteoroidů, které se setkávají se Zemí má průměr řádově milimetry. Takové tělíčko 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>29</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 než Venuše v době své největší jasnosti (−4 mag), který se označuje jako **bolid**<sup>30</sup>. Jsou tak jasné, že je možné je pozorovat i ve dne (viz obrázek 6.31 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 roj meteorů, které 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

<sup>29</sup>Lidové označení „padající hvězda“ s hvězdami samozřejmě nemá nic společného.

<sup>30</sup>Původ slova můžeme hledat v řečtině, kde „bolídos“ značí metací střelu.



Obrázek 6.29: Kometa McNaught na snímku Miloslava Druckmüllera z 28. ledna 2007.

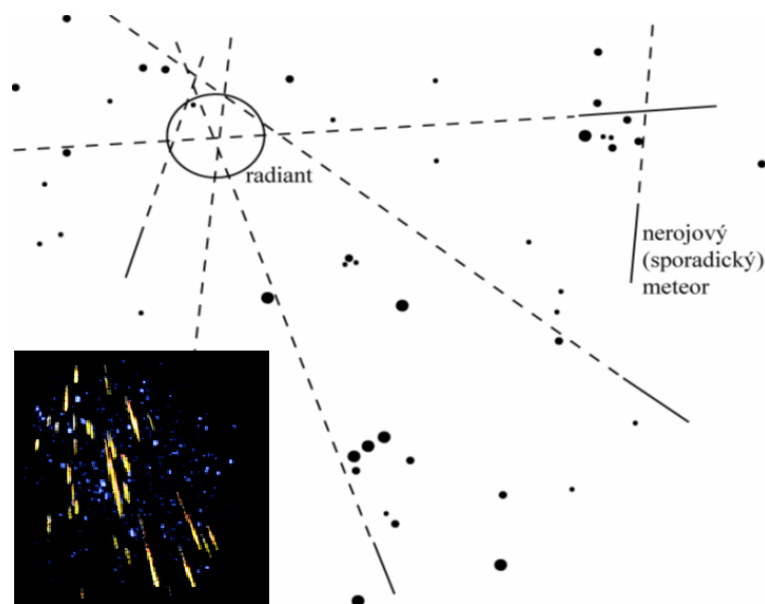


Obrázek 6.30: Zbytek kouřové stopy po výbuchu meteoroidu 2008 TC<sub>3</sub> nad súdánskou pouští. Snímek je z videozáznamu, který na mobilní telefon pořídil Mohamed Elhassan Abdelatif Mahir.

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 zdrojová kometa prolétala 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 do-



Obrázek 6.31: 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 6.32: Radiant meteorického roje. Na vloženém malém snímku je zachycen roj Alfa-Monocerotid v roce 1995. Zdroj NASA.

tuje roj Leonid. V letech 1998 a 1999 bylo jejich pozorování opravdovým zážitkem, frekvence meteorů byla až několik tisíc za hodinu a řada pozorovaných meteorů byla bolidy (obrázek 6.33 vpravo).

## 6.8 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 anebo 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 po-



Obrázek 6.33: 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.

zorujeme 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. Od letadel je ale většinou lze rozeznat. U nízko letících letadel je možné rozeznat červená blikající světla a i ta vysoko letící se většinou pohybují po obloze rychleji než družice.

Občas je možné zachytit stopu družice i na snímku při fotografování objektů hvězdné oblohy (viz obrázek 6.34). Polohy družic a jejich pozorovatelnost v daném místě na Zemi je možné zjistit na <http://www.heavens-above.com/>.

## Použitá a doplňující literatura

- Brown, M. 2016, <http://www.gps.caltech.edu/~mbrown/dps.html>  
 Druckmüller, M., 2016, <http://www.zam.fme.vutbr.cz/~druck/>  
 International Energy Agency 2016, Key World Energy Statistics 2016  
 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  
 Horálek, P., 2015, Tajemná zatmění, Cpress, 248 stran  
 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.  
 Littmann, M., Espenak, F., Willcox, K. 2008, Totality: Eclipses of the Sun, Oxford University Press, 3. vydání, 296 stran



Obrázek 6.34: 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 stran
- 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>
- Příhoda, P. 2000, Průvodce astronomií, 1. vyd., Praha, Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy
- 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

## 7 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 dopadají nejen fotony z různých vesmírných objektů, ale také kosmické záření, Země je pod vlivem slunečního větru, případně proudu dalších 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.

### 7.1 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). Meteority z těchto těles jsou ale vzhledem k celkovému množství nalezených meteoritů mimořádně vzácné. Například měsíčních meteoritů je zdokumentováno zhruba 310 (k 15.9.2017)<sup>1</sup>, což představuje vzorky měsíčních hornin o celkové hmotnosti několika desítek kilogramů.

Meteority z Marsu jsou vzácnější. Databáze meteoritů vedená mezinárodní Meteorickou společností<sup>2</sup> uváděla k 15. září 2017, že je registrováno 56 963 pojmenovaných meteoritů a 8 012 meteoritů s provizorními jmény, z toho 9 102 meteoritů je s úplným popisem. V těchto číslech se doslova ztrácí necelé dvě stovky 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 7.1). 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>3</sup>. Ale ani v České republice není člověk bez šance. Většinou 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 onoho Příbramského meteoritu se podobná událost podařila mnohokrát. Jedním

<sup>1</sup>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).

<sup>2</sup>Jedná se o Meteoritical Bulletin Database v péči The Meteoritical Society, společnosti pro meteority a planetární vědy (<http://meteoriticalsociety.org>).

<sup>3</sup>Detailed lze najít na <http://curator.jsc.nasa.gov/antmet/index.cfm>.



Obrázek 7.1: Meteorit ALH84001 z Marsu. Vpravo je detail jemných struktur připomínajících zárodky života z elektronového mikroskopu. Převzato z wikipedia.

z posledních případů je meteorit Košice z února 2010 nebo bolid Vysočina z prosince 2014. 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>.

Přímé pozorování dopadu meteoritu je velmi vzácné. Jsou zaznamenány případy, kdy dokonce meteorit zranil člověka (více v kapitole 23), ale ke zcela mimořádné události došlo 15. února 2013 v Čeljabinsku. Jak jsme již uvedli v předchozí kapitole, vybuchl nad Čeljabinskem meteoroid, jehož kousky pak dopadly jako sprška meteoritů do okolí města. Původní těleso (asi 17 metrů v průměru o hmotnosti přes 7 000 tun) pocházelo z oblasti pásu planetek mezi Marsem a Jupiterem. Některé práce určily i mateřskou planetku (např. Borovička et al., 2013). Největší úlomek o hmotnosti 654 kg byl nalezen na dně jezera Čebarkul.

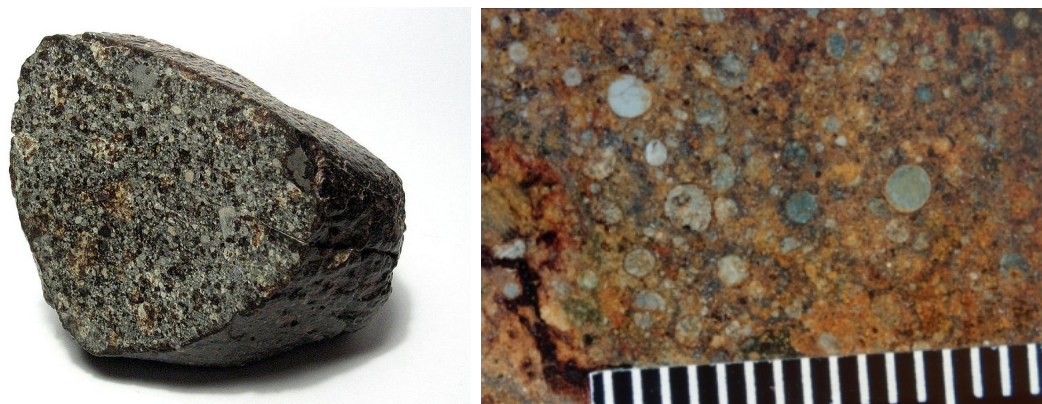
Obecně jsou nalezené meteority tříděny podle poměrného zastoupení křemičitanů a ryzích kovů. Odhaduje se, že 95% všech meteoroidů, které zasáhnou Zemi, tvoří kamenné meteority, 4% železné a 1% železokamenné. V některých kamenných meteoritech nalézáme malá kulovitá zrníčka s průměrem do 5 mm, zvaná chondry nebo chondruly. Podle jejich výskytu a poměru různých chemických prvků pak kamenné meteority rozdělujeme ještě na chondrity (86% všech meteoritů), uhlíkaté chondrity a achondrity. Zastoupení jednotlivých meteoritů v celkovém množství pozorovaných pádů odpovídá jejich zastoupení v okolí Země. Statistika nálezů je ale odlišná. Železné meteority jsou nápadné dlouho po pádu, nepodléhají snadno povětrnostním vlivům, dají se hledat pomocí detektorů kovů, takže tvoří více než čtvrtinu nalezených meteoritů. V posledních letech se ale skóre začíná vyrovnávat. V oblibě je hledání meteoritů na antarktických bílých pláních. Činností ledovců a následným odtáním ledu se objevily oblasti s velkým výskytem meteoritů. Každý kámen je navíc na bílém sněhu velmi nápadný. Podobně nápadné jsou tmavé meteority i v pouštní krajině.

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>.

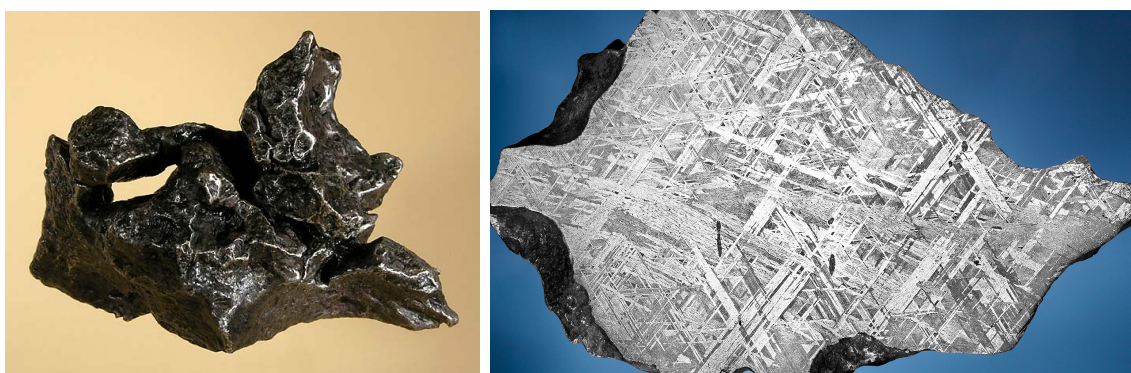
<sup>4</sup>Podrobnosti na [http://www.rozhlas.cz/meteor/prispevky/\\_zprava/bolid-benesov-vydal-tajemstvi-video--1061668](http://www.rozhlas.cz/meteor/prispevky/_zprava/bolid-benesov-vydal-tajemstvi-video--1061668).

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





Obrázek 7.2: 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 7.3: Vlevo: Fragment z železného meteoritu z Campo del Cielo o hmotnosti 576 gramů. Celková hmotnost nalezených částí dosahuje zhruba 100 tun. Jedná se tak o největší nalezený meteorit. Převzato z wikipedie. Vpravo: Leštěný řez železným meteoritem Gibeon nalezeným v Great Nama Land (Namibia) ukazuje pěknou strukturu tzv. Widmanstättenových obrazců.

## 7.2 Dovož vzorků

V dnešní době už při studiu vzorků hornin z kosmických těles nejsme odkázáni jen 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 celkové hmotnosti 382 kg. Tehdy soupeřící sovětská kosmonautika získala díky třem automatickým družicím Luna celkem 0,32 kg vzorků.

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. Ještě před tím, 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 kórou komety a dopravit



Obrázek 7.4: Největší nalezený fragment meteoritu 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>.



Obrázek 7.5: 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.

je k analýze na Zemi. Tentokrát 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 návratového pouzdra vzorky planetky Itokawa podařilo najít.

V září 2016 vyslala americká NASA sondu OSIRIS-REx k planetce 101955 Bennu s plánovaným návratem odebraných vzorků na Zemi v roce 2023.

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



Obrázek 7.6: Vzorek číslo 15555 dovezený z Měsíce posádkou Apolla 15 představuje tzv. olivinický bazalt. Zformoval se před 3,3 miliardami let. Dnes je vystaven v Národním muzeu přírodních věd USA ve Washingtonu. Převzato z wikipedie.

## 7.3 Kosmický vítr aneb „nálety“ částic

### 7.3.1 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 částic s vysokou energií pohybujících se vysokou rychlostí a dopadajících do zemské atmosféry. Primární kosmické záření (před dopadem do atmosféry Země) je tvořeno téměř z 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 fyzik Pierre Auger. Částice v nich dosahují energie až  $10^{20}$  eV.

Původ kosmického záření není dosud zcela objasněn. Vysvětlení mechanismu urychlování částic na tak vysoké energie dosud chybí. Má se za to, že roli hraje zejména urychlování v rozlehlých, 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 jsou výbuchy supernov, aktivní galaktická jádra, kvasary či gama záblesky. V r. 2017 bylo potvrzeno, že částice kosmického záření s největší energií jsou extragalaktického původu.

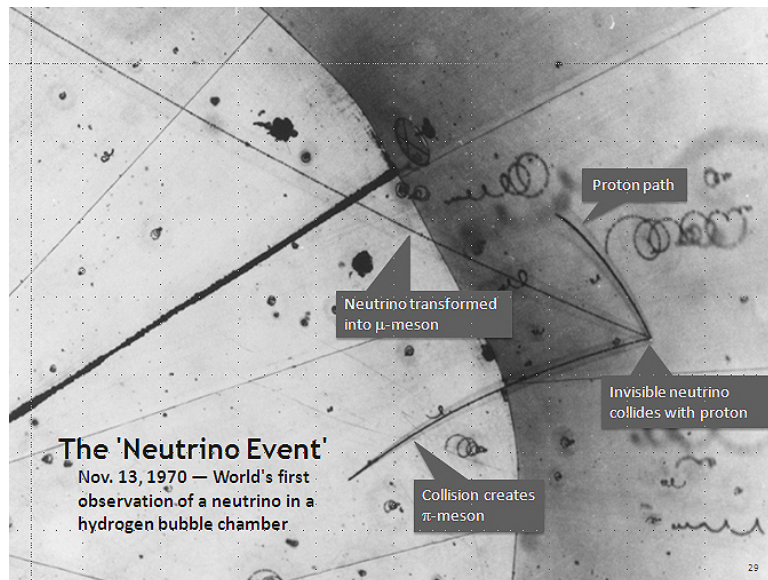
<sup>7</sup>V roce 1936 dostal za svůj objev Nobelovu cenu.

V roce 2008 byla v Argentině dokončena stavba Observatoře Pierra Augera<sup>8</sup> tvořené 1 600 detektory na ploše 3 000 km<sup>2</sup>. Jde o největší detektor kosmického záření na světě. Na projektu se podílejí také vědci z Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky (více viz kapitola 11).

### 7.3.2 Sluneční vítr

Ze sluneční atmosféry, zejména z její horní vrstvy, tzv. **koróny** uniká do okolního prostoru 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 či 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.

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.



Obrázek 7.7: První detekce neutrina 13. listopadu 1970. Neutrino se srazilo s protonem v atomu vodíku. Srážka se objevila v bodě, odkud vychází tři trajektorie (na obrázku vpravo). Zdroj: Argonne National Laboratory

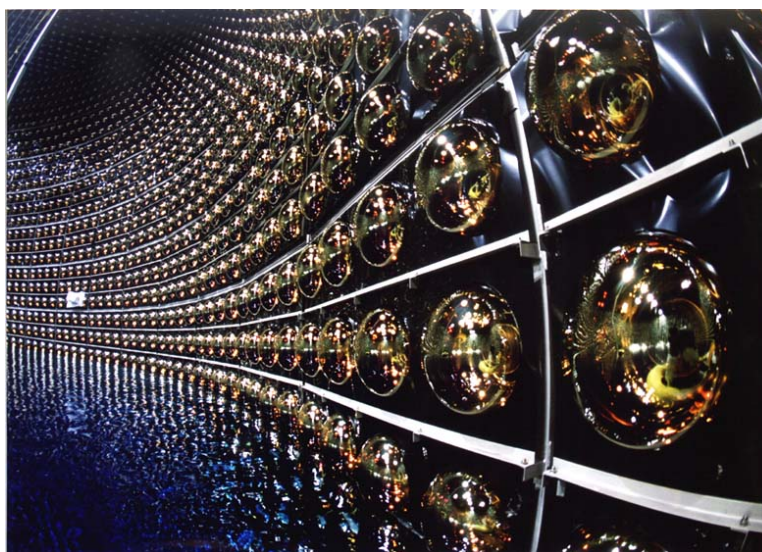
<sup>8</sup>[http://www.auger.org/cosmic\\_rays/](http://www.auger.org/cosmic_rays/)

### 7.3.3 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, netečná jsou vůči gravitaci. Částečně se podvolí jen slabé interakci. Z toho ovšem vyplývá pro nás nepříjemná vlastnost neutrin. Jsou velmi obtížně detekovatelná, s okolím prakticky neinteragují. Každou sekundu projde  $1 \text{ cm}^2$  naší kůže asi 100 miliard neutrin bez jakéhokoli vlivu na nás nebo naše okolí.

Neutrino vznikají zjednodušeně řečeno 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 Super-Kamiokande, ANTARES, AMANDA, IceCube<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.



Obrázek 7.8: Skleněné baňky s fotonásobiči v detektoru neutrin Super-Kamiokande. Zdroj: Japan Radio Glass Co.,Ltd.

### 7.3.4 Gravitační vlny

Spektrum našich znalostí o okolním vesmíru významně rozšířila 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

<sup>9</sup>Podrobněji se budeme detekci neutrin věnovat v kapitole 11.

objekty nebo události, které budou silně zakřivovat prostoročas. Projeví se tak třeba dvojice velmi malých a hutných hvězd obíhajících kolem společného těžiště a jejich splnutí.

V roce 1974 byl objeven binární pulsar PSR1913+16 (Taylor & Hulse, 1974). Jeho složky, neutronové hvězdy, 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 (Hulse & Taylor, 1975). Za tento objev binárního pulsaru a nepřímou detekci gravitačních vln byla v roce 1993 udělena Nobelova cena za fyziku.

Na přímou detekci čekali astronomové až do roku 2015, kdy 14. září zachytily oba detektory LIGO podezřelý signál označovaný dnes GW150914. Po důkladné analýze se ukázalo, že se jedná o signál ze splnutí dvou černých děr o hmotnostech  $29 M_{\odot}$  a  $36 M_{\odot}$ . Objev byl oznámen veřejnosti na tiskové konferenci v únoru 2016. Tři vůdčí postavy týmu, který se objevu podílel, Rainer Weiss, Barry C. Barish a Kip S. Thorne dostali za tento objev Nobelovu cenu za fyziku v roce 2017.

Do října 2017 byly gravitační vlny z vesmíru detekovány v pěti případech. Nejzajímavější je právě ten pátý GW170817. Na rozdíl od všech předchozích nebylo zdrojem splnutí dvou černých děr, ale dvou neutronových hvězd. A navíc poprvé zde byla událost detekována i v různých oblastech spektra elektromagnetického záření jako záblesk  $\gamma$  záření GRB170817A, zjasnění (tzv. transient) AT 2017gfo v optické oblasti. K dispozici jsou ale i rentgenová, infračervená, ultrafialová měření. Jde jednoznačně o mezník v studiu vesmíru.

## 7.4 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

$$E = h\nu = mc^2, \quad (7.1)$$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}, \quad (7.2)$$

kde  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  J·s je Planckova konstanta,  $c$  je rychlost šíření světla v daném prostředí (maximální  $299\,792\,458$  m·s<sup>-1</sup> ve vakuu) a  $m$  je klidová hmotnost částice<sup>10</sup>. Jistá energie a hybnost tak charakterizují stav rovnoměrně a přímočaře se pohybující

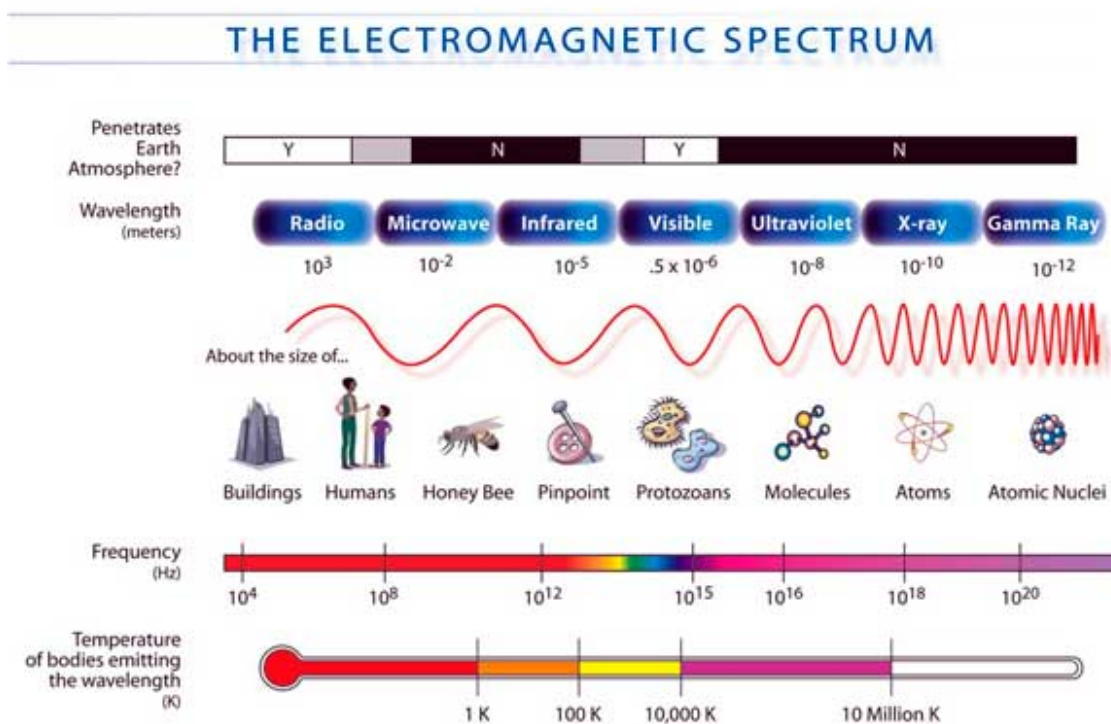
<sup>10</sup>Německý fyzik Max Planck v roce 1900 vztahy odvodil jen pro fotony, které mají jako částice nulovou klidovou hmotnost. Nicméně de Brogliho vztahy platí obecně i pro částice s nenulovou klidovou hmotností.

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>11</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  $\lambda$ .

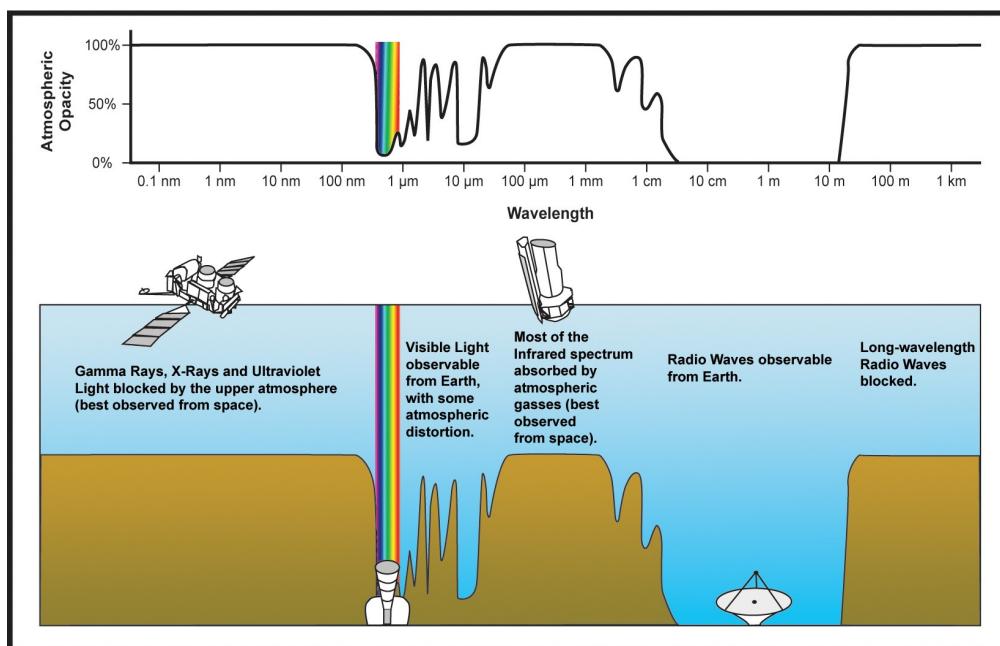
$$c = \lambda\nu. \quad (7.3)$$

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 7.1. Kvantum energie se přitom mění v závislosti na kmitočtu záření.



Obrázek 7.9: Elektromagnetické spektrum. Zdroj: NASA.

<sup>11</sup>Právě Albert Einstein využil v roce 1905 poprvé myšlenku dualismu vlna–částice pro objasnění fotoelektrického jevu.



Obrázek 7.10: Atmosférická okna do vesmíru. Zdroj: NASA.

### 7.4.1 Okna do vesmíru

Vesmírná sonda ve volném kosmickém prostoru může měřit intenzity záření v jakékoli části nebo i v celém rozsahu elektromagnetického 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 7.10. 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>12</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 celá řada fyziků studovala záření ve vakuovaných trubicích emi-

<sup>12</sup>V roce 1981 odvysílala tehdejší Československá televize na svou dobu unikátní seriál Okna vesmíru dokořán, jehož hlavním protagonistou byl Jiří Grygar.

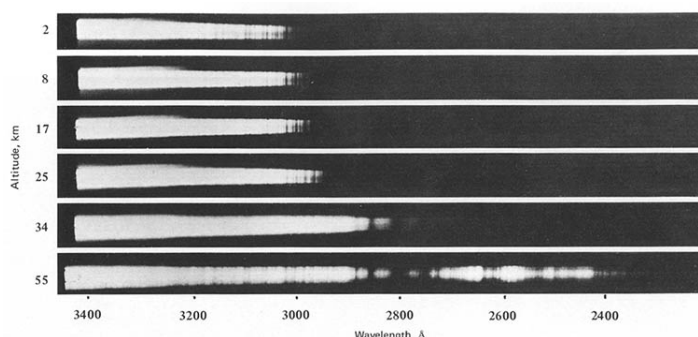


tované na elektrodě. Nicméně jako oficiální objevitel paprsků X je uváděn Wilhelm Röntgen, který o nich publikoval souhrnnou studii na sklonku roku 1895. Záhy začali fyzikové tyto paprsky po objeviteli označovat jako rentgenové<sup>13</sup>. Mozaiku objevitelů ještě doplníme jménem francouzského fyzika 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 záření  $\gamma$ .

V 19. století tedy začalo odhalování celého spektra elektromagnetického záření a uskutečnily se i první pokusy o pozorování okolního vesmíru v nově objevených oborech spektra. V roce 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 7.10. Velká část infračerveného a mikrovlnného záření je pohlcena zejména molekulami vody a kyslíku, respektive oxidu uhličitého. 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 7.11: 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.

Oblasti spektra s nejkratšími vlnovými délkami od  $\gamma$  až po UV záření jsou pohlcovány zejména atmosférickým ozónem ve výškách 15 až 35 kilometrů nad zemí. 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. Skutečně otevírání oken do vesmíru ale nastalo až s počátkem kosmické éry, zejména v šedesátých

<sup>13</sup>V roce 1901 se Röntgen stal prvním laureátem Nobelovy ceny za fyziku.

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.

### 7.4.2 Jak tělesa září?

Při studiu vzdálených končin vesmíru stále využíváme zejména záření, které z nich přichází. Analýza elektromagnetického záření nám poskytne značnou část informací o objektech ve vesmíru. Při čtení těchto informací zkoumáme:

- směr, odkud k nám záření přichází; předmět studia **astrometrie**,
- hustotu toku záření; **fotometrie**,
- spektrální složení; **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? Odpovědi lze nalézt v řadě učebnic 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 popsána vyzařovaná energie 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>. Jejich energie je 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,

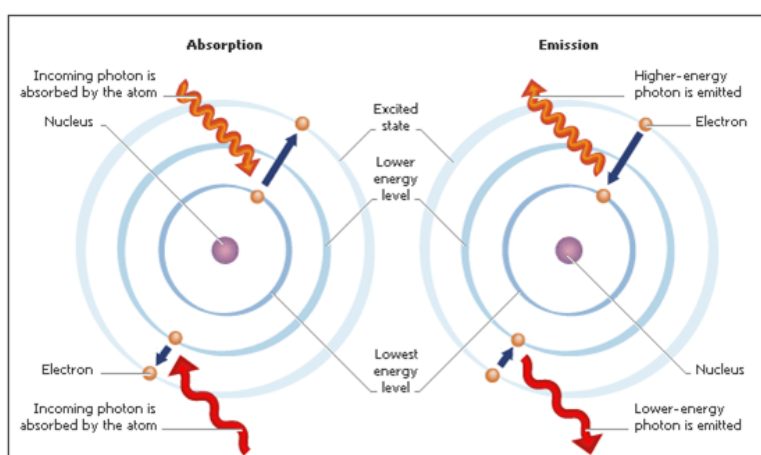
<sup>14</sup>Jak dnes víme, Spitzerova myšlenka byla nakonec realizována. V roce 1990 byl na oběžnou dráhu vynesena Hubbleův kosmický dalekohled.

<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.

aby přecházely mezi dvěma prakticky libovolnými energetickými stavy. Podobné je to i v případě, kdy jeden stav je volný a druhý vázaný.

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.

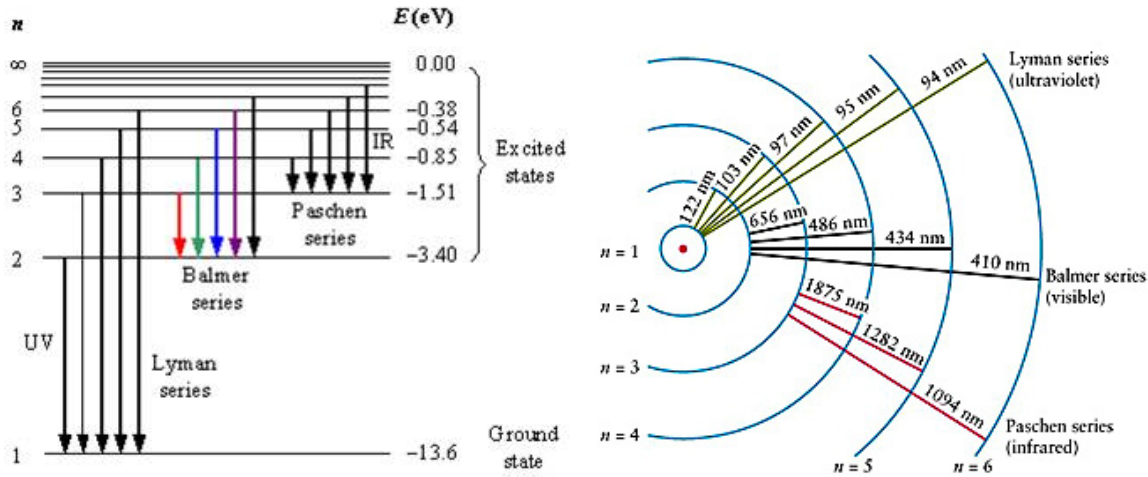


Obrázek 7.12: Vznik a zánik fotonu. Převzato z [http://light.physics.auth.gr/enc/wavelength\\_en.html](http://light.physics.auth.gr/enc/wavelength_en.html).

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 nejlehčí a nejnáze 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, která je následně uvolněna v podobě kvanta záření. Na cestu vyrazí foton *brzdného záření*.

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



Obrázek 7.13: 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).

síly

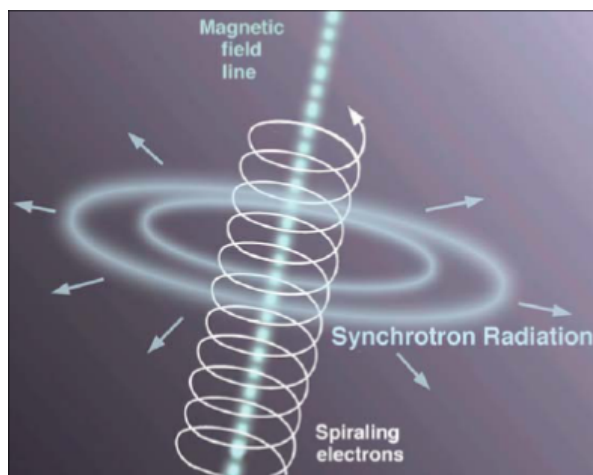
$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B},$$

kde  $q$  je náboj elektronu (obecně, pohybující se nabitá částice),  $\vec{v}$  její rychlost a  $\vec{B}$  intenzita magnetického pole. Lorentzova síla způsobuje zakřivování trajektorie elektronu a tím také i jeho vyzářování. 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).

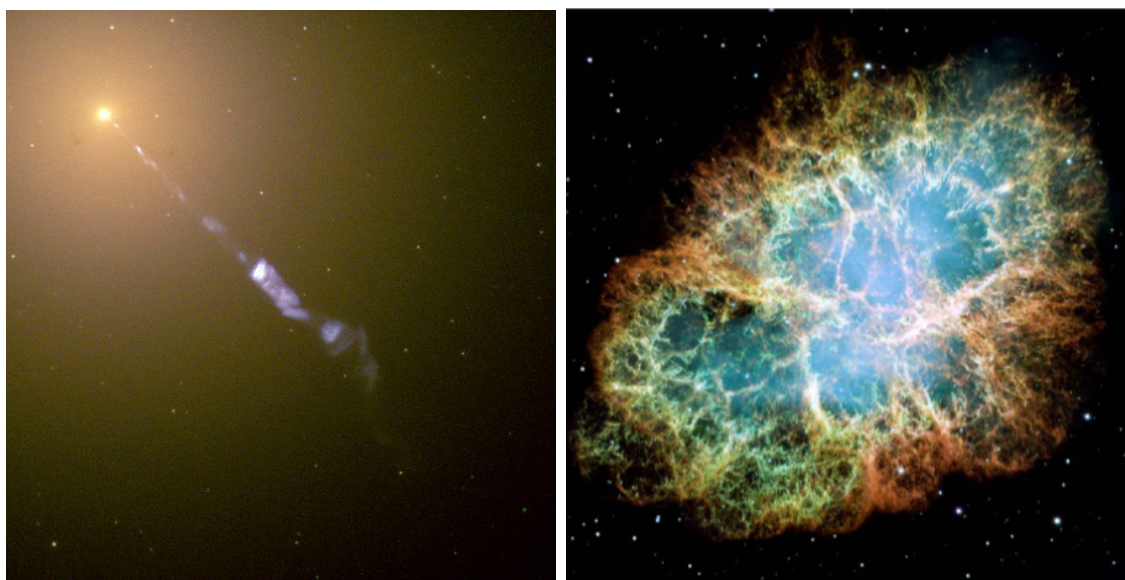
Závěrem kapitoly tedy můžeme konstatovat, že rozbořením elektromagnetického záření z kosmu lze zjišťovat také způsob a podmínky vzniku tohoto záření. Jde tak o velmi cenný zdroj informací o vesmíru, na nichž si můžeme ověřovat i základní principy fyziky. Větší laboratoř než náš vesmír prostě nemáme.

<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 7.14: Vznik synchrotronového záření. Zdroj: Jon Lomberg, Gemini Observatory.



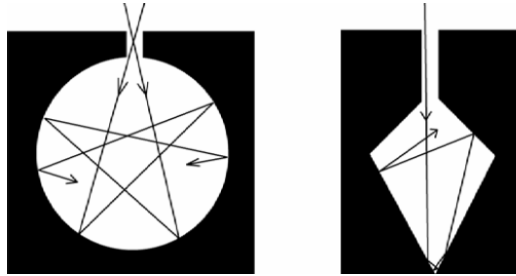
Obrázek 7.15: Zdroje synchrotronového záření. Vlevo: výtrysk u galaxie M87. Vpravo Krabí mlhovina M1. Převzato z wikipedie.

### 7.4.3 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 7.16: 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 Johna Tyndalla) slovinský fyzik Jožef Stefan závislost mezi intenzitou záření absolutně černého tělesa a jeho (termodynamickou) teplotou (Stefan, 1879). Celkové množství energie  $F$  vyzářené jednotkou plochy absolutně černého tělesa za jednotku času je úměrné čtvrté mocnině jeho teploty  $T$ . O pět let později tuto závislost odvodil Němec Ludwig Boltzmann s využitím termodynamiky a obecných předpokladů (Boltzmann, 1884). Proto se vztah

$$F = \sigma T^4 \quad (7.4)$$

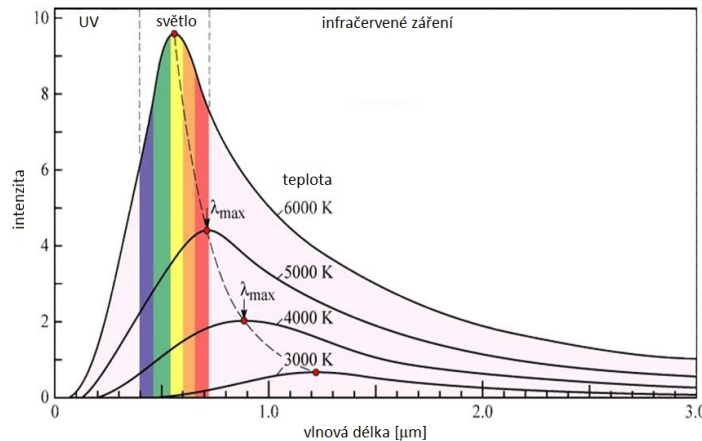
někdy označuje jako **Stefanův–Boltzmannův zákon**, někdy jen jako Stefanův zákon. Konstanta úměrnosti  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$  je Stefanova–Boltzmannova konstanta. Protože uvažujeme zpravidla kulový zářič (o poloměru  $r$ ) zářící do všech stran, bude plocha emitující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

$$L = 4\pi r^2 \sigma T^4. \quad (7.5)$$

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. 7.17). S teplotou absolutně černého tělesa se ale mění profil křivky. Zvýšíme-li teplotu  $T$  absolutně černého tělesa, zmenší se vlnová délka  $\lambda_{\max}$ , na níž je vyzářeno maximum energie. Součin těchto dvou veličin je konstantní. Závislost odhalil Wilhelm Wien v roce 1893, proto také ve vztahu označovaném jako **Wienův posunovací zákon** (Wien, 1893)

$$T\lambda_{\max} = b, \quad (7.6)$$

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 ohříváče je tmavá. Když ale ohříváč 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, světlejší“ je jeho barva. Samozřejmě, že takto popíšeme jen projevy ve viditelné oblasti spektra. Wienův posunovací zákon ale platí zcela obecně.



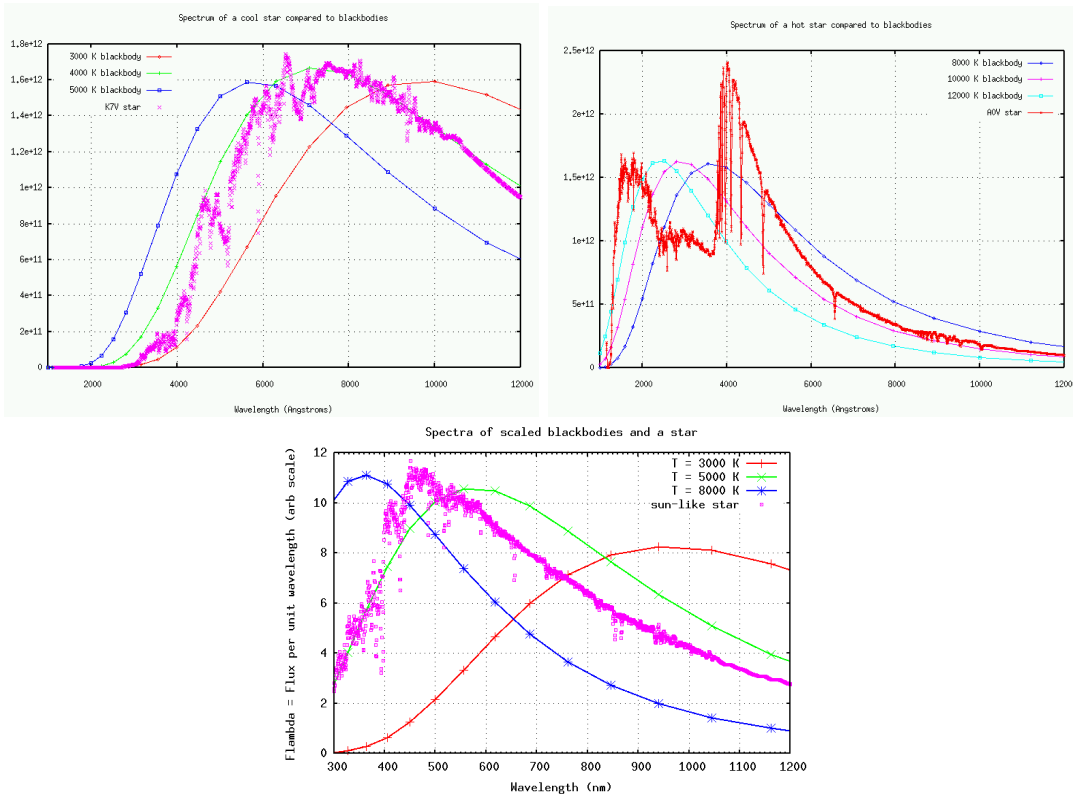
Obrázek 7.17: Křivky množství vyzářené energie pro různé teploty. Převzato od D. Fieldse a upraveno.

Aplikace Wienova posunovacího zákona 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 3000 K budou mít načervenalý odstín, ty nejžhavější o teplotách desítek tisíc kelvinů budou svítit modrobíle.

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

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad \text{nebo} \quad B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (7.7)$$

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



Obrázek 7.18: Nahoře: Reálná spektra hvězd ve srovnání s ideálním průběhem záření absolutně černého tělesa různých teplot. Nahoře: chladná hvězda (vlevo), horká hvězda (vpravo) a dole hvězda slunečního typu. Převzato z <http://spiff.rit.edu/classes/phys440/lectures/filters/filters.html>.

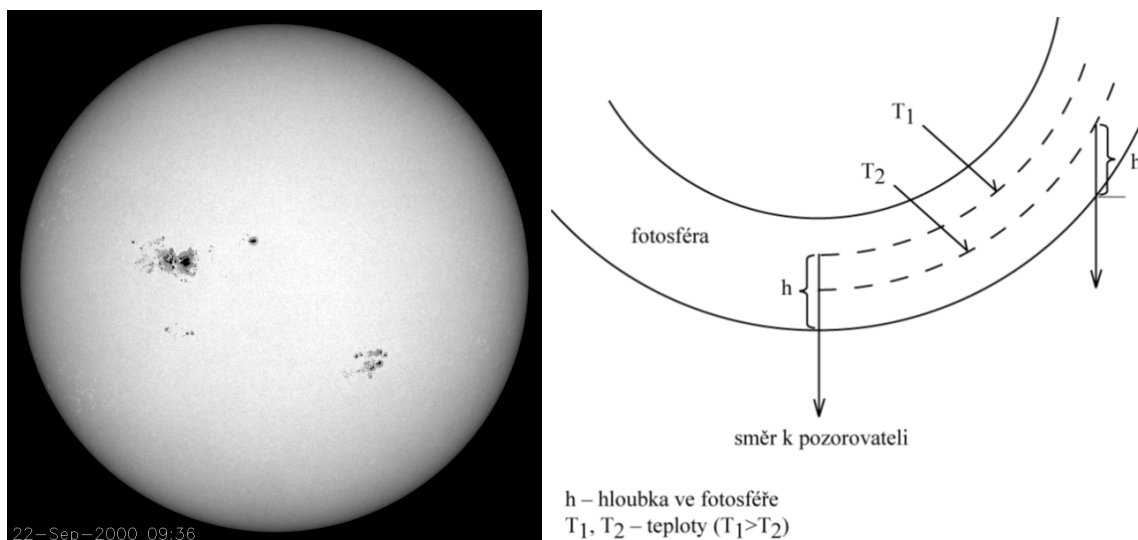
odvodil až roku 1900 Max Planck. Dnes je proto závislost monochromatického jasu na kmitočtu či vlnové délce záření označována jako **Planckův zákon**. Význam objevu byl později oceněn udělením Nobelovy ceny za fyziku (1918).

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 povrchu vesmírného tělesa, jakou by mělo absolutně černé těleso se stejným zářivým výkonem. Jde tedy o teplotu určenou ze Stefanova-Boltzmannova zákona. Hvězdy ale jako absolutně černá tělesa nezáří (viz obrázek 7.18). Při podrobnějších studiích vlastností hvězd je zpravidla nutné přikročit k mnohem náročnějšímu popisu záření hvězdy a spočítat model jejich atmosféry.

Jedním z důkazů, že reálné hvězdy nejsou tzv. kosinový zářič, tedy, že nezáří jako absolutně černé těleso je pozorované *ztemnění okrajů slunečního disku* (obr. 7.19 vlevo). 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 7.19, 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 rozбором přesných pozorování zákrytových dvojhvězd nebo transitů exoplanet.



Obrázek 7.19: Vlevo: 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/). Vpravo: Schématické znázornění vzniku okrajového ztemnění. Převzato z Pokorný (2006).

## Použitá a doplňující literatura

- Boltzmann, L. 1884, Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie, *Annalen der Physik und Chemie*, 258 (6), 291–294
- Borovička, J., Spurný, P., Brown, P., et al. 2013, *Nature* 503, 235
- Burbidge, G. R. 1956, *ApJ*, 124, 416
- Hulse, R. A., & Taylor, J. H. 1975, *ApJ Letters*, 195, L51
- 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)
- Kleczek, J. 2002, *Velká encyklopedie vesmíru*, Academia Praha, 582 str.
- 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.
- Planck, M. 1900, *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum*.

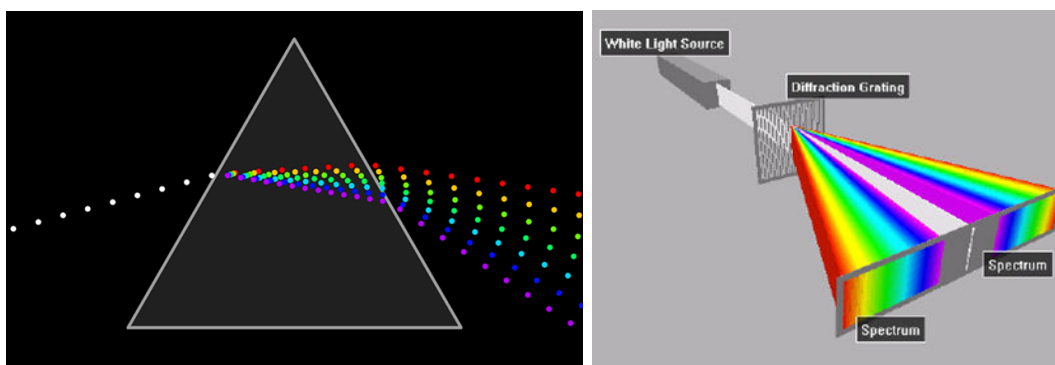
- V: Verhandlungen der Deutschen physikalischen Gesellschaft. 2, No. 17, 1900, str. 245, Berlin
- Pokorný, Z., 2006, Vademecum – Váš průvodce vesmírem, Hvězdárna a planetárium M. Koperníka v Brně
- Spurný, P., Haloda, J., & Borovička, J. 2012, LPI Contributions, 1667, 6143
- Stefan, J. 1879, Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur, Sitzungsberichte der Math.-Naturwissenschaftlichen Classe Akademie der Wissenschaften 79 (II), 391–428
- Taylor, J. H., Hulse, R. A. 1974, IAU Circular, 2704
- Wien, W. 1893, Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin), 55-62

## 8 Spektroskopie

Nejkomplexnější informace o vzdálených vesmírných objektech získáváme z jejich spektra, rozložíme-li přicházející záření pomocí hranolu nebo optické mřížky. 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<sup>1</sup>, který zkoumal vlastnosti barevných paprsků vycházejících z hranolu.

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 Wollastonovu hypotézu o hranicích barev vyvrátil.

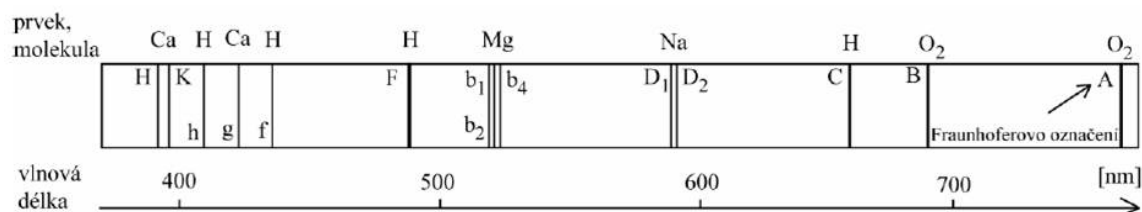
Dnes víme, že za barvu předmětů vděčíme odrazu světla. Jestliže má předmět modrou barvu, pohltí jeho povrch všechno světlo kromě jediného – světla o vlnové délce modrého světla, které odrazil. Bílé světlo je samozřejmě tvořeno všemi barvami, zastoupené jsou rovnoměrně všechny složky spektra, všechny barvy, které vidíme při rozkladu například hranolem. Bílý předmět je tedy takový, který odrazí většinu světla bez toho, aby některou složku (barvu) pohlcovал více než jinou. Černý předmět naopak většinu dopadajícího světla pohltí<sup>2</sup>.



Obrázek 8.1: 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)“.

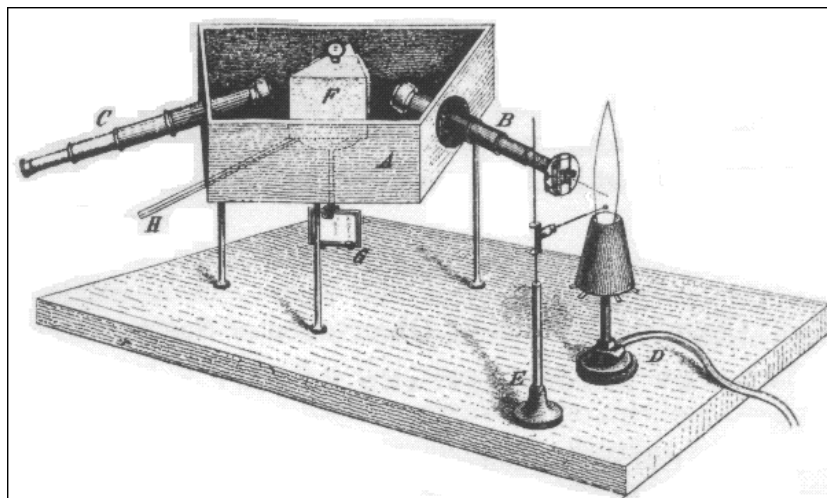


Obrázek 8.2: Fraunhoferovy čáry ve slunečním spektru. Převzato z Pokorný (2006).

## 8.1 Počátky astrofyziky

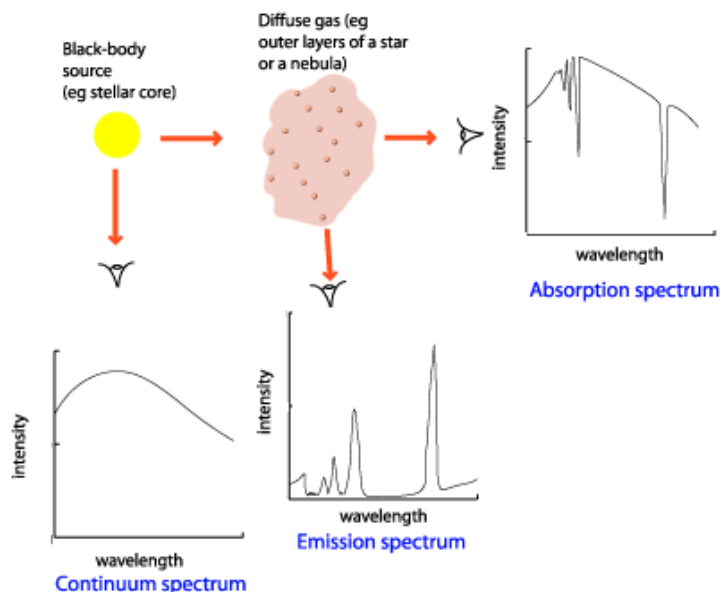
Na Fraunhoferovy spektroskopické výzkumy navázali v polovině 19. století Gustav Robert Kirchhoff a Robert Bunsen. Bunsen studoval charakteristické barvy zahříváných prvků, ale nijak systematicky. Kirchhoff mu v létě 1859 zkusil vytvořit hranolová spektra těchto barev. Do října téhož roku pak zkonstruovali spektroskop (viz obr. 8.3), s nímž 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 8.3: Spektroskop Kirchhoffa a Bunsena, A dřevěný box, B,C dalekohledy, na konci B je štěrbin, D je Bunsenův hořák, E stojánek s platinovým drátkem ve spirále, kde byl umístěn vzorek, F hranol, G zrcátko, H tyčka, která sloužila k otáčení hranolu. 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 hvězdy jsou složeny



Obrázek 8.4: Obrázek ukazuje, jak tentýž zdroj produkuje spojité spektrum (kontinuum) a čárová spektra emisní i absorpční. Převzato z Kaler (1989) a upraveno.

ze stejných prvků, jaké 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 pořízených pomocí spektroskopu. V následujícím roce začal kněz Pietro Angelo Secchi<sup>4</sup> systematicky studovat hvězdná spektra a jako první se pokusil o jejich 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.

Vraťme se ještě v čase do 25. května 1842. tehdy se v Praze konala schůze Královské české společnosti nauk, na níž vystoupil s přednáškou „O barevném světle dvojhvězd a některých jiných hvězd na obloze“ tehdejší profesor matematiky na pražské technické univerzitě, rakouský matematik a fyzik Christian Andreas Doppler. V přednášce a jejím přepisu (Doppler, 1842) popsal změnu barvy světla zdroje, pokud se vůči sobě pohybují zdroj světla a pozorovatel. Dopplerův jev patří mezi nejvýznamnější fyzikální jevy. Je využíván nejen v astronomii, ale v celé řadě vědních i technických oborů. S Dopplerovým jevem se setkáme i v běžném životě. Například houkající siréna záchranky bude mít vyšší tón, když se k nám blíží, a nižší, až se od nás bude vzdalovat.<sup>5</sup>

<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.

<sup>5</sup>Ne všichni s Dopplerem souhlasili. Jedním z nejhlasitějších kritiků byl Christoph Hendrik Diederot Buys Ballot, který dokonce zorganizoval pokus, který měl Dopplerův jev vyvrátit. Na železniční vůz umístil skupinu hudebníků, kteří za jízdy hráli, a na nástupišti byli posluchači s cvičeným sluchem, kteří měli potvrdit, že k žádné změně tónů při přibližování a vzdalování hudebníků nedošlo. Výsledek

Princip Dopplerova jevu si můžeme přiblížit následujícím příkladem. 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

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = \frac{T'}{T} = 1 + \frac{v_r}{c}. \quad (8.1)$$

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

Buyss Ballot dokázal platnost Dopplerova jevu už roku 1845, ale v astronomii jej ověřil až Huggins (1867) v práci, v níž na základě spektroskopických pozorování diskutuje, zda se sledované objekty pohybují od Země nebo k Zemi.

Dopplerův jev má dalekosáhlé důsledky při zkoumání vesmíru. Umožňuje nám určovat, 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.

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>6</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 8.5), 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

byl přesně opačný než Buys Ballot zamýšlel. Změna výšky tónů byla zcela zřetelná a Dopplerův jev tak byl potvrzen. Dlužno říci, že princip Dopplerova jevu je v pořádku, ale jeho aplikace na barvy dvojhvězd, jak popisoval sám Doppler, nikoli.

<sup>6</sup>Poprvé byl termín spektrograf použit v roce 1884.

hvězd (Maury & Pickering, 1897). Všechny výsledky byly v letech 1918-1924 publikovány v katalogu Henryho Drapera<sup>7</sup> (Cannon & Pickering, 1993).



Obrázek 8.5: Fotografie zachycuje E. Pickeringa a jeho ženský tým na Harvard College Observatory 13. května 1913. Zdroj: Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics.

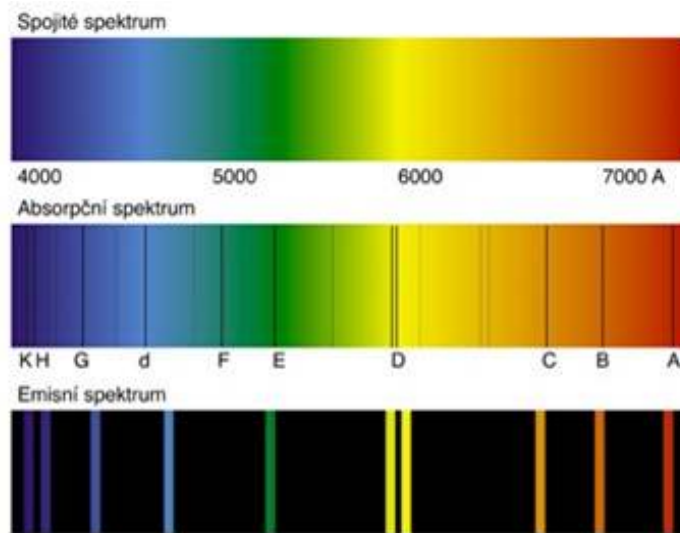
## 8.2 Spektroskopie hvězd

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.

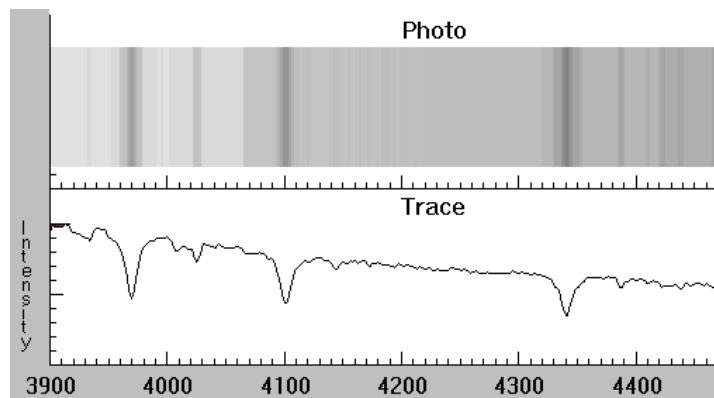
Spektrum hvězdy získáváme pomocí spektroskopu, resp. spektrografu rozkladem světla buď pomocí optického hranolu nebo spektrální mřížky – skleněné destičky, v níž je zpravidla až několik set rovnoběžných vrypů na jednom milimetru. Vzniklé spektrum je ve spektrografu zaznamenáno. Až do sklonku 20. století byla záznamovým médiem klasická fotografie, ale dnes už se spektrum zaznamenává elektronicky pomocí citlivých CCD kamer. Na snímku se objeví naexponovaný světlý proužek představující zaznamenané spojité spektrum (kontinuum) a v něm lze nalézt tmavší (absorpční) čáry, případně i světlé (emisní) spektrální čáry (viz obr. 8.6 a 8.7).

V dolní části obrázku 8.7 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

<sup>7</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 8.6: Typy spekter. Spojité, absorpční, emisní. Převzato z <http://astronomia.zcu.cz>.



Obrázek 8.7: 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, <http://www3.gettysburg.edu/marschal/clea/cleahome.html>.

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 me-



Tabulka 8.1: Spektrální třídy, povrchové teploty a odpovídající barvy 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
L,T,Y	<3 000 K	červená	červení a hnědí trpaslíci

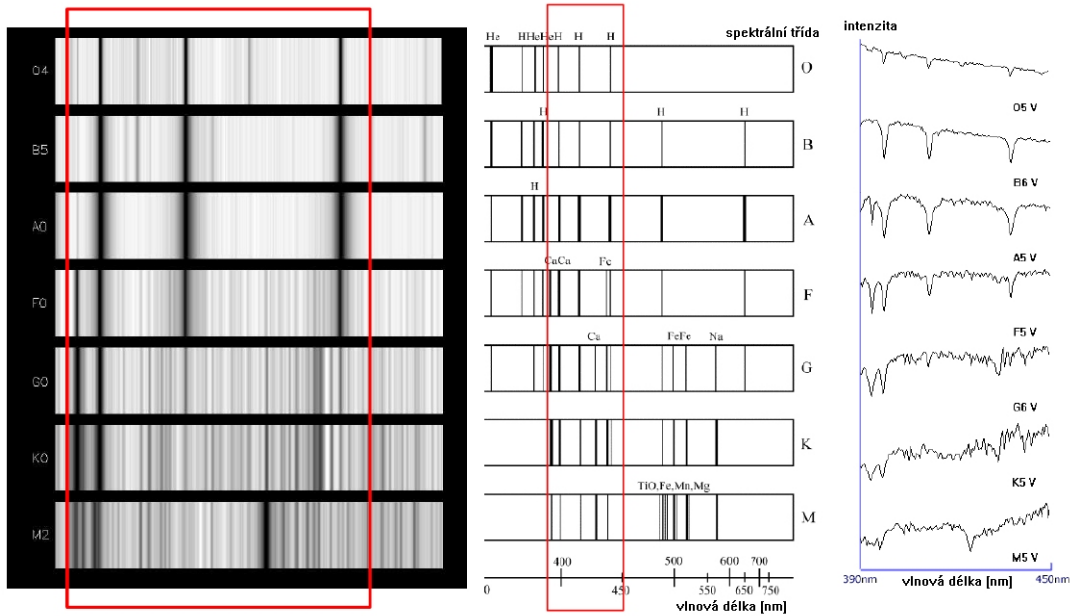
Spektrální třída	Charakteristické čáry
O	ionizované a neutrální helium, slabý vodík
B	neutrální helium, silnější vodík
A	silný vodík
F	slabší čáry vodíku, ionizované kovy (prvky těžší než hélium)
G	velmi slabý vodík, ionizované a neutrální kovy
K	občas velmi slabý vodík, neutrální kovy, slabé molekulové 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

tody natolik zpřesnily, že dokonce můžeme nejen odhalovat jinak skryté planety v cizích hvězdných soustavách, ale i studovat chemické složení exoplanetárních atmosfér.

## 8.3 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. Edward Charles 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 Antonia Mauryová ve svých 22 skupinách poprvé prohodila dva typy, dnešní B dala před A. V roce 1901 Annie Jump Cannonová revidovala předchozí sekvenci typů a vypustila řadu písmen. Vznikla dobře známá posloupnost O — B — A — F — G — K — M. V roce 1912 pak přidala 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),



Obrázek 8.8: Harvardská spektrální klasifikace. Převzato z <http://cde.vwc.edu>, Pokorný (2006), CLEA Project a upraveno.

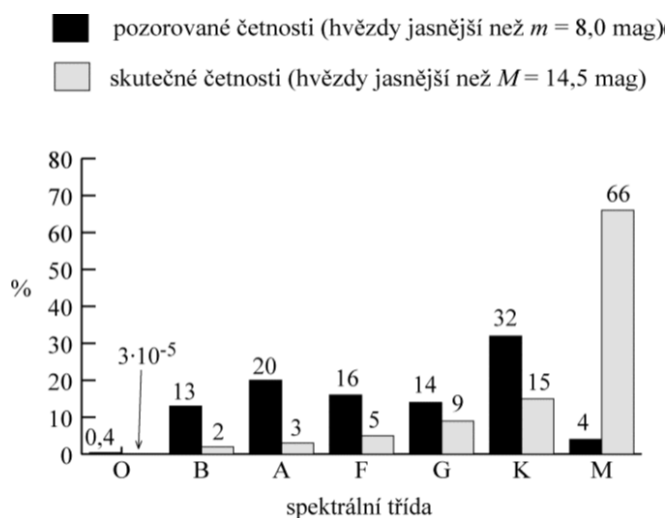
nebo železných, kam bylo zařazeno Slunce. V té době ale ještě nebylo známo, jak spektra hvězd vznikají. Dnes víme, že rozhodující pro vzhled spekter jsou fyzikální podmínky v místě vzniku záření. A klíčovým parametrem je teplota. V době vzniku Harvardské klasifikace nebylo ještě spojení spektrálních tříd s teplotou zřejmé. To prokázala až další z harvardských žen Cecilia Payne, později Payne-Gaposchkinová (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 8.1).

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>8</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).

Spektrální klasifikace se dnes běžně používá, ale je třeba mít na paměti, že informace, které nám poskytuje o okolním vesmíru mohou být zkreslené vlivem výběrového efektu. Na obrázku 8.9 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.



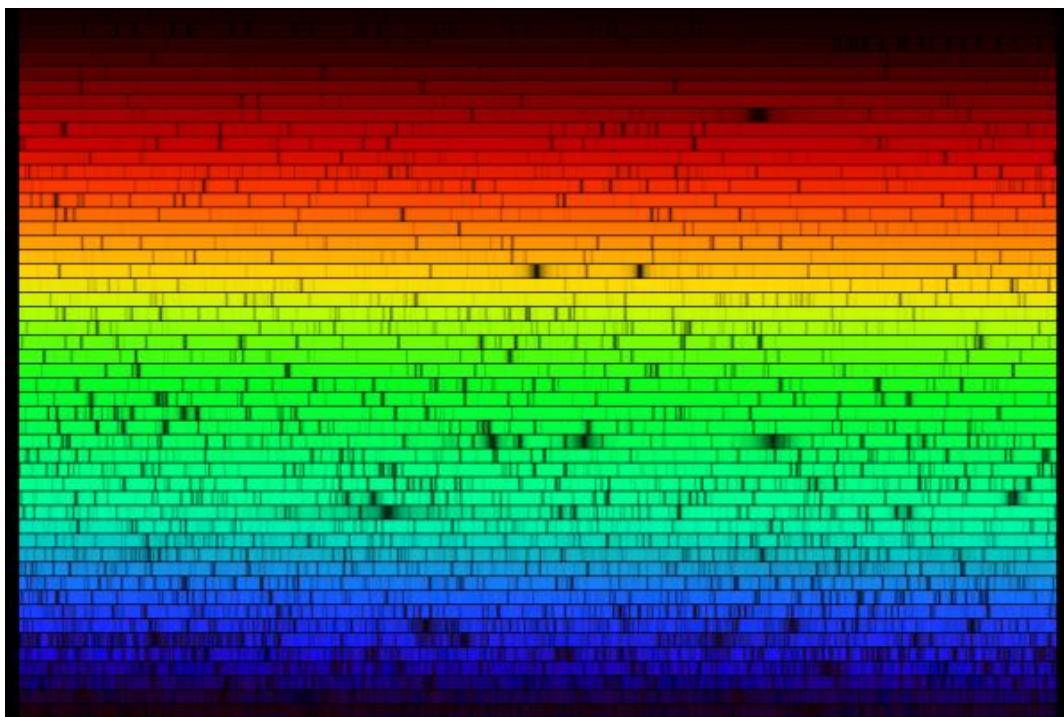
Obrázek 8.9: Četnosti různých spektrálních tříd. Převzato z Pokorný (2006).

## Použitá a 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. Pojednání České Královské české společnosti nauk, řada V, sv. 2, Praha  
 Huggins, W., & Miller, W. A. 1862, Royal Society of London Proceedings Series I, 12, 444

<sup>8</sup><http://astro.wsu.edu/worthey/astro/html/mnemonic-trditional.html>,  
<http://www.astro.sunysb.edu/fwalter/AST101/mnemonic.html>

- Huggins, W. 1867, Royal Society of London Proceedings Series I, 16, 382 (Further 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)
- Kleczek, J. 2002, Velká encyklopedie vesmíru, Academia Praha, 582 str.
- 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, online <http://www.vesmir.cz/clanek/jan-marek-marci-z-lanskrouna>



Obrázek 8.10: Sluneční spektrum pořízené na McMath-Pierceově sluneční observatoři. Zdroj: Nigel Sharp (NOAO), FTS, NSO, KPNO, AURA, NSF. Astronomický snímek dne 29. 6. 2003.

## 9 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>

S trochou nadsázky by se dalo říci, že 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 pochází ze 4. století př.n.l., kdy sestavil první hvězdný katalog čínský astronom Ši-Šen. Známější je (zejména pro Evropany) až Hipparchův katalog z roku 129 př.n.l. Na základě vlastních pozorování v něm uvedl nejen polohu 1080 hvězd v ekliptikálních souřadnicích, ale i to, jak jsou jasné a v kterém souhvězdí<sup>2</sup> se nacházejí. Kolem roku 150 našeho letopočtu vydal Claudios Ptolemaios kompendium astronomických znalostí své doby – *Almagest*. V něm 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 stokrát jasnější než druhá. Jak jsme k tomu dospěli? Z předchozího vyplývá, že to vše mají na svědomí Hipparchos, Ptolemaios a také Norman Pogson.

### 9.1 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 Ernst Heinrich Weber a psycholog Gustav Theodor 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. Při pozorování hvězd budou v důsledku Weberova-Fechnerova zákona rozdíly našich pocitů (vjemů) stejné, jestliže se hvězdy budou lišit vždy o jednu třídu z Hipparchova, respektive Pto-

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

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

Tabulka 9.1: 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
Nej slabší hvězdy viditelné očima	6-7 mag
Nej slabší objekty pozorovatelné dalekohledem na Zemi	28 mag
Nej slabší objekty pozorovatelné Hubbleovým kosmickým dalekohledem	31,50 mag
Nej slabší objekty pozorovatelné plánovaným dalekohledem E-ELT	36 mag

lemaiova katalogu. Při pozorování hvězd vnímáme jejich **jasnost**. Z hlediska 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 čtvereční ( $\text{lm}/\text{m}^2$ ), tedy 1 lux (lx). Vraťme se ale k aplikaci Weberova-Fechnerova zákona ve fotometrii. Matematicky ji lze zapsat ve tvaru

$$j_1/j_2 = j_2/j_3 = j_3/j_4 = \dots = \rho, \quad (9.1)$$

kde  $j_i$  jsou jasnosti  $i$ -té hvězdy a  $\rho$  je kvocient geometrické řady. Almagest včetně Ptolemaiova katalogu hvězd byl svým způsobem biblí astronomie po dlouhá staletí. 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 N. 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

$$j_m = j_n \rho^{(n-m)}, \text{ resp. } m - n = -2,5 \log \frac{j_m}{j_n}, \quad (9.2)$$

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 (9.2)

$$m = -2,5 \log \frac{j}{j_0}, \quad (9.3)$$

kde  $j_0$  je jasnost objektu s nulovou hvězdnou velikostí ( $m_0 = 0$  mag), který působí osvětlení  $2,54 \cdot 10^{-6}$  lx. Pogsonova rovnice, hvězdná velikost, magnituda a jasnost jsou jedny z nejvýznamnějších 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 9.1). Dávejte si také pozor a nezaměňujte název

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

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 9.2 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

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log \frac{F_1}{F_2}, \quad (9.4)$$

respektive

$$\frac{F_1}{F_2} = 10^{-0,4(m_1 - m_2)}. \quad (9.5)$$

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 určenou (integrovanou) 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.

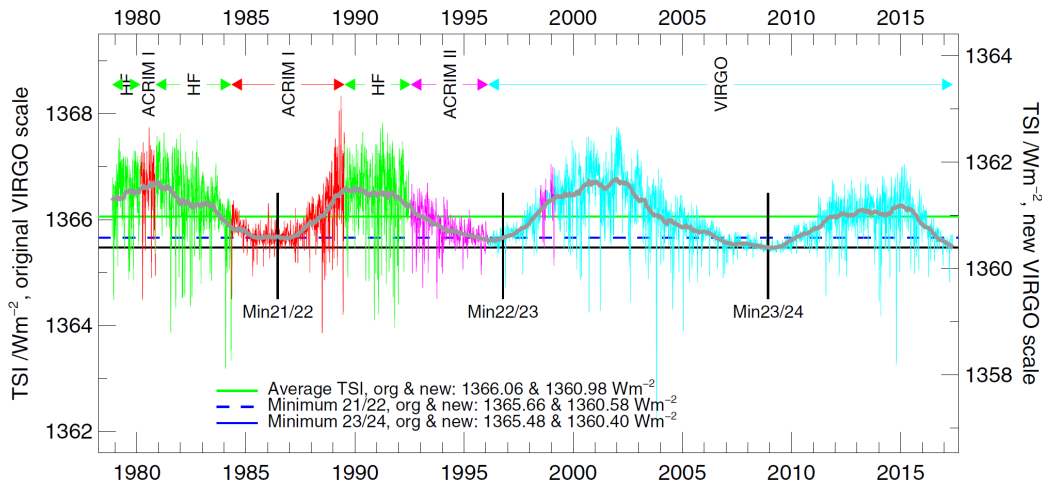
Pozorovaný zdroj vyzáří do svého okolí na všech vlnových délkách za 1 sekundu celkovou energii, kterou označujeme jako **zářivý výkon zdroje**  $L$ . Jeho hodnotu udáváme ve wattech. Jestliže do vzdálenosti  $r$  od zdroje záření umístíme kolmo na směr přicházejících paprsků plochu  $1 \text{ m}^2$ , proteče touto plochou za jednu sekundu množství energie  $F$ , která se rovná celkové hustotě toku dopadajícího záření ve wattech na metr čtvereční a tedy bolometrické jasnosti. Pro zářivý výkon zdroje  $L$  pak lze psát

$$L = 4\pi r^2 F. \quad (9.6)$$

Principiálně lze bolometrická měření vykonávat jen vně zemské atmosféry, protože ta určité oblasti elektromagnetického záření blokuje. To se samozřejmě týká i měření hustoty toku záření našeho Slunce. Měření prováděná na povrchu Země závisí na řadě faktorů, například denní, roční době, 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 na oběžné dráze kolem Země, získáme bolometrickou jasnost Slunce, které říkáme **sluneční konstanta**. Její střední hodnota  $K$  se udává přibližně  $1367 \text{ W m}^{-2}$ . Skutečná hodnota kolísá v důsledku změn

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

na Slunci, tzv. slunečního cyklu, ale i v důsledku eliptické trajektorie Země kolem Slunce. První měření sluneční konstanty ale nejsou omezena až na kosmický věk lidstva. Množství dopadajícího slunečního záření měřili na zemském povrchu v první polovině 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. Je zřejmé, že nejpřesnější měření lze získat mimo atmosféru a o tato měření se stará hned několik družic (viz obrázek 9.1). Dlužno říci, že pozemská měření vykazují oproti kosmickým odchylky a nepřesnosti zhruba 2%.



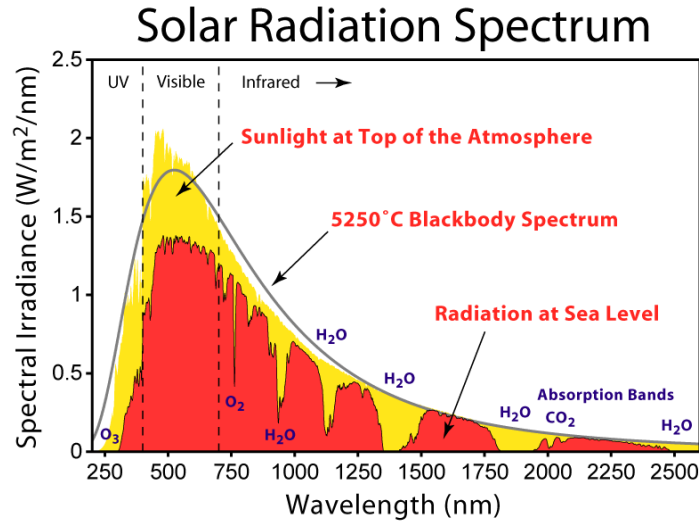
Obrázek 9.1: Měření sluneční konstanty na družicích s využitím různých přístrojů v letech 1979-2017. Změny odpovídají jedenáctiletému cyklu aktivity Slunce. Zřetelné je prodloužení minima sluneční činnosti kolem roku 2009. Převzato z World radiation Center (<http://www.pmodwrc.ch>).

## 9.2 Absolutní jasnost, modul vzdálenosti

Zaznamenané jasnosti, ať již v určité části spektra nebo bolometrické, popisují pozorovanou jasnost, ale bohužel neumožňují porovnávat mezi sebou zářivé výkony jednotlivých těles. Zjištěné hodnoty totiž závisejí na vzdálenosti zdroje. Abychom mohli jasnosti snadno poměřovat, umístíme myšlenkově všechny objekty do stejné nominální vzdálenosti, běžně 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

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log \frac{F_1}{F_2} \quad (9.7)$$





Obrázek 9.2: Spektrum slunečního záření na vrcholu zemské atmosféry (žlutá oblast) a na mořské hladině (červená oblast) ve srovnání se zářením absolutně černého tělesa o teplotě 5 525 K, což přibližně odpovídá teplotě sluneční fotosféry. Jak záření prochází zemskou atmosférou, jsou některé jeho části pohlcovány. Dodatečné světlo je naopak výsledkem určitého přerozdělení způsobeného Rayleighovým rozptylem. Zdroj: Robert A. Rohde, Global Warming Art project.

dosadíme jasnosti ( hustoty zářivého toku)  $F$  ze vztahu 9.6. Pak

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log \frac{\frac{L}{4\pi r_1^2}}{\frac{L}{4\pi r_2^2}}. \quad (9.8)$$

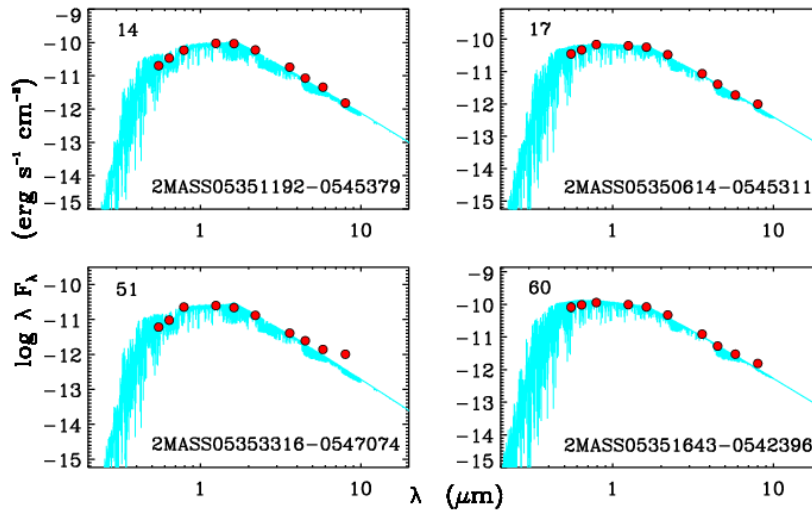
Ale jedná se o jeden objekt se zářivým výkonem  $L$ , který budeme sledovat ze dvou vzdáleností. Řekněme, že  $r_2 = 10$  pc,  $r_1$  je nějaká obecná vzdálenost  $r$ . Pak  $m_1$  je pozorovaná hvězdná velikost  $m$  ze vzdálenosti  $r$  a  $m_2$  odpovídá absolutní hvězdné velikosti  $M$ . Po dosazení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

$$m - M = -5 \log \pi - 5 = 5 \log r - 5, \quad (9.9)$$

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

### 9.3 Barvy v astronomii

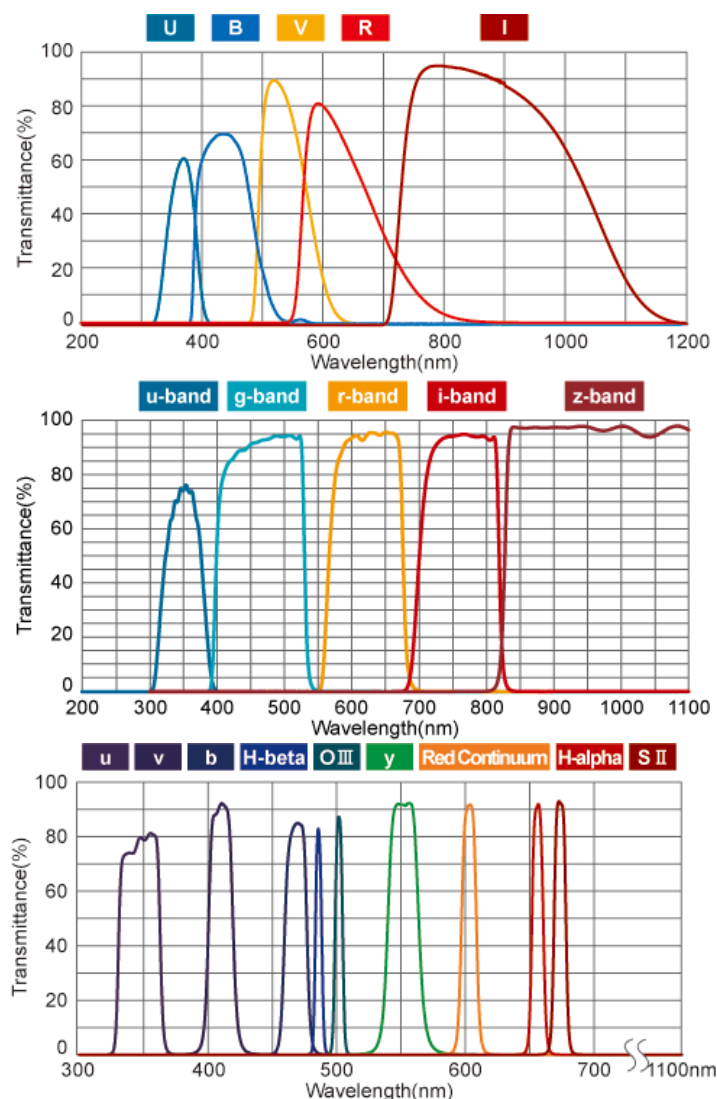
Jedním z hlavních úkolů astrofyziky je studovat rozložení vyzážené energie v závislosti na vlnové délce nebo frekvenci záření kosmických objektů. Jenže pozorovat tyto objekty v celém rozsahu elektromagnetického spektra je, jak už víme, velmi náročné a na zemském povrchu v principu nerealizovatelné. Navíc většinou máme k dispozici jen vybavení pro fotometrii. Otázkou tedy je, zda vůbec můžeme požadovanou informaci



Obrázek 9.3: Rozložení energie ve spektru (SED; Spectral energy distribution) čtyř hvězd z katalogu 2MASS. Červené body představují výsledky fotometrických měření, světle modře je zobrazeno uměle spočtené spektrum hvězd, které nejlépe odpovídá fotometrickým pozorováním. Zdroj: Frasca et al. (2009).

o rozložení vyzařované energie studovaného objektu získat fotometrickým měřením ze zemského povrchu. A pokud ano, jak nejnázorněji to provést. Na obrázku 9.2 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 zrekonstruovat celkovou závislost energie (vyzařené objektem) na vlnové délce záření (viz obrázek 9.3). Kvazibolometrická měření v celém rozsahu citlivosti přístroje, například měření pomocí CCD kamery bez filtru jsou v tomto případě spíše na závadu.

**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 9.4). 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 9.4). Hvězdné velikosti v jednotlivých barvách, oblastech spektra podléhají stejným zákonitostem jako hvězdná velikost vizuální. Pogsonova rovnice zde platí zcela analogicky. Rozdíly hvězdných velikostí téhož



Obrázek 9.4: 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>.

objektu zjištěných ve dvou různých filtrech označujeme jako **barevný index**<sup>5</sup>, například barevný index  $(B - V) = m_B - m_V = M_B - M_V$ .

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 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

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

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 přibližně  $+1$  mag i větší.

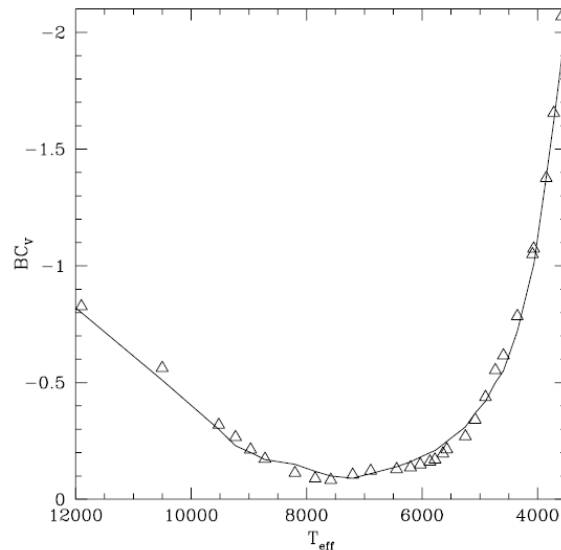
Barevný index objektu nezávisí na jeho vzdálenosti. Pro vzdálené objekty ale může být hodnota ovlivněna tzv. **mezihvězdnou extinkcí**, kdy je část záření pohlcena materiálem v mezihvězdném prostředí mezi zdrojem a námi. V optické části spektra je extinkce zhruba úměrná převrácené hodnotě vlnové délky světla, a proto způsobí, že se nám 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

$$E_{B-V} = (B - V)_{\text{pozorovaný}} - (B - V)_{\text{skutečný}}. \quad (9.10)$$

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

$$BC = m_{\text{bol}} - m_{\text{viz}} = M_{\text{bol}} - M_{\text{viz}}. \quad (9.11)$$

Bolometrická korekce je přibližně nulová pro hvězdy spektrální třídy F ( $T_{\text{ef}} = 6800$  K). Všechny ostatní hvězdy jsou jasnější bolometricky než vizuálně. Bolometrická korekce



Obrázek 9.5: 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).

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 9.5. Pro některé typy hvězd nabývá korekce hodnoty až  $-4$  mag, takže určitě není zanedbatelná! Ze vztahu 9.11 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.

## Použitá a 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  
Kleczek, J. 2002, Velká encyklopedie vesmíru, Academia Praha, 582 str.  
Kopp, G., Krivova, N., Wu, C. J., & Lean, J. 2016, Solar Physics, přijato  
Lejeune, T., Cuisinier, F., & Buser, R. 1997, A&A Suppl., 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

## 10 Optická astronomie – přístroje

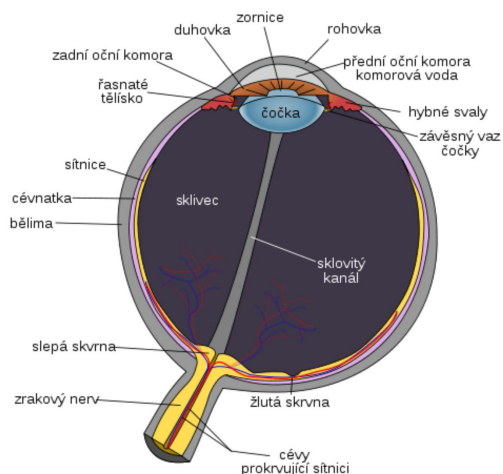
Optická astronomie se zabývá sledováním vesmírných objektů zejména ve vizuální oblasti spektra. Po celá tisíciletí byl základním přístrojem astronoma jeho zrak. Teprve v novověku začal člověk zrak „posilovat“ použitím čoček, dalekohledů a od 19. století i různých detektorů a záznamových zařízení. V současnosti se oblast optické astronomie mírně rozšířila. Stejně přístroje je možné využívat i pro 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 však pozorování silně ovlivňuje a někdy dokonce znemožňuje. Proto se nejlepší observatoře staví vysoko v horách a nebo se umísťují ještě výše – až do kosmického prostoru. Ale než se dostaneme ke kosmickým observatořím, je třeba porozumět fungování a základním principům i jednoduchých astronomických přístrojů.

### 10.1 Oko – nejcennější přístroj astronoma

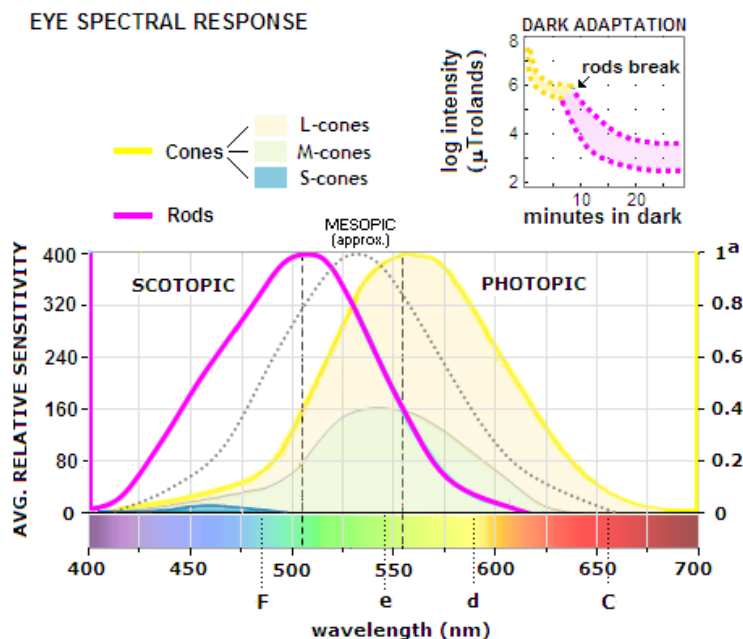
Když se zeptáte návštěvníků hvězdárny: „Co pokládáte za nejcennější přístroj astronoma – a) dalekohled, b) počítač, c) něco jiného?“. Většina zpravidla odpoví, že dalekohled, několik z nich uvede i počítač. Třetí možnost nezvolí nikdo. A přece. Odpověď c) je správně. Nejcennějším přístrojem astronoma je lidské oko!

I když většina odborníků odmítá ve svých pracích používat vizuální pozorování, tedy pozorování prováděná pouhými očima případně s pomocí dalekohledu, i oni jsou uchváteni 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 10.1). V přední průhledné části se nachází rohovka a za ní duhovka, která reguluje množství světla dopadajícího do oka. Tmavý



Obrázek 10.1: Lidské oko. Převzato z <http://techmania.cz/edutorium>.



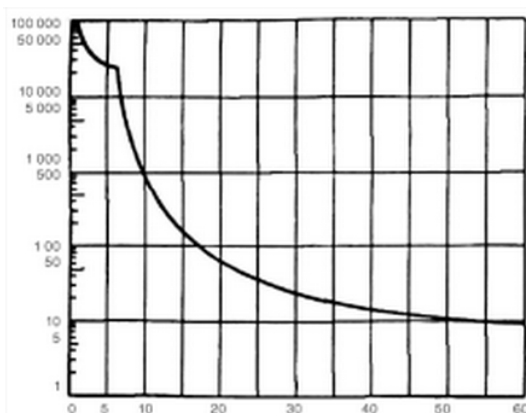
Obrázek 10.2: Spektrální citlivost oka. Vrchol citlivosti čípků je 200krát nižší než vrchol citlivosti tyčinek. Vpravo nahoře: Za špatných světelných podmínkách roste citlivost čípků 30krát až 100krát do doby zhruba 10 minut (čím větší je tma, tím rychleji předávají čípků svoji funkci tyčinkám). V okamžiku, 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>.

otvor uprostřed duhovky se nazývá zornice (zornička, panenka, pupila). Její průměr se mění podle intenzity osvětlení. Ve dne za intenzivního slunečního světla je jen 2 až 4 milimetry, v noci při nízkém osvětlení 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 dvojjvypuklá 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  $1^\circ - 2^\circ$  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 — čípků a tyčinek.<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 je rozmístěno dále od optické osy oční čočky, nejvíce je jich asi  $20^\circ$  od ní. Čípků se uplatňují zejména

<sup>1</sup>Výsledky řady výzkumů 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.

při denním (fotopickém) vidění, zatímco tyčinky především při nočním (skotopickém) vidění (viz obrázek 10.2).

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.



Obrázek 10.3: Typická křivka adaptace na tmu. Na ordinátě (osa y) osvětlení testovací plochy v mikroluxech, na abscise (osa x) trvání adaptace v minutách. Převzato z Boguszaková (2003).

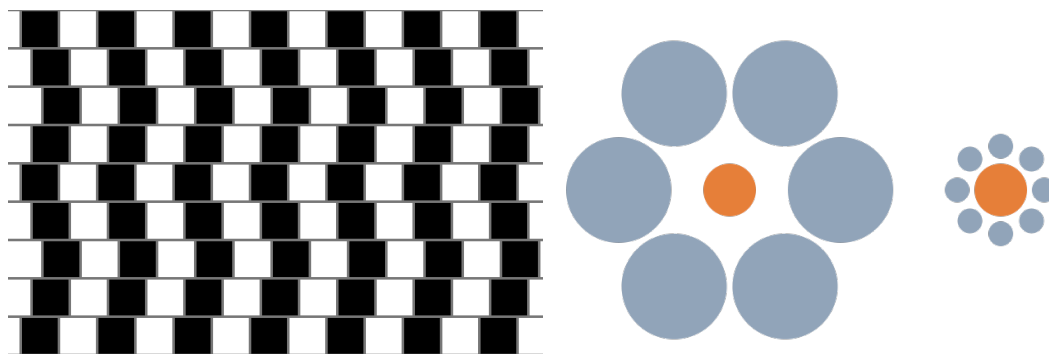
Na noční vizuální pozorování je třeba se řádně připravit. Abychom plně využili schopností oka, musí se na pozorování ve tmě adaptovat. Úplná adaptace trvá necvičenému oku až 60 min (viz obrázek 10.3), ale lze ji zrušit silným osvětlením už během pár sekund.<sup>3</sup> Pokud potřebujete při nočním pozorování 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 10.2). 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 tento proces může negativně ovlivnit výsledky pozorování.<sup>4</sup> 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

<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 vizuální fotometrii například v Zejda et al. (1994).





Obrázek 10.4: Optické klamy. Převzato z <http://en.wikipedia.org>.

sledovaný objekt přímo, ale trochu vedle něho. Je to do jisté míry věc cviku, podobně jako pozorování dalekohledem. Necvičené oko neuvidí tolik podrobností například při pozorování Jupitera, 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 *mezní hvězdná velikost*, která vymezuje, jak slabé hvězdy může pozorovatel pouhými 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<sup>12</sup>! Pro detektory, jako jsou fotoelektrické fotometry nebo CCD kamery, je to zatím nedostižné. Nicméně, přesto se v současnosti vizuálně pozoruje už jen výjimečně a spíše při nedostatku jiných možností a na amatérské bázi. Pokud však jsou vizuální pozorování například proměnných hvězd, meteorických rojů, Slunce dostatečně kvalitní, mohou i dnes přispět při studiu vesmíru.

I sebelepší vizuální pozorovatel bývá však někdy oklamán. Věci nejsou takové, jak na první pohled vypadají. Určitě znáte mnoho obrázků s podobnými optickými klamy jako na obrázku 10.4. 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 jeho akomodace, adaptace 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. Právě proto je i v našich zeměpisných šířkách více UV záření. Je třeba si chránit oči tmavými brýlemi s UV filtrem, případně si alespoň oči clonit kloboukem, kšiltovkou. 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!

## 10.2 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 zařízení vybavená 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 v Londýně. 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.

Ve 12. století 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 učence, 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 jejímž jednom konci byla čočka vydutá a na 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 Alkmaaru. Je tu však ještě třetí osoba – Zacharias Jansen, který měl údajně prodávat dalekohledy na tradičních trzích v září roku 1608 ve Frankfurtu nad Mohanem. Jeho prvenství však někteří autoři zpochybňují. Dochovalo se ale i svědectví Zachariova syna, který odpřisáhl, 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 popsál 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. Takové „keplerovské“ dalekohledy sestrojili až roku 1630 Christopher Scheiner a Antonín Maria Šírek (Schyrl, Schyrleus) z Reity.

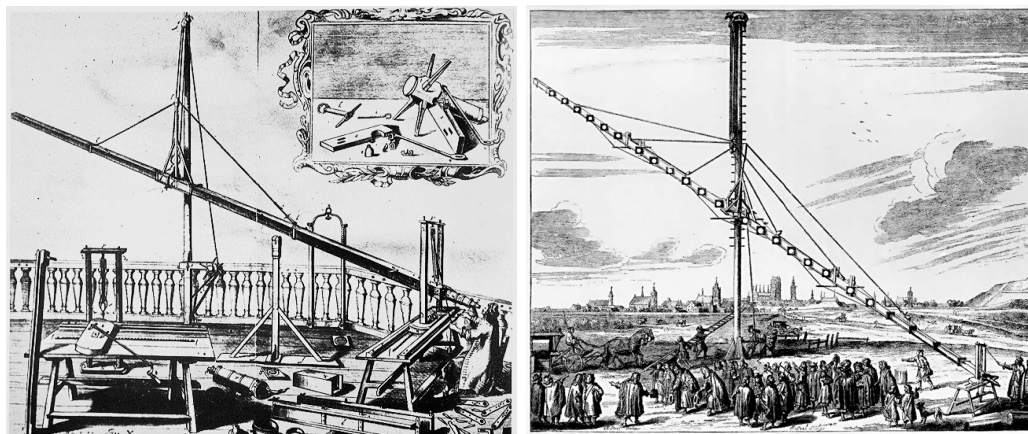


Obrázek 10.5: Nejstarší známý obrázek dalekohledu. Giovanni Battista Della Porta vložil tento náčrt do dopisu v srpnu 1609.

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 Jupitera. Bohužel, sklo čoček používaných v dalekohledech bylo velmi špatné kvality s barevnou a sférickou vadou (viz kapitola 10.4.4). Astronomové chtěli 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 Heveliov dalekohled s ohniskovou vzdáleností objektivu 18 metrů nebo jeho tzv. „vzdušný dalekohled“ bez tubusu o délce 60 metrů (viz obrázek 10.6).

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 skládací námořní dalekohled), nebo latinsky „perspicillum“. Název „telescopium“ Galileovi navrhl po předvedení přístroje jeho přítel Federico Cesi v roce 1611.



Obrázek 10.6: Dalekohledy Johanna Hevelia o délce 60 a 150 stop (46 m). Autorem je sám Johannes Hevelius. Převzato z jeho knihy „Machina coelestis“ (1673).

Zcela jinou cestu představovala myšlenka využít jako objektivu odraznou plochu. Prvenství je připisováno Isaacu Newtonovi, který měl v roce 1668 sestavit 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 astronomických 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.

### 10.3 Funkce dalekohledů a jejich typy

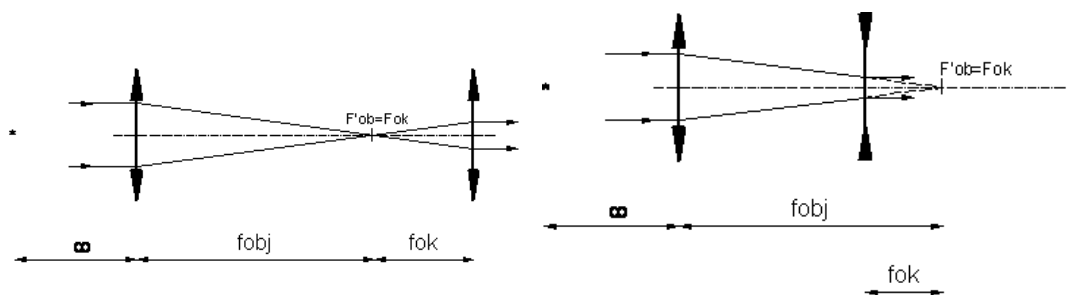
Čas od času lze v novinách v rubrice inzerátů narazit na inzerát, v němž je nabízen k prodeji hvězdařský dalekohled, zvětšující řekněme 150krát, a to bez uvedení dalších parametrů. Z takového inzerátu je okamžitě zřejmé, že jej podával laik, který se v astronomii a dalekohledech vůbec nevyzná. Chybí tam přinejmenším jeden zásadní údaj, a to

průměr objektivu. Právě jeho průměr ovlivňuje dvě zásadní vlastnosti dalekohledu. Dalekohled je vlastně sběrač světla. **Úkolem dalekohledu je posbírat a 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. Budeme-li tedy lineárně zvětšovat průměr objektivu, poroste kvadraticky množství světla dalekohledem zachycené. Druhou základní charakteristikou dalekohledu je **úhlová rozlišovací schopnost.** Meze rozlišovací schopnosti dalekohledu si později přiblížíme v kapitole 10.4.3. Obě vlastnosti platí pro všechny typy dalekohledů. Podle jejich konstrukce rozlišujeme dalekohledy:

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

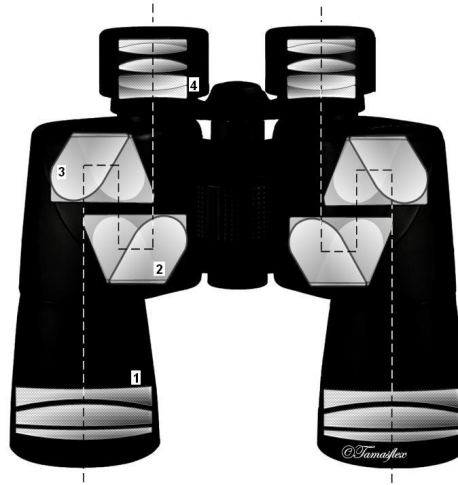
### 10.3.1 Čočkové dalekohledy (refraktory)

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 konstrukci Keplerova dalekohledu se dvěma spojnými spojkami (na místě objektivu i okuláru) dává menší zorné pole i při stejných rozměrech a dosahuje se i menšího zvětšení. Obraz v Galileově 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 10.8).



Obrázek 10.7: 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  $f_{ok} < f_{obj}$ . 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, tedy otočený kolem optické osy o  $180^\circ$ .



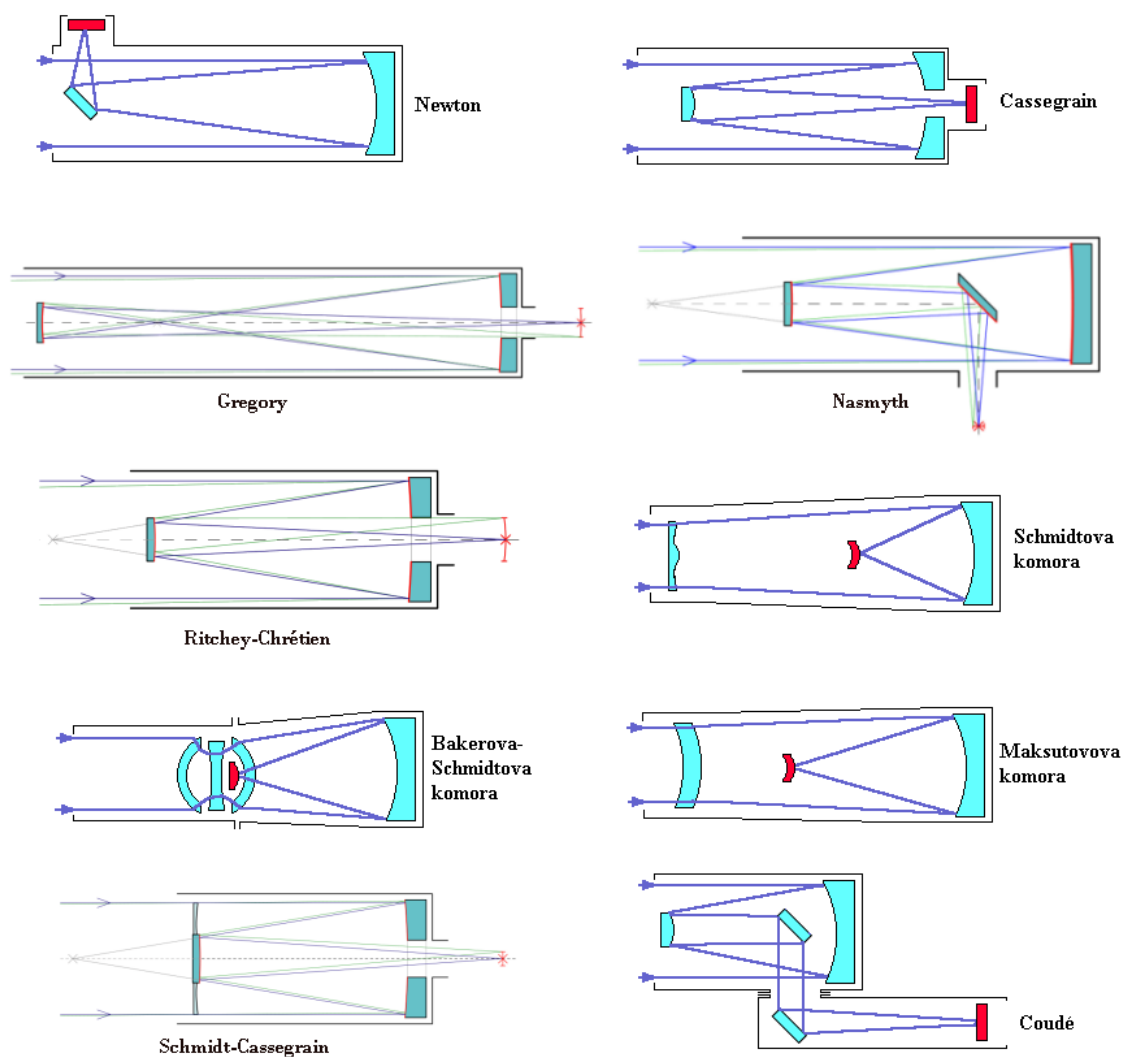
Obrázek 10.8: Schéma triedru. Převzato z wikipedie.

Čočkové dalekohledy stále najdete v nabídce prodejen dalekohledů. Současné refraktory mají už většinou zkorigované optické vady (viz kapitola 10.4.4), 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 navíc i ty největší refraktory patří dnes už mezi „malé“ dalekohledy.

### 10.3.2 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. Navíc nové materiály nahradily u velkých přístrojů používané sklo. K pokovení se používá většinou hliník 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 (obrázek 10.9a) má objektiv z jediného dutého parabolického 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 jedno-



Obrázek 10.9: Schémata zrcadlových a kombinovaných dalekohledů. Převzato ze stránek <http://web.quick.cz/frantabilek/> a <http://en.wikipedia.org>.

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

Velmi rozšířený je i systém Cassegrain (obrázek 10.9b), který také obsahuje dvě zrcadla. 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 při současném zkrácení tubusu dalekohledu a také snadná přístupnost ohniska za dalekohledem.

O podobném Gregoryho systému (obrázek 10.9c), který 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 různé modifikace Cassegrainova systému. James Nasmyth přidal do soustavy další zrcátko (obrázek 10.9d), které vyvádí světlo po odrazu od sekundárního zrcátka 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-Chrétien<sup>7</sup> (obrázek 10.9e). Vynalezli jej na počátku 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 10.4.4).

### 10.3.3 Kombinované dalekohledy

Ve dvacátém století byly refraktory postupně nahrazovány reflektory. Jejich hlavní nevýhoda – malé zorné pole však byla protikladem k potřebám a požadavkům fotografických přehlídek oblohy. S řešením přišel roku 1930 Bernhard Schmidt. Zkombinoval zrcadlový dalekohled s čočkovým. *Schmidtův dalekohled* (Schmidtova komora) (obrázek 10.9f) 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 úhlových 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 anebo pomocným konvexním zrcadlem (Bakerova-Schmidtova komora) (obrázek 10.9g). Schmidtův dalekohled je poměrně rozšířený, vyznačuje se velkým relativním otvorem objektivu při velkém zorném poli a používá se výhradně na fotografování anebo 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* (obrázek 10.9h) 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. Pro zmenšení ztrát světla odrazem se optické plochy pokrývají antireflexní vrstvou, která snižuje procento 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) (obrázek 10.9i),

<sup>7</sup>Čti „riči-krétién“.



který má na rozdíl od klasického „cassegaina“ kulové primární zrcadlo a korekční desku. Pro malé rozměry a rozumný poměr cena/výkon je velmi oblíben mezi amatérskými astronomy zejména ve Spojených státech.

### 10.3.4 Speciální dalekohledy

Zvláštním typem zrcadlových dalekohledů je systém coudé (obrázek 10.9j). Podobně jako Nasmythův systém řeší otázku, jak na dalekohled připevnit rozměrné a těžké přístroje, zejména spektrografy. Coudé řešení navrhl Arthur Cowper Ranyard. Název **coudé**<sup>8</sup> 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 to, kam dalekohled právě míří.

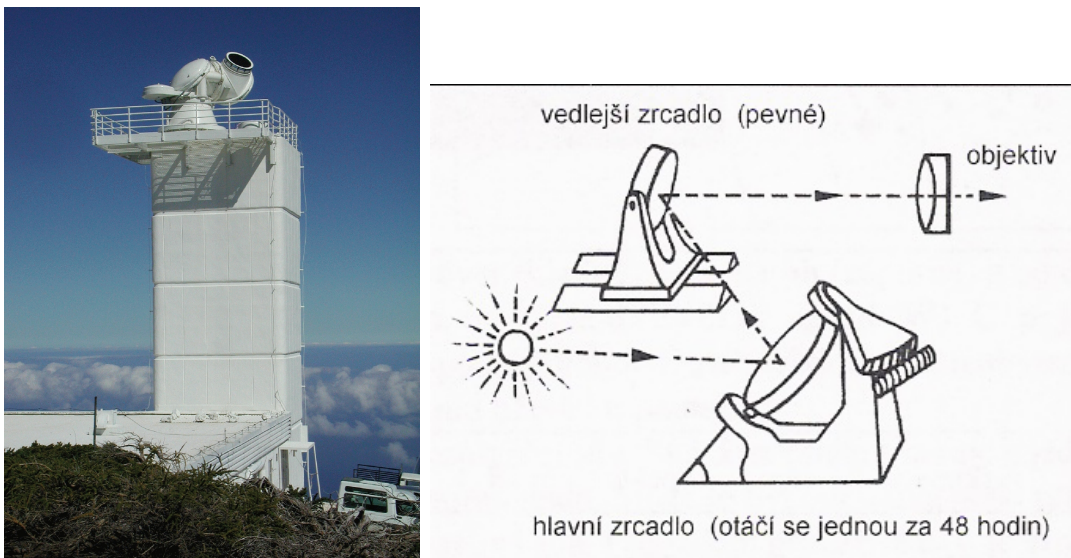
Dosud jsme se zabývali přístroji používanými zejména na noční pozorování. Významnou a dosti specifickou skupinu astronomických dalekohledů ale představují i přístroje používané pro pozorování Slunce. Použití „tradičních“ dalekohledů na pozorování Slunce může být nebezpečné, ať již pro naše oči při vizuálním pozorování nebo pro citlivé detektory na dalekohledech. Nicméně sledování slunečních skvrn je nepochybně zajímavé a provedení takového pozorování by prostě mělo patřit k základnímu souboru dovedností každého 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>9</sup>. Obraz Slunce nesledujeme přímo v dalekohledu, 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 zamlouvat. V roce 1930 sestrojil Bernard Lyot přístroj nazvaný **koronograf**. Pokud je korunograf vybaven filtrem  $H\alpha$ , využívá se ke sledování slunečních protuberancí<sup>10</sup> a nazývá se protuberanční dalekohled.

<sup>8</sup>Čti kudé.

<sup>9</sup>Galileo Galilei pozoroval Slunce dalekohledem, jen když bylo těsně nad obzorem, ale i tak byla tato pozorování nepříjemná. Záhy objevil možnost pozorování projekcí a nadále už využíval tuto metodu. Jeho oslepnutí nebylo přímo způsobeno pozorováním Slunce, jak se traduje, ale došlo k němu až mnoho let poté, co prováděl svá první pozorování Slunce dalekohledem.

<sup>10</sup>Podrobněji se slunečním útvarům budeme věnovat v kapitole o Slunci.

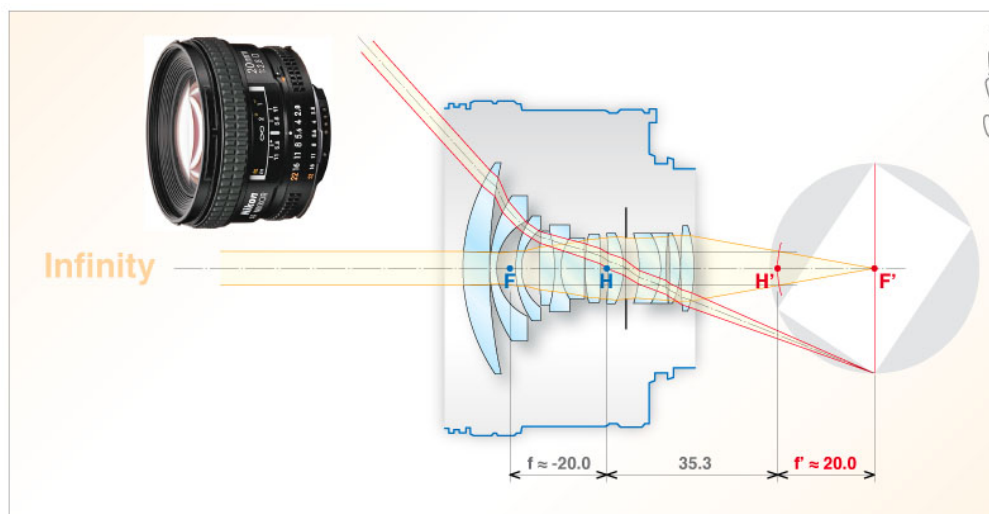


Obrázek 10.10: Vlevo: Švédský metrový sluneční dalekohled na La Palma (Španělsko), vpravo schéma horizontálního celostatu. Zdroj: <http://www.solarphysics.kva.se/>, Kleczek (2002).

Dnešní velké sluneční observatoře používají speciální *sluneční dalekohledy*, které mají velkou ohniskovou vzdálenost a jsou někdy instalovány vodorovně, svisle nebo šikmo (viz obrázek 10.10). Světlo Slunce do slunečních věží přivádí tzv. *celostat* (někdy také celostat nebo heliostat), který tak nahrazuje otáčení dalekohledu (obrázek 10.10 vpravo). Vidíme jej na vrcholu švédské sluneční věže na obrázku 10.10 vlevo. Celostat tvoří dvě rovinná zrcadla. 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.

## 10.4 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 (použitelné) 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 10.11), která je definována jako vzdálenost hlavního bodu optické soustavy (optického středu) od ohniska.

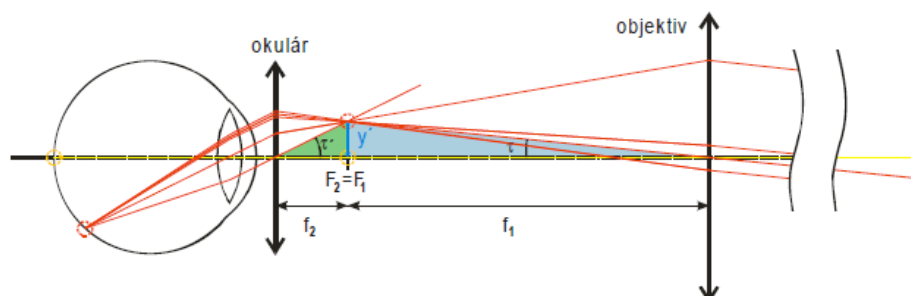


Obrázek 10.11: Efektivní ohnisková vzdálenost je dána vzdáleností  $H'F'$ . Převzato z [http://www.pierretoscani.com/echo\\_focal\\_length.html](http://www.pierretoscani.com/echo_focal_length.html).

### 10.4.1 Zvětšení dalekohledu

Laickou veřejností nejvíce oceňovaným a doslova magickým parametrem dalekohledu je jeho zvětšení. Odhlédneme od toho, že to nejdůležitější parametr dalekohledu není, ale jak jej vlastně určíme? Představte si, že budeme pozorovat vzdálený předmět o výšce  $y$ , jehož obraz v ohniskové rovině má velikost  $y'$  (viz obrázek 10.12). Necht'  $\tau$  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 10.12 lze psát

$$\frac{y}{f_{\text{obj}}} = \text{tg } \tau = \tau; \quad \frac{y'}{f_{\text{ok}}} = \text{tg } \tau' = \tau', \quad (10.1)$$



Obrázek 10.12: Schéma Keplerova dalekohledu k odvození zvětšení dalekohledu. Autor M. Krynický. Převzato z [www.realisticky.cz](http://www.realisticky.cz).

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

$$z = \frac{\text{tg } \tau}{\text{tg } \tau'} \Rightarrow z = \frac{f_{\text{obj}}}{f_{\text{ok}}}; \quad z = \frac{D}{D'}, \quad (10.2)$$

kde  $D$ , respektive  $D'$  jsou vstupní a výstupní pupila dalekohledu neboli průměr objektivu a průměr okuláru<sup>11</sup>. Tento vztah jsme sice odvodili pro Keplerův dalekohled, ale je zcela obecný a platí pro všechny refraktory i reflektory.

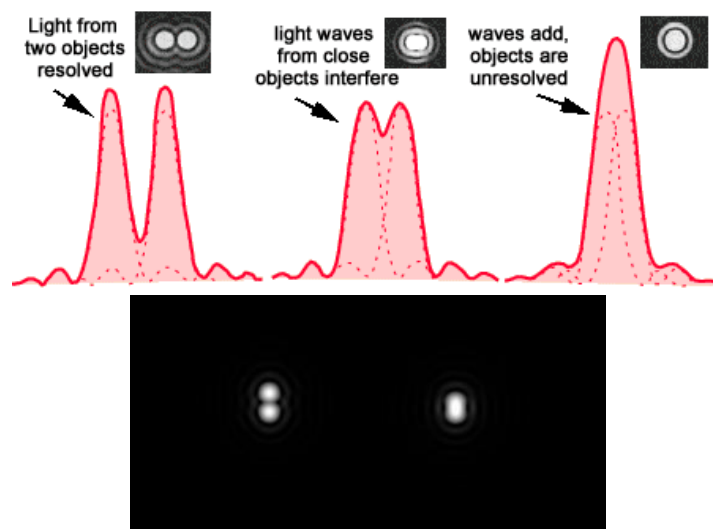
Výše uvedený vztah (10.2) může vést k takřka libovolným hodnotám zvětšení. V praxi však existují určité limity dané povahou světla, zemskou atmosférou i místními podmínkami jako je světelné znečištění. Běžně se udává, že zvětšení větší než je dvojnásobek průměru objektivu v milimetrech, nepřináší větší 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.

### 10.4.2 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>12</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, 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. Zvětšení obrazu je výhodné například při pozorování Měsíce nebo planet. Pro pozorování nebo měření hvězd nehraje světelnost až tak velkou roli, i když samozřejmě ovlivňuje velikost zorného pole a také vzájemnou 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.

<sup>11</sup>Upřesnění nalezne čtenář v kapitole 10.5.1 věnované okulárům.

<sup>12</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 10.13: 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/>.

### 10.4.3 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. Tento 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 stejně zářivé 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>13</sup>

$$\sin \delta = \frac{1,220\lambda}{D}, \quad (10.3)$$

kde  $\delta$  je rozlišovací úhlová schopnost v radiánech,  $\lambda$  vlnová délka světla v nanometrech a  $D$  průměr objektivu v milimetrech. Pokud uvažíme, 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

$$\delta = \frac{126''}{D}, \quad (10.4)$$

<sup>13</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 průměr objektivu  $D$  i zde zadáváme v milimetrech.<sup>14</sup>

Největší český teleskop, Perkův dalekohled s průměrem zrcadla 2 metry 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  $\delta_{\text{real}} > \delta_{\text{teor}}$ . Musíme vzít v úvahu kvalitu dalekohledu, pozorovací podmínky, poměry jasností dvou objektů a další efekty.

Při použití CCD kamer můžeme rozlišovací schopnost vyjádřit dalekohledu pomocí rozlišení  $\Delta$ , které udává velikost úhlu připadajícího na jednotku délky v ohniskové rovině. Běžně se udává v obloukových vteřinách na milimetr nebo jeden zobrazovací element, tzv. **pixel** (px). Ve vztahu

$$\Delta["] = \frac{206\,265 \cdot s}{f} \quad (10.5)$$

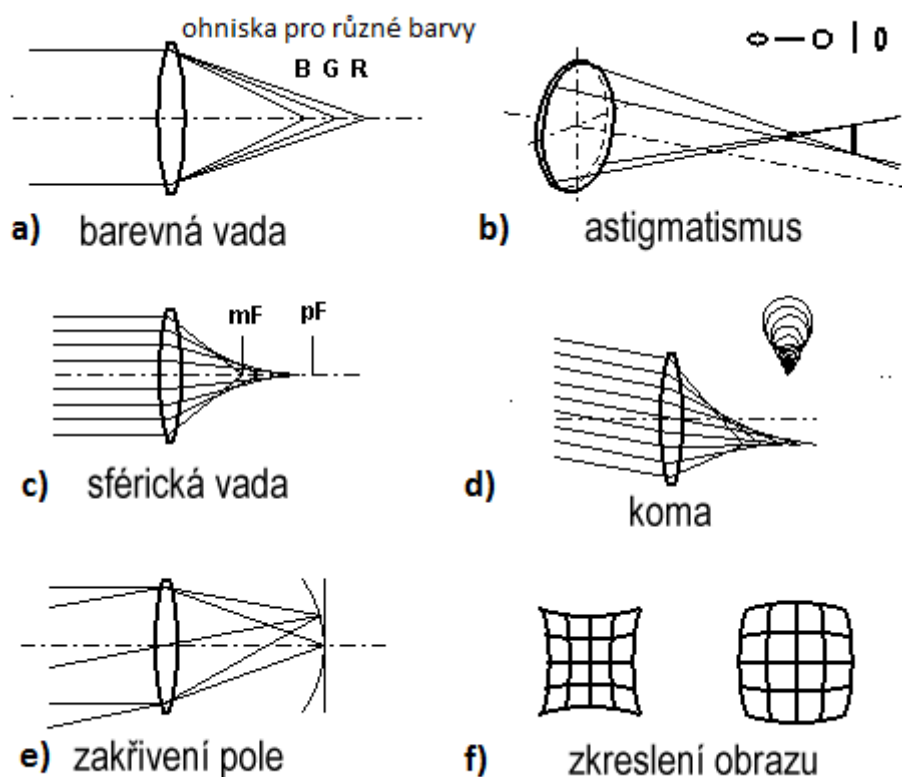
představuje číselná konstanta v čitateli počet úhlových vteřin v jednom radiánu,  $s$  je velikost 1 pixelu a  $f$  ohnisková délka, obě vyjádřené v milimetrech. Uživatelé CCD kamer tento vztah jistě ocení. Umožní jim spočítat, jak velká část hvězdné oblohy se vejde na CCD čip kamery nebo jaký úhel připadá na jeden pixel čipu.

#### 10.4.4 Optické vady dalekohledů

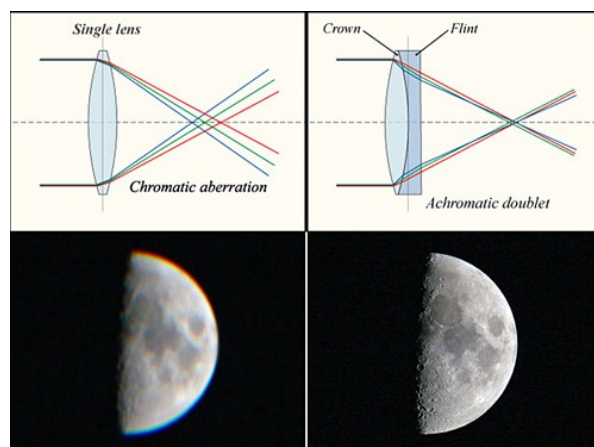
V ideálním případě by se měl bodový zdroj zobrazit v dalekohledu jako bod a to ve všech barvách. Jak ale víme šedivá je teorie a zelený strom života. V podstatě každý optický přístroj má nějakou vadu, která je více či méně úspěšně korigována. Představíme si stručně jen hlavní optické vady.

- **Barevná vada** (obrázky 10.14a, 10.15) – 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 blíž čočce, než ohniska delších vlnových délek. Pokud by měl dalekohled objektiv tvořený jen jednou čočkou, měl by velkou barevnou vadu. Proto jsou objektivy refraktorů 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.
- **Astigmatismus** (obr. 10.14b, 10.16) 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.
- **Kulová vada (sférická aberace)** (obrázek 10.14c) je vada zobrazení předmětu, objektu kulovou čočkou nebo zrcadlem. Paprsky, které jsou dále od optické osy, se

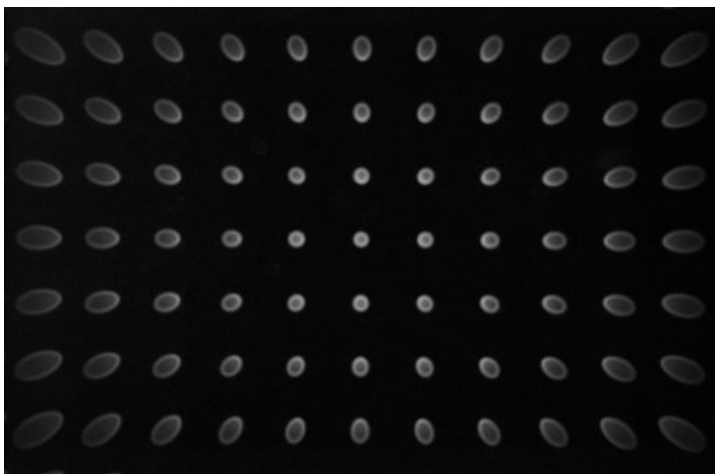
<sup>14</sup>Pokud zadáte vlnovou délku, na níž je oko nejvíce citlivé při denním vidění, dostanete vztah pro rozlišovací schopnost dalekohledu, který se občas objevuje v učebnicích  $\delta'' = 140/D$ .



Obrázek 10.14: Hlavní optické vady. U sférické vady jsou označena ohniska pro paprsky vzdálené od osy (mF) a blízké ose (pF). Zdroj: <http://www.funsci.com>.



Obrázek 10.15: Levný dalekohled s jednoduchou čočkou vytváří rozmazaný obraz s okraji s falešnými barvami (vlevo). Galileoscope (vpravo) představuje kvalitnější achromát tvořený dvojicí čoček. Ohnisko je společné pro modré a červené světlo, ohnisko zeleného světla je lehce posunuté. Zdroje: Schémata R. Caniatti/Wikipedia, snímky Měsíce R. Fienberg.



Obrázek 10.16: 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>.

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. 10.14d) – 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.
- **Zkreslení obrazu** (obr. 10.14e,f) 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.

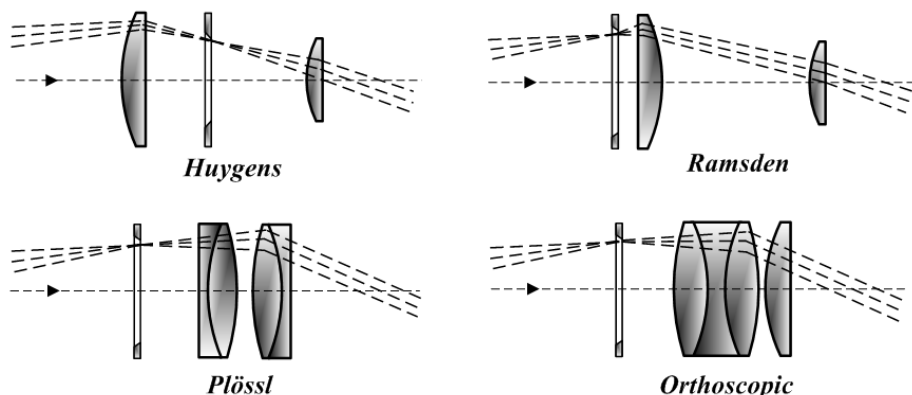
Na kvalitu zobrazení objektů nějakou optickou soustavou má vliv i rozptyl a absorpce světla při interakci (průchodu nebo odrazu) světla s každým optickým prvkem soustavy. Čím více optických členů soustava má, tím více se tyto členy mohou negativně projevovat. Rozptylem vzniká tzv. parazitní světlo, které snižuje kontrast obrazu. Absorpce i rozptyl obecně zmenšují množství světla, které nakonec projde optickou soustavou. Protiopatření jsou zřejmá. Nanášení antireflexních vrstev na lámavé prvky v optické soustavě a pravidelné obnovování reflexních povrchů zrcadel, které časem oxidují a ztrácí odrazivost.

## 10.5 Příslušenství dalekohledů

### 10.5.1 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





Obrázek 10.17: Konstrukce nejběžnějších typů okulárů. Nahoře: vlevo - Huygensův (1703), vpravo Ramsdenův (1783). Dole: vlevo - Plösslův (1860), vpravo Abbeho ortoskopický (1880). Převzato z wikipedie.

okuláry, které jsou většinou tvořeny celou soustavou čoček (viz obrázek 10.17). 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 10.4.1, vztah 10.2) Zvětšení lze ale dle vztahu 10.2 vyjádřit také jako poměr vstupní a výstupní pupily dalekohledu. Vstupní pupila dalekohledu je vlastně průměr dalekohledu opravený, zmenšený o případné clony. Výstupní pupila dalekohledu odpovídá výstupní pupile okuláru. 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. Tento průměr vystupujícího svazku rovnoběžných paprsků 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

$$z \geq \frac{d}{D} = 1,7D. \quad (10.6)$$

Důležitým údajem pro přípravu pozorování je velikost zorného pole dalekohledu (FOV)<sup>15</sup>. Je tedy třeba vědět, jak velkou část hvězdné oblohy uvidíte při pohledu dalekohledem s daným okulárem. Zorné pole dalekohledu  $\Theta$  závisí na použitém zvětšení  $z$  i na zorném poli okuláru  $\vartheta$

$$\Theta = \frac{\vartheta}{z}. \quad (10.7)$$

Velikost zorného pole okuláru závisí na jeho typu bývá od  $25^\circ - 50^\circ$  až po  $55^\circ - 90^\circ$  pro širokoúhlé okuláry.

<sup>15</sup>Zkratka FOV pochází z anglického „field of view“.

### 10.5.2 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 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.

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 jasu jsou vhodné měsíční filtry. Po snížení jasu 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 pohltí takřka 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 úzkopásmové filtry UHC (z anglického „Ultra High Contrast“), které vytvářejí vysoký kontrast hvězdného pozadí vůči pozorovanému objektu, případně jejich speciální podtypy jako OIII, H $\beta$  a podobně.

### 10.5.3 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>16</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<sup>17</sup> 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>16</sup>V neoptické astronomii dokonce pracujeme i s detektory trojrozměrnými.

<sup>17</sup>Zkratka z anglického „Charge Coupled Device“, v překladu nábojově vázané prvky.

Detektory se liší nejen stavbou, ale také dalšími parametry. Pro zachycení slabých zdrojů záření je u detektoru rozhodující tzv. **kvantová účinnost** QE<sup>18</sup>, která pro danou vlnovou délku ukazuje, jaké procento z fotonů dopadajících na detektor je detektorem zaregistrováno (viz obr. 15.10). Jinak řečeno, jaká část z dopadajících fotonů je schopna vyprodukovat nějaké nosiče náboje. Kvantová účinnost je tedy dána 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 závisí na vlnové délce dopadajícího záření 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>19</sup> označujeme jako **charakteristickou (senzimetrickou, 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>20</sup> Při srovnání různých detektorů dnes vítězí CCD čip, který má sice ve většině případů menší dynamický rozsah a nejkratší expozice kolem setiny sekundy. Ty nejlepší čipy však mohou měřit s přesností na mikromagnitudy s časovým rozlišením desetin mikrosekundy. Jejich kvantová účinnost je zpravidla mnohem větší než fotografie nebo fotoelektrického fotometru. Navíc i rozměry dnes už předčí skleněné fotografické desky. Vždyť například dalekohled LSST v Chile bude vybaven CCD kamerou 3.2 Gpx!<sup>21</sup>

#### 10.5.4 Aktivní a adaptivní optika

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. A 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 k 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, které se deformuje v důsledku větru, změn teploty nebo mechanického namáhání dalekohledu.

Oproti tomu **adaptivní optika** je zařízení, které koriguje vlivy atmosféry Země. S návrhem přišel už v roce 1953 Horace Welcome Babcock, ale praktické realizace se

<sup>18</sup>Zkratka QE vychází z anglického výrazu „quantum efficiency“.

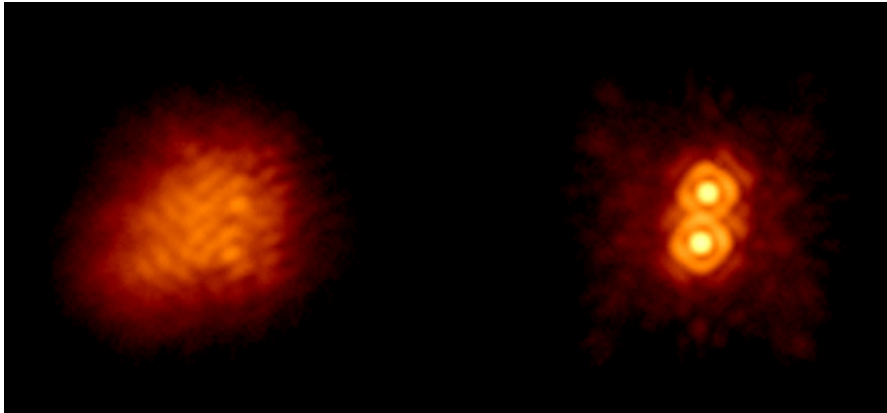
<sup>19</sup>Pod pojmem osvětlení zde rozumíme součin dopadajícího toku záření a expoziční doby.

<sup>20</sup>V některých případech se hodnotí jen použitelný dynamický rozsah, tedy jen lineární oblast charakteristické křivky detektoru.

<sup>21</sup>Pro srovnání, první obrazový čip měl 10 kpx a dnešní fotoaparáty v mobilních telefonech mají běžně 5 až 8 Mpx.

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 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 zespodu 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 Hubbleova kosmického dalekohledu.



Obrázek 10.18: Dvojhvězda Iota Tau pozorovaná pomocí 5m Haleova dalekohledu na Mt. Palomaru. Vlevo: snímek dvojhvězdy bez použití adaptivní optiky; vpravo: odhalené složky dvojhvězdy vzdálené jen 0.3" po využití adaptivní optiky. Převzato z <http://www.astro.caltech.edu/palomar/AO/>.

### 10.5.5 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.

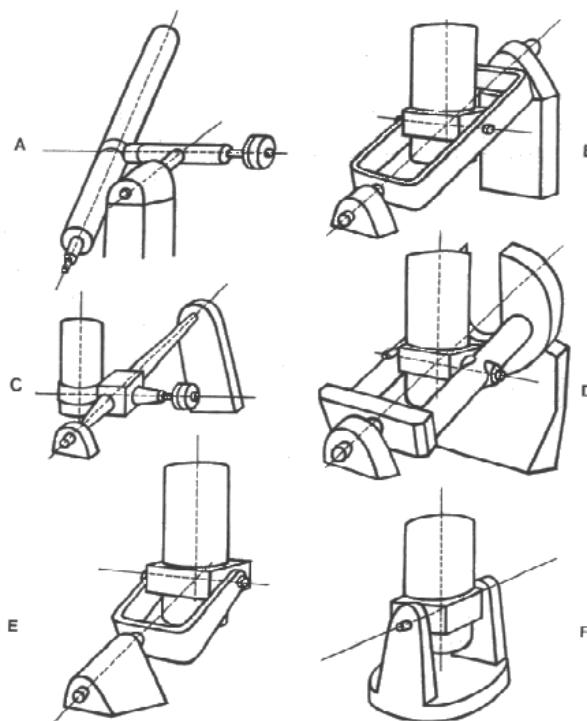
Příkladem azimutální montáže oblíbené zejména mezi amatérskými astronomy je Dobsonova montáž (viz obrázek 10.19). Je vhodná zejména pro dalekohledy typu Newton. Montáž je velmi nízká a tím i značně stabilní. Umožňuje pracovat i s velkými zrcadly. V jiném provedení by cena montáže byla i několikanásobně vyšší.



Obrázek 10.19: Dalekohled na jednoduché azimutální montáži typu Dobson. Převzato z <http://www.ozscopes.com.au>.

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 10.20). Nejběžnější je u nás německá montáž. Typické pro ni je protizávaží, které vyrovnává hmotnost tubusu dalekohledu. S tím ale přichází i jedna velká nevýhoda této montáže. Zpravidla není možné sledovat objekty od jejich východu až k jejich západu. Krátce před průchodem objektu meridiánem je zpravidla nutné dalekohled otočit v obou osách o  $180^\circ$ , protože se musí „vyhnout“ pilíři montáže.

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.



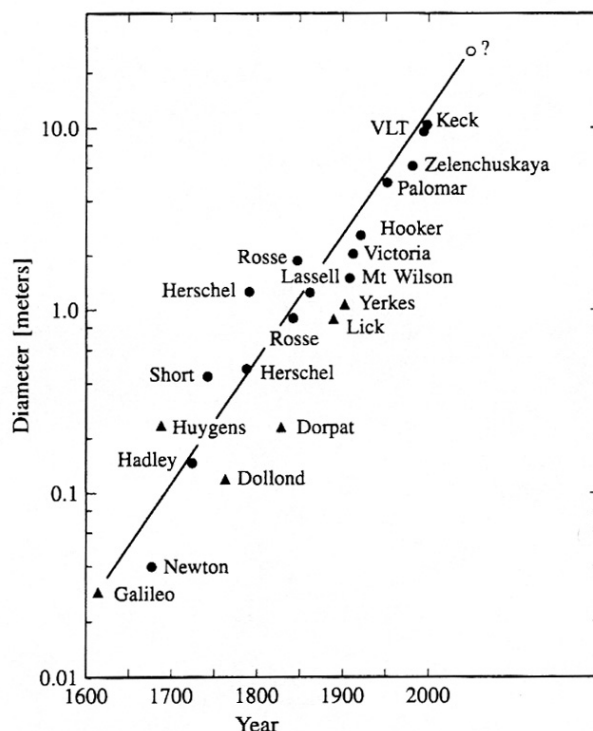
Obrázek 10.20: Montáže dalekohledů. A – E. Paralaktické montáže. A. Německá; B. Anglická rámová; C. Anglická osová; D. Podkovová; E. Vidlicová. F. Azimutální montáž. Převzato z Grygar et al. (1979).

## 10.6 Největší observatoře a teleskopy světa

V minulosti se i velké profesionální observatoře stavěly poblíž velkých měst nebo přímo ve městech. Noční život měst nijak nevnadil 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 horských oblastech Kanárských ostrovů, v jihovýchodní části Austrálie, v poušti Atacama v Chile, ve Skalnatých horách v americké Arizoně nebo vysoko na vrcholcích hor na Havajských ostrovech. Tam najdeme také největší současné dalekohledy světa. Jejich aktuální přehled je v tabulce



Obrázek 10.21: Vývoj velikosti dalekohledů s časem. Graf byl převzat z <http://www.astro.virginia.edu/class/oconnell/astr511>.

10.1. Některé dalekohledy jsou využívány jako součást interferometrického systému, jako například dalekohledy VLT, Keck nebo soustava CHARA (Center for High Angular Resolution Astronomy) či NPOI (Navy Precision Optical Interferometer).

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  $5 \cdot 10^6$  krát větší než je plocha lidského oka. A v plánu jsou dalekohledy podstatně větší (viz tabulka 10.2). 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 projekt ESO. Stavba dalekohledu o průměru 39,3 metru už byla zahájena. První světlo v dalekohledu se očekává v roce 2024.<sup>22</sup>

<sup>22</sup>Ani tento projekt se neubráníl škrtům, původně zamýšlený teleskop měl mít průměr neuvěřitelných 100 metrů!

Tabulka 10.1: Největší dalekohledy světa.

Název	Efekt. průměr	Typ zrcadla	Stát / Partneři	Umístění	V provozu
Large Binocular Telescope (LBT)	11,9 m	2×8,4 m	USA, Itálie, Německo	Mt. Graham Internat. Observatory, USA	2005
Gran Telescopio Canarias (GTC)	10,4 m	36 částí	Španělsko (90%), Mexiko, USA	Kanárské ostrovy, Španělsko	2009
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)	11×9,8 m	91 částí	USA, Německo	McDonald Obs., 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 × 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	Spec. 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

## 10.7 Kosmické observatoře

Pozemské observatoře mají své výhody i nevýhody. Ve srovnání s přístroji na družicích jsou pozemské 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 Hermann Oberth (1923). Detailní rozbor možností připravil ale až Lyman 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 Richard 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 průměru od 20 do 80 cm. Spitzer ale stále prosazoval realizaci velkého kosmického teleskopu. NASA o něm



Tabulka 10.2: Dalekohledy ve výstavbě, se schválenou realizací, plánované.

Název	Průměr [m]	Rok dokončení	Poznámka
Schválené projekty, ve výstavbě			
European Extremely Large Telescope	39.3 m	2024	ve výstavbě
Thirty Meter Telescope	30 m	2024	
Giant Magellan Telescope	7x8.4 m zrcadel	2025	= 24.5 m průměr
Large Synoptic Survey Telescope	8.4 m	2022	2019 první světlo
Pan-STARRS	4 x 1.8 m		2 už kompletní
DAG Telescope	4 m	2020	Turecko
Magdalena Ridge Observatory Telescope Array	10 x 1.4 m		
San Pedro Martir Telescope (SPMT)	6.5 m		ve výstavbě
Daniel K. Inouye Solar Telescope	4 m		2019 první světlo
International Liquid Mirror Telescope	4 m		ve výstavbě
Plánované			
ALPACA telescope,	8 m		tekuté zrcadlo
Chinese Future Giant Telescope (CFGT)	30 m		Čína
30m Ring Interferometric Telescope (RIT)	30m		Čína
Chinese Giant Solar Telescope (CGST)	ekviv. 8 m (5m)		Čína; infračervený a optický sluneční dalekohled

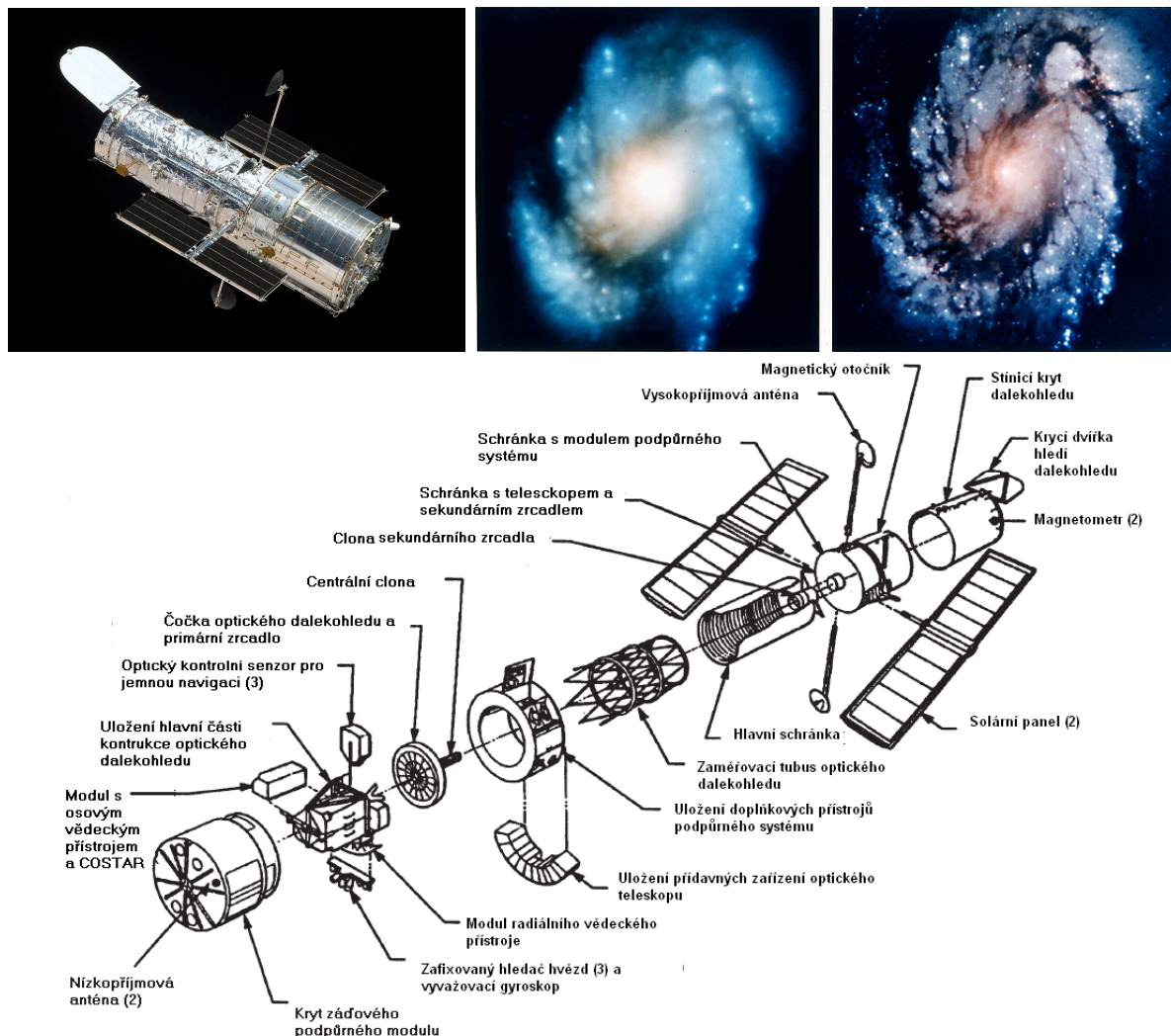
začala reálně uvažovat v roce 1962. Průměr uvažovaného dalekohledu se zejména z finančních důvodů neustále zmenšoval, ale konečně byl projekt i za spoluúčasti Evropské kosmické agentury ESA v roce 1977 schválen. Dalekohled<sup>23</sup> o průměru primárního zrcadla 2,4 metru byl připraven k vypuštění v roce 1986. Havárie raketoplánu Challenger vypuštění zpozdila. 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. HST už několikrát „prošel servisem“ na oběžné dráze (posledním v roce 2009) a pokud vše půjde dobře, měl by být provozován až do třicátých let 21. století. Jeho význam pro astronomii je zcela zásadní. Dokládá to i počet článků využívajících dat z HST v recenzovaných časopisech, který v polovině roku 2016 překročil překročil 14 000!<sup>24</sup> 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 Vesmírný dalekohled Jamese Webba (JWST; James Webb Space Telescope) se zrcadlem o velikosti 6,5 metru, který má pracovat zejména v oblasti dlouhovlnného infračerveného spektra. Jeho vypuštění se plánuje na rok 2018.

Nicméně kosmický výzkum nelze omezit jen na jeden nebo dva satelity. V uplynulých desetiletích bylo do vesmíru vysláno několik desítek astronomických družic. Mezi ty nejznámější, pracující zejména ve viditelné oblasti spektra, patří astrometrická družice

<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.

<sup>24</sup>Aktuální stav lze najít na <https://archive.stsci.edu/hst/bibliography/pubstat.html>.



Obrázek 10.22: 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.

Hipparcos, případně fotometrické družice MOST, CoRoT a zejména satelit Kepler, který výrazně rozšířil naše znalosti o exoplanetách i proměnných hvězdách. Na Keplera má v brzké době navázat družice TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite). Velkým projektem Evropské kosmické agentury je družice GAIA se dvěma zrcadly  $1,45 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$ , která má poskytnout velmi přesná měření jasnosti a polohy obrovského množství hvězd. Kompletní výsledky této mise mají být k dispozici v roce 2022.

Kosmické družice nejsou omezeny jen na optickou oblast, naopak. Pracují ve všech částech spektra elektromagnetického záření. Právě díky nim jsou všechna pomyslná okna do vesmíru otevřena. Výběr těch nejvýznamnějších je uveden v tabulce 10.3.

Tabulka 10.3: Výběr nejvýznamnějších astronomických družic.

Název	Vzlet	Stát/organizace	Obor záření
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
GAIA	19.12.2013	ESA	V
LISA Pathfinder	3.12.2015	ESA	gravitační vlny
TESS	březen 2018	NASA	V I

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.

## Použitá a doplňující literatura

- Baker, A. E. 1925, Proc. RAS Edinburgh, 45, 166
- 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)
- Grygar, J., Horský, Z., Mayer, P., 1979, Vesmír, Mladá fronta, Praha
- 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 Observatory (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

## 11 Neoptická astronomie

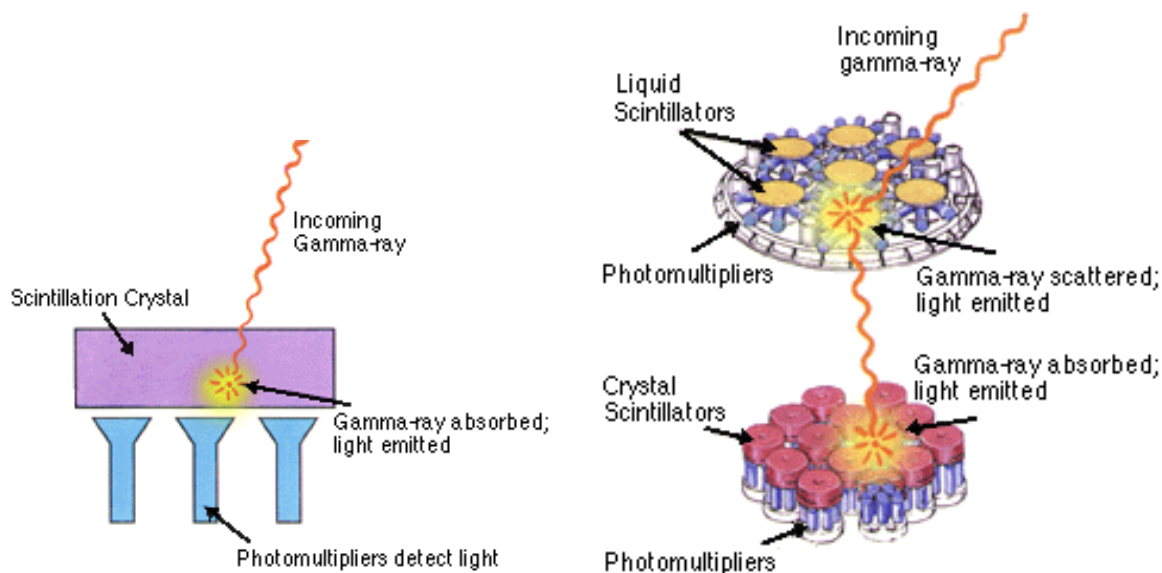
V kapitole o zdrojích našich informací o okolním vesmíru jsme připomněli, že kromě tradiční optické části elektromagnetického spektra můžeme využívat pro studium vesmíru i další části spektra jako infračervenou, rádiovou, ultrafialovou, rentgenovou, případně oblast záření gama. Ale nejen to. Významnou 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 přístupná nebo neprostupná, je rozvoj neoptické astronomie spojen ve značné míře s rozvojem kosmonautiky a vypouštěním speciálních kosmických astronomických observatoří.

### 11.1 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 záblesky záření gama přicházející z vesmíru než ze zemského povrchu. Odhalené kosmické úkazy se označují prostě jako **gama záblesky**<sup>1</sup>, o jejichž povaze se vedou spory dodnes. Je zřejmé, že takové výrony vysoce energetických částic doprovázejí největší kataklyzmata ve vesmíru jako výbuchy 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, 1991-2000), BeppoSAX (1996-2002), INTEGRAL (2002-), Swift (2004-), AGILE (2007-), Fermi Gamma-ray Space Telescope (FGST, dříve GLAST, 2008-) a další. Protože gama fotony mají mnohonásobně vyšší energii než fotony světla, je jejich samotné pozorování, chcete-li detekce, složitý proces. Můžeme je registrovat 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, tedy Comptonův rozptyl nebo fotoionizaci posunutím elektronu na vyšší energetickou hladinu. Výsledkem je světelný záblesk, který lze monitorovat scintilačním detektorem (viz obrázek 11.1 vlevo). Při vyšších energiích dopadajícího fotonu gama záření (až přibližně do 10 GeV) dochází k transformaci energie a k vytvoření páru elektron-pozitron. Takový efekt je možno zachytit v tzv. jiskrové komoře (viz obrázek 11.1 vpravo) kde při rozlišovací schopnosti zhruba 1° lze určit i polohu zdroje záření.

Pokud vysokoenergetické fotony gama záření z vesmíru interagují s částicemi atmosféry, vyvolají emisi sekundárních fotonů doprovázenou vznikem Čerenkovova záření, které lze v noci zachytit optickými dalekohledy jako světelný záblesk. Specializovaných

<sup>1</sup>V literatuře se setkáte také se zkráceným označením GRB vycházejícím z anglického „gamma ray burst“.



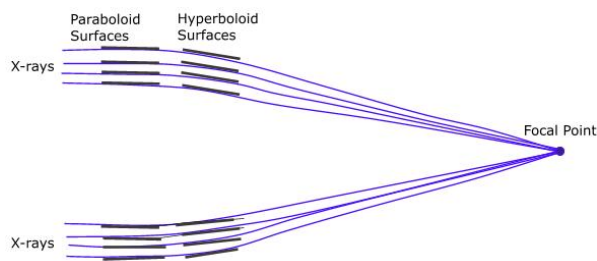
Obrázek 11.1: Scintilační detektor. Schéma dalekohledu využívajícího Comptonův rozptyl. ([http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/how\\_11/gamma\\_detectors.html](http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/how_11/gamma_detectors.html)).

observatoří a optických dalekohledů na taková pozorování je celá řada, například H.E.S.S., VERITAS, MAGIC, CANGAROO III nebo HEGRA.

## 11.2 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 jako objevitel W. C. Röntgen. Počátky rentgenové astronomie ale spadají až do doby po druhé světové válce. Zemská atmosféra vůbec nepropouští rentgenové záření vesmírných zdrojů v rozmezí frekvencí od přibližně 50 PHz ( $= 5 \cdot 10^{16}$  Hz) do 50 EHz ( $= 5 \cdot 10^{19}$  Hz), což odpovídá intervalu vlnových délek (8 pm - 8 nm).<sup>2</sup> Měření v rentgenovém oboru spektra, v intervalu energií přibližně 0,12 keV až 120 keV 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 počítačů) 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

<sup>2</sup>Rentgenové záření je v elektromagnetickém spektru vymezeno ultrafialovým zářením a na straně vyšších energií gama zářením. Hranice mezi rentgenovým a gama zářením byla v posledních desetiletích předmětem diskusí (Dendy & Heaton, 1999). Ve starších publikacích se jako hraniční vlnová délka uvádí  $10^{-11}$  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 atomu, rentgenové paprsky jsou vyzařovány elektrony mimo jádro. 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).



Obrázek 11.2: Schéma rentgenového dalekohledu Wolterovy konstrukce. Rentgenové záření je zde soustředěno pomocí několika souosých rotačních parabolických a hyperbolických ploch vložených do sebe. Převzato z <http://ixo.gsfc.nasa.gov/images/science>.

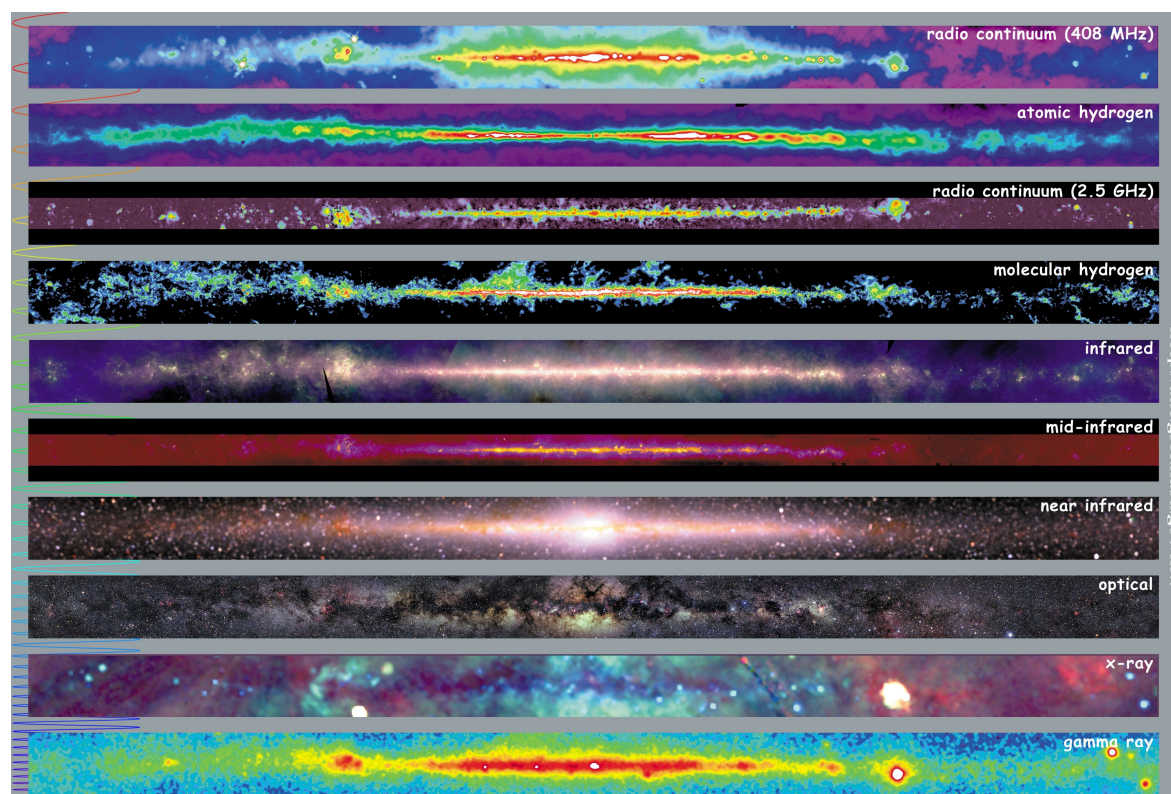
a odráží se jen pod úhlem dopadu větším než  $85^\circ$ . Odrazné plochy jsou proto opatřeny tenkou vrstvou kovu s vysokou elektronovou hustotou jako nikl, zlato, platina nebo iridium. Hladkost jejich povrchu je 1 nm. Prakticky u všech rentgenových dalekohledů se používá Wolterovy konstrukce (viz obrázek 11.2). 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 ROSAT (1990-2011), Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE, 1995-2012), Chandra (1999-), X-ray Multi-Mirror Mission-Newton (1999-), INTEGRAL (2002-), Swift (2004-). Jejich dalekohledy zkoumaly celou škálu zdrojů rentgenového záření, od našeho Slunce, rentgenových dvojhvězd až po vzdálené rentgenové galaxie, aktivní galaktická jádra, kvasary nebo kupy galaxií a další. O těchto objektech bude pojednáno později.

## 11.3 Ultrafialová astronomie

Astronomie využívající oblast elektromagnetického záření přibližně mezi 10 až 320 nm se označuje jako ultrafialová. Záření kosmických objektů 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, 1992-2001), přístroje HST nebo družice FUSE (1999-2007), GALEX (2003-2013), Astrosat (2015-). Za zmínku zcela jistě stojí i ultrafialový dalekohled LUT pracující na Měsíci jako součást čísnkové sondy Čchang-e 3 od ledna 2014.

Ultrafialová astronomie je velmi důležitá součást zkoumání vesmíru. Většina hvězd patří mezi 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 11.3: Snímky pásu Mléčné dráhy (části hvězdné oblohy do vzdálenosti  $10^\circ$  od roviny Galaxie) v různých oblastech spektra elektromagnetického záření. Zdroj: NASA.

## 11.4 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 hoře Mauna Kea na Havajských ostrovech). 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 (4 205 m n.m.), Atacama Large



Millimeter Array (ALMA, 5 000 m n.m.) či observatoře v Antarktidě. Dnes už existují i významné přehlídkové projekty v infračervené oblasti spektra, jako například 2MASS<sup>3</sup>.

Z kosmických projektů infračervené astronomie jmenujme alespoň satelity a přístroje nové generace jako HST/NICMOS (2009-), SIRTFF (Space Infrared Telescope Facility), dnes Spitzer Space Telescope (2003-), nebo WISE (2010-) a Herschel Space Observatory (2009-2013) 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 struktury a chemického složení vesmíru. V létě roku 2011 například družice Herschel definitivně potvrdila výskyt molekul kyslíku ve vesmíru. Na podzim téhož roku byly oznámeny další dva významné objevy tohoto satelitu. V kometě Hartley 2 bylo naměřeno 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 – nositelek vody vnitřním planetám planetárních soustav (HSO, 2011).

## 11.5 Radioastronomie

Nejvýznamnější oblastí neoptické astronomie je radioastronomie. Tuto kapitolu astronomie otevřel v roce 1931 americký fyzik s českými kořeny Karl Guthe Jansky vlastně náhodou. Původně hledal pro firmu Bell možné zdroje poruch rádiového vysílání. 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 rádiová technika uplatnila i v astronomii.

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.

---

<sup>3</sup>Přehlídka *Two Micron All Sky Survey* využívá dva robotické dalekohledy – jeden na Mt. Hopkins, USA a druhý na Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO), Chile. Oba pozorují ve filtrech *J* (1,25  $\mu\text{m}$ ), *H* (1,65  $\mu\text{m}$ ) a *K<sub>s</sub>* (2,17  $\mu\text{m}$ ). Bližší informace a data lze nalézt na <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/>.

- aktivní (radarová astronomie). Rádiový signál se nejprve vyšle směrem ke studovanému objektu a po odrazu od cíle se 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 planetky.



Obrázek 11.4: Nahoře: Původní velký radioteleskop v NRAO, Green Bank, 15. listopadu 1988 a vpravo následující den, po zhroutilí. Dole: Zničený radioteleskop nahradil nový přístroj – Robert C. Byrd Green Bank Telescope. Foto: Richard Porcas, NRAO.

Základními přístroji jsou radioteleskopy, rádiové interferometry, spektrografy a radary. Rozlišovací schopnost radioteleskopů je dána stejným vztahem jako pro optické dalekohledy (10.3):

$$\sin \delta = \frac{1,220\lambda}{D}. \quad (11.1)$$

Úhel  $\delta$  je zde v radiánech, průměr radioteleskopu  $D$  a vlnová délka přijímaného záření  $\lambda$  v metrech. Vezmeme-li v úvahu, že vlnové délky rádiového záření propouštěného zemskou atmosférou jsou řádově metry, je možné vyrobit i velké radioteleskopy, které budou měřit s velkou přesností. Zpravidla se vyžaduje, aby odchylky 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>4</sup> (součást National Radio Astronomy Observatory NRAO, USA)

<sup>4</sup>Tento radioteleskop nahradil předchozí 90m anténu, která se vlastní vahou zhroutilá 15. 11. 1988.

s anténou  $100 \times 110$  metrů (obrázek 11.4) a 100metrový radioteleskop v Effelsbergu (Německo). Největší nepohyblivá celistvá anténa měla do roku 2016 průměr 305 metrů. Nachází se v Arecibu na Portoriku (obrázek 11.5a). Na jihovýchodě Číny zprovoznili v roce 2016 radioteleskop FAST (Five hundred meter Aperture Spherical Telescope), který má průměr 500 metrů (obrázek 11.5b). Největší samostatný radioteleskop světa RATAN 600 o průměru 576 m pracuje v Rusku (obrázek 11.5c). 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 postup, jak skládat rádiová záření přijímaná ve stejném čase různými radioteleskopy, vznikla rádiová interferometrie. Cílem je zvýšit úhlové rozlišení. Rozlišovací schopnost celé sestavy interferometru je totiž stejná, jakou by měla jediná anténa s průměrem shodným se vzdáleností dílčích antén. Nezáleží přitom na tvaru antén. Mohou to být soustavy klasických parabolických antén jako například One-Mile Telescope na MRAO (Mullard Radio Astronomy Observatory) v Cambridge, 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.



Obrázek 11.5: Vlevo: Radioteleskop Observatoře Arecibo na ostrově Portoriko. Převzato z <http://www.naic.edu>. Vpravo: Čínský radioteleskop FAST v provincii Kuej-čou. Zdroj: <http://gbtimes.com/>. Dole: Radioteleskop RATAN 600 Ruské akademie věd na Kavkaze. Zdroj: <http://space-memorial.narod.ru/astro2/kajdanovskij.html>.

## Největší radiové interferometry

MERLIN (Multi-Element Radio Linked Interferometer Network) – síť tvořená radioteleskopy na území Anglie.

VLA (Karl G. Jansky Very Large Array) – 27 antén v Novém Mexiku (USA), každá o průměru 25 metrů (při rozestavení antén do konfigurace tvaru Y mají jednotlivá ramena délku 21 km), maximální délka základny 36 km.

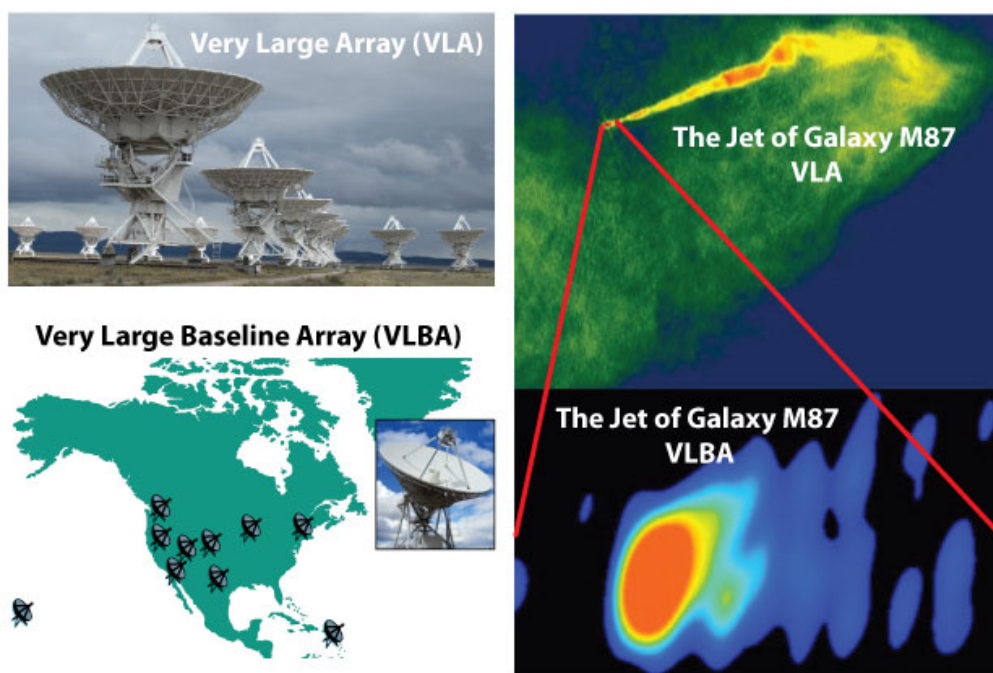
VLBA (Very Long Baseline Array) – 10 teleskopů o průměru 25 m, délka základny až 8 611 km.

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 plném provozu od roku 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 (Součástí příprav je i vybudování a provozování menších soustav radioteleskopů jako jihoafrické MeerKAT (64 antén, každá o průměru 13,5 m) nebo australské ASKAP (36 antén, 12 m).

WSRT (Westerbork Synthesis Radio Telescope) – 14 antén, každá o průměru 25 m.



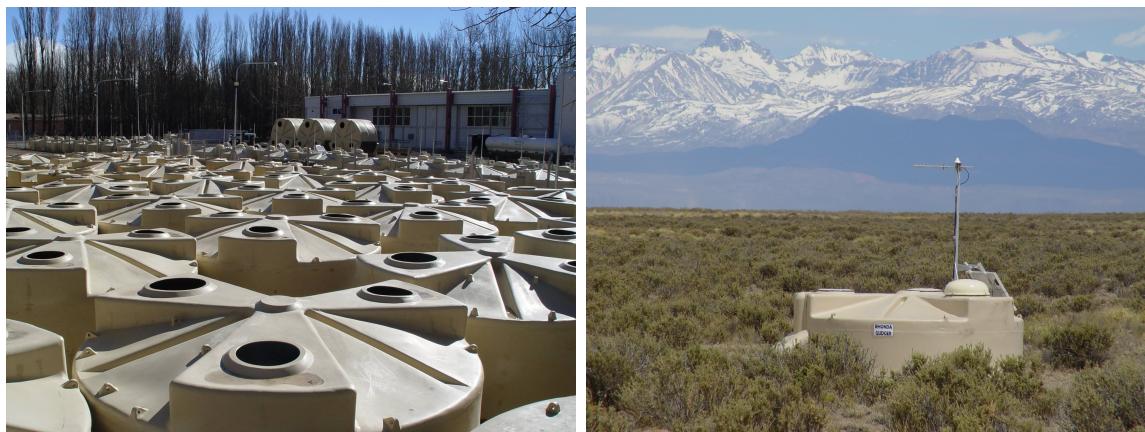
Obrázek 11.6: Vlevo: radioteleskopy použité v interferometrické soustavě VLA, respektive VLBA. Vpravo: porovnání výsledků při pozorování výtrysku z galaxie M87. Zdroj: <http://www.erau.edu/>.

## 11.6 Částicová astronomie

Částicová astronomie je založena na výsledcích experimentů v urychlovačích částic i na pozorováních proudů částic z vesmíru. Urychlovače, detektory kosmického záření nebo neutrin patří k největším a nejdražším fyzikálním přístrojům nebo chcete-li, laboratorům světa. Díky nim se však rozvoj částicové fyziky včetně astrofyziky výrazně zrychlil. Představit všechny tyto přístroje je dalece nad rámec této publikace, připomeňme si však alespoň stručně ty nejvýznamnější.

### 11.6.1 Kosmické záření

Zdroj kosmického záření zatím nejasný. Víme jen, že jeho částice s nejvyšší energií pochází z oblastí mimo naši Galaxii. Největším projektem pro studium kosmického záření je mezinárodní Observatoř Pierra Augera vybudovaná v Argentině. Observatoř je schopna detekovat částice kosmického záření s ultravysokou energií nad  $10^{20}$  eV, což je pro představu energie, jakou má tenisový míček při rychlosti 80 km/h. 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/>.



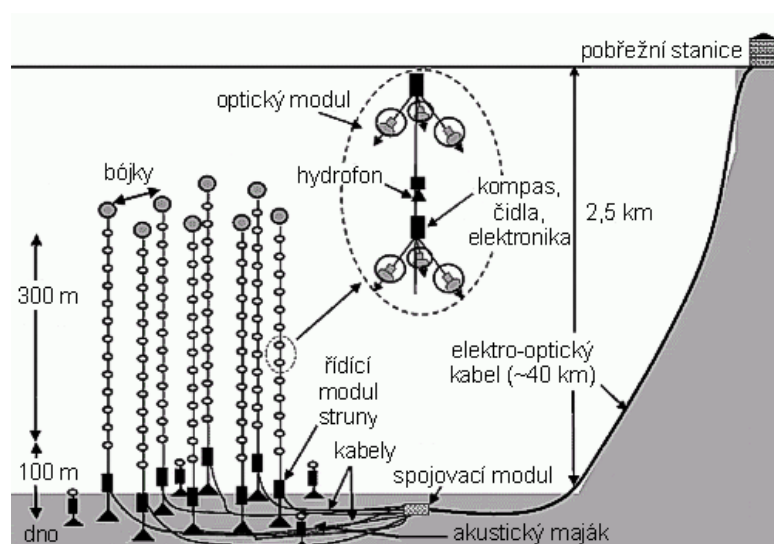
Obrázek 11.7: Observatoř Pierra Augera. Vlevo: Tanky na vodu při přípravě. Vpravo: Jeden z tanků na vodu už zapuštěný do země a připravený k činnosti. Zdroj: <http://www.auger.org>.

### 11.6.2 Neutrinová astronomie

O profilu neutrin jsme se stručně zmínili v kapitole 7. Vzhledem k jejich vlastnostem je jejich detekce a studium velice obtížné. Zdroji neutrin ve vesmíru, jejich šířením kosmickým 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. Experimentálně se neutrino podařilo prokázat až o čtvrt století později. Nejprve elektronové (Cowan et al., 1956), pak mionové (Lederman, Schwartz a Steinberger, 1962) a nakonec tauonové (tým DONUT, Fermilab 2000).

Později byly prokázány odlišné formy neutrin – elektronové, mionové a tauonové. Poslední až na počátku tohoto tisíciletí. Problémem je totiž jejich velmi malý účinný průřez a nízká reaktivnost. Prakticky bez odporu prochází látkou. Podle různých odhadů projde naším tělem za dobu našeho života až  $10^{24}$  slunečních neutrin, z nichž jsou zachycena jen jedno až dvě neutrina. Většina dosud detekovaných mimozemských neutrin pochází ze Slunce a ze supernovy SN1987A.



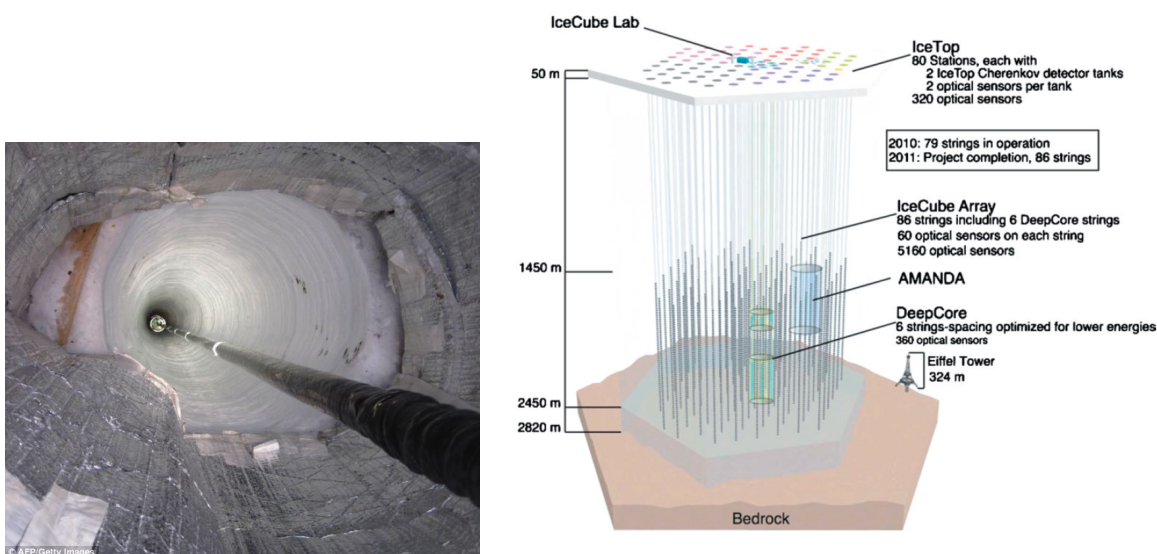
Obrázek 11.8: Schéma neutrinového vodního detektoru v rámci projektu ANTARES. Převzato z <http://www.aldebaran.cz>.

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 Super-Kamiokande (Super-Kamioka Neutrino Detection Experiment). Kanadský projekt<sup>5</sup> využívá nádrž s jednou kilotunou těžké vody v hloubce 2 kilometry pod zemí. Japonci v projektu Super-Kamiokande<sup>6</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 galium. 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, DU-

<sup>5</sup><http://www.sno.phy.queensu.ca/>

<sup>6</sup><http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html>

MAND, NESTOR, NEMO se do hloubky až několika kilometrů umístí na laněch řetězce senzorů (viz obrázek 11.8), které zaznamenávají případnou reakci neutrína s prostředím. Ambiciózní evropský projekt KM3NeT je zatím ve výstavbě. První senzory rozmístěné ve Středozezemním moři v objemu 1 km<sup>3</sup> už ale od září 2017 pracují. 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.



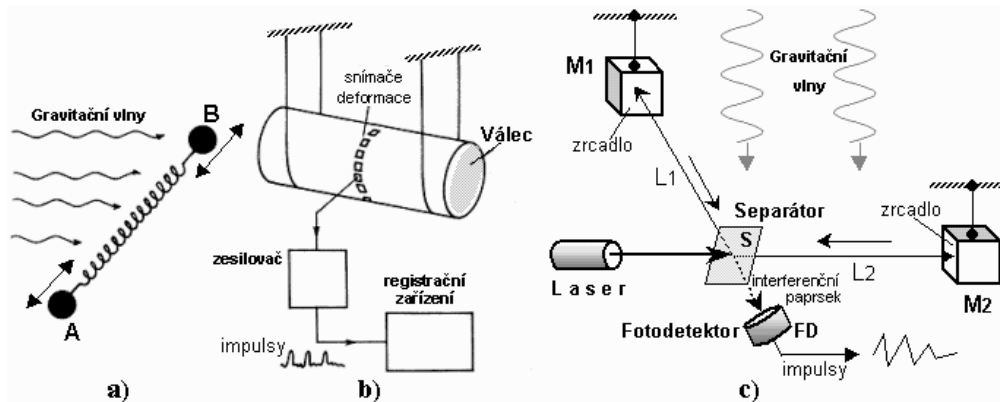
Obrázek 11.9: Vlevo: Vkládání řetězce detektorů do jednoho z otvorů v ledu v poli IceCube poblíž základny na jižním pólu. Vpravo: Schéma pole detektorů IceCube. Převzato z <http://www.dailymail.co.uk>.

### 11.6.3 Gravitační vlny

Existenci gravitačních vln 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.

První detekce gravitačních vln byly jen nepřímé. Interpretovalo se tak zkracování oběžné doby binárních pulsarů, například PSR 1913+16. V roce 1972 sice ohlásil Joseph 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 11.10b) 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 11.10c). Jsou tvořeny dvěma na sebe kolmými tunely,



Obrázek 11.10: 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>.

v nichž je vyčerpán vzduch. Na konci tunelů jsou umístěna zrcadla odrážející vyslaný laserový paprsek. Po odrazu a návratu na počátek tunelů paprsky interferují. Při příchodu gravitační vlny se nepatrně změni poloha jednoho zrcadla, což se projeví změnou interferenčního obrazce. Největším detektorem gravitačních vln je dnes americký LIGO (Laser Interferometer Gravitational wave Observatory) sestávající ze dvou detektorů vzdálených 3 000 km. Oba přístroje mají ramena dlouhá 4 km. V Evropě mu sekundují italský experiment VIRGO a německo-britský GEO 600 a v Japonsku TAMA. Právě aparatura LIGO zaznamenala 14. září 2015 první gravitační vlnu z vesmíru GW150914 (Abbott et al., 2016).

Observatoř na detekci gravitačních vln má být zbudována i ve vesmíru. Bohužel plánovaný americko-evropský projekt LISA (Laser Interferometer Space Antenna) byl pro nedostatek financí na americké straně v roce 2011 zrušen. ESA projekt přepracovala a pod názvem eLISA/NGO (Evolved Laser Interferometer Space Antenna/New Gravitational Wave Observatory) v něm pokračuje. V roce 2015 vypustila družici LISA Pathfinder, která v letech 2016 až 2017 v oblasti bodu  $L_1$  testovala možnosti detekce gravitačních vln. Výsledky předčily očekávání a tak se snad dočkáme i velké vesmírné observatoře na detekci gravitačních vln.

## Použitá a doplňující literatura

- Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al. 2016, Physical Review Letters, 116, 061102  
 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



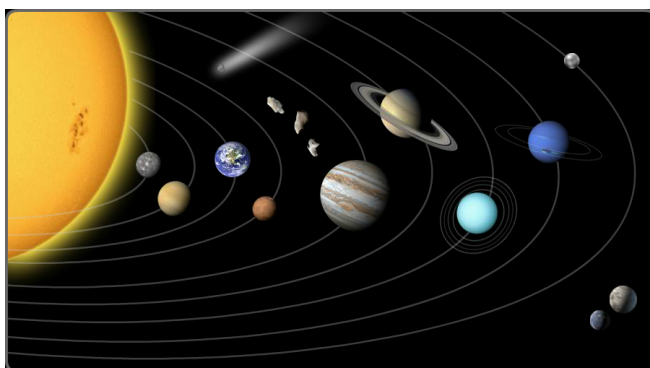
- Cowan, C. L., Jr., Reines, F., Harrison, F. B., Kruse, H. W., & McGuire, A. D. 1956, *Science*, 124, 103
- Cowen, R. 2011, October 5, "Comets take pole position as water bearers". *Nature*.doi:10.1038/news.2011.579
- Dendy, P. P., & Heaton, B., 1999, *Physics for Diagnostic Radiology*. USA: CRC Press. p. 12. ISBN 0-7503-0591-6
- 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>

## 12 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 6. Pojdme se ještě jednou podívat na tělesa naší Sluneční soustavy. Tentokrát nás bude zajímat organizace Sluneční soustavy, popis pohybu jejích těles a podíváme se trochu blíže i na jednotlivé planety.

### 12.1 Inventura ve Sluneční soustavě

Dominantním tělesem Sluneční soustavy je její centrální hvězda – Slunce, která sama představuje 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.



Obrázek 12.1: Sluneční soustava. Zdroj: <http://www.seasky.org/>.

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 roztřídit 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 6. Bohužel tyto definice jsou skutečně platné pouze v rámci naší Sluneční soustavy 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. Své vlastní 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. Formálně jsou všechny považovány za planetky, včetně Pluta i s Charonem<sup>2</sup>. 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 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>3</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 známým objektem z této kategorie byl objekt 1992 QB1, dalšími pak například Makemake, dále sem můžeme zařadit objekty Quaoar, Varuna, Chaos, Logos a další.

Ostatní objekty Sluneční soustavy jako například komety, meteoroidy už naštěstí žádná změna zařazení v poslední době nepostihla.

## 12.2 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 dosavadní vývoj? To jsou otázky, které se pokusíme velmi stručně zodpovědět v následujících řádcích.

### 12.2.1 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. Některé otázky vzniku planet a jejich vlastností tak stále nejsou uspokojivě 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

<sup>1</sup>U těles Sluneční soustavy se jako absolutní hvězdná velikost označuje hvězdná velikost objektu pozorovaného ze vzdálenosti 1 au pod fázovým úhlem (Slunce-těleso-Země) rovným nule.

<sup>2</sup>Pluto má sice v katalogu planetek své číslo 134340, ale to se většinou nepoužívá.

<sup>3</sup>Prazvláštní jméno kubewano (cubewano) je odvozeno z označení prvního takového tělesa 1992 QB1.

let se vytvořil centrální horký zárodek budoucího Slunce a kolem něj protoplanetární disk o průměru přibližně 200 au<sup>4</sup>. Během následujících 50 miliónů let zárodek centrální hvězdy narostl a ohřál se natolik, že se v něm zapálily jaderné reakce – vzniklo Slunce. Mezitím v okolí probíhala divoká akrece látky. Částice prachu v okolí Slunce tvořily shluky s rozměry řádově stovky metrů, 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 okolo velké množství. Během několika miliónů let narostly až na hmotnost čtyř Zemí a začaly přitahovat a zachycovat vodík a hélium ze svého okolí. Tento proces byl ukončen po uplynutí 3 až 10 miliónů let od zapálení reakcí v nitru Slunce, protože následný velmi intenzivní hvězdný vítr „vyfoukal“ ze Sluneční soustavy všechn zbylý materiál zárodečného mračka (Lin, 2008; Elmegreen, 1979). Podle různých odhadů naše planetární soustava mohla přijít o hmotu hmotností srovnatelnou s hmotností Slunce.

Tyto představy dostaly trhlinu s objevem planet o velikosti a konstituci Jupitera 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 tyto planety vznikly společně s Jupiterem a Saturnem někde v jejich blízkosti a poté migrovaly 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 Jupitera připadal jeden oběh Saturnu, dokázala vytlačit Uran a Neptun za trajektorie Jupitera a Saturnu, a naopak mnoho malých ledových těles z vnějších oblastí bylo vychýleno z jejich trajektorie a dostalo se do blízkosti Jupitera, 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 pozdního 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 pozdního intenzivního bombardování se ale stále Sluneční soustavou potuluje dostatek projektilů, které mohou Zemi smrtelně zranit.

<sup>4</sup>Pro připomenutí a srovnání, Neptun jako nejvzdálenější planeta od Slunce obíhá kolem něj v uctivé vzdálenosti zhruba 30 au.

### 12.2.2 Stopy předchozího vývoje na tváři planet

Nejsilněji se na podobě planet podepsaly dva procesy, které probíhaly hned v raných stadiích 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. Podle některých teorií podobné dramatické setkání potkalo v dávné minulosti i naši Zemi. Srážka Prazemě s planetou o velikosti zhruba dnešního Marsu měla zásadně pozměnit svrchní vrstvy tehdejší Země a navíc uvolnit do okolního prostoru dostatek materiálu, z něhož později vznikl Měsíc.

Podle složení a vnitřní stavby rozdělujeme planety Sluneční soustavy do dvou skupin.

- **podobné Zemi (terestrické)** – Jsou tvořeny převážně z prvků železa, křemíku, hořčíku, hliníku a vápníku a jejich sloučenin. 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 terrestrické 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 terrestrických planet a velkých družic jako náš Měsíc jsou dodnes zřejmé stopy intenzivního bombardování z počátku Sluneční soustavy i etapy vulkanismu v podobě sopek, sopečných průduchů, impaktních kráterů, velkých dopadových pánví, prasklin a v případě Země i pevninských desek.

#### 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 na Marsu má průměr základny 610 km a vrcholový kráter o průměru 80 km naleznete ve výšce 26 km nad zvolenou nulovou referenční hladinou. Pro srovnání – velikostí největší pozemská sopka Mauna Kea na Havaji, se vypíná nad mořskou hladinu jen 4205 m, ale od 120 km široké základny na dně oceánu je vysoká pouze 10 205 m.

Zcela jiný typ vulkanismu byl objeven u velkých měsíců planet. Na měsíci Ió je v důsledku slapových sil Jupitera aktivních hned několik sopek, které produkují proudy



Obrázek 12.2: Sopky na Zemi (nahore vlevo), na Venuši (nahore vpravo), na Jupiterově měsíci Io (dole). Zdroj: BBC, NASA.

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 1500 m vysoká hora, z jejíhož jícnu vytéká materiál podobný lávovým proudům. 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 12.3: Impaktní krátery. Vlevo: Barringerův kráter v Arizoně, USA. Vpravo: Měsíční kráter Daedalus. Zdroj: National Geographic, NASA.

## Impakty

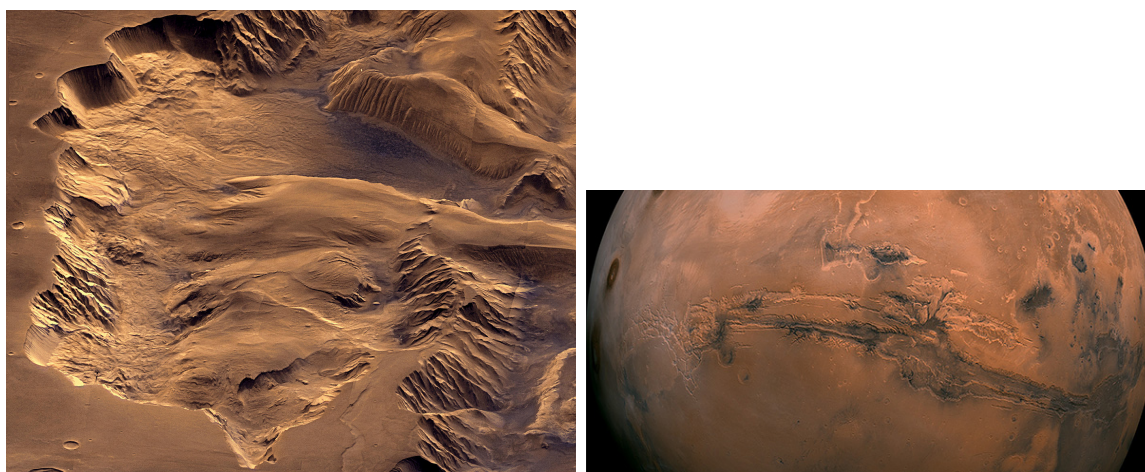
Zcela zásadní vliv na podobu některých těles Sluneční soustavy mají impaktní krátery. Většina z těch, které se nacházejí na povrchu planet nebo velkých měsíců, vznikla v období intenzivního bombardování, ale vznikají i dnes. Na Zemi a dalších tělesech s intenzivním geologickým vývojem a hustou atmosférou jsou stopy po dopadu cizího tělesa

poměrně brzy zahlazeny. Patrné zůstávají jen relativně čerstvé krátery, staré jen milión až 10 miliónů let<sup>5</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.

## Praskliny

Tektonické<sup>6</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 12.4: Údolí Marineru (Valles Marineris) na Marsu. Zdroj: NASA.

<sup>5</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).

<sup>6</sup>Tektonika je část geologie, zabývající se poruchami zemské kůry, eventuálně kůry dalších těles ve Sluneční soustavě.

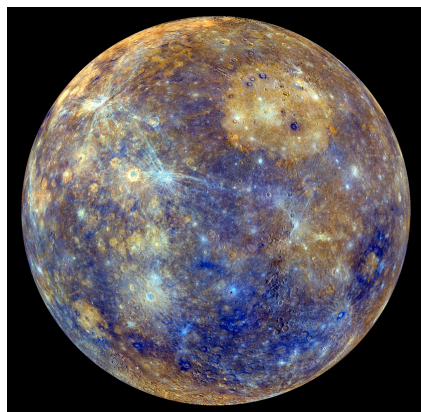
Tabulka 12.1: Planety Sluneční soustav.

Planeta	Vzdálenost od Sl. [au]	Výstřednost	Doba oběhu kolem Sl.[d]	Rovn.průměr [km]	Hmotnost [ $M_Z$ ]	Doba rotace [d]	Počet měsíců
Merkur	0,388	0,206	87,97	4 879	0,055	58,646	0
Venuše	0,723	0,007	224,70	12 104	0,815	243,019	0
Země	1,000	0,017	365,26	12 756	1	0,997	1
Mars	1,524	0,093	686,96	6 792	0,107	1,026	2
Jupiter	5,203	0,048	4 332,59	142 984	317,899	0,414	69
Saturn	9,537	0,054	10 757,73	120 536	95,162	0,440	62
Uran	19,191	0,047	30 708,16	51 118	14,536	0,718	27
Neptun	30,069	0,011	60 190	49 528	17,147	0,671	14

Poznámky k tabulce:  $M_Z = 5,97 \cdot 10^{24}$  kg, počet přirozených měsíců k roku 2017.

## 12.3 Základní informace o planetách

### 12.3.1 Merkur ☿



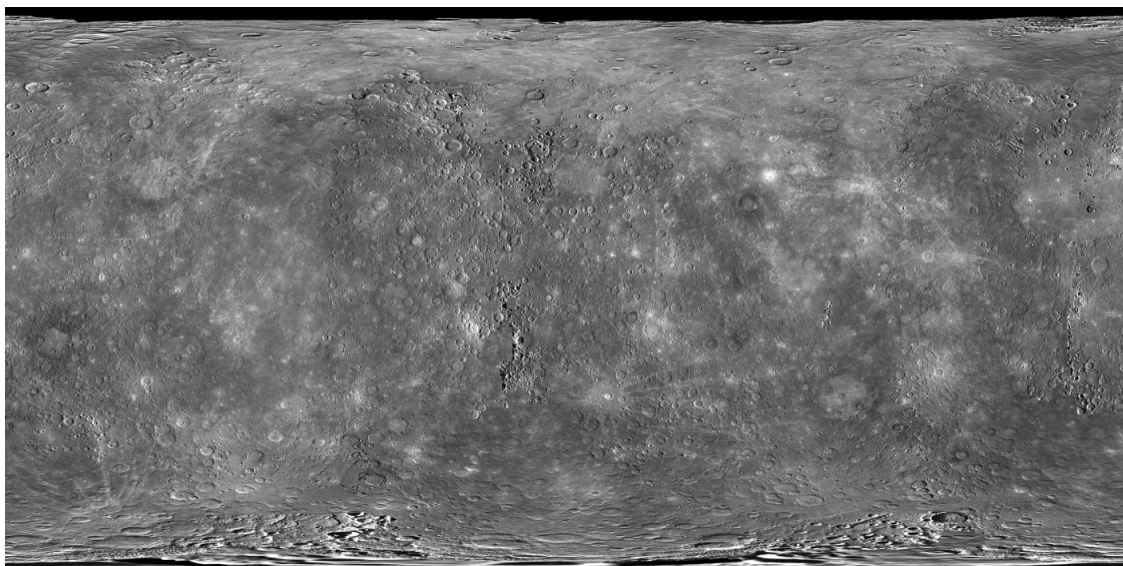
Obrázek 12.5: Snímek Merkuru z širokouhlé kamery sondy Messenger. Zdroj: NASA.

Planeta Merkur má hned několik „nej“, například obíhá nejbližše ke Slunci nebo je nejmenší z planet Sluneční soustavy. Dokonce je menší než některé měsíce velkých planet. Oběžná doba je nejkratší. Trajektorie Merkuru má největší výstřednost ze všech planet Sluneční soustavy a nejmenší sklon rotační osy vůči rovině ekliptiky. Navíc se přímka apsid (spojnice perihelu a afelu) 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 otočí třikrát. Povrch Merkuru je vystaven velkému střídání teplot od  $-173$  °C až do  $+427$  °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 zlomy (relativně strmé příkopy v délce až několika set kilometrů). Nejvýraznějším útvarem je pánev Caloris (Pánev horka) – systém šesti prstencových valů (nejvýraznější o průměru 1 340 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 kosmické sondy Mariner 10 (1974 - 1975), který prozkoumal 45 % povrchu, a zejména nově sonda Messenger, která u Merkuru pracovala v letech 2011 až 2015, kdy dopadla na povrch planety. Mezi nejvýznamnější objevy sondy patří detekce vodního ledu na dně kráterů v oblasti





Obrázek 12.6: 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>.

severního pólu Merkuru. V roce 2018 by měla k merkuru odstartoval první evropsko-japonská sonda BepiColombo.

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. Naposledy v roce 2016, další nastanou v letech 2019 a 2032.

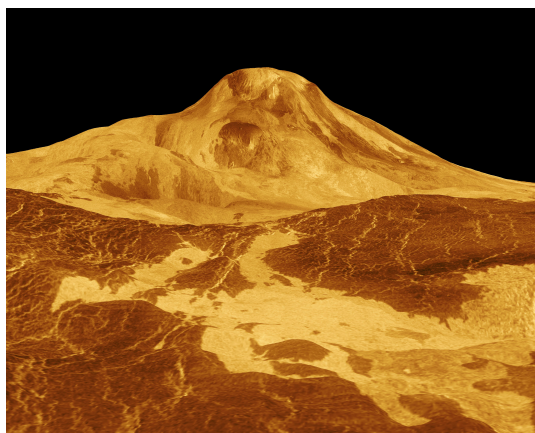
### 12.3.2 Venuše ♀



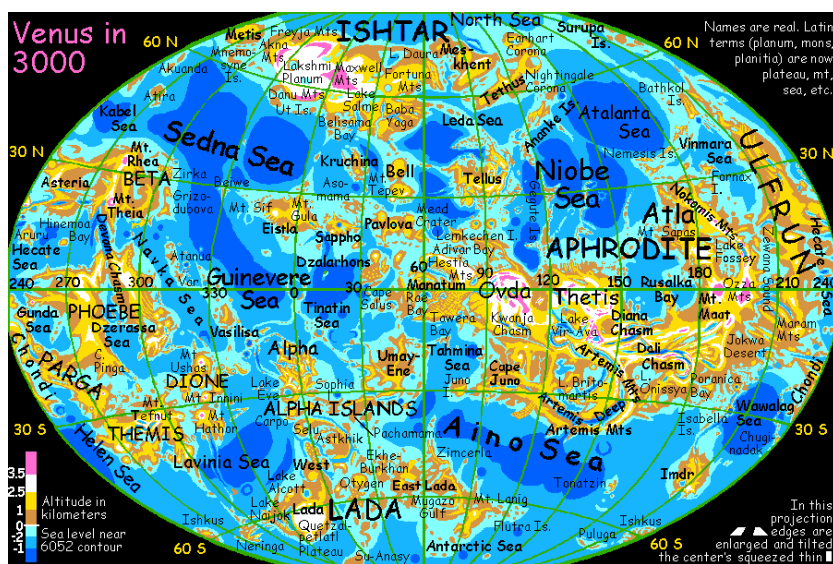
Obrázek 12.7: Snímek povrchu planety Venuše pořízené sondou Veněra 14 v roce 1982. Zdroj: [http://www.mentallandscape.com/C\\_CatalogVenus.htm](http://www.mentallandscape.com/C_CatalogVenus.htm).

O Venuši se často říká, že je sestrou Země. Vždyť je přibližně stejně veliká. Ale rozdíl 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. A liší se i samotné těleso. Zatímco zemská kůra je rozdělena do pevninských desek, kůra planety Venuše je celistvá a relativně mladá. Její stáří odhadujeme na 600 milionů let. Je to výsledek mohutné sopečné erupce nebo erupcí na povrchu. Největší sopky jsou štítové (podobné jako ty havajské na Zemi) a mají základny až 1 000 km v průměru. Nejvyšší vrcholky Maxwellova pohoří sahají až do výšky přibližně 11 kilometrů. Otázkou

je, zda se na povrchu nacházejí i aktivní vulkány. V roce 2015 byly zaznamenány teplotní změny povrchu v oblasti Ganiki Chasma, které lze interpretovat přítomností aktivních vulkánů. Na tyto informace jsme však museli čekat až do poměrně nedávné doby.



Obrázek 12.8: Hora Maat. 8 km vysoká sopka ze vzdálenosti 560 km. Počítačově zpracovaný snímek z radarových měření sondy Magellan. Zdroj: NASA.

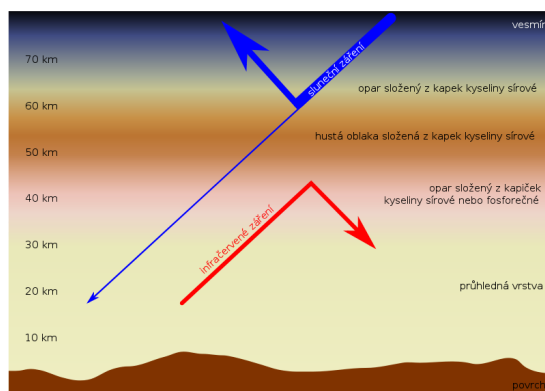


Obrázek 12.9: Mapa Venuše. Zdroj: <http://www.worlddreambank.org/>.

Povrch Venuše zakrývá hustá vrstva oblačnosti ve výšce 45 až 60 km nad povrchem, v masivní atmosféře, tvořené téměř výhradně oxidem uhličitým. Co se skrývá na Venušině povrchu pod atmosférickou pokličkou jsme tak mohli odhalit až s rozvojem radarové techniky a díky kosmickým sondám. V rámci sovětského kosmického programu Veněra bylo v letech 1961 - 1983 k Venuši vypuštěno 16 sond. Jen některé se ale dokázaly vypořádat s tavnými podmínkami, teplotou až 500°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 12.7). První mapa povrchu byla zhotovena teprve v 90. letech 20. století v rámci amerického projektu Magellan, který mimo

jiné ukázal, stopy silné sopečné aktivity. Vždyť až zhruba 85 % povrchu je sopečného původu. Poslední výzkum prováděla sonda Venus Express, která kroužila kolem planety v letech 2006 - 2014.

Na pozemské obloze je Venuše po Slunci a Měsíci třetím nejjasnějším kosmickým objektem. Může dosáhnout hvězdné velikosti až  $-4,6$  mag a na večerní nebo ranní obloze<sup>7</sup> se opravdu mnohdy třpytí jako drahokam. V dalekohledu ale uvidíme jen fáze planety, povrch nikoli.



Obrázek 12.10: Skleníkový jev – příčina extrémních podmínek na Venuši. Zdroj: wikipedia.

### 12.3.3 Země ☾



Obrázek 12.11: Země z kosmu. Zdroj: <http://p-in.it/>.

Naše domovská planeta je zatím jediná, na níž byl potvrzen život. S poloměrem 6 378 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.

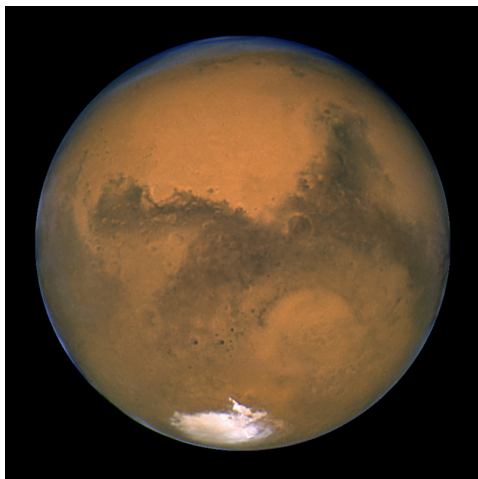
Země vznikla před zhruba 4,6 miliardami let. Krátce poté získala i dnešní Měsíc. Ten výrazně zasáhl do dalších osudů naší Země. Především dlouhodobě stabilizoval sklon zemské osy a pravděpodobně také díky slapovým silám, přílivu a odlivu také napomohl přechodu života z moří na souši. Nicméně, zcela zásadní 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 zahálí do

<sup>7</sup>Maximální elongace (od Slunce) je  $45^\circ$  až  $47^\circ$ .

mraků a dostaví se silný skleníkový jev<sup>8</sup>, který nadále zvýší teplotu na 40 až 80 °C. Organismy, které do této doby ještě nevymřely, se vrátí 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 překročí 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 její povrch se bude doslova tavit. Za další tři miliardy let se Slunce změní v bílého trpaslíka. Naše Země sice přečká celý životní cyklus Slunce, ale stane se z ní chladné, mrtvé těleso, které bude v temnotě, bez zdrojů energie obíhat 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. Nemusí jít ani o použití zbraní. Člověk Zemi ničí pozvolna, ale o to systematictěji. Znečištění vody, půdy nebo ovzduší už někde nabývá katastrofálních rozměrů. Je jen na nás, zda budou na Zemi moci žít i budoucí generace lidí. Budoucnost Země, alespoň ta z astronomického hlediska velmi blízká, není ve hvězdách ale v lidech.

### 12.3.4 Mars ♂

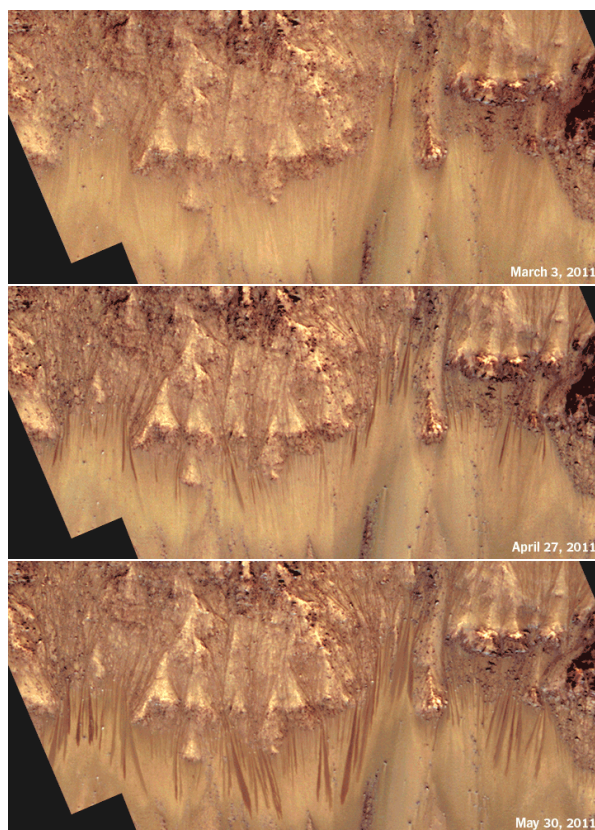


Obrázek 12.12: Mars na snímku HST v době velké opozice 27. 8. 2003. Na snímku jsou patrné nejvýraznější útvary povrchu jako Olympus Mons, Valles Marineris, Solis Lacus. Zdroj: NASA.

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 tvořena oxidem uhličitým a spodní vodou. Voda se na Marsu vyskytuje i ve stále zmrzlé půdě (permafrostu). V minulosti byla na povrchu běžná voda i v tekutém stavu.

V roce 2015 objevili vědci známku toho, že na některých místech Marsu může i dnes voda stékat po stěnách kráterů (viz obrázek 12.13). Později se však ukázalo, že pozorované stružky s největší pravděpodobností voda na svědomí nemá. Jde o působení chemických látek oxidu uhličitého  $\text{CO}_2$  a chloristanu  $\text{ClO}_4^-$ .

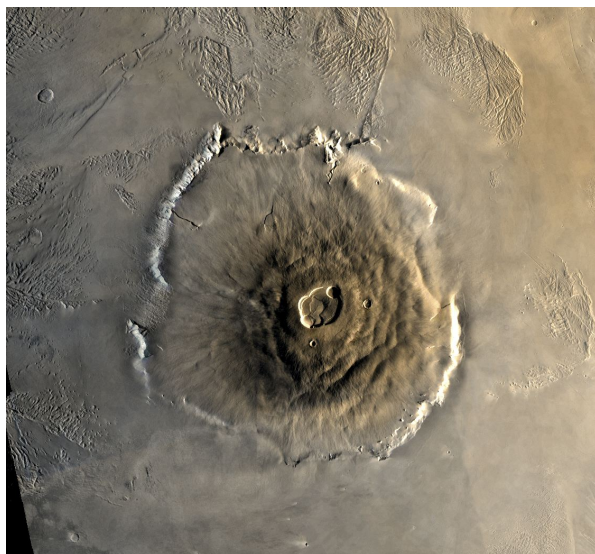
<sup>8</sup>Mechanismus skleníkového jevu je obdobný jako u Venuše (obrázek 12.10), jen působící látky jsou v případě Země jiné.



Obrázek 12.13: Stěny kráteru Palikir ukazují, jak se stružky rozšiřují a tmavnou během teplých měsíců. Zdroj:NASA/Jet Propulsion Laboratory/University of Arizona.

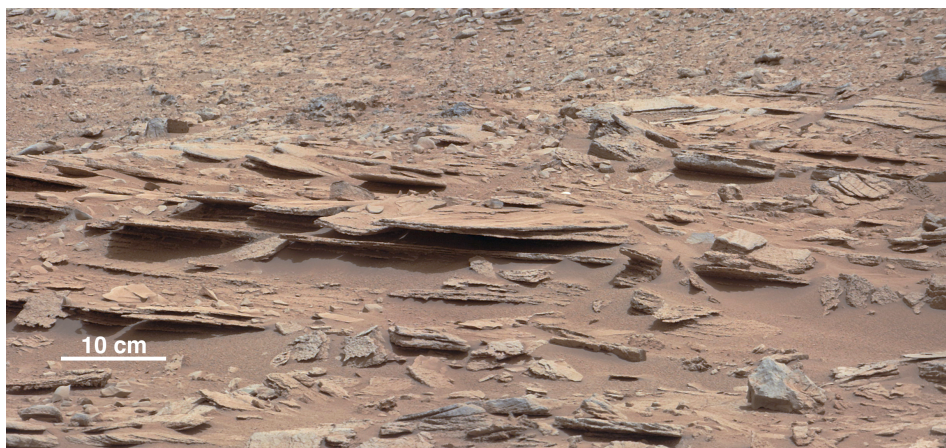
Povrch Marsu je kromě bílých polárních čepiček spíše červenavý. Vděčí za to písku a prachu s oxidem železitým ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), který známe i ze Země jako nerost hematit. Na povrchu můžeme najít pánve – rozsáhlé, zhruba kruhové plošiny. Největší z nich je Hellas o průměru 1600 km a hloubce 6 km. V kůře Marsu jsou obří praskliny. Valles Marineris (Údolí Marinerů) představuje celý komplex údolí s délkou 5 000 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 610 km, která ční do výšky 26 km nad okolí. Pohled na povrch je ale občas zastřen mohutnými písečnými bouřemi globálního charakteru. Ve výšce 6 tisíc, 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 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 tou 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 klam. Šance na objev života na Marsu měl posílit objev údajných fosilních mikroor-



Obrázek 12.14: Olympus Mons. Zdroj: NASA.

ganismů 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 řídnutí 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



Obrázek 12.15: Detail povrchu Marsu v kráteru Gale na záběrech z vozítka Curiosity. Zdroj: NASA.

rozvinul zatím nevíme. Na definitivní potvrzení života na Marsu si prostě budeme ještě muset počkat.

Výzkum Marsu 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. Například v roce 2014 pracovalo v okolí planety 7 aktivních misí. Na druhou stranu musíme dodat, že také celá řada projektů zde skončila neúspěchem.

Právě Mars ale bude zřejmě první planetou, kam zamíří i lidská posádka. V současnosti se nejvíce spekuluje o termínu po roce 2030.

### 12.3.5 Jupiter ♃

Největší planetou Sluneční soustavy je Jupiter, který se stal 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 tisícinu hmotnosti Slunce a oběhne kolem Slunce jednou za 11 let.



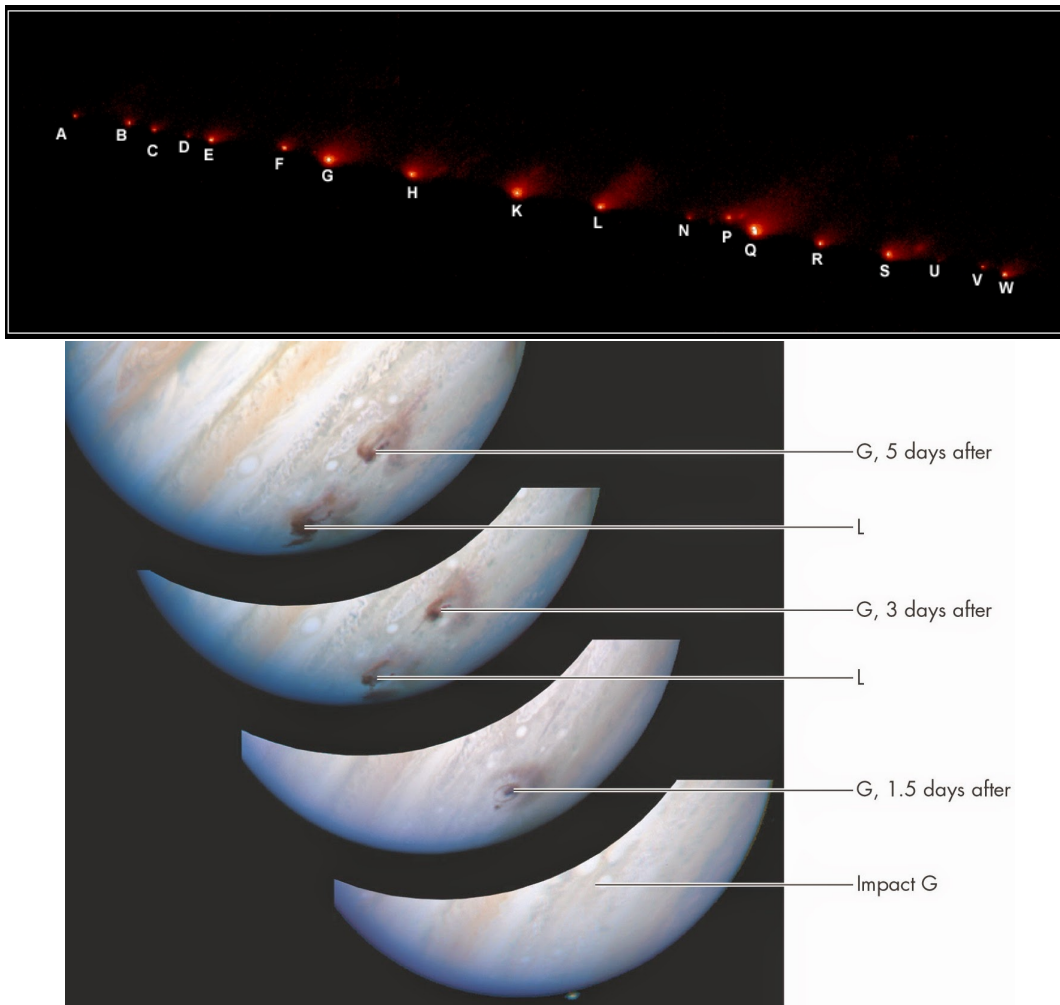
Obrázek 12.16: Mapa atmosférických útvarů na Jupiteru z pozorování sondy Cassini v prosinci roku 2000. Zdroj: NASA.

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 pásích 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>9</sup> vlastních měsíců, které se pohybují v silném radiačním poli.

<sup>9</sup>K říjnu 2017 bylo známo 69 měsíců Jupitera. Aktuální stav je možné nalézt na <http://www.dtm.ciw.edu/users/sheppard/satellites/>.

Největší z nich jsou čtyři velké tzv. *galileovské družice* Io, Europa, Ganymed a Callisto, velikostí srovnatelné s naším Měsícem (více v kapitole 12.4.2).

S průzkumem Jupitera „zblízka“ začala dvojice sond Pioneer 10 a 11 v letech 1973 až 1974. Od té doby se u Jupitera pohybovaly zejména družice Voyager 1 a 2 (v roce 1979) a pak sondy Cassini a zejména sonda Galileo v roce 1995, která kolem Jupitera obíhala 8 let. Krátké dostaveníčko se novými údaji a snímky předvedla v roce 2007 sonda New Horizons, která kolem něj proletěla na své cestě k Plutu. Od července 2016 pracuje na oběžné dráze u Jupitera sonda Juno. Čas od času se na Jupitera a jeho družice zaměří i Hubbleův kosmický dalekohled. Ten mimo jiné sledoval nárazy částí komety Shoemaker-Levy 9 do Jupitera v roce 1994 (obrázek 12.17).



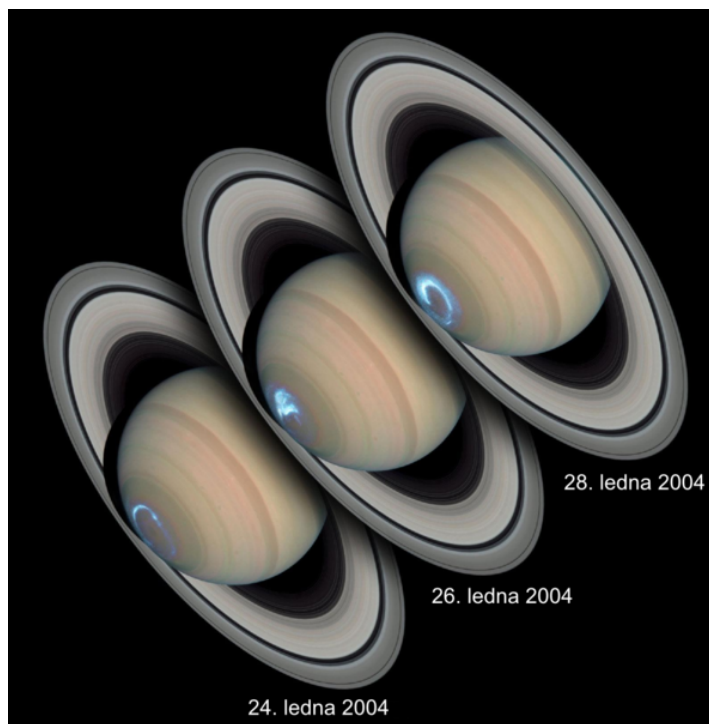
Obrázek 12.17: Úlomky komety Shoemaker-Levy 9 a jejich dopad na Jupitera v roce 1994. Zdroj: NASA.

Ze Země je Jupiter vidět 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.



### 12.3.6 Saturn $\eta$

Saturn spolu s jasnými prstenci je považován 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. Navíc 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 tyto 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.



Obrázek 12.18: 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 snímky ve viditelné oblasti spektra až v březnu téhož roku. Zdroj: NASA, ESA.

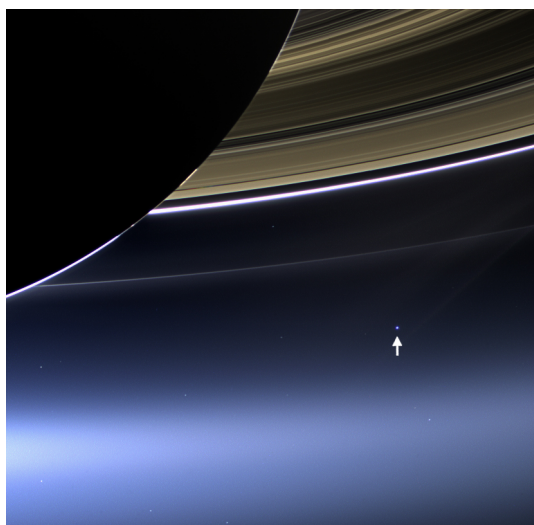
Při pozorování ze Země je i v malých dalekohledech vidět prstence, obepínající nažloutlý kotouček. Vedle prstenců najdeme u planety i početnou rodinu měsíců<sup>10</sup>, které vévodí Titan s hustou atmosférou a jezery s tekutinou na povrchu (více v kapitole 12.4.2).

<sup>10</sup>K říjnu 2017 bylo známo 62 měsíců Saturnu. Aktuální stav je možné nalézt na <http://www.dtm.ciw.edu/users/sheppard/satellites/>.



Obrázek 12.19: Panoramatický pohled na prstence Saturnu. Širší, šedý prstenec je prstenec A. Z vnitřní strany ho vymezuje Cassiniho dělení, největší mezera mezi Saturnovými prstenci. Za ní se nachází široký prstenec B, potom tenčí a tmavší prstenec C a nejvnitřnější je prstenec D. Zdroj: wikipedia.

V současné době přímý průzkum planety a jejího okolí pomocí kosmických sond neprobíhá. V minulosti byly velmi úspěšné sondy Pioneer 11, Voyager 1 a 2 a zejména sonda Cassini-Huygens. Ta dorazila k Saturnu v roce 2004. Její modul Huygens počátkem roku 2005 dokonce přistál na povrchu Titanu. Celá mise skončila v září 2017, kdy byla sonda navedena do hustých vrstev atmosféry planety.



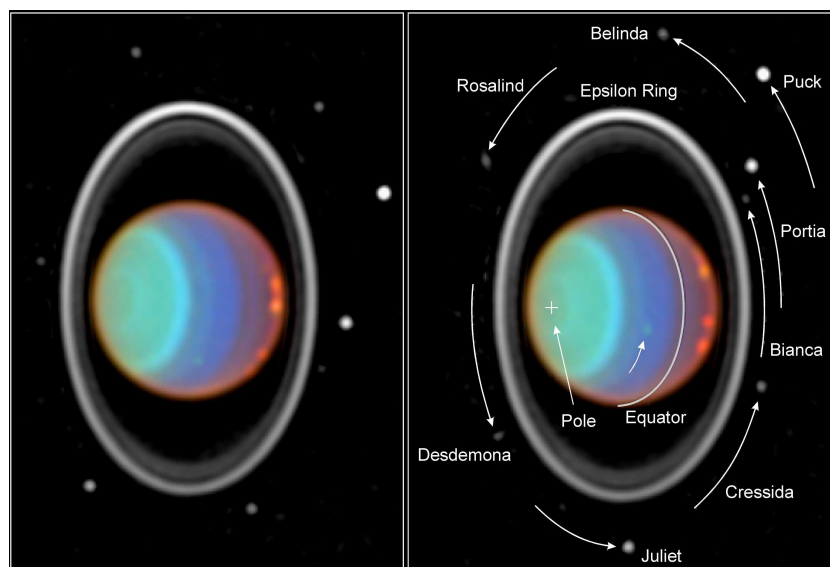
Obrázek 12.20: Snímek Země pořízený sondou Cassini z oběžné dráhy kolem Saturnu 19. 7. 2013. Zdroj: NASA.

### 12.3.7 Uran ♅

Uran je možné za výjimečných podmínek pozorovat i pouhými očima na noční obloze. Protože je ale na hranici viditelnosti, starověcí hvězdáři jeho planetární povahu neodhalili. Objevil jej až 13. března 1781 William Herschel<sup>11</sup>.

Stavbou a složením řadíme Uran mezi plynné obry, ale spolu s Neptunem také mezi tzv. *ledové obry*. Uran je tvořen zejména vodíkem a héliem, ale jsou zde i výrazné příměsi

<sup>11</sup>Herschel rozpoznal jako první planetární charakter. Uran pozorovali už před ním např. John Flamsteed v roce 1690, Tobias Mayer v roce 1756 nebo Pierre Charles Le Monnier dvanáctkrát v letech 1750-1771. Všichni jej ale považovali za kometu.



Obrázek 12.21: Planeta Uran se skupinou měsíců. Na dvojici infračervených snímků (ve falešných barvách), které od sebe dělí 90 minut, je jasně patrná rotace planety i oběh měsíců. Prstence byly uměle zjasněny, aby byla patrná jejich struktura, ve skutečnosti jsou velmi tmavé. Zdroj: NASA.

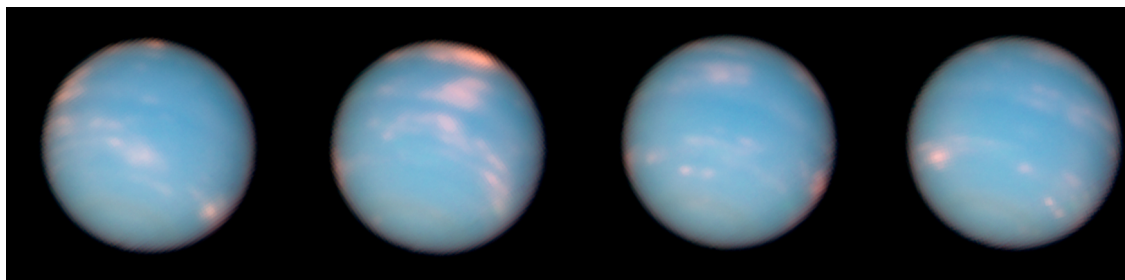
vody, čpavku či metanu se stopami uhlovodíků. Atmosféra je vůbec nejchladnější v celé Sluneční soustavě – jen kolem 49 K. V horních vrstvách atmosféry se vyskytuje metan, který pohlcuje červené světlo a způsobuje modré zbarvení planety. Atmosféra rotuje rychleji než jádro planety, větrné proudy v atmosféře se pohybují rychlostí až 900 km/h. Osa rotace leží takřka v rovině ekliptiky, 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 (Elliott 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>12</sup>. Zajímavosti o některých z nich jsou v kapitole 12.4.2.

### 12.3.8 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 (Galle, 1846). 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

<sup>12</sup>K říjnu 2017 bylo známo 27 měsíců Uranu. Aktuální stav je možné nalézt na <http://www.dtm.>



Obrázek 12.22: Narozeninové snímky Neptuna byly pořízeny HST během 16 hodin 25.-26. června 2011. NASA tým připomněla 165 let od objevu planety, za které Neptun dokončil právě jeden oběh kolem Slunce. Zdroj: NASA.

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 je také řazen mezi tzv. *ledové obry*.

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 také 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>13</sup>. Největší z nich Triton je zhruba pětínové velikosti Země. Více o něm a dalších měsících v kapitole 12.4.2.

## 12.4 Malá tělesa Sluneční soustavy

### 12.4.1 Trpasličí planety

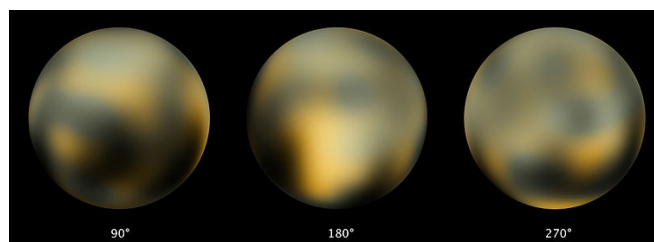
#### Pluto

Pluto objevil 18. února 1930 Clyde W. Tombaugh na Lowellově observatoři v USA<sup>14</sup>. 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 (Christy & Harrington, 1978). Protože těžiště 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 dorazila v roce 2015. Dosavadní výsledky ukazují, že svými rozměry, stavbou, trajektorií a zřejmě i vznikem patří Pluto mezi tělesa Kuiperova pásu. Povrch Pluta

[ciw.edu/users/sheppard/satellites/](http://ciw.edu/users/sheppard/satellites/).

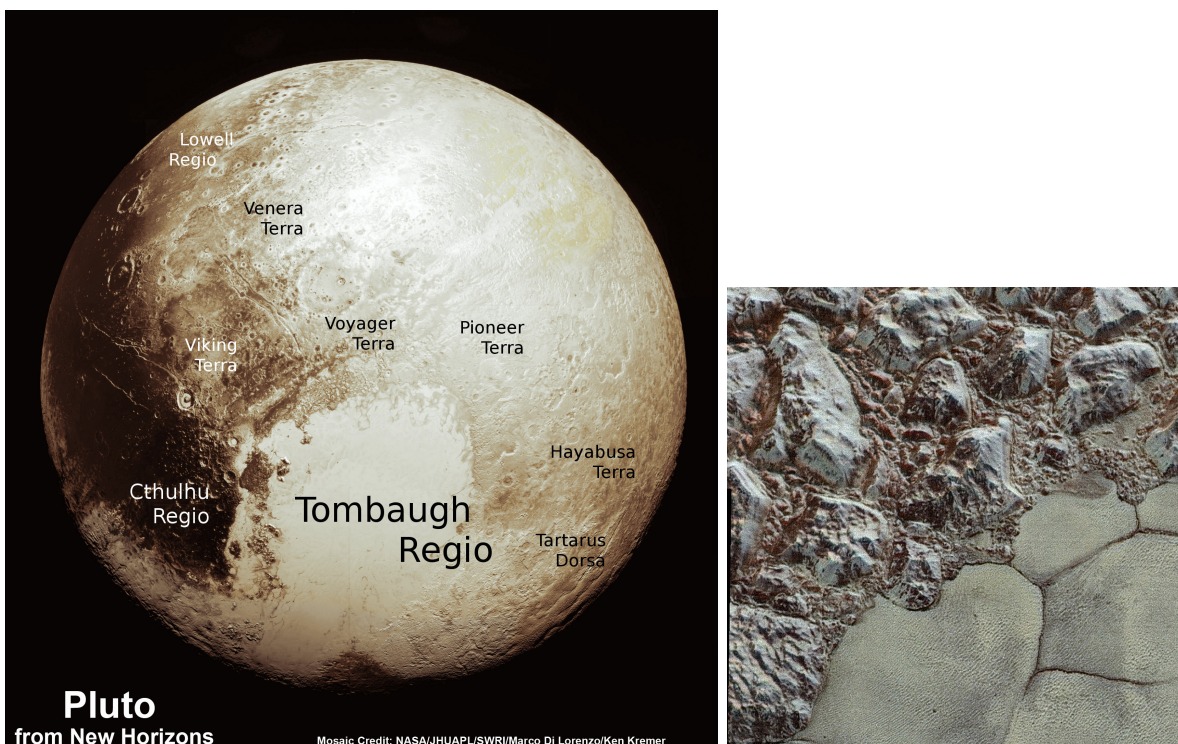
<sup>13</sup>Poslední objev 14. měsíce Neptunu byl oznámen v létě 2013. Aktuální stav je možné nalézt na <http://www.dtm.ciw.edu/users/sheppard/satellites/>.

<sup>14</sup>Tombaugh si svůj objev ověřil na dalších snímcích a teprve 12. března 1930 odeslal telegram na Harvardskou observatoř s žádostí o oficiální zveřejnění objevu (Shapley, 1930)



Obrázek 12.23: Povrch trpasličí planety Pluto na snímcích z HST. Zdroj: NASA.

je velmi chladný, v průměru jen 43 K ( $-230\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Protože má velmi výstřednou trajektorii, dochází na jeho povrchu k výraznému kolísání teplot a k opakovanému zahřívání a ochlazování povrchu. Podobně jako u komet, také 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. Sonda New Horizon ukázala, že Pluto má relativně hustou a chemicky různorodou atmosféru. Pluto má retrográdní rotaci, sklon rotační osy k rovině oběhu je nyní asi  $120^{\circ}$ , ale zřejmě v řádů miliónů let kolísá v rozsahu  $25^{\circ}$ . Některá data naznačují i existenci podpovrchového oceánu.



Obrázek 12.24: Vlevo: Nový celkový pohled na Pluto vytvořený ze snímků sondy New Horizons pořízených 14. 7. 2015 ze vzdálenosti 80 000 km od povrchu. Vpravo: Detailní snímek planiny Sputnik na povrchu Pluta. Zdroj: NASA.

Kolem Pluta obíhá pět měsíců. Kromě již zmíněného Charonu ještě Nix, Hydra, Styx a Kerberos. Všechny pravděpodobně vznikly před 4 miliardami let srážkou dvou těles o velikosti dnešního Pluta.

### Ceres, Eris, Makemake, Haumea a další

Ceres objevil 1. ledna 1801 Giuseppe Piazzi. Až do roku 1851 byla považována za planetu. Poté byla číslem 1 mezi planetkami. Od roku 2006 patří mezi trpasličí planety a 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. Podstatné zlepšení našich znalostí o tělese umožnila sonda Dawn, která se dostala na oběžnou dráhu Ceresu v roce 2015.

Eris byla objevena v roce 2003 (Brown et al., 2005). Je větší než Pluto. V žebříčku hmotností těles Sluneční soustavy zaujímá místo hned po osmi planetách. Také proto byla krátce (do srpna 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 [mejkmejk].

Haumea byla objevena v roce 2005 a na první pohled zaujme především její silně zploštělý tvar  $1960 \times 1518 \times 996$  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.

Někteří autoři, například Gonzalo Tancredi nebo Mike Brown (viz <http://web.gps.caltech.edu/~mbrown/dps.html>) uvádějí mezi trpasličími planetami i další tělesa například Quaoar, Sedna, Orcus, Salacia, 2007 OR<sub>10</sub>, 2002 MS<sub>4</sub> a mezi kandidáty pak radí několik set dalších objektů.



Obrázek 12.25: Největší transneptunické objekty, které jsou trpasličími planetami nebo na oficiální zařazení do této kategorie čekají. Zdroj: <http://hubblesite.org/>.

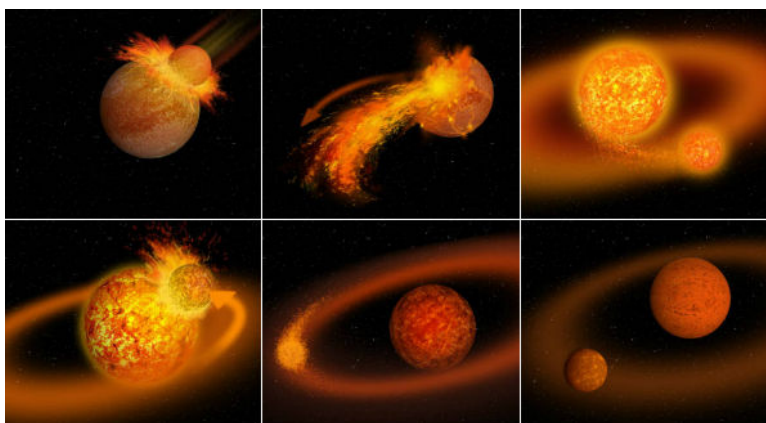
## 12.4.2 Měsíce planet

Přirozené družice planet jsou významnou součástí naší Sluneční soustavy. Řada z těchto těles má velikost srovnatelnou s Merkurem nebo trpasličími planetami. Mohou významně ovlivňovat podmínky na mateřské planetě, což je případ i našeho Měsíce. Některé z nich mohou být i místem výskytu života. Kandidátů je zde hned několik. Proto je vhodné jim věnovat zvláštní pozornost.

### 12.4.2.1 Země: Měsíc

Významu Měsíce pro Zemi a život na ní a jeho pozorování ze Země jsme se věnovali v kapitole 6.2. Nyní se podívejme trochu podrobněji na to, kde se vlastně Měsíc vzal, jak vznikl. V minulosti se spekulovalo o třech možnostech, v nichž Měsíc hraje zjednodušeně řečeno roli bratra, syna nebo manžela Země.

V teorii, kde Měsíc vystupuje jako manžel Země, by vznikl na jiném místě Sluneční soustavy a byl zemí později zachycen. Jako bratr by vznikl ve stejné době jako Země v její blízkosti. V nejpravděpodobnějším scénáři vzniku ale Měsíc hraje roli syna Země. Podle teorie z poloviny 70. let 20. století (Hartmann & Davis, 1975) vznikl Měsíc při srážce předchůdce naší planety s tělesem o velikosti Marsu, přibližně desetkrát méně hmotným než tehdejší Země. Během střetu byla menší planeta, pojmenovaná podle matky Měsíce Theia, zcela zničena a většinu jejího materiálu uchvátila Země. Zbýlý materiál byl rozptýlen v okolí Prazemě do obrovského prstence, z něhož v průběhu několika tisíc let vznikl náš Měsíc. Výpočetní simulace lze najít například v práci Canup (2004).



Obrázek 12.26: Simulace vzniku Měsíce. Vytvořilo Black Cat Studios.

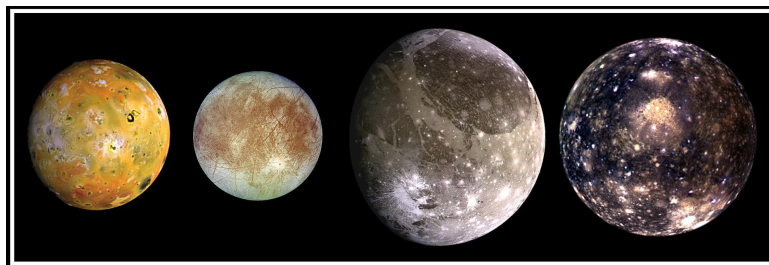
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! zbytek kapitoly nedokončen !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

### 12.4.2.2 Mars: Phobos a Deimos

Strach a Hrůza - malé nepravidelné

### 12.4.2.3 Rodina družic Jupitera

Kolem Jupitera obíhá několik desítek známých měsíců. Mnoho drobnějších satelitů zůstalo zatím neobjeveno. Čtyři největší měsíce – Io, Europa, Ganymed a Kallisto objevil počátkem 17. století Galileo Galilei, proto jsou někdy označovány jako galileovské měsíce.



Obrázek 12.27: Galileovské družice Io, Ganymed, Europa, Kallisto. Zdroj: NASA.

Ió - aktivní sopky.

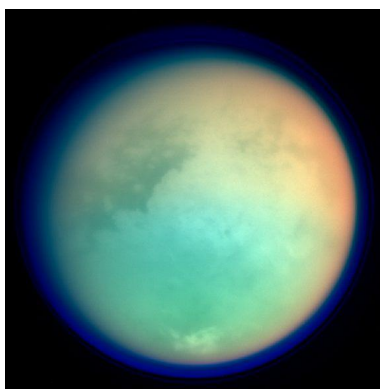
Ganymed - největší měsíc ve Sluneční soustavě, větší než Merkur.

Europa - podpovrchový oceán, možný výskyt života.

Úkazy Jupiterových měsíců (zákryty a přechody) posloužily Olemu Rømerovi v 17. století ke změření rychlosti světla.

### 12.4.2.4 Měsíce Saturna

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 povrchu je voda v kapalném stavu.

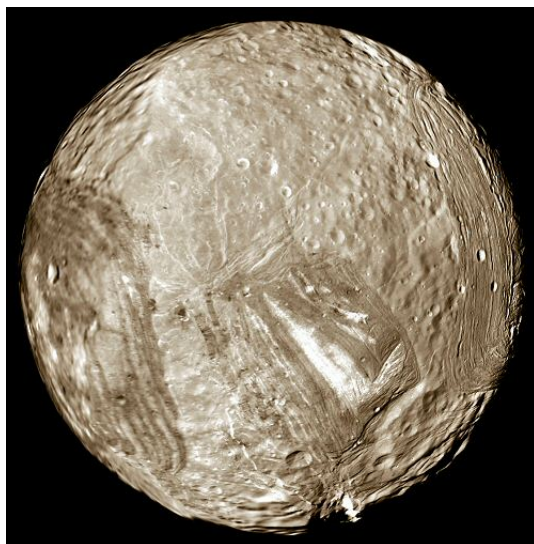


Obrázek 12.28: Složený snímek Titanu (v IR a UV) ze sondy Cassini 26. října 2004. Zdroj: NASA.



#### 12.4.2.5 Společníci Uranu

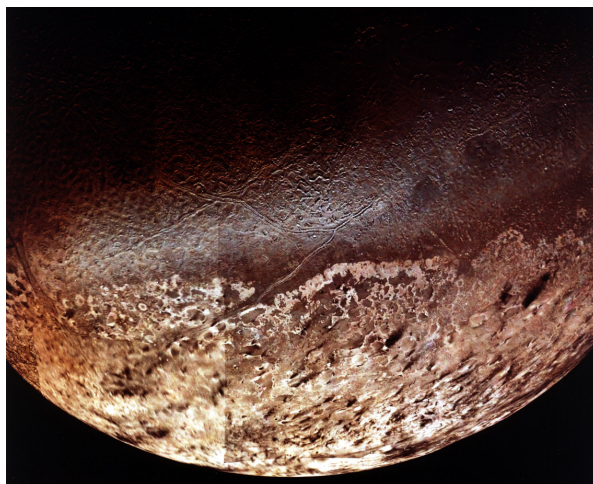
Nejzajímavější z nich je zřejmě Miranda, která má na povrchu hluboké šrámy (viz obrázek 12.29).



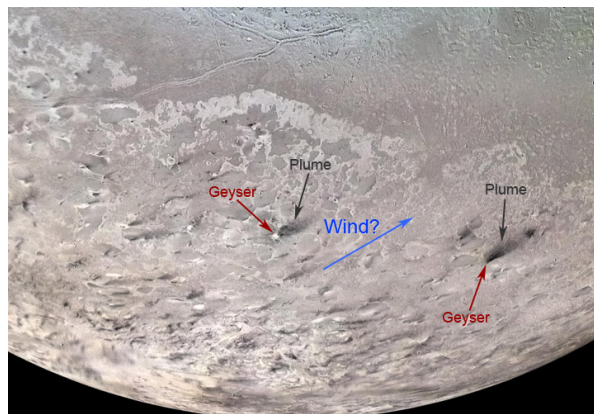
Obrázek 12.29: Uranova družice Miranda na snímku pořízeném sondou Voyager 2 v roce 1986. Zdroj: NASA.

#### 12.4.2.6 Neptunovy měsíce

Triton byl objeven jen 17 dní po objevu vlastní planety (Lassell, 1847). S teplotou 45 K ( $-228\text{ °C}$ ) patří k nejchladnějším světům ve Sluneční soustavě. Podobně jako na Titanu, Europě nebo Enceladu tady nalezneme známky kryovulkanismu, zde v podobě gejzírů tekutého dusíku (viz obrázek 12.31).



Obrázek 12.30: Povrch největšího Neptunova měsíce – Tritonu. Zdroj: NASA.



Obrázek 12.31: Gejzíry tekutého dusíku poblíž jižního pólu Tritonu. Jak se vyvržený materiál snaží zpět na povrch, naznačuje převažující směr proudění atmosféry. Zdroj: NASA.

### 12.4.3 Planetky

Ve Sluneční soustavě jsme si už ukázali a popsali Slunce, planety, trpasličí planety, měsíce planet, 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, ale ta už od roku 2006 patří mezi trpasličí planety. Pomyslnou královnou planetek je tak Pallas, objevená H. W. Olbersem v březnu 1802. V současné době je evidováno 746 412 planetek (stav k lednu 2018) a z nich 21 191 získalo do konce roku 2017 své definitivní pojmenování.<sup>15</sup>

Planetky se vyskytují ve Sluneční soustavě zejména ve třech oblastech. Nejbliže k nám je oblast mezi trajektoriemi Marsu a Jupitera. Mluví se často o hlavním pásu planetek. Další oblastí výskytu je prostor za trajektorií Neptunu. Souhrnně se tato tělesa označují jako transneptunická a místo jejich výskytu za tzv. *Kuiperův pás*<sup>16</sup>. Třetí oblastí výskytu planetek a jader komet komet je *Oortův oblak*<sup>17</sup> doslova na periferii Sluneční soustavy, ve vzdálenosti zhruba 50 000 au.

<sup>15</sup>Aktuální čísla jsou k dispozici na <http://www.minorplanetcenter.net>.

<sup>16</sup>O existenci planetek za drahou Neptunu uvažoval Gerard Kuiper [k(h)ajpr] již v roce 1951. První takové těleso ale objevili až 30. srpna 1992 David Jewitt a Jane Luuová.

<sup>17</sup>Hypotézu o existenci oblaku poprvé publikoval Jan Hendrik Oort v roce 1950, nicméně první předpověď jeho existence pochází z roku 1932 od Ernsta Öpika. Proto se někdy oblak označuje jako Öpikův-Oortův.

### 12.4.4 Komety

Velmi stručně jsme si komety představili v kapitole 6. Komety 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 zejména SOHO a STEREO jsme byli dokonce svědky zániku komet, které dopadly přímo na Slunce (například 1. 10. 2011). Ve Sluneční soustavě je na počátku roku 2018 známo 4 000 komet.

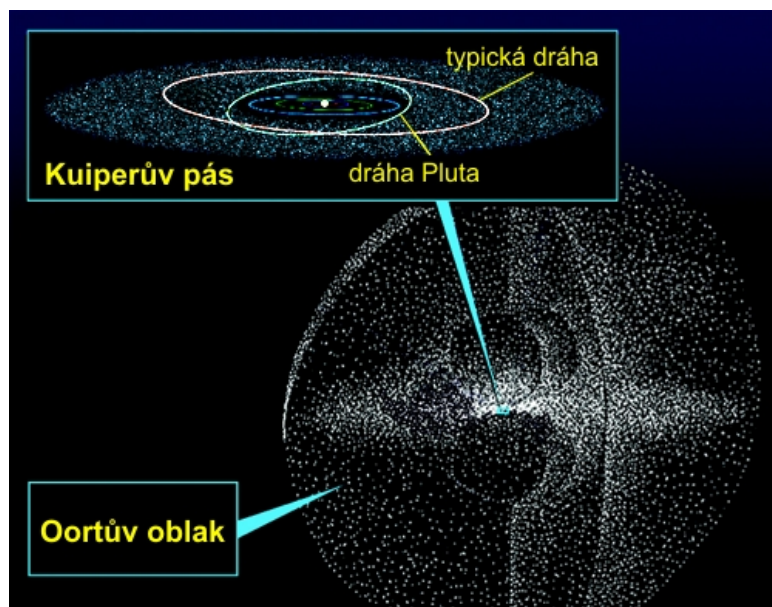
Těleso komety je v principu tvořeno *jádrem*, *komou* a jedním nebo i více *ohony* (viz obrázek 12.34). Jádro je poměrně malý útvar, slepenec zmrzlých plynů a hornin o rozměrech stovek metrů až desítek kilometrů. Samotné jádro je ze Země přímo nepozorovatelné. Když se jádro komety přiblíží ke Slunci, začnou se z něj uvolňovat částice plynu a prachu, které utvoří hlavu komety, komu<sup>18</sup>. Její rozměry mohou být opravdu úctyhodné. Mohou být dokonce větší než Slunce. Posledním důkazem takové obří komy byla kometa 17P/Holmes v roce 2007 na obrázku 6.28 vpravo. Ta dokonce sesadila Slunce z pomyslného trůnu největšího tělesa ve Sluneční soustavě, když dosáhla průměru 1,4 miliónu kilometrů (Hopkin, 2007). Prvenství a slávy si ale kometa užila jen krátce.

Lidé si většinou komety představují jako mlhavý obláček s ohonem. Na jeho vytvoření se podílejí jak samotná kometa, tak i Slunce. 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 6.28 vlevo. Ohony komet odvrácené od Slunce mohou dosáhnout délky až několika astronomických jednotek. Zcela výjimečně může vzniknout i tzv. anomální ohon, který míří z jádra komety směrem ke Slunci.

<sup>18</sup>Slovo *koma* pochází z latiny, kde „coma“ značí kštici, hřívu

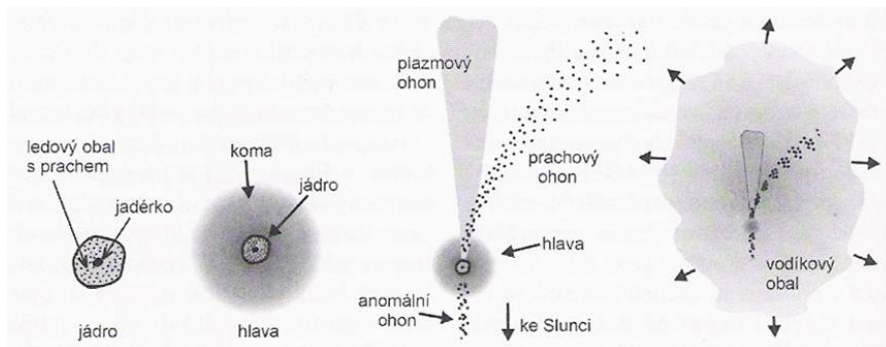


Obrázek 12.32: Eros, jedna z nejbližších blízkozemních planetek na snímku sondy NEAR-Shoemaker. Zdroj: NASA.



Obrázek 12.33: Kuiperův pás a Oortův oblak. Zdroj: NASA.

I když ohony prostě ke kometám patří, známe už i takové, které žádný ohon nemají. Jednou z nich je kometa C/2014 S3, která si vysloužila přezdívku Manx podle manské kočky, která ocas také chybí.



Obrázek 12.34: Schéma komety.

## 12.5 Modely Sluneční soustavy

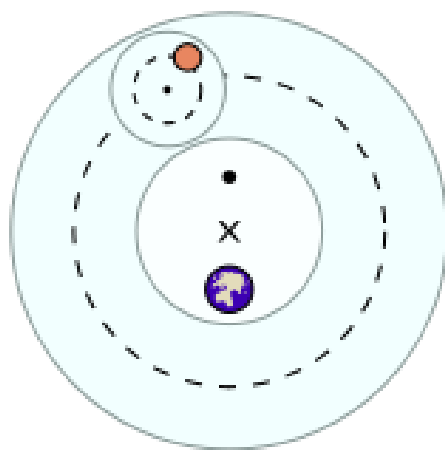
Už starověcí astronomové, jakmile odlišili planety od hvězd, se snažili uspořádat okolní vesmír. Dát mu nějaký řád a vymezit v něm místo pro Slunce, Měsíc, Zemi, další známé planety a hvězdy. Jednotlivé představy uspořádání kosmu se lišily zejména v postavení Země a Slunce. Hlavní názorové proudy vymezují představy geocentrismu a heliocentrismu.

Než se pustíme do výkladu jednotlivých modelů a přístupů, je třeba zmínit, že v dnešní době chápeme tyto modely jako náhledy na uspořádání Sluneční soustavy, nikoli

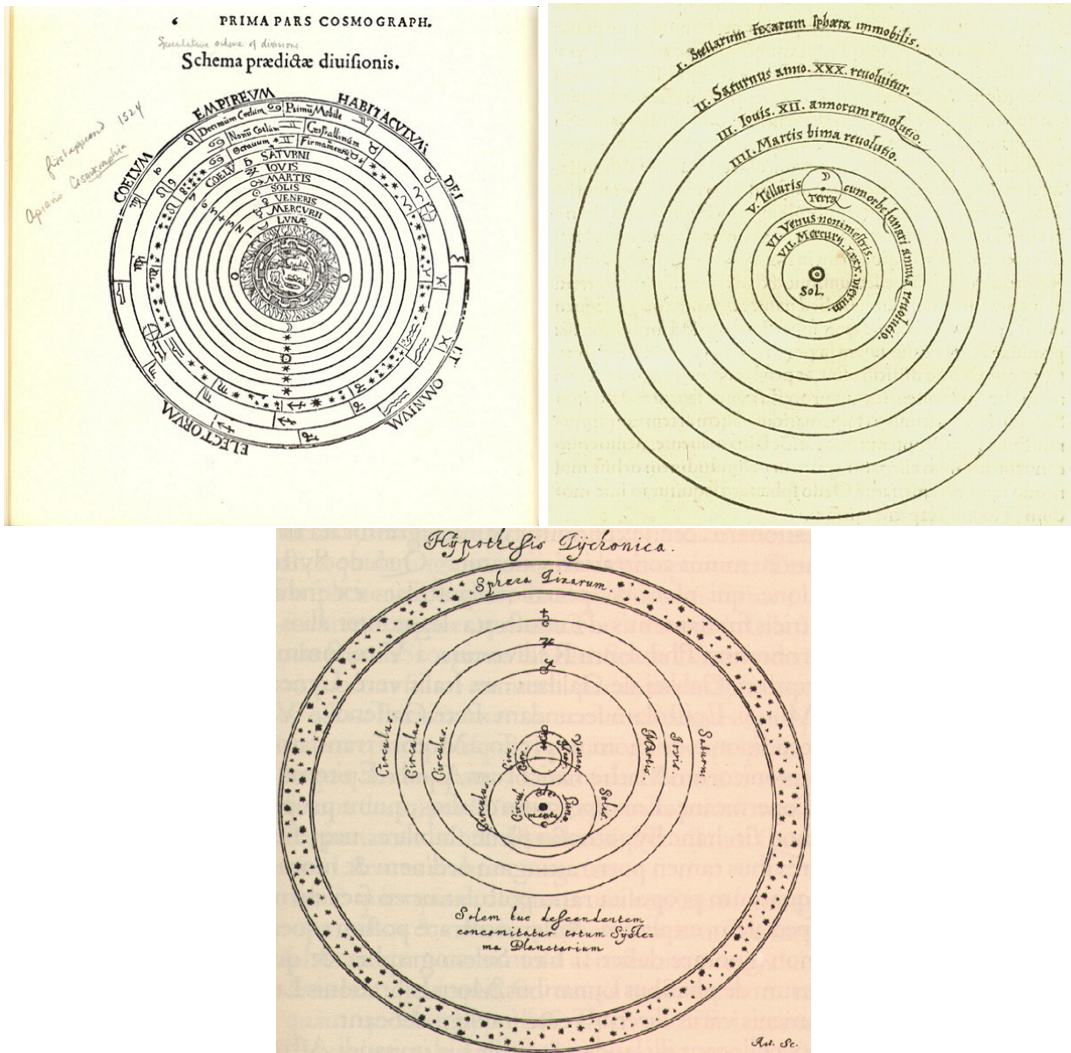
celého světa, kosmu. Z tohoto pohledu není ani „vítězná“ heliocentrická teorie správná. Mimo jiných například Giordano Bruno na konci 16. století poukázal na to, že Slunce není středem vesmíru, ale jen jednou z mnoha hvězd. Později, v průběhu 18. a 19. století už Slunce výsadní postavení ztratilo definitivně. 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.

### 12.5.1 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 byl Klaudios Ptolemaios (římský občan řecké národnosti žijící v Egyptě). 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. Podstatou Ptolemaiova řešení bylo vychýlení Země ze středu deferentu, který se pak označoval jako excentrický deferent nebo *excentr*, a navíc přidal tzv. *ekvant* (viz obrázek 12.35). Teorii epicyklů s ekvantem zpochybnili až perští astronomové ve 13. století nebo Mikuláš Koperník, ale vyvrátil ji až Johannes Kepler.



Obrázek 12.35: 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.



Obrázek 12.36: Modely Sluneční soustavy. Vlevo nahoře geocentrická soustava (Christian Aristotelian Cosmos. Peter Apian: Cosmographia) , vpravo nahoře heliocentrická (M. Koperník: De revolutionibus orbium coelestium) a dole smíšený systém, který navrhl Tycho Brahe. Zdroj: wikipedia.

## 12.5.2 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 nejhlasitějším propagátorem. Ve spise *De Revolutionibus Orbium Coelestium* 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 přirozeně vysvětlil například retrográdní pohyb planet po hvězdné obloze.

Heliocentrický model bojoval nejen s odporem církve, ale i s mnoha předsudky. Nezapomínejme také na to, že tehdejší věda byla stále v područí aristotelovské fyziky. 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 nekoná. 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 jí 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 v takovém rozsahu, který odporoval geocentrické konfiguraci planet. Galileo pozoroval Venuši nejdříve jako malý kotouček a posléze jako velký srpek.

### 12.5.3 Tychonův 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 12.36 dole).

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. Navíc i v tomto modelu ukazovala Venuše všechny fáze.

## 12.6 Keplerovy zákony

Po Koperníkovi měli významnou zásluhu na prosazení heliocentrického názoru 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>19</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>20</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 Mars vrátí přesně do téhož místa dráhy. A totéž věděl také u Země, jejíž polohu si znázornil den po dni. Když byla Země v bodě  $Z_1$  (viz obrázek 12.37), našel Kepler v záznamech pozorování Tychona Braheho, že se Mars 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 prochází Sluncem 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.**

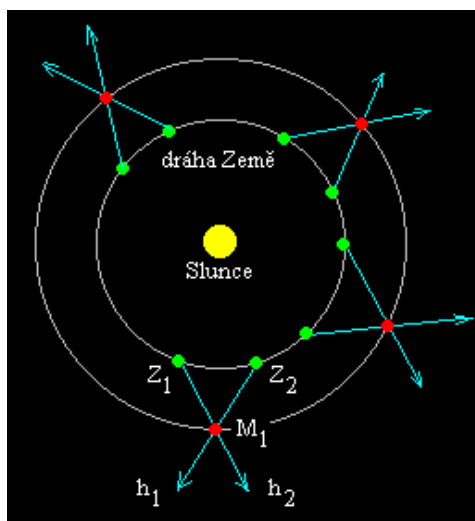
Připomeňme, že průvodič je spojnice planety a Slunce. Důsledky zákona jsou poměrně rozsáhlé. Pokud se planeta pohybuje po elipse, jde o pohyb nerovnoměrný. Planeta se pohybuje nejrychleji v přísluní (perihelu) a nejpomaleji v odsluní (v afelu)<sup>21</sup>. Z toho mimo jiné vyplývá, že léto a zima nejsou na Zemi stejně dlouhé. Protože Země prochází přísluním počátkem ledna, je naše „česká“ zima kratší než naše léto nebo zima u protinožců. Díky tomuto zákonu je také možné jednoznačně odpovědět na trochu záludnou otázku, která noc na Zemi je nejdelší. Asi vás napadne, že jde o noc polární, ale v souladu s výše řečeným je nejdelší jižní polární noc.

<sup>19</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>20</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.

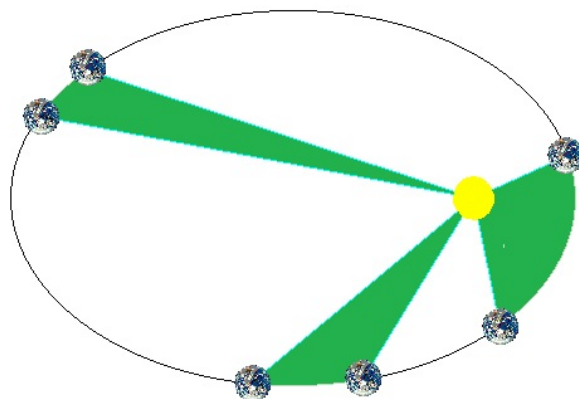
<sup>21</sup>Označení bodů trajektorie nejbližších a nejvzdálenějších k centrálnímu tělesu pro různé případy včetně připomenutí geometrie elipsy najdete v příloze C.





Obrázek 12.37: Princip, jakým Kepler odvodil zákonitost o podobě trajektorie planet. Autor: Ota Kéhar.

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 12.38: 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

$$\frac{P_1^2}{P_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}, \quad (12.1)$$

kde  $P_1, P_2$  jsou oběžné doby planet a  $a_1, a_2$  velké poloosy jejich trajektorií. Ekvivalentní je ale také zápis

$$P^2 \propto a^3, \text{ tedy } P^2 = ka^3, \quad (12.2)$$

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 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

$$\frac{P^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{(M+m)G}, \quad (12.3)$$

kde  $M$  je hmotnost centrálního tělesa,  $m$  hmotnost obíhajícího satelitu,  $P$  jeho oběžná doba,  $a$  velká poloosa jeho trajektorie a  $G$  gravitační konstanta.

## Použitá a 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  
 Brown, M. E., Trujillo, C. A., & Rabinowitz, D. L. 2005, *ApJl*, 635, L97  
 Canup, R. M. 2004, *Icarus*, 168, 433  
 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  
 Hartmann, W. K., & Davis, D. R. 1975, *Icarus*, 24, 504  
 Hopkin, M., 2007, *Nature*, doi:10.1038/news.2007.261  
 Christy, J. W., & Harrington, R. S. 1978, *AJ*, 83, 1005  
 Kleczek, J. 2002, *Velká encyklopedie vesmíru*, Academia Praha, 582 str.  
 Lassell, W., 1847, *MNRAS*, 8, 8 (ve zprávě W. C. Bonda)  
 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  
 Shapley, H. 1930, *Harvard College Observatory Announcement Card*, 108

## 13 Exoplanety



Obrázek 13.1: Možný vzhled povrchu planety CoRot 7b v malířské představě 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 Isaaca Newtona *General Scholium* (1713).

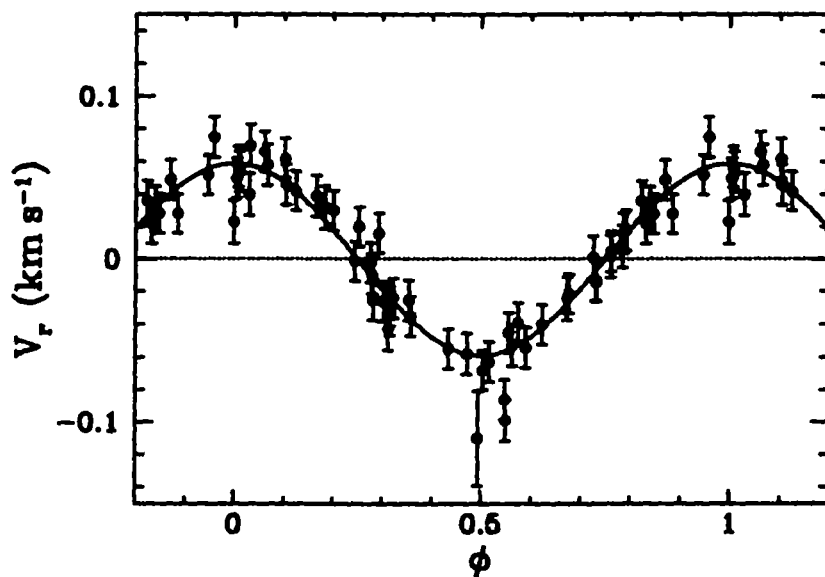
První náznaky potvrzení existence planet mimo Sluneční soustavu přicházejí v polovině 19. století z měření vlastních pohybů hvězd, například v roce 1855 W. S. Jacob z Madraské observatoře poukázal na možné planetární těleso u dvojhvězdy 70 Ophiuchi. Později Peter van Kamp ohlásil dokonce několik objevů 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 Dailem Frailem, obíhající kolem pulsaru PSR 1257+12.<sup>1</sup> Přesto v řadě moderních učebnic

<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.

najdete jako první objevenou exoplanetu až tu, jejíž objev ohlásili 6. října 1995 Michel Mayor a Didier Queloz z Ženevské univerzity. Tato exoplaneta totiž obíhá kolem běžné hvězdy hlavní posloupnosti (viz kapitola 15.5) 51 Pegasi vzdálené od Země 50 ly. Exoplaneta na svou mateřskou hvězdu gravitačně působí. Při oběhu kolem těžiště soustavy hvězda – exoplaneta, se k nám bude hvězda v pravidelných intervalech přibližovat a od nás vzdalovat. Takový pohyb můžeme detekovat v podobě změn radiální rychlosti hvězdy (viz obrázek 13.2).

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 poloviny roku 2016 objeveno více než 2 600 extrasolárních planetárních soustav s více než 3 500 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 13.2: 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.

## 13.1 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

<sup>2</sup>Aktuální počet objevených exoplanet lze zjistit na <http://www.exoplanet.eu>.

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 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, nomádů (na jaře roku 2011) – objektů planetární hmotnosti volně se potulující naší Galaxií.

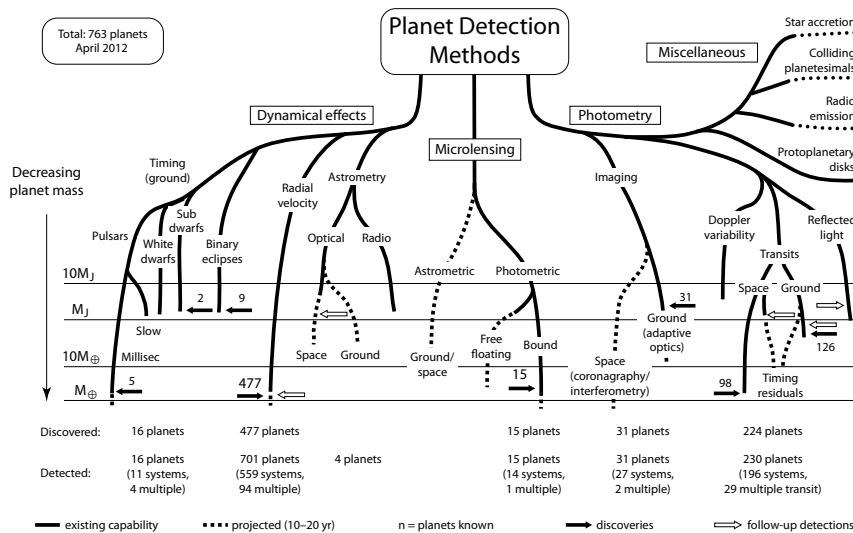
Jak byly objevovány další a další exoplanety, byly postupně tříděny do různých skupin, kde měřítkem byly většinou planety naší Sluneční soustavy. V literatuře o exoplanetách se dnes setkáte s následujícími pojmy:

- *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.
- *excentriční 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.

<sup>3</sup>Se stejnou metalicitou (obsahem kovů) jako u Slunce – viz kapitola o Slunci.

- *exozemě* (v zónách života) – planety velikosti Země obíhající kolem mateřské hvězdy ve vzdálenosti, která by mohla zajistit přítomnost vody v kapalném stavu 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.
- *nomádi*<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 13.3: 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. V české literatuře se nejčastěji setkáme s označením bludné planety nebo nomádi.

## 13.2 Exoplanety ve dvojhvězdách

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus,

magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

### 13.3 Přehled metod pro detekci exoplanet

Jak jsme již uvedli, výzkum exoplanet je 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 13.3. V dalším textu si postupně přiblížíme ty nejúspěšnější.

#### 13.3.1 Přímé zobrazování

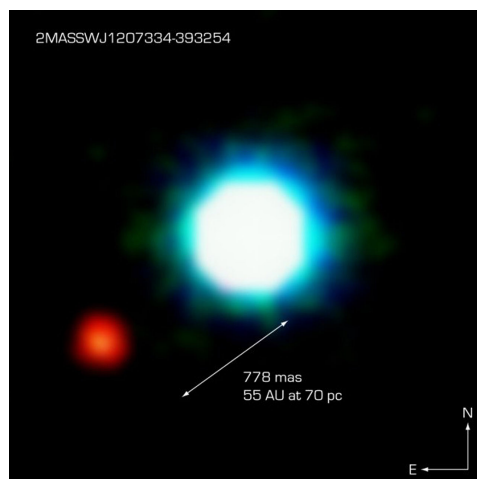
V astronomických knihách minulého století a starších se zcela běžně setkáváme s tvrzením, že přímé pozorování planet obíhajících jiné hvězdy než naše Slunce není možné. Důvody jsou zřejmé. Planety, jak je známe ze Sluneční soustavy, září většinou jen odraženým světlem slunečním. Mezi centrální hvězdou 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 13.4). 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>.

#### 13.3.2 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.

<sup>5</sup>Pro aktuální údaje navštivte <http://www.exoplanet.eu>.





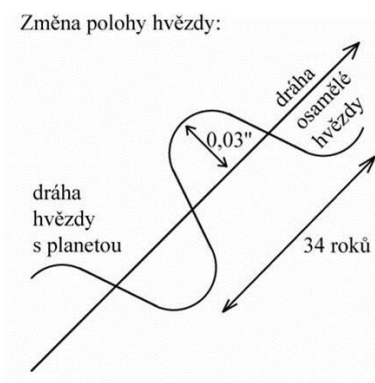
Obrázek 13.4: Hnědý trpaslík 2M1207 (ve středu) a jeho planeta (červený objekt). Obrázek vznikl složením tří snímků ve filtrech blízké infračervené oblasti spektra H, K, L. Planeta je od mateřské hvězdy vzdálena jen  $0,778''$ . Zdroj: ESO PR Photo 14a/05.

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 malé horké hvězdy, tzv. bílí trpaslíci, 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 milionů kilometrů, pak by se poloha Proximy vychylovala o  $\pm 0,03''$  každých 34 let, jak ukazuje obrázek 13.5. Potřebujeme tedy nejen velmi přesná astrometrická měření, ale také prováděná po delší dobu. Legendární družice Hipparcos sice změřila 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.

### 13.3.3 Gravitační mikročočky

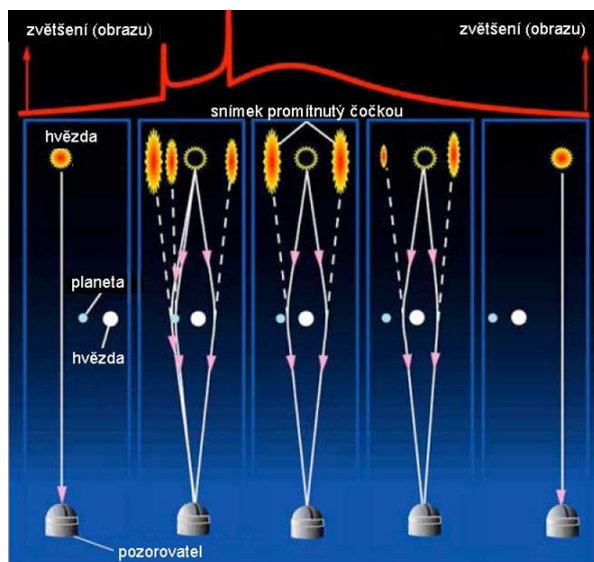
V hledání exoplanet nám pomáhá i Einsteinova obecná teorie relativity. Podle ní jsou totiž paprsky procházející v okolí velmi hmotných objektů zakřiveny. Pokud tedy budeme sledovat velmi vzdálený objekt a mezi ním a námi bude procházet nějaké velmi hmotné těleso, dojde ke zjasnění vzdáleného objektu. Pokud kolem objektu, který hraje roli



Obrázek 13.5: Možnosti astrometrické detekce exoplanet. Převzato z Pokorný (2006).

čochy,<sup>6</sup> navíc obíhá nějaká planeta, může se na křivce zjasnění objevit ještě další velmi krátké zjasnění, jak je vidět na obrázku 13.7.

Úskalím metody je ale to, že doba zjasnění závisí na hmotnosti čočujícího 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 13.6: Ilustrace metody gravitační mikročochy v detekci exoplanet. Převzato z <http://astronomia.zcu.cz>.

<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 mikročočce.

### 13.3.4 Zpožd'ování záblesků pulsarů

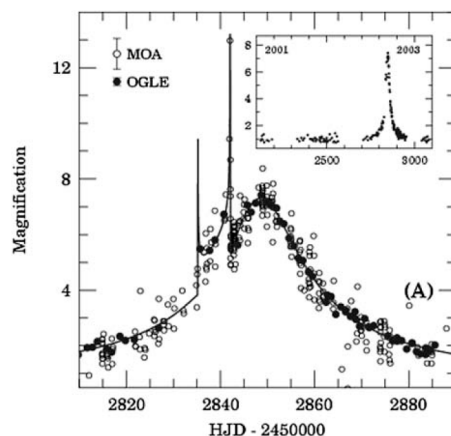
Vzpomenete si na historii objevování exoplanet? První detekci exoplanety, dokonce hned systému exoplanet učinili Wolszczan a Frail v roce 1992 v okolí pulsaru<sup>7</sup> PSR 1257+12. Jenže o jejich objevu se silně pochybovalo. Krátce před tím byl jeden takový objev odvolán a navíc nebylo zřejmé, jak mohou mít pulsary nějaké planety. Dnes už je jejich objev nejen potvrzen, ale přibyly i další planety u pulsarů. Jejich detekce vychází z jednoduchého principu. Planeta obíhající kolem pulsaru na něj gravitačně působí a tak dochází ke zpožd'ování nebo zrychlování jednotlivých velmi rychlých záblesků, jak vidíme na obrázku 13.10. Metoda analýzy zpožd'ování záblesků pulsarů<sup>8</sup> vedla zatím k potvrzeným objevům pěti planet. Několik dalších kandidátů přitom čeká na potvrzení.

### 13.3.5 Radiální rychlosti

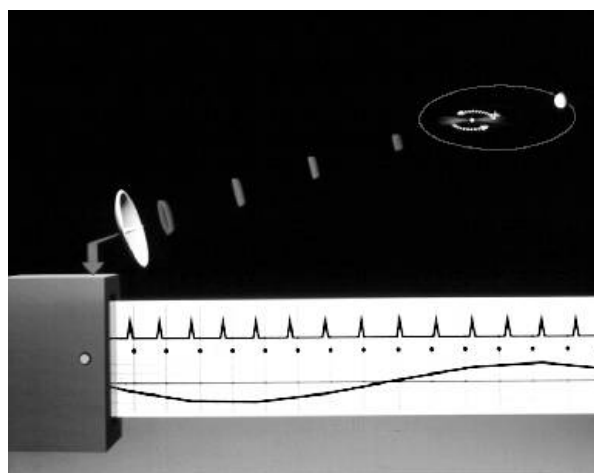
Na projevech gravitačního působení planety na mateřskou hvězdu je založeno několik metod. Ale nejúspěšnější je metoda měření změn radiální rychlosti mateřské hvězdy. Pomocí velmi citlivého spektrografu zkoumáme posun čar ve spektru mateřské hvězdy způsobený Dopplerovým jevem. Jak planeta obíhá kolem 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 u vytipovaných hvězd. Počáteční přesnost určení radiální rychlosti hvězd byla kolem 15 m/s, dnes nejlepším přístrojem v tomto směru je

<sup>7</sup>Pulsarům se budeme věnovat dalších kapitolách. 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.

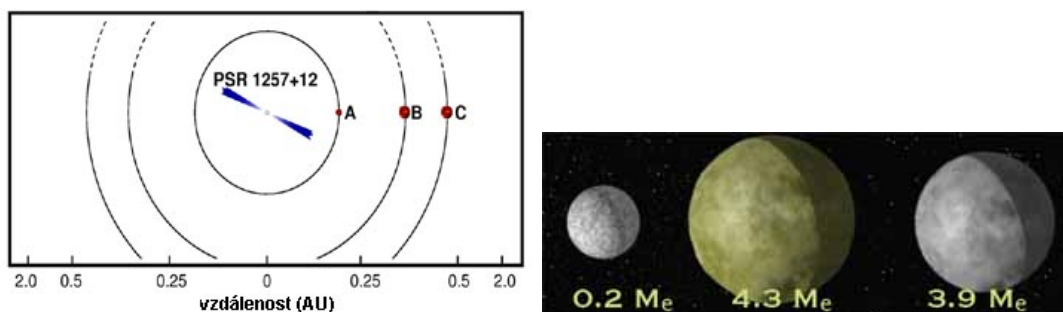
<sup>8</sup>V anglicky psané literatuře se používá termínu „Pulsar timing“.



Obrázek 13.7: Pozorování planety gravitační mikročočkou 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.



Obrázek 13.8: 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>.



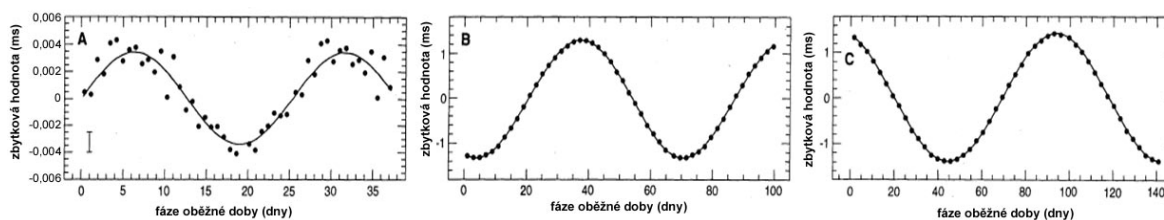
Obrázek 13.9: Pulsar PSR 1257+12 a jeho planetární soustava. Převzato z <http://astronomia.zcu.cz>.

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 13.2). 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 13.11).

### 13.3.6 Transit

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 tak, že zorný paprsek ze Země leží v této rovině, pak exoplaneta během oběhu kolem mateřské hvězdy přechází přes disk hvězdy nebo se za ním celá schová. Přechod temného kotoučku planety přes zářivý disk hvězdy způsobí



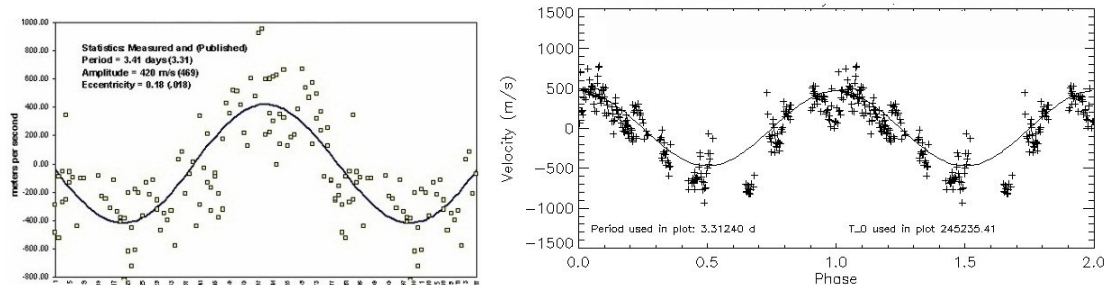
Obrázek 13.10: Zbytkové hodnoty času z měření pulsaru PSR 1257+12, na kterých je vidět vliv oběžných dob 25,34 dne (planeta A), 66,54 dne (planeta B) a 98,22 dne (planeta C). Pozorování bylo prováděno po dobu 3 let. Na každém snímku je vliv ostatních dvou planet odfiltrován. Pro planetu A je na snímku zřetelná nejistota výsledku důsledkem digitálního zpracování signálu. Pro planety B a C jsou nejistoty nepostřehnutelné. Převzato z <http://astronomia.zcu.cz>

maličký pokles jasnosti hvězdy zhruba na úrovni jednoho procenta. Pokles hvězdné velikosti centrální hvězdy takového systému můžeme měřit v milimagnitudách.

Po objevu první exoplanety 51 Pegasi b začaly závody, 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 13.12), zatímco Henry et al. (2000) měřili hvězdu až v listopadu téhož roku.

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,

<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>.



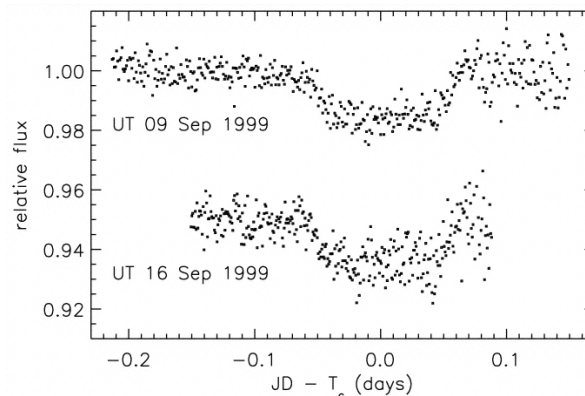
Obrázek 13.11: Křivka radiálních rychlostí hvězdy  $\tau$  Boo jasně ukazuje přítomnost exoplanety. Měření byla provedena skupinou amatérských astronomů v letech 2000 (obrázek vlevo) a 2004. Převzato z <http://www.spectrashift.com>.

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.

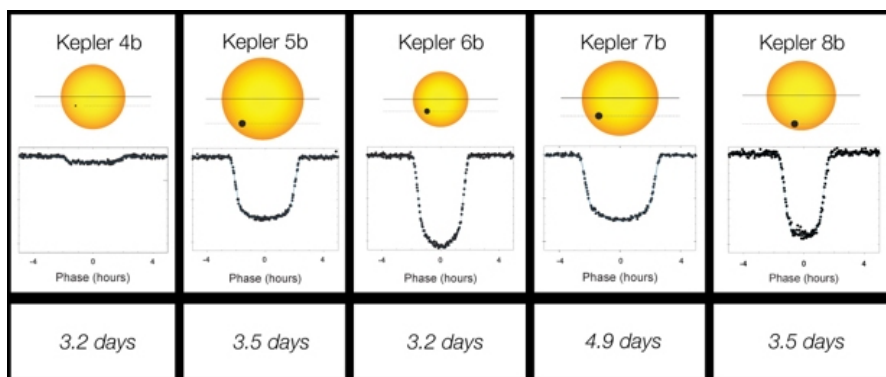
Největším „lovcem“ exoplanet současnosti je družice KEPLER. Hledání exoplanet tvoří podstatnou část náplně také u družice CoRoT. Bohužel mise družice CoRoT v létě 2013 skončila. Práce družice KEPLER byla plánována na 4 roky do května 2013. V létě 2013 došlo k technickým potížím (porucha třetího gyroskopu), které znemožnily pokračování původního programu. Nicméně sonda pokračuje v práci a v rámci mise K2 dále přináší vynikající měření oblastí v okolí ekliptiky. Nicméně se připravují 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), PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of stars). Řada podobných projektů byla ale pro nedostatek finančních prostředků zrušena. Budoucnost nám ukáže.

### 13.3.7 TTV,ETV

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.



Obrázek 13.12: První zaznamenané transity exoplanety HD 209458 b. Zdroj: Charbonneau et al. (2000).



Obrázek 13.13: Ukázka transitů pěti exoplanet pozorovaných družicí KEPLER. Zdroj: NASA.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vi-

tae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

## Použitá a 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



## 14 Život ve vesmíru

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 Kauffmann 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:

<sup>1</sup><https://astrobiology.nasa.gov/roadmap/>

- samostatné existence,
- samostatné údržby,
- samostatné reprodukce,
- vývoje.

Jako základní jednotku všech živých soustav chápeme buňku.

## 14.1 Vznik života

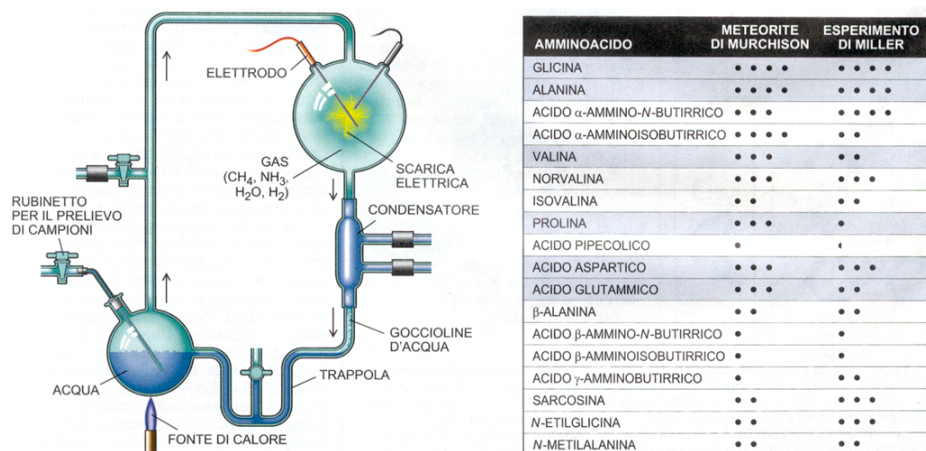
Otázce vzniku života se věnovali lidé od nepaměti. Jde o složitou vědecko-filozoficko-náboženskou otázku, která není dodnes uspokojivě vyřešena. Až do poloviny 18. století mezi učenici převládala naivní abiogeneze, tedy názor, že určité formy života vznikají spontánně z neživé hmoty. Tehdy Francouzská akademie věd vypsala cenu pro toho, kdo otázky 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 14.1). 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;



Obrázek 14.1: 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 byly objeveny i v Murchinsonském meteoritu). Zdroj: <http://www.bionat.unipi.it>.

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.

## 14.2 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 chladících nádobách jaderných reaktorů. Jedním z takových neuvěřitelně nezdolných tvorečků je želvuška (viz obrázek 14.2), která vydrží dávky radioaktivního záření až 15 000 Gy<sup>2</sup>. Pro srovnání uveďme, že pro člověka je smrtelná dávka už 5 Gy.

<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 14.2: Želvušky jsou miniaturní členovci (maximálně 1,5 milimetru velcí). V Česku žije několik desítek druhů. Nejrozšířenější je medvíďátko obecné. Zdroj: <http://www.ekonom.cz>.

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.

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 14.3 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.

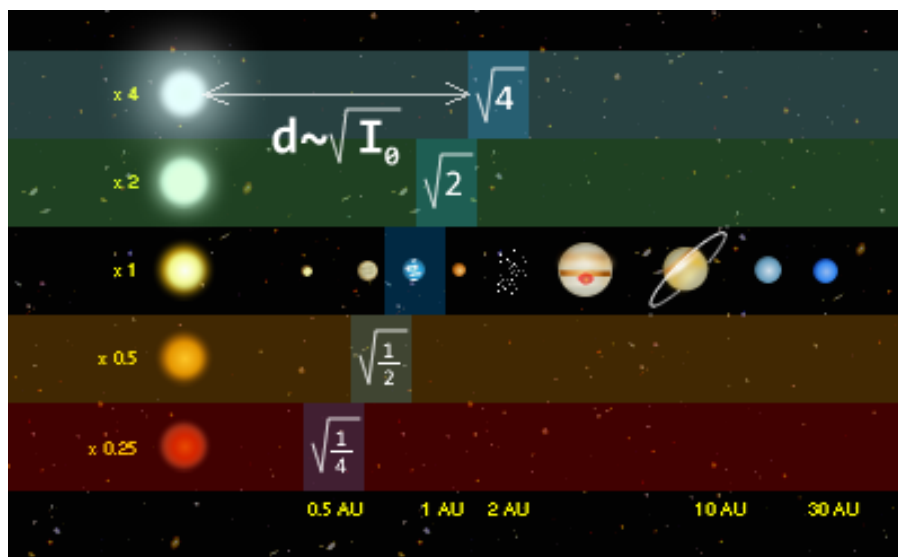
!!

### 14.3 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 mimozemských civilizací (projektu SETI<sup>4</sup>). Nadšený zastávce 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

<sup>3</sup>V angličtině se používá termínu „habitable zone“, případně „life supporting zone“.

<sup>4</sup>Akronym SETI vznikl z anglického názvu projektu „Search for Extra-Terrestrial Intelligence“, tedy Hledání mimozemské inteligence.



Obrázek 14.3: Zóny života podle zářivého výkonu hvězdy. Zdroj: wikipedia.

okolností. Vznikla tak známá Drakeova rovnice vyjadřující pravděpodobnost výskytu civilizací podobných naší v Galaxii

$$N = R_* f_p n_e f_l f_i f_c L, \quad (14.1)$$

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 Drakeovy 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 Drakeovy 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, neznamena nic. Přesně řečeno, Drakeova rovnice skutečně nemá smysl...“.

### 14.3.1 Život na Zemi – typický vzorek?

Současné výsledky ukazují, že život na Zemi mohl vzniknout 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 pozdního intenzivního bombardování před přibližně 3,8 až 4,0 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.

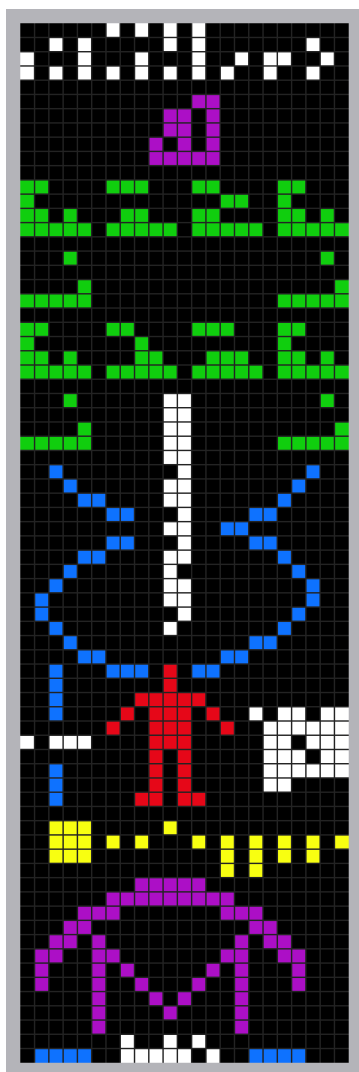
V roce 2011 splaskla další mediální bublina. Michael Callahan s kolektivem spoluautorů s velkou slávou tvrdil, že „život přišel z vesmíru“. Toto sdělení bylo ale založeno jen na tom, že ve 3 z 12 uhlíkatých chondritů našli vzácné dusíkaté sloučeniny, které mohou sloužit jako základy pro nukleové kyseliny. Nedávno ohlásily hned dva týmy objev mikrofosílií 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).

## 14.4 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 však nic zajímavého neobjevil. Projekt ale inspiroval i další pracoviště k podobným pokusům. V 60. letech minulého sto-

letí 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.



Obrázek 14.4: Grafická podoba zprávy odvysílané radioteleskopem v Arecibu. Zdroj: wikipedia.

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 extraterrestrial 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 14.4).

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

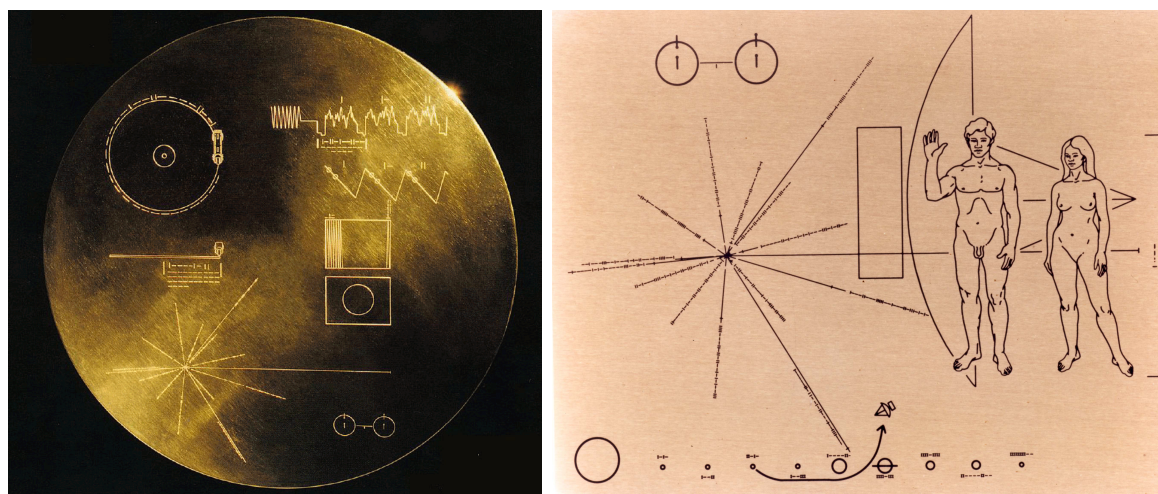
350 antén v provozu jen 42. Po dokončení ale půjde o unikátní velmi citlivý přístroj s obrovským frekvenčním rozsahem (0,5–11,2 GHz) i rozsahem plošným (17krát lepší než VLA). Má být využíván jak pro projekty SETI, tak i pro radioastronomii.

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 projekt 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 serveru. 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 s 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 14.5: Vlevo: Gramofonová deska, kterou na palubě nese sonda Voyager. Vpravo: Plaketa na palubě sondy Pioneer 10. Zdroj: wikipedia.

### 14.4.1 Život ve Sluneční soustavě

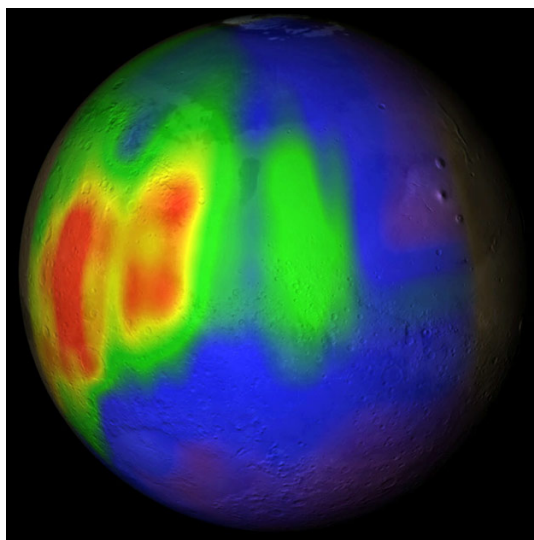
Projekty zmíněné v předchozí kapitole se zaměřují na hledání života ve vzdálenějším vesmíru, ale nemůže být život podstatně blíže, někde doslova za humny, ještě ve Sluneční

<sup>5</sup>Zvuky na desce na sondě Voyager jsou dostupné na <http://re-lab.net/welcome/>.



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 (zvláštnosti 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?



Obrázek 14.6: Oblasti s největším zaznamenaným výskytem metanu na povrchu Marsu. Zdroj: Tisková zpráva NASA 09-006.

Dalším 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. Přímý průzkum zaměřený na hledání života provedly sondy Viking v roce 1976. 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 přítomna nějaká forma živých organismů, vyloučeny však nejsou ani geologické 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. Zatímni 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. přílivového 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 kapalné jezero mimo Zemi (asi etanu a/nebo metanu) a podpovrchový 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 náznaky fosilních bakterií. 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 (Wickramasinghe et al., 2013). Byl by to jistě jeden ze stěžejních důkazů výše zmíněné teorie panspermie. Ukazuje se ale, že nalezené fosilní rozsivky na obrázku jsou výsledkem kontaminace zde na Zemi.

## 14.5 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 kontrolují mimozemšťany na našem území. Tyhle složky prezident dostává s jaderným kufříkem. 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 Medvěděva 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 (srpen 2016) Úřadu pro vztahy s vnějším vesmírem (UNOOSA) italská astrofyzikálníka Simonetta Di Pippo <sup>6</sup>.

<sup>6</sup>Zajímavostí je, že z osmi ředitelů, kteří stáli v čele úřadu byli dva Češi astrofyzik Luboš Perek a právník Vladimír Kopal.

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 uvažovat 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 máme mimozemské civilizace sami aktivně vyhledávat. Jeden z největších myslitelů současnosti, S. Hawking se domnívá, že nikoli.

## 14.6 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 všech směrech „šedý průměr“. Teorie průměrnosti nebo také tzv. Koperníkovský princip, jak se takovému tvrzení říká, měla své velké zastánce v již zmíněném Francisu Drakeovi a známém astronomovi a popularizátorovi Carlu Saganovi. Jenže v roce 2000 vyšla kniha geologa a 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. Vycházejí 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.

## Použitá a 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*)
- Shklovskii, 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., Samaranyake, A. 2013, *Journal of Cosmology*, 21, No. 37 (10 January 2013)

# Základy astronomie 2



## 15 Hvězdy zpovzdáli

Hvězdy jsou základními stavebními kameny vesmíru. Pro nás představují velmi vzdálené světy, o nichž ale chceme vědět a zjistit co nejvíce. Ale jak? Nelze je studovat přímo. Nelze odebrat vzorky, nelze je měřit nebo vážit v nějaké laboratoři. Přesto existují nástroje, pomocí nichž jsme schopni zjistit řadu parametrů hvězd i na dálku. Jaké jsou možnosti dálkového průzkumu hvězd? Co můžeme zjistit ze Země nebo jejího blízkého okolí o vzdálených hvězdách? V minulosti byly naše možnosti omezeny v podstatě jen na vizuální fotometrii. Člověk se mohl spolehnout jen na svůj zrak a poměřoval pozorované hvězdy jen svými očima. Při představě nebeské sféry, na níž jsou všechny hvězdy ve stejné vzdálenosti, nutně musel dojít k názoru, že čím je hvězda jasnější, tím je větší. Tak vznikl fotometrický pojem "hvězdných velikostí", který však, jak víme, se skutečnou velikostí nemá nic společného a slouží k potrápení studentů a zájemců o astronomii. S nástupem záznamové techniky – fotografie a později elektronických čipů jsme měření jasností a určování hvězdných velikostí zpřesňovali, prováděli v různých oblastech spektra, v různých barvách, a zejména jsme měření zaznamenávali a ukládali do archivů. Zásadní zvrát v dálkovém průzkumu hvězd přinesla spektroskopie. Studium rozloženého světla nebo obecně spektra elektromagnetického záření bylo najednou možné zjistit složení povrchových vrstev hvězd, zjistit jejich teplotu, tlak, přítomnost magnetického pole, ale také jak se hvězda pohybuje, zda se od nás vzdaluje nebo se k nám přibližuje, jak rychle se otáčí. Pokud je hvězda navíc součástí dvojhvězdy nebo vícenásobného systému, lze kombinací spektroskopických a fotometrických dat zjistit hmotnosti složek dvojhvězdy, jejich vzájemnou vzdálenost i vzdálenost od nás, jejich poloměry a další parametry. Dnes už nemusí jít o soustavu hvězda–hvězda, může jít o planety obíhající kolem mateřské hvězdy, které lze pomocí spektroskopie detekovat a studovat. Ještě na konci 20. století se zdálo, že exoplanety budeme schopni maximálně detekovat. Na počátku druhé dekády 21. století však už pomocí spektroskopie studujeme složení jejich atmosfér. Astronomové nezůstali jen u klasických nástrojů fotometrie a spektroskopie. V minulém století dokázali přímo měřit rozměry hvězd pomocí interferometrie nebo studovat jejich vlastnosti pomocí detekce vysokoenergetických částic rentgenovského či gama záření nebo neutrin. Nástrojů na dálkový průzkum světa hvězd máme tedy dnes k dispozici velké množství. Jde ale nejen o to, naměřit určité veličiny, ale také je interpretovat a porovnat s modely hvězdné stavby a našimi představami o vzniku, vývoji a zániku hvězd. Významným nástrojem při poznávání hvězd je i nejvýznamnější astrofyzikální diagram - Hertzsprungův-Russellův diagram.

### 15.1 Fotometrie

#### 15.1.1 Vizuální fotometrie

Nejstarší vizuální pozorování proměnných hvězd byla prováděna různými metodami. Například William Herschel zaznamenával výsledky srovnání jasnosti proměnné hvězdy s jinou hvězdou v okolí slovně. První kvantitativní metodu pozorování proměnných hvězd publikoval až Argelander (1844). Při srovnání dvou hvězd - proměnné a srovnávací zavedl hodnocení rozdílu jejich jasností pomocí škály jasně definovaných odhadních stupňů

0 až 4. Velikost stupně je přitom individuální a závisí na zkušenosti a aktivitě pozorovatele. U začátečníka odpovídá jeden odhadní stupeň 0,1 až 0,2 mag, zatímco zkušený pozorovatel dosahuje až 0,05 mag, zcela výjimečně i 0,02 mag.<sup>1</sup> Argelander hrál velmi významnou roli při výzkumu proměnných hvězd. Jeho metoda nabídla snadnou a rychlou možnost sledování proměnných hvězd, což vedlo ke zpopularizování stelární astronomie. Dnes se používá jak původní metoda, tak i různé modifikace. Nejvíce se využívá místo jedné srovnávací hvězdy dvojice hvězd a určuje se rozdíl jasností mezi slabší srovnávací hvězdou, proměnnou hvězdou a jasnější srovnávací hvězdou - místo odhadu se tedy provádí najednou dvojodhad. Je ale možné využít i více srovnávacích hvězd nebo jemnější škálu s více odhadními stupni. Spolu s Argelanderovou metodou se v bývalém Československu od 60. let minulého století velmi využívala také Nijlandova-Blažkova metoda. Princip odhadů zůstává v této metodě stejný jako u Argelanderovy metody. Pozorovatel využívá odhadních stupňů ke srovnání jasnosti proměnné hvězdy s dvojicí srovnávacích hvězd. Odhady ale určují nejen rozdíly jasností v odhadních stupních, ale odhadní stupeň jsou také v poměru podle pozorovaných jasností. Svou metodu pozorování proměnných hvězd zavedl i Edward Pickering. Jeho metoda spočívala ve srovnávání jasnosti proměnné hvězdy s dvojicí srovnávacích hvězd, jejichž rozdíl v odhadních stupních byl vždy deset. Odhadní stupeň pak byl vlastně při každém (dvoj)odhadu různě veliký, což byla značná nevýhoda metody. Ještě uveďme jednu Pogsonovu metodu. Je založena na tom, že znám hvězdné velikosti srovnávacích hvězd ve vizuálním oboru a při dvojodhadu interpoluji mezi jejich hvězdnými velikostmi. Výsledkem je pak přímo hvězdná velikost proměnné ve vizuálním oboru. Tato metoda má ale úskalí v tom, že jednak musím znát hvězdné velikosti srovnávacích hvězd, ale navíc musím mít jistotu, že jsou to hvězdy neproměnné. Při této metodě se totiž jako jediný výsledek dvojodhadu uchovává jen hvězdná velikost proměnné hvězdy v čase pozorování, pokud se však jedna srovnávací hvězda také mění, jsou všechna taková pozorování znehodnocena. Příkladem je pozorování supernovy SN1993J vyhlášené v rámci kampaně americkou společností pozorovatelů proměnných hvězd AAVSO<sup>2</sup>. Dva čeští pozorovatelé si všimli, že jedna z doporučených srovnávacích hvězd se je ve skutečnosti proměnná (dnes označená jako ES UMa). Bohužel to znamenalo, že všechna pozorování provedená Pogsonovou metodou, která tuto hvězdu použila jako srovnávací, se musela vyhodit. Vizuální fotometrie nepochybně splnila svou historickou úlohu. Předností je její snadnost a rychlost. Bohužel jde o metodu subjektivní zatíženou mnoha vlivy a tudíž s menší přesností a spolehlivostí. V dnešní době se pozorovatelé (i ty amatérští) dávají raději na cestu CCD fotometrie. Přesto se s výsledky vizuálních pozorování setkáte zejména ve starších publikacích a nutné vědět, jak vznikala a jaké jsou nebezpečí při jejich použití při studiu chování například proměnných hvězd. Podrobněji se této problematice věnuje publikace *Pozorování proměnných hvězd I* (Zejda et al., 1994).

<sup>1</sup>Mezi zcela výjimečné vizuální pozorovatele patří například Sebastian Otero, Kamil Hornoch nebo Pavol A. Dubovský. I oni však pokud mohou dávají přednost snazším a objektivnějším metodám pozorování.

<sup>2</sup><http://www.aavso.org>



### 15.1.1.1 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 hvězdu (Vegu) zachytili na daguerotypii 17. 7. 1850 John Adams Whipple a George Phillips Bond. Posledně jmenovaný je také autorem prvního koloidního snímku hvězd, soustavy Alkora a Mizara, pořízeného 27. 4. 1857. Stále se však jednalo o snímky jasných hvězd. Teprve roku 1881 se podařilo Henrymu Draperovi 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 Common 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<sup>3</sup> a lze jej opakovaně vyhodnocovat. Navíc umožňoval při delších expozicích 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.

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>4</sup>), která je definována jako dekadický logaritmus podílu světelného toku  $F_0$  před průchodem deskou a světelnému toku po průchodu zkoumaným bodem desky  $F_z$ :

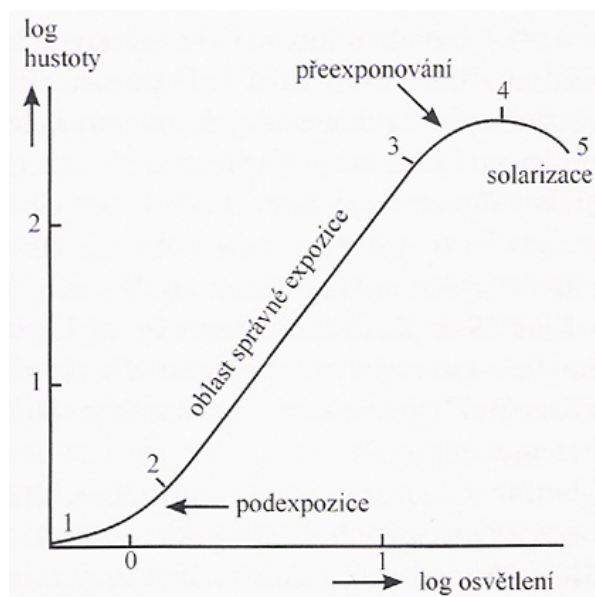
$$D = \log_{10} \left( \frac{F_0}{F_z} \right). \quad (15.1)$$

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 15.8). Pro fotometrii můžeme využít jen lineární část. I proto je výhodnější zavést tzv. Bakerovu denzitu (?)

$$D_B = \log_{10} \left[ \left( \frac{F_0}{F_z} \right)^\gamma - 1 \right], \quad (15.2)$$

<sup>3</sup>V současnosti se ukazuje, že fotografické emulze stárnou a degradují. Pokud nebudou rozsáhlé skleněné archivy fotografických desek brzy digitalizovány, budou získané snímky nenávratně ztraceny.

<sup>4</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.



Obrázek 15.1: Charakteristická tzv. gradační křivka fotografické emulze. Je charakterizována sklonem (gradací) lineární části. Převzato z Kleczek (2002).

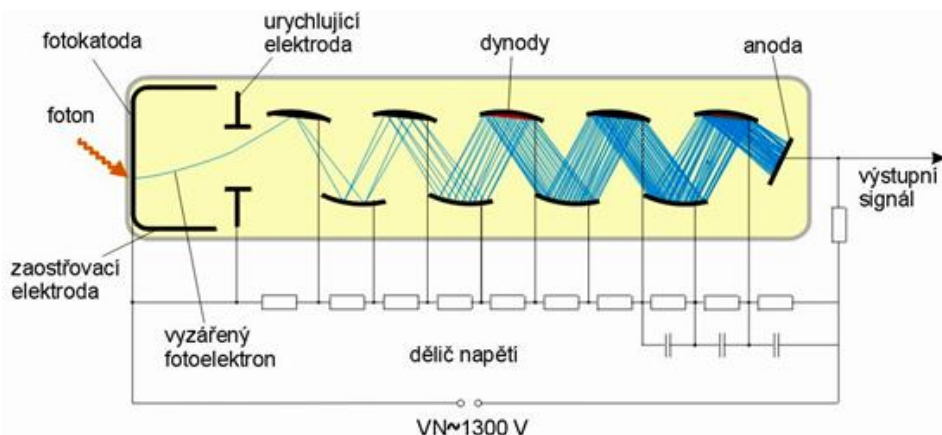
kde  $\gamma$  je experimentální konstanta. Závislost na osvětlení  $E$ , kdy  $D_B = D_B(\log_{10} E)$  je totiž bližší přímce než závislost  $D = D(\log_{10} E)$ . V dnešní době se klasická fotografie používá jen výjimečně. Fotografickou emulzi nahradily elektronické čipy.

### 15.1.1.2 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>5</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 desetimilionkrát více elektronů než bylo uvolněno fotony na katodě. Taková sprška elektronů způsobí na anodě proudový puls jednotek miliampér v délce asi 5 nanosekund.

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

<sup>5</sup>V angličtině se užívá pro jeho označení výrazů photomultiplier, electron multiplier tube, PMT.



Obrázek 15.2: Schéma fotonásobiče. Převzato z <http://fyzika.jreichl.com>.

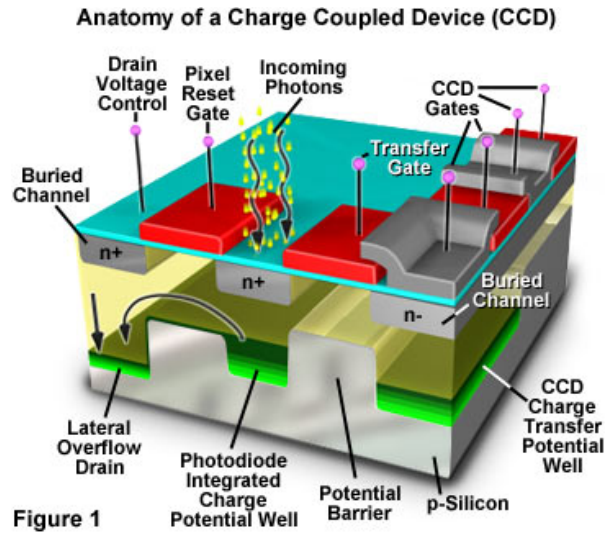
vlnových délkách světla. Na výsledky měření s fotoelektrickým fotometrem má ale vliv řada faktorů, které musíme vzít v úvahu již při samotném měření a následném zpracování. V anodách a dynodách lze zpravidla detekovat i proud, který není vyvolán dopadajícím zářením pozorovaného objektu. Je způsoben tepelným 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 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 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.

### 15.1.1.3 Na bázi křemíku – CCD čipy

Relativně vysoká pořizovací cena, náročnost pozorování a zpracování spolu s možností pozorovat jen relativně jasné hvězdy byla příčinou toho, že fotoelektrická fotometrie byla v druhé polovině 20. století takřka výhradně záležitostí velkých profesionálních observatoří. Na konci 20. století se však objevila jiná možnost, jak fotometricky pozorovat vesmírné objekty, a tak byla fotoelektrická fotometrie odeslána do výslužby.

Nejúčinnějším a nejrozšířenějším detektorem pro měření jasnosti hvězd se staly CCD kamery. Oproti fotonásobičům představují CCD kamery zcela jinou dimenzi, a to doslova. Zatímco výsledkem měření 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.

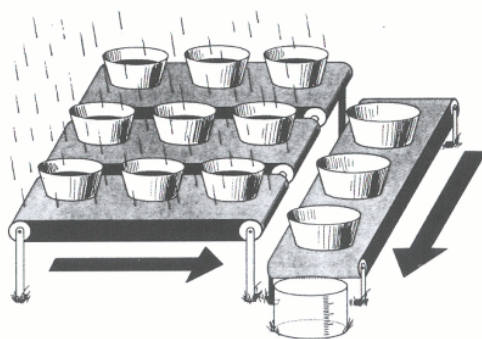


Obrázek 15.3: Anatomie CCD čipu. Převzato z <http://www.circuitstoday.com/2010>.

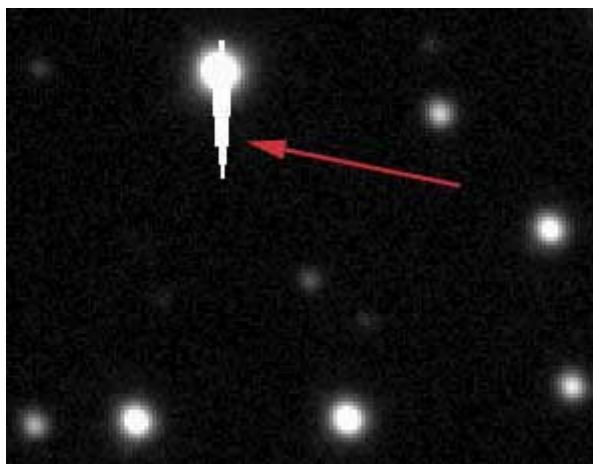
Myšlenka na takové využití křemíkového čipu se zrodila v hlavách dvou pracovníků Bellových laboratoří v roce 1969. Willard Boyle a George Elwood Smith později za tento objev dostali v r. 2009 Nobelovu cenu. První CCD kamera byla představena už v roce 1970 a o čtyři roky později se CCD kamery začaly sériově vyrábět. V astronomii byla CCD kamera poprvé použita v roce 1979 na metrovém dalekohledu observatoře na Kitt Peak, USA. Tehdy začala éra „křemíkové astronomie“. Jádrem CCD kamery je totiž čip s destičkou polovodivého materiálu, nejčastěji křemíku. Na povrchu čipu je rozmístěna soustava kladných elektrod, na spodní stranu je přivedeno záporné napětí (viz obrázek 15.3). Samotné lapání dopadajících fotonů pak opět využívá fotoelektrického jevu. Velmi zjednodušeně bychom si princip činnosti CCD čipu mohli představit pomocí analogie zobrazené na obrázku 15.4. Dopadne-li na plochu čipu foton s dostatečnou energií, uvolní elektron(y), který spadne, případně spadnou, do nějaké nádoby. 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 nádobka 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 15.5).

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 15.4 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 dokonce až miliontiny magnitudy. Na rozdíl od fotometru nebo fotografie je u CCD kamer velmi vysoká kvantová účinnost, která může přesáhnout 90 % (viz obrázek 15.10). Nicméně podobně jako u fotonásobiče se zde projevuje tepelný šum v podobě temného



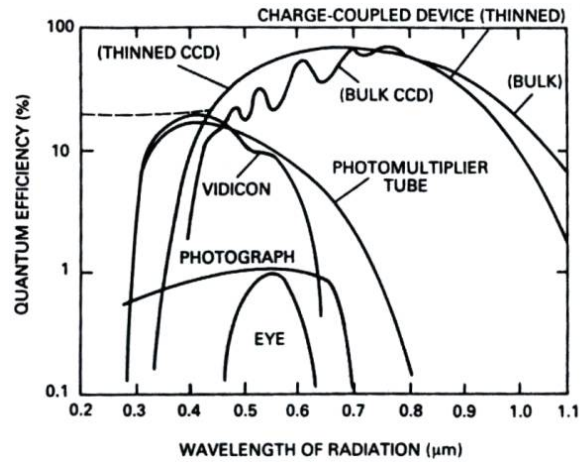
Obrázek 15.4: CCD čip můžeme přirovnat k sadě nádobek, které během deště měří množství srážek. Po dešti se nádoby posunují na dopravníkových pásích k měřicí stanici. Voda shromážděná v každé nádobce je pak přelita do měřicí nádoby, množství je změřeno a na výstupu dostaneme údaj o množství vody v každé jedné nádobce. Převzato z Janesick & Blouke, *Sky and Telescope*, vol. 74, p. 238.



Obrázek 15.5: Blooming se projevuje charakteristickými „ocásky“ kolem jasných hvězd. Převzato z <http://www.ccd.com>.

proudu. Pro zlepšení citlivosti se čipy CCD kamer chladí Peltierovým článkem, vodou případně tekutým dusíkem. Kromě šumu se na snímku projevuje i rozdílná citlivost jednotlivých pixelů. 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.

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



Obrázek 15.6: Srovnání kvantové účinnosti detektorů. Graf byl převzat z <http://www.astro.ljmu.ac.uk>.

	Frame	Data	Measured magnitude of RX Andromedae
Bias			10.0 +/- .4 Vmag
Dark			10.2 +/- .1 Vmag
Flat			10.25 +/- .05 Vmag

Obrázek 15.7: Ukázka vlivu použití kalibračních snímků na světlý snímek pole RX And. Převzato ze CCD Manual 2010, <http://www.aavso.org>.

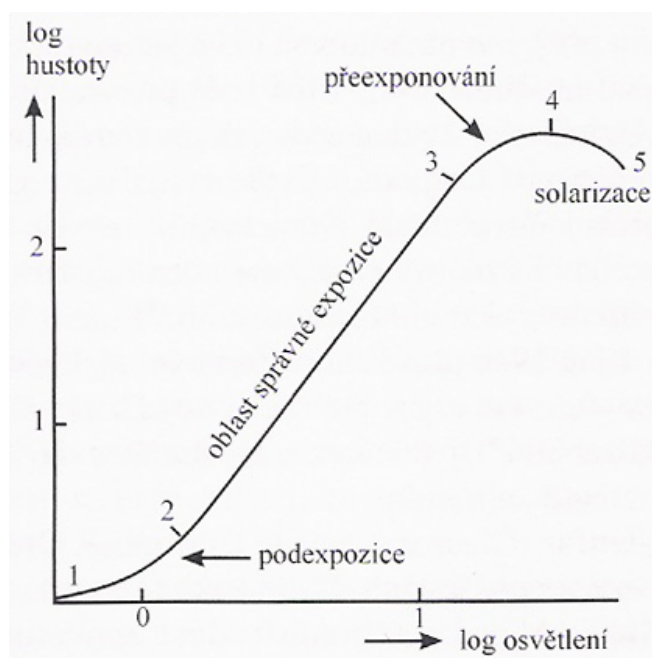
nyní sledovat i slabší objekty, které byly do té doby měřitelné výhradně velkými profesionálními dalekohledy. Na snímku je navíc najednou zachyceno více objektů. Výhodou CCD pozorování je také to, že snímky lze kompletně zpracovávat v počítači, uchovávat v archivech a následně znovu zpracovávat.

### 15.1.2 Fotografická fotometrie

První snahou o nahrazení subjektivního vizuálního pozorování bylo využití fotografie a její následné proměřování. K jejímu širokému uplatnění vedla ale dlouhá cesta. První astrofotografii (snímek Měsíce) pořídil 23. března 1840 J. Draper a zanedlouho bylo zachyceno i sluneční spektrum. 17. července 1850 pak J. A. Whipple a G. Bond pořídili první snímek hvězdy. Na jejich daguerotypii byla zachycena Vega. G. Bond pořídil i první koloidní snímek hvězd (Alkora a Mizara) 27. dubna 1857. Pořád však šlo o snímky poměrně jasných objektů. Teprve v roce 1881 zaznamenal H. Draper na snímku mlhoviny v Orionu hvězdy až do 14,7 mag. V té době už dva roky A. Common experimentoval se suchými deskami. Na řadě snímků mlhoviny (nejlepším z roku 1883) ukázal, že dlouhými expozicemi na suchých fotografických deskách je možné získat obrazy hvězd, které nejsou stejným dalekohledem vizuálně pozorovatelné (podrobnosti viz Hearnshaw, 1996). Taková fotografie už představovala značný pokrok a přinášela oproti vizuálnímu pozorování řadu výhod. Záznam na fotografii je trvalý, lze se k němu po čase vrátit a znovu proměřit. Na fotografii jsou objektivně zachyceny polohy i hvězdné velikosti všech objektů. A především - mohu světlo z hvězd zaznamenávat a integrovat po dlouhou dobu. V astronomii se uplatňovaly hlavně skleněné fotografické desky, na nichž byla nanášena vrstvička světlocitlivé emulze. Folie s citlivou vrstvou nebo běžné filmy nejsou příliš vhodné. Snadno se deformují, takže znemožňují přesnou astrometrii. Fotometrické informace získávané z fotografických desek jsou založeny na velikosti odezvy fotografické emulze na světlo. Mírou této odezvy je tzv. denzita<sup>6</sup>, někdy též hustota zčernání nebo opacita. Její závislost na délce expozice a tedy množství osvětlení není lineární (viz obrázek 15.8). Fotografická emulze tedy není lineární detektor. Také spektrální citlivost je omezena, i když ji lze vhodným chemickým složením rozšířit až na rozsah od 250 nm do 900 nm. Obecně je ale citlivost větší v modré části tohoto intervalu. Kvantová účinnost fotografie se pohybuje jen v řádu několik procent a ještě zpravidla po procesu hypersenzibilace.

Získávání a proměřování fotografií bylo nejrozšířenější fotometrickou metodou zhruba do poloviny minulého století. Po druhé světové válce se začala více uplatňovat fotoelektrická fotometrie. Fotografie zůstala ale doména amatérské astronomie. Od 90. let 20. století se začaly používat CCD kamery, které původní fotografické přístroje prakticky úplně vytlačily. Oproti prvním CCD čipům měly fotografické desky řadu výhod - plocha detektoru byla velká, bylo možné zachytit velkou část hvězdného nebe s větším rozlišením (zrna emulze jsou menší než pixely CCD čipu) a mezi expozicemi nevznikaly dlouhé mezery jako při vyčítání velkých CCD čipů. Situace se ale mění, nevýhody fotografie převažují (malá kvantová účinnost, nelinearita, špatné skladování skleněných desek). Znalost fotografie i tak patří k základní výbavě astronoma. Z dob minulých máme k dispozici rozsáhlé archivy desítek tisíc fotografických desek, z nichž můžete získat unikátní informace o chování například proměnných hvězd, v době, kdy se ještě nevědělo, že jsou proměnné a že by bylo vhodné je sledovat.

<sup>6</sup>V minulosti se velikost zčernání desky určovala tak, že se snímek prosvětloval tenkým svazkem světla a měřil se světelný tok na opačné straně desky.

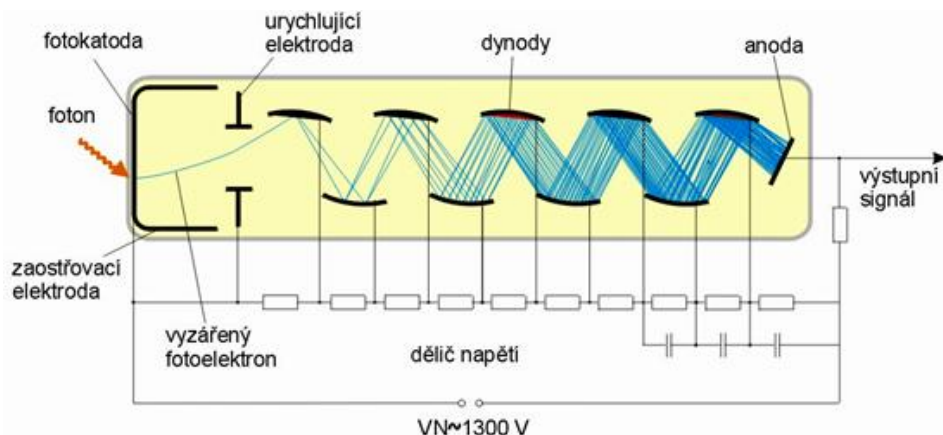


Obrázek 15.8: Charakteristická gradační křivka fotografické emulze. Je charakterizována sklonem (gradací) lineární části. Převzato z Kleczek (2002).

### 15.1.3 Fotoelektrická fotometrie

Na konci 19. století, v době, kdy fotografie přesvědčila o svých kvalitách a možnostech, začínají také první pokusy o přímé měření světla hvězd. První elektrickou detekci světla hvězd provedl pomocí fotonky v Dublinu roku 1892 William Monck. Roku 1907 vyzkoušel Američan Joel Stebbins seleniový odporový fotočlánek a následovaly další pokusy. Hlavními průkopníky fotoelektrické fotometrie byli Paul Guthnick a Richard Prager v Berlíně a Joel Stebbins a jeho kolegové v USA, kteří původní fyzikálně technické pokusy povýšili na metodu, která přinášela vědecké výsledky (podrobnosti viz Hearnshaw, 1996). Přesto byla fotoelektrická fotometrie v první polovině 20. století do značné míry uměním. Jednotlivá jakkoli přesná měření většinou nebyla příliš reprodukovatelná a nebylo možné je opakovat na jiné observatoři. Počátkem 50. let minulého století přišli Johnson & Morgan (1953) s jasně definovanými spektrálními filtry *UBV*, které umožnily měřit jasnosti hvězd ve třech oblastech spektra a po řádném zpracování tato měření porovnávat s jinými, provedenými na jiné observatoři. Teprve tehdy se fotoelektrická fotometrie začala prosazovat pro přesná měření jasností hvězd na profesionálních observatořích. Základem fotoelektrického fotometru je fotonásobič (z anglického "photomultiplier", ale užívá se "electron multiplier tube" nebo "PMT") schematicky zobrazený na obrázku 15.9. V přední části evakuované trubice se nachází fotokatoda. Foton s dostatečně vysokou energií uvolní při dopadu na fotokatodu jeden nebo více elektronů dle vnějšího fotoelektrického jevu. Za katodou je umístěna soustava dynod, přičemž každá je připojena k vyššímu napětí než předchozí dynoda. Elektrony uvolněné z fotokatody jsou při cestě k dynodě urychleny, při nárazu uvolní další elektrony, která jsou urychlovány na cestě k další dynodě a tak dále. Než dorazí na anodu na konci trubice je jejich počet





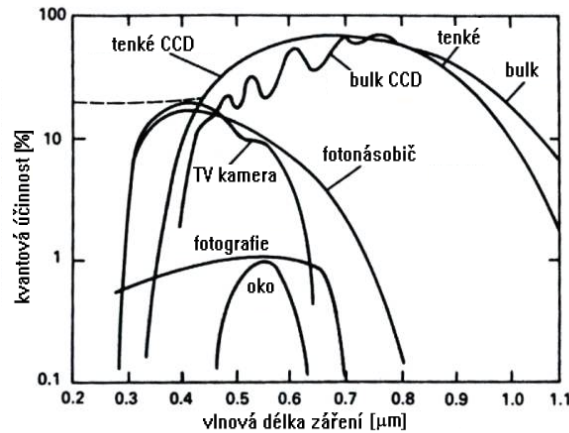
Obrázek 15.9: Schéma fotonásobiče. Převzato z <http://fyzika.jreichl.com>.

až desetimilionkrát větší. Na anodě se pak registrují velmi krátké miliampérové proudové pulzy. Počítáním těchto pulzů lze pak měřit jasnost pozorovaných hvězd. Cesta k výsledné hvězdné velikosti ale není vůbec jednoduchá. Při samotném měření je třeba měřit i jas pozadí (oblohy bez hvězd), ale také proměřovat řadu srovnávacích a kontrolních hvězd. Při zpracování je třeba brát v úvahu polohu hvězdy na obloze, její spektrální typ a vliv extinkce a jejích změn (podrobnosti viz Harmanec et al., 1994; Janík & Mikulášek, 2012; Mikulášek & Zejda, 2012).

Výhodou fotoelektrické fotometrie je velká přesnost (až 0,001 mag v časovém rozlišení milisekundy) a zejména velký dynamický rozsah. Fotometry pracují v rozsahu vlnových délek 200-650 nm (zejména v modrém světle). Úpravami chemického složení fotokatody lze ale rozšířit použitelnost až na interval od 150 nm do 1700 nm, tedy od ultrafialového až po infračervené záření. Na druhou stranu ale vysoká cena, malá kvantová účinnost (méně než 20 procent podle typu a spektrální oblasti) a náročné pozorování i zpracování mluví proti dalšímu využívání fotoelektrické fotometrie. Náhradou jsou CCD kamery, ale je třeba si uvědomit, že jejich masivním nasazením místo původních fotoelektrických fotometrů přestala být většina observatoří schopna měřit jasné hvězdy. Pro velké dalekohledy s citlivými kamerami jsou příliš jasné.

#### 15.1.4 CCD fotometrie

Moderními detektory světla, které způsobily doslova revoluci v astronomickém pozorování, jsou elektronické kamery vybavené křemíkovými CCD čipy. První CCD čip vytvořili v roce 1969 Willard Boyle a George E. Smith, pozdější nositelé Nobelovy ceny za fyziku v roce 2009. Byl jednorozměrný a měl sloužit jako elektronická paměť. Záhy si ale uvědomili zobrazovací potenciál těchto prvků a tak první CCD kameru sestrojili už o rok později a první komerční CCD zobrazovací prvky o rozměru 100 x 100 zobrazovacích elementů (pixelů) se začaly vyrábět v roce 1974. V astronomii byl CCD prvek (chlazený čip RCA 320x512 LN<sub>2</sub>) poprvé použit v roce 1979 na metrovém dalekohledu na Kitt Peak National Observatory. Podobně jako fotonásobič využívají CCD čipy při své činnosti fotoelektrický jev, ale vzhledem k tomu, že detektor je dvourozměrný, je







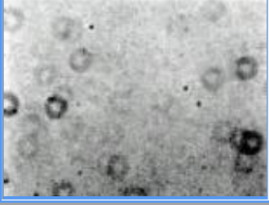

Obrázek 15.10: Srovnání kvantové účinnosti detektorů. Převzato z Howell (2000).

výsledkem matice hodnot, kterou mohu převést na obrázek. I ty nejjednodušší čipy dosahují dnes při pečlivém zpracování přesnosti větší než 0,01 mag. Profesionální přístroje i o několik řádů větší. Spektrální citlivost se pohybuje přibližně od 400 do 1200 nm s maximem pro červenou oblast spektra kolem 700 nm. U prvních kamer byla kvantová účinnost čipů srovnatelná s fotografickou deskou, dnes může pro vhodnou vlnovou délku přesáhnout i 90%. Srovnání s ostatními detektory je zobrazeno na obr. 15.10).

CCD pozorování ale vyžaduje provádět základní sérii základních korekcí snímků, kterým říkáme redukce snímků. I kdybychom snímali rovnoměrně osvětlené pozadí, dostali bychom snímek, který by měl v každém zobrazovacím elementu, tzv. pixelu, zaznamenanou jinou intenzitu. Každý pixel má totiž trochu jinou sensitivitu. Navíc se mohou na snímku projevit i nečistoty optiky a podobně. To je možné zkorigovat takzvaným flat snímkem, který se získává snímáním rovnoměrně osvětlené plochy nebo bezoblačné oblohy za soumraku. Všechny snímky v sobě ale obsahují šum, který vzniká buď přímo v čipu tepelným pohybem elektronů nebo při vyčítání signálu z čipu. To znamená, že i když je zavřená závěrka kamery, přesto je zachycen na snímku šum určité intenzity. Také ten je možné ze snímků sledovaného objektu (tzv. snímků pole) odfiltrovat. Pořídíme sérii temných (dark) snímků se stejnou expoziční dobou a při stejné teplotě čipu jako byly snímky pole a pak tyto temné snímky od snímků pole odečteme. Pokud se nám nepodaří pořídít snímky se stejnou expoziční dobou, musíme ještě pořídít tzv. bias snímky na korekci vyčítacího šumu. Jedná se o snímky při zavřené závěrky kamery s nulovou délkou expozice. Řada kamer už automaticky bias korekci provádí a pokud je dodrženo výše uvedené pravidlo pro temné snímky, není třeba bias snímky používat. Obecně ale celý proces redukce lze zapsat takto

$$\text{redukovaný snímek} = \frac{(\text{surový snímek} - \text{master bias} - \text{master dark})}{\text{master flat}}, \quad (15.3)$$

kde master flat je zpravidla normovaný medián flat field korekčních snímků opravených o temné snímky. O přesnosti výsledné fotometrie případné astrometrie zásadním způsobem rozhoduje kvalita korekčních snímků. Jejich pořizování je tedy třeba věnovat patřičnou

	Frame	Data	Measured magnitude of RX Andromedae
Bias			10.0 +/- .4 Vmag
Dark			10.2 +/- .1 Vmag
Flat			10.25 +/- .05 Vmag

Obrázek 15.11: Ukázka vlivu použití kalibračních snímků na snímek pole proměnné hvězdy RX And. Převzato ze CCD Manual 2010, <http://www.aavso.org>.

pozornost. Podobu snímků hvězdného pole a kalibračních snímků ukazuje obrázek 15.11.

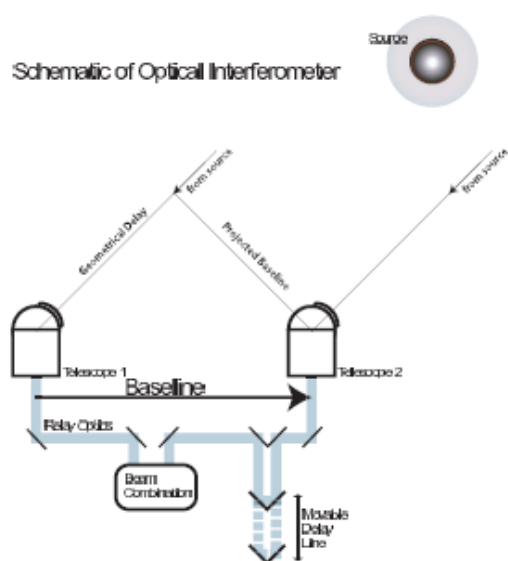
CCD kamery našly v astronomii obrovské uplatnění. S jejich masovým rozšířením začali i amatérští pozorovatelé získávat fotometrická a astrometrická data i pro slabší objekty a to s přesností vyhrazenou dříve jen profesionálním observatořím s velkými dalekohledy. Navíc je snímky možné velmi snadno archivovat, sdílet, lze je automaticky zpracovávat. V případě potřeby je možné zpracování kdykoli zopakovat. Přitom všem získáváme údaje nejen o sledovaném objektu, ale o všech objektech na snímku. Nevýhodou je pro nejmasověji rozšířené kamery menší přesnost než u profesionálních kamer nebo fotoelektrických fotometrů a zejména to, že po záměně fotometrů za CCD kamery nelze pozorovat jasné hvězdy, což vede k přerušení dlouhodobých pozorovacích řad. Ještě před několika lety byla za nevýhodu ozančována i malá plocha CCD čipů, ale vývoj elektronické fotografie jde kupředu opravdu velmi rychle a tak dnes startují projekty, které využívají čipy o souhrnné velikosti 1,4 gigapixelu. Čeká nás tak opravdová záplava dat.

## 15.2 Astronomická interferometrie

V kapitole o dalekohledech 10 jsme uvedli, že jedním ze základních parametrů dalekohledů je jejich úhlové rozlišení. To je dáno difrakčním limitem a je úměrné průměru dalekohledu. Samozřejmě čím větší dalekohled, tím větší úhlové rozlišení. Jenže náklady na stavbu dalekohledu se zvyšujícím se průměrem strmě rostou. Řešení ale existuje. Jmenuje

se astronomická interferometrie. Místo jedno gigantického dalekohledu se využívá řady menších, levnějších dalekohledů. Signály z jednotlivých dalekohledů jsou pak složeny do výsledného obrazce. Tím vzniká efektivně dalekohled o velkém průměru s vysokým úhlovým rozlišením.

Myšlenka hvězdného interferometru byla popsána v roce 1890 Albertem Michelsonem (na základě návrhu H. Fizeaua z roku 1868). První hvězdný interferometr byl sestaven na observatoři Mount Wilson. A. A. Michelson a F. G. Pease jej využili k prvnímu přímému měření rozměrů hvězdy. V prosinci 1920 určili průměr Betelgeuse na přibližně 380 milionů kilometrů (Michelson & Pease, 1921).

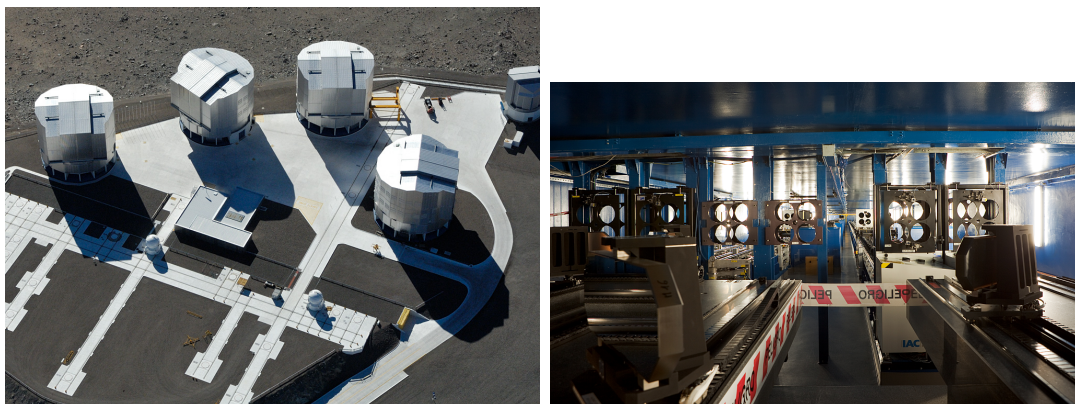


Obrázek 15.12: Schéma moderního optického interferometru: dalekohled, the relay optics, the delay lines and the beam combination. Zdroj: J. D. Monnier, Rep. Prog. Phys. 66, 789 (2003).

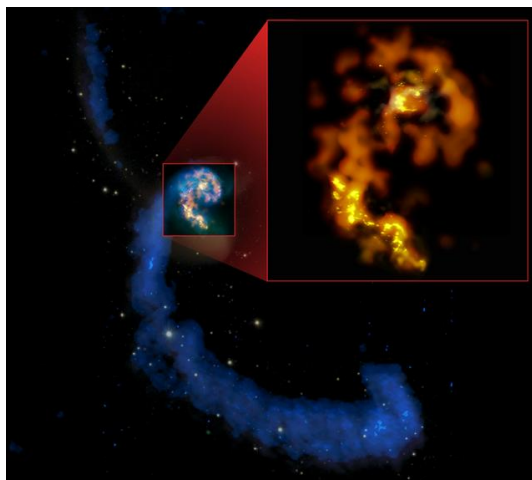
Základní jednotkou pro astronomickou interferometrii je dvojice dalekohledů. Nyní už se ale používá i více dalekohledů spojených do celé sítě. Interferometrické systémy pracují na povrchu Země, ale i ve vesmíru. Nejde v žádném případě jen o optickou část spektra. Spíše naopak. Je třeba si uvědomit, že čím delší je vlnová délka přicházejícího záření, tím snazší je měření jeho fázové informace. První interferometrické systémy byly takřka výhradně tvořeny radioteleskopy pro příjem dlouhovlnného rádiového záření (například VLA (Very Large Array) nebo MERLIN). Nicméně, jak se zlepšovaly technologie a zpřesňovala měření, bylo možné měřit i v oblasti kratších vlnových délek. V optické oblasti pracuje řada interferometrů, například CHARA, VLTI<sup>7</sup>. Od roku 2012 má být plně funkční interferometrický systém v pásmu vlnových délek 0,3 až 9,6 mm ALMA (Atacama Large Millimeter Array). Na projektu se aktivně podílí i vědci z České republiky.

Interferometrie je tedy výborným pomocníkem při studiu vzdálených světů. Můžeme s její pomocí například přímo určovat průměry hvězd, rozlišovat dvojhvězdné páry, hle-

<sup>7</sup>viz [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_astronomical\\_interferometers\\_at\\_visible\\_and\\_infrared\\_wavelengths](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_astronomical_interferometers_at_visible_and_infrared_wavelengths)



Obrázek 15.13: Vlevo: Letecký pohled na Very Large Telescope (VLT) array ESO na vrcholu hory Cerro Paranal v Chile. Největší budovy jsou kopule čtyř dalekohledů o průměru 8,2 metru. Uprostřed je laboratoř VLT Interferometer (VLTI), kam je sváděn signál z těchto dalekohledů. Pohled do tunelu VLTI je vpravo. Zdroj: ESO.



Obrázek 15.14: Složený pohled na interagující galaxie NGC 4038/4039 Tykadla, který ukazuje slapový ohon v rádiové oblasti (modrá), rodící se hvězdy v optické části (bílá a růžová) a ve vybraném čtverci současné oblasti tvorby nových hvězd v milimetrové a submilimetrové části spektra (oranžová a žlutá). Vložený obrázek je první mm/submm testovací pohled ALMA ve třech oblastech spektra zachycující mimořádné detaily. Zdroj: <http://www.almaobservatory.org>.

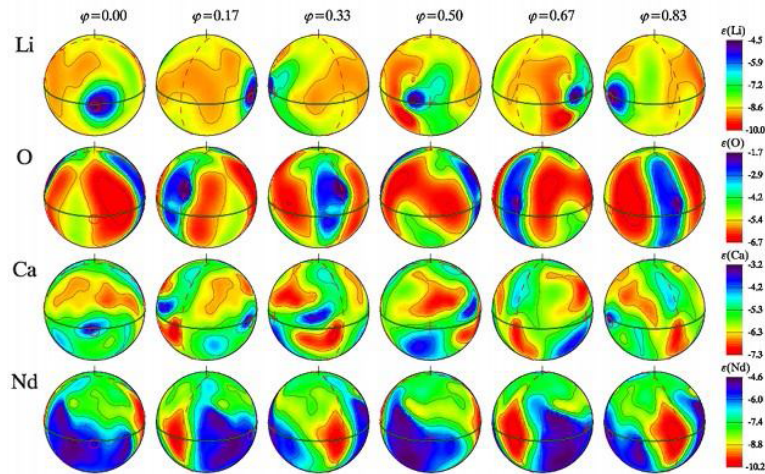
dat exoplanety, studovat detaily v oblastech tvorby hvězdy a podobně, ale také pomocí interferometrie sledujeme rychlost rotace Země vůči velmi vzdáleným objektům a tak zpřesňujeme náš časový rámec.

## 15.3 Spektroskopie

V kapitole 8 jsme se věnovali základům spektroskopie a historii jejího využití v astronomii. V počátcích bylo možné studovat ve spektrech hvězd a obecně vesmírných objektů

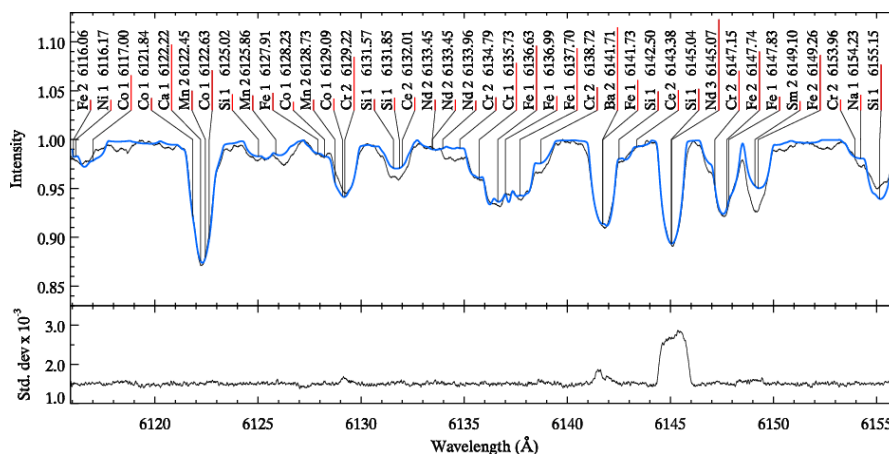
jen ty nejvýraznější jevy a charakteristiky. Spektrální klasifikace z přelomu 19. a 20. století se konec konců používá dodnes, i když s různými doplňky a rozšířeními. Nicméně rozvoj pozorovací techniky a metod zpracování pozorování vedl k obrovskému pokroku a umožnil nám nyní detekovat například změny radiálních rychlostí v řádu  $\text{dm/s}$  nebo drobné změny chemického složení studovaného objektu nebo jeho částí. Například ze spekter hvězd je možné získávat následující informace o:

- složení atmosfér hvězd,
- rotaci hvězd, její rychlosti a změnách,
- skvrnách na povrchu hvězd, jejich rozmístění a složení,
- vzájemné rychlosti hvězdy a pozorovatele,
- složení, směru, intenzitě hvězdného větru,
- složkách dvojhvězd, jejich radiálních rychlostech, poměrech hmotností,
- exoplanetách z měření radiálních rychlostí,
- složení atmosfér exoplanet.



Obrázek 15.15: Rozložení skvrn prvků na povrchu Ap hvězdy HR 3831 detekovaných ze spektroskopie. Zdroj: <http://www.almaobservatory.org>.

A jak takový spektrální výzkum vlastně probíhá? Po základním zpracování spektrogramu, což je dnes vlastně v naprosté většině CCD snímek, se získá průběh intenzity v závislosti na vlnové délce. Pak zkoumáme celý spektrogram, úroveň a průběh kontinua, ale i jednotlivé úseky nebo i samostatné spektrální čáry, jejich umístění i podobu. Profil čáry, zejména její šířka nás informují o teplotě, turbulenci, rychlosti rotace, hustotě (tlaku) či intenzitě magnetického pole v místě vzniku záření. Přítomnost a intenzita čar vypovídají o teplotě a zastoupení chemických prvků v místě vzniku záření. Z polohy čar, respektive jejich posunu vůči laboratornímu srovnávacímu spektru, pak určíme zda se objekt od nás vzdaluje nebo se k nám blíží a jakou rychlostí. Při analýze spekter ale nepoužíváme jen napozorovaná spektra objektů nebo srovnávací laboratorní spektra, ale zpravidla také teoretická (syntetická) spektra, vypočítaná pro daný objekt (viz obr. 15.16).



Obrázek 15.16: Srovnání napozorovaného spektra hvězdy HR 3831 (tenká čára) se syntetickým spektrem v oblasti 611.6-615.6 nm. Nejsilnější spektrální čáry jsou identifikovány. Zdroj: Kochukhov O., A&A 446, 1051-1070 (2006).

## 15.4 Dvojhvězdné studnice informací

V přehlídce objektů pozorovatelných na obloze jsme v kapitole 5.1 představili dvojhvězdy a jejich základní rozdělení na optické dvojice a fyzické páry. Nás nyní budou zajímat fyzické dvojhvězdy, tedy případy, kdy dvě hvězdy obíhají kolem společného těžiště. Právě takové případy jsou nesmírně cenným zdrojem informací ze světa hvězd, často i takových, které bychom jinak s takovou přesností získat nemohli. Hvězdy žijící v páru toho prostě na sebe prozradí více.

Podle metod, nebo chcete-li způsobu pozorování, je můžeme rozdělit do několika skupin.

- vizuální
- astrometrické
- spektroskopické
- zákrytové

### 15.4.1 Vizuální dvojhvězdy

Na rozdíl od optické dvojhvězdy, kdy se dvě spolu nijak nesouvisející hvězdy náhodně vyskytují takřka ve stejném směru a pozorovatel pak má dojem hvězdného páru, vizuální dvojhvězda je tvořena skutečným, fyzickým párem dvou hvězd obíhajících kolem společného těžiště. Prívlastek "vizuální" je zde používán proto, že vzdálenost dvojhvězdy od nás je poměrně malá a tak můžeme rozlišit prostýma očima nebo s pomocí dalekohledu obě složky dvojhvězdy. Jednou z nejznámějších vizuálních dvojhvězd je Mizar a jeho průvodce Alkor v oji Velkého vozu.

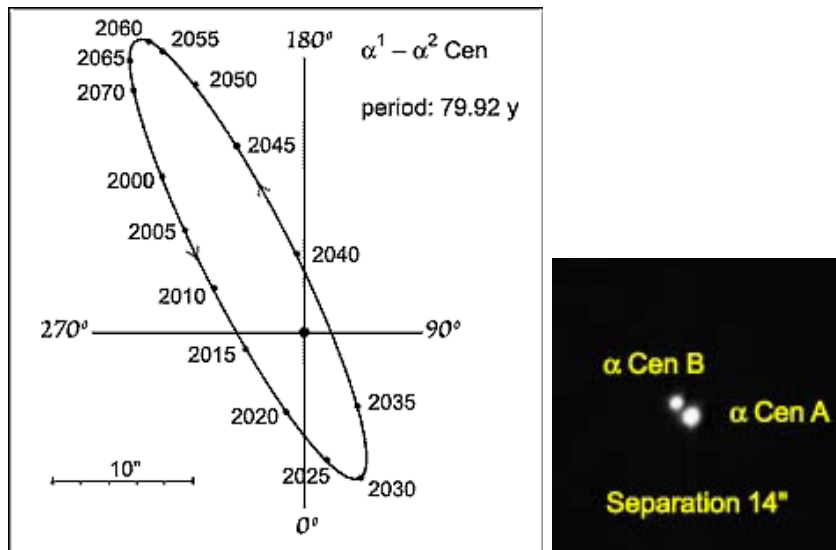
První záznamy o pozorování vizuálních dvojhvězd najdeme v korespondenci Benedetto Castelliho a jeho učitele Galilea Galileiho z let 1616-1617<sup>8</sup>. V 17. i 18. sto-

<sup>8</sup>Podrobněji si o pátrání po prvních pozorování vizuálních dvojhvězd můžete přečíst na webu Leoše Ondry <http://www.leosondra.cz/mizar/>.

letí si astronomové mysleli, že takové dvojice hvězd vznikají jen náhodou a navíc že všechny hvězdy jsou stejně zářivé a jejich rozdílná pozorovaná hvězdná velikost je jen důsledkem jejich odlišné vzdálenosti. Proto se William Herschel rozhodl využít dvojhvězd ke změření paralaxy hvězd a začal je roku 1779 soustavně sledovat. Vydal celkem 3 katalogy s několika stovkami dvojhvězd. Jeho současník, anglický přírodovědec John Michell (1724-1793) ale jednoduchou úvahou a jedním z prvních statistických výpočtů prokázal, že pozorujeme mnohem více dvojhvězd než by odpovídalo náhodnému rozložení hvězd a tedy, že dvojhvězdy, které pozorujeme, musí být zčásti skutečnými fyzickými páry (Michell, 1767). V roce 1797 Herschel znovu proměřil katalogizované dvojhvězdy a zjistil, že vzájemná poloha hvězd ve dvojhvězdách se změnila. V katalogu různých objektů Herschel (1802) vyslovil domněnku, že tato změna není důsledkem pohybu Země, ale že pozorujeme skutečné "dvojité hvězdné systémy", kde dvě hvězdy obíhají kolem hmotného středu. O čtvrt století později vypočítal Francouz Félix Savary (1827) poprvé na základě pozorování trajektorii složek dvojhvězdy, konkrétně se jednalo o  $\xi$  UMa.

Pokud známe u vizuální dvojhvězdy periodu oběhu  $P$  jejich složek kolem těžiště soustavy a velkou poloosu  $a$  jejich trajektorie, lze poměrně jednoduše zjistit vzdálenost soustavy tzv. *dynamickou paralaxu dvojhvězdy* i hmotnosti obou složek (viz praktická úloha Dynamická paralaxa hvězd).

V dnešní době je známo přes sto tisíc vizuálních dvojhvězd, které jsou uvedeny ve Washingtonském katalogu vizuálních dvojhvězd WDS (<http://ad.usno.navy.mil/wds/>).

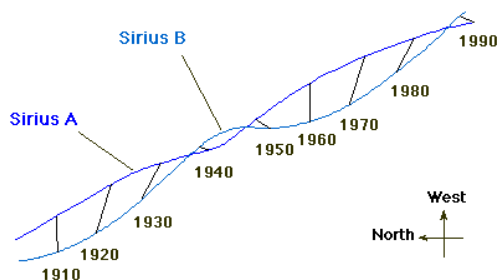


Obrázek 15.17: Relativní trajektorie složek dvojhvězdy  $\alpha$  Cen A a B. Jasnější složka  $\alpha$  Cen A je v počátku a kolem ní je vykreslena trajektorie slabší složky  $\alpha$  Cen B. Ve skutečnosti obě složky obíhají kolem hmotného středu soustavy. Předpovězené polohy slabší hvězdy jsou vykresleny v pětiletých intervalech. Vpravo CCD snímek dvojhvězdy. Převzato z <http://outreach.atnf.csiro.au>.



### 15.4.2 Astrometrické dvojhvězdy

Německý matematik a astronom Fridrich Bessel se věnoval mimo jiné astrometrickým pozorováním hvězd. Soutěžil s jinými astronomy své doby o to, kdo první změří paralaxu hvězdy a Bessel tento pomyslný závod v roce 1838 vyhrál určením paralaxy hvězdy 61 Cygni. Nabyté zkušenosti - kritický pohled na starší měření poloh hvězd a vlastní přesná měření ho v roce 1843 přivedly ke zjištění, že v měřeních rektascenze Síria a deklinace Prokyonu jsou větší odchylky, než by vyplývalo z pouhých chyb pozorování. Po důkladné analýze všech dat dospěl k závěru, že tyto odchylky jsou způsobeny přítomností neviditelných průvodců u těchto hvězd (Bessel, 1844). Důkazu své hypotézy se bohužel nedočkal, to se podařilo až o dvacet let později. Americký výrobce dalekohledů a astronom Alvan Graham Clark pozoroval Síriova průvodce (nyní Sírius B) 31. ledna 1862 během testování tehdy největšího refraktoru o průměru 0,47 m. Na odhalení souputníka Prokyona museli astronomové čekat až do roku 1896, kdy jej pozoroval John Martin Schaeberle refraktorem Lickovy observatoře o průměru 0,91 m. Sírius i Prokyon jsou typičtí představitelé tzv. astrometrických dvojhvězd. Jedná se o gravitačně vázané dvojice hvězd obíhající kolem společného těžiště, z nichž vidíme jen jednu, jasnější složku. Hvězdy se obecně pohybují prostorem naší Galaxie. Na časových škálách desítek let lze tento pohyb považovat za rovnoměrný a přímočarý. Pokud je ale hvězda gravitačně vázána ve dvojhvězdném systému, není její vlastní pohyb přímočarý. "Skrytá" složka způsobuje zvlnění vlastního pohybu jasnější složky (viz obrázek 15.18). Stejným způsobem by v principu bylo možné pátrat i po exoplanetách, ale tyto výchyly by byly příliš malé. Například, všechny planety Sluneční soustavy vychýlí Slunce maximálně až o dva jeho poloměry, což při pozorování z dostatečného odstupů je velmi malá výchylka.

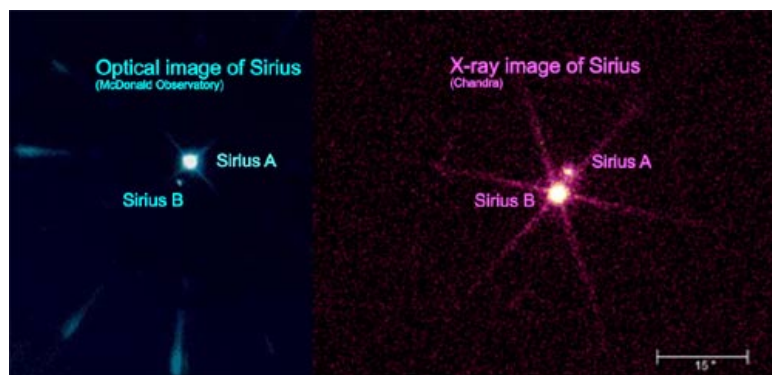


Obrázek 15.18: Vlastní pohyb soustavy Síria v průběhu 80 let. Sírius byl nejdříve detekován jako astrometrická dvojhvězda, ale nyní už je považován za vizuální soustavu, jak ukazuje též následující obrázek. Převzato z <http://outreach.atnf.csiro.au>.

Katalog astrometrických dvojhvězd lze najít na <http://ad.usno.navy.mil/wds/> (Mason et al., 2001).

### 15.4.3 Spektroskopické dvojhvězdy

Někdy hvězdy svůj dvojhvězdný charakter prozradí změnami ve spektru. Jak dvojice hvězd obíhá kolem těžiště soustavy, jednotlivé složky se k nám střídavě přibližují a vzdalují, což se v důsledku Dopplerova jevu projeví periodickým posunem spektrálních čar

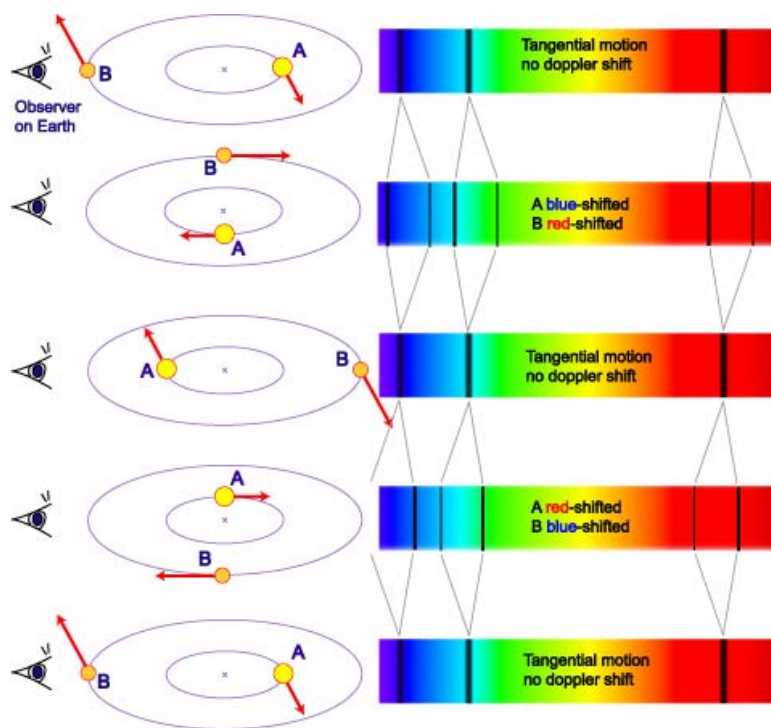


Obrázek 15.19: Zajímavé srovnání pohledů na soustavu Síría pozemským dalekohledem a přístroji rentgenové družice Chandra. Zatímco v optické oblasti spektra je Síría A ( $T_{\text{eff}}=10\,000\text{ K}$ )  $100\,000\times$  jasnější než Síría B, v rentgenové oblasti je mnohem jasnější Síría B, protože je velmi žhavý ( $25\,000\text{ K}$ ) a produkuje i nízkoenergetické rentgenové záření. Převzato z <http://outreach.atnf.csiro.au>.

k červenému a modrému konci spektra. Ideální je, pokud vidíme ve spektru čáry obou složek a detekujeme jejich pohyb. Takovým soustavám se říká dvousložkové spektroskopické dvojhvězdy (v ang. double-lined spectroscopic binary, SB2). Často se ale stává, že slabší složka dvojhvězdy je natolik slabá, že není ve spektru detekovatelná a pozorujeme pouze pohyb jedné skupiny spektrálních čar. Takové dvojhvězdy, resp. jejich spektrum pak označujeme jako jednosložkové (single-line spectroscopic binary, SB1). Prvním, kdo si povšiml těchto periodických změn poloh čar ve spektru byl Edward Pickering. Tím vlastně v roce 1887 objevil první spektroskopickou dvojhvězdu –  $\zeta$  UMa (Mizar). Poté, co se Antonia Mauryová stala členkou tzv. Pickeringova harému (skupiny asistentek), dostala za úkol spočítat trajektorii Mizara ( $\zeta$  UMa). Mauryová nezávisle objevila druhou spektroskopickou dvojhvězdu  $\beta$  Aurigae a pro obě hvězdy poprvé spočítala trajektorii (Pickering, 1890).

#### 15.4.4 Zákrytové dvojhvězdy

Jak již bylo několikrát řečeno, jsou dvojhvězdy opravdu nenahraditelným zdrojem informací ze světa hvězd. Nejvýznamnější studnicí jsou z tohoto pohledu zákrytové dvojhvězdy, tedy soustavy, kde se nám při pohledu ze Země jejich složky při oběhu kolem těžiště soustavy vzájemně zakrývají. Zpravidla jsou tak daleko, že složky dvojhvězdy nerozlišíme jako jednotlivé hvězdy, ale pozorujeme jen společné světlo obou hvězd. První pozorování zákrytové dvojhvězdy (Algolu) zaznamenal roku 1667 italský astronom Gemignano Montanarimu. Nicméně se má za to, že nebyl prvním, kdo změny jasnosti Algolu pozoroval. Znalost jeho proměnnosti je často připisována arabským astronomům z přelomu 1. a 2. tisíciletí n. l. Změny  $\beta$  Persei znovu objevil John Goodricke (1764–1786) a v letech 1782–3 hvězdu systematicky pozoroval. Určil periodu změn na necelé tři dny a dokonce správně vysvětlil příčinu světelných změn. Bohužel nenašly tyto výsledky větší odezvu. Teprve v roce 1880 oprášil Edward Pickering Goodrickovu domněnku o dvojhvězdné povaze proměnné hvězdy a z tvaru světelné křivky odvodil i relativní rozměry obou složek. V roce 1888 Hermann Vogel (1834–1898), zjistil, že Algol je jed-



#### A Spectroscopic Binary System

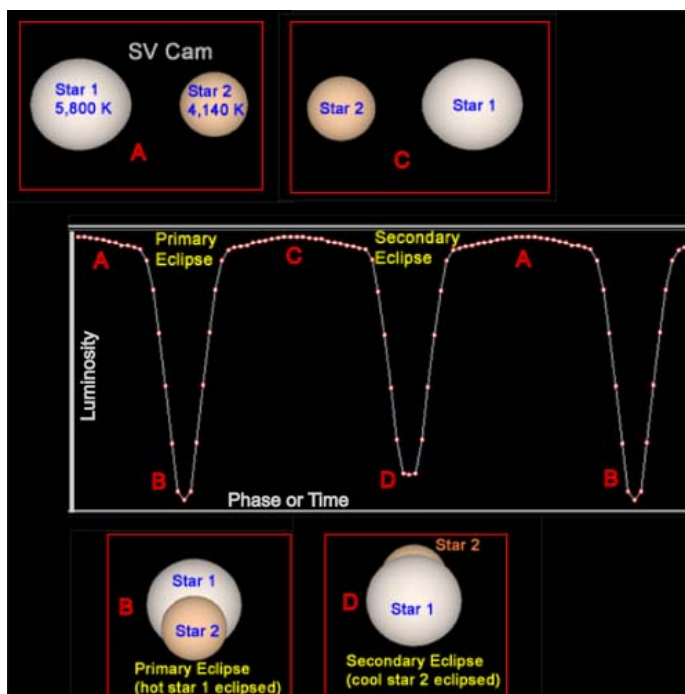
High-mass star A and lower-mass B orbit around a common centre of mass. The observed combined spectrum shows periodic splitting and shifting of spectral lines. The amount of shift is a function of the alignment of the system relative to us and the orbital speed of the stars.

Obrázek 15.20: Spektroskopická dvojhvězda. Převzato z <http://outreach.atnf.csiro.au>.

nosložková spektroskopická dvojhvězda, jejíž křivka radiální rychlosti přesně odpovídá dvojhvězdnému modelu. Mechanismus proměnnosti tak byl konečně kombinací fotometrických a spektroskopických pozorování jasně prokázán. Nicméně ještě zhruba století trvalo, než byly složky Algolu rozlišeny interferometricky, nejprve v rádiovém oboru a posléze i opticky (Lestrade et al., 1999; Csizmadia et al., 2009).

Z prostého fotometrického sledování změn celkové jasnosti zákrytové soustavy můžeme určit zejména poměry hmotností, rozměrů, zářivých výkonů složek a sklon trajektorie. Pokud přidáme i výsledky spektroskopických pozorování, zejména křivku radiálních rychlostí, můžeme určit zásadní parametry jako hmotnosti a poloměry v absolutních hodnotách, tedy přímo v kilogramech a metrech. Pro tzv. řešení světelné křivky i křivky radiálních rychlostí existuje celá řada programů (PHOEBE, Nightfall, WD, FOTEL a další), které jsou až na výjimku volně k dispozici a zájemce se může do modelování dvojhvězdných soustav hned pustit. V některých případech umožňují tyto programy použít i další typy pozorování (astrometrická, interferometrická, případně okamžiky minimální jasnosti). Pokud jsou použita pozorování dostatečně přesná, je možné získat hodnoty parametrů složek dvojhvězdy s přesností lepší než 1 %, což je základní předpoklad k tomu, abychom mohli takové výsledky použít pro verifikaci například modelů hvězdné stavby nebo hvězdného vývoje. Stejně komplexní informace o hvězdách s podobnou přesností zatím není možné získávat jinak.

Přestože známe zákrytové proměnné hvězdy velmi dlouho, některá jejich tajemství

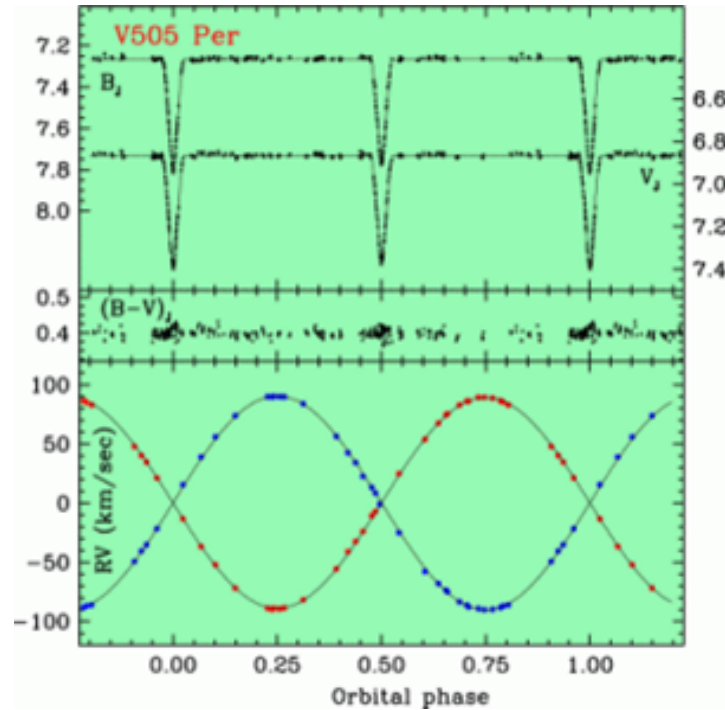


Obrázek 15.21: Počítačová simulace světelné křivky zákrytové dvojhvězdy SV Cam. Povšimněte si deformace primární složky dvojhvězdy. Převzato z <http://outreach.atnf.csiro.au>.

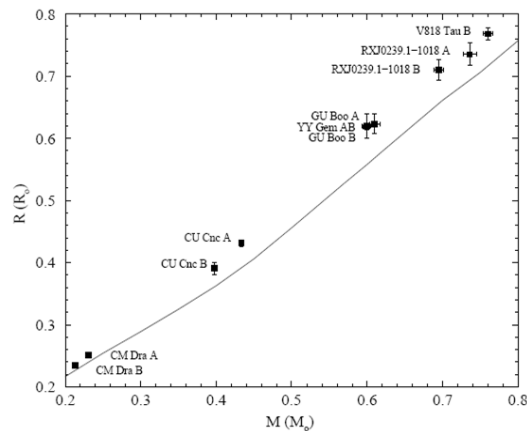
zůstávají stále neodhalena. Povšimněme si alespoň těch tří nejzávažnějších:

1. Velmi hmotné hvězdy – Poznat jejich vývoj, vnitřní stavbu a chování je důležité například pro studium emise ionizujícího záření, chemický vývoj galaxie, energetické fenomény. Potřebujeme znát co nejpřesněji jejich parametry, abychom mohli přesně popsat jejich vývoj po opuštění hlavní posloupnosti nulového stáří (ZAMS). Hlavní problém je dosud bohužel v tom, že klasické metody analýzy světelných křivek a křivek radiálních rychlostí a následný model dávají pro parametry popisující konvekci uvnitř těchto hvězd odlišné výsledky než vyplývají z astroseismologických studií.
2. Hvězdy s malou hmotností - Naše představy o těchto hvězdách ve dvojhvězdách neodpovídají pozorováním. Modelové poloměry hvězd jsou podhodnocené o zhruba 10%, zatímco modelové teploty teploty jsou o přibližně 5 % nadhodnocené (viz obrázek 15.23). Graf závislosti hmotnosti na svítivosti pak ale na první pohled vypadá v pořádku. Nejčastěji zmiňovaným vysvětlením je hvězdná aktivita složek dvojhvězdy nízké hmotnosti, která velmi ztěžuje přesné určení fyzických vlastností těchto hvězd. Navíc jich bylo dosud detailně prozkoumáno jen málo, přestože řada z nich je i v dosahu menších přístrojů, jako například YY Gem, CM Dra, CU Cnc nebo GU Boo.
3. Dvojhvězdy typu W UMa - Jsou velmi snadno pozorovatelné, mají poměrně krátké periody, ale přesto jsou záhadné. Doposud se přesně neví, jak tyto dotykové nebo přesahující<sup>9</sup> soustavy vznikají a jak se dále vyvíjejí.

<sup>9</sup>Přívlastky vycházejí z anglických označení „contact“ a „overcontact“.



Obrázek 15.22: Světelné křivky v  $B$ ,  $V$ ,  $(B-V)$ , křivky radiálních rychlostí zákrytové dvojhvězdy V505 Persei. Zdroj: <http://www.pd.astro.it/oapd>.



Obrázek 15.23: Graf závislosti poloměru na hmotnosti pro složky zákrytových dvojhvězd v dolní části hlavní posloupnosti určené s přesností lepší než 3%. Čára v grafu znázorňuje teoretickou izochronu 300 milionů let podle modelu Baraffe et al. (1998).

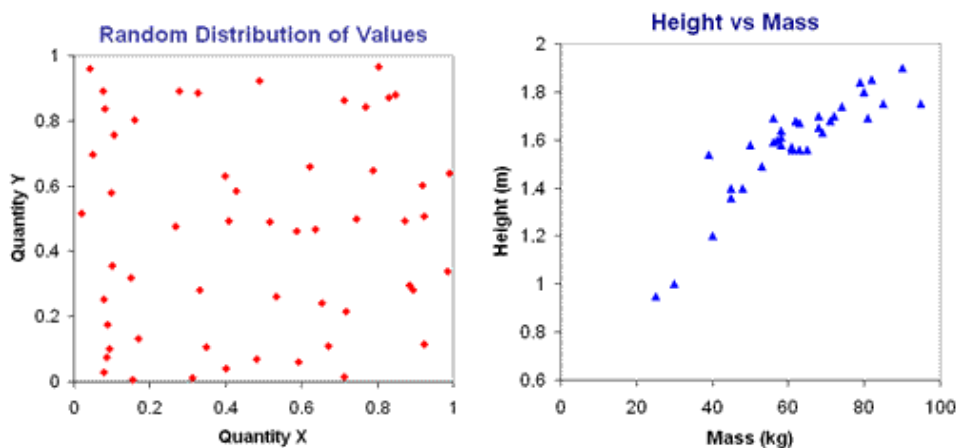
Zákrytové dvojhvězdy jsou v jistém slova smyslu doslova astrofyzikální laboratoře. Můžeme v nich na dálku získávat informace a testovat naše znalosti z různých oblastí. V řadě případů jde o zásadní informace, které nelze jinak zjistit:

- zmíněné základní parametry složek dvojhvězdy,
- údaje o hvězdných atmosférách (okrajové ztemnění, gravitační zjasnění), studium atmosférických zákrytů,

- detaily o hvězdných nitrech, struktuře a konvektivní vrstvě (pomocí apsidálního pohybu, dvojhvězd s excentrickou trajektorií, modelů),
- parametry popisující hvězdné magnetické dynamo a magnetické aktivity (z rentgenovských, ultrafialových, optických a radiových pozorování - mapování zákrytů, hvězdné korony a chromosféry, střídavé změny periody),
- pro fyziku plazmatu (dvojhvězdy s akrečním diskem, plynné proudy),
- pro relativistickou fyziku, kosmologii (černé díry ve dvojhvězdách - potvrzení existence, získání informací o jejich hmotnostech, věku a vlastnostech; stáčení periastra)
- vzdálenosti ve vesmíru - nezávislé určení vzdáleností, „standardní svíčky“.

## 15.5 Hvězdný diagram

Vykreslení získaných dat do grafu, moderně řečeno - jejich vizualizace, je jedním ze základních nástrojů vědecké práce. Konec konců se říká, že jeden obrázek vydá za tisíc slov. V astronomii, kde často pracujeme s nezvykle velkými čísly a jejich relacemi to platí dvojnásob. Začněme ale dvěma jednoduchými příklady. Mějme například dvě veličiny -  $X$  a  $Y$ , o kterých nevíme, zda je mezi nimi nějaká závislost. Po zakreslení do grafu (viz obrázek 15.24 vlevo) je vše jasné. Mezi veličinami  $X$  a  $Y$  žádný vztah není. A nyní si vezměte jiné dvě veličiny, například výšku a hmotnost osob v malé skupině lidí. Jak vyplývá z obrázku 15.24 vpravo, naše očekávání se potvrdilo. Mezi výškou a hmotnostmi lidí ve skupině je zřejmá závislost. Zpravidla bude mít vyšší člověk i větší hmotnost, ale jsou jistě i výjimky. Nicméně existuje jisté fyzické limity, a tak nelze očekávat třímetrového obra s hmotností 20 kilogramů nebo malého trpaslíka, kterému váha ukazuje 350 kilogramů.



Obrázek 15.24: Vlevo: Náhodná rozložení. Vpravo: Závislost mezi dvěma veličinami. Převzato z <http://outreach.atnf.csiro.au>.

A podobné je to i ve světě hvězd. I zde najdeme hvězdy droboučké (ve srovnání s ostatními hvězdami), ale i velmi rozměrné, hvězdy relativně málo hmotné, i hvězdy s nadváhou. Správné grafické zobrazení vztahů mezi parametry hvězd nám při studiu světa hvězd výrazně pomůže.

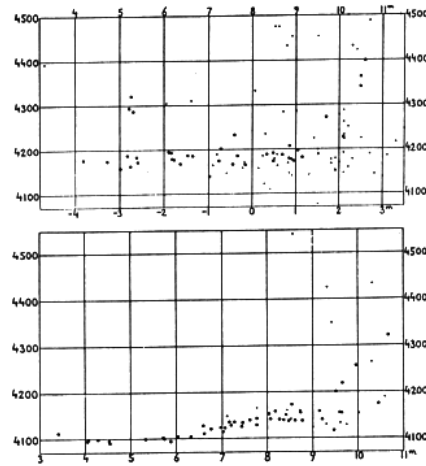
### 15.5.1 Historie

Nejznámější hvězdný diagram je zpravidla spojován se dvěma jmény - Ejnar Hertzsprung a Henry Norris Russell. Historie však byla, jak už to bývá, trochu složitější. Prvním, kdo si všiml odlišných vlastností hvězd na základě fotografií hvězdných polí a měření hvězdných velikostí a jejich souvislosti se zářivým výkonem hvězd, byl C. V. L. Charlier, který výsledky shrnul do tabulek už v roce 1889. Bohužel práce Charlier (1889) nezbudila větší pozornost. Počátkem minulého století vyšla v neastronomickém časopise práce (Hertzsprung, 1905), v níž se autor zabýval souvislostmi mezi jasnostmi, spektrálními třídami a paralaxami hvězd. O rok později na Štědrý den 1906 odeslal pokračování práce (Hertzsprung, 1907a), jejíž závěry lze shrnout do následujících bodů:

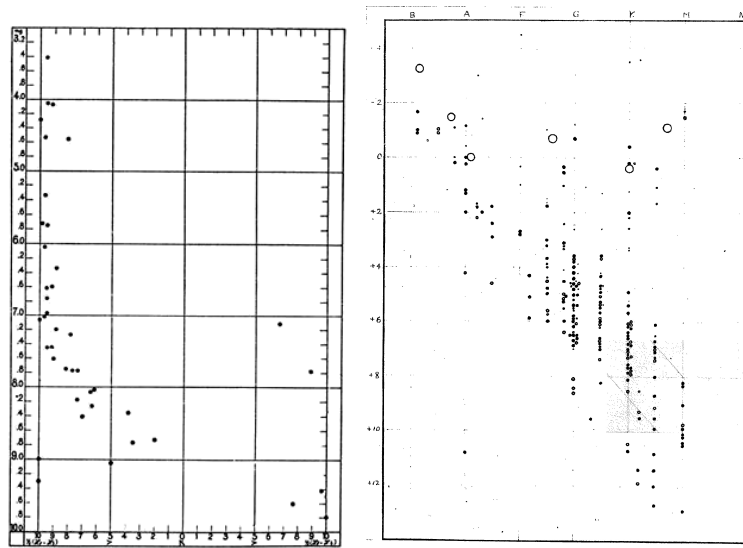
- Hvězdy spektrálních tříd G, K a M lze rozdělit do dvou skupin s odlišnou svítivostí, jedna je dnes známa jako hlavní posloupnost a v druhé jsou zastoupeny velmi zářivé hvězdy.
- Zářivé červené hvězdy musí být velmi velké.
- Malý počet těchto červených obrů (takové označení ale Hertzsprung nepoužil) ukazuje, že tyto hvězdy jsou v rychlé fázi svého vývoje. Předpokládal, že musí být souvislost mezi spektrem a zářivým výkonem hvězd.
- Ukázal, že hvězdy s ostrými a hlubokými absorpčními čarami, jsou zářivější než ostatní. Tento objev je základem pro určování zářivého výkonu hvězdy z jejího spektra, tedy pro metodu určování tzv. spektroskopické paralaxy.

Výše zmíněné Hertzsprungovy práce neobsahují ilustraci výsledků v grafické podobě, žádný diagram. Je však známo, že Hertzsprung vytvořil takový graf pro Plejády už v roce 1906. V další práci (Hertzsprung, 1907b) využil svých znalostí z oblasti fotografie a snažil se nashromážděná data astrofyzikálně interpretovat. Otevřené hvězdokupy mu připadaly jako správný nástroj pro studium závislosti mezi zářivým výkonem hvězd a jejich barvou. Protože jsou hvězdy z jedné otevřené hvězdokupy členy stejného uskupení a jsou od nás všechny přibližně stejně daleko, je možné zkoumat vztah mezi jejich pozorovanou hvězdnou velikostí a barvou. Poslal článek Karlu Schwarzschildovi a ten jej roku 1909 pozval do Göttingenu ke spolupráci. Tam také Schwarzschildovi ukázal svůj diagram. Pro Plejády a Hyády jej ale publikoval až o dva roky později (Hertzsprung, 1911). Nicméně Schwarzschildovou zásluhou, na jeho přímé doporučení, se problémem začal zabývat také Hans Rosenberg, který publikoval svůj diagram závislosti pozorované hvězdné velikosti na spektrálním typu pro hvězdy v Plejádách o rok dříve (Rosenberg, 1910) (viz obrázek 15.26). Za oceánem se podobným otázkám věnoval Henry Norris Russell a nezávisle došel ke stejným výsledkům jako Hertzsprung nebo Rosenberg<sup>10</sup>. Svůj diagram Russell poprvé prezentoval v červnu 1913 na zasedání Královské astronomické společnosti. Záznam přednášky byl publikován v Russell (1913). Malé hvězdy označuje podle Hertzsprunga "trpaslíky" a velké jako "obry". V textu Russell jasně navíc uvádí, že jedině, co udělal jinak než Hertzsprung je, že použil bohatší pozorovací materiál. Druhé veřejné představení diagramu provedl Russell v závěru roku 1913, v textové podobě v Russell (1914a,b). Delší dobu pak byl diagram znám jako Russellův. Teprve od roku 1933 se podle návrhu Bengta Strömgrena používá označení *Hertzsprungův-Russellův diagram* nebo jednoduše *HR diagram*.

<sup>10</sup>Zajímavé je, že se v roce 1910 setkal se Schwarzschildem během jeho cesty po USA.



Obrázek 15.25: Podoba HR diagramu pro Plejády a Hyády v práci Hertzsprung (1911). Na vodorovné ose je pozorovaná hvězdná velikost a na ose  $y$  efektivní vlnová délka v angströmech.



Obrázek 15.26: Vlevo: Nejstarší podoba HR diagramu pro Plejády v práci Rosenberg (1910). Na vodorovné ose jsou spektrální třídy a na ose  $y$  pozorovaná hvězdná velikost v magnitudách. Vpravo: Russellova podoba HR diagramu Russell (1914a).

## 15.5.2 Podoby HRD

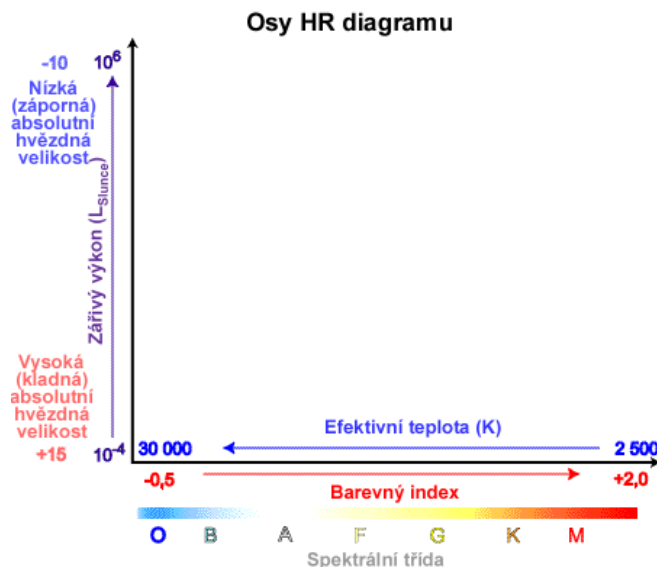
Historická kapitola o vzniku HR diagramu nám ukázala mimo jiné, že první podoby diagramu byly trochu odlišné. Vědci si teprve uvědomovali vzájemné souvislosti a význam HR diagramu. Dnes je zřejmé, že HR diagram představuje nejdůležitější astrofyzikální diagram a to i přesto, že podává tak trochu klamný obraz o světě hvězd, ale o tom až za chvíli. Nyní si povšimněme různorodosti s jakou je HR diagram prezentován. Jeho podoby se liší. Začneme u os diagramu (viz obrázek 15.27). Na vodorovné ose se zpravidla setkáme s popisem pomocí spektrálních tříd, které zleva doprava jdou podle Harvardské spektrální klasifikace od třídy  $O$  až po třídu  $M$  ( $O$ - $B$ - $A$ - $F$ - $G$ - $K$ - $M$ ), eventuálně další



nově zaváděné třídy (viz kapitola 8.3). Každou třídu můžeme v intencích zavedeného dělení ještě zjemnit na desetiny. Spektrální třídy poskytují informaci o teplotě místa vzniku záření a někdy je výhodnější pracovat přímo s efektivními teplotami. Pak je ale stupnice teplot na ose  $x$  obrácená, než jsme zvyklí, směrem doprava teplota klesá (viz obrázek 15.27). Teplotu hvězd lze ale vyjádřit i pomocí tzv. barevného indexu, což je vlastně rozdíl naměřených hvězdných velikostí ve dvou různých částech spektra. A hodnota barevného indexu už se chová dle očekávání a směrem zleva doprava roste. Na osu  $y$  zpravidla vynášíme zářivý výkon hvězdy  $L$  vyjádřený buď v absolutní jednotkách (ve wattech) nebo v jednotkách zářivého výkonu nominálního Slunce  $L_{\odot}$ . V obou případech hodnoty směrem vzhůru rostou. Ekvivalentním vyjádřením zářivého výkonu je ale absolutní hvězdná velikost v magnitudách. Čím má potom hvězda větší zářivý výkon, tím je číselná hodnota hvězdné velikosti menší a hodnoty na ose tak směrem vzhůru klesají (viz obrázek 15.27). Absolutní hvězdná velikost poměřuje hvězdy v nominální vzdálenosti deseti parseků, ale v principu to může být jakákoli vzdálenost. Jen musíme zaručit, že pro všechny zakreslované objekty bude stejná. Takový předpoklad je splněn v případě hvězdokup. Jejich rozměry jsou zpravidla vzhledem k jejich vzdálenosti od nás zanedbatelné. Pak můžeme na svislou osu dokonce vynášet pozorované hvězdné velikosti, ale i zde bude směrem vzhůru číselná hodnota klesat. Variantě HR diagramu, kde jsou vynášeny na ose vodorovné barevné indexy a na ose svislé pozorované hvězdné velikosti, říkáme *barevný diagram*.

HR diagram má tedy rozmanité podoby, možnosti zápisu veličin, ale všechny tyto varianty mají jedno společné - vyjadřují závislost zářivého výkonu hvězd na jejich povrchové teplotě. Hvězdy se v HR diagramu seskupují na několika místech, naopak některé části HR diagramu doslova zejí prázdnotou. Podíváme-li se na HR diagram (obrázek 15.28) najdeme v něm zejména čtyři seskupení hvězd:

**hlavní posloupnost** – soustřeďuje přes 90 % hvězd v pásu, který probíhá od



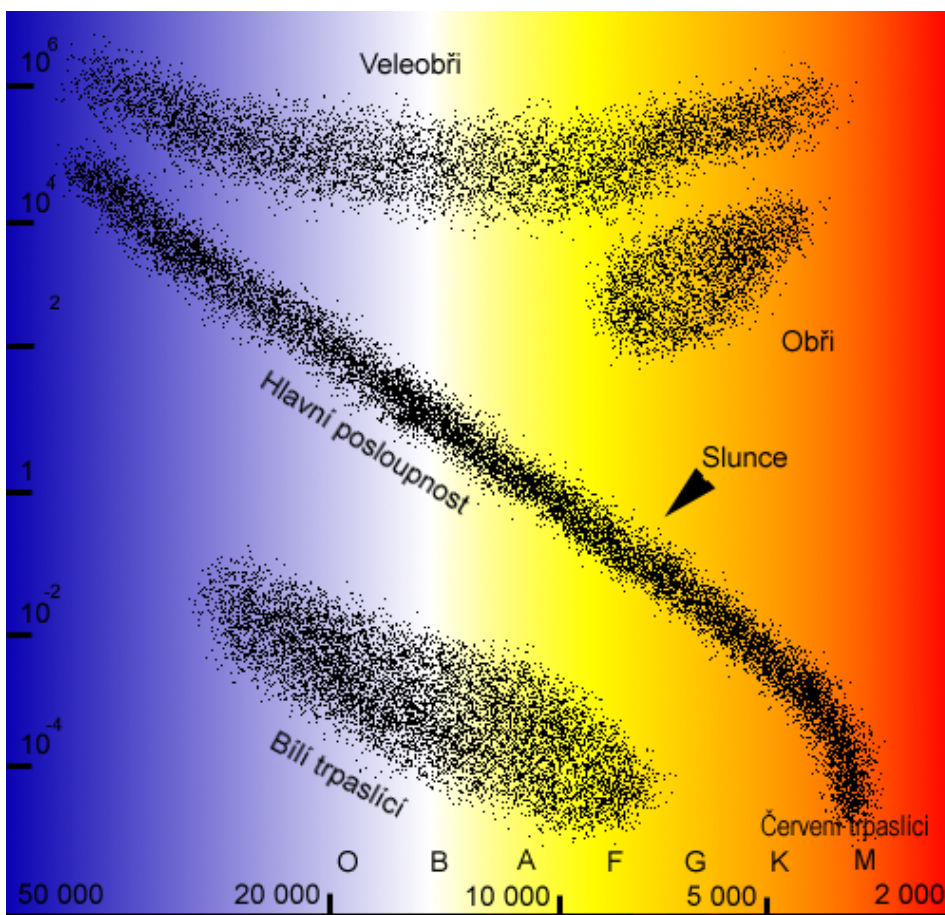
Obrázek 15.27: Různé podoby os HR diagramu. Převzato z <http://outreach.atnf.csiro.au> a upraveno

horkých a zářivých hvězd k chladným hvězdám s malým výkonem,

**obři** (červení obři) a **veleobři** - obří hvězdy s vysokými zářivými výkony a většinou relativně nízkými povrchovými teplotami,

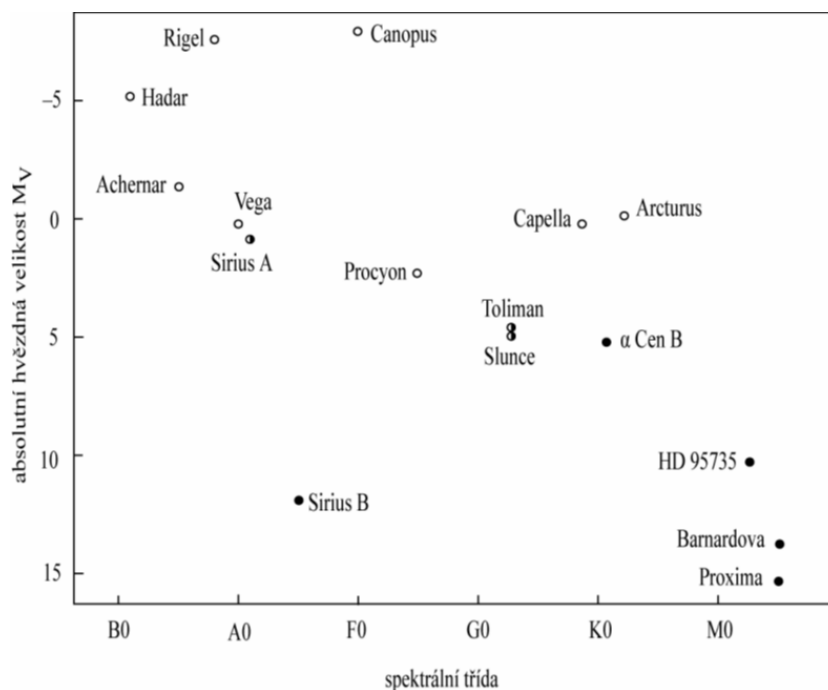
**bílí trpaslíci** - hvězdy malých rozměrů, typické jsou malé zářivé výkony a vysoké povrchové teploty,

**červení trpaslíci** - malé hvězdy na spodním konci hlavní posloupnosti spektrálních tříd K a M s malým zářivým výkonem.



Obrázek 15.28: HR diagram. Zdroj: wikipedia. Upraveno.

Potíž s HR diagramem je ale v tom, že nám ukazuje obraz světa hvězd značně zkreslený. Stačí si jej vykreslit pro nejjasnější hvězdy naší hvězdné oblohy a pak pro hvězdy k Slunci nejbližší. Rázem dostanete dvě odlišné podoby HR diagramu (viz obrázek 15.29). Která je ale ta správná? Které máme věřit? Správné jsou, možná pro někoho překvapivě, obě podoby. Při vytváření diagramu se silně uplatňuje výběrový efekt. Pokud upřednostníme nejjasnější hvězdy nebe, budou to hvězdy velmi jasné, zářivé, obři a veleobři, které se zobrazí v levé horní části HR diagramu. Těch malých a slabých hvězd bude velmi málo. Naproti tomu v bezprostředním okolí Slunce jsou spíše malé, málo zářivé hvězdy, které najdeme spíše v pravé dolní části HR diagramu.



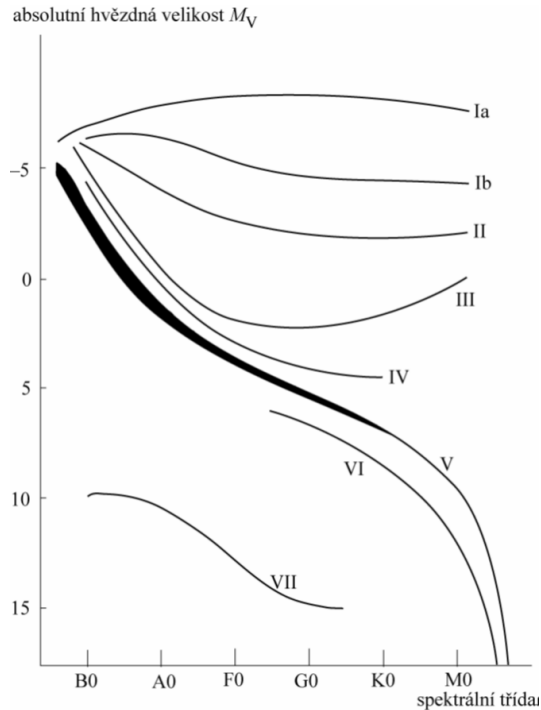
Obrázek 15.29: Hertzsprungův-Russellův diagram pro nejjasnější hvězdy (prázdné kotoučky) a nejbližší hvězdy (plné kotoučky).

Při popisu HR diagramu je tedy nutné dávat pozor z jaké množiny hvězd byl ten který HR diagram vytvořen. Pokud do něj zakreslíme co nejvíce všech hvězd, snadno zjistíme, že v HR diagramu lze odhalit jemnější rozdělení, než jsme dosud uvedli. Hvězdy jsou v něm zobrazeny v několika skupinách, které odpovídají luminositním třídám Morganovy-Keenanovy klasifikace (viz obrázek 15.30). Tato klasifikace zjemňuje spektrální typologii hvězd. Označení jednotlivých tříd (viz tabulka 15.1) se přidává za spektrální typ, případně podtyp v podobě římské číslice a případně ještě písmena, například K2III, G2V. Takové rozdělení ale není samoúčelné. Určuje se podle profilu spektrálních čar ionizovaných prvků, citlivých na tlak v atmosféře hvězdy, takže zatímco spektrální typ přináší informaci o povrchové teplotě hvězdy, luminositní třída poukazuje na tlak v atmosféře hvězdy. Dohromady pak spektrální typ a luminositní třída poskytují rámcovou informaci o velikosti hvězdy.

I přes výše uvedené obtíže s výběrovým efektem je HR diagram vcelku oprávněně označován jako nejdůležitější astrofyzikální diagram. Jeho užití v astrofyzikální praxi je opravdu široké. Například je možné jej využít pro odhad vzdálenosti hvězdy. Po-

Tabulka 15.1: Luminositní třídy klasifikace, kterou zavedli Morgan, Keenan & Kellman (1943); Morgan & Keenan (1973). V dnešní době se většinou k původním třídám I až VII přidává ještě další dosud neoznačená, která zahrnuje hnědé trpaslíky a malé červené trpaslíky.

Lum. třída	Hvězda	Příklad
0	extrémně zářiví veleobři (hyperobři)	$\eta$ Carinae
Ia	jasní veleobři	Betelgeuze
Ib	(normální) veleobři	Antares
II	jasní obři (někdy označení jako nadobři)	Canopus
III	(normální) obři	Aldebaran
IV	podobři	Procyon
V	hvězdy hlavní posloupnosti (a červení trpaslíci)	Slunce
VI	podtrpaslíci	Kapteynova hvězda
VII	bílí trpaslíci červení, hnědí trpaslíci	Sírius B

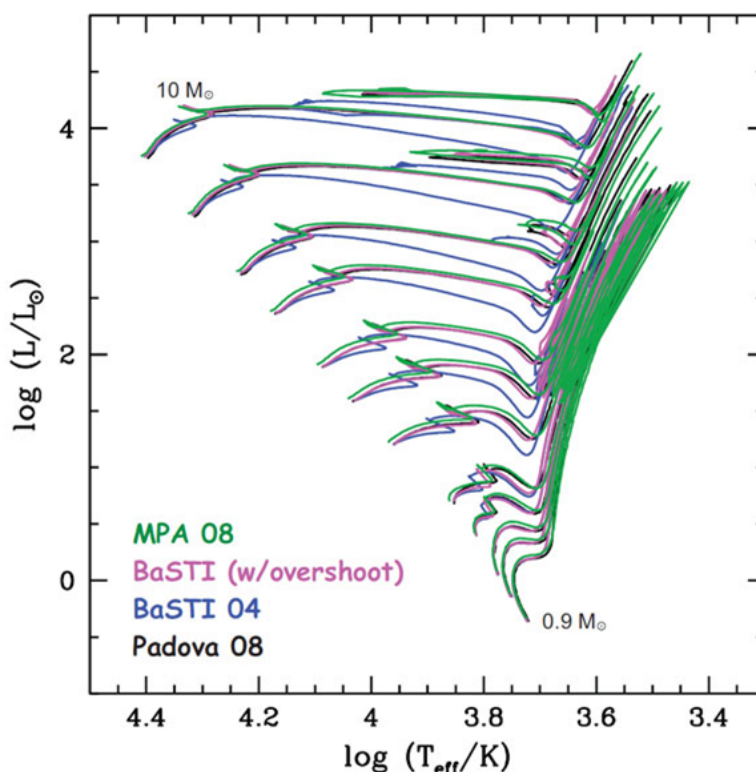


Obrázek 15.30: Luminositní třídy - Morganova-Keenanova (MK) klasifikace

kud známe z pozorování hvězdnou velikost a spektrální typ, respektive spektrální třídu hvězdy, vyneseme hvězdu do HR diagramu dle spektrálních charakteristik (hodnotu osy  $x$  dle spektrálního typu a pořadnici umístění dle typu (hvězda hlavní posloupnosti, obr, trpaslík). Z HR diagramu pak odečteme absolutní hvězdnou velikost a z pozorované hvězdné velikosti spočteme náš odhad vzdálenosti. Takto určená vzdálenost hvězdy se

někdy označuje jako spektroskopická paralaxa.

Další významnou oblastí uplatnění HR diagramu je výzkum hvězdokup. Vcelku jednoduše lze například určit vzdálenost celé hvězdokupy od Země. Předpokládáme, že rozměry hvězdokupy vůči vzdálenosti k Zemi jsou zanedbatelné, takže všechny hvězdy hvězdokupy mají od země stejnou vzdálenost. Pak stačí srovnání pozorované hvězdné velikosti hvězd s absolutní pro hvězdy známé vzdálenosti (nebo modelové hvězdy). Rozdíl mezi hlavními posloupnostmi obou skupin hvězd na ose  $y$  představuje vlastně modul vzdálenosti, takže pak lze hledanou vzdálenost studované hvězdokupy snadno spočítat. Ale HR diagram, resp. jeho modifikace v podobě barevného diagramu se ve studiu hvězdokup uplatní podstatně více, jak si ukážeme v následující kapitole.

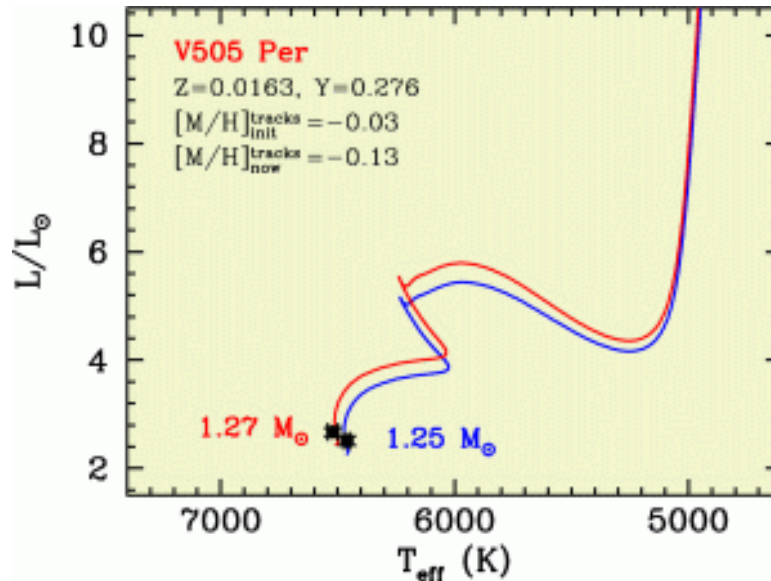


Obrázek 15.31: Vývojové cesty hvězd v HR diagramu.

Mezi nejdůležitější využití HR diagramu lze nepochybně patřit testy platnosti teorií stavby a vývoje hvězd. Jak se hvězda vyvíjí, mění se její parametry a tím nutně i její postavení v HR diagramu. Pro hvězdy různé hmotnosti pak můžeme v HR diagramu zaznamenávat různé vývojové stopy a následně při pozorování zjišťovat, zda v HR diagramu existují takové objekty, jaké předpovídá teorie. Možných vývojových modelů hvězd existuje více, jak je například vidět na obrázku 15.31. Pro srovnání teoretických modelů s pozorovanými daty je třeba, aby základní parametry hvězdy byly určeny s přesností alespoň 1 %. Zatím nejspolehlivějším zdrojem takových dat je analýza fotometrických a spektroskopických pozorování těsných dvojhvězd (viz obr. 15.32).

Na internetu lze najít jak hotové modely, sítě dat pro různé kombinace hvězdných parametrů, tak i programy, které umožní seznámit se blíže s HR diagramem a vývojovými stopami hvězd v něm, například [http://sunshine.chpc.utah.edu/labs/star\\_life/](http://sunshine.chpc.utah.edu/labs/star_life/)

support/HR\_animated.swf, <http://leo.astronomy.cz/sclock/sclock.html>, <http://www.astro.ubc.ca/~scharein/a311/Sim/hr/HRdiagram.html> a další.



Obrázek 15.32: Srovnání vývojových stop modelu BaSTI s pozorovanými parametry V505 Per, které byly určeny z pozorování viz obrázek 15.22 Zdroj: <http://www.pd.astro.it/oapd>.

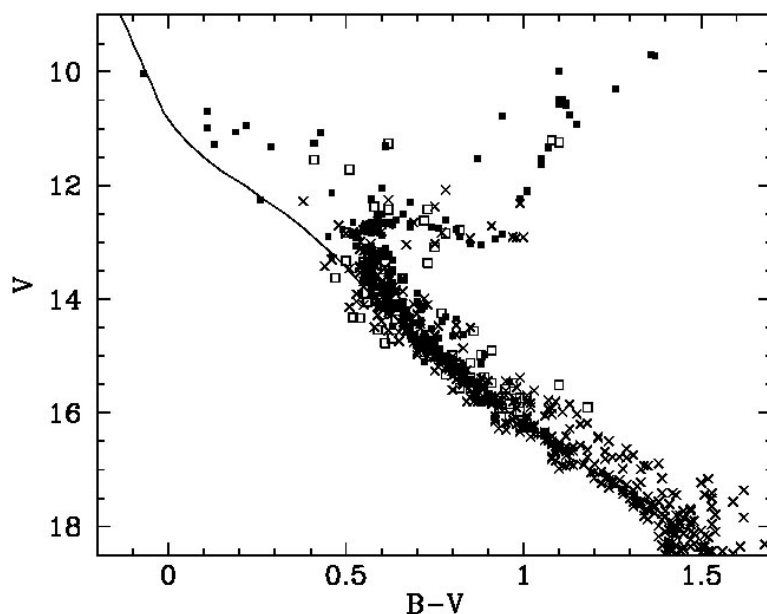
### 15.5.3 Barevný diagram

Barevný diagram je modifikací HR diagramu. Jak už víme, lze na osu  $x$  vynášet místo teploty, respektive spektrální třídy barevný index. Pokud barevný index doplní na ose  $y$  pozorovaná hvězdná velikost místo absolutní, mluvíme právě o barevném diagramu. Jenže pozor, takový diagram lze smysluplně vytvořit jen tehdy, budou-li všechny hvězdy v něm zakreslené od nás stejně daleko. Taková situace nastává pro hvězdy ve hvězdokupách, případně v galaxiích mimo naší Galaxie.

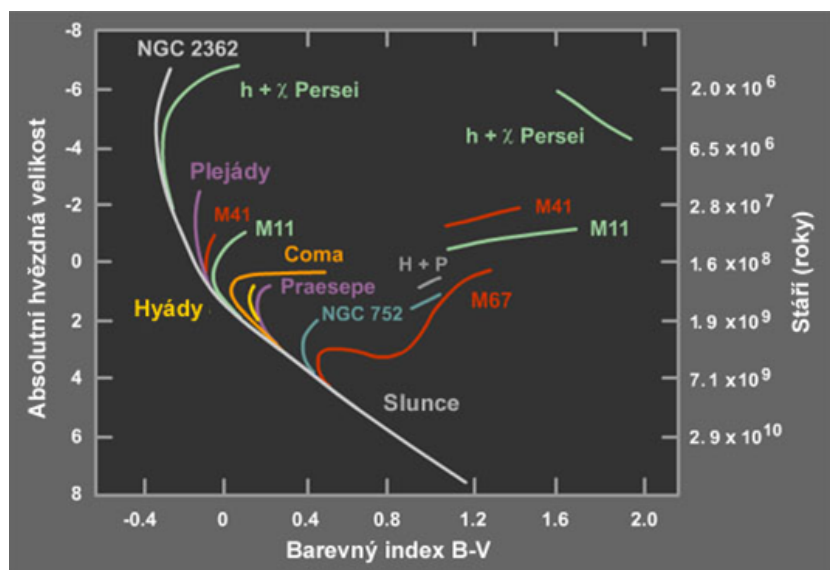
Barevný diagram je velmi účinná pomůcka. Elegantně nám pomůže nahradit značný deficit spektroskopických pozorování slabších objektů ve vzdálených hvězdokupách nebo galaxiích. Pořídít vícebarevnou fotometrii pro tyto objekty je totiž podstatně jednodušší.

Barevný diagram pak můžeme použít k tomu, abychom odlišili hvězdy, které jsou skutečně členy hvězdokupy, od těch, které se do stejného místa hvězdného nebe jen promítají. Lze je samozřejmě využít k určení vzdálenosti hvězdokupy, jak jsme popsali u HR diagramu.

Z HR diagramu nebo i barevného diagramu můžeme snadno určit také stáří hvězdokupy pomocí tzv. bodu odbočení. Jak je vidět na obrázku 15.34 pro různé hvězdokupy se místo výskytu nejvíce hvězd odchyluje od hlavní posloupnosti v různém místě. Čím je tento bod odbočení na hlavní posloupnosti níže, tím starší je daná hvězdokupa. Jak je vidět, lze i v podstatě velmi jednoduchým fotometrickým pozorováním hvězdokup určovat tak významný údaj, jako je jejich stáří.



Obrázek 15.33: Barevný diagram otevřené hvězdokupy M67 (NGC 2682).



Obrázek 15.34: HRD pro různé otevřené hvězdokupy.

## Použitá a doplňující literatura

- Argelander F. W. A., 1844, "Aufforderung an Freunde der Astronomie", Schumacher's Jahrbuch 1844, 123-254
- Bessell, F. 1844, MNRAS 6, 136
- Csizmadia, S., Borkovits, T., Paragi, Z., et al. 2009, ApJ 705, 436
- Harmanec P., Horn J., Juza K. 1994, Astron. Astrophys. Suppl. **104**, 121
- Hearnshaw, J. B. 1996, Cambridge University Press

- Herschel, W. 1802, Royal Society of London Philosophical Transactions Series I, 92, 477
- Hertzsprung, E. 1905, Zeitschrift für Wissenschaftliche Photographie, Photophysik und Photochemie, (článek "Zur Strahlung der Sterne"), Vol. 3, No. 2, 429-442
- Hertzsprung, E. 1907, Zeitschrift für Wissenschaftliche Photographie, Photophysik und Photochemie, (článek "Zur Strahlung der Sterne II"), Vol. 5, No. 3, 86-107
- Hertzsprung, E. 1907, Astronomische Nachrichten, 176, 49
- Hertzsprung, E. 1911, Publikationen des Astrophysikalischen Observatoriums zu Potsdam, 63,
- Howell, S.B., 2000, Handbook of CCD astronomy, Cambridge University Press
- Charlier, C. V. L. 1889, Publicationen der Astronomischen Gesellschaft XIX. Leipzig, vyd. W. Engelmann, 1889.
- Janík, J., Mikulášek, Z., 2012, Astronomické pozorování, učební text, Masarykova univerzita
- Johnson, H. L., Morgan, W.W., 1953, ApJ 117, 313
- Kleczek, J., 2002 Velká encyklopedie vesmíru. Academia, Praha
- Lestrade, J.-F., Preston, R. A., Jones, D. L., et al. 1999, A&A 344, 1014
- Mason, B. D., Wycoff, G. L., Hartkopf, W. I., Douglass, G. G., & Worley, C. E. 2001, AJ 122, 3466
- Michell, J. 1767, Royal Society of London Philosophical Transactions Series I, 57, 234
- Michelson, A. A., & Pease, F. G. 1921, ApJ 53, 249
- Mikulášek, Z., Zejda, M., 2012, Proměnné hvězdy, učební text, Masarykova univerzita
- Monnier, J. D., 2003 Rep. Prog. Phys. 66, 789–857
- Morgan, W. W., & Keenan, P. C. 1973, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 11, 29
- Morgan, W. W., Keenan, P. C., & Kellman, E. 1943, Chicago, Ill., The University of Chicago press [1943]
- Pickering E. Ch., 1890, "On the Spectrum of Zeta Ursae Majoris", American Journal of Science, 3rd Ser., vol. 39, 46-47
- Rosenberg, H. 1910, Astronomische Nachrichten, 186, 71
- Russell, H. N. 1913, The Observatory, 36, 324
- Russell, H. N. 1914a, Popular Astronomy, 22, 275
- Russell, H. N. 1914b, Popular Astronomy, 22, 331
- Savary, F., 1827, "Sur la détermination des orbites que décrivent autour de leur centre de gravité deux étoiles très rapprochées l'une de l'autre" v Connaissance des Temps
- Zejda, M., Borovička, J., Hájek, P., et al. 1994, Pozorování proměnných hvězd I, HaP MK Brno



## 16 Hvězdy zblízka

### 16.1 Svítící koule

Ve vesmíru lze nalézt velké množství rozmanitých objektů, které se liší v rozměrech nebo hmotnostech o mnoho řádů. Jaký objekt bychom ale z nich měli vybrat a považovat jej za nejběžnější, za základní?

Základní stavebními prvky alespoň té viditelné hmoty ve vesmíru jsou objekty o hmotnostech v rozmezí několika setin hmotnosti Slunce až přibližně  $100 M_{\odot}$ . Takové objekty označujeme jako hvězdy. Jejich svět je velmi různorodý a na první pohled by nezasvěcenému mohl připomínat svět pohádkový - setkáme se zde totiž s trpaslíky, obry, dokonce i nadobry nebo veleobry. Ve vesmíru se vyskytují jak osamoceně tak ve dvojicích, případně vícenásobných soustavách. Shluky hvězd pak vytváření hvězdokupy a následně galaxie.

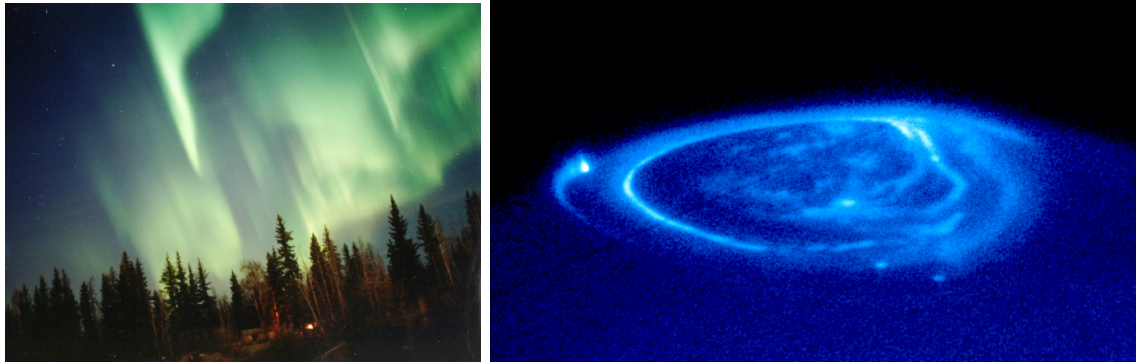
Nám nejbližší hvězdou je Slunce, které se také stará o to, abychom ve dne žádnou jinou hvězdu na obloze neviděli. Teprve v noci můžeme pozorovat ostatní hvězdy. Ale všechny pozorovatelné pouhýma očima patří mezi hvězdy naší Galaxie.

Nejstarší generace řeckých filozofů, například Anaximandros z Milétu, (okolo 610 př. n. l. – okolo 546 př. n. l.) považovali hvězdy za útvary stlačeného vzduchu vyplněného ohněm. Motiv centrálního ohně se pak objevuje po řadu století, i když například Anaxagoras z Klazomen (asi 500 - 428 před n. l.) považoval Slunce za rozžhavenou kamennou kouli. Ještě na konci 18. století anglický filozof Thomas Wright z Durhamu tvrdil, že hvězdy jsou obří vulkány soptící v temnotách. V té době už ale vznikaly první fyzikální představy o vzniku Slunce a planet. Na počátku 19. století začali astronomové měřit vzdálenosti hvězd, přemýšleli o zdroji energie uvnitř hvězd. Hvězdy byly stále více chápány jako fyzická tělesa, která je třeba měřit a studovat. Konečně v polovině 19. století dostali astronomové do rukou i nástroj, jak zkoumat hvězdy na dálku – spektroskopii. Bylo odhalováno složení povrchových vrstev hvězd, zkoumány rychlosti jejich pohybu vůči Zemi, ale teprve v roce 1925 přišla Cecilia Payne-Gaposchkinová ve své dizertační práci s tvrzením, že většina hvězd je ze tří čtvrtin složena z vodíku. Krátce nato Eddington navrhl jako možný zdroj energie ve Slunci jadernou syntézu vodíku na hélium. V letech 1937-9 se pak Hansi Bethemu a Carlu von Weizsäckerovi podařilo definovat základní jaderné procesy v nitru hvězd. Poznávání hvězd samozřejmě pokračovalo a pokračuje neustále, ale základy byly položeny.

Můžeme tedy konstatovat, že hvězdy objekty zpravidla kulového tvaru<sup>1</sup> o hmotnostech přibližně  $0,03 M_{\odot}$  až řádově  $100 M_{\odot}$ . Jsou tvořeny plazmatem<sup>2</sup>, ionizovaným plynem složeným z iontů, elektronů (a případně neutrálních částic, atomů a molekul), který je kvazineutrální a navíc vykazuje kolektivní chování. V plazmatu se nachází

<sup>1</sup>Nekulový tvar hvězd můžeme najít u složek těsných dvojhvězd a v případě velmi rychle rotujících hvězd.

<sup>2</sup>Slovo plazma pochází z řečtiny, znamená "dávající tvar" nebo "dávající formu". V biologickém významu jej pro označení tekutiny vzniklé po odstranění všech částic z krve v polovině 19. století použil Jan Evangelista Purkyně (1787–1869). Pak se skloňuje podle rodu ženského. Ve fyzikálním významu použil termín plazma poprvé Irving Langmuir (1881–1957) v roce 1922. Jde o formu látky, o plazmatu se mluví často jako o čtvrtém skupenství hmoty. V tomto případě se používá v češtině rodu středního.



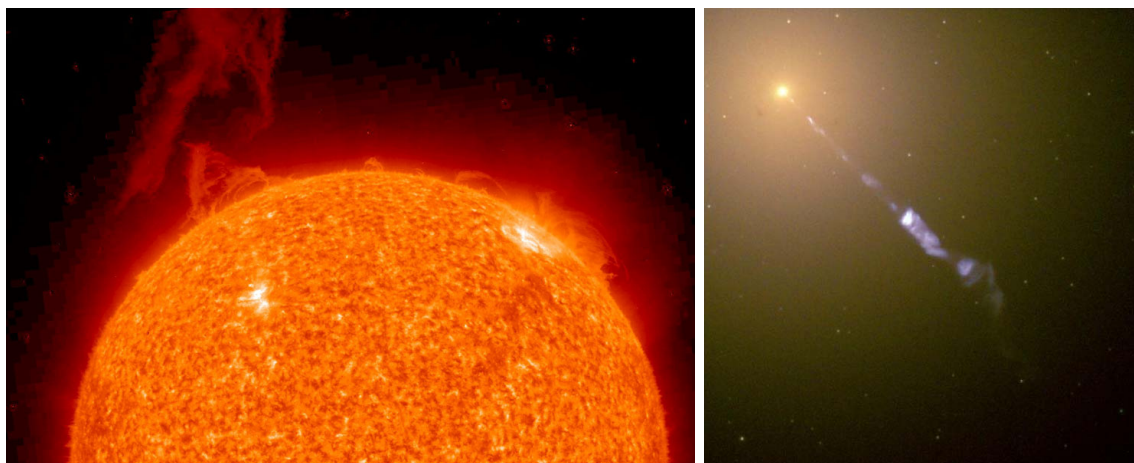
Obrázek 16.1: Vlevo: Polární záře z okolí Fairbanks. Foto: Jan Curtis <http://www.geo.mtu.edu/weather/aurora/images/aurora/jan.curtis/index.html>. Vpravo: Polární záře na Jupiteru z kosmického dalekohledu Hubble Space Telescope v ultrafialovém světle. Bližší popis <http://apod.gsfc.nasa.gov/apod/ap001219.html> Foto: John T. Clarke (U. Michigan), ESA, NASA

volné nosiče náboje, takže je plazma vodivé a reaguje na elektrická a magnetická pole. V makroskopických měřítkách ale obsahuje zhruba stejný počet kladných a záporných nabitých částic, takže se chová podobně jako neutrální tekutina, bez náboje. Kolektivním chováním se pak rozumí, že plazma je schopné jako celek na jednu stranu svými projevy generovat globální elektrická a magnetická pole a na druhou stranu na takováto globální pole reagovat. Jinak řečeno nabité částice v plazmatu jsou schopny ovlivňovat pohyb dalších nabitých částic na poměrně velkou vzdálenost. Působí na sebe coulombovskými silami, které klesají se čtvercem vzdálenosti ( $\sim 1/r^2$ ). Naproti tomu částice plynu na sebe působí až při těsném přiblížení prakticky v okamžiku srážky. Působící síla je zde nepřímo úměrná  $r^6$ .

Ve hvězdách se setkáváme s plazmatem natolik hustým, že zde často dochází ke srážkám částic. Navenek se pak hvězdné plazma chová jako tekutina (kapalina nebo plyn). V mezihvězdném prostředí nalezneme opačný případ. Plazma je tak řídké, že coulombovské síly mezi jednotlivými nabitými částicemi plazmatu jsou menší než síly vnějšího elektrického a zejména magnetického pole. V naší Sluneční soustavě se setkáte plazmatem ve slunečním větru, v magnetosférách planet, komet, ale zejména ve Slunci.

## 16.2 Modely hvězd

Hvězd ve vesmíru je obrovské množství. Jen v naší Galaxii jich najdeme asi 100 miliard. Jak už jsme prozradili v minulé kapitole, jde o velmi rozmanitý svět. Pohádkové označení trpaslíků a obrů je zde zcela na místě. Nejmenší hvězdy mají v průměru zhruba 10 kilometrů, ale ty největší nabobtnají až do rozměrů řádově tisíckrát větších než je naše Slunce (tedy až 1,5 miliardy kilometrů). O rozmezí hmotností jsme už mluvili. Je vůbec za těchto podmínek možné jednotným způsobem popsat, co se děje v nitru všech hvězd, vytvořit nějaký konzistentní model hvězdy? Odpověď na takovou otázku je velmi složitá, samozřejmě popsat komplexně děje v nitru všech hvězd není docela dobře možné, jinak jsou zařízeny útroby trpaslíka, jinak obra či normální hvězdy. Ve většině případů se

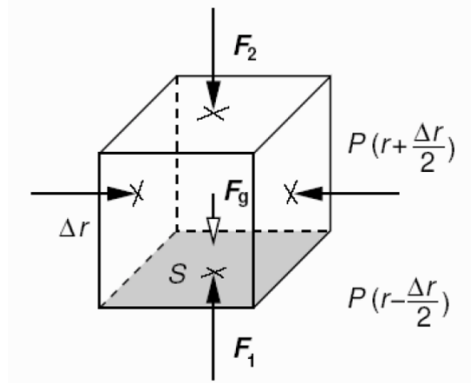


Obrázek 16.2: Vlevo: Sluneční protuberance 26.–27. září 2009. Foto: STEREO Project, NASA. Vpravo: Radiová galaxie M 87 ve viditelném světle a relativistický výtrysk plazmatu. Foto: Hubble Space Telescope (HST)

bere jako etalon naše Slunce, které je sice mírně nadprůměrnou hvězdou, ale na druhou stranu nejlépe prostudovanou hvězdou.

A jak je to s těmi modely hvězd? Rozhodně tady nemáme na mysli různě barevné koule, jak jsou hvězdy představovány třeba dětem. Modelem zde rozumíme určitou idealizovanou, zjednodušenou představu, případně matematický popis objektu a jeho chování. Můžeme postupovat od nejjednodušších variant modelu až po velmi složité modely popisující i jemné detaily a charakteristiky a zahrnující kdejakou fyzikální vazbu mezi nimi. Výpočet takového modelu pak bude samozřejmě velmi složitý a náročný. Modelování v tomto smyslu se používá v řadě vědních odvětví. V běžném životě se nejvíce budeme setkávat s modelem předpovědi počasí. V astrofyzice nám modelování umožní studovat nejen současný stav hvězd a jejich vývoj, vznik planetárních soustav, vývoj galaxií, jejich pohyb, srážky ale i vývoj celého vesmíru. Vesměs jde o popis nepřístupných míst a velmi dlouhé děje, které bychom nemohli během lidského života postihnout. Zásadní ovšem je vždy srovnávat modelové výpočty s reálnými daty. To nám může odhalit jak (ne)správnost našeho modelu, tak i vazby a souvislosti, které by jinak zůstaly skryté.

Modelové výpočty pro hvězdy jsou založeny na rovnicích hvězdné stavby, což jsou stavová rovnice, zákon zachování hmoty, rovnice hydrostatické rovnováhy, rovnice tepelné rovnováhy a rovnice přenosu energie. Řešením této soustavy rovnic se budeme zabývat v následujících kurzech, tady se blíže podívejme jen na to, co vlastně udržuje hvězdy takové, jaké jsou. Jinak řečeno zkusme na následujících řádcích odpovědět na otázku: „Proč se hvězdy nezhroutí?“. Z našich představ (samozřejmě podpořených modelovými výpočty) vyplývá, že u hvězd se látka směrem ke středu silně koncentruje. To znamená, že můžeme hvězdy považovat za „hmotné body“. Zejména to platí u obrů



Obrázek 16.3: Objemový element. Převzato z Mikulášek & Krtička (2005).

a veleobrů. Když je však hmota tak silně koncentrována ke středu, proč se do středu nezhroutí veškerá hmota hvězdy? Co jí v tom brání? Obvyklá školácká chyba, kterou však můžeme najít v řadě populárních astronomických knih, je, že hvězdy se nezhroutí proto, že proti gravitační síle působí tlak. Jenže tlak je přece veličina skalární a gravitační síla vektorová, takže **proti gravitační síle působí** nikoli tlak, ale rozdíl, chcete-li **gradient tlaku, tedy vztlaková síla**. Půjdeme-li směrem ke středu hvězdy, bude se zvyšovat teplota, hustota i tlak, což znamená, že na každý objemový element uvnitř hvězdy působí zdola větší tlak než shora. Rozdíl tlaků (vztlaková síla) tak brání, aby gravitační síla stáhla objemový element do středu hvězdy. Na vztlakové síle se podílí dvě složky – tlak plynu a tlak záření. Tlak plynu je dán vzájemnými srážkami částic, z nichž je hvězda složena. Tlak záření si můžeme představit jako tlak fotonového plynu. Pro většinu hvězd je zanedbatelný a uplatní se jen u velmi hmotných hvězd, například u Slunce představuje tlak záření v nejlepším případě jen promile celkového tlaku.

Kdyby ve hvězdě působila jen gravitační síla, materiál hvězdy by se velmi rychle zhroutil. Například u Slunce by kolaps trval jen asi půl hodiny. Naštěstí je tu vztlaková síla, která udržuje hvězdu ve stavu hydrostatické rovnováhy. Zkusme si tento stav popsat matematicky. Představme si, že máme samostatnou, (pro jednoduchost) nerotující hvězdu a v ní elementární objem ve tvaru kvádrů s dolní a horní podstavou o ploše  $S$  a výšce  $\Delta r$ . Těžiště našeho objemového elementu leží ve vzdálenosti  $r$  od středu hvězdy, v místě s hustotou materiálu  $\rho(r)$ , kde je gravitační zrychlení  $\mathbf{g}(r)$ . Na elementární kvádr působí gravitační síla  $\mathbf{F}_g$

$$F_g = mg(r) = \rho(r) S \Delta r g(r) = -\rho(r) S \Delta r g(r) \frac{r}{r}. \quad (16.1)$$

V posledním kroku úpravy se objevilo znaménko minus, protože gravitační síla je opačně orientovaná než polohový vektor  $\mathbf{r}$ . Proti gravitační síle působí vztlaková síla  $\mathbf{F}_t$ , která je výslednicí tlakových sil působících na dolní a horní podstavu kvádrů

$$F_t = F_1 + F_2 = S \left[ P \left( r - \frac{\Delta r}{2} \right) - P \left( r + \frac{\Delta r}{2} \right) \right] \frac{r}{r} \cong S \left[ P(r) - \frac{dP}{dr} \frac{\Delta r}{2} - P(r) - \frac{dP}{dr} \frac{\Delta r}{2} \right] \frac{r}{r}. \quad (16.2)$$

Po úpravách

$$F_t = -S \frac{dP}{dr} \Delta r \frac{r}{r}. \quad (16.3)$$

Aby byl zvolený objemový element v klidu, musí být výslednice sil, které na něj působí nulová  $F_t + F_g = 0$ , takže

$$F_t + F_g = \left( -\frac{dP}{dr} - \rho(r) g(r) \right) S \Delta r \frac{r}{r} = 0. \quad (16.4)$$

Odtud po úpravě dostaneme první rovnici hvězdné stavby, rovnici hydrostatické rovnováhy

$$\frac{dP}{dr} = -\rho(r) g(r). \quad (16.5)$$

Výsledný vztah platí zcela obecně, tedy pro libovolná statická tělesa nacházející se v obecném gravitačním poli. S dalšími rovnicemi hvězdné stavby se seznámíte v navazujících kurzech. V každém případě ale představují tyto matematické vztahy a vlastně celé modelování pro astronoma podobně účinný nástroj jako dalekohled.

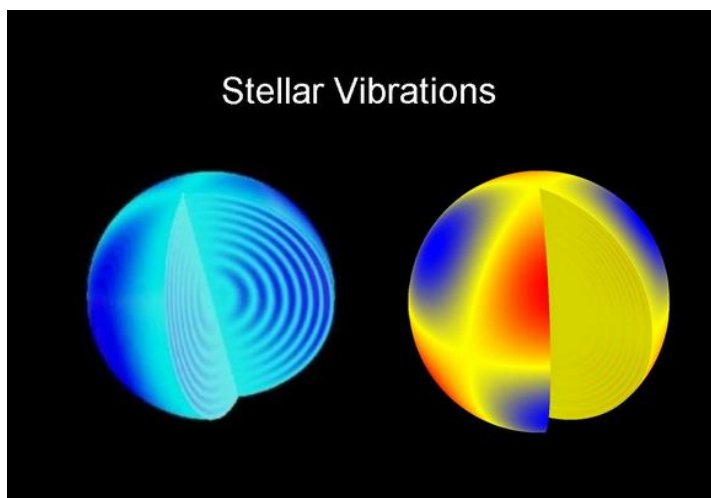
## 16.3 Anatomie hvězdy

Většina hvězd pro nás představuje stále jen zářící body. Jako malé plošky dokážeme rozlišit a zobrazit jen několik málo nejbližších veleobrů. Můžeme tak studovat detaily na jejich "povrchu". Ale ani u mnohem bližší a nejlépe prostudované hvězdy – našeho Slunce se pod zářivou, povrchovou slupku nepodíváme. V principu lze tedy hvězdy rozdělit na dvě části – přímo nepozorovatelné nitro a hvězdnou atmosféru. Předělem je tenká vrstva, odkud k nám přichází záření hvězd. Jde o nejspodnější vrstvu hvězdné atmosféry tzv. fotosféru, která je také považována za "povrch hvězdy". Poloměr hvězdy je tedy dán vzdáleností fotosféry od středu hvězdy.

### 16.3.1 Nitro hvězdy

Hvězdným nitrem budeme rozumět části hvězdy, které nikdy nemůžeme přímo pozorovat. V roce 1926 Arthur Eddington v publikaci „The Internal Constitution of the Stars“ napsal: „Už na první pohled se zdá, že vnitřek Slunce a hvězd je méně dostupný vědeckému zkoumání než jakákoli jiná oblast vesmíru. Naše dalekohledy mohou zkoumat vzdálenější a vzdálenější hlubiny vesmíru, ale jak lze vůbec získat nějakou povědomost o tom co je skryto pod tak důkladnými překážkami? Jaký přístroj je schopen proniknout svrchními vrstvami hvězdy a zjistit jaké podmínky panují uvnitř?“<sup>3</sup> Je pravda, že z nitra Slunce k nám nepronikne jediný foton. Hmotou hvězdy projdou jen těžko polapitelná neutrina. Nicméně kromě nich a už představeného modelování máme pro studium hvězd ještě přinejmenším jeden nástroj a tím je helioseismologie. Vnitřek Slunce a hvězd můžeme alespoň částečně "vidět" pomocí zvukových vln. Ty proniknou hmotou hvězdy a tak díky nim můžeme zkoumat vnitřní strukturu a dynamiku Slunce. Poprvé zaznamenali zvukové kmity Slunce s charakteristickou periodou 5 minut Leighton et al.

<sup>3</sup>Převzato z kongresových novin Valného shromáždění IAU v Praze 2006 Nuncius Sidereus III. Překlad Michal Varady.

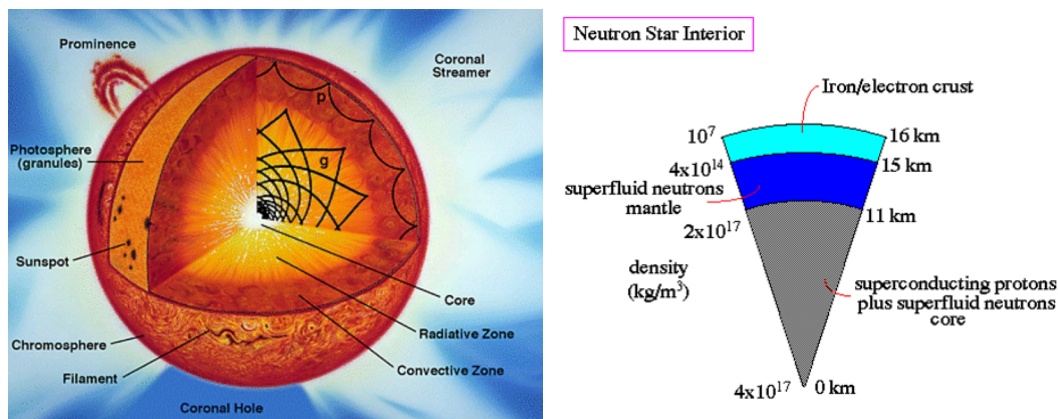


Obrázek 16.4: Změny jasnosti hvězd je možné interpretovat jako vibrace nebo oscilace v jejich nitru užitím techniky zvané asteroseismologie. Oscilace odhalují informace o vnitřní struktuře hvězd, víceméně stejným způsobem jako seismologové používají zemětřesení k poznávání nitra Země. Zdroj: Astroseismologický tým družice Kepler

(1962). Později se ukázalo, že frekvence pozorovaných oscilací závisí na různých vlastnostech slunečního nitra, na rychlosti zvuku, hustotě materiálu, úhlové rychlosti rotace a dalších. Se stále se zpřesňujícími přístroji pro pozorování hvězd zejména na družicích jako KEPLER, Corot, můžeme nyní tyto drobné oscilace registrovat nejen u Slunce, ale i u dalších hvězd. Obor studia má také širší název asteroseismologie.

Současné výsledky modelových výpočtů a našich pozorování ukazují, že hvězdné nitro vypadá rozdílně pro různé typy hvězd. Na obrázku 16.5 můžete porovnat stavbu hvězdy hlavní posloupnosti podobné Slunci se stavbou neutronové hvězdy. Ty však představují naprosto extrémní případ hvězdy. Podrobněji o nich budeme mluvit v následující kapitole. Obecně nalezneme ve středu každé hvězdy jádro. Pro většinu hvězd platí, že právě v něm se vyrábí energie, která je posléze vyzářena hvězdným povrchem. Teplota v jádru hvězdy dosahuje milionů až miliard kelvinů, což znamená, že vodík a helium jsou zcela ionizovány, a u těžších prvků je ionizace velmi silná. Spolu s vysokou hustotou (řádově  $10^4$  až  $10^9$   $\text{kg}/\text{m}^3$ ) to vede k tomu, že dochází k častým srážkám částic a hvězdná látka se pak chová jako ideální plyn. V některých fázích hvězdného vývoje se hustota látky ještě zvětší, elektronové skořápky atomů jsou narušeny, částice spolu začnou interagovat i v době mezi vzájemnými srážkami a začnou se uplatňovat efekty kvantové fyziky, látka degeneruje<sup>4</sup>. Nejvýznamnější interakcí se stanou kvantově mechanické efekty působící mezi nejllehčími fermiony – volnými elektrony. Uplatňuje se Pauliho vylučovací princip, který dvěma různým fermionům v soustavě zakazuje zaujmout stejný kvantový stav. Taková látka svými mechanickými, tepelnými a elektrickými vlastnostmi připomíná pozemské kovy, má vysokou hustotu, je obtížně stlačitelná, a je to dokonalý vodič elektřiny a tepla. Označujeme ji jako *elektronově degenerovaný plyn*. Setkáme se s ním celkem běžně v jádrech hvězd, která mají už svá nejlepší léta na hlavní posloupnosti za sebou,

<sup>4</sup>Latinsky *degenerare* znamená upadat, zvrtnout se, pozbývat dobrých vlastností.



Obrázek 16.5: Vlevo: Nitro hvězdy hlavní posloupnosti. Vpravo: Nitro neutronové hvězdy

v nitrech bílých, červených i hnědých trpaslíků a ve svrchních vrstvách neutronových hvězd.<sup>5</sup>

### 16.3.2 Atmosféra hvězdy

Na rozdíl od nitra hvězdy je vnější obálka hvězdy, její atmosféra, přístupná našemu pozorování. Nejlépe prostudovanou hvězdnou atmosférou je samozřejmě atmosféra našeho Slunce. Atmosféry ostatních hvězd můžeme studovat ze spektroskopických nebo fotometrických pozorování, případně pomocí modelů hvězdného větru. Nejvíce nám o sobě hvězda prozradí, pokud se její jasnost mění. Z pozorování samostatných hvězd, ale lépe z pozorování dvojhvězd lze určovat teplotu, hustotu, tlak a složení atmosfér, přítomnost magnetického pole, ale také horkých a chladných skvrn a další vlastnosti. Jak již bylo uvedeno v kapitole o spektroskopii, spodní husté a horké vrstvy atmosféry, zejména fotosféry, vytvářejí ve spektru tzv. kontinuum. Chladnější a řidší materiál nad touto vrstvou způsobí, že se ve spektru objeví temné absorpční čáry. Naopak teplejší útvary mají za následek přítomnost jasných emisních čar. Lze tedy studovat i průběh teplot v atmosféře hvězd. U Slunce máme navíc ještě metodu přímého odběru vzorků slunečního větru a jeho analýzy. Atmosféra Slunce je bezesporu nejlépe prostudovanou hvězdnou atmosférou.

Obecně rozlišujeme v atmosférách hvězd tři vrstvy. Nejnižší je uložena **fotosféra**, v níž vznikají fotony, které pozorujeme. Tam vzniká optické spektrum hvězdy a tam pokládáme povrch hvězdy. Fotosféry různých typů hvězd mají různou tloušťku i různou teplotu. Zatímco naše Slunce má fotosféru 135-200 km silnou, u obrů a veleobrů dosahuje až řádově poloměru Slunce a naopak pro bílé trpaslíky má řádově jen několik metrů. V ještě větším rozpětí se mění hustoty fotosféry. Pro bílého trpaslíka je to zhruba  $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , ale u Slunce už jen  $3 \cdot 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , což odpovídá hustotě zemské atmosféry ve výšce asi 60 km nad hladinou moře, a pro veleobry bychom museli ještě několik řádů

<sup>5</sup>Tlak elektronově degenerovaného plynu na rozdíl od ideálního plynu velmi silně závisí na koncentraci volných elektronů, tedy na hustotě a jen minimálně na teplotě  $p_{\text{eldeg}} \sim \rho^{5/3}$ .

ubrat. Teplota fotosféry směrem od středu hvězdy klesá. Pro Slunce jde o pokles necelých 3000 kelvinů na zhruba 200 km. Důkazem takového průběhu teploty je i pozorované okrajové ztemnění disku hvězd. Celá fotosféra hvězdy je ve stavu energetické rovnováhy. V ustáleném stavu musí projít touto vrstvou v každém okamžiku právě tolik tepla, kolik ho uvnitř koule pod fotosférou vznikne.

Fotosféra přechází v chromosféru, která je několikrát silnější. Teplotní spád se zde otáčí a teplota se vzrůstající vzdáleností od povrchu mírně roste. U Slunce jde o nárůst zhruba 20 000 kelvinů na 2000 km tloušťky vrstvy. Z toho ale vyplývá, že zde vznikají zejména emisní čáry spektra, zejména nejsilnějších Fraunhoferových čar (u hvězd spektrální třídy M).

Nejsvrchnější vrstvou hvězdné atmosféry je koróna. Její hustota je už velmi malá. Tloušťka koróny například u Slunce se udává až  $10^6$  km, ale není zde žádné hranice. Koróna v podstatě volně přechází do hvězdného větru v okolohvězdném prostoru. I zde podobně jako ve chromosféře je chod teploty obrácený a se vzrůstající vzdáleností od hvězdy roste. U Slunce dosahuje až jednoho milionu kelvinů, takže je zdrojem rentgenového záření hvězd. Nicméně její zářivý výkon je ve srovnání s fotosférou malý.

## 16.4 Proč hvězdy září?

Doposud jsme se stále zabývali otázkou, z čeho jsou hvězdy složeny, jaká je jejich stavba. Ale pomíjeli jsme zásadní otázku: "Proč vlastně hvězdy září?". Někdo možná začne spekulovat o tom, co se děje v nitru hvězd, ale odpověď na položenou otázku je velmi prostá. Lakonicky se dá říci, že *hvězdy září proto, že jsou žhavé!* Samozřejmě ruku v ruce s takovou odpovědí přichází další otázka: „A proč jsou žhavé.“ Teď už je zcela na místě zabývat se otázkou, co vlastně zahřívá hvězdy a zejména jejich nitro. Zdroj energie musí být tak vydatný, že hvězdu nejen vyhřeje na vysokou teplotu, ale tuto teplotu také udržuje po poměrnou dlouhou dobu navzdory tomu, že fotosférou odchází z hvězdy obrovské množství energie. Kdyby fotosféra nebyla tajně „sponzorována“ zevnitř hvězdy, brzy by se na ní výdej energie projevil, ale nic takového u hvězd nepozorujeme. Takže skrytý dárce energie musí být dost „bohatý“.

V minulosti byla předložena řada teorií vysvětlující zdroj energie hvězd. V antice se například Anaximandros domníval, že naše Slunce je dobřela rozhavený železný kotouč. To ale odpovídalo jen na otázku, co Slunce je, ale ne, kde vzalo svou energii. Až v polovině 19. století navrhli nezávisle přírodovědec Helmholtz (1854) s astronomem J. Herschelem jako zdroj energie hvězd chemické hoření. Astronom amatér J. Mayer (1846) se domníval, že Slunce je dotováno dopady meteoritů. A objevila se i hypotéza, že spotřeba energie hvězd je kryta jejich smršťováním, tedy na úkor potenciální energie. S touto myšlenkou přišli Helmholtz s lordem Kelvinem. Dá se velmi rychle ukázat, že bohužel ani jedna z představ není správná. Žádná z nich neposkytuje dostatek energie po dostatečně dlouhou dobu. Posledně uvedenou teorii gravitačního smršťování ale alespoň částečně můžeme omilostnit, protože v určitých fázích vývoje hvězdy se o přísun energie skutečně stará. Pátrání po zdroji energie tedy pokračovalo. Na počátku 20. století se objevil názor, že ve hvězdách dochází k rozpadu uranu  $^{235}\text{U}$ . Jenže v roce 1925 Paynová-Gaposchkinová prokázala, že hvězdy se skládají ze tří čtvrtin z vodíku a později se ukázalo, že zbývající čtvrtina připadá takřka celá na hélium. Uran je velmi



těžký prvek a ve Slunci i dalších hvězdách je ho žalostně málo. Nicméně právě Paynová-Gaposchkinová a její práce byla prvním krokem správným směrem. Eddington sice už po úspěšných pokusech Rutherforda v roce 1919, při nichž se podařilo uskutečnit první umělou přeměnu atomu, tušil, že zdrojem energie ve hvězdách by mohly být jaderné reakce. Nikoli štěpení těžkých prvků, ale naopak syntéza těch nejlehčích, tedy zejména vodíku. Jenže až Paynová-Gaposchkinová prokázala, že jaderného paliva – vodíku je ve hvězdách dostatek. Ve 30. letech minulého století už byla hypotéza jaderné syntézy v jádru hvězd všeobecně akceptována. Jak ale takový proces u hvězd jako Slunce a hmotnějších funguje popsali v letech 1937-9 Hans Bethe a Carl von Weizsäcker. K reakcím dochází jen v místě s opravdu vysokou teplotou, tedy v bezprostředním okolí středu hvězdy, v samém jádru. Pro Slunce tvoří oblast jaderného hoření jen zhruba jedno procento objemu.

Hlavním zdrojem energie hvězd je tedy jaderné hoření, ale spíš bychom měli asi říkat „jaderné doutnání“ v centrálních oblastech. Ale je-li relativně malý zdroj uložen hluboko v nitru hvězdy, znamená to, že se musí nějak dostávat na povrch - až do fotosféry. Z toho jednak vyplývá existence teplotního spádu s rostoucí vzdáleností od centra hvězdy a jednak stav energetické rovnováhy fotosféry, která musí zvládnout odvést veškerou dodanou energii do okolního prostoru. Jenže ten pohled lze i otočit, vrstvy hvězd pod fotosférou jsou vlastně dokonalými izolanty, které v samém středu ukrývají dokonale seřízený atomový reaktor. Po miliardy let se v něm mění podmínky jen nepatrně. Rychlost jaderných reakcí je silně závislá na teplotě. Když se například výkon reaktoru malinko zvýší, oblast hoření se rozepne a mírně ochladí, což vede ke snížení výkonu a návratu teploty na rovnovážnou hodnotu. Takto se uvnitř hvězd udržuje teplota s přesností na tisíce stupňů a to při teplotách řádově milióny až desítky miliónů kelvinů. O tak přesné regulaci si mohou nechat zdát všechny termoventily topení.

Na první pohled by se mohlo zdát, že jaderné reakce v nitru hvězd jsou vysoce účinnými zdroji energie, ale není to pravda. Účinnost reakcí v nitru hvězd při hoření vodíku je dokonce velmi malá. Běžná elektrická kamínka mají měrný výkon miliónkrát větší než je účinnost jaderných kamen v centru Slunce. Přesto se lidé snaží i tento typ jaderných reakcí ovládnout. Člověk zatím využívá štěpení těžších prvků na lehčí ať již nekontrolované v podobě jaderných výbuchů bomb nebo kontrolované v jaderných reaktorech elektráren. Ve hvězdách jde ale o syntézu lehčích jader atomů, při níž vznikají těžší atomy. Předpokládá se, že zvládnutí jaderné syntézy by mohlo vést k řešení energetických potřeb naší civilizace. A to je také jeden z důvodů, proč je dotován astronomický výzkum spolu s výzkumy jaderných fyziků, tedy dvě odvětví, která používají největší a nejdražší vědecké přístroje současnosti.

Dobrá, jak vypadají reakce v nitru hvězd snad víme. V čem je tedy problém? Proč není možné tyto reakce prostě napodobit? Odpověď je ale zřejmá. Podmínkou pro průběh jaderné syntézy je vysoká teplota a velký tlak, to znamená, že jádra prvků se pohybují velkými rychlostmi a protože je jich tam velké množství, prudce do sebe narážejí. Vysoká kinetická energie částic je nezbytná pro překonání elektrostatických sil, které jádra odpuzují. A vytvoření takových podmínek po delší dobu v nějakém zařízení na Zemi představuje opravdu problém. Zatím se daří na srovnatelné rychlosti urychlit jednotlivé částice nebo svazky částic, ale nikoli uzavřít tak horké plazma v malém objemu na dobu delší než zlomky sekundy. Pokud bychom i podobných jaderných re-

akcí jako v nitru hvězd dosáhli, je potřeba je jednak spolehlivě řídit a jednak izolovat od okolí a bránit tak rychlému vychladnutí. Zdá se, že vhodnou cestou pro napodobení podmínek v nitru hvězd je vysoce výkonný laser, urychlovač a magnetická past. Česká republika k tomuto výzkumu přispívá účastí na výzkumu v evropském středisku jaderného výzkumu v CERN ve Švýcarsku nebo v projektu HiPER ale i vybudováním dalšího evropského centra, který bude obsahovat nejvýkonnější laser světa ELI (Extreme Light Infrastructure) v Říčanech u Prahy.<sup>6</sup> Výsledky ELI se budou doplňovat s výsledky výzkumného laserového zařízení projektu HiPER (High Power Energy Research Facility) ve Velké Británii. Oba projekty mají zkoumat zcela novou technologii, která by měla být v budoucnu použita pro výrobu elektrické energie, tzv. termojadernou fúzi zažehovanou lasery. Laserové pulsy při tom stlačí palivo (deuterium a tritium) na extrémní hustotu a laser je pak ohřeje až na teplotu fúze zhruba 100 miliónů kelvinů. Jenže takové podmínky vydrží zatím jen po několik tisíc nanosekund.

## 16.5 Jaderné reakce v nitru hvězd

Jaderné hoření v samém srdci hvězdy má spíše charakter doutnání, jak jsme již uvedli. Navíc, kdybychom vzali, že například Slunce jako celek o hmotnosti  $2 \cdot 10^{30}$  kg produkuje zářivý výkon  $4 \cdot 10^{26}$  W, snadno zjistíme, že na jeden kilogram sluneční hmoty připadá výkon jen 0.0002 W! Přitom spálením jednoho kilogramu dřeva lze uvolnit přes 10 MJ energie. Teoreticky bychom tedy reakce v nitru Slunce mohli nahradit spalováním dostatečného množství nějakých věcí. Jenže tak jednoduché to zase není. Je tu ale přece jen zásadní rozdíl. Hvězdy umí své palivo spalovat po miliardy let! Každý kilogram Slunce tak vyprodukuje za dobu existence naší mateřské hvězdy odhadem 60 terajoulů energie. Zatím známe jen jediný proces, který je schopen produkovat energii tím nepřiliš výkonným a pomalým, ale stabilním a dlouhodobým způsobem. V nitru hvězd tak zřejmě probíhá jaderná fúze.

### 16.5.1 Proton-protonový řetězec (p-p řetězec)

Jaderná fúze v nitru hvězd znamená, že dochází ke slučování několika jader lehčích prvků na jádra těžších prvků. Přitom ale součet hmotností lehčích jader je větší než hmotnost těžšího jádra, které z nich vzniklo. Hmotnost se samozřejmě nikam neztratila, ale podle Einsteinova vztahu ekvivalence hmotnosti a energie  $E = mc^2$  se přemění na energii, která je při reakci uvolněna. Způsobů provedení jaderné fúze si příroda zvolila hned několik. Nejjednodušší je přeměna vodíku na hélium. Nedochozí k ní ale při jediné reakci. Jaderná fúze je výsledkem sledu reakcí, které probíhají každá různou rychlostí a s různou pravděpodobností podle částic, které do dané reakce vstupují.

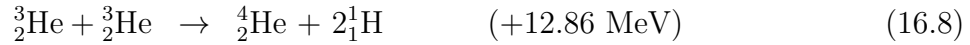
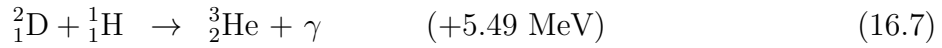
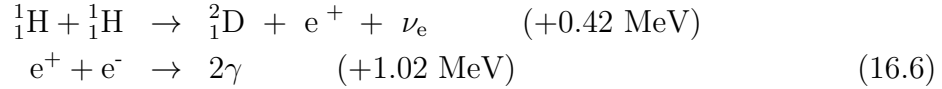
Pro hvězdy s hmotností do přibližně  $1.3 M_{\odot}$  až  $1.7 M_{\odot}$ <sup>7</sup> probíhá jaderná fúze v jejich nitru v podobě proton-protonové řetězce<sup>8</sup>, kdy se 4 protony (jádra vodíku) sloučí na

<sup>6</sup>Projekt ELI má být spuštěn v roce 2014. Detaily na <http://www.eli-beams.eu/cs/>.

<sup>7</sup>Neurčitost vyplývá z odlišných výpočtu modelů popisujících nitro hvězd.

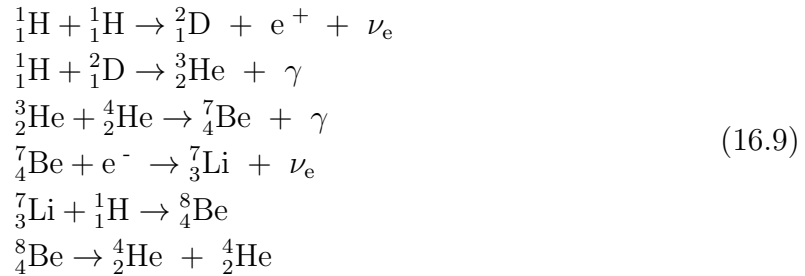
<sup>8</sup>Poprvé se myšlenka jaderné syntézy v nejjednodušší podobě objevila v pracích Eddingtona (1920, 1926). Jeho odpůrci namítali, že hvězdy nejsou dost horké na to, aby částice překonaly Coulombovské bariéry a mohlo k syntéze dojít. Teprve po rozvinutí kvantové fyziky se ukázalo, že díky tunelovému

2 protony a 2 neutrony a vytvoří jedno jádro hélia a uvolní přitom energii v podobě fotonu, pozitronu a neutrína. Reakce ale probíhá ve třech krocích:



Pozitron vzešlý z první reakce ale okamžitě anihiluje s elektronem (viz 16.6) a vzniknou dva vysoce energetické fotony gama záření. Neutrino s hmotou nereaguje a bez obtíží unikne z místa vzniku do kosmického prostoru. První reakce je velmi pomalá, má malou pravděpodobnost. Dvě vodíková jádra čekají zhruba jednu miliardu let, než dojde k jejich fúzi. Druhá reakce, sloučení protonu s deuteriem, je naproti tomu velmi rychlá, běžně postačí jedna sekunda. Třetí reakce například v podobě uvedené výše potřebuje k realizaci přibližně milion let. Nicméně možností jak z izotopu hélia  ${}^3\text{He}$  získat hélium  ${}^4\text{He}$  je více. V každém případě tato reakce musí pro vznik jednoho héliového jádra proběhnout dvakrát.

V centru našeho Slunce takto probíhají přibližně dvě třetiny reakcí, další třetina probíhá trochu složitějším způsobem.

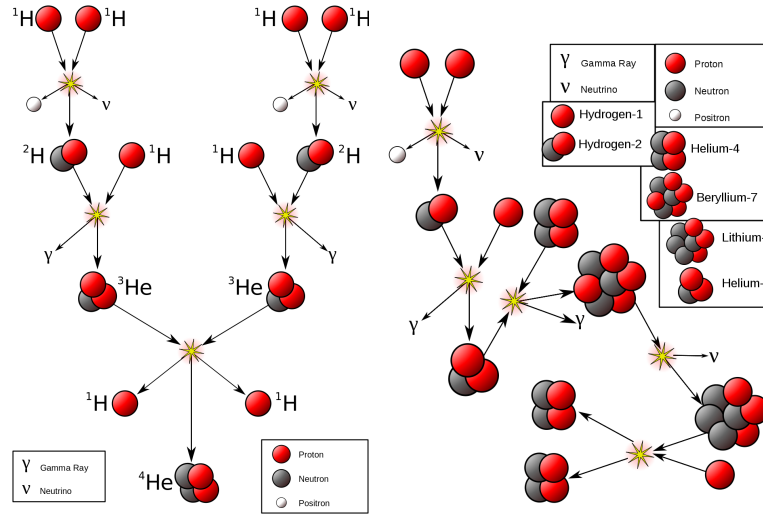


Celková energie uvolněná při proton-protonovém řetězci je závislá na hustotě materiálu a jeho teplotě, přesněji mocnině teploty. Zpravidla se udává  $E \sim \rho T^4$ , ale exponent někdy může dosáhnout až 5 nebo 6. Jeho skutečná hodnota závisí na teplotě. Podle modelových výpočtů je účinnost proton-protonového řetězce nejvyšší při teplotě pod  $20 \cdot 10^6$  K. Ještě citlivější na teplotu je uhlíkový cyklus. Nicméně proton-protonový cyklus se vyskytuje v nitru hvězd s hmotností do  $1.3\text{--}1.7 M_\odot$  a to je naprostá většina hvězd.

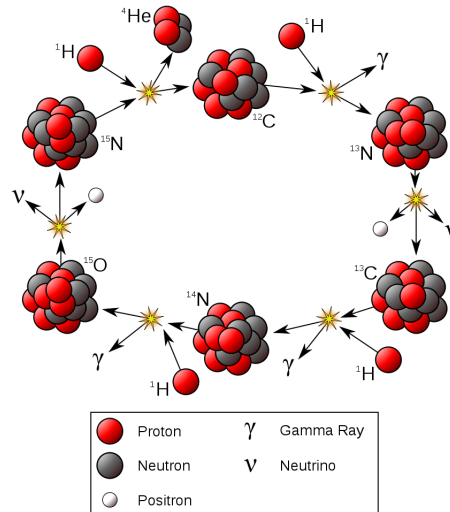
### 16.5.2 CNO (uhlíkový) cyklus

Nadprůměrné hvězdy, větší než naše Slunce, mají k dispozici nejen proton-protonový řetězec. Od vodíku k héliu vede i jiná cesta, tentokrát s pomocí katalyzátorů uhlíku, dusíku a kyslíku, tzv. uhlíkový nebo také CNO cyklus. Jeho průběh popsali von Weizsäcker (1937, 1938) a Bethe (1939), jen několik let po objevu neutronu. Zatímco pro rozběhnutí proton-protonového řetězce stačí teplota zhruba čtyř milionů kelvinů, CNO cyklus se může spustit při 15 miliónech kelvinů. Produkce energie i zde závisí na hustotě a mocnině

jevu je podobná námitka neopodstatněná. Přesný průběh reakcí popsali Atkinson s Houtermansem (1929).



Obrázek 16.6: Proton-protonový řetězec. Základní varianta je zobrazena vlevo. Zdroj: wikipedia.

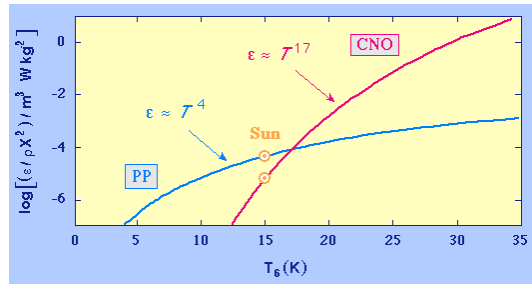
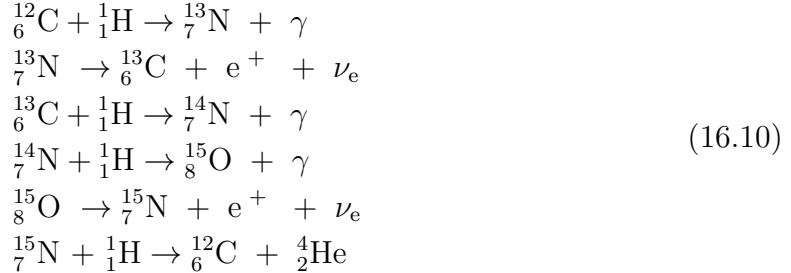


Obrázek 16.7: CNO cyklus. Zdroj: wikipedia.

teploty, ale teplotní závislost je mnohem prudší  $E \sim \rho T^{18}$ , přičemž exponent se u teploty může měnit dle teploty a použitého modelu od 15 do 18. Z toho vyplývá, že už při teplotě  $17 \cdot 10^6$  K se CNO cyklus stává majoritním zdrojem energie hvězdy. Naše Slunce má teplotu jádra něco málo přes 15 milionů kelvinů. CNO cyklus v něm tedy může probíhat, ale dle modelů jen necelá dvě procenta slunečních jader hélia je výsledkem CNO cyklu. V průběhu pobytu hvězdy na hlavní posloupnosti se její centrální teplota zvolna zvyšuje a s tím roste i podíl CNO cyklu na produkci energie hvězdy. U hvězd spektrální třídy  $F$  se například proton-protonový řetězec a CNO cyklus podílejí na celkové produkci energie hvězdy zhruba stejným dílem.

Podobně jako u proton-protonového řetězce vedou k cíli různé cesty, zde navíc

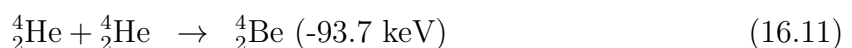
s použitím různých katalyzátorů, i zde ale jednoduše řečeno se přemění čtyři protony na jedno jádro hélia.

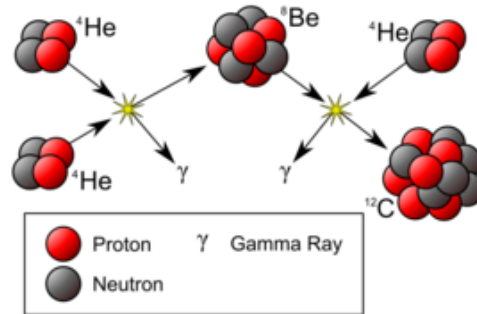


Obrázek 16.8: PP řetězec a CNO cyklus. Míra produkce energie pro PP řetězec a CNO cyklus jako funkce teploty v jednotkách miliónů kelvinů. Zdroj: Dept. Physics & Astronomy, University of Tennessee

### 16.5.3 $3\alpha$ proces

Hvězdy během svého pobytu na hlavní posloupnosti spalují vodík a vzniká hélium. Pokud jsou dostatečně hmotné, dosáhne za jistých okolností centrální teplota po opuštění hlavní posloupnosti řádově až 100 miliónů kelvinů. Pak je možné zapálení dalšího typu jaderných reakcí v nitru. Spustí se  $3\alpha$  reakce, někdy také označovaná Salpeterův proces. Při něm vzniká ze tří héliových jader ( $\alpha$  částic) atom uhlíku a gama záření. Za teploty  $10^8 \text{ K}$  mají héliová jádra dostatečnou energii, aby překonala Coulombovskou bariéru. Dvě  $\alpha$  částice se spojí a s přispěním malého množství energie utvoří jádro berylia. Jde tedy o endogenní reakci, kterou je třeba energeticky dotovat. Nicméně jádro berylia je nestabilní a během zlomku sekundy se opět rozpadá. Reakce, která ale vede ke vzniku beryliových jader je dostatečně rychlá, aby v nitru hvězdy bylo vždy dostatek berylia a Salpeterův proces mohl pokračovat spojením jádra berylia s dalším jádrem hélia. Vzniká stabilní atom uhlíku a uvolní se i kvantum  $\gamma$  záření. Jako vedlejší efekt může docházet i k další reakci, při níž z atomů uhlíku a hélia vzniká stabilní izotop kyslíku a uvolní se  $\gamma$  záření. Pokud jsou v nitru hvězdy příhodné podmínky, tedy zejména, pokud je hvězda na počátku dostatečně hmotná, pokračuje řetězec jaderných  $\alpha$  reakcí dále až po nikl a železo.





Obrázek 16.9:  $3\alpha$  cyklus. Zdroj: wikipedia.

$3\alpha$  proces je velice nepravděpodobný. Ale uhlík ve vesmíru je, je tu život na bázi uhlíku a víme, že uhlík nemohl vzniknout při Velkém třesku. Jenže situace není tak beznadějná. Základní stav berylia má skoro přesně stejnou energii jako dvě héliová jádra a podobně i součet energie berylia a třetí alfa částice se takřka shoduje s energií uhlíku. A právě tato rezonance významně zvyšuje pravděpodobnost Salpeterova procesu. Celková energie uvolněná při  $3\alpha$  reakcích (16.11,16.12) je 7.275 MeV. Spalování hélia ale neprobíhá tak poklidně jako předcházející syntéza vodíku. Pro hvězdy o hmotnosti přibližně  $2.25 M_{\odot}$  dojde po spálení vodíku v jádru k elektronové degeneraci materiálu jádra. Zapálení Salpeterova procesu pak vede k okamžitému sejmutí degenerace a spálení většiny (60 až 80 %) hélia během několika sekund. U hvězdy dojde k tak zvanému héliovému záblesku. Obecně se tedy Salpeterovy reakce spouští při teplotách řádově stovky miliónů kelvinů a vyprodukované množství energie je úměrné  $\sim 10^{30}$  J.

Historie objevu  $3\alpha$  reakcí odpovídá tak trochu překotnosti jejich průběhu. Syntézu uhlíku ze tří jader hélia popsali Öpik (1951) a Salpeter (1952, 2002). Teprve Hoyle (1954) ale našel způsob, jak mohou takové reakce probíhat za dostatečně krátkou dobu. Objevil přitom zvláštní excitovaný stav jádra uhlíku, který Fowler<sup>9</sup> s kolegy experimentálně prokázal (Cook et al., 1957). Pak už se podařilo kolektivu z Kellogg Radiation Laboratory (Kalifornský technologický institut) poměrně rychle odhalit celou síť jaderných reakcí, kterými se v nitru hvězd syntetizují všechny prvky až po železo (Burbidgeovi, Fowler a Hoyle, 1957). Jedna nejasnost v procesech jaderné syntézy ale přetrvala až do 21. století. Teprve nedávno se podařilo skupině německých fyziků Epelbaum et al. (2011) Hoyleův stav jádra atomu uhlíku popsat matematicky. Výpočet na superpočítači trval týden, ale výsledky výpočtu jsou ve skvělé shodě s experimenty.

## 16.6 Přenos tepla

V předchozí kapitole jsme popsali reakce probíhající v samém nitru hvězd. Tyto reakce jaderné syntézy jsou hlavním zdrojem energie hvězdy. Rozhodujícím parametrem pro jejich „nasazení“ je teplota. Ta také výrazně ovlivňuje energetickou výtěžnost spuštěných

<sup>9</sup>Jedná se amerického astrofyzika Williama Alfreda „Willy“ Fowlera, nositele Nobelovy ceny za fyziku v roce 1983. Nezaměňovat s britským astronomem Alfredem Fowlerem.

reakcí, což znamená, že se tyto reakce budou spouštět a odehrávat jen v místech s nejvyšší teplotou a tedy zejména v centrálních oblastech. Vyrobenou energii je ale nutné přenést z nitra hvězdy na povrch a odeslat do kosmického prostoru, což nutně vede ke vzniku teplotního spádu uvnitř hvězdy. Přenos energie ve hvězdě je realizován v podstatě čtyřmi způsoby.

- zářením,
- prouděním,
- vedením,
- zářením neutrin.

### 16.6.1 Přenos energie zářením (zářivou difúzí)

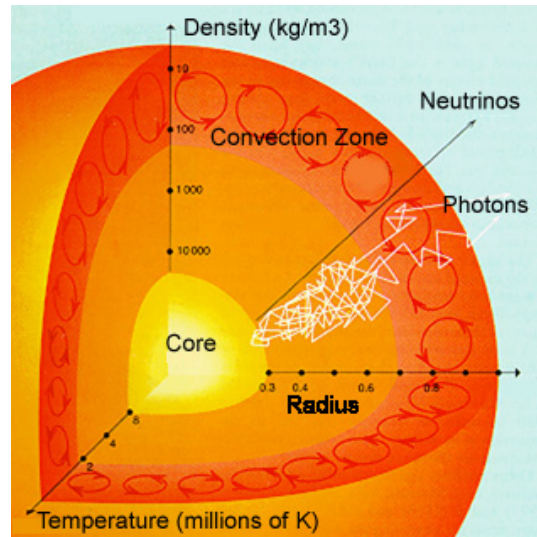
Při jaderných reakcích v nitru hvězd vznikají fotony  $\gamma$  záření. Ty odnášejí energii z centra hvězdy. Přenos energie probíhá zářením neboli zářivou difúzí. Jenže, kdo by očekával, že takový foton prostě nabere správný směr a při rychlosti světla zanedlouho opustí hvězdu a vydá se do kosmického prostoru, ten by se šeredně spálil. Zářivá difúze takto funguje se stoprocentní účinností jen v prázdém kosmickém prostoru. Nitro hvězd ale prázdé není. Fotonům v cestě brání materiál hvězdy a tak je jeho střední volná dráha řádově jen velmi krátká, ve Slunci řádově jen několik milimetrů. Foton je zachycen elektronem, ale vzápětí opět vyzářen, ale už nikoli v původním směru. Fotony tak vykonávají značně neuspořádaný pohyb (viz obr. 16.10). Přesto ale směr ven z hvězdy převládá, například v polovině vzdálenosti od středu Slunce k povrchu připadá na  $4 \cdot 10^{10}$  částic pohybujících se směrem k centru  $4 \cdot 10^{10} + 1$  částic směřujících ven z hvězdy (viz obr. 16.11). Přitom na vzdálenosti odpovídající střední volné dráze fotonu v této vzdálenosti od středu Slunce je teplotní gradient 0.000 03 K. Blíže k centru, v teplejších oblastech je vždy fotonů více a mají vyšší energii. Na povrch hvězdy nebo do oblastí, kde se začne uplatňovat přenos energie konvekcí se tak dostává méně fotonů a ty už navíc nejsou vysokoenergetické. Maximum vyzařované energie se přesunulo z oblasti  $\gamma$  záření do vizuální oblasti spektra. Celý proces přenosu energie zářivou difúzí je ale velmi pomalý.

### 16.6.2 Konvekce

Ve většině běžných hvězd je energie z nitra přenášena zářivou difúzí. Někdy je ale produkce energie ve hvězdě příliš velká nebo probíhá ve velmi malém objemu, takže fotony nestačí vyrobenou energii odvádět pryč. Materiál hvězdy se pak nahřeje a začne "vřít", začne se chovat jako vroucí voda, v níž směrem vzhůru se pohybuje horký, ohřátý materiál, na hladině se ochladí a pak klesá směrem dolů. Konvekce<sup>10</sup> ve hvězdě vypadá obdobně. Konvekce je poměrně efektivní způsob přenosu energie, protože se děje v přímém směru. Proudý teplého plazmatu stoupají vzhůru k fotosféře hvězdy a po ochlazení vyzářením opět klesají dolů, směrem ke středu hvězdy.

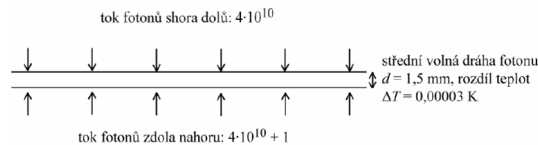
Ke vzniku konvekce v nitru hvězdy je zapotřebí splnění určitých podmínek. Prouděním se bude přenášet energie z nitra hvězdy na povrch, pokud je materiál hvězdy příliš

<sup>10</sup>Slovo „konvekce“ je odvozeno z latinského *convehere*, což znamená dovážet, svážet, *convectio* pak znamená přívod.



Obrázek 16.10: Přenos energie zářením.

příklad: nitro Slunce, vzdálenost  $r = 0,5 R_{\odot}$ , teplota  $T = 3,5 \cdot 10^6$  K



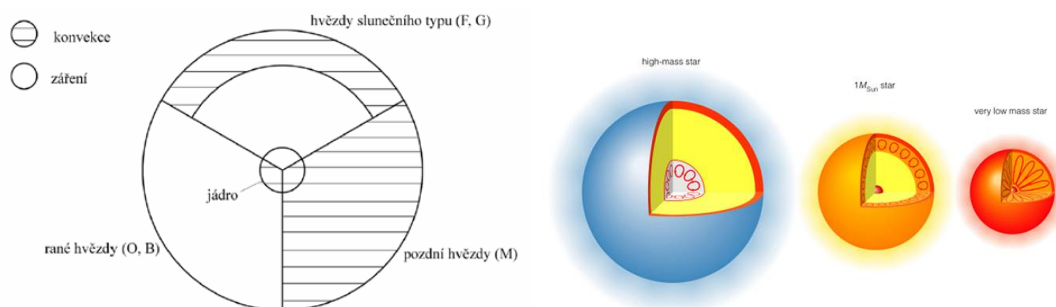
Obrázek 16.11: Přenos energie zářením.

neprůhledný, má vysokou opacitu. To platí vesměs pro hvězdy s hmotností pod  $1,5 M_{\odot}$ . Díky konvekci je u těchto menších hvězd zajištěna i dodávka čerstvého materiálu do místa jaderného hoření. Konvekce důkladně promíchává celou hvězdu. Je-li ve větší hvězdě zdroj energie ve velmi malém objemu, nestačí malý povrch odvádět vyrobené teplo, směrem od toho energetického centra vzniká prudký teplotní spád, který vede ke spuštění konvekce. Hloubka konvektivní vrstvy pod fotosférou přitom závisí na hmotnosti hvězdy. Čím je hvězda méně hmotná, tím je konvektivní vrstva silnější (viz obrázek 16.12). U Slunce je konvektivní vrstva silná asi 200 000 kilometrů, takže je konvekci ovlivněno asi 70 % hmoty. Vrcholky výstupných konvektivních proudů můžeme dokonce pozorovat ve sluneční fotosféře v podobě granulace.

### 16.6.3 Přenos tepla vedením

Vedení neboli kondukcce je způsob, jakým se přenáší teplo zejména v kovech. U většiny hvězd se s kondukcí nesetkáme. Důvod je jednoduchý. Materiál běžných hvězd se chová přibližně jako ideální plyn a má dobré tepelně–izolační vlastnosti. Během vývoje hvězd ale dochází k situacím, že je materiál velmi silně stlačen a dochází k jeho degeneraci. Bílí trpaslíci, neutronové hvězdy nebo jádra velmi hmotných hvězd se pak chovají jako kovy s volnými elektrony, které pak mohou teplo přenášet. Materiál hvězd se tak stane velmi dobrým vodičem tepla. Jenže k takovým situacím dochází až na konci hvězdného





Obrázek 16.12: Přenos energie konvekcí.

vývoje, kdy hvězda nemá jaderný zdroj energie a nedochází ani k jejímu smršťování. Veškeré výdaje energie hvězdy jsou hrazeny ze zásob. Jinak řečeno, hvězda velmi zvolna chladne. U bílého trpaslíka může takový proces chladnutí trvat až desítky miliard let. Důvod je zřejmý – relativně velmi malý povrch.

#### 16.6.4 Proud neutrin

Zpravidla se udávají tři způsoby přenosu energie ve hvězdách. Často se totiž zapomíná na proud neutrin. Neutrina proudí i z našeho Slunce, ale jejich role z hlediska přenosu energie nabývá na významu zejména v pozdních stádiích života velmi hmotných hvězd, kdy je třeba přenést více energie než je možné pomocí fotonů nebo konvekcí. Tehdy je do prostoru mimo hvězdu přeneseno velké množství energie právě prostřednictvím záření neutrin. Takový přenos energie představuje dominantní metodu ochlazování masivních hvězd v pokročilých stádiích jaderného hoření a klíčovou roli hraje například při výbuchu supernovy.

## Použitá a doplňující literatura

- Atkinson, R. D. E., & Houtermans, F. G. 1929, Zeitschrift fur Physik, 54, 656  
 Bethe, H. A. 1939, Physical Review, 55, 434-456  
 Cook, C. W., Fowler, W. A., Lauritsen, C. C., & Lauritsen, T. 1957, Physical Review, 107, 508  
 Burbidge, E. M., Burbidge, G. R., Fowler, W. A., & Hoyle, F. 1957, Reviews of Modern Physics, 29, 547  
 Eddington, A. S. 1920, The Observatory, Vol. 43, p. 341-358  
 Eddington, A. S. 1926, The Internal Constitution of the Stars, Cambridge: Cambridge University Press, 1926. ISBN 9780521337083  
 Epelbaum, E., Krebs, H., Lee, D., Meißner, U.-G. 2011, Phys. Rev. Lett. 106, 192501  
 Hoyle, F. 1954, ApJ Suppl., 1, 121  
 Leighton, R. B., Noyes, R. W., & Simon, G. W. 1962, ApJ, 135, 474  
 Mikulášek, Z., Krtička, J. 2005, Základy fyziky hvězd, učební text  
 Öpik E. J. 1951. Proc. R. Irish Acad. A 54,49  
 Salpeter, E. E. 1952, ApJ 115, 326

Salpeter, E. E. 2002, ARA&A 40, 1

von Weizsäcker, C. F. 1937, Physikalische Zeitschrift 38, 176-191

von Weizsäcker, C. F. 1938, Physikalische Zeitschrift 39, 633-646

## 17 Slunce jako vzorová hvězda

Slunce je k nám nejbližší hvězda. Můžeme říci, že je také zřejmě nejpodrobněji a nejlépe prozkoumanou hvězdou. Z toho často pramení snaha porovnávat ostatní hvězdy se Sluncem. Poloměry hvězd vyjadřujeme v poloměrech Slunce ( $1 R_{\odot} = 696\,000$  km, hmotnosti ve hmotnostech Slunce ( $1 M_{\odot} = 1,9891 \cdot 10^{30}$  kg, zářivý výkon v zářivých výkonech Slunce ( $1 L_{\odot} = 3,839 \cdot 10^{26}$  W). Až potud je vše v pořádku. Někteří autoři ale na tomto místě sklouznou k tvrzení, že Slunce je zcela obyčejná, tuctová, průměrná hvězda. Ale tak to rozhodně není! Jak jsme už dříve uvedli, že Slunce je hvězdou neobyčejnou, vždyť jí vděčíme za naši existenci, a také nadprůměrnou, pokud ji srovnáváme s běžnou hvězdou naší Galaxie. Pojdme si nyní naše Slunce prohlédnout trochu důkladněji.

### 17.1 Chemické složení Slunce

Slunce patří mezi hvězdy hlavní posloupnosti. Vypovídá nám o tom spektrální klasifikace G2V, z níž se ale také dozvíme, že povrchová teplota je přibližně 5000 až 6000 kelvinů a ve spektru jsou patrné slabé čáry vodíku, ale také velmi silné čáry H a K ionizovaného vápníku<sup>1</sup> CaII a kovů, zejména železa a neutrálních kovů. Jenže, jak víme z předchozího povídání o spektroskopii a dálkovém průzkumu hvězd, poskytuje nám spektrum informaci jen o složení povrchových vrstev hvězdy, přesněji tzv. fotosféry, odkud je z hvězdy uvolňováno záření. Skutečné složení hvězdy je ale jiné! Ukazuje se, že naprostá většina hvězd je namíchána ze dvou prvků – ze tří čtvrtin vodíku a jedné čtvrtiny hélia a to vše okořeněné špetkou těžších prvků. Konkrétně pro Slunce publikovali Grevesse et al. (2010) nové složení Slunce na základě 3D hydrodynamického modelu. Z něj vyplývá, že 73,8 % hmotnosti Slunce připadá na vodík, 24,85 % na hélium a jen 1,34 % na těžší prvky (zejména kyslík, uhlík, železo, neon, dusík, křemík a další). Poměrné zastoupení jednotlivých prvků ve hvězdách označujeme jako abundance. Může se uvádět jako početní zastoupení, tedy v logaritmech počtu atomů vztahených vůči takovému množství látky, v němž je obsaženo právě  $10^{12}$  atomů vodíku, případně v  $10^{12}$  kg vodíku a pak mluvíme hmotnostním zastoupením. Stručně se zapisuje tak, že abundance vodíku se označí jako X, hélia Y a abundance těžších prvků Z.<sup>2</sup> Abundance těžších prvků se navíc označuje jako tzv. metalicita. Pro Slunce tedy máme  $X = 0,7380$ ,  $Y = 0,2485$  a metalicitu  $Z = 0,0134$  (Grevesse et al., 2010). Metalicita Slunce se běžně po léta udávala 2 %, jak ale vidíme dle posledních modelů je nižší,  $Z=0,0134$ .

Pro lepší představu si můžeme přepočítat složení Slunce na počty atomů. Potom na 1 000 atomů vodíku v povrchových vrstvách Slunce připadá jen 85 atomů hélia, 1,2 atomu lehčích prvků, tj. kyslíku, uhlíku, dusíku nebo neonu, 0,14 atomu těžších prvků. V centrálních oblastech, v jádru Slunce je ale složení jiné. Zhruba polovinu vodíku už strávily jaderné reakce v nitru a přeměnily jej na hélium. Na hmotnosti jádra Slunce se tak dle našich předpokladů podílí vodík 35 procenty. Naopak hélia je 63 % a jen přibližně 2 % prvků jako uhlík, dusík, kyslík a další.

<sup>1</sup>Pozor na záměnu. V tomto místě se jedná o čáry ionizovaného vápníku označené písmeny H a K. Nejde o označení prvků vodíku a draslíku!

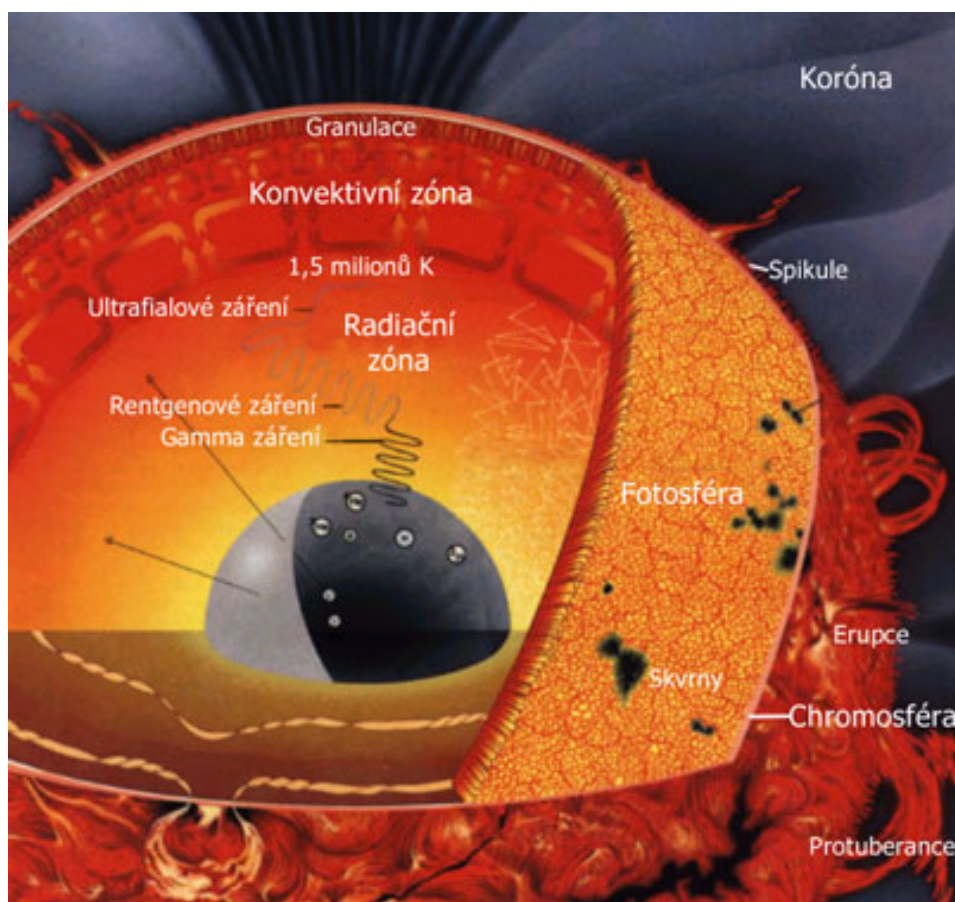
<sup>2</sup>Samozřejmě vždy  $X + Y + Z = 1$ .

## 17.2 Model Slunce

Už jsme se zmínili, že chemické složení celého Slunce vychází z vypočtených modelů. Modely umožňují nejen stanovit chemické složení, ale také stavbu Slunce a fyzikální podmínky v jeho nitru. Vzhledem k tomu, že je Slunce k Zemi nejbližší hvězdou, lze některé výsledky slunečního modelu relativně snadno (rozhodně snáze než pro ostatní hvězdy) ověřit pomocí pozorování – fotometrických, spektroskopických, ale také třeba pomocí lapačů neutrin v podzemí.

Podle našich současných představ lze sluneční nitro rozdělit do čtyř částí:

1. jádro,
2. zářivá vrstva (vrstva v zářivé rovnováze),
3. tachoklina,
4. konvektivní vrstva.



Obrázek 17.1: Sluneční nitro. Zdroj: Vik Dhillon.

Veškerá energie Slunce je generována v jádře, které sahá až do vzdálenosti zhruba jedné čtvrtiny poloměru Slunce. Tato energie pak prostupuje dalšími vrstvami až k povrchu Slunce (sluneční fotosféře), přičemž míra propustnosti těchto vrstev velmi úzce souvisí s výkonem jádra. Z jádra odchází fotony vysoce energetického záření (gama

a rentgenové), které jsou po cestě k povrchu pohlcovány a znovu vyzařovány až jsou nakonec vyzařeny ze sluneční fotosféry jako fotony viditelného světla.

Slunce je hvězdou hlavní posloupnosti, takže v jeho jádru dochází k jaderné přeměně vodíku na hélium za teploty přibližně 15 milionů kelvinů (viz obrázek 17.2a). Hustota materiálu jádra je podle našich představ  $150 \text{ g/cm}^3$ , řádově desetkrát větší než hustota zlata nebo olova (viz obrázek 17.2b). Obě veličiny – tlak i teplota směrem od centra klesají. Ve vzdálenosti 175 000 km od středu klesne teplota na polovinu a hustota na desetinu centrální hodnoty. Jaderné reakce zde zcela ustávají.

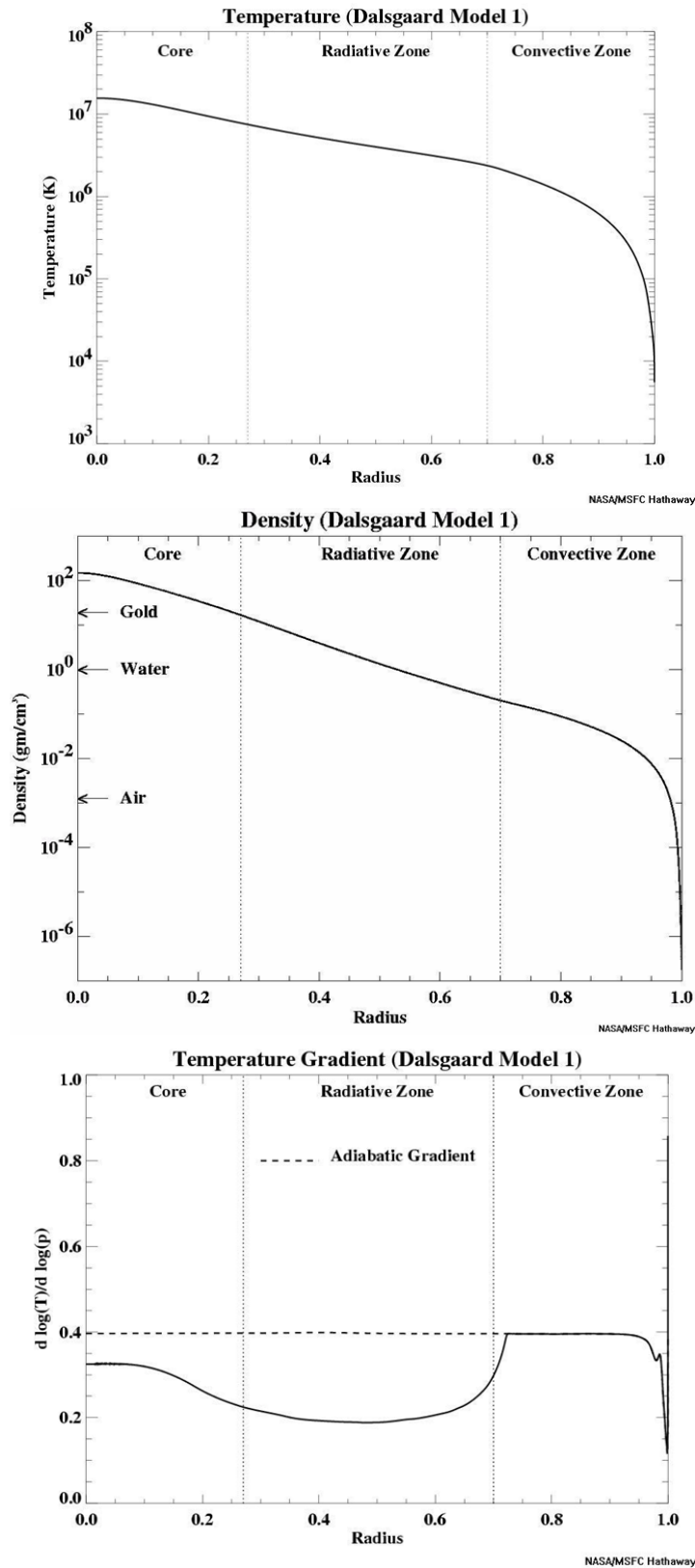
Zatímco o vrstvách nad jádrem nám informace přináší zvukové vlny procházející Sluncem a tedy helioseismologie, o nitru Slunce nám informace zprostředkují neutrina, která vznikají při jaderných reakcích. O jejich detekci jsme hovořili v kapitole 11.6.2. Jenže počet zachycených slunečních neutrin byl dlouhodobě menší (jen asi jedna třetina), než by odpovídalo našim modelovým představám. Problém chybějících slunečních neutrin byl jednou z největších záhad astrofyziky konce minulého století. Dnes už víme, že vysvětlení spočívá v odhalení existence více forem neutrin, které se navíc mění i během jejich letu od Slunce k Zemi. A protože starší detektory dokázaly místo tří detekovat jen jeden typ neutrin, byla anomálie na světě.

Nad jádrem, zhruba v rozmezí  $0.25 R_{\odot}$  -  $0.7 R_{\odot}$  se v nitru Slunce nachází vrstva v zářivé rovnováze, kde se energie z nitra přenáší zářením, resp. zářivou difúzí. Fotony ve vakuu cestují rychlostí světla, v materiálu o hustotě srovnatelné s hustotou zlata ( $19320 \text{ kg/m}^3$ ) se však velmi často sráží s částicemi látky, jsou pohlcovány a znovu vyzařovány. I když svrchní část vrstvy v zářivé rovnováze má hustotu už jen  $200 \text{ kg/m}^3$  fotonů zabere průchod celou vrstvou řádově miliony let. Jak se fotony vzdalují od centra Slunce, zmenšuje se nejen hustota prostředí, v němž se pohybují, ale také jeho teplota. Zatímco u jádra má vrstva v zářivé rovnováze teplotu kolem 7 milionů kelvinů, na opačné straně už jen dva miliony kelvinů (viz obrázek 17.2a).

Podpovrchové vrstvy Slunce jsou promíchávány konvekcí, ale než se foton z nitra dostane do konvektivní oblasti, musí projít přes tenkou přechodovou vrstvu, tzv. tachoklinu<sup>3</sup>. Její význam pro děje v posledních letech roste s tím, jak jsou odhalovány její vlastnosti. Nyní se například předpokládá, že právě v této vrstvě je magnetickým dynamem generováno magnetické pole Slunce.

Vnější vrstvou slunečního nitra je konvektivní obálka nad tachoklinou o tloušťce zhruba 200 000 km. Dno konvektivní vrstvy má teplotu  $2 \cdot 10^6 \text{ K}$ , což je sice z pohledu běžného člověka velmi vysoká teplota, ale pro těžké ionty je dost nízká na to, aby si ionty uhlíku, dusíku, kyslíku, vápníku nebo železa udržely alespoň část svých elektronů. V důsledku toho se zvýší opacita materiálu. Záření už nemůže tak snadno procházet méně průhlednou látkou a „rozpohybuje“ materiál Slunce, který zde začne doslova vřít a pohybovat se směrem vzhůru k povrchu a přenášet tak energii. Jak materiál stoupá k povrchu, rozpíná se a ochlazuje. Na viditelném povrchu Slunce už má hustotu jen  $0.2 \text{ g/m}^3$  (tedy zhruba jednu desetitisícinu hustoty vzduchu na mořské hladině) a teplotu 5700 K. Samotný konvektivní pohyb je už pozorovatelný přímo na povrchu Slunce v podobě tzv. granulace (viz následující kapitola).

<sup>3</sup>Termín „tachocline“ v angličtině zavedli Spiegel & Zahn (1992).



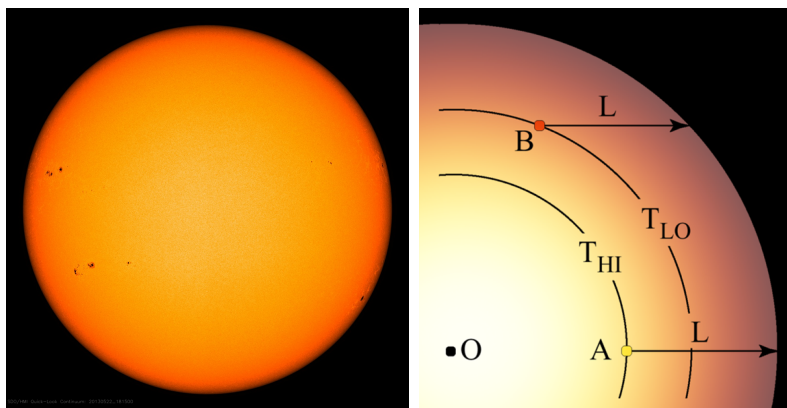
Obrázek 17.2: Výsledky modelových výpočtů slunečního nitra dle Christensen-Dalsgaard et al. (1996). Zdroj: NASA.

## 17.3 Sluneční atmosféra a projevy aktivity Slunce

Na rozdíl od slunečního nitra je atmosféra Slunce přímo pozorovatelná. Díky družicím a moderní technice můžeme děje ve sluneční atmosféře a projevy aktivity Slunce sledovat v nepřetržitém přímém přenosu. Je tedy zřejmé, že nejlépe prostudovanou hvězdnou atmosférou je atmosféra Slunce.

Celou sluneční atmosféru můžeme rozdělit na čtyři oblasti – fotosféru, chromosféru, korónu a heliosféru. Dno sluneční atmosféry tvoří fotosféra, vrstva, kde vzniká většina záření přicházejícího ze Slunce. Vzhledem k tomu, že je tato vrstva ve srovnání s poloměrem Slunce velmi tenká (řádově jen stovky kilometrů), má pozorovatel ze Země dojem, že Slunce má pevný povrch. Tak tomu ale není, Slunce je přece v podstatě plynná koule. Navíc, záření různé vlnové délky vzniká v různé výšce v atmosféře Slunce, takže tloušťka fotosféry závisí také na tom, zda se jedná o fotosféru vizuálního záření, infračerveného záření atp. Proto také můžeme nalézt pro tloušťku fotosféry odlišné údaje v literatuře až do zhruba 1000 km. Spodní hranice pro tloušťku fotosféry ve vizuální oblasti spektra je dána tím, že ze Země vidíme dalekohledy ostrý okraj Slunce a to odpovídá síle vrstvy přibližně 130 km.

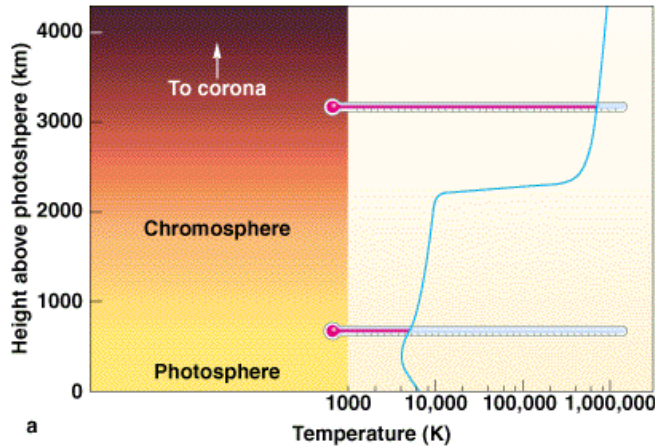
Teplota ve sluneční fotosféře zvolna klesá od 9000 K do 4400 K ve výšce kolem 500 km (viz obrázek 17.4). Důsledkem takového průběhu teploty ve fotosféře je jev označovaný jako *okrajové ztemnění*. Na slunečním disku je zřetelně vidět, že okraje jsou tmavší než střed disku (viz např. obrázek 17.3 vlevo). Vysvětlení jevu je zřejmé z obrázku 17.3. Na okrajích disku se totiž díváme do oblastí s nižší teplotou, které tak pro nás budou tmavší. Při pohledu do středu disku se ve stejné hloubce (kam dohlédneme) nacházejí teplejší oblasti, z nichž k nám jde větší množství vyzařované energie. Střed disku tedy září více než okraje a bude se jevit světlejší.



Obrázek 17.3: Vlevo: Fotografie Slunce. Vpravo: Schéma vzniku okrajového ztemnění.  $T_{LO}$  nižší teplota,  $T_{HI}$  vyšší teplota. Zdroj: NASA.

Fotosféra má na svém vrcholu teplotu kolem čtyř a půl tisíce kelvinů. Člověk by očekával, že bude i nadále klesat, ale opak je pravdou. V následujících dvou vrstvách sluneční atmosféry se chod teploty obrací a v chromosféře roste až na přibližně 10000 K ve výšce kolem 2000 km. Pozorujeme-li chromosféru za okrajem slunečního kotouče, projevuje se charakteristickými emisními čarami, na pozadí disku jde naopak o temné

čáry ve slunečním spektru. Celkový zářivý výkon chromosféry ale činí jen 0,0001 zářivého výkonu fotosféry. A podobně zaniká v záři fotosféry i sluneční koróna. I přesto, že její teplota dosahuje dvou až tří milionů kelvinů, její zářivý výkon je ve srovnání s fotosférou asi milionkrát menší. To je způsobeno zejména velmi malou hustotou, která je až  $10^{-12}$  krát menší než hustota fotosféry. Podobně jako chromosféru můžeme tedy korónu pozorovat jen v době úplného zatmění Slunce nebo speciálními přístroji, např. koronografem.



Obrázek 17.4: Chod teploty v atmosféře Slunce. Zdroj: Brooks/Cole Publishing Company/ITP.

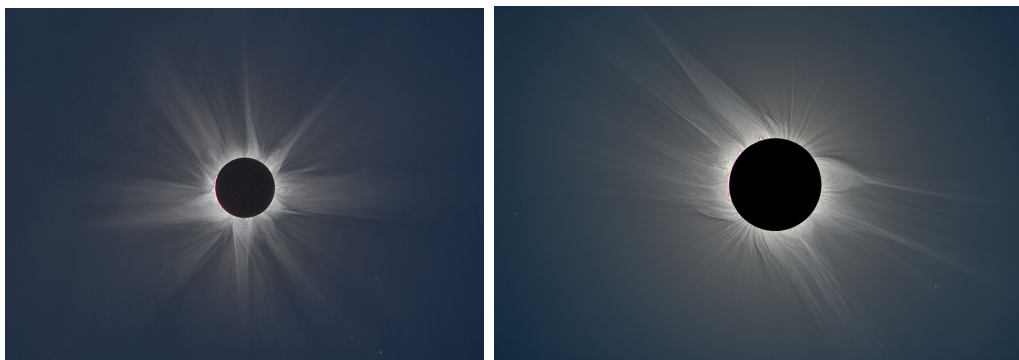
Zdrojem energie pro extrémní nahřívání horních vrstev sluneční atmosféry mají být dle práce Schatzman (1949) akustické nebo magnetohydrodynamické rázové vlny generované na povrchu Slunce konvekcí. V současné době se má spíše za to, že koróna je ohřívána elektrickým proudem generovaným změnami magnetického pole, procesem tzv. magnetické rekonexe. Siločáry magnetických polí odlišných domén se mohou náhle spojit, přestavět se a tím přerušit dosavadní elektrické proudy. Při takovém náhlém přerušení se energie elektrického proudu uvolní do koróny a ohřeje ji.<sup>4</sup> V lednu 2013 zveřejnila NASA (tisková zpráva 13-030) první výsledky z dalekohledu Hi-C (High Resolution Coronal Imager). Na dosud nejlepších detailních záběrech koróny (obrázek 17.6) se podařilo poprvé přímo pozorovat „magnetické stužky“.

Vysoká teplota koróny a její nízká hustota vedou k tomu, že materiál koróny je velmi difúzní. Rychlost částic často překoná i únikovou rychlost, vzniká tak nepřetržitý proud částic ze Slunce – tzv. sluneční vítr. Sluneční vítr tvoří typicky jen 5 až 10 částic v jednom  $\text{cm}^3$ , ale ročně jím Slunce ztrácí  $10^{-13}$  své hmotnosti, tedy zhruba  $10^{17}$  kg látky. Pro srovnání je to zhruba hmotnost Marsova měsíce Phobos, která je ročně slunečním větrem distribuována do okolí Slunce. Ztráta částic koróny je kontinuálně nahrazována z chromosféry.

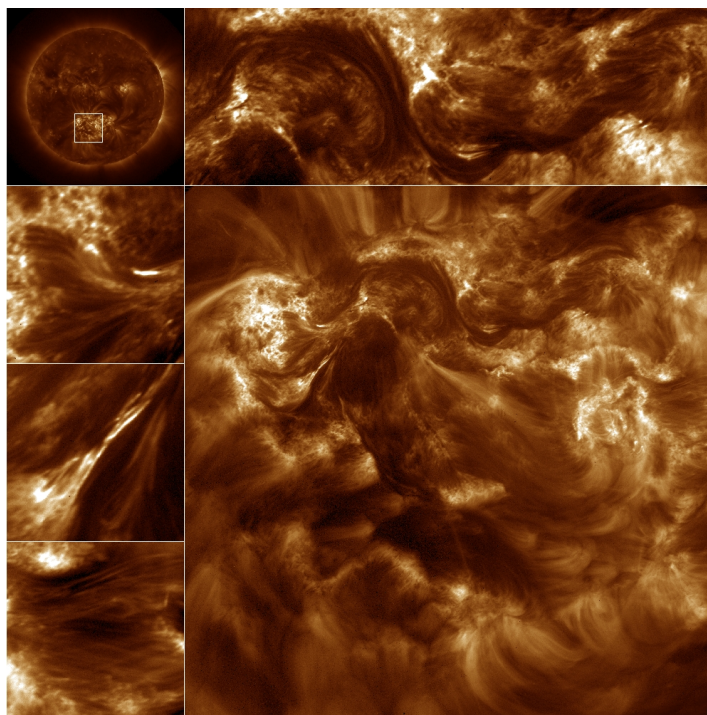
Velikost koróny se mění v závislosti na aktivitě Slunce. Zhruba ve vzdálenosti 2.3  $R_{\odot}$  poklesne ale její hustota natolik, že zde můžeme položit vnější okraj koróny. Hranice to není nijak ostrá, koróna prostě volně přechází do slunečního větru a okolního prostoru, tzv. heliosféry, v níž je Slunce dominantním tělesem.

<sup>4</sup>O teorii magnetické rekonexe a její historii si lze přečíst zejména v Priest & Forbes (2000).





Obrázek 17.5: Sluneční koróna během úplného zatmění Slunce. Tvar koróny se mění – v době maxima sluneční činnosti má pravidelný tvar (snímek vlevo, zatmění z roku 2012 pozorované v Austrálii), zatímco v období minima sluneční činnosti je zúžená v rovině slunečního rovníku (snímek vlevo, 2006 Turecko). Snímky zabírají odlišnou část hvězdné oblohy, proto má Slunce různý průměr. Zdroj: M. Druckmüller.

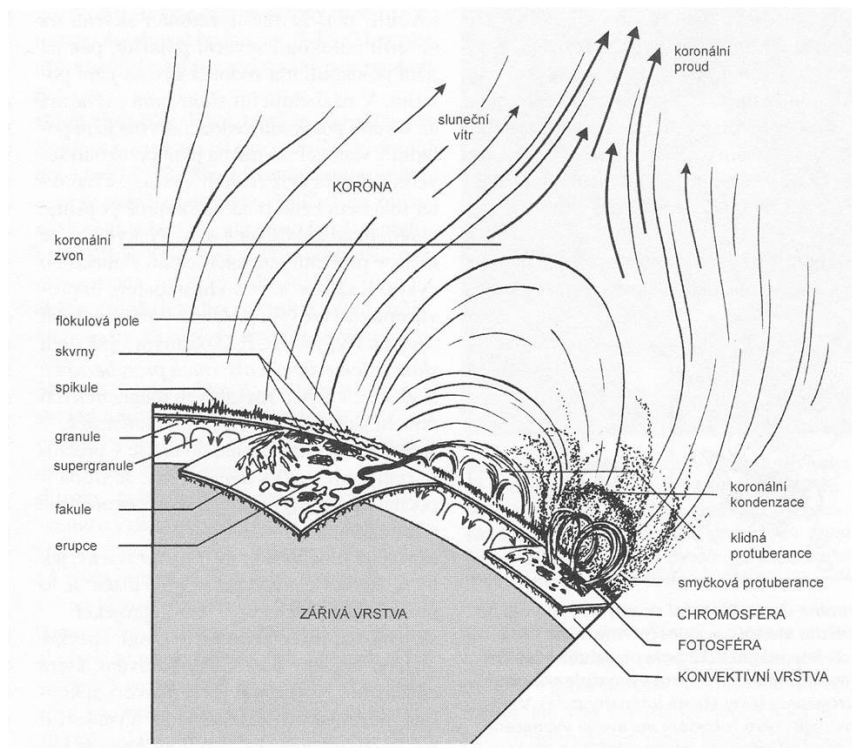


Obrázek 17.6: Záběry z koronární kamery s vysokým rozlišením (Hi-C, Hi-resolution Coronal Imager) ukazují vývoj aktivní oblasti na Slunci vyznačené na obrázku z přístroje AIA (Atmospheric Imaging Assembly) vlevo nahoře. Menší obrázky ukazují několik detailů: část kanálu filamentu (vpravo nahoře), lemované těleso (vlevo 2. obr. shora), příklad magnetické rekonexea erupce (vlevo, 3. shora), a jemné vláknité smyčky (vlevo dole). Obrázky z Hi-C jsou v rozlišení 0.2" nebo 150 km. Zdroj: NASA.

## 17.4 Projevy aktivity Slunce

Přestože Slunce nepatří mezi nějak zvlášť aktivní hvězdy, můžeme sledovat nejružnější projevy jeho činnosti ve všech vrstvách sluneční atmosféry. I když některé projevy nejsou omezeny jen na jednu vrstvu atmosféry, uvádí je následující přehled vždy jen v hlavních oblastech výskytu:

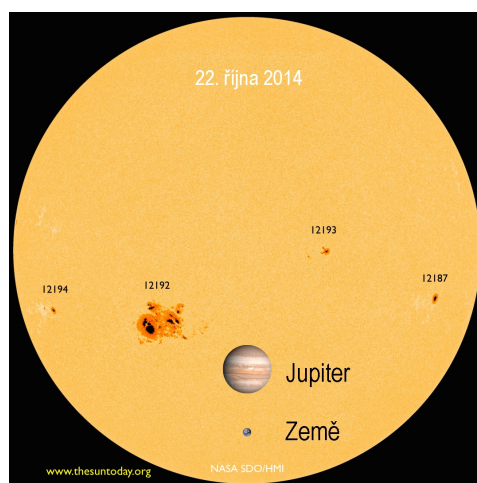
- fotosféra
  - sluneční skvrny
  - granule
  - fakule
- chromosféra
  - erupce
  - spikule
  - flokule
  - sluncetřesení
- koróna
  - protuberance (filamenty)
  - koronární transienty, kondenzace, výbuchy, díry
- heliosféra
  - sluneční vítr
  - koronární proudy



Obrázek 17.7: Aktivity Slunce.

### 17.4.1 Sluneční skvrny

Nejnápadnějším a proto i nejdéle známým projev sluneční činnosti jsou sluneční skvrny. Známe je i z období před vynálezem dalekohledu. Ty největší z nich mají průměr desítky tisíc kilometrů. V roce 2014 jsme mohli pozorovat skvrnu průměrem srovnatelnou s Jupiterem (viz obrázek 17.8), nicméně velká skvrna v roce 1947 byla ještě třikrát větší.



Obrázek 17.8: Největší sluneční skvrna v průběhu slunečního cyklu 24 zachycená přístrojem HMI na družici Solar Dynamics Observatory. Zdroj: „www.thesuntoday.org“.

První zaznamenaná pozorování slunečních skvrn pocházejí z roku 466 př. n.l. od Anaxagora z Klazomen. Čínská pozorování z let 301 – 1205 shrnul v prvním katalogu Číňan Ma Tuan-sien, který shromáždil informace o 45 záznamech. Středověk v Evropě příliš ovlivňovala Aristotelovský pohled na svět a tak nemáme z této doby mnoho astronomických záznamů včetně těch o Slunci. Výjimkou jsou tři známé záznamy. První pochází z roku 807, kdy tajemník a rádce Karla Velikého Einhard popsal v kronice domnělý přechod Merkuru přes Slunce. Ve skutečnosti však šlo o několikadenní pozorování velké sluneční skvrny. Druhý záznam o středověkém pozorování sluneční skvrny a její první vyobrazení pochází z roku 1128 od Johna z Worcesteru a můžeme jej nalézt v kronice uložené v Oxfordu v Corpus Christi College. Pro nás může být zajímavé, že také v Kosmově kronice můžeme objevit zmínku o pozorování sluneční skvrny, a to v roce 1139. Řadu pozorování ukrývají i arabské spisy.

Navzdory těmto historickým záznamům je objev slunečních skvrn oficiálně datován až do éry po objevu dalekohledu. Za objevitele jsou považováni David Fabricius a jeho syn Johann, kteří pozorovali sluneční skvrny 9. března 1611 a svá pozorování bezprostředně publikovali. Až poměrně nedávno se zjistilo, že skvrny na Slunci pozoroval 8. prosince 1610 anglický matematik a filozof Thomas Harriot, avšak bohužel bez publikace.

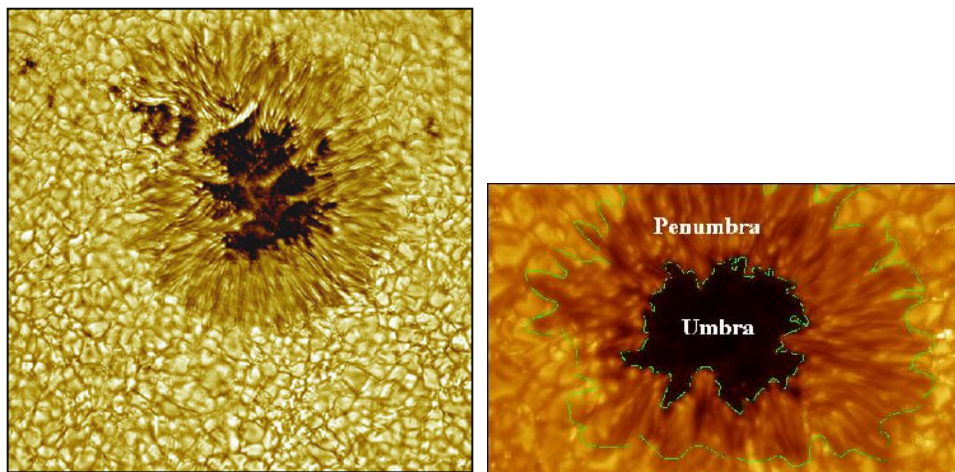
místo vzniku – fotosféra

části

- - umbra (neboli stín),

- - penumbra (polostín) – vlákna

doba trvání - hodiny až měsíce tvar i velikost skvrn se s časem mění



Obrázek 17.9: Sluneční skvrny.

Co jsou zač?

Herschel - průduchy v atmosféře; Herschel: skvrny jsou díry v horké sluneční atmosféře, kterými se díváme na pevný povrch Slunce, na kterém mohou žít organismy vznikající interakcemi magnetického pole Slunce a vzhledem k nižší teplotě se jeví jako tmavé oblasti.

velikost – mohou převyšovat velikost Země

pozorování

- dalekohledem
- volným okem

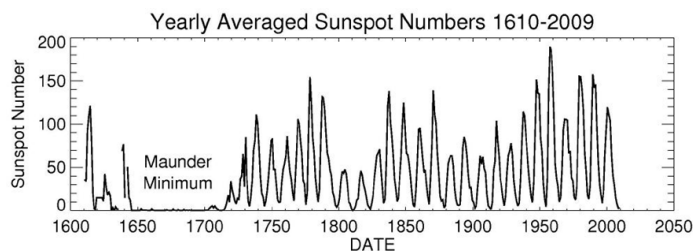
k čemu jsou dobré?

- určení rotace Slunce – objev diferenciální rotace – 27.3 d

Slunce nerotuje jako tuhé těleso, ale různou úhlovou rychlostí v různých vzdálenostech od rovníku. Na rovníku je rotace nejrychlejší a směrem k pólům klesá. Tak například v šířce 17 stupňů činí asi 27 a jednu třetinu dne; toto číslo se obvykle udává v tabulkách jako doba rotace Slunce vzhledem k Zemi.

**Počet skvrn – příznak aktivity Slunce**

periodické změny – odhad  $P \approx 10$  let (1844 Heinrich Samuel Schwabe); dnešní hodnota v průměru asi 11,3 roku



Obrázek 17.10: Počty slunečních skvrn.

poslední maximum - 2001, příští 2013 - (poznámka o průběhu maxima, zpoždění)

výrazná minima = Slunce beze skvrn - 1645 – 1715 Maunderovo minimum, 1450-1550 Spörerovo minimum (objevil německý astronom-amatér – původním povoláním lékárník Gustav Spörer a Edward Maunder)

1848 Johann Rudolf Wolf – relativní číslo množství skvrn na Slunci:

$$R = 10 * g + n, \quad (17.1)$$

kde  $g$  je počet skupin skvrn,  $n$  celkový počet jednotlivých skvrn.

### 17.4.2 Granulace (zrnitost)

granule - zrna o velikosti cca 700-1000 km; vrcholky vzestupných proudů plazmatu  
životnost - 6 až 8 minut;  
Pozorování - dalekohledem

### 17.4.3 Fakule (pochodně)

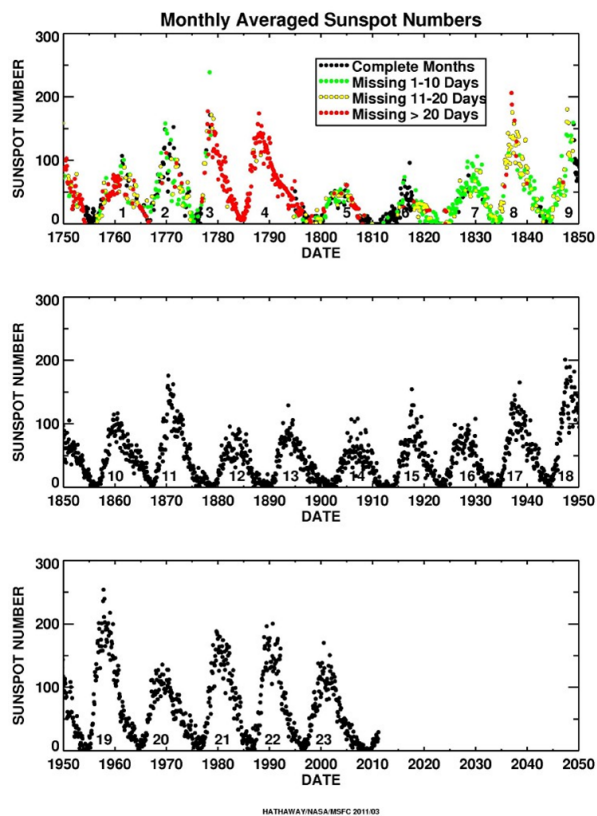
světlé skvrnky nejnápadnější na okraji slunečního kotouče interpretace - místa s poněkud vyšší teplotou než okolní fotosféra

Pozorování - dalekohledem

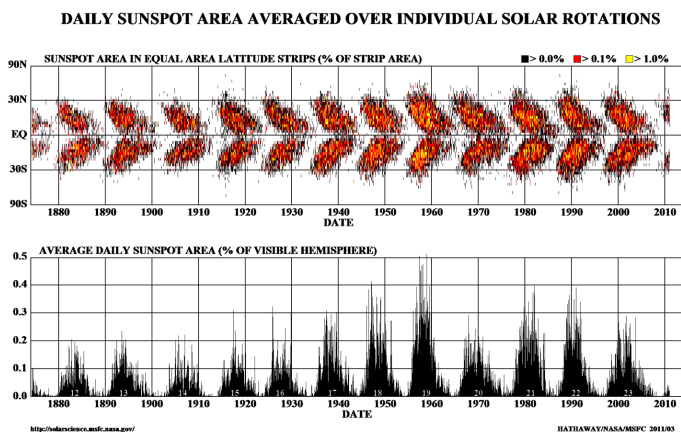
### 17.4.4 Erupce

Místo vzniku - chromosféra

Náhlá zjasnění chromosféry, doprovázená silným vyzařováním na různých frekvencích a výronem nabitých částic do meziplanetárního prostoru. Erupce vznikají v místech silných magnetických polí. Doba trvání - několik desítek minut



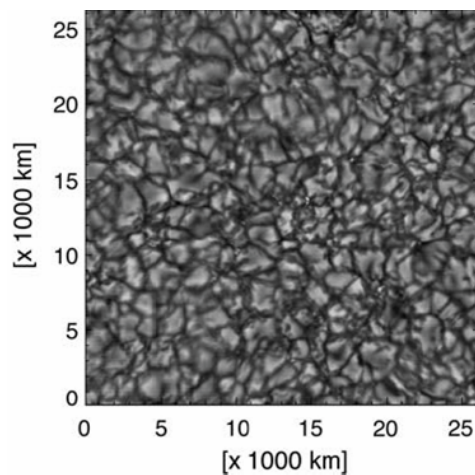
Obrázek 17.11: Sluneční skvrny



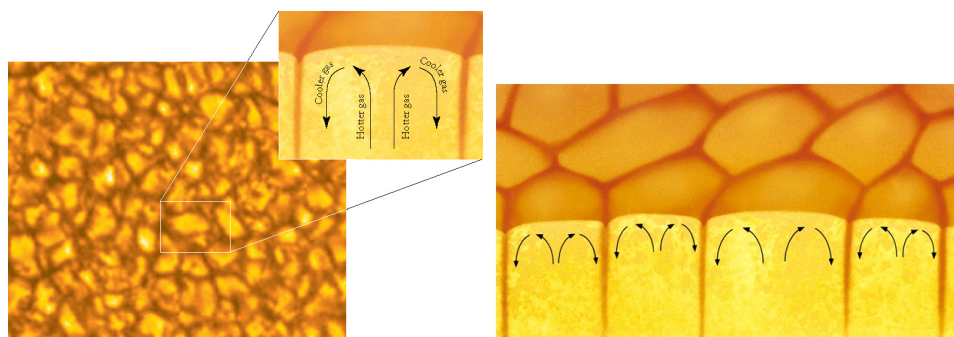
Obrázek 17.12: Motýlkový diagram.

## 17.4.5 Sluncetřesení

video: 9 July 1996 - sluncetřesení  
sérii obrázků + vysvětlení



Obrázek 17.13: Granulace.

Obrázek 17.14: Granulace. Schéma. Zdroj: [http://www.ualberta.ca/~pogosyan/teaching/ASTRO\\_122/lect9/lecture9.html](http://www.ualberta.ca/~pogosyan/teaching/ASTRO_122/lect9/lecture9.html).

### 17.4.6 Flokule a spikule

Flokule jsou jasná místa ve chromosféře, tvoří chromosférickou síť.

Spikule - vrcholky flokulí, velmi dobře pozorovatelné v čáře H-alfa.

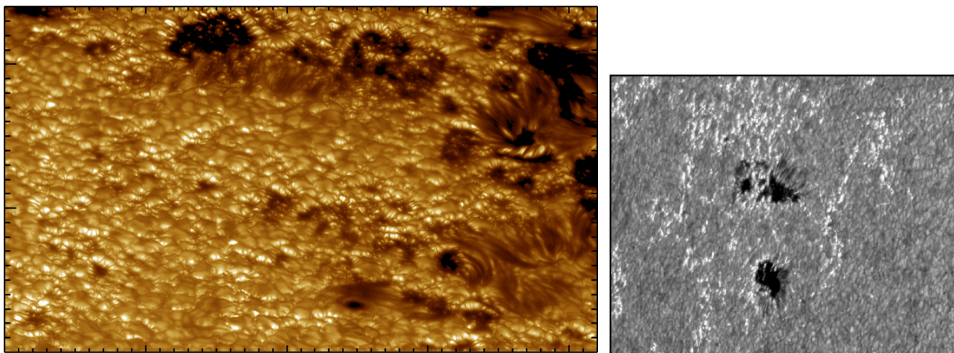
Výtrysky z chromosféry do koróny – 10000 K, průměr vláken 1000 km; „hořící prerie“

### 17.4.7 Protuberance

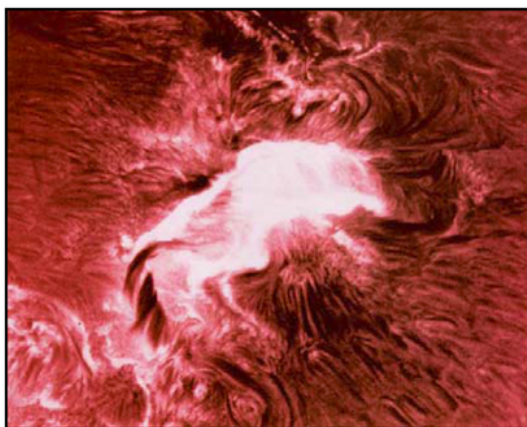
shluky plazmatu - vystupují z chromosféry do koróny desítky tisíc km vysoko  
klidná protuberance x eruptivní protuberance

### 17.4.8 Koróna

velmi řídký plyn obklopující Slunce, září zhruba milionkrát méně než fotosféra



Obrázek 17.15: Fakule.



Obrázek 17.16: Erupce.

pozorování - při úplném zatmění Slunce, koronograf

- bez vnější hranice
- přechází do okolního prostoru
- sluneční vítr
- výtrysky částic (CME) – vliv na Zemi ( $20 - 3200 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ )

### 17.4.9 Sluneční vítr

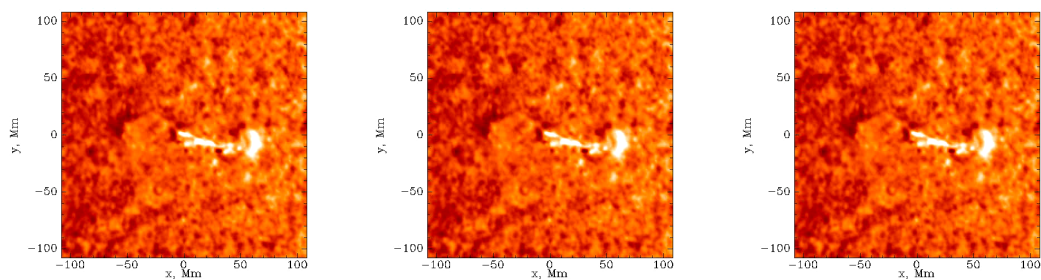
přesné chemické složení Slunce – přímým rozbořem slunečního větru pomocí družic nebo kosmických sond.

pomalý (stacionární) –  $300 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$

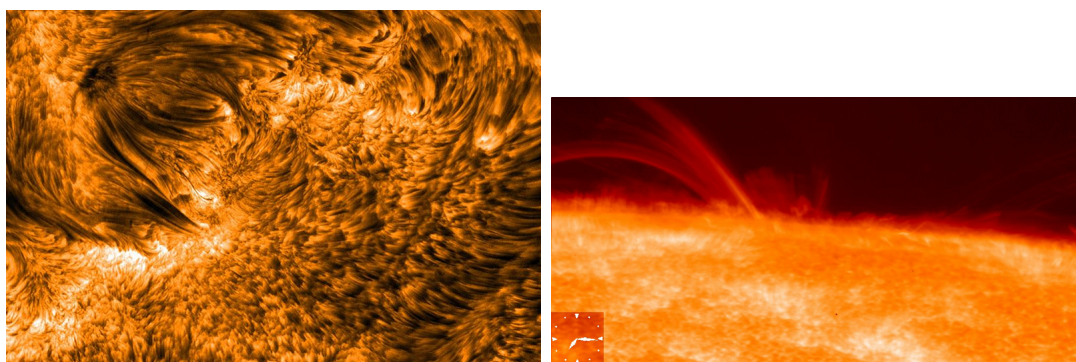
rychlý (kvazistacionární) – nad koronárními děrami ( $700-800 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ )

velmi rychlý – přechodný, při výbuších Slunce – vede k tzv. meziplanetární bouři





Obrázek 17.17: Sluncetřesení.



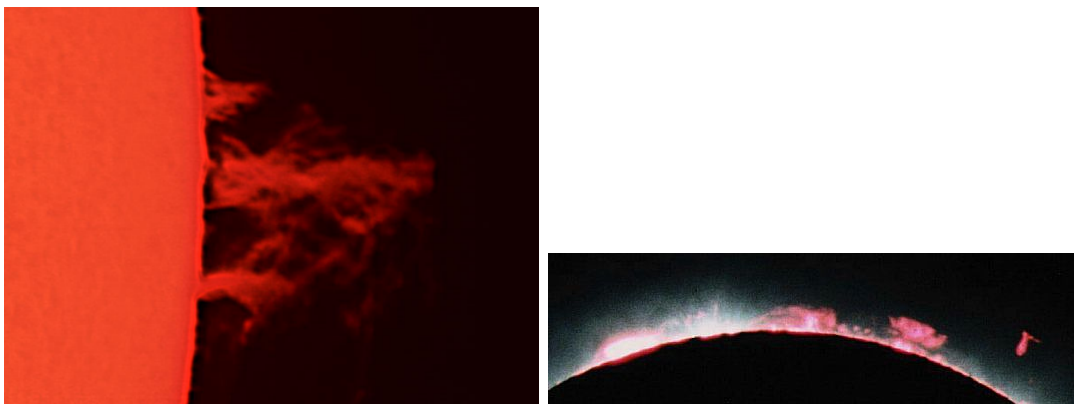
Obrázek 17.18: Flokule a spikule

Slunečním větrem = stálý proud částic, unikající ze Slunce; v okolí Země - hustota několik částic/cm<sup>3</sup>, - rychlost - několik set km·s<sup>-1</sup>, sahá daleko za dráhu Země.

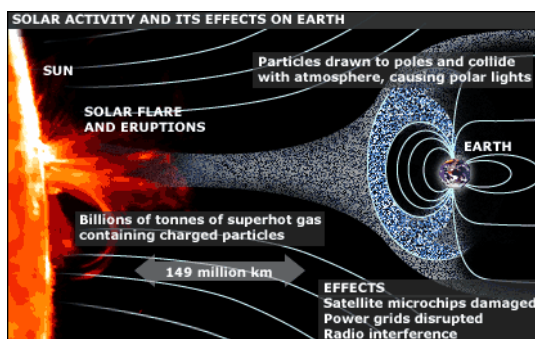
Sluneční vítr - přímá informace o chemickém složení svrchní vrstvy Slunce, (už po promíchání) => odpovídá celkovému chemickému složení Slunce

Tabulka 17.1: Složení slunečního větru

Prvek:	Relativní množství ve slunečním větru:
vodík	0,96
helium 3	$1,7 \cdot 10^{-5}$
helium 4	0,04
kyslík	$5 \cdot 10^{-4}$
neon	$7,5 \cdot 10^{-5}$
křemík	$7,5 \cdot 10^{-5}$
argon	$3,0 \cdot 10^{-6}$
železo	$4,7 \cdot 10^{-5}$



Obrázek 17.19: Protuberance.



Obrázek 17.20: Aktivita Slunce a její vliv na Zemi.

## 17.5 Heliosféra

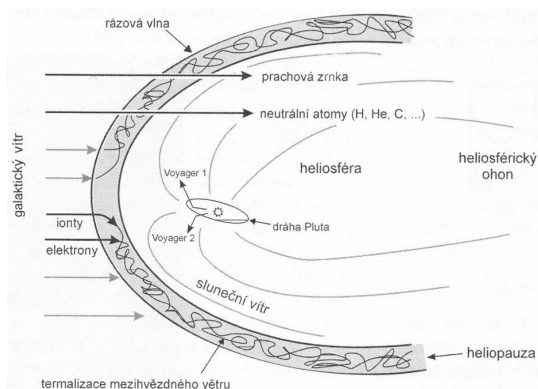
Heliospheric current sheet (HCS)

Zvlněné proudové vrstvy uvnitř Sluneční soustavy – oddělují opačně orientované meziplanetární magnetická pole

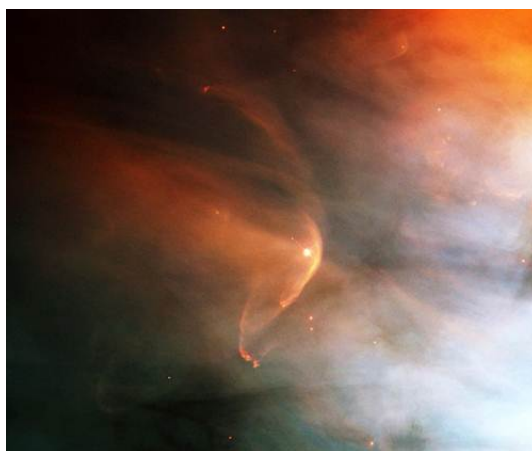
největší útvar ve Sluneční soustavě  
 vychází z rovinu slunečního rovníku  
 tvar – výsledek rotace mg. pole Slunce a působení slunečního větru  
 tloušťka vrstvy – cca 10 000 km  
 el. proudy s hustotou  $10^{-10}$  A/m<sup>2</sup>

## Použitá a doplňující literatura

Grevesse, N., Asplund, M., Sauval, A. J., & Scott, P. 2010, *Astroph. & Space Sci.*, 328, 179

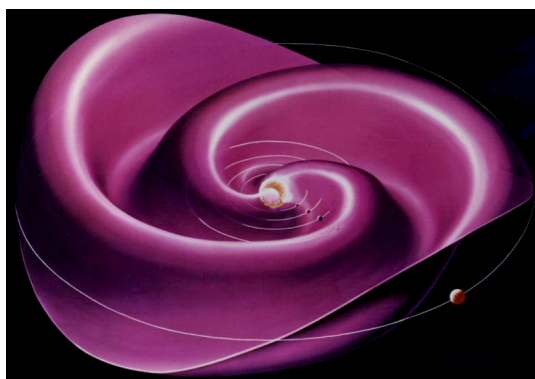


Obrázek 17.21: Schéma heliosféry. Na heliosféru působí galaktický vítr, tok mezihvězdné hmoty pohybující se od středu Galaxie vůči Slunci rychlostí 25 km/s. Převzato z Kleczek (2002).



Obrázek 17.22: HST poskytl v únoru 1995 pohled na rázovou vlnu o rozměru zhruba půl světelného roku, která vznikla u hvězdy LL Orionis. Jak rychlý hvězdný vítr naráží do pomalu se pohybujícího plynu Mlhoviny v Orionu, vzniká rázová vlna, podobně u letadla, které letí nadzvukovou rychlostí. Zdroj: Astronomický snímek dne 15.11.2003. NASA.

- Christensen-Dalsgaard, J., Dappen, W., Ajukov, S. V., et al. 1996, *Science*, 272, 1286  
 Kleczek, J., 2002 *Velká encyklopedie vesmíru*. Academia, Praha  
 Leighton, R. B., Noyes, R. W., & Simon, G. W. 1962, *ApJ*, 135, 474  
 Priest, E., & Forbes, T. 2000, *Magnetic Reconnection*, by Eric Priest and Terry Forbes, pp. 612. ISBN 0521481791. Cambridge, UK: Cambridge University Press, June 2000.  
 Schatzman, E. 1949, *Annales d'Astrophysique*, 12, 203  
 Spiegel, E. A., & Zahn, J.-P. 1992, *A&A*, 265, 106  
 Svalgaard, L., & Wilcox, J. M. 1976, *Nature* 262, 766



Obrázek 17.23: Heliosférická proudová vrstva. Jeden z prvních 3D modelů se objevil v článku (Svalgaard & Wilcox, 1976).

## 18 Zrození, život a skon hvězd

Vývoj hvězdy je ve srovnání s délkou lidského života ba i existencí člověka velmi dlouhý proces. Naše pozorování v délce maximálně stovek let představuje jen okamžik z celého vývoje určité hvězdy. Jsou to momentky ze života hvězd. Představte si ale, že byste například měli sérii fotografií (momentek) z určitých vývojových stádií různých druhů hmyzu a měli je poskládat ve správném pořadí, aby vznikl dokumentární sled obrázků ukazující vývoj společné i odlišné cesty vývoje různých druhů hmyzu. Bez široké škály biologických znalostí je to těžko řešitelný úkol. Astrofyzikové ale řeší úkol velmi podobný. Ze zachycených momentek různých hvězd se snaží poskládat obraz vývoje hvězd různých typů. Jenže náš pohled do vesmíru a tím i pořizování oněch momentek je silně zatížen výběrovým efektem. Stejně hvězdy se nám z různých vzdáleností jeví odlišně, jako četnější se budou jevit zářivější hvězdy a nezapomínejme ani na nepravidelně rozmístěný mezihvězdný materiál, který může náš pohled do vesmíru také výrazně zkreslit. Nicméně i přes nastražené obtíže se astronomům skutečně podařil husarský kousek a vývojovou sekvenci pro různé hvězdy opravdu sestavili.

Než se však pustíme do samotného vývoje hvězd, věnujme se na chvíli jednomu z fenomenů, který náš pohled do okolního vesmíru silně ovlivňuje a který je také nezbytný pro vznik hvězd.

### 18.1 Mezihvězdná látka

O mezihvězdné látce jsme se v kurzu už několikrát zmiňovali, ale podívejme se na ni trochu detailněji. Mezihvězdná látka je tvořena plynem s teplotou většinou do 100 K většinou z atomů a molekul vodíku a hélia s příměsí prachových zrn. Nejhmotnější složkou je plyn, který představuje až 99 % hmoty mezihvězdné látky. Vodík je zastoupen zhruba 70 procenty, 28 % tvoří hélium a zbytek ostatní prvky. Vodík se v mezihvězdném prostředí vyskytuje jak v základním, tak i excitovaném stavu.

Neutrální vodík tvořící oblasti H I, které jsou detekovatelné na vlnové délce 21,1 cm, tedy na frekvenci 1420 MHz. Tato oblaka jsou ale dost chladná (do 100 K), takže většina vodíku se vyskytuje v podobě molekul. Hustota je v těchto uskupeních většinou desítky atomů v jednom centimetru krychlovém, ale mohou se vyskytnout i zhustky s hustotou až  $10^6$  částic/cm<sup>3</sup>. Rozměry obřích molekulárních mračen dosahují až několika set světelných let a hmotností až  $10^7 M_{\odot}$ .

Chladná oblaka mezihvězdné látky můžeme pozorovat jako temné nezářící mlhoviny. Typickými příklady jsou mlhoviny Koňská hlava v Orionu, Dýmka v Hadonoši (viz obr. 5.12) nebo Uhelný pytel v souhvězdí Jižního kříže.

V okolí žhavých hvězd je mezihvězdná látka vystavena intenzivnímu záření, které vodík ionizuje. Pak hovoříme o oblastech H II s teplotou několika tisíc kelvinů. Tyto oblasti mezihvězdné látky jsou zpravidla řidší než oblasti H I. jsou pozorovatelné zpravidla jako červeně zářící emisní mlhoviny (viz obrázek 18.1 vpravo).

Mezihvězdný prach tvoří jen jedno procento mezihvězdné látky, ale jeho role je velmi významná. Je tvořen zrnky o velikosti 0.1  $\mu\text{m}$  z uhlíku, křemičitanů, různých kovů a ledu. Jedno takové zrnko je vyskytuje v prostoru 10 až 100 m<sup>3</sup>. Přestože je hustota mezihvězdného prachu velmi nízká, právě na jeho částicích dochází k absorpci

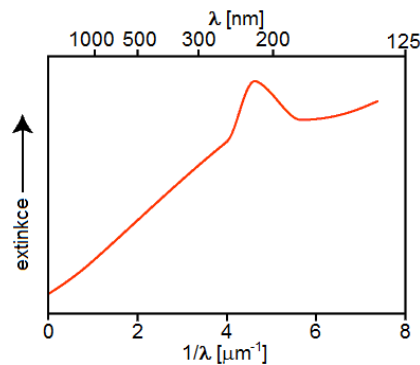


Obrázek 18.1: Mléčná dráha a oblast HII v mlhovině M17 Omega. Zdroj: Sid Leach a Martin Altmann & Jürgen Schmoll.

a rozptylu procházejícího záření. Rozptyl a absorpce jsou totiž neúčinnější na částicích srovnatelných s vlnovou délkou procházejícího záření. To znamená, že zatímco dlouhovlnné a infračervené záření prochází těmito oblaky bez potíží, pro krátkovlnné a ultrafialové záření neprůhledná. To samozřejmě vede k celkovému zeslabení záření po průchodu mezihvězdnou látkou, k tzv. *mezihvězdné extinkci*. Ve známém vztahu pro modul vzdálenosti pak vystupuje i extinkční člen  $A_V$ , který vlastně říká o kolik magnitud je hvězda slabší kvůli mezihvězdné extinkci.

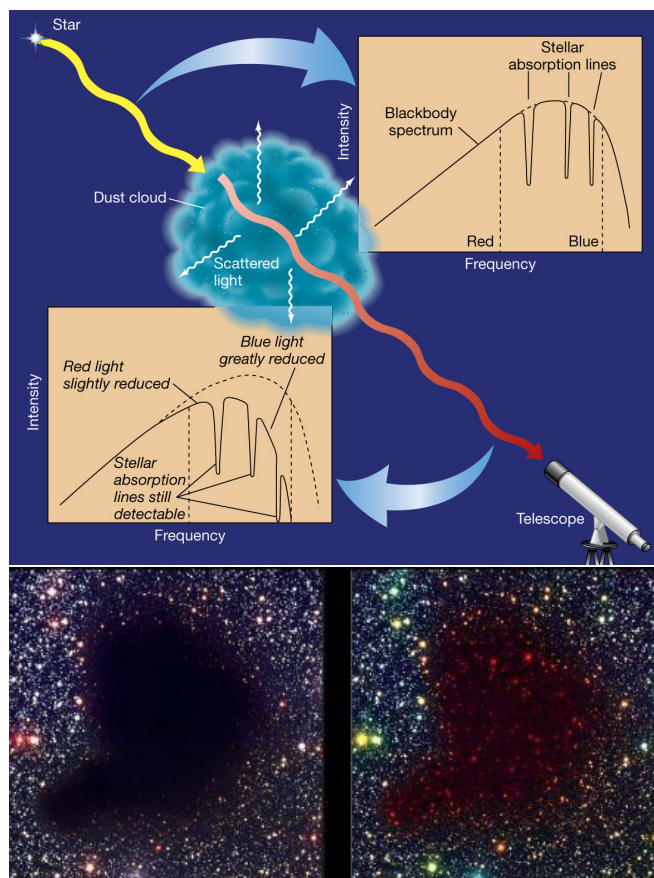
$$m_V - M_V = 5 \log r - 5 + A_V \quad (18.1)$$

Ve směru do středu naší Galaxie může extinkce ve vizuální oblasti spektra dosáhnout až 30 mag!



Obrázek 18.2: Graf mezihvězdné extinkce v závislosti na vlnové délce  $\lambda$ , respektive vlnočtu  $1/\lambda$ . Zdroj: <http://www.jb.man.ac.uk/>

Extinkce není ale jediný efekt, který prostředí s mezihvězdným prachem způsobuje. Tím, že je prakticky neprůhledné pro krátkovlnné záření, tedy modrou složku světla, bude se světlo po průchodu tímto prostředím jevit červenější, dojde k tzv. *mezihvězdnému zčervenání*. Připomeňme, že toto zčervenání nemá nic společného s Dopplerovým červeným posunem.

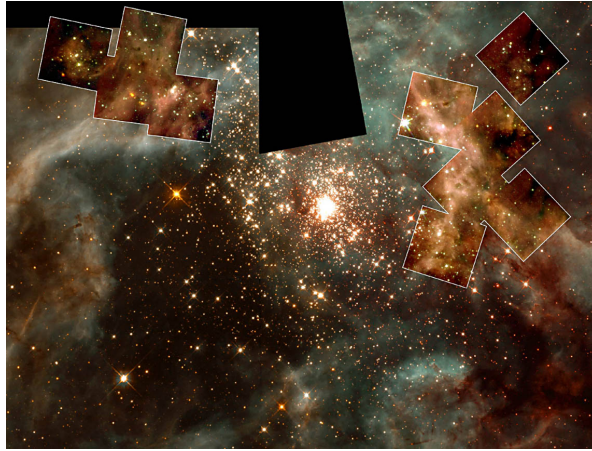


Obrázek 18.3: Nahoře: Působení mezihvězdného prachu na procházející záření. Dole: Záběry temné mlhoviny Barnard 68 v souhvězdí Hadonoše na snímcích z VLT na ESO. Vlevo je snímek v optické a vpravo v infračervené oblasti spektra. Zdroj: Chaisson/McMillan: *Astronomy Today*. Pearson a ESO.

## 18.2 Akt zrození aneb 7 kroků ke vzniku hvězdy

Hvězdy jsou základními stavebními kameny ve vesmíru. Měli bychom tedy vědět odkud se vzaly, jak se vyvíjejí a jak zaniknou. Vývoj hvězd je v každém případě nevratný proces. Ale koncem vývoje jedné hvězdy začíná vlastně vývoj hvězd(y) další generace. Ve vesmíru funguje prakticky dokonalá recyklace. Uvědomme si, že i všechny věci, které nás obklopují, dokonce i my sami jsme složeni z částic, které kdysi dávno byly součástí hvězd. Z. Mikulášek to vyjádřil tvrzením, že člověk je jen myslícím prachem supernov. Cesta částic z hvězdného nitra až k lidskému tělu je však hodně dlouhá.

Detailní odpověď popisující důkladně mechanismy vývoje hvězd i samotný „motor“ hvězdného vývoje je nad rámec tohoto kurzu, prozatím vystačíme s tvrzením, že vývoj (osamocených) hvězd je diktován změnami jejich chemického složení, k nimž dochází v důsledku jaderných reakcí probíhajících v nitru hvězdy (viz kapitola 16.5). Tyto reakce jsou, jak víme, také hlavním zdrojem energie hvězdy. Jejich roli se budeme věnovat podrobněji, ale už nyní můžeme konstatovat: jaderné reakce probíhají zejména v jádru hvězd, stav jádra tak určuje zářivý výkon, celkovou stavbu i vývoj hvězdy. Jaké reakce se tam odehrávají a jak rychle, to závisí především na počáteční, dalo by se říci



Obrázek 18.4: Místo zrodu velmi hmotných hvězd, mlhovina 30 Doradus. Zdroj: HST, NASA.

porodní, hmotnosti hvězdy. Začněme tedy popis hvězdného vývoje jejich vznikem ve hvězdné porodnici. Než se ale narodí hvězda, je třeba udělat 7 kroků, projít sedm stádií prenatalního vývoje hvězdy:

1. Fragmentace oblaku mezihvězdné látky.
2. Samostatný kolaps fragmentu.
3. Vznik protohvězdy (konec fragmentace).
4. Kelvinova-Helmholtzova kontrakční fáze.
5. Pobyť na Hayashiho stopě.
6. Zážeh (zrození nové hvězdy).
7. Dosednutí hvězdy na hlavní posloupnost.

Výše zmíněné kroky jsou nezbytné k tomu, aby se ustavila jednak hydrostatická rovnováha, kdy je vyrovnána gravitační síla s gradientem tlaku ve vznikající protohvězdě, a jednak tepelná rovnováha, kdy hvězda vyzáří tolik energie, kolik se vyrobí v jejím jádru. Tepelná rovnováha je ustavena ve fázi těsně před dosednutím nové hvězdy na hlavní posloupnost.

Tabulka 18.1: Počáteční fáze vývoje hvězdy slunečního typu.

Fáze	dobu trvání fáze [roky]	centrální teplota [K]	povrchová teplota [K]	centrální hustota [částice/m <sup>3</sup> ]	rozměr [km]	objekt
1	$2 \cdot 10^6$	10	10	$10^9$	$10^{14}$	mezihvězdný oblak
2	$3 \cdot 10^4$	100	10	$10^{12}$	$10^{12}$	část oblaku -"/protohvězda
3	$10^5$	$10^4$	100	$10^{18}$	$10^{10}$	
4	$10^6$	$10^6$	3000	$10^{24}$	$10^8$	protohvězda
5	$10^7$	$5 \cdot 10^6$	4000	$10^{28}$	$10^7$	protohvězda
6	$3 \cdot 10^7$	$10^7$	4500	$10^{31}$	$2 \cdot 10^6$	hvězda
7	$10^{10}$	$15 \cdot 10^6$	6000	$10^{32}$	$1,5 \cdot 10^6$	hvězda hlavní posloupnosti



### 18.2.1 Vznik protohvězdy

Ke vzniku hvězdy potřebujeme především dostatečné množství stavebního materiálu. Ten se, jak víme, nachází v mezihvězdném prostředí v podobě mračen plynu a prachu. Hvězdné porodnice budeme hledat právě tam, kde se nachází velké množství mezihvězdné látky. V horkém, řídkém, difúzním atomárním vodíku jsou „vlozena“ obří neforemná oblaka chladného, relativně hustého molekulárního vodíku. V anglické literatuře se označují jako GMC (z *giant molecular cloud*). Parametry těchto obřích molekulárních mračen jsou vskutku úctyhodná. Rozměry se pohybují mezi 10 až 50 parseky (30 až 160 ly). Zatímco malé zárodečné oblaky mají hmotnosti řádově srovnatelné s hmotností Slunce, obří molekulová mračna mohou mít až  $10^7 M_{\odot}$ . Jejich hustota je zpravidla stovky až tisíce částic v jednom centimetru krychlovém, v místech zhuštění až  $10^6$  částic/cm<sup>3</sup>.<sup>1</sup> V průměru má zárodečný molekulární mrak mezihvězdné látky hustotu zhruba  $10^{20}$ krát menší než hvězda, která z něj vznikne. Připomeňme, že naprostá většina zárodečné látky je tvořena vodíkem (někdy je to až 99 %). Mezihvězdný prach může tvořit jen 1 až 10 % látky. Zpravidla několik procent zárodečného materiálu zabírá helium a jen zlomek připadá na těžší prvky. Metalicita této zárodečné směsi o teplotě jen kolem 15 K je ale velmi důležitá a rozhoduje o tom, jak se obří molekulový oblak rozdělí, fragmentuje na jednotlivé zárodečné mlhoviny pro vznik hvězd. Z jednoho oblaku mohou dle jeho velikosti vzniknout desítky až tisíce nových hvězd. V poslední době se ukazuje, že naprostá většina hvězd, ne-li všechny hvězdy v naší Galaxii vznikly v otevřených hvězdokupách.

Na počátku vývoje můžeme nalézt obří molekulový mrak GMC v hydrostatické rovnováze. Proti gravitačnímu smršťování působí gradient tlaku tvořený různými složkami, přispívá k němu gradient tlaku plynu, teplota materiálu, jeho pohyb, rotace kolem středu oblaku, magnetické pole a pod. Matematicky se tato rovnováha pro stabilní gravitačně vázaný systém dá zapsat jako tzv. viriálový teorém

$$2K + U = 0, \quad (18.2)$$

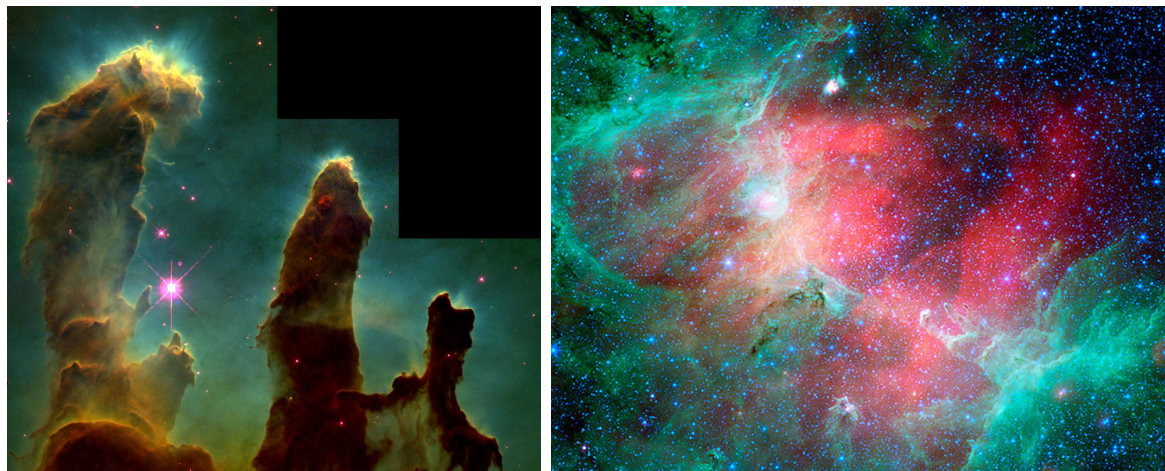
kde  $K$  je střední kinetická energie oblaku a  $U$  jeho střední potenciální energie<sup>2</sup>.

Z poklidného rovnovážného stavu se GMC dostane poměrně náhle změnou vnějších podmínek. Nezbytným impulsem zvětší může být srážka s jiným mračnem, rázová vlna vzniklá výbuchem blízké supernovy, případně blízký vznik velmi hmotné hvězdy spektrálních typů O nebo B, ale také jím může být průchod mračna spirálními rameny Galaxie. Výsledek takového vnějšího působení je ale stejný, vzniklá nestabilita oblaku vede k tomu, že převáží gravitace a začíná gravitační kolaps mračna. Velmi zjednodušeně (a zjevně nereálně) se zde většinou předpokládá, že částice GMC podléhající gravitačnímu kolapsu padají do středu volným pádem a veškerá získaná energie se vyzáří, takže teplota oblaku se nemění. Doba volného pádu nezávisí na počátečním rozměru mračna, ale jen nepřímo úměrně na počáteční hustotě. Jestliže budeme uvažovat počáteční oblak jako homogenní, doba kolapsu bude pro všechny části oblaku stejná a hustota během něj poroste všude stejnou měrou. Takto probíhající prvotní fáze se zpravidla označuje jako *homologický kolaps*. Samotný GMC ale není homogenní, obsahuje

<sup>1</sup>Pro srovnání v pozemských laboratořích se prostředí s počtem  $10^4$  až  $10^9$  molekul/cm<sup>3</sup> považuje za ultravysoké vakuum.

<sup>2</sup>Střední hodnoty jsou získány průměrováním v čase.

malé „hrudky“, zahuštěná místa o rozměrech zhruba  $0,1 \text{ pc}^3$ . Pak ovšem bude doba volného pádu kratší u míst s větší hustotou, takže u zmíněných zhustků proběhne gravitační kolaps dříve a rychleji. Tím ovšem dojde k dělení mračna, jeho fragmentaci na řadu částí s hustšími jádry o hmotnostech srovnatelných s hmotností Slunce.<sup>4</sup> V každém případě délka tohoto prvního kroku ke vzniku hvězdy trvá řádově statisíce až miliony let.



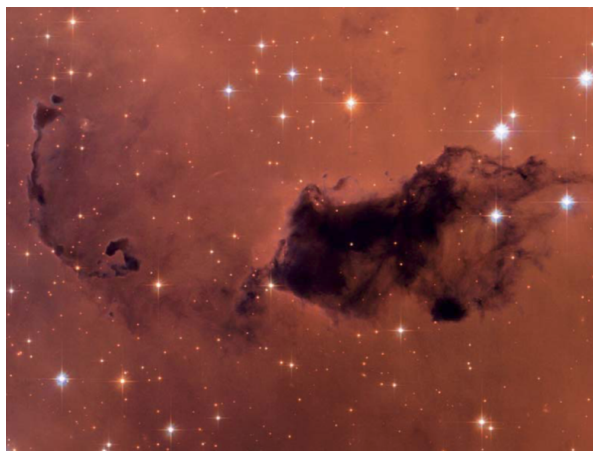
Obrázek 18.5: Snímek tzv. pilířů stvoření z HST z roku 1995 (vlevo) ukazuje vypařující se plynné globule, které se vynořují z pilířů molekulárního plynu a prachu v oblasti Orlí mlhoviny a otevřené hvězdokupy M16. V pilířích několik světelných let dlouhých dochází ke vzniku nových hvězd. Intenzivní záření jasných hvězd na konci každého pilíře způsobuje, že se materiál s nízkou hustotou odpařuje a zanechává hvězdné porodnice plné odkrytých hvězdných zárodků. V roce 2007 zachytil stejnou oblast v infračerveném záření Spitzerův kosmický dalekohled (snímek vpravo). Tři známé pilíře poblíž centra snímku jsou obklopeny prachem ohřátým pravděpodobně výbuchem blízké supernovy. Zdroj: NASA.

V druhém kroku při vzniku hvězdy budeme sledovat vývoj jediného fragmentu z původního obřího molekulového mračna a to fragmentu, z něhož posléze vznikne hvězda velikosti našeho Slunce. V dalším tedy budeme popisovat a mít na mysli vznik hvězdy slunečního typu. Zárodečný chomáč hmoty je v takovém případě asi stokrát větší než Sluneční soustava a jeho hmotnost je mezi 1 až  $2 M_{\odot}$ . Hustota ve středu této plynné koule dosahuje přibližně  $10^{12} \text{ částic/m}^3$  a centrální teplota se zvýšila na zhruba 100 K. Oproti tomu teplota vnějších částí fragmentu zůstává stále nízká, materiál je opticky tenký a tak prakticky veškerá energie získaná v nitru zárodečného chomáče snadno unikne do prostoru.

Náš prvotní předpoklad, že smršťování je izotermické ale není zjevně správný. Část energie přece jen zůstává v nitru kolabujícího fragmentu. V centru tak roste nejen hustota, ale i teplota. Výsledkem je zastavení procesu fragmentace, nicméně gravitační smršťování velmi rychle pokračuje i nadále a to až do chvíle, kdy materiál v centru začne být neprůhledný. V době, kdy se původní fragment smrští přibližně na velikost naší Sluneční soustavy, jsou fotony odnášející energii z centra zachyceny do neprůhledné

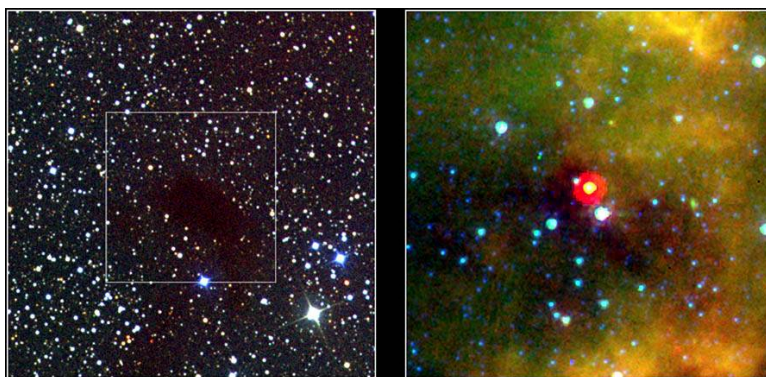
<sup>3</sup>V anglicky psané literatuře se těmto zhustkům říká „clumps“.

<sup>4</sup>V angličtině se tento proces označuje jako „inside-out collapse“.

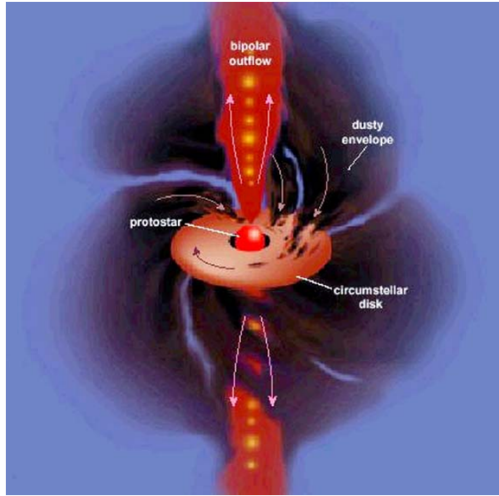


Obrázek 18.6: V infračerveném oboru vyhlíží jinak tmavá globule docela prapodivně: toto je pohled na globuli v emisní mlhovině IC 1396 v souhvězdí Cephea, jak jej zprostředkoval Spitzerův kosmický dalekohled v prosinci 2003.

pasti. Teplota a tlak centra začnou výrazněji růst až na 10 000 K a zhruba  $10^{18}$  částic/m<sup>3</sup>. V centrální části se ustaví hydrostatická rovnováha, vzniká protohvězda. Z vnějších oblastí, které jsou stále chladnější a opticky tenké, dopadají na zárodek hvězdy další a další částice. Hmotnost zárodka stále roste, ale současně se stále mírně smršťuje. Zachytit nějaký objekt v této fázi vývoje se podařilo až nedávno (Chen et al., 2010) týmu, který použil výsledky družice Spitzer a Submilimetrové observatoře SMA. Objekt L1448-IRS2E lze považovat za skutečné hvězdné embryo. Je, zdá se, ještě tak mladé, že ani nedosáhlo stádia protohvězdy, takže jde velmi pravděpodobně o jeden z nejmladších pozorovaných hvězdných objektů. Pro okolí je vznikající protohvězda ukryta v zárodečném materiálu, takže je velmi slabá a navíc, jak tato fáze, tak i samotná fáze protohvězdy jsou velmi krátké, jen  $10^4$  až  $10^5$  let.



Obrázek 18.7: Srovnání pohledu na protohvězdu L1014 ve viditelném světle (vlevo) a v infračerveném záření ze Spitzerova dalekohledu (vpravo). Jasný žlutý objekt v centru obrázku je vznikající hvězda, kterou pozoroval Spitzer díky své schopnosti proniknout opticky hustým materiálem v okolí protohvězdného jádra. Červený kroužek kolem objektu je artefakt, který vznikl kvůli omezené prostorové rozlišovací schopnosti dalekohledu na 24 mikronech. Zdroj: NASA.

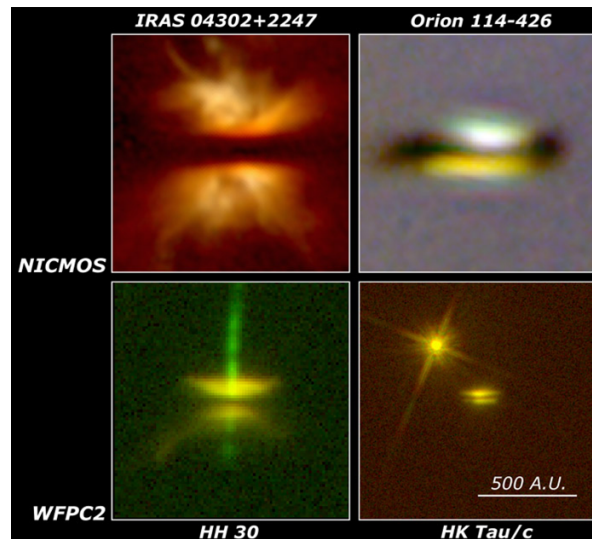


Obrázek 18.8: Model vznikající hvězdy s diskem. Zdroj: Greene (2001).

zatímco na rovníku jsou brzděny odstředivou silou, což vede k tomu, že se celý zárodečný chomáč zplošťuje. V rovníkové oblasti se vytváří disk kolem protohvězdy, jak je vidět na modelu na obrázku 18.8. Takové disky tvořené prachem a dalšími zbytky zárodečného materiálu skutečně u velmi mladých hvězdných objektů pozorujeme (obrázek 18.9). Právě disky jsou odpovědné za většinu záření vycházejícího od protohvězdy. Zdrojem energie je samozřejmě akrece. Díky ní protohvězda během typicky zhruba 100 000 let dosáhne své konečné počáteční hmotnosti. Souběžně s akrecí dochází ke stabilnímu odtoku materiálu v podobě silného větru, který z polárních oblastí vznikající hvězdy (viz obrázky 18.8, 18.10). Právě tyto polární výtrysky nám pomáhají odhalit místa, kde

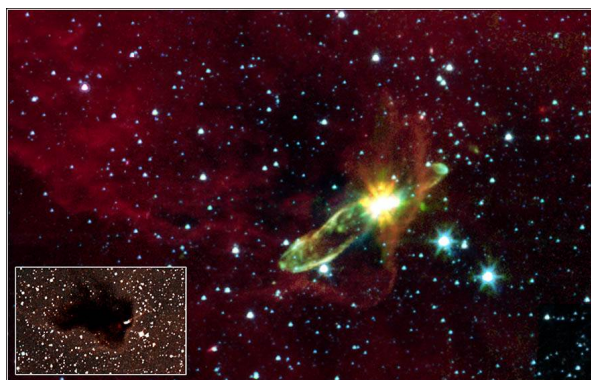
V centru protohvězdy se ustaví hydrostatická rovnováha. Ta ovšem neplatí v celém tělese a není zde ustavena ani rovnováha tepelná. Zatímco v centru protohvězdy a jejím blízkém okolí se při teplotě vyšší než 2 000 K vypaří prachové částice, na vnějších oblastech zůstávají podstatně chladnější. Protože protohvězda je stále „uložena“ hluboko v nitru zárodečné látky, lze ji pozorovat jen v infračervené oblasti spektra (viz obrázek 18.7).

Průběh kolapsu zárodečné látky a vznik protohvězdy ovlivňuje nejen gravitace ale i působení dalších sil. Při smršťování zárodečného materiálu se zachování moment hybnosti, to znamená, že celý fragment se se zmenšujícím rozměrem více roztáčí. Částice v oblasti pólů pak padají jen volným pádem,



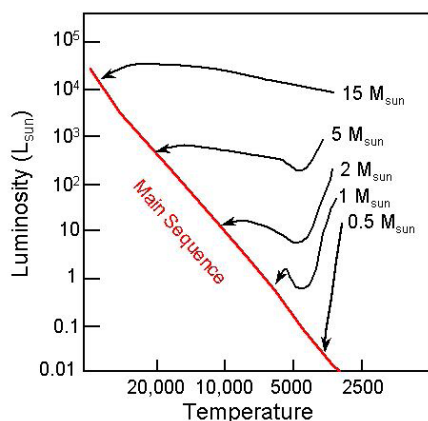
Obrázek 18.9: Na záběrech z HST jsou blízké disky kolem vznikajících hvězd. Všechny snímky mají stejné měřítko, každý z nich ukazuje oblast asi 20krát větší než je průměr oběžné trajektorie Neptunu. Zdroj: NASA.

právě vznikají nové hvězdy. Pro astronomy fungují jako signální majáky, ale pro samotnou protohvězdu slouží k odklizení přebytečné hmoty a energie ze systému. Nepotřebovaný materiál v okolí vznikající hvězdy je zlikvidován zhruba do 6 milionů let. Část spadne na protohvězdu, část poslouží k formování planetární soustavy a zbytek je později odvanut z okolí hvězdy po zapálení jaderných reakcí v jejím centru.



Obrázek 18.10: HH 46/47 je jeden mladých hvězdných objektů (YSO), které vytvářejí bipolární výtrysky. Centrální protohvězda leží v tzv. Bokově globuli, ve vizuální oblasti není pozorovatelná (vložený obrázek). Zdroj: NASA.

### 18.2.2 Od protohvězdy k hvězdě hlavní posloupnosti



Obrázek 18.11: Vznikající hvězdy v HR diagramu v Kelvinově - Helmholtzově kontrakční fázi. Zdroj: <http://www.astronomy.ohio-state.edu/>.

Protohvězdy září, protože jsou teplejší než okolí, ale většina tohoto záření přichází z jejich disků. Centrální teplota je stále příliš malá na to, aby zde probíhaly jaderné reakce, takže jediným zdrojem, který dotuje energetické výdaje protohvězdy, je akrece. Na rozdíl od předchozí fáze rychlé kontrakce, nyní probíhá smršťování podstatně pomaleji. Období vývoje hvězdy od počátku této fáze až po dosednutí na hlavní posloupnost nulového stáří ZAMS<sup>5</sup> se označuje jako Kelvinova-Helmholtzova kontrakční fáze. Zdrojem energie pro zahřívání protohvězdy a její vyzařování je gravitační kolaps a tedy potenciální energie. Podle viriálového teorému se polovina takto získané energie vyzáří a polovina využije ke zvýšení vnitřní energie systému, tedy k jeho zahřátí. Porovnáním vyzářené energie  $L$  a potenciální energie zárodečného chomáče hmoty o poloměru  $R$  a hmotnosti  $M$  lze odvodit délku

<sup>5</sup>Běžně užívaný akronym vznikl z anglického označení Zero Age Main Sequence, tedy skutečně hlavní posloupnost nulového stáří.

Kelvinovy-Helmholtzovy kontrakční fáze

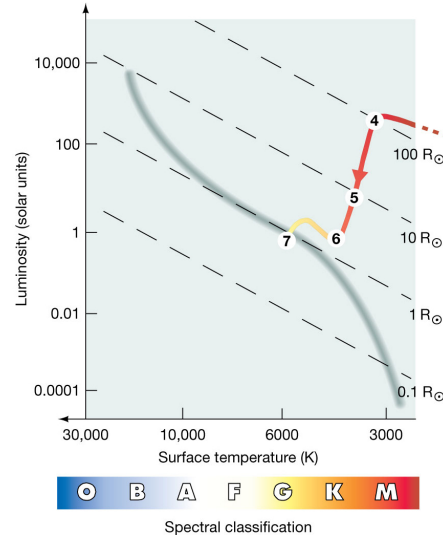
$$\tau_{\text{KH}} \propto \frac{M^2}{RL}. \quad (18.3)$$

Pro hvězdu o hmotnosti Slunce je to přibližně  $3 \cdot 10^7$  let. V průběhu této fáze dochází k důsledku smršťování k dalšímu růstu hustoty a teploty v centru. Při dosažení teploty zhruba 0,5 až 5 milionů kelvinů se nitru vznikající hvězdy zapalují první jaderné reakce, při nichž postupně v relativně krátké době vyhoří deuterium, lithium a bór. Nejedná se ale o stabilní jaderné reakce. Jejich výsledkem je jednak vznik hélia a jednak zpomalení kontrakce hvězdy<sup>6</sup>. Budoucí hvězda o velikosti Slunce má rozměry srovnatelné s oběžnou trajektorií Merkuru a zářivý výkon zhruba  $1\,000 L_{\odot}$ , a to i přesto, že povrchová efektivní teplota  $T_{\text{eff}}$  je ve srovnání se Sluncem jen poloviční (kolem 3 000 K).

Kelvinova-Helmholtzova časová škála také v podstatě určuje čas, za který se vznikající hvězda dostane v HR diagramu na hlavní posloupnost (viz obrázek 18.11). Část této cesty v HR diagramu absolvuje protohvězda po tzv. Hayashiho stopě, jak je vyznačeno mezi body 4 až 6 na obrázku 18.12. Protohvězda se v této fázi vývoje stále smršťuje až na velikost zhruba desetinásobku dnešní velikosti Slunce<sup>7</sup>. Centrální teplota dosáhne  $5 \cdot 10^6$  K, ale žádné trvalé jaderné reakce v centru neprobíhají. Na povrchu se ustálila teplota na 4 000 K, dále už téměř neroste. Se zmenšujícím se poloměrem to znamená, že zářivý výkon klesá až na zhruba  $10 L_{\odot}$ . V HR diagramu tak protohvězda „klesá“ dolů do oblasti nižších zářivých výkonů, ale při zachované povrchové teplotě (obrázky 18.11, 18.12). Tento proces trvá zhruba jeden milion let.

Podmínky ve hvězdě vedou nyní k tomu, že materiál protohvězdy je prakticky neprůhledný, energie se přenáší mohutnou konvekcí, která zasahuje celý objekt. Protohvězda je tak dokonale promíchána a je chemicky stejnorodá. Konvekce ale s sebou nese velmi silnou povrchovou aktivitu a silný hvězdný vítr. Protohvězda se v této fázi vývoje podobá objektu T Tauri, proto je jako fáze T Tauri někdy označováno celé toto období vývoje.

Ani ve stádiu T Tauri není v centru vznikající hvězdy dostatečná teplota k zapálení a trvalému udržení jaderných reakcí. Pro její dosažení je v této fázi možná překvapivě dostatečně intenzivní vyzařování z povrchu. Do okolního prostoru odchází část tepelné energie z nitra a tato ztráta umožní, aby gravitační smršťování pokračovalo. Zisk energie z gravitačního kolapsu se přitom dělí rovným dílem. Jak víme, dle viriálového teorému



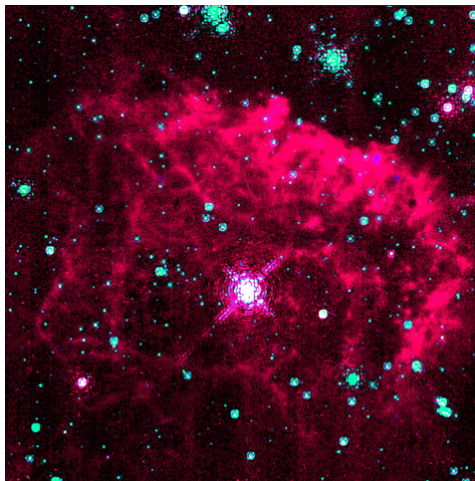
Obrázek 18.12: Vývojová cesta nově vznikající hvězdy HR diagramem. Úsek mezi body 4 až 6 nazýváme Hayashiho vývojová stopa. Vpravo od této linie je v HRD oblast, kde nemůže existovat stabilní objekt. Zdroj: Chaisson & McMillan (2005).

<sup>6</sup>Pro zárodky nízké hmotnosti vede dokonce k zastavení kontrakce.

<sup>7</sup>Připomínáme, že stále v této části hovoříme o vzniku hvězdy srovnatelné se Sluncem nebo chcete-li o vzniku Slunce. Pro menší nebo větší hvězdy budou uváděné údaje samozřejmě odlišné.

se polovina vyzáří a polovina použije na zvýšení vnitřní energie. Po zhruba 30 miliónech let se hvězda srovnatelná se Sluncem dopravuje k centrální teplotě vyšší než 10 milionů kelvinů a to už stačí pro trvalé hoření vodíku v proton-protonovém řetězci. Zapálením těchto reakcí se zrodila nová hvězda. Její hmotnost je zhruba sluneční<sup>8</sup>, poloměr je o málo větší (zhruba 1 000 000 km) a povrchová teplota menší (4500 K), než jaké má Slunce dnes. Také zářivý výkon je kvůli chladnější fotosféře menší, jen asi dvě třetiny současného zářivého výkonu Slunce. Hvězda se nyní nachází v bodě 6 na HR diagramu na obrázku 18.12. Zatím ještě stále není plně v hydrostatické rovnováze, její vnitřní stavba dosud není ukončena. Stačí ale nějakých 30 miliónů let, aby v jádru dosáhla hustota  $10^5 \text{ kg/m}^3$ , teplota  $15 \cdot 10^6 \text{ K}$  a povrchová teplota vystoupala na přibližně 6 000 K. Hvězda už není plně konvektivní, energie z nitra se předává zářivou difúzí. V celé hvězdě se konečně ustaví hydrostatická a tepelná rovnováha. Hvězda dosedla na hlavní posloupnost, přesněji na hlavní posloupnost nulového stáří (viz bod 7 na obrázku). Její parametry odpovídají zhruba současným parametrům Slunce. Po dobu na hlavní posloupnosti se budou měnit jen velmi, velmi zvolna.

Celý vývoj hvězdy slunečního typu od počátečního mračna a jeho fragmentace až po dosažení hlavní posloupnosti (etapy 1-7) trval 40-50 miliónů let, což z předpokládané celkové doby života Slunce kolem 10 miliard let představuje méně než jedno procento. Pro lepší představu, pokud bychom celý život Slunce smrskli do jediného dne, pak počáteční fáze jeho vývoje až po hlavní posloupnost by trvaly jen 6 až 7 minut.



Obrázek 18.13: Pistolová hvězda na snímku pořízeném HST pomocí infračervené kamery. Hvězda je blízko středu Galaxie ukryta v závoji mezihvězdného plynu a prachu. Nicméně její zářivý výkon je  $10^7 L_{\odot}$ . Zdroj: NASA.

## 18.3 Protohvězdy rozdílné hmotnosti

Předchozí popisu vzniku hvězdy byl zejména popisem hvězdy srovnatelné se Sluncem. Podívejme se nyní trochu podrobněji na zvláštnosti vývoje hvězd s menší a větší počáteční hmotností.

<sup>8</sup>Pořád uvažujeme hvězdu, která je srovnatelná se Sluncem, nebo chcete-li mluvíme o vzniku Slunce.

### 18.3.1 Protohvězdy s nadváhou

Začneme s nadprůměrnými hvězdami. Mírně nadprůměrné je i naše Slunce, ale teď budou zajímat opravdoví cvalíci mezi hvězdami. Obecně platí, že čím je počáteční hmotnost hvězdy větší, tím kratší život ji čeká a tím rychleji probíhá jednotlivá období svého života. Celkový čas od počáteční fragmentace oblaku až po dosednutí hvězdy na hlavní posloupnost je například pro hvězdu o hmotnosti  $3 M_{\odot}$  asi 50krát kratší než pro Slunce, tedy necelý milion let. Pro hvězdu o hmotnosti  $30 M_{\odot}$  však počáteční vývojové fáze zaberou méně než 10 000 let. Pro takové hvězdy gravitační kolaps způsobí nárůst centrální teploty až na desítky milionů kelvinů, takže dojde rychle k zapálení vodíku a jeho hoření v proton-protonovém řetězci a posléze i v CNO cyklu. Masivní hvězda se tak velmi rychle rozzáří, ionizuje látku a odfoukne zbylý materiál ze svého okolí.

Horní hranice hmotnosti hvězd se udává různě, většinou v rozmezí  $100\text{--}150 M_{\odot}$ . Má se totiž za to, že pro objekty nad touto hranicí by jádro bylo příliš žhavé, takže by gradient tlaku záření překonal gravitaci, hvězda by se stala nestabilní a sama by se začala rozpadat na menší části. Velmi hmotné hvězdy jsou v naší galaxii velmi vzácné. Mezi supertěžké hvězdy v naší Galaxii patří například hvězda WR 102ka s hmotností větší než  $150 M_{\odot}$ ,  $\eta$  Carinae nebo Pistolová hvězda na obrázku 18.13. V sousední galaxii Velkém Magellanově mračnu nalezneme ale celou hvězdokupu obřích hvězd R136. Nejtěžší hvězdy zde přesahují výše zmíněný limit velmi výrazně - R136a1 má mít hmotnost  $265 M_{\odot}$ , R136a2  $195 M_{\odot}$  a R136c  $175 M_{\odot}$ . Jde o trojlístek nejhmotnějších dosud známých hvězd ve vesmíru.



Obrázek 18.14: Jen asi 100 000 let stará hvězdokupa R136 tvořená velmi hmotnými hvězdami v mlhovině Tarantule v LMC obsahuje nejhmotnější známou hvězdu R136a1, která je 265krát těžší než naše Slunce. Zdroj: ESO, Crowther et al. (2010).

### 18.3.2 Subtilní protohvězdy

V případě hvězd o hmotnosti menší než sluneční, tedy pro průměrné hvězdy naší galaxie a menší, platí stejná závislost rychlosti vývoje na počáteční hmotnosti. Zatímco gravitační kolaps Protoslunce trvá asi 30 milionů let, pro hvězdy s hmotností  $0.2 M_{\odot}$  až 1 miliardu let! Nárůst teploty v centru je při takto pomalé kontrakci velmi pozvolný.



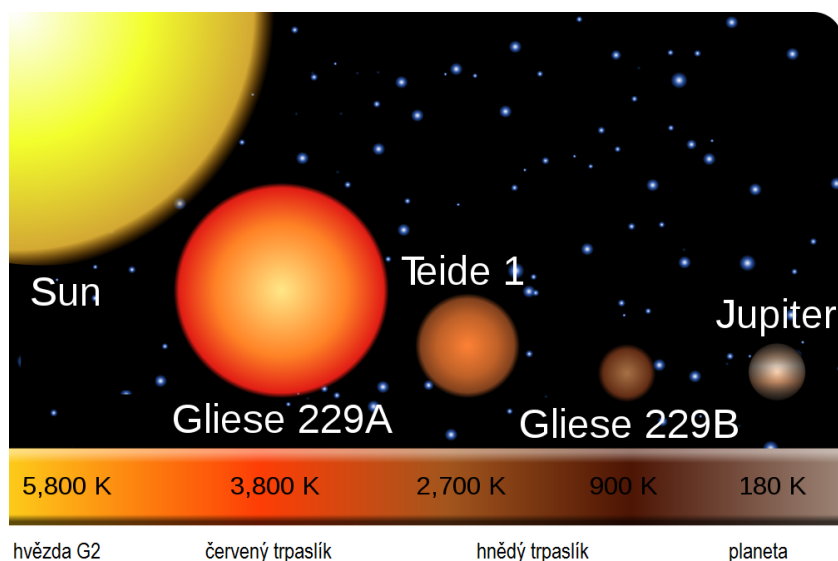
Jakmile ale teplota jádra dosáhne přibližně  $10^7$  K, spustí proton-protonový řetězec hoření vodíku. Hvězdný vítr pak odváne zbytky zárodečného kokonu hvězdy i hvězdného disku a hvězda zvolna dosedá na hlavní posloupnost.

### 18.3.3 Objekty pod míru

Smůlu mají objekty, které mají hmotnost zhruba  $0.075 M_{\odot}$  a menší. Jsou totiž tak malé, že se v jejich jádru nikdy nezapálí jaderné reakce, při nichž by došlo k syntéze vodíku. Nemůžeme zde mluvit o jaderném hoření jako u objektů s větší hmotností. V objektu o hmotnosti do zhruba 80 hmotností Jupiteru se může spalovat lithium, případně deuterium, ale jen krátkodobě a navíc k energetické produkci objektu to přispívá jen minimálně. Hlavním zdrojem energie je energie získaná z gravitačního kolapsu.

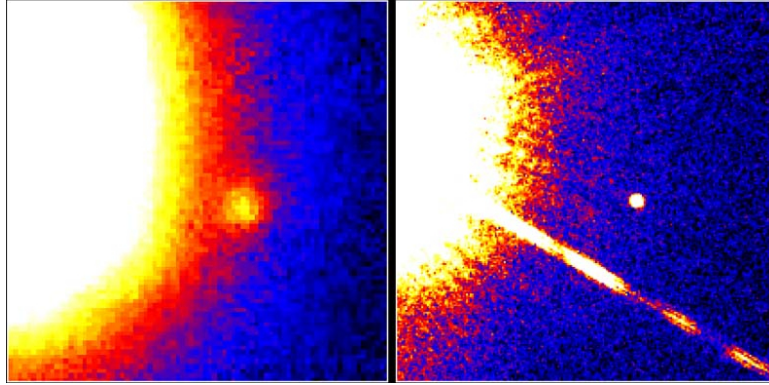
Objekt, o kterém nyní mluvíme, označila před lety Jill Cornell Tarterová jako *hnědý trpaslík*<sup>9</sup>. Hnědí trpaslíci se tedy mohou podobat „superjupiterům“ z rodiny exoplanet, ale existuje tu hranice, která obě skupiny těles odděluje. Přestože se o podobu hranice mezi exoplanetami a hnědými trpaslíky vedou spory, všeobecně se akceptuje jako limitní hmotnost  $13 M_J$ . Objekty s hmotností menší pak řadíme mezi exoplanety.

Přestože se o objektech s hmotností hnědých trpaslíků začalo spekulovat v 60. letech minulého století, k objevu prvních exemplářů došlo až v polovině 90. let – Teide 1 (Rebolo et al., 1995), Gliese 229B (Nakajima et al., 1995). Detekce hnědých trpaslíků je velmi obtížná, protože jsou velmi slabí a září v infračervené oblasti spektra. V současné době je jich známo několik set, ale s rozvojem pozorovací techniky počet rychle roste.



Obrázek 18.15: Porovnání velikostí Slunce, hnědých trpaslíků Gl 229B, Teide 1 a Jupiteru. Převzato z NASA a upraveno.

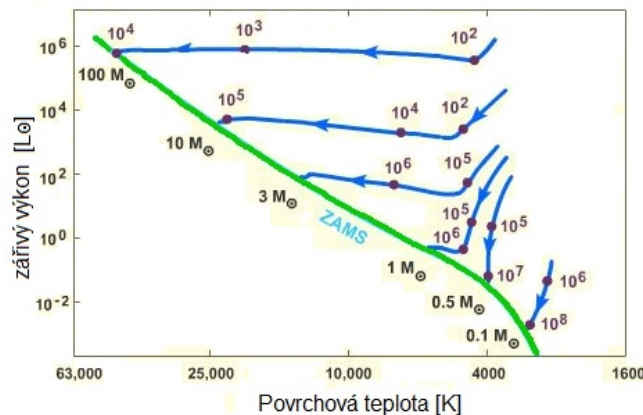
<sup>9</sup>Autorka termínu se dlouhá léta věnovala hledání mimozemských civilizací a stala se také předobrazem hlavní hrdinky románu Carla Sagana a posléze i stejnojmenného filmu Kontakt.



Obrázek 18.16: První snímky hnědého trpaslíka pořízené na observatoři Mount Palomar (27. 10. 1994, vlevo) a HST (17.11.1995, vpravo). Hnědý trpaslík Gliese 229B (GL229B) je malý souputník chladné trpasličí hvězdy Gliese 229, která se nachází ve vzdálenosti 19 ly od Země v souhvězdí Zajíce. V době objevu byl tento hnědý trpaslík nejslabším pozorovaným objektem, který obíhá hvězdu. Zdroj: NASA.

## 18.4 Hvězdy na hlavní posloupnosti

Poloha hvězdy na HR diagramu do značné míry vypovídá o jejím vývojovém stádiu. Mladé hvězdné objekty (YSO) se pohybují v pravé horní části HRD a dle své počáteční hmotnosti buď klesají po Hayashiho linii dolů k hlavní posloupnosti nebo se k ní přibližují zprava (viz obrázek 18.17). Dosednutí hvězdy na hlavní posloupnost HR diagramu, resp. hlavní posloupnost nulového stáří ZAMS, signalizuje, že se ve hvězdě ustavily rovnovážné stavy. Ve hvězdě nyní panuje hydrostatická rovnováha, při níž je působení gravitace a gradient tlaku v rovnováze, hvězda se tak ani nerozpíná ani nesmršťuje. Jaderné hoření vodíku v jádru jako hlavní a v podstatě jediný zdroj energie napomohlo ustavení energiové rovnováhy, kdy přenos energie z jádra a její vyzáření je v rovnováze s produkcí energie. Jinak řečeno, ztráty energie hvězdy vyzářováním do okolí jsou velmi přesně nahrazovány produkcí energie v nitru. Vyrábí se přesně tolik energie, kolik je třeba.



Obrázek 18.17: Fáze kontrakce hvězdy před hlavní posloupností. Převzato z webu <http://csep10.phys.utk.edu/> a upraveno.

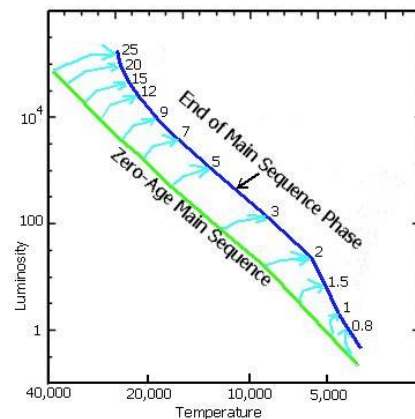
veličiny									jednotky	
$T_{ef}$	30	20	15	10	8	6	5	4	kK	
spekt	O5	B0	B5	A0	F0	G0	K0	M0		
$M_V$	-4	-2	0	2	4	6	8		mag	
$M_b$	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	mag
$L$	E5	E4	E3	E2	10	1		E-1	$L_S$	
$M$	30	20	10	5	3	2		0,6	$M_S$	
$R$	15	10	5	3,5	2			0,8	$R_S$	
$\rho$	0,02		0,1		0,3	0,5		2	$t \cdot m^{-3}$	
$\tau$	E6	E7	E8		E9		E10		E11	rok
$(B-V)$		-0,3		-0,2		0,0	0,2	0,5	1,0	mag

Obrázek 18.18: Parametry hvězd na hlavní posloupnosti. Hvězdy hlavní posloupnosti.  $T_{ef}$  efektivní teplota hvězdy, spektrální třída,  $M_V$  absolutní vizuální hvězdná velikost,  $M_b$  absolutní bolometrická hv. velikost,  $L$  zářivý výkon,  $M$  hmotnost,  $R$  poloměr,  $\rho$  střední hustota,  $\tau$  doba setrvání na hlavní posloupnosti,  $(B-V)$  barevný index. Převzato z Pokorný (2006).

Před stádiem hvězdy na hlavní posloupnosti se vlivem masivních konvektivních pohybů celá hvězda důkladně promíchala, můžeme tedy říci, že na počátku svého života má hvězda stejné složení ve fotosféře jako v nitru. Je to jediné období, kdy můžeme výsledky analýzy složení fotosféry hvězdy vztáhnout na celou hvězdu. Kdykoli později se tyto výsledky budou týkat výhradně jen atmosféry hvězdy, ale nikoli jejího nitra.

Na počátku je hvězda zpravidla tvořena z 60 až 90 procent z vodíku, 5 až 35 procent připadá na hélium a zbytek tvoří těžší prvky. Platí přitom, že, starší hvězdy mají zpravidla menší obsah těžších prvků, menší metalicitu. Od okamžiku zapálení jaderného hoření vodíku v nitru se ale postupně bude chemické složení hvězdy měnit. Můžeme říci, že právě změna chemického složení hvězdy je motorem dalšího vývoje.

Na hlavní posloupnosti hvězda stráví nejlepší léta svého života. Je to také nejdelší etapa její existence (až 85 %). Celkově jde o klidnou etapu bez nějakých překotných změn. Odpovídající charakteristiky hvězd hlavní posloupnosti lze najít na obrázku 18.18. Během pobytu na hlavní posloupnosti probíhá jaderné hoření vodíku v jádře. To způsobuje pozvolnou změnu chemického složení v jádře, kde ubývá vodíku a přibývá hélia. Velmi zvolna se mění také průměr a zářivý výkon hvězdy. Když se v nitru hvězdy zažehne jaderné hoření vodíku, hvězda dosedne na hlavní posloupnost nulového stáří ZAMS. Během pobytu na hlavní posloupnosti se hvězda pomalu posouvá napříč hlavní posloupností na její druhou stranu až k linii TAMS (z anglického Terminal-Age Main Sequence), vyznačující konec pobytu na hlavní posloupnosti a tedy konec vyčerpání vodíku v



Obrázek 18.19: Pohyb hvězdy po hlavní posloupnosti od ZAMS k TAMS. Zdroj: <http://www.uni.edu/morgans>.

jádře (viz obrázek 18.19). Dobu  $\tau_{\text{HP}}$ , kterou hvězda s počáteční hmotností  $M$  stráví na hlavní posloupnosti, lze přibližně určit dle vztahu

$$\tau_{\text{HP}} = 10^{10} \left( \frac{1}{M} \right)^{2.5}, \quad (18.4)$$

kde hmotnost udáváme v hmotnostech Slunce. Několik vypočtených hodnot pro různé hvězdy udává tabulka 18.2. Opět můžeme vidět silnou závislost délky fáze hlavní posloupnosti na počáteční hmotnosti hvězdy. Důvod je zřejmý. Hmotnost přece, jak víme, rozhoduje o tom, jaký bude tlak a teplota v nitru hvězdy, a určuje tak i rychlost jaderného hoření. Čím intenzivnější jsou jaderné reakce v nitru, tím rychleji se zásoba vodíku v jádru hvězdy vyčerpá.

Naše Slunce je hvězdou spektrální třídy G2V. Dle modelů hvězdné stavby a hvězdného vývoje je hvězdou v nejlepších letech. Má za sebou asi polovinu etapy na hlavní posloupnosti. Do kolony stáří můžeme zapsat 4.6 miliardy let.

Tabulka 18.2: Doba strávená na hlavní posloupnosti

Hmotnost [ $M_{\odot}$ ]	Spektrální třída	Doba strávená na HP [roky]
25	O7	$6.4 \cdot 10^6$
20	O9	$8.1 \cdot 10^6$
15	B0	$11.6 \cdot 10^6$
12	B1	$16.0 \cdot 10^6$
9	B2	$26.4 \cdot 10^6$
7	B4	$43.1 \cdot 10^6$
5	B6	$94.3 \cdot 10^6$
3	A0	$351.7 \cdot 10^6$
2	A5	$1.1 \cdot 10^9$
1.5	F2	$2.7 \cdot 10^9$
1	G2	$9.4 \cdot 10^9$
0.8	K0	$22.8 \cdot 10^9$

## 18.5 Vývoj hvězd po opuštění hlavní posloupnosti

Konec klidu na HP

kdy k němu dojde? – až začne docházet palivo!

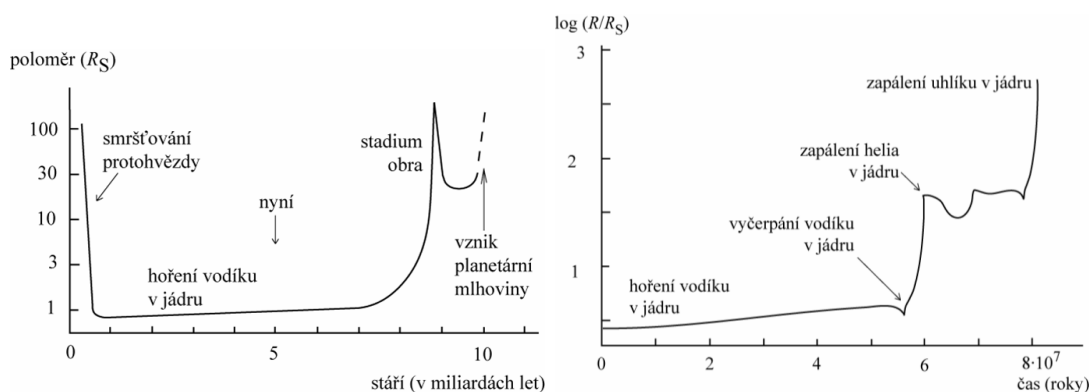
v centru jen cca 5 % H – > výrazné snížení výroby energie

=> smrštění jádra

=> místa s více H poklesnou hlouběji do teplejších míst

=> může se zapálit H ve slupce kolem jádra - *slupkové hoření vodíku*

Důsledky:



Obrázek 18.20: Změny velikosti Slunce a hvězdy o hmotnosti  $5 M_{\odot}$  v průběhu vývoje. Převzato z Pokorný (2006).

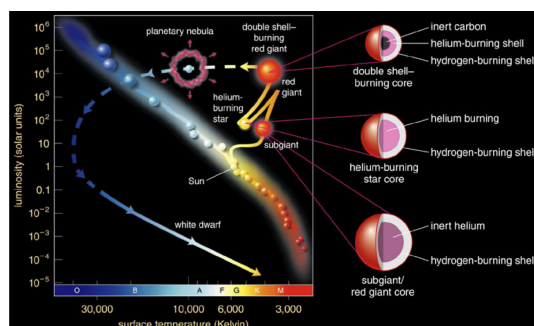
- jádro hvězdy - nadále se smršťuje a zahřívá – > vyšší produkce energie ve slupce
- obálka hvězdy – zvýšený tok energie zdola => rozpíná se a chladne => červený obr nebo veleobr (stěhování v HRD)

## 18.6 Závěrečná stadia vývoje hvězd

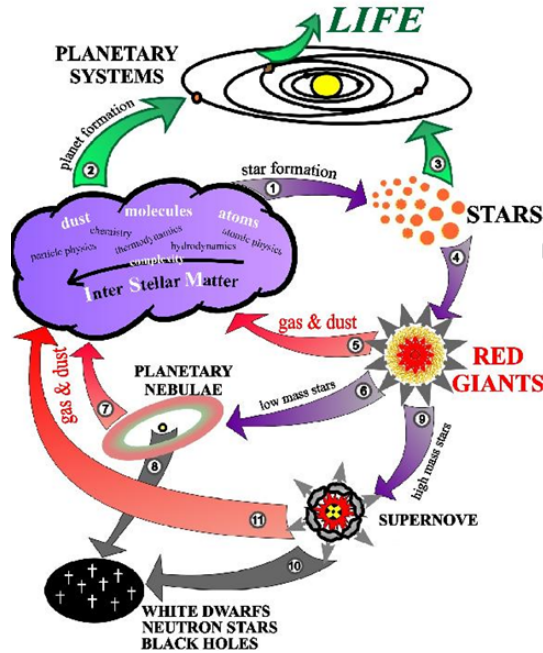
Hvězdní obři a veleobři

Senior zrychlí!

- ve fázi obra nebo veleobra - vývoj prudce zrychlí
- výrazné změny parametrů
- smršťování nitra hvězdy x rozpínání obálky
- při centrální teplotě  $\sim 100 \cdot 10^6$  K – He – > C ( $3\alpha$  proces)
- v obálce silná konvekce – silný hvězdný vítr – hvězda nestabilní (ztráty 30 - 85 % hmoty)



Obrázek 18.21: Vývojová stopa Slunce v HR diagramu po opuštění hlavní posloupnosti.



Obrázek 18.22: Schéma vývoje hvězdy.

## 18.7 Konečný osud hvězd

Osud – je dán hvězdě „do vínku“ – počáteční hmotnost

Závěrečná stadia:

- stabilní (rovnovážná) – černý trpaslík (ČT), bílý trpaslík (BT), (neutronová hvězda NH, kvarková hvězda KH)
- nestabilní (nerovnovážná) – novy, super- a hyper-

### 18.7.1 Stabilní řešení - chladnoucí trpaslíci

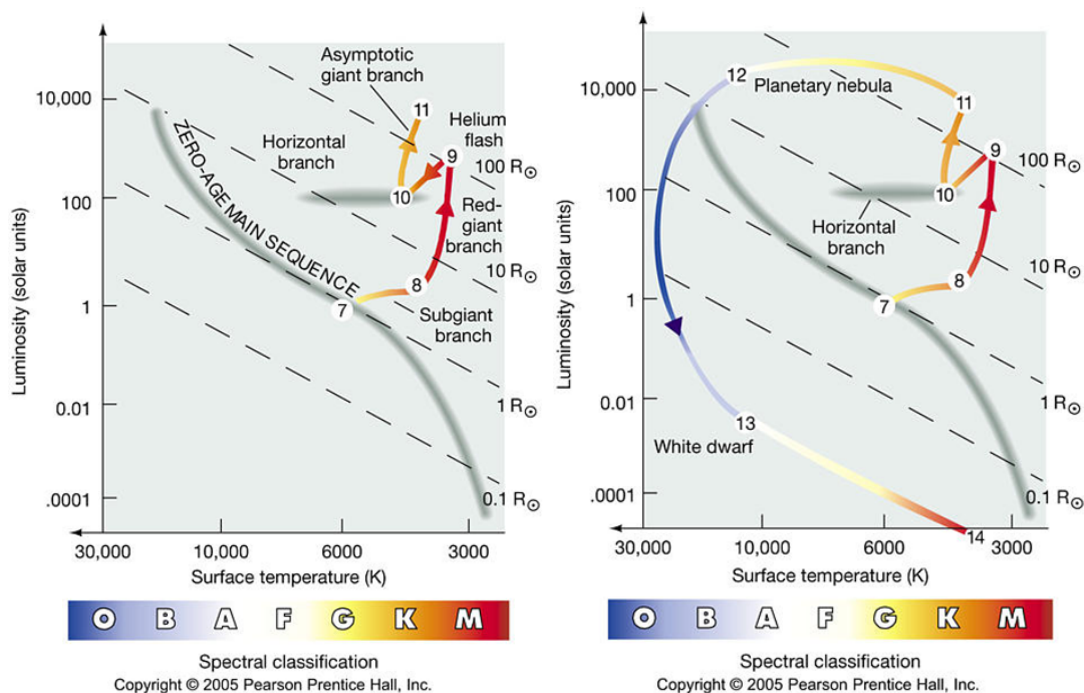
$M_{\text{poc}} < 0.075 M_{\odot}$  – hnědý trpaslík –  $\rightarrow$  vodíkový černý trpaslík

$0.075 < M_{\text{poc}} < 0.5 M_{\odot}$  – po vyhoření H v jádře –  $\rightarrow$  heliový černý trpaslík  
máme důkazy?

$0.5 < M_{\text{poc}} < 11 M_{\odot}$  – zapálí se H a později i He

- hvězdný vítr odnese obal, zůstává žhavé hutné CO jádro,  $M_j < 1.4 M_{\odot}$
- obálka – rozpínání - řádově  $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$
- za 10 000 až 50 000 let - planetární mlhovina
- jádro – BT chladne –  $\rightarrow$  černý CO trpaslík

$M_{\text{poc}} > 11 M_{\odot}$  – postupně hoří v nitru i další prvky – až po Fe jádro  
NH, ČD – vznik dramatický  $\Rightarrow$  nestabilní řešení



Obrázek 18.23: HRD - vývojové stopy hvězd po opuštění HP.

Subrahmanyan Chandrasekhar

obrázky - Planetární mlhoviny mají často velice zvláštní tvary, M27, M57

V naší Galaxii – jen asi 1500 planetárních mlhovin

Proč tak málo?

je to velmi krátké vývojové období

krátké období, jako když se línne kuře ze skořápky

## 18.7.2 Nestabilní řešení - supernovy, hypernovy

$M_{\text{poc}} > 11 M_{\odot}$  (ve stadiu obra  $M > 8 M_{\odot}$ )

- v jádru se postupně zapalují jaderné reakce až po Fe ( $1.4 M_{\odot} < M_j < 3 M_{\odot}$ )
- centrální oblasti zhroucení → neutronová hvězda (řádově 10 km,  $M_{\odot}$ )
- uvolněná energie – výbuch supernovy – většina energie v neutronech
- sup Ia – dvojhvězdný scénář – BT rozmetán – standardní svíčky
- pulsar – nesouhlas rotační osy a osy mg. pole - rádiové pulsy, přísně periodické

$M_{\text{poc}} > \text{cca } 50 M_{\odot}$  – Fe jádro  $M_j > 3 M_{\odot} \Rightarrow$  kolaps se nezastaví – vzniká černá díra - uvolněná energie – výbuch *hypernovy* - SN1998bw

Neutronová hvězda (pulsar) v Krabí mlhovině, která je pozůstatkem po výbuchu supernovy v roce 1054.



Obrázek 18.24: Vlevo nahoře: The Cat's Eye Nebula, one of the first planetary nebulae discovered, also has one of the most complex forms known to this kind of nebula. Eleven rings, or shells, of gas make up the Cat's Eye. Credit: NASA, ESA, HEIC, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) Acknowledgment: R. Corradi (Isaac Newton Group of Telescopes, Spain) and Z. Tsvetanov (NASA). Vpravo nahoře: M27. Uprostřed vlevo: NGC2392 Eskymak. Uprostřed vpravo: NGC 6751. Dole vlevo: M57. Dole vpravo: Dying Star HD 44179, the "Red Rectangle,"Sculpts Rungs of Gas and Dust

Zbytek po výbuchu supernovy v souhvězdí Labutě před asi 15 000 lety.

### Historické supernovy

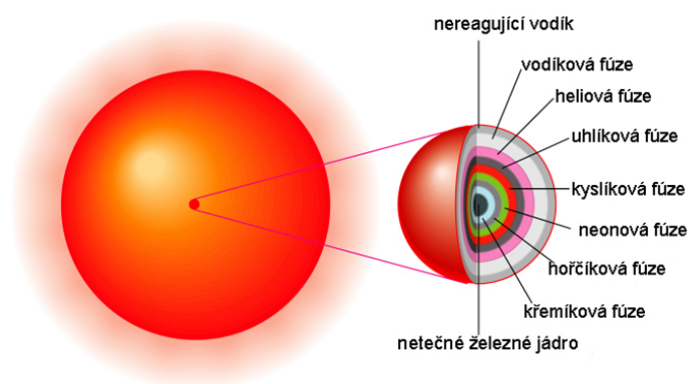
supernovy viditelné pouhýma očima - jen šest během n.l.

383 Sco

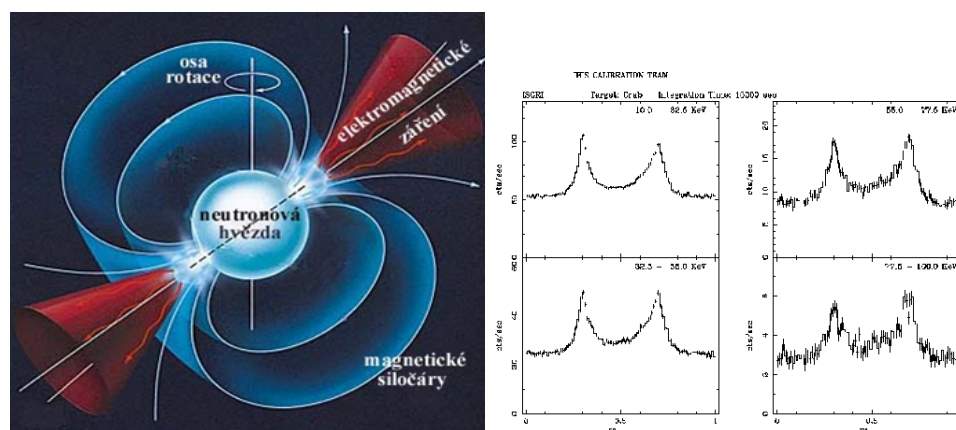
1006 Lup - nejjasnější

1054 Tau – nejslavnější - Krabí mlhovina s pulsarem





Obrázek 18.25: Slupky hoření.



Obrázek 18.26: Pulsar.

1572 Cas - Tychonova supernova

1604 Oph - Keplerova supernova

24. II. 1987 – Dor – LMC - v maximu 4 mag

kdy vybuchne další supernova, kterou uvidíme pouhýma očima?

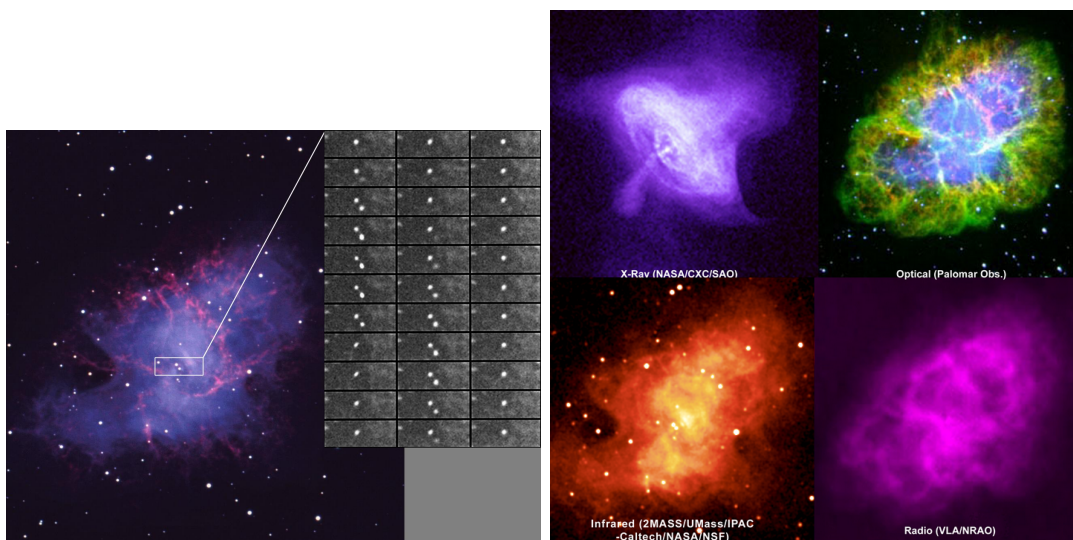
obrázky - detaily srdce M1, řasy v Labuti....

Kandidáti na supernovy

Betelgeuse

## 18.8 Zvláštnosti vývoje těsných dvojhvězd

O dvojhvězdách už bylo řečeno mnohé i v těchto skriptech, ale proč by měly mít dvojhvězdy nějaké zvláštnosti ve svém vývoji? Je třeba říci, že ke zvláštnostem ve vývoji dochází u těsných dvojhvězd, tedy takových, kde jsou složky dostatečně blízko, aby si lidově řečeno "lezli do zelí". Kolem každé hvězdy můžeme spočítat plochy se stejným gravitačním



Obrázek 18.27: Krabí mlhovina M1.

potenciálem. U kulové hvězdy je taková plocha také kulová. Přítomnost blízkého souputníka ale tuto plochu deformuje do podoby tzv. Rocheova laloku. Problém pak nastane v případě, že jedna složka dvojhvězdy během svého vývoje vyplní svůj Rocheovský lalok.

Podle vztahu složek dvojhvězdy ke svým Rocheovským lalokům dělíme dvojhvězdy na:

- oddělené/detached
- polodotykové/semi-detached
- kontaktní/contact (overcontact)
- double-contact (Wilson)

podle konfigurace systému (Kuiper, Kopal)

Rozdělení dvojhvězd - podle konfigurace a složek

těsná dvojhvězda – blízké složky, gravitací deformovaný tvar (výměna látky)

zákrytová dvojhvězda - vzájemné zákryty jednotlivých složek

typický představitel – např.  $\beta$  Per,  $\beta$  Lyr

vývojový paradox Algolu

Algol - těsná zákrytová dvojhvězda => známe rozměry a hmotnosti složek dvojhvězdy

1. složka - žhavá hvězda hlavní posloupnosti ( $5 M_{\odot}$ ),
2. složka - chladný obr ( $1 M_{\odot}$ ) (!)

v čem je paradox?

dvojhvězda => současný vznik obou hvězd => více hmotná by měla být dál ve vývoji

ALE NENÍ !

Vysvětlení - pes požírá psa! (John Crawford & Fred Hoyle) – vývojový scénář

- společný vznik => obě hvězdy v páru se vyvíjejí jako osamocené hvězdy
- hmotnější hvězda – rychlejší vývoj => začne se rozpínat – > vzniká obr, ale prostor omezen!

Rocheův lalok („šaty, které začínají být obrovi těsné“) - ekvipotenciální hladina deformována – vliv druhé složky a rotace => zploštělá kapka

- hmotnější složka vyplní Rocheův lalok – přetok hmoty k vývojově opožděné složce; na druhou složku přeteče až 80 % hmoty! => 2. složka nyní hmotnější (ale vývojově je opožděná – hvězda na HP)= stadium Algola
- nyní hmotnější hvězda zrychlí vývoj – > i ona se začne rozpínat – > vyplní svůj Rocheův lalok – přetok opačným směrem

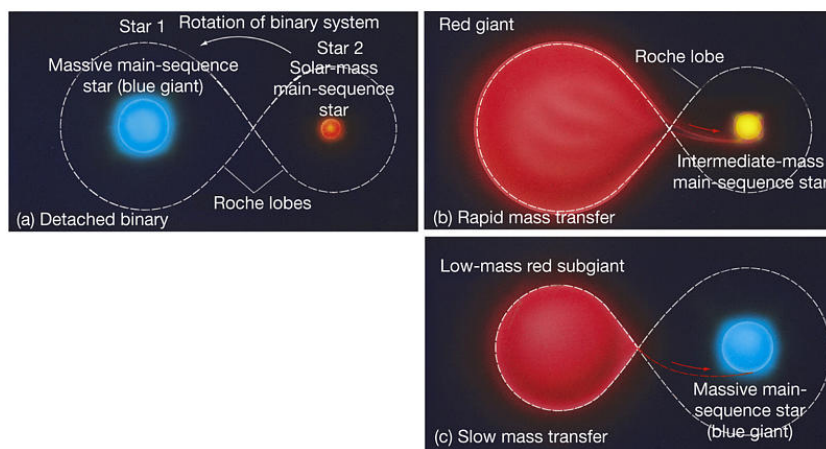
=> pes požírá psa

Zdeněk Kopal

KP Aql - oddělená soustava

AD Her - polodotyková soustava (algolida)

BX And - dotyková soustava



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

Obrázek 18.28: Dvojhvězdy.

## Přetok hmoty

hypotéza nebo prokázaný poznatek?

teorie výměny hmoty mezi složkami těsných dvojhvězd – prvotní nedůvěra

Mirek Plavec – jeden z prvních zastánců (v 60. letech 20. st.)

**Příčiny** – hvězdný vývoj, rozpínání hvězd (složek dvojhvězdy)

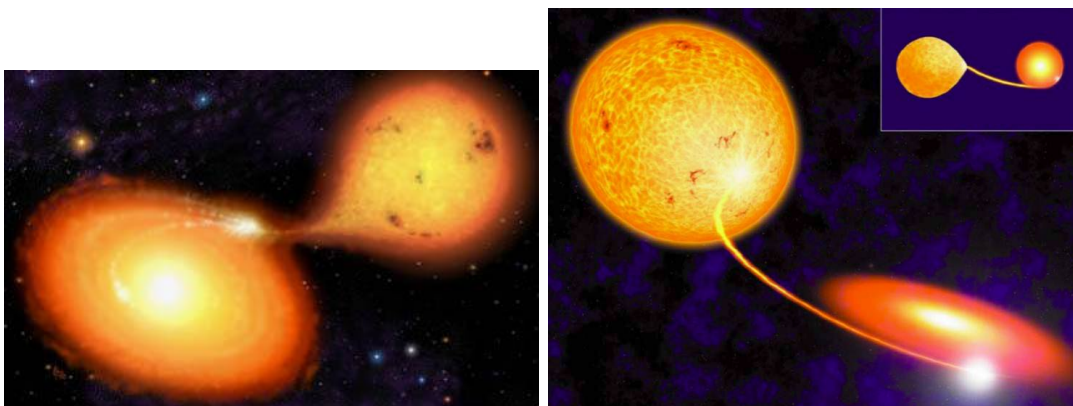
**Průběh** – i velmi rychlý, masivní

- dopad – přímo na souputníka

- do okolí – vznik akrečního disku, z něj hmota vypadává na souputníka, horká skvrna

**Důsledky (projevy)** – změna periody oběhu,

- změny jasnosti, projevy ve spektru



Obrázek 18.29: Přetok hmoty.

možnosti pozorování - sledování vývojových změn, změny period (O-C)

### 18.8.1 Novy

změna jasnosti - během několika dní se zjasní o 10 mag i více, a pak pozvolna (typicky během 40 dní) pokles na počáteční úroveň

1963 - Robert Kraft - novy = zvláštní typ těsných dvojhvězd

1 složka = bílý trpaslík - přetok hmoty na BT - pomalé (řád.  $10^4$  let) ukládání do povrchové vrstvy – > tlustá slupka na BT – > roste T, p – > zapálení termonukleární reakce – > výbuch – slupka zničena, BT zůstává - vše se může opakovat  
jiný scénář – *symbiotické proměnné hvězdy* - není třeba přetok přes  $L_1$  – stačí hvězdný vítr z červeného obra – > BT „vychytává“ hvězdný vítr – > spad na BT



Obrázek 18.30: Výbuch novy.

možnosti pozorování

Rekapitulace

vývoj hvězd = nevratný děj

protohvězda	počátek jad. hoření - hl. posloupnost	červený obr / veleobr	bílý trpaslík/černá díra
plod	od plenek k dospělosti	střední věk	stáří - smrt

Obrázek 18.31: Srovnání vývoje člověka a hvězdy.

recyklace – opětovné použití látky - hvězdný vítr, supernovy... myslící prach supernov

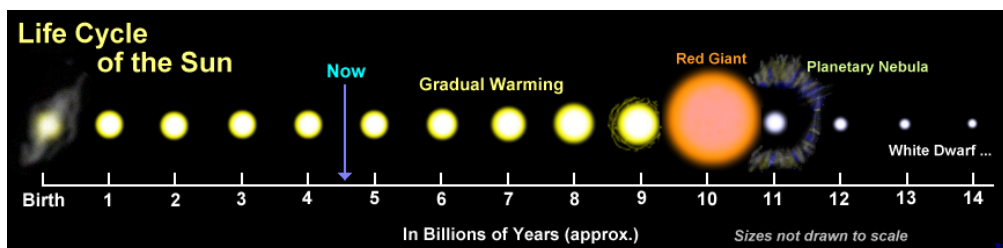
vývoj (osamocených) hvězd - určen změnami jejich chemického složení

jaderné reakce – příčina změn chemického složení =  $\dot{m}$  příčina vývoje hvězd - hlavní zdroj energie hvězdy POZOR – probíhají v nitru =  $\dot{m}$  =  $\dot{m}$  stav jádra určuje zářivý výkon, celkovou stavbu a vývoj!

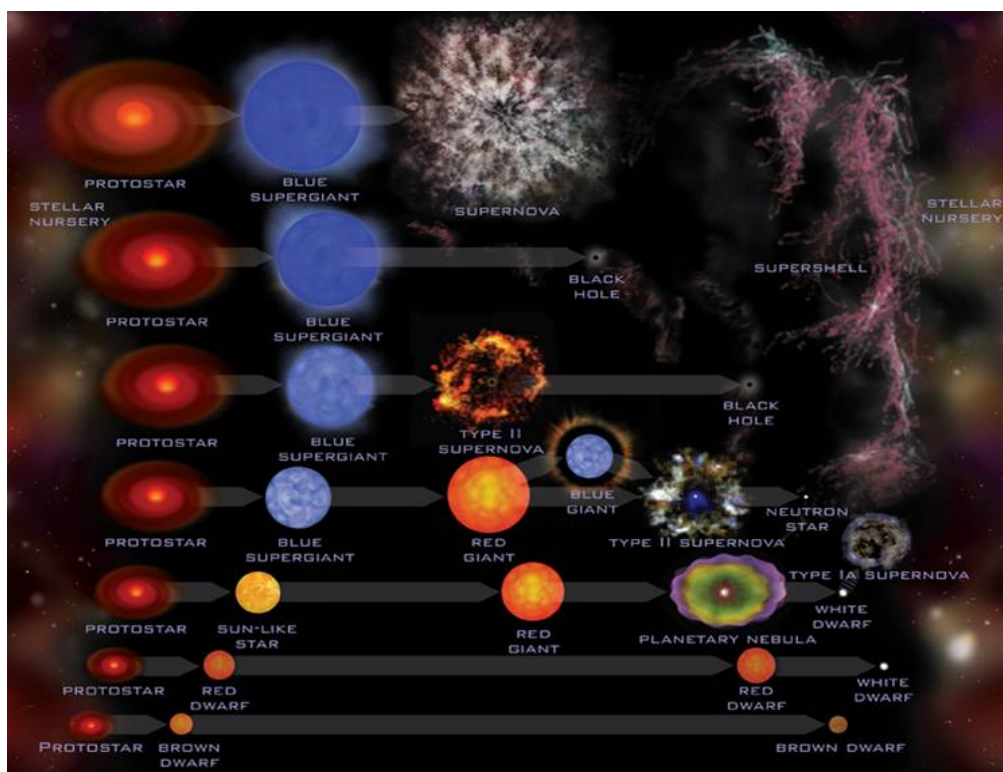
## Použitá a doplňující literatura

Crowther, P. A., Schnurr, O., Hirschi, R., et al. 2010, MNRAS 408, 731

Greene, T., 2001, American Scientist, 89, 316



Obrázek 18.32: Vývoj Slunce.



Obrázek 18.33: Vývoj hvězd.

Chaisson, E., & McMillan, S. 2010, *Astronomy Today*, 7th Edition, by E. Chaisson and S. McMillan. Prentice Hall, 2010. e-book, ISBN 978-0-321-73441-9, 0-321-73441-6, 850 str.

Chen, X., Arce, H. G., Zhang, Q., et al. 2010, *ApJ* 715, 1344

Kleczek, J., 2002, *Velká encyklopedie vesmíru*. Academia, 584 str.

Nakajima, T., Oppenheimer, B. R., Kulkarni, S. R., et al. 1995, *Nature* 378, 463

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

Rebolo, R., Zapatero Osorio, M. R., & Martín, E. L. 1995, *Nature* 377, 129

## 19 Hvězdná uskupení

Hvězdy jsou základní stavební kameny ve vesmíru. Nejsou ve vesmíru rozmístěny rovnoměrně a nevyskytují se jen jednotlivě. Sdružují se a seskupují. Jejich uskupení čítají od dvou či několika členů až stovky miliard hvězd. Nejmenší jsou málopočetné skupiny hvězd, vlastně jakési vícehvězdy (dvojhvězdy, trojhvězdy,...) do deseti členů. Větší soustavu hvězd už nazveme hvězdokupou. Menší počet členů (běžně stovky až tisíce) mají zpravidla otevřené hvězdokupy nepravidelného tvaru. Naopak větší, hmotnější a většinou starší jsou kulové hvězdokupy. Ještě větší soustavy hvězd pak vytváří galaxie, ale o nich si povíme až v následující kapitole.



Obrázek 19.1: Představa vícenásobné hvězdné soustavy.

### 19.1 Málopočetné skupiny hvězd – hvězdné soustavy (multiple stars)

Výskyt hvězd ve vícenásobných soustavách velmi úzce souvisí s mechanismem jejich vzniku, zejména s procesem dělení původního zárodečného materiálu, molekulového mračna (viz kapitola 18). O dvojhvězdách se se již zmiňovali dříve. Připomeňme si alespoň několik nejznámějších dvojhvězdných soustav. U Síria a následně Prokyonu byl v 19. století poprvé jako souputník přímo pozorován bílý trpaslík. Mira Ceti je sice typickou představitelkou dlouhoperiodických pulzujících proměnných hvězd a zřejmě první periodicky proměnnou hvězdou známou v novodobé historii, ale kromě toho všeho se jedná i o dvojhvězdu. A doplňme ještě  $\epsilon$  Aurigae, zákrytová dvojhvězda s dosud nejdelší známou oběžnou periodou xxxx dní.

Mezi trojhvězdami nás zaujme Polárka a pak také nejbližší hvězdný soused Slunce, soustava  $\alpha$  Cen, která je složena z hlavní dvojhvězda, páru žlutých trpaslíků (složky A+B) a červeného trpaslíka Proxima Centauri, který je momentálně vůbec nejbližší hvězdou ke Slunci. Vzdálenost mezi složkami trojhvězdy A a B je 11 au a mezi tímto párem a Proximou 15 000 au.

HD 188753 – trojhvězda (3 trpaslíci) 149 ly od Země- zjistit konfiguraci???????

čtyřhvězda (quadruple) - 4 Cen

Mizar - Castelli a Galileo, později spektroskopie Mizaru A a B => obě dvojhvězdy  
HD 98800,  $\varepsilon$  Lyr, V994 Her

pětihvězda (quintuple) - 91 Aqr,  $\delta$  Ori,  $\sigma$  Ori

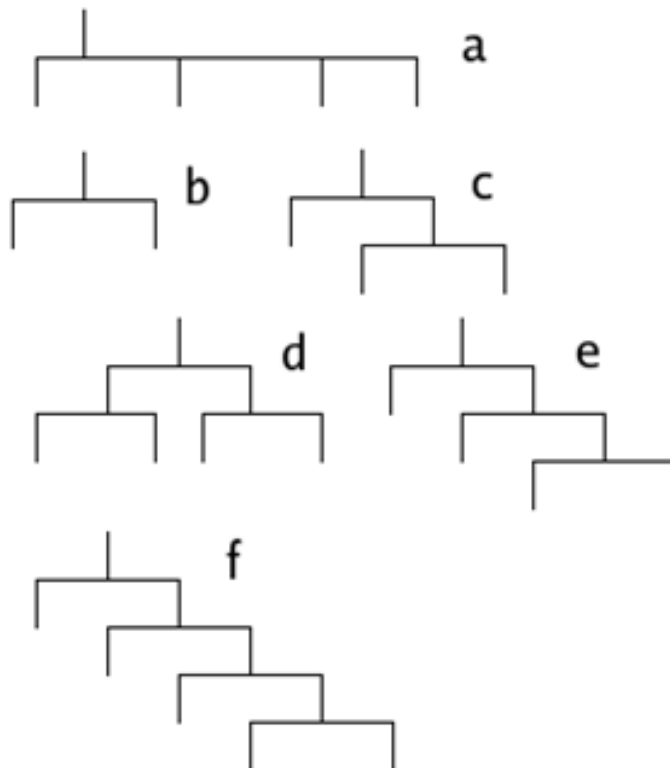
šestihvězda (sextuple)

- Castor (+YY Gem)

- HD 139691

- Alcor – je-li součástí systému Mizaru

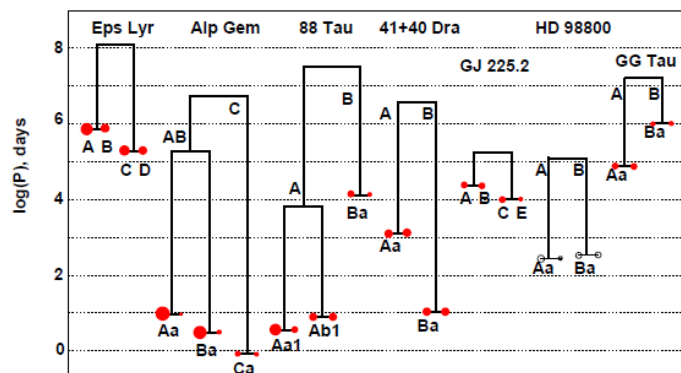
sedmihvězda (septuple)  $\nu$  Sco, AR Cas



Obrázek 19.2: Hierarchie.

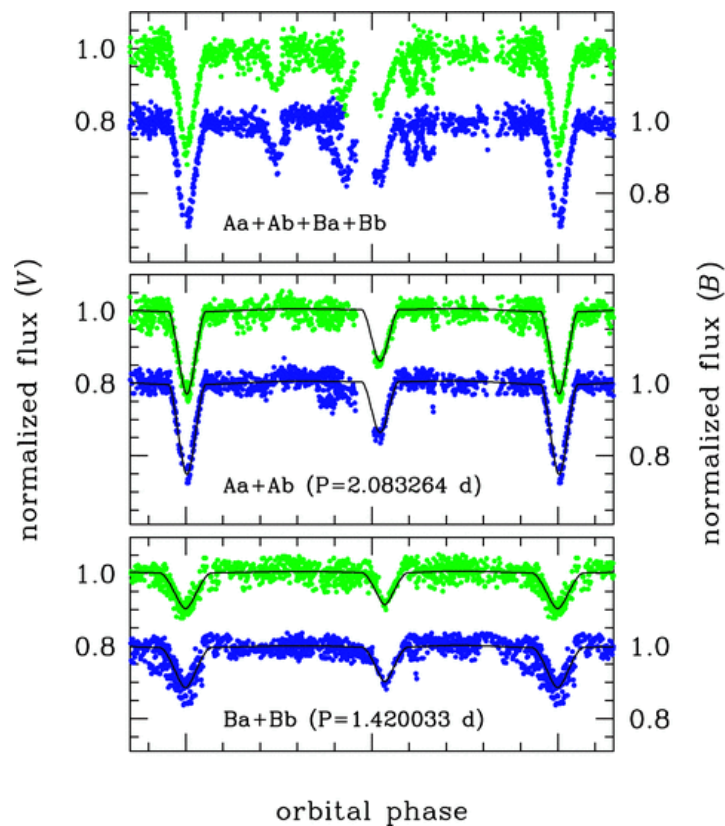
katalog vícenásobných soustav: Tokovinin  
neúplný - výběrové efekty  
výzkum pokračuje





Obrázek 19.3: Hierarchie soustav

V994 Her (Chung-Uk Lee et al.)



Obrázek 19.4: V994 Her

### 19.1.1 Dvojhvězdy

Úvod, výskyt dvojhvězd, těsné dvojhvězdy

odkaz na předchozí kapitoly 15, 18

většina, více než 50 %, ... - úvod v knihách a člancích  
 o dvojhvězdách, např. J. Schombert - Univ. of Oregon - 85 % !  
 1983 – Abt – v okolí Slunce; 60-70 % hvězd – dvojhvězdy nebo vícenásobné systémy  
 2006 – Lada – většina hvězdných soustav (až 2/3) vytvořených v Galaxii jsou samotné hvězdy!  
 typická hvězda v Galaxii – červený trpaslík (RD)  
 jen u 43 ze 171 RD jako primárních složek dvojhvězd do 10 pc (32.6 ly) od Slunce je RD nebo hnědý trpaslík

2010 – Richichi et al. – zákryty hvězd Měsícem s VLT – ze 191 hvězd 16 dvojhvězd a 2 trojhvězdy

Rozmanitost světa dvojhvězd

doba oběhu: 321 s - soustava s 2 degenerovanými hvězdami (HM Cnc, 21 mag), 9,5 min (V407 Vul), 18 min (AM CVn), 46 min (GP Com), 4,7 h (UX UMa) - i 27,2 roku (e Aur)

poloosa trajektorie: a i 0,05 Ro  $\sim$  28 au a více

složky dvojhvězdy: jakýkoli typ hvězd, mrtvé nebo „živé“, mladé nebo staré, PMS, neutronové hvězdy, černé díry, planety a hnědí trpaslíci

zvláštnosti: akreční disky, plynné proudy, společné obálky

## 19.2 Hvězdokupy

hvězdná uskupení desítek až milionů hvězd  
 společný původ  
 gravitačně vázané  
 ale

méně početná uskupení (otevřené hvězdokupy, pohybové hvězdokupy, asociace) – dlouhodobě nestabilní, rozpadají se

Typy:

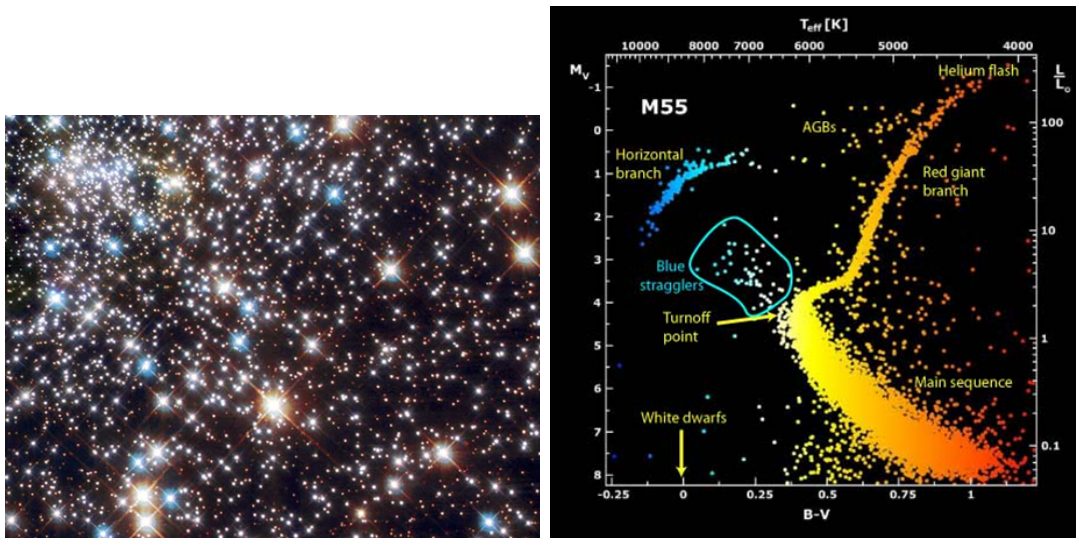
- kulové
- otevřené
- hybridní?

otevřené, kulové, pohybové - vývojové zvláštnosti, popis

### 19.2.1 Kulové hvězdokupy

- přibližně kulového tvaru
- počet hvězd – řádově  $10^4 - 10^6$
- průměr – 10 - 400 ly => malé vzdálenosti mezi členy => noční obloha na planetě v kulové hvězdokupě?
- stáří – 10 až 13 mld let
- členové: hvězdy s vyšším  $Z$  => staré hvězdy červené a žluté hvězdy o hmotnostech  $< 2 M_{\odot}$  => populace II
- výjimky – modří obři (blue stragglers, modří opozdilci) – různé teorie vzniku: splynutí hvězd, hvězdy zachycené hvězdokupou ...

gravitačně velmi silně vázané soustavy;  $10^4$  až  $10^6$  hvězd; výrazně kulovitý tvar a silná koncentraci ke středu; střední průměr cca 50 ly; asi 150 známých, v Galaxii odhadem 500 až 1000; např. 47 Tucanae, M 13 v Herkulovi, Omega Cen



Obrázek 19.5: Modří opozdilci v NGC 6397 a v HRD.

počet KH v Galaxii: 135, odhad cca 200  
distribuce KH v Galaxii: symetricky kolem středu v kouli o  $r = 70000$  ly, více směrem ke středu

KH v Galaxii, M31 vznik krátce po vzniku vesmíru x v LMC, SMC mnohem mladší

### 19.2.2 Otevřené hvězdokupy

- tvar nepravidelný
- počet hvězd – řádově desítky až stovky, výjimečně více
- průměr – 5 - 50 ly (většinou do 20 ly)



Obrázek 19.6: Credit: RUSSELL CROMAN/SCIENCE PHOTO LIBRARY Caption: Hercules globular cluster (M13), optical image. A globular cluster is a huge spherical grouping of old stars that orbits a galaxy, in this case our Milky Way. M13 is around 168 light years in diameter and lies 25,100 light years from Earth in the constellation Hercules. <http://www.sciencephoto.com/media/330923/enlarge> .



Obrázek 19.7: 47 Tuc.

- slabě gravitačně vázané => rozpadají se
- členové: mladé modré (zářivé) hvězdy – žijí krátce, ale OH se dříve rozpadne hvězdy populace I

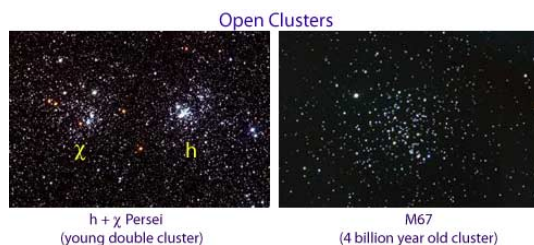
- obvykle desítky až stovky hvězd; průměr až 10 ly; 15 - 250  $M_{\odot}$ ; známých více než tisíc, ale odhadem v naší Galaxii až 100000;

nestabilní útvary, postupně se rozpadají; např. Plejády, Praesepe, dvojitá hvězdokupa  $\chi$  a h Per;

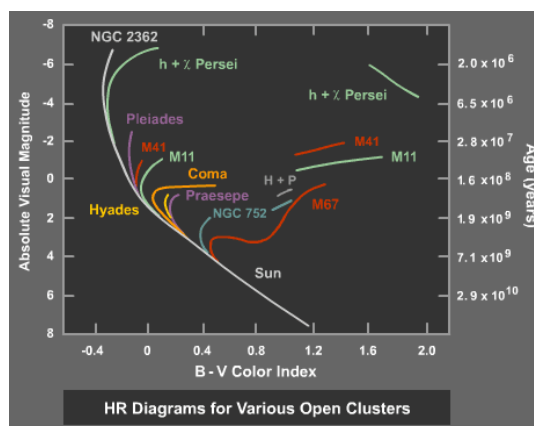
DAML02

počet OH v Galaxii: cca 2100, ale jen několik set prozkoumaných! - WEBDA umístění v Galaxii: galaktický disk

- třídy: 1. všechny hvězdy na HP (Plejády)  
 2. většina hvězd na HP, ale malá část už na větvi obrů (Jesličky)  
 3. starší žlutí a červení obři (M67)



Obrázek 19.8: OC



Obrázek 19.9: Barevný diagram otevřených hvězdokup.

### Vznik a vývoj otevřených hvězdokup

vznik – v oblastech tvorby hvězd (GMCs), probíhá neustále, např. v HII oblasti mlhoviny v Orionu

věk – většinou řádově miliony let, jen výjimečně delší než 1 mld let (hybridy?)

zánik – rozpadem – vlastní pohyby, působení okolí (slapy, srážky s mračny. . .)

- vypařováním

### 19.2.3 Hybridní? - zvláštní?

NGC 6791 - jedna z nejstarších a největších známých otevřených hvězdokup

ale !

počet hvězd – tisíce, jenže starých 8 miliard let!  
 navíc s vysokým obsahem těžších prvků!



Obrázek 19.10: Credit: N.A.Sharp/NOAO/AURA/NSF (left), Nigel Sharp, Mark Hanna/NOAO/AURA/NSF (right) Hyady a Plejady: Alson Wong.

ale staré hvězdy by mít  $Z$  malé (v Galaxii se kovy hromadí jen pomalu)!

NGC 6791 jedna z nejstudovanějších hvězdokup

možné vysvětlení: pochází ze středu Galaxie. . .



Obrázek 19.11: NGC 6791. <http://apod.nasa.gov/apod/ap000112.html> .

### 19.2.4 Hvězdné asociace

dvě možnosti

- hvězdokupy přestávají být gravitačně vázané a rozpadají se
- nově vznikající hvězdokupy – hvězdy mají podobné trajektorie v prostoru

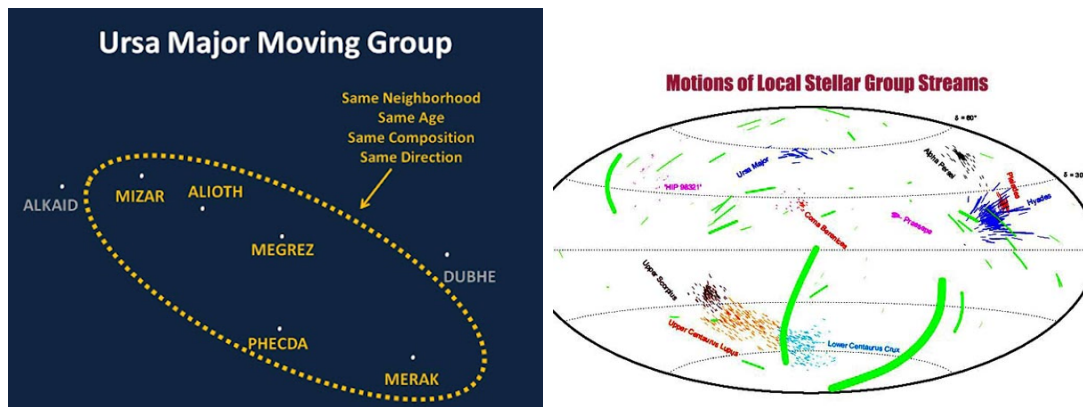
=> hvězdné asociace nebo pohybové hvězdokupy

pohybové hvězdokupy:

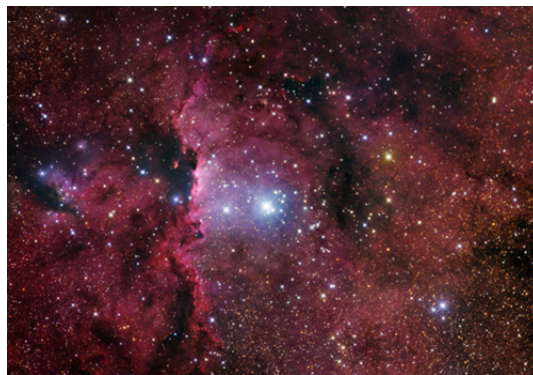
- Ursa Maior (Collinder 285) – hvězdy od Velkého Vozu, Cep až po TrA! Slunce uvnitř, ale není členem (jiná trajektorie, věk, chem. složení);
- Hyády;
- Jesličky a další

hvězdné asociace:

- O asociace – masivní hvězdy, např. v Orionu, středem Trapez
- OB asociace – nejbližší Sco-Cen asociace
- R asociace – hvězdy střední hmotnosti se zbytky původní látky (reflexní mlhoviny, např. Mon R2
- T asociace – hvězdy s malou hmotností v původní mlhovině (T Tauri)



Obrázek 19.12: Pohybové hvězdokupy



Obrázek 19.13: OB asociace Ara OB1.

## 20 Galaxie a galaxie

Galaxie představuje obrovský gravitačně vázaný, zpravidla vnitřně strukturovaný a organizovaný útvar tvořený hvězdami, mezihvězdným plynem a prachem a nezářivou látkou, skrytou hmotou. Počet takových útvarů ve viditelném vesmíru se odhaduje na řádově jeden bilión. Jak galaxie ke svému označení přišly jsme si prozradili už v kapitole 5.3. Nás ale bude v první řadě zajímat ta soustava, ve které se nachází naše Slunce.

### 20.1 Naše Galaxie se představuje

Připomeňme, že galaxii, ve které se nachází Slunce, označujeme jako naše Galaxie. Naproti tomu Mléčná dráha je jen nádherný stříbřitý pás na temné noční obloze, který je tvořen hvězdami naší Galaxie. Je to jen boční pohled na naši Galaxii.



Obrázek 20.1: Mléčná dráha nad Atacamskou pouští v Chile. Zdroj: ESO/Y. Beletsky.

Výklady, co je vlastně Mléčná dráha najdeme ale různé. Pomineme nyní krásnou řeckou báji o vzniku Mléčné dráhy (viz kapitola 5.3). Aristoteles ve čtvrtém století před naším letopočtem ve svém díle „Meteorologica“ psal, že před desítkami let Anaxagoras a Démokritos vyslovili názor, že Mléčná dráha je tvořena mnoha hvězdami. Aristoteles sám však považoval Mléčnou dráhu za meteorologický jev, za důsledek hoření hvězdných výparů v horní části zemské atmosféry, v oblasti spojené se sférou hvězd. V 6. století našeho letopočtu tento výklad kritizoval Olympiodorus mladší a tvrdil, že pokud by Mléčná dráha ležela pod sférou Měsíce, měla by zřejmou paralaxu. Tuto paralaxu ale nikdo nenašel, takže podle něj Mléčná dráha není sublunární objekt. Myšlenky Olympiodora mladšího ale ovlivnily zejména arabské astronomy v následujících stoletích, kteří se snažili o nalezení, změření paralaxy Mléčné dráhy. I mezi arabskými astronomy se ale objevují i názory, že by mohlo jít o velké uskupení hvězd. „Záhadu“ Mléčné dráhy definitivně vyřešilo až použití prvních dalekohledů. Galileo Galilei v roce 1610 popsal v knize



Hvězdný posel Mléčnou dráhu jako uskupení obrovského množství slabých hvězd, které viděl ve svém dalekohledu.

Galileo ale vyřešil jednu otázku týkající se Mléčné dráhy. Na řadu přišla další: Proč vlastně máme Mléčnou dráhu?, tedy proč nejsou hvězdy na hvězdné obloze rozmístěny více rovnoměrně?. První řešení nabídli filozofové v 18. století. Swedenborg (1734), Wright (1750) i Kant (1755) ve svých úvahách shodně prezentovali Mléčnou dráhu jako hvězdný ostrov diskového tvaru. Nicméně jejich hypotézu bylo třeba ověřit a podpořit pozorovacími daty.

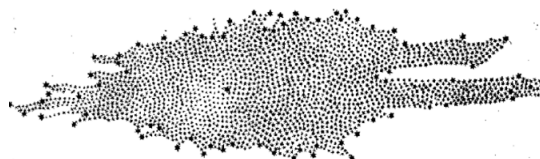
### 20.1.1 Historie výzkumu

1. model Galaxie z pozorování - William Herschel  
v 80. letech 18. st. - počty hvězd v několika stech oblastí nebe

chybné předpoklady:

- všechny hvězdy mají stejný zářivý výkon,
- prostorová hustota hvězd je stálá,
- neexistuje zeslabování světla hvězd (mezihvězdná extinkce), nevěděl o ní
- dohlédne dalekohledem na hranici Galaxie.

výsledek – model Galaxie o průměru 3 kpc, uprostřed je Slunce



Obrázek 20.2: Herschelův model Galaxie se Sluncem téměř uprostřed soustavy. Herschelův model: Figure 4 from *On the Construction of the Heavens* by William Herschel, published in *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 75 (1785), pp. 213-266

### Kapteynův model Galaxie (Kapteynův vesmír)

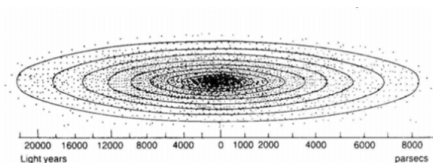
1922 - Jacobus Kapteyn (1851–1922) – opět počítáním hvězd (ve vybraných částech hvězdné oblohy) zkoumal strukturu Galaxie

- + znal absolutní hvězdné velikosti pro různé typy hvězd;
- nevěděl o mezihvězdné extinkci

výsledek - tvar zploštělého elipsoidu 8500 pc x 1700 pc, Slunce 650 pc od středu  
model platí pro vysoké galaktické šířky, v rovině Galaxie selhává

důvod – mezihvězdná extinkce! => Galaxie je větší a Slunce není poblíž středu

dnešní rozměry – průměr disku 28 kpc, Slunce 8 kpc od středu



Obrázek 20.3: Kapteynův model Galaxie.

### 20.1.2 Velká debata

1918 Shapley - vzdálenosti 93 kulových hvězdokup pomocí pulzujících proměnných hvězd typu RR Lyr a W Vir;

„troufalý a ukvapený předpoklad“ - systém kulových hvězdokup = kostra Galaxie (střed kostry souhlasí s centrem Galaxie) => centrum Galaxie leží ve směru Strělce ve vzdálenosti 15 kpc ;=> průměr Galaxie cca 100 kpc, Slunce v 1/3 mezi centrem a okrajem systému

1920 Velká debata - o rozměrech Galaxie a povaze spirálních mlhovin

Harlow Shapley x Heber Curtis

Curtis - odborník na spirální mlhoviny = vzdálené soustavy z milionů hvězd;

- obhajoval Kapteynův model Galaxie (průměr cca 8,5 kpc);
- přednost kratší škále vzdáleností, (mj. pro vzdálenost M 31 z jasnosti pozorovaných „nov“ (150 kpc) => velikost srovnatelná s rozměrem Kapteynovy Galaxie;
- velké rychlosti vzdalování spirálních mlhovin (příliš velké na to, aby byly gravitačně spjaty s Galaxií)

Shapley - Galaxie je nejméně o řád větší a představuje celý vesmír.

hmotnost (zářící látky):  $2 \cdot 10^{11} M_{\odot}$  (celková hmotnost je až o řád větší, většina látky Galaxie je uložena v temném halu, jehož rozměry mnohonásobně převyšují velikost viditelné části Galaxie)

Základní čísla o naší Galaxii

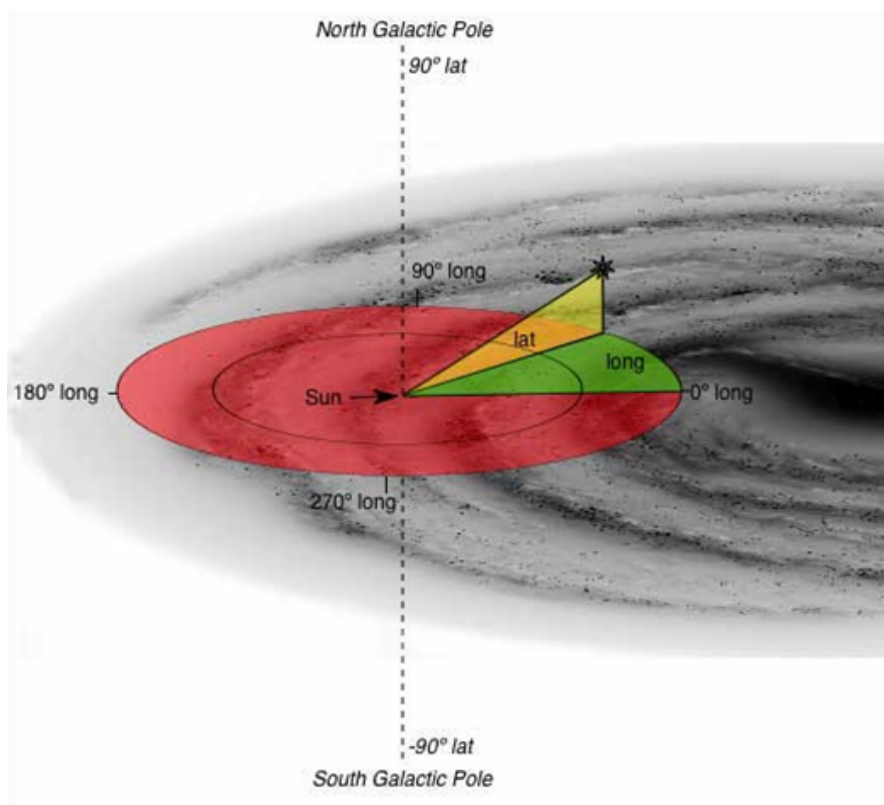
zářivý výkon:  $2 \cdot 10^{40} L_{\odot}$  (tj.  $7,7 \cdot 10^{36} W$ )

počet hvězd, tvořících Galaxii: 400 miliard (odhad)

podíl mezihvězdné látky na hmotnosti Galaxie: asi 10 % hmotnosti zářící látky

hmotnost (zářící látky):  $5,8 \cdot 10^{11} M_{\odot}$  (celková hmotnost je až o řád větší, většina látky Galaxie je uložena v temném halu, jehož rozměry mnohonásobně převyšují velikost viditelné části Galaxie)

průměr:  $100\,000\text{ ly} = 30\text{ kpc} = 9 \cdot 10^{17}\text{ km}$



Obrázek 20.4: Galaktické souřadnice.

### 20.1.3 Galaktická souřadnicová soustava

Základní rovina - rovina největší koncentrace hvězd v Galaxii (na hvězdné obloze - přibližně Mléčná dráha)

Základní rovina (galaktický rovník) - sklon galakt. a světového rovníku  $62^{\circ}36,0'$ .

základní směr (ke středu Galaxie) -  $\alpha = 17^{\text{h}} 42^{\text{m}} 29,3^{\text{s}}$ ,  $\delta = -28^{\circ}59' 18''$  (1950.0) - 1959 rezoluce IAU

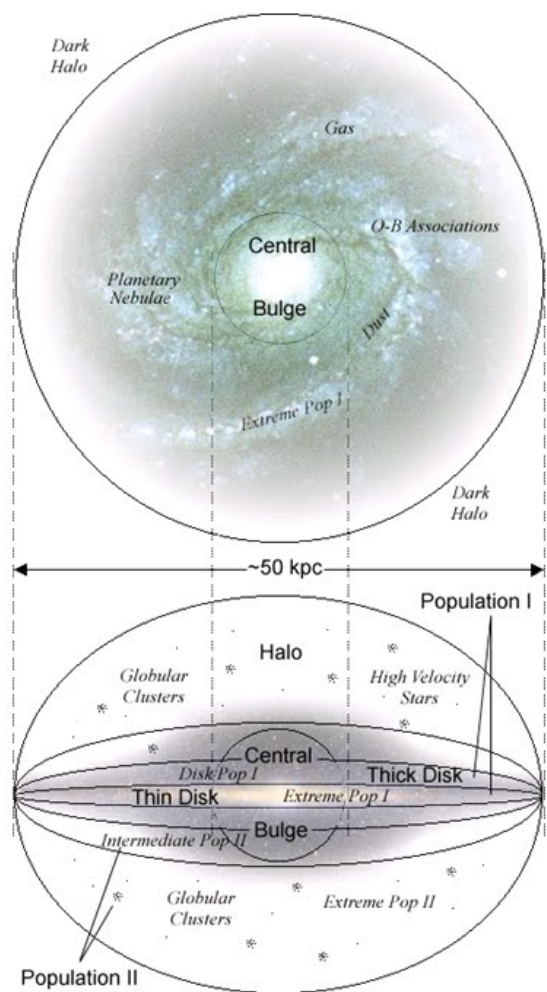
galaktická délka  $l$  ( $0^{\circ}$  až  $360^{\circ}$ ),

galaktická šířka  $b$  ( $0^{\circ}$  až  $\pm 90^{\circ}$ ).

(pravotočivá souřadná soustava)

### 20.1.4 Anatomie naší Galaxie

Složení Galaxie – hvězdy, mezihvězdná látka, skrytá hmota



Obrázek 20.5: Anatomie Galaxie.

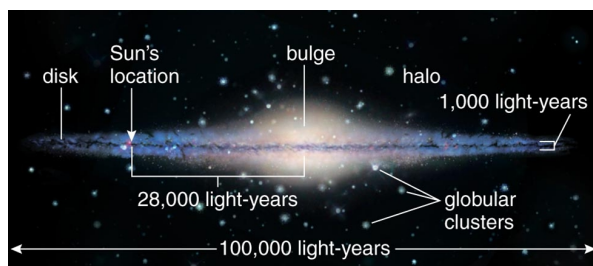
**Kulová složka (halo)** - mírně zploštělá koule o průměru asi 50 kpc; nejstarší hvězdy v Galaxii (stáří až 12 miliard let), kulové hvězdokupy; nepatrné množství těžších prvků (do 0,1 %)

**Disková složka** - průměr 30 kpc, disk mimo střed jen 1 kpc tlustý, uprostřed galaktická výduť – koule o průměru 4-5 kpc;  
Slunce – 15 pc od galaktické roviny, 8,0 kpc od středu; patří sem většina hvězd - populace I; účastní se galaktické rotace; stáří hvězd - cca 5 miliard let, od roviny Galaxie - střední vzdál. 300 pc

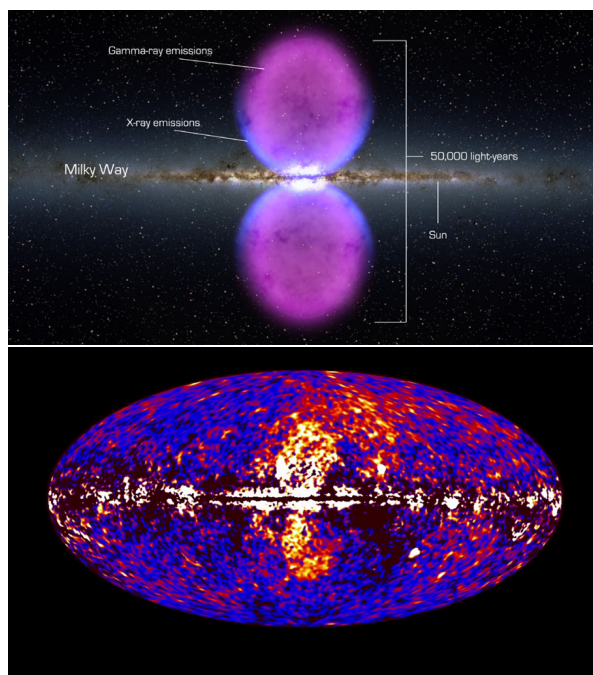
**Plochá složka** - nejmladší hvězdy (stáří milion až několik mld. let, těžších prvků až 5 %) a mezihvězdná látka; udává polohu galaktického rovníku. Hmotné hvězdy s největším zářivým výkonem.

**Jádro Galaxie** – od nás vzdáleno 30 000 ly, zastíněno, v centru obří černá díra

Bublíny - objev r. 2010 družice Fermi, původ neznámý



Obrázek 20.6: Anatomie Galaxie.



Obrázek 20.7: Galaktické bubliny.

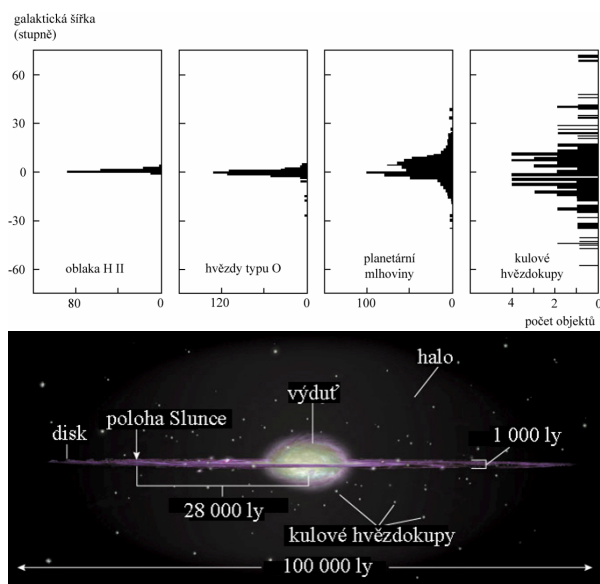
#### 20.1.4.1 Disková a plochá složka

##### Spirály

- spirální ramena - nahuštění hvězd a mezihvězdné látky
- stabilní hustotní vlna
  - ve spirálních ramenech - zvýšená hustota mezihvězdné látky => vznik nových hvězd; žhavé hmotné hvězdy a mladé otevřené hvězdokupy
- spirální struktura Galaxie - podoba s blízkými galaxiemi (např. M 31)
- důkazy - radioastronomie

##### Naše Galaxie

- disková a zejména plochá složka Galaxie - vytvářejí ramena, vyběhající z galaktického jádra
- dříve 4 stejná spirální ramena,



Obrázek 20.8: Rozložení některých druhů objektů v Galaxii. První dva jsou v ploché složce, další v diskové, poslední v kulové složce Galaxie.

- nyní 2 hlavní spirální ramena (Scutum-Centaurus a Perseus) a 2 vedlejší, malá ramena (Norma a Sagittarius)

1852 – Stephen Alexander – první předpokládal spirální strukturu

2008 – R. Benjamin 2 hlavní spirální ramena: Scutum-Centaurus, Perseus 2 vedlejší, malá ramena Norma Sagittarius

2012 – stále diskuse např. nový vnější prstenec (Monoceros Ring)

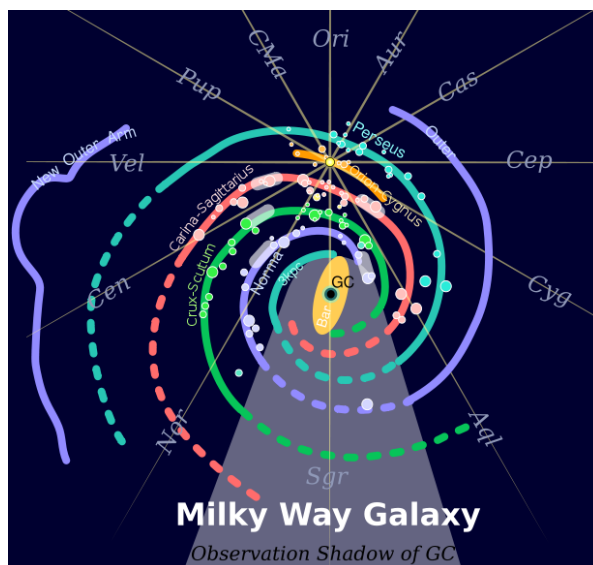
#### 20.1.4.2 Jádru Galaxie

centrum Galaxie – hvězdná obloha mezi  $\gamma$  Střelce a  $\theta$  Hadonoše

- extinkce ve viditelném oboru spektra - 30 magnitud!
- infračervená, rádiová pozorování

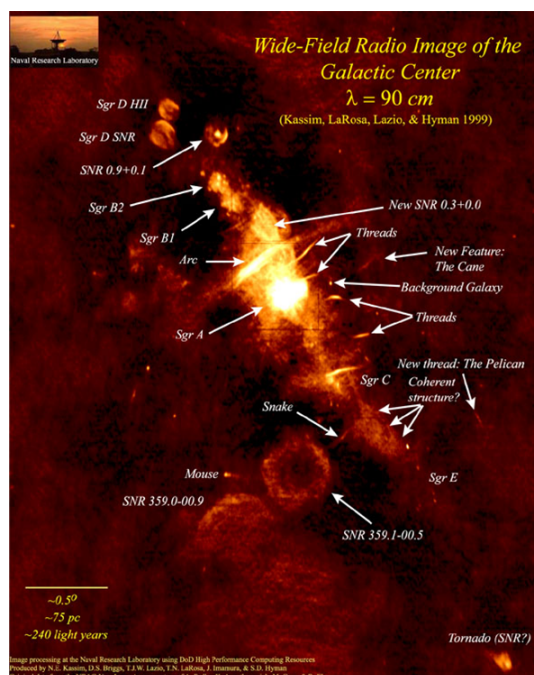
#### Skryté jádro

- jádro Galaxie
  - patrně obrovská, mírně zploštělá kulová hvězdokupa o rozměrech 4 x 5 kpc
  - nejčtenější slabí červení trpaslíci
  - obklopeno hustým prstencem mezihvězdné látky => nelze zkoumat jádro ve vizuálním oboru spektra
  - koncentrace hvězd směrem ke středu prudce roste => vyšší pravděpodobnost blízkých setkání hvězd.



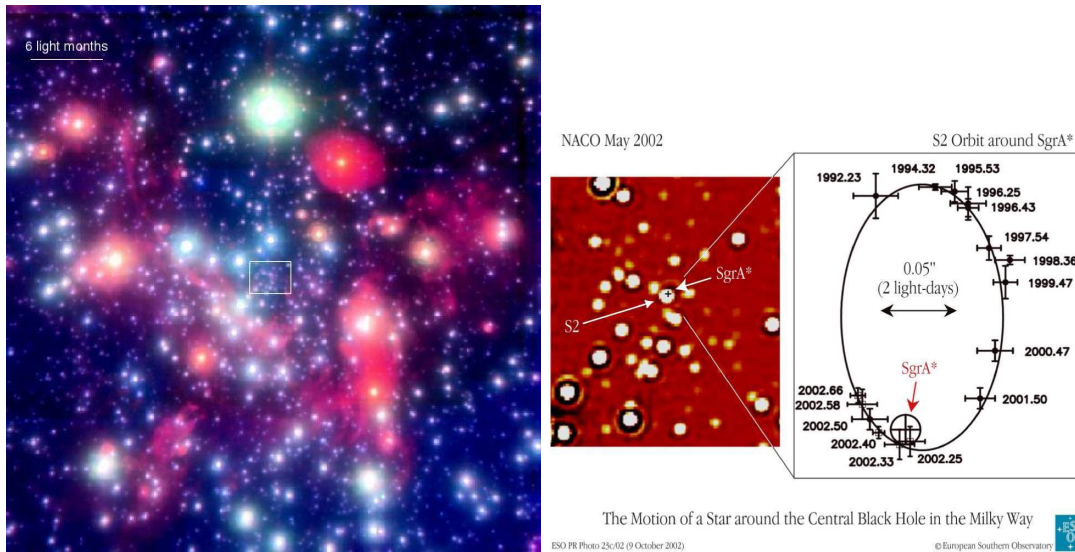
Obrázek 20.9: Spirální ramena Galaxie.

- galaktické jádro – cca 1 pc, výrony plynu a netepelného rádiového záření – výsledek interakce jedné či dvou velmi hmotných černých děr s hvězdami a mezihvězdnou látkou – Sgr A ( $3,6 \cdot 10^6 M_{\odot}$ )



Obrázek 20.10: Jádro Galaxie.

Objev hmoty pohybující se kolem středu Galaxie - část spadne do centrální černé díry!!!



Obrázek 20.11: Jádru Galaxie.

### 20.1.5 Rotace Galaxie

prokázána 1927 Jan Oort, 1932 – první poukázal na temnou hmotu  
 hvězdy – rychlost oběhu kolem středu Galaxie – závisí na vzdálenosti od středu (z měření  
 radiálních rychlostí a vlastních pohybů hvězd)

model Galaxie: pevná deska s rovnoměrným rozložením hmoty  $\Rightarrow v \sim r$  oběžná  
 rychlost hvězd  $\sim$  vzdálenosti od středu otáčení

hvězdy – rychlost oběhu kolem středu Galaxie – závisí na vzdálenosti od středu (z  
 měření radiálních rychlostí a vlastních pohybů hvězd)

Galaxie = pevná deska s rovnoměrným rozložením hmoty - oběžná rychlost hvězd  $\sim$   
 vzdálenosti od středu otáčení;

Rotace Galaxie – model s koncentrací hmoty v centrální oblasti (blízké modelu spirálních  
 galaxií)

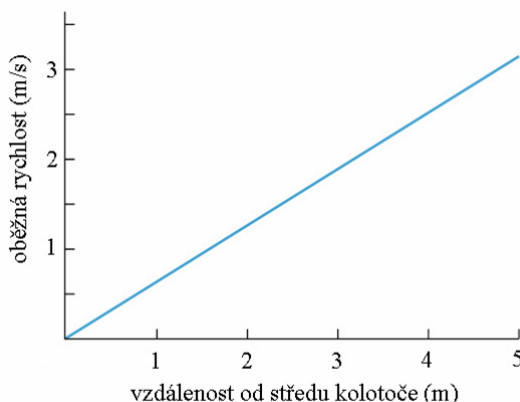
hmotnost jádra  $\gg$  hmotnost hvězdy  $\Rightarrow$  podobné jako u Sluneční soustavy  $\Rightarrow$  problém  
 dvou těles (Keplerovými zákony)

oběžná rychlost závisí na vzdálenosti nepřímo úměrně

Rotační vlastnosti Galaxie – složité, *diferenciální rotace* nevyhovuje - model pevné desky  
 ani koncentrace látky k centru

Závislost oběžné rychlosti na vzdálenosti od středu hvězdné soustavy - složitá funkce  
 (různá u různých galaxií)





Obrázek 20.12: Rotační model galaxie s rovnoměrným rozložením hmoty - předpokládáme, že prostorová hustota rozložení hvězd  $\rho$  je konstantní v celém galaktickém prostoru. Nejvíce se tomuto modelu přibližuje situace v blízkosti galaktického jádra. Za předpokladu kruhových drah hvězd: závislosti rotační rychlosti  $v$  na vzdálenosti  $r$  od osy rotace - Na libovolný bod A uvnitř galaxie působí odstředivá síla  $F_1 = mv^2/r$ , kde  $m$  je hmotnost hvězdy,  $r$  její vzdálenost od osy rotace,  $v$  její rotační rychlost. Vedle síly  $F_1$  na bod A působí také přitažlivá síla  $F_2$ , jejímž zdrojem je hmotnost vnitřního elipsoidu.  $F_2 = G(\rho r^3 m)/r^2 = krm$ , kde  $k$  je koeficient úměrnosti, objem elipsoidu závisí na  $r^3$ . Z rovnosti  $F_1 = F_2$  vyplývá, že  $v = \sqrt{(k)r}$ , tedy rotuje jako tuhé těleso. Převzato: Vademecum

Obr: z průběhu rotačních křivek – hmotnost galaxií

## 20.2 V říši galaxií

velké množství galaxií => každý má aspoň jednu viz např. (ultra)hluboký pohled do vesmíru

galaxie – rozdíly – velikost, stavba => klasifikace - Edwin Hubble (1926, 1936)

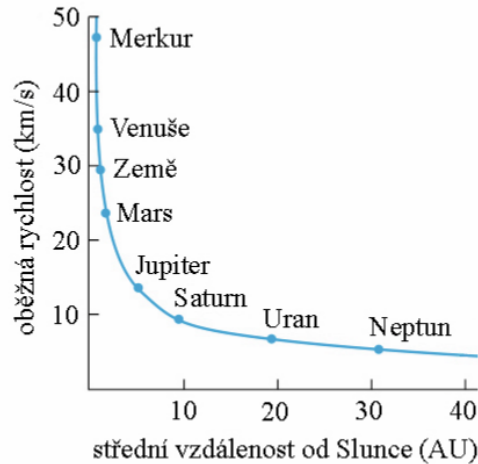
Hubbleova klasifikace galaxií

de Vaucouleursův systém klasifikace galaxií - 3D rošíření Hubbleovy klasifikace (1959)

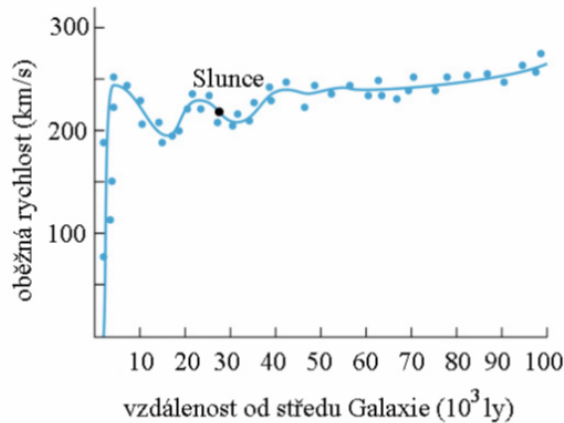
### Falešná představa?

Je Hubbleova sekvence vývojová?

- 1930 - 1950: ANO,  
ale kterým směrem? E- > S nebo S -> E?  
Hubble sám: eliptické nemluvně - > čočková dorostenec - > dospělá spirální nemluvně = „early type galaxy“, ale „raná galaxie“ je nesmysl jiní: nejmladší Irr - > Sd - Sc - Sb - Sa a čočkovité - > E nejstarší
- 1950 - 1980: NE  
důvod: galaxie se rodí s počátečním úhlovým momentem



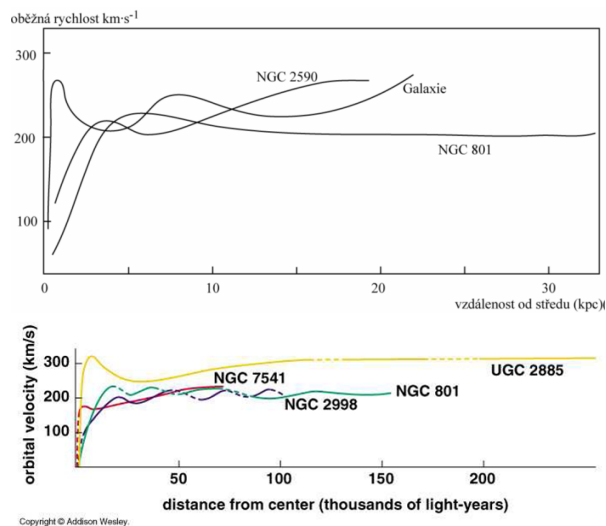
Obrázek 20.13: Rotační model galaxie s koncentrací hmoty v centrální oblasti - hmotnost jádra galaxie je velká ve srovnání s hmotností všech hvězd. Tomuto modelu se nejvíce přibližuje rotace ve spirálních galaxiích - analogie se sluneční soustavou, ve které je hmotnost planet zanedbatelná ve srovnání s hmotností Slunce. Pohyb planet vyjadřuje III. Keplerův zákon  $r^3/T^2 = konst.$  Za zjednodušujícího předpokladu, že hvězdy se pohybují v galaxii po kruhové dráze, platí tento zákon pro pohyb hvězd v tomto modelu. Úpravou vztahu pro III. Keplerův zákon dostáváme  $v^2/r = konst.$ ,  $v = konst./\sqrt{r}$ . Rotační rychlost je tedy nepřímo úměrná  $\sqrt{r}$ . Převzato: Vademecum



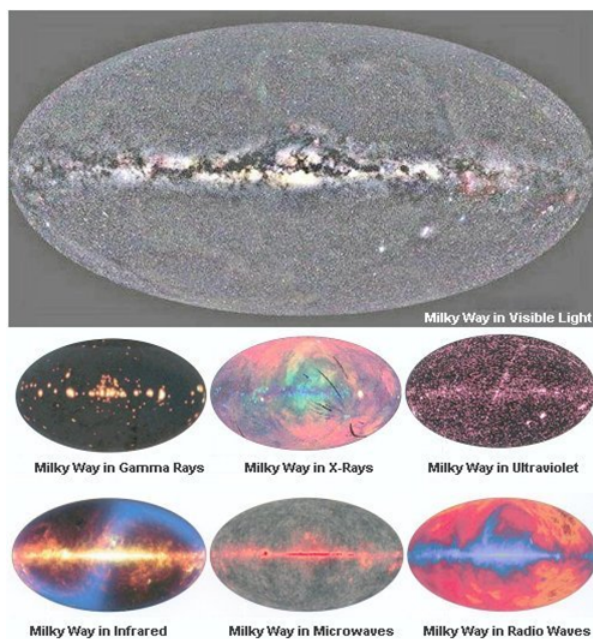
Obrázek 20.14: Rotační křivka.

- 1980 – nyní: ANO!  
S – > E: pravděpodobnější – eliptické a čočkové jsou starší galaxie, které se pravděpodobně vyvinuly z stárnoucích spirálních systémů

návrh na lepší dělení: 2006 - Atlas3D (2006) - projekt mapuje 260 eliptických a čočkových galaxií raných galaxií ve 3D použití; „rané galaxie“ – bez plynu pro tvorbu hvězd, červené a mrtvé = fosilní záznamy evoluce galaxií



Obrázek 20.15: Rotační křivky.



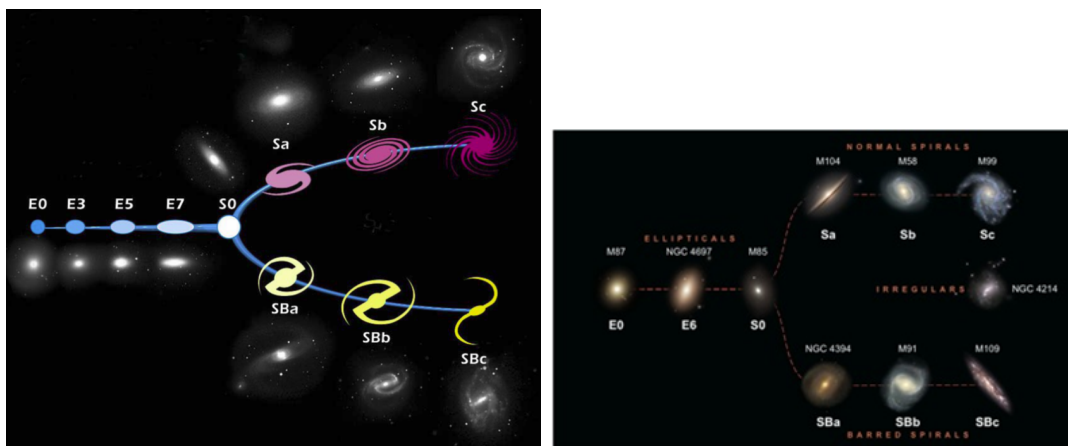
Obrázek 20.16: Galaxie v různých oborech.

rané galaxie – hladké, ploché, hvězdy obíhají samostatně  
 spirální – rameno, plyn, prach pro tvorbu hvězd, obíhají v rovině stejným směrem spolu  
 rané – do dvou skupin – rychlé a pomalé rotátory

nové dělení - lépe popisuje vlastnosti



Obrázek 20.17: This high-resolution image of the HUDF includes galaxies of various ages, sizes, shapes, and colors. The smallest, reddest galaxies, of which there are approximately 10000, are some of the most distant galaxies to have been taken by an optical telescope, existing at the time shortly after the big bang.



Obrázek 20.18: Hubbleova klasifikace galaxií - vidlička.

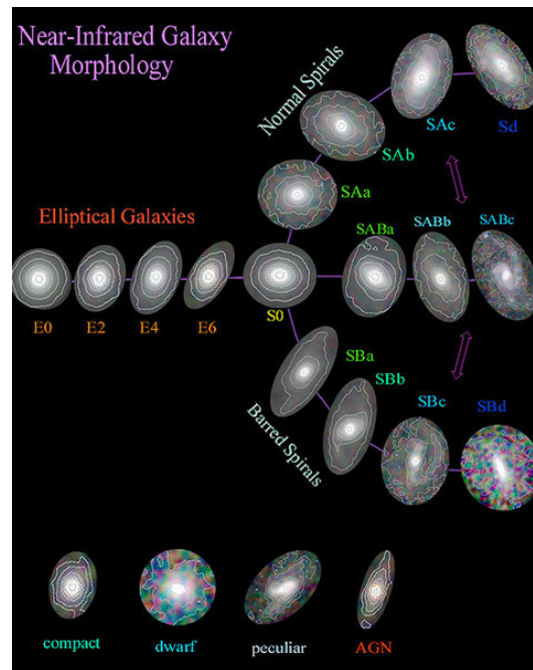
### 20.2.0.1 Spirální galaxie

**Spirální galaxie** – označování - S - spirální, případně SB - spirální s příčkou + písmena *a* až *d* - podle poměru velikosti jádra a ramen;

Sa - relativně velké jádro malá ramena – > Sd malé jádro, velká ramena; obdobně SBa – > SBd

Naše Galaxie je typu SBc.

- různorodé tvary
- nejméně dvě spirální ramena připojená přímo nebo přes příčku



Obrázek 20.19: de Vaucouleursův systém klasifikace galaxií - with stage (spiralness) on the x-axis, family (barredness) on the y-axis, and variety (ringedness) on the z-axis .

- v ramenech - hodně žhavých hmotných hvězd,
  - rozsáhlá oblaka mezihvězdné látky (oblasti HII)
- 1 do 20 % (hmotnostně) mezihvězdné látky
- celkové hmotnosti -  $10^9$  -  $10^{12} M_{\odot}$

### 20.2.0.2 Eliptické galaxie

**Eliptické galaxie** – označení: E+x, kde  $x = 10[(a-b)/a]$ ,  $a, b$  - poloosy galaxie; fakticky E0 (kruhové) – > E7 (ploché)

- tvar koule nebo rotačního elipsoidu
- většinou staré trpasličí hvězdy –  $M < 2 M_{\odot}$ , malý výkon
- mezihvězdná látka do 0,2 % celkové hmotnosti
- velké rozdíly velikostí a hmotností (obří  $10^{13} M_{\odot}$  x trpasličí  $10^6 M_{\odot}$ )

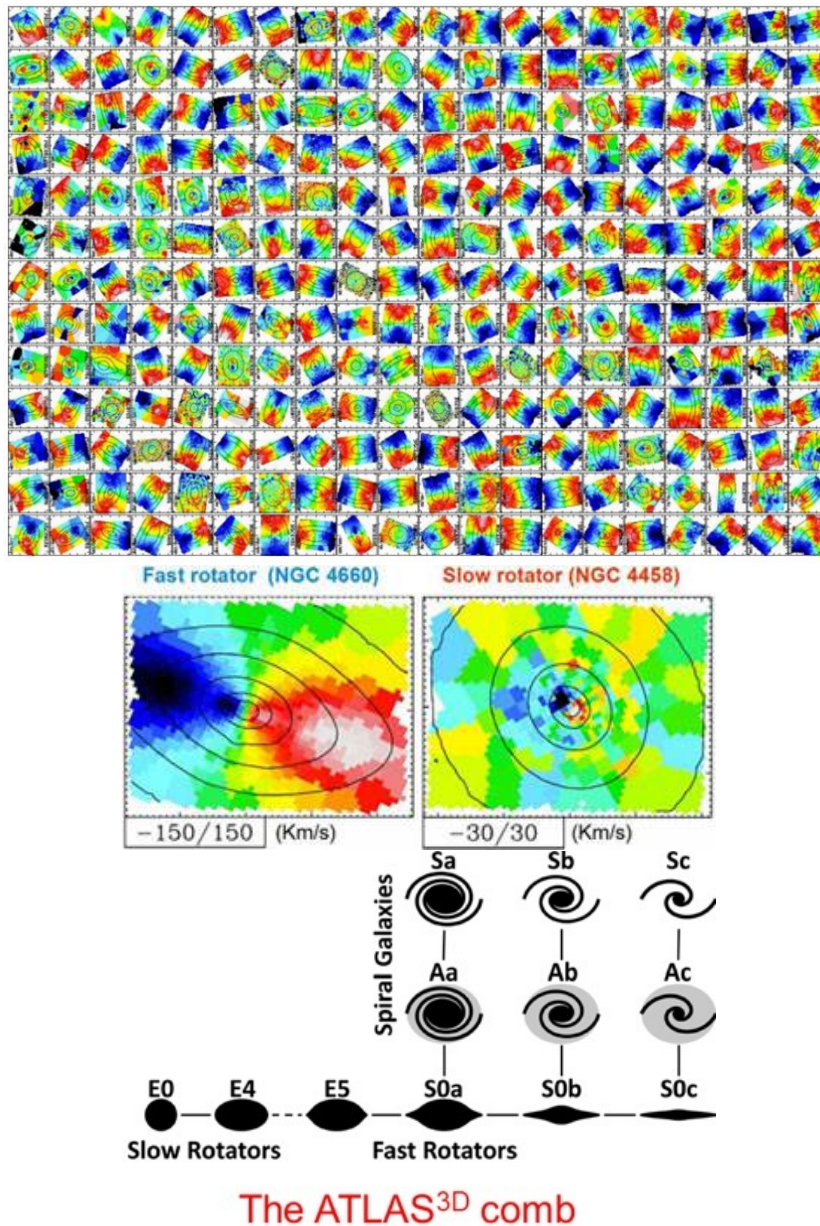
#### Slupkové galaxie

eliptické galaxie s oblouky, slupkami kolem celé galaxie odhad – 17-44 % E je slupkových

### 20.2.0.3 Čočkovité galaxie

spirální galaxie bez ramen

**Čočkovité galaxie S0** – nelze jednoznačně přiřadit - přechodný typ mezi S a E galaxiemi

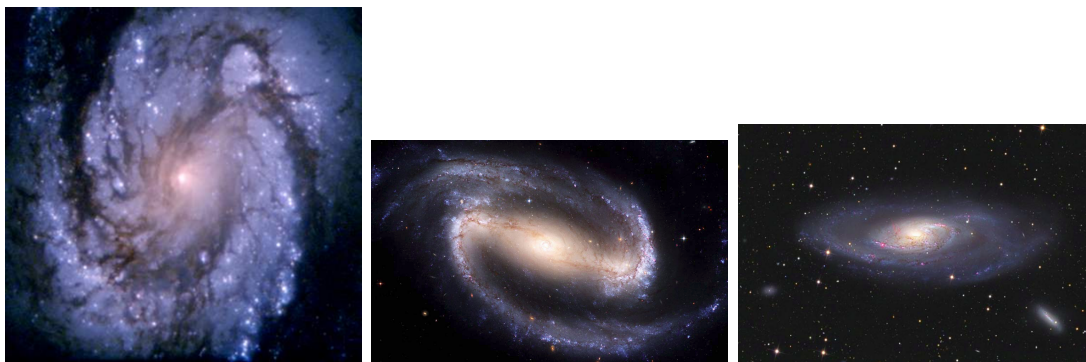


Obrázek 20.20: Maps of the observed velocity of the stars in the volume-limited sample of 260 early-type galaxies of the ATLAS3D survey. Red/blue colours indicate stars moving away/towards us respectively. Fast rotating and disk-like galaxies are characterized by two large and symmetric red/blue peaks at the two sides of the centre. This figure shows that this class of objects constitutes the vast majority of the sample. Credit: ATLAS3D Project.

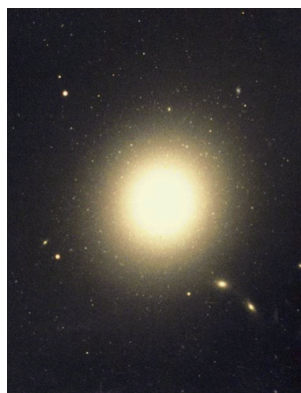
- výrazné jádro (pokles jasu od středu k okrajům stupňovitě),
- někdy sledujeme náznaky spirálních ramen, příčky a vnějšího prstence
- téměř žádná mezihvězdná látka

#### 20.2.0.4 Nepravidelné galaxie

**Nepravidelné galaxie** – označení Irr (z anglického irregular = nepravidelný);



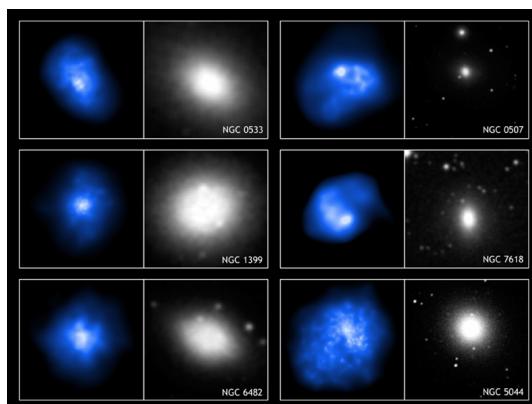
Obrázek 20.21: Spirální galaxie M100, uprostřed NGC1300, vpravo M106 .



Obrázek 20.22: Eliptická galaxie M87.

- několik procent galaxií
- méně hmotné soustavy,  $10^8 - 10^9 M_{\odot}$
- 30 - 40 % celkové hmotnosti – mezihvězdná látka => tvorba nových hvězd.

**Prstencová galaxie** – Hoagův objekt - vzdálena přibližně 600 milionů světelných let.



Obrázek 20.23: Eliptické galaxie ve vizuálním a rtg. oboru. Credit: X-ray: NASA/CXC/U. Ohio/T.Statler & S.Diehl; Optical: DSS.



Obrázek 20.24: Slupková galaxie NGC474.



Obrázek 20.25: Čočkové galaxie.

Statistika typů galaxií - přehled

jen roztríděné galaxie! – celkové odhady krajně nejisté!

Typ galaxie	Relativní počet (%)
spirální	50
eliptické	25
čočkovité	20
nepravidelné	5

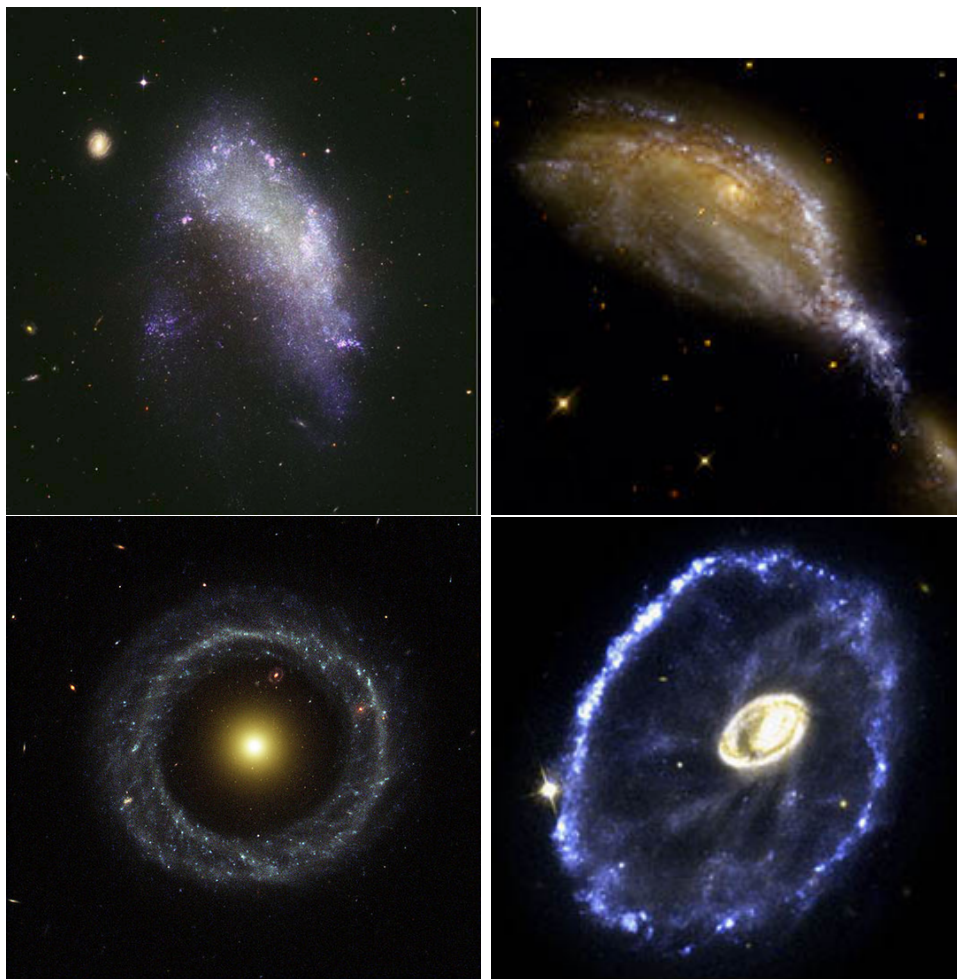
### 20.3 Aktivní galaxie - AGN

jádra cca 10 % galaxií - anomálie:

- vyšší a proměnlivý tok záření v části spektra
- výrony materiálu, výtrysky ionizovaného plynu až  $10^6 M_{\odot}$

1908 – Edward A. Fath – emisní čáry ve spektru NGC 1068





Obrázek 20.26: Nepravidelné galaxie. Dole: Hoagovy objekty.

1926 – Edwin Hubble – emisní čáry u třech galaxií

1943 – Carl K. Seyfert – 12 galaxií s velmi jasným jádrem, odlišným spektrem

studium aktivních galaxií - jedna z priorit galaktické astronomie

### **Energie aktivních galaxií**

Zářivý výkon - o 1-3 řády větší než zářivý výkon všech hvězd v galaxii  
vyzařován z malé oblasti – jádro galaxie => jaderné reakce nestačí !

efektivnější uvolňování energie – > spad hmoty do černé díry => model galaxie s masivní ČD uprostřed

kde se bere krmění?

- mezihvězdná hmota
- hvězdy, jejich zbytky (slapové síly)
- materiál z mezigalaktického prostoru
- pohlcené galaxie (kanibalismus)



Obrázek 20.27: Aktivní galaxie.

### 20.3.1 Typy aktivních galaxií

- rádiově tiché (linery, Seyfertovy galaxie, kvasary QSO)
- rádiově hlučné (rádiové galaxie, blazary, OVV kvasary)

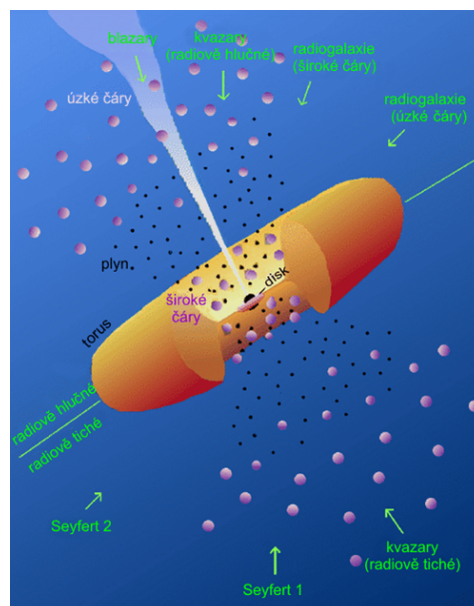
LINERs = Low-ionization nuclear emission-line regions

QSO = quasi-stellar object

OVV = Optically Violently Variable (OVV) quasars

blazar = objekt typu BL Lac

stejná fyzikální podstata x různé úhly pohledu!



Obrázek 20.28: Typy aktivních galaxií.

### 20.3.1.1 Seyfertovy galaxie

objev – 1943 – Carl K. Seyfert – 12 galaxií – jasné jádro, odlišné spektrum

dnes – cca 200 galaxií (cca 10 % velkých spirálních galaxií)

akreční disky - pod úhlem nebo z boku; z naměřených rudých posuvů => mnohem blíže než kvasary a blazary

spektrum jádra není hvězdné – zakázané, emisní čáry; podle čar – 2 typy

zářivý výkon  $10^9$ - $10^{12}$   $L_{\odot}$  – změny v průběhu měsíců => rozměry řádově 0.1 ly



Obrázek 20.29: Seyfertovy galaxie. obr. vlevo – NGC7742 - má napříč asi 3000 světelných let. NGC 7742 je vzdálená asi 72 miliónů ly v Pegasovi vpravo - Co se děje ve středu spirální galaxie M106? Vzhledu disku vířících hvězd a plynu - galaxie M106 dominují dvě jasná spirální ramena a tmavé prachové pásy poblíž jádra. Jasně nověji formované hvězdy blízko jejich vnějších konců zvýrazňují na fotografii nahoře spirální ramena. Jádro M106, ve kterém byl objeven dvojitý výtrysk (jet) o délce galaxie, jasně září na rádiových vlnách a v rentgenových paprscích. Neobvyklá záře ve středu činí M106 jedním z nejbližších příkladů třídy Seyfertových galaxií, o nichž se předpokládá, že velké množství zářícího plynu padá do centrální hmotné černé díry. M106, též s označením NGC 4258, je poměrně blízko ve vzdálenosti 25 miliónů světelných let a zabírá napříč 30 tisíc světelných let a může být viditelná i malým dalekohledem v souhvězdí Honících psů (Canes Venatici)

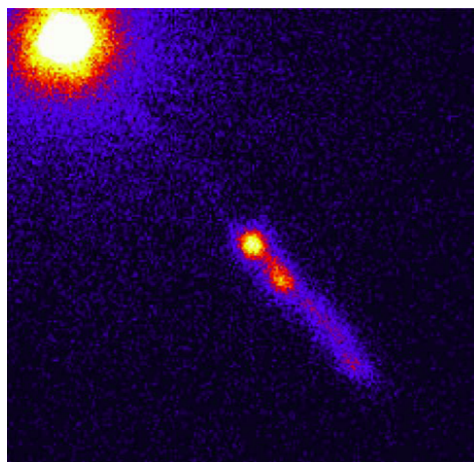
### 20.3.1.2 Kvasary

kvasary (quasistellar radio source) - nejmohutnější aktivita

- objev 1963 – optický protějšek rádiových zdrojů
- velmi staré, nejvzdálenější objekty ve vesmíru
- nejbližší kvasar 3C 273 – vzdálenost 749 Mpc, rychlost vzdalování  $50\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 12,8 mag
- nejzářivější objekty ve vesmíru –  $10^{15}$   $L_{\odot}$  ( $10^4$  x více než  $L_{\text{Galaxie}}$ ).

- zářivá oblast – o 20 řádů menší než objem normální galaxie!
- změny zářivého výkonu ve škále dnů => rozměr zdroje < světelné dny

50 000 kvasarů, většina radiově klidná = tzv. tiché kvasary

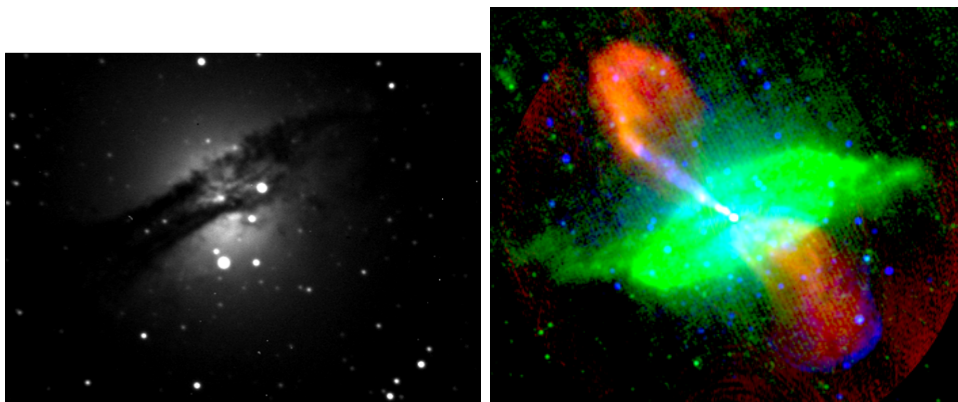


Obrázek 20.30: Kvasar.

### 20.3.1.3 Rádiové galaxie (radiogalaxie)

z boku pozorovaná eliptická galaxie

emise rádiových vln - synchrotronové záření (elektrony urychlené magnetickým polem)

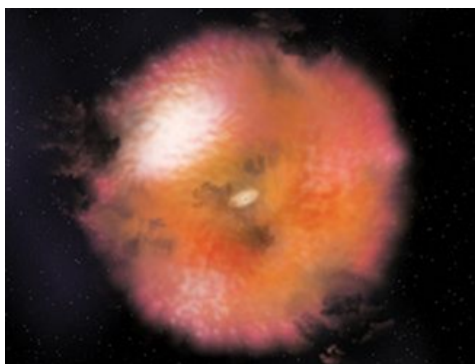


Obrázek 20.31: Rádiová galaxie Cen A. Snímek: MZ, vpravo: False-colour image of the nearby radio galaxy Centaurus A, showing radio (red), 24-micrometre infrared (green) and 0.5-5 keV X-ray emission (blue). The jet can be seen to emit synchrotron emission in all three wavebands. The lobes only emit in the radio frequency range, and so appear red. Gas and dust in the galaxy emits thermal radiation in the infrared. Thermal X-ray radiation from hot gas can be seen in the blue 'shells' around the lobes, particularly to the south (bottom)

### 20.3.1.4 Nový typ AGN

Ueda et al. – ApJ 664, L79 (2007)

- výsledky družic: Suzaku a Swift BAT (Burst Alert Telescope)
- stovky nových AGN, dříve neodhalených – detekce v rtg. oblasti
- okolo hustý oblak prachu a plynu - viditelné a ultrafialové světlo pohlcuje
- možná odpověď - proč některé supermasivní ČD září a jiné ne



Obrázek 20.32: Nový typ AGN.

## 20.4 Kanibalismus galaxií

nepřavidelné galaxie – některé „deformované“ spirální galaxie vysvětlení - těsná vzájemná přiblížení a srážky

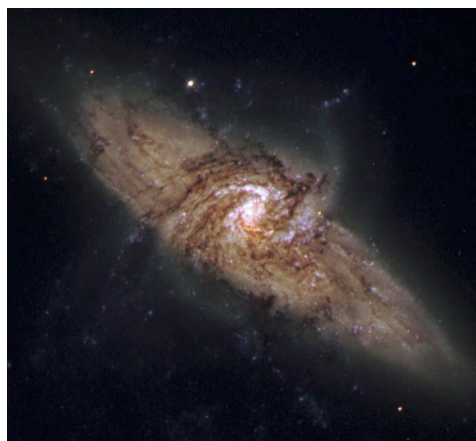
velmi pomalé setkání galaxií – > menší pohlcena => kanibalismus galaxií



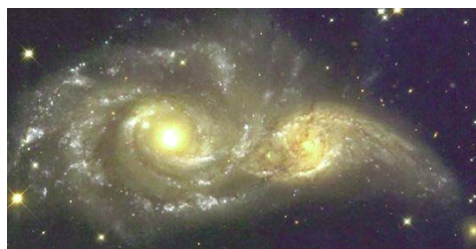
Obrázek 20.33: Kanibalismus galaxií.

Průběh setkání:

- trajektorie hvězd v galaxiích silně změněny, přímá srážka však nehrozí
- mezihvězdný materiál – promíchán a zahuštěn => překotná tvorba nových hvězd (řádově desítky až stovky tisíc)
- „kanibal ztloustne“
- časté v centrech velkých kup galaxií
- doba setkání –  $10^8$  -  $10^9$  let
- kolem velkých kanibalů - tisíce kulových hvězdokup (relativně mladých!)



Obrázek 20.34: Dvě propletené galaxie, označené NGC 3314, se nacházejí v souhvězdí Hydry, ale neinteragují, jen projekce.



Obrázek 20.35: Interagující galaxie NGC 2207 (vlevo) a IC 2163 v souhvězdí Velkého psa.

#### Aktivní galaxie

Většina záření způsobena rozžhaveným plynem  
 Intenzita záření maximální v rádiové oblasti  
 Supermasivní černé díry v jejich středech - velmi aktivní.  
 Nejvíce záření vychází z jejich jader.

#### Běžné galaxie

Většina světla pochází z hvězd.  
 Emitované záření - nejintenzivnější ve viditelné oblasti  
 Obří černé díry v jejich centrech jsou neaktivní.  
 Světlo je rozloženo po celé galaxii.

## Použitá a doplňující literatura

## 21 Velkorozměrové struktury ve vesmíru

### 21.1 Vesmír velkých měřítek

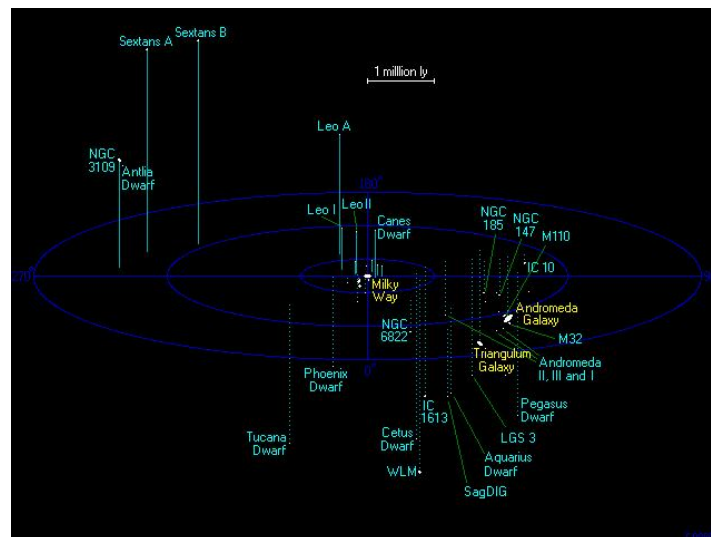
galaxie – většinou v párech, skupinách

Galaxie – ve skupině 50 galaxií (místní skupina galaxií)

známí sousedé: LMC, SMC, M 31, M 33

nejhmotnější – naše Galaxie a M 31

galaxie místní skupiny - v oblasti o průměru asi 800 kpc



Obrázek 21.1: Místní skupina galaxií.

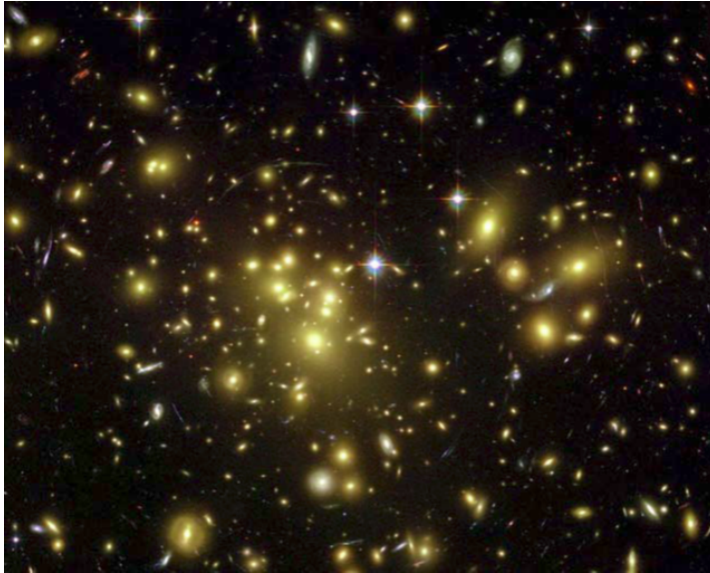
### 21.2 Kupy galaxií

největší gravitačně vázané struktury ve vesmíru

- z pozorování - Com, Her, Vir (nejbližší 17 Mpc)
- téměř pravidelné útvary, ale zploštělé, průměr řádově Mpc
- řádově tisíce až desetitisíce gravitačně vázaných galaxií
- neuspořádaný pohyb členů
- kupa jako celek nerotuje
- v centru kupy - obvykle obří eliptické galaxie

„typická“ kupa galaxií - v Panně

- 2500 galaxií (7 obřích E, 10 obřích S),
- průměr 3 Mpc,

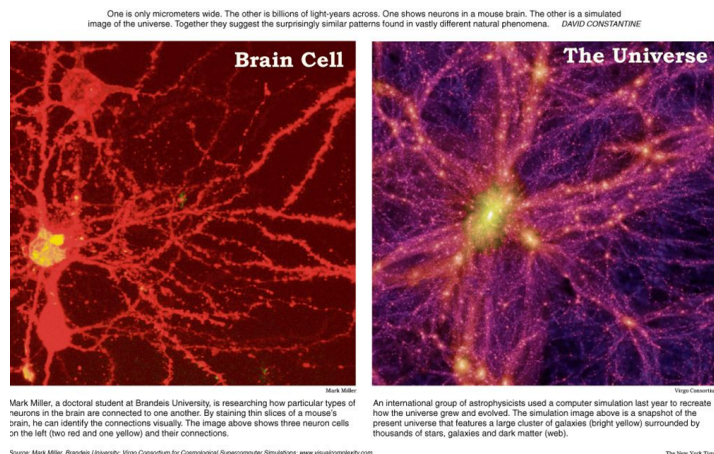


Obrázek 21.2: Kupa galaxií Abell 1689.

- vzdálenost 17 Mpc,
- střední vzdálenost sousedních galaxií 100 kpc.

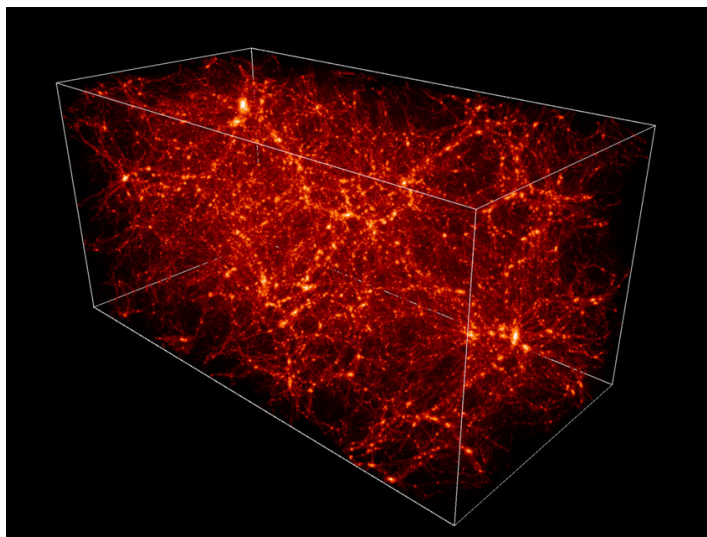
„obří“ kupa - v Com

- 25000 galaxií,
- vzdálenost 105 Mpc,
- průměr 8 Mpc.



Obrázek 21.3: Struktury.





Obrázek 21.4: Struktury.

## 21.3 Velké struktury

**Kupy galaxií** - největší gravitačně vázané struktury ve vesmíru - v prostoru ve shlucích = nadkupy galaxií

Nadkupa není gravitačně vázána, časem se rozpadá.

**Buněčná struktura** – galaxie podél stěn nepravidelných „buněk“ - rozměry „buněk“ - 50 - 150 Mpc.

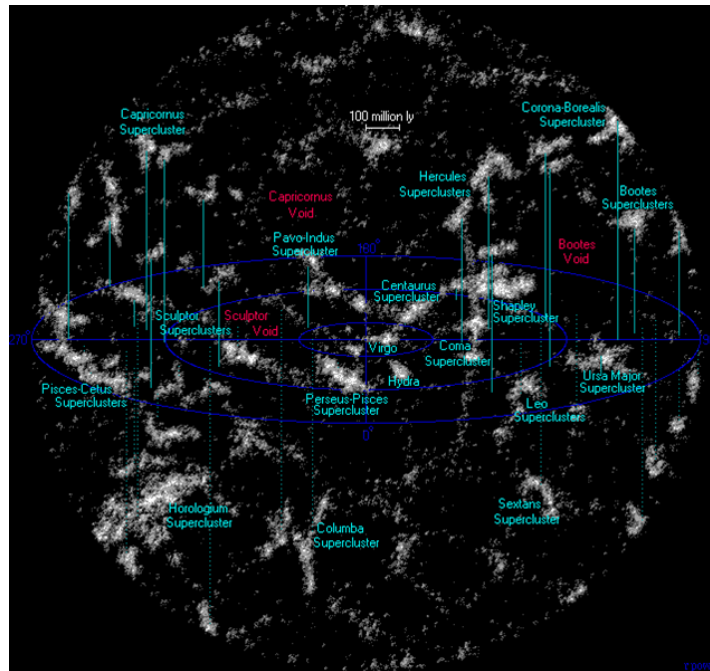
nad několik set megaparseků - žádné struktury, ale ...

### 21.3.1 Větší než nadkupy

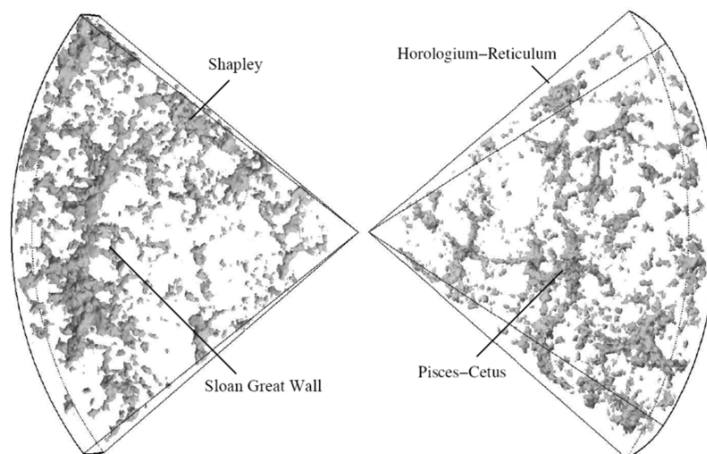
- dlouhá vlákna (filamenty) galaxií - délka přes 250? Mpc,
- galaktická stěna - nakupení galaxií, velikost cca  $0,5 \cdot 10^9$ ? Mpc
- kostra obřích prapůvodních struktur z raných stadií vesmíru

Uspokojivé vysvětlení pro tyto úkazy dosud nemáme.

## Použitá a doplňující literatura



Obrázek 21.5: The universe within 1 billion light years of Earth, showing local superclusters. Approximately 63 million galaxies are shown.



Obrázek 21.6: Three-dimensional DTFE reconstruction of the inner parts of the 2dF Galaxy Redshift Survey. The figure reveals an impressive view on the cosmic structures in the nearby universe. Several superclusters stand out, such as the Sloan Great Wall, the largest structure in the universe known to date. "Great Wall," a sheet of galaxies more than 500 million light-years long and 200 million wide, but only 15 million light-years thick. – objev 1989

## 22 Kosmologie

V našich základech astronomie jsme dospěli takřka k samému závěru. Zabývali jsme se jednotlivými částmi vesmíru od jeho základních stavebních jednotek (hvězd) až největším dosud zaznamenaným strukturám v pozorovatelném vesmíru. Do mozaiky našich znalostí nyní přidáme pohled na vesmír jako celek, jako jeden objekt studia odvětví zvaného kosmologie. Pojem "kosmologie" vychází z řeckého "κοσμολογια", což značí nauka o světě. Tím světem rozumíme v nejširším slova smyslu právě vesmír. Samotné české slovo "vesmír" vychází z ruského slova *весь мир* (ves mir, v překladu „celý svět“) a začalo se používat v době národního obrození, kdy nahradilo staročeské "vesvět". Setkáme se i termínem "kosmos" vycházejícím z řeckého *κόσμος* (ozdoba, šperk), ale později značícího také vše uspořádané, řádné. To byla ovšem jen etymologie několika zásadních slov, jaký je však jejich obsah?

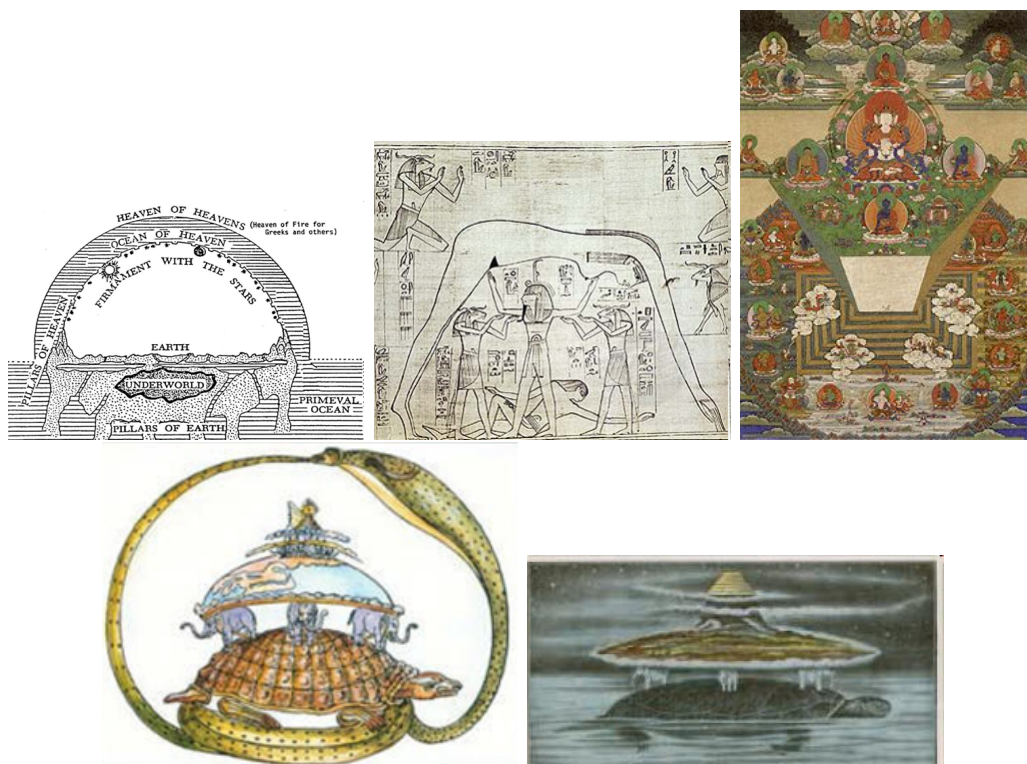
Vesmír či chcete-li kosmos lze definovat jako celek (časovo-)prostoru a v něm obsažené hmoty a energie. V užším slova smyslu lze jako vesmír definovat jednoduše prostor mimo naši Zemi a její atmosféru. A kosmologie je pak nauka, která zkoumá vesmír jako celek. Zabývá se jeho vznikem vývojem i budoucím vývojem. Přestože termín kosmologie použil poprvé zřejmě roku 1730 německý filozof Christian Wolff (v knize *Cosmologia generalis*), nejstarší dochované představy lidí o vzniku a vývoji světa kolem nás jsou staré řadu tisíciletí. Připomeňme staré čínské, hinduistické nebo babylonské texty. První představy byly do značné míry mýtické (viz obr. 22.28). Každá kultura řešila otázku původu světa, kde žijeme, po svém. Zpočátku tak byla kosmologie naplňována jen krásnými mýty a pověstmi, později se dostala na pomezí filozofie a náboženství a teprve nakonec se zapojila i věda. Nejednoznačnou roli vědy v kosmologii jí řada lidí přisuzuje i dnes. Kosmologie je však dnes moderní velmi rychle se rozvíjející věda založená na pozorováních! Doufejme, že k takové poznání přispějí i následující řádky.

Předmětem kosmologie je tedy celý náš vesmír, a o i přesto, že vlastně z našeho vesmíru pozorujeme jen kus, vlastně docela malý kousek - a znalosti tohoto kousku vesmíru extrapolujeme na celý vesmír. Při tom aplikujeme jeden zásadní předpoklad - a totiž, že fyzikální zákony platí vždy a všude v celém vesmíru stejně. Problémem ovšem je, že ve vesmíru máme co dočinění i se skrytou hmotou a energií, o nichž toho zatím mnoho nevíme.

Základní metodou kosmologie tak zůstává srovnávání modelových představ s výsledky pozorování. Při popisu vesmíru samozřejmě nemůže kosmolog popisovat okolní svět do nejmenších detailů, pro sestavení modelu okolního světa použije určitá zjednodušení. Například bude model budovat v určité škále velikostí. Vše menší než jistá vzdálenost, a buďte si jisti, že docela velká, pro něj bude z hlediska modelu nezájímavé. Pozorováním poté své představy o vesmíru vložené do vytvořeného modelu potvrdí, verifikuje nebo naopak vyvrátí a pak nezbude nic jiného, než pustit se do tvorby nového modelu.

### 22.1 První představy a první paradoxy

Na cestě od těchto mýtů až po moderní modely vesmíru je několik mylníků, které další vývoj významně ovlivnily. Nejstarší kosmologické představy o vzniku světa se v podstatě omezovaly jen na naši Zemi, respektive na území té které kultury a její okolí a oblohu



Obrázek 22.1: Mytologie - modely světa.

nad ním. Země měla v těchto mýtech povětšinou tvar kruhové placky, kterou spolu s nebeskou klenbou nesla například obří želva (a trojice slonů na ní), plující v nekonečném vodním chaosu.

O řadu století později - přesněji ve starém Řecku v 5. století před naším letopočtem se tzv. atomisté (například Anaxagorás (500 př.n.l. - 428 př.n.l.) nebo Démokritos (460 př.n.l. - 370 př.n.l.)) domnívali, že nekonečně mnoho malých zrněk hmoty (atomů) je rozseto v nekonečné prázdnotě věčného vesmíru. Platón (427 př.n.l.-347 př.n.l.) později protestoval proti myšlence věčného vesmíru. Tvrdil, že vesmír musel být nejprve vytvořen a teprve od svého stvoření může existovat věčně. Nezdála se mu ani úloha atomů. Ze srážek nějakých malých částic podle něj nikdy nemůže vzejít krása a nemůže být vytvořen náš svět. Inspirován prací Empedokléa (490 př.n.l. - 430 př.n.l.), který jako základní látky všeho bytí definoval čtyři substance: oheň, vodu, vzduch a zemi, vytvořil Platón koncept čtyř jednoduchých základních těles - ohně, země, vody a vzduchu. V jeho představě to nebyly nejmenší částičky hmoty, ale byly to nejjednodušší částice, které bylo možné popsat základním a neměnným jazykem - matematikou. Částice ohně chápal jako čtyřstěn, země jako krychli, vzduchu jako osmistěn a vody jako dvacetistěn. Kolem roku 330 před naším letopočtem rozpracoval ideu základních esencí hmoty Aristoteles. Odmítl atomistický náhled Platóna a jako čtyři prvky tvořící pozemskou materii chápal takto:

- země - chladná a suchá, v moderním pojetí je to pevná látka;
- voda - chladná a mokrá, odpovídá kapalině;
- vzduch - horký a vlhký, odpovídá v moderním pojetí plynu;

oheň - horký a suchý, odpovídá teplu.

K nim ale Aristoteles přidal ještě matérii nebeskou, božskou substanci, která tvoří nebeskou sféru a nebeská tělesa (hvězdy a planety).<sup>1</sup> Aristoteles popsal i chování čtyř pozemských substancí a jejich tzv. přirozené místo. Všechny se pohybují ke středu vesmíru, to je ke středu Země. Voda se pohybuje ke sféře obklopující střed, který je tvořen zemskou substancí. Vzduch se snaží zaujmout místo ve sféře obklopující vodní sféru a oheň směřuje k měsíční sféře, kde se pohybuje Měsíc. Když jsou tyto substance odsunuty ze své přirozené polohy, snaží se vrátit zpět. A tak, například pevná tělesa se ve vodě potápí ke dnu, zatímco bublinky vzduchu stoupají vodou vzhůru nebo kapky deště padají ve vzduchu dolů, ale plameny ohně míří vzhůru. V nebeské sféře je ale vše jinak. Tam se éterická tělesa pohybují na ideálních, perfektních kruhových trajektoriích. Tyto Aristotelovy představy byly bez větších výhrad většinově přijímány až do konce 16. století a ovlivnily tak učence na téměř dvě tisíciletí!

Aristotelův vesmír byl tedy geocentrický, omezený v prostoru, ale nekonečný v čase. Nicméně i ve starověkém Řecku se objevily konkurenční představy o podobě vesmíru. Důležitý mezník představuje zejména zpochybnění ústředního postavení Země v modelu vesmíru. Prvním, kdo "vystrnadil Zemi z centra vesmíru" byl pythagorovec Filoláos (470 př.n.l. - 399 př.n.l.). Do středu vesmíru umístil centrální oheň, kolem něhož obíhají Země, Slunce, Měsíc a planety. Slunce oběhne kolem centrálního ohně za jeden rok. Hvězdy jsou naproti tomu nehybné. Zajímavé je, že Filoláos uvažoval i tom, že Země rotuje kolem své osy. Kolem roku 280 před naším letopočtem přišel Aristarchos ze Sámu (320 př.n.l. - 250 př.n.l.) s heliocentrickým modelem. Do středu vesmíru umístil Slunce a kolem něj nechal obíhat Země i ostatní planety. Aristarchos odvodil tvar Země, snažil se o určení vzdáleností Země, Slunce a Měsíce. Ve svých úvahách se pustil i dál. Prohlásil, že vesmír je nekonečný a hvězdy jsou jiná Slunce. Jenže to už byly na tehdejší dobu příliš kacírské myšlenky a Aristarchos byl obžalován z bezbožnosti. Jeho model byl zamítnut a posléze na dlouho zapomenut. Renesance se dočkal až v 16. století. Mikuláš Koperník (1473-1543) tehdy v podstatě ukončil debatu o postavení Země jako středu vesmíru. Historicky byl střed vesmíru ztotožňován se Zemí. Koperník (1543) s pomocí svého heliocentrického modelu Sluneční soustavy ukázal, že Země je jen jednou ze součástí systému, jednou z planet, které obíhají kolem Slunce. Až ve 20. století se tento poznatek začal označovat jako Koperníkovský princip. Nicméně Koperník řešil lokální postavení Země a Slunce, ale nikoli otázku středu vesmíru. Roli ústředního tělesa převzalo Slunce, ale ani tomu pozice středu vesmíru nepřísluší. I když už Aristarchos a po něm třeba Giordano Bruno mluvili o tom, že Slunce je jen jednou z mnoha hvězd ve vesmíru, bylo třeba přinést nějaký důkaz. Teprve v 18. století se začalo s proměřováním vlastních pohybů hvězd, měřením paralax a určováním jejich vzdáleností nejbližších hvězd. Slunce se tak postupně "začleňovalo" do prostoru mezi ostatní hvězdy. V Herschelově modelu naší Galaxie je Slunce umístěno mírně mimo střed. Dnes víme, že se Slunce nachází skoro na periferii Galaxie, která je jednou hvězdných soustav místní skupiny a ta je součástí ... a tak bychom mohli pokračovat dále. Země a potažmo ani Slunce tedy nemají ve vesmíru žádné privilegované postavení.

Z dob Aristotelových ale do novověku přetrvávalo rozdělení vesmíru na dvě části - pozemskou, tvořenou čtyřmi pozemskými elementy a hvězdnou éterickou sféru. Každá

<sup>1</sup>Později byla tato pátá substance označována za tzv. kvintesenci.

byla utvořena jinak a v každé platily jiné přírodní zákonitosti. První pozorovatelské důkazy, které začaly tyto představy nabourávat pochází z konce 16. století. Tycho Brahe, Tadeáš Hájek z Hájku a další pozorovali roku 1572 supernovu v souhvězdí Kasiopeji a důkladným rozbořením pozorování určili, že leží dále než Měsíc. Patří tedy do sféry stálic, která měla být podle Aristotela zcela neměnná. Počátkem 17. století se Galileo Galilei (1564-1642) věnoval mimo jiné mechanice a popisoval pohyby těles. Proslavené jsou jeho měření volného pádu těles pouštěných z šikmé věže v Pise. Na jeho práci navázal Isaac Newton (1642–1727), který formuloval zákony pohybu a konečně i gravitační zákon. Gravitace má být univerzální vlastností látky a gravitační zákon by tak měl platit stejně na Zemi i ve vesmíru, podobně jako další pohybové zákony. Po dvou tisíciletích od Aristotela tedy fyzika pozemská a nebeská splynuly! Tím se ovšem vyřešila jen část problému. Pozemská i nebeská tělesa se řídí stejnými fyzikálními zákony, ale mají také stejné složení? Na odpověď bylo nutné počkat až do poloviny 19. století a nástupu spektrální analýzy. Ta prokázala, že hvězdy a obecně vesmírné objekty jsou složeny ze stejných prvků jako Země a předměty na ní. Teprve od té doby bylo možné beze zbytku aplikovat jednu fyziku na celý vesmír.

Základní paradigma kosmologie:

*Žádný bod v prostoru nemá privilegované postavení!*

=>

*Vesmír musí být homogenní a izotropní!*

Edward Milne (1896–1950) - kosmologický princip

## 22.2 Newtonův model vesmíru

vesmír je nekonečný, rovnoměrně vyplněný hvězdami, které nekonají žádný systematický pohyb => homogenní, izotropní - v prostoru i čase

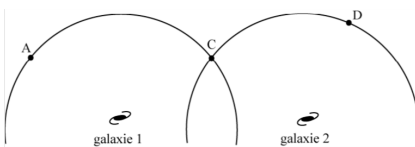
hezké . . . . ale!!!

vady Newtonova modelu = kosmologické paradoxy:

- gravitační paradox - výsledné gravitační pole nekonečného počtu kosmických objektů => gravitační síly se vykompenzují, ale potenciály jdou k nekonečnu řešení: prázdný vesmír
- fotometrický paradox – Olbersův, Keplerův . . . když je hvězd nekonečně mnoho, proč nevyplní oblohu? řešení: - hvězdy „nežijí“, nezáří nekonečně dlouho
  - vesmír nekonečný v prostoru i čase, ale světlo ze stejně vzdálených míst na slupce k nám „putuje“ určitou dobu; vesmír vznikl => ze vzdálenějších slupek světlo nedolétlo, vesmír ještě neexistoval => počet slupek není nekonečný
  - vesmír se rozpíná => kosmologický červený posuv záření a snížení intenzity záření

Nejjednodušším důkazem vývoje a časových změn vesmíru je tma v noci.

### Izotropie a homogenita.



Obrázek 22.2: Izotropie a homogenita. Převzato z knihy Stevena Weinberga První tři minuty (Mladá fronta, Praha 1983, překlad Michal Horák, 25-26).

komentář k obrázku: Je-li vesmír izotropní kolem galaxie 1 i kolem galaxie 2, pak je homogenní. Abychom ukázali, že podmínky v libovolných dvou bodech A a B jsou stejné, nakreslíme kružnici se středem v galaxii 1, procházející bodem A, a jinou kružnici se středem v galaxii 2, procházející bodem B. Izotropie kolem galaxie 1 vyžaduje, aby podmínky byly stejné v bodě A a v bodě C, kde se obě kružnice protínají. Podobně izotropie kolem galaxie 2 vyžaduje, aby byly stejné podmínky v B a C. Jsou tedy stejné podmínky i v A a B.

okolní prostor nehomogenní – záleží na měřítkách – od 108 pc výše vesmír homogenní; reprezentativní vzorek vesmíru – krychle o hraně 200 milionů sv. l. – v našem dohledu jich je milión!

## 22.3 Standardní model

do poč. 20. st. – vesmír statický a věčný

1916 Albert Einstein: OTR - rovnice obecné relativity

$$G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

- matematický popis faktu, že hmota kolem sebe zakřivuje prostor a čas -  $\kappa = 8\pi G/c^4$   
pro slabá pole Einsteinovy rovnice – > Newtonův gravitační zákon - vesmír statický  
=> 1917 kosmologická konstanta  $G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$

1922 Alexandr Fridman - řešení rovnic OTR popisujících vývoj vesmíru v čase => vesmír není statický, ale dynamický!

1927 Georges Lemaître - nezávislé potvrzení Fridmanových výpočtů

1929 Edwin Hubble – objev vzdalování se galaxií, rozpínání vesmíru

1931 Albert Einstein – kosmologická konstanta = největší omyl života

1998 renesance kosmologické konstanty (akcelerace rozpínání vesmíru)

duben 2012 potvrzena oprávněnost kosmol. konstanty (10m dalekohled SPT)

### 22.3.1 Geometrie vesmíru

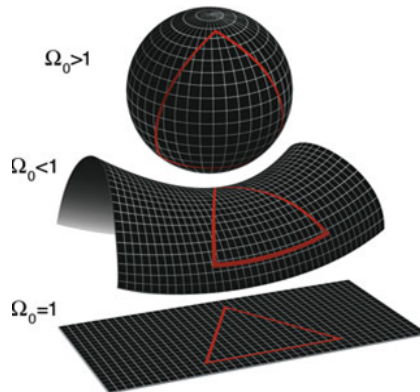
Dominující síla – gravitace – dalekého dosahu, nepřímo úměrná čtverci vzdálenosti, nelze ničím odstínit => kosmologické modely vesmíru založené na teorii gravitace – zejména OTR - tělesa se pohybují po nejpřímější možné dráze v prostoročasu zakřiveném působením hmotných těles

platí kosmologický princip => geometrii vesmíru lze popsat pomocí křivosti prostoru.

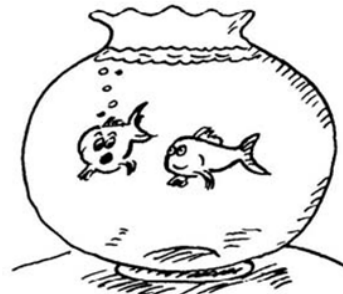
$W_0 > 0$  => 3D prostor má vlastnosti obdobné vlastnostem povrchu koule: (konečný objem, bez hranic, součet vnitřních úhlů v trojúhelníku  $> 180^\circ$ )

$W_0 = 0$  nekonečný a nezakřivený prostor, platí euklidovská geometrie

$W_0 < 0$  2D analogie v sedlové ploše (prostor nekonečný, součet úhlů v trojúhelníku  $< 180^\circ$ )



Obrázek 22.3: Modely vesmíru. ( $\Omega$  – poměr celkové střední hustoty vesmíru ke kritické hustotě)



MĚLAS PRAVDU, SVĚT  
JE ZAKŘIVENÝ!

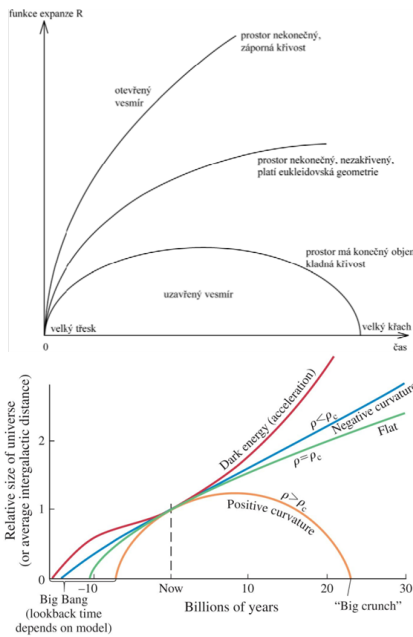
Obrázek 22.4: Vtip - zakřivený vesmír.



v počátečních fázích se vesmír rozpíná, expanze vesmíru probíhá buď stále nebo se může změnit ve smršťování

Funkce expanze (škálovací faktor)  $R$ : bezrozměrné číslo, (udává, jak se s časem mění vzdálenosti ve vesmíru)

v čase  $t_0$  vzdálenost dvou kup galaxií  $l_0$ , v čase  $t$   $l_t = R(t)l_0$  (z definice:  $R(t_0) = 1$ )



Obrázek 22.5: Modely vesmíru. Zdroj - dolní obr. <http://www.nat.vu.nl/wimu/FundConst-Notes.html>

## 22.4 Rozpínání vesmíru a Hubblův vztah

do poč. 20. st. – vesmír statický a věčný

proč ne?

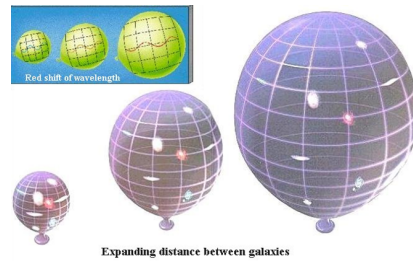
homogenní vesmír => všude stejný tlak => nevzniká rozdíl tlaků - uplatňuje se pouze gravitace, kterou nelze nijak odstínit => vesmír musí být dynamický

model rozpínání:

2D - velká gumová blána (balónek) s tečkami (tečky=kupy galaxií) a sítí – při rozpínání se roztahuje síť, ale tečky neputují napříč sítí'- matematicky – Hubblův vztah

3D – bublanina s rozinkami

o kolik za rok? - v 1 m<sup>3</sup> objemu o 0,23 mm<sup>3</sup>/rok



Obrázek 22.6: Modely vesmíru. Rozpínání

### Hubbleův vztah a kosmologický princip

kosmologický princip => pozorovatel by měl vidět stejné rozložení rychlostí ostatních galaxií nezávisle na místě, kde se nachází

matematickým důsledkem kosmologického principu - Hubbleův vztah (1929):

Relativní rychlost libovolných dvou galaxií je úměrná vzdálenosti mezi nimi.

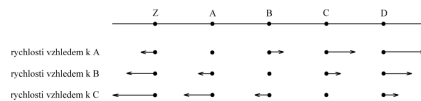
$v = Hr$  – potvrzením správnosti kosmologického principu

dvojit směr:

Hubble - zjištění  $v = H \cdot r$  => nepřímé potvrzení správnosti kosmologického principu => různé části vesmíru se neliší => platí kosmologický princip

a obráceně

kosmologický princip správný => vztah úměrnosti mezi vzdáleností a rychlostí galaxií  
=> z měření Dopplerova posuvu určíme vzdálenost dalekých objektů



Obrázek 22.7: Rozpínání - galaxie

Hubble - zjištění  $v = H \cdot r$  -> nepřímé potvrzení správnosti kosmologického principu  
=> různé části vesmíru se neliší => platí kosmologický princip

a obráceně

kosmologický princip správný => vztah úměrnosti mezi vzdáleností a rychlostí galaxií  
=> z měření Dopplerova posuvu určíme vzdálenost dalekých objektů

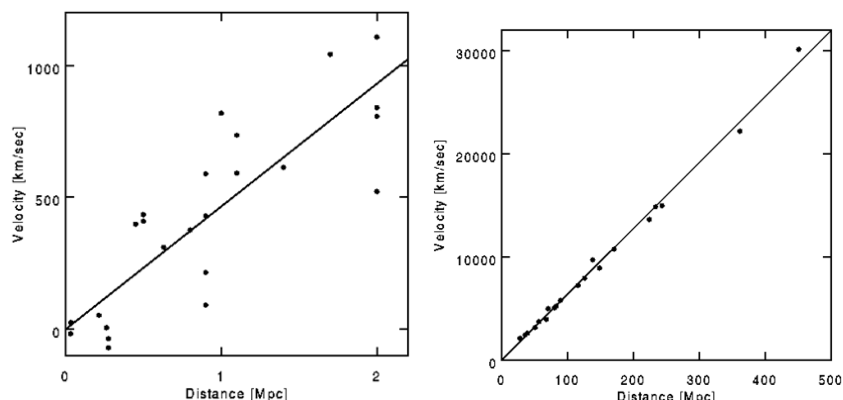
Nejdůležitější kosmologická konstanta = Hubbleova konstanta,  $[\text{km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc})]$   $[\text{s}^{-1}]$   
- udává o kolik se zvětší rychlost vzdalování ( $v$   $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ ), při přechodu k objektům vzdálenějším o jednotku vzdálenosti (1 Mpc).

Hubblova konstanta není konstantní! mění se s časem  
protože se s časem mění rychlost rozpínání

Hubbleova konstanta  
 $\text{km}/(\text{s Mpc}) [\text{s}^{-1}]$

- udává o kolik se zvětší rychlost vzdalování (v  $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ), při přechodu k objektům vzdálenějším o jednotku vzdálenosti (1 Mpc).

Hubbleova konstanta není konstantní!  
mění se s časem  
proč?  
protože se s časem mění rychlost rozpínání



Obrázek 22.8: Měření - data. grafy z [http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmo\\_01.htm](http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmo_01.htm)

Hubbleova konstanta - v současnosti  $H_0 = 74.2 \pm 3.6 (\text{km}\cdot\text{s}^{-1})/\text{Mpc}$  (HST, 2009)  
kombinací všech dostupných dat:  $70.8 \pm 1.6 (\text{km}\cdot\text{s}^{-1})/\text{Mpc}$  pro plochý vesmír, jinak  
 $70.8 \pm 4.0 (\text{km}\cdot\text{s}^{-1})/\text{Mpc}$  (NASA, 2010); 21.3.2011  $73.8 \pm 2,2 (\text{km}\cdot\text{s}^{-1})/\text{Mpc}$

## 22.5 Rozpínání vesmíru

Vesto Slipher – cca 1920 – spektra 36 tzv. „spirálních mlhovin“ z 41 – červený posuv spektrálních čar

červený posuv

$z + 1 = \lambda/\lambda_0$ ,  $\lambda_0$  - původní vlnová délka,  $\lambda$  - současná vlnová délka

Interpretace červeného posunu spektrálních čar:

u blízkých galaxií - pomocí Dopplerova jevu - důsledek vzdalování objektů

vzdálené galaxie – jde o kosmologický rudý posuv v důsledku rozpínání vesmíru velkými měřítky (popsáno Hubbleovým vztahem) Kosmologický červený posuv, který foton vy-

kazuje, poskytuje informaci, kolikrát se zvětšil vesmír za dobu jeho putování prostorem.

rozpínání vesmíru nemá vliv na vzdálenosti gravitačně vázaných objektů => v důsledku rozpínání vesmíru se nemění velikosti atomů či molekul, vzdálenost Země – Slunce nebo vzdálenosti hvězd v Galaxii

vzdálené galaxie – nelze použít - kosmologický rudý posuv, protože vesmír velkých měřítek se rozpíná

Kosmologický červený posuv, který foton vykazuje, poskytuje informaci, kolikrát se zvětšil vesmír za dobu jeho putování prostorem. rozpínání vesmíru nemá vliv na vzdálenosti gravitačně vázaných objektů => v důsledku rozpínání vesmíru se nemění velikosti atomů či molekul, vzdálenost Země – Slunce nebo vzdálenosti hvězd v Galaxii

### 22.5.1 Rozpínání vesmíru - tam a zpět

1922 – Fridman - modely

1924 – Hubble – vzdálenost galaxií

1927 – Lemaitre – modely

1929 – Hubbleův vztah

1931 – Lemaitre – expanze vesmíru => obrácením toku času – > nulové rozměry vesmíru, „prapůvodní atom“

1948 - George Gamow & asistent Ralph Alpher & „do počtu“ Hans Bethe ( $\alpha, \beta, \gamma$ )

Alpher, R.A.; Bethe, H.; Gamow, G. (1948). "The Origin of Chemical Elements,, - vyšel 1.4.

1948 – Fred Hoyle et al. – teorie kvazistacionárního vesmíru (Steady State Theory)

1949 – Hoyle - termín velký třesk - teorii VT nepodporoval, termín posměšný

počátek rozpínání vesmíru – okamžik velkého třesku = singularita, rozběhl se čas; => vesmír v minulosti - menší, hustší a teplejší.

velký třesk neznamená výbuch! - vesmír se nikam nerozpíná, nese si svůj prostor s sebou; začal se rozpínat sám prostor, v tu chvíli začal plynout čas

Problém – neexistovaly důkazy, nebylo bráno vážně

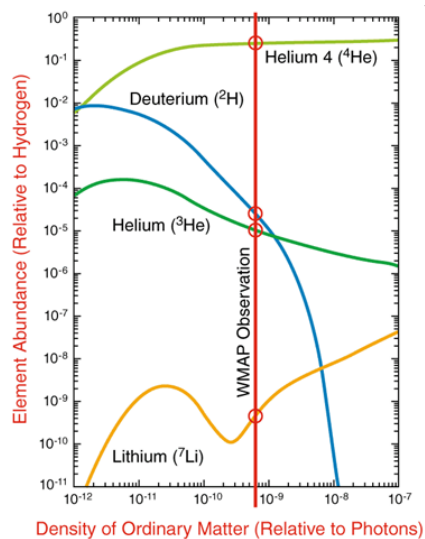
### 22.5.2 Důkazy teorie velkého třesku

- rozpínání vesmíru - 1929 - Edwin Hubble - pozorování vzdalování galaxií, Hubbleův zákon
- zastoupení lehkých prvků H, He, Li ve vesmíru - teorie velkého třesku předpovídá, že tyto prvky vznikly z protonů a neutronů v prvních minutách po VT



Obrázek 22.9: Vtipy

- mikrovlnné kosmické záření na pozadí (CMBR Cosmic microwave background radiation) raný vesmír byl velmi horký, CMBR je pozůstatek žáru po VT 1965 - objev reliktního záření
- vývoj a rozložení galaxií vzdálenější galaxie, kvasary a uskupení mají jiné vlastnosti než blízké (jsou starší)



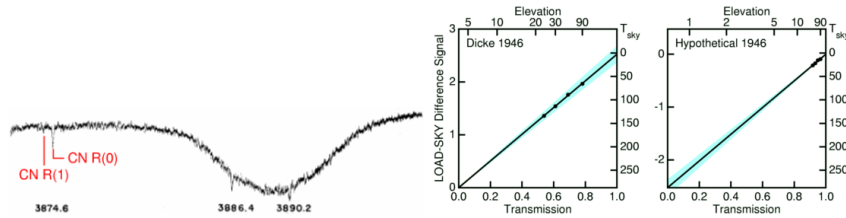
Obrázek 22.10: prvky

### 22.5.2.1 Reliktní záření

1937 T. Dunham a W. Adams – neuvědomělé pozorování reliktního záření

1941 A. McKellar – studium mezihvězdných molekul

1946 R. Dicke – měření jasové teploty oblohy v závislosti na úhlové výšce (elevačním úhlu)



Obrázek 22.11: Předchůdci CMB

1948 - G. Gamow, R. Alpher, R. Herman - v rámci svého horkého modelu vesmíru předpověď existence všesměrového mikrovlnného záření (odhady teplot různé  $T=5-50$  K)

žádný pokus o pozorovací důkaz

1957 - Tigran A. Šmaonov – změřil efektivní teplotu rádiového pozadí  $4 \pm 3$  K, intenzita signálu byla nezávislou na čase a směru

poč. 60. let - nezávislé teoretické předpovědi - Zeldovič, Dicke, Doroškevič, Novikov...

1965 A. Penzias, R. W. Wilson – objev reliktního záření teoretické zdůvodnění – Dicke, Roll, Wilkinson, Peebles v témže čísle ApJ 142

Relikt ní záření – obsahuje v sobě 30x více energie než bylo kdy vyzářeno z hvězd

Vlastnosti reliktního záření v současnosti: záření AČT o  $T = 2,725$  K

Koncentrace fotonů reliktního záření:  $n_r = 4,11 \cdot 10^8$  fotonů/ $m^3$ . Počet nukleonů:  $n_n = 0,22$  nukleonu/ $m^3$  – > poměr je 1:1 900 000 000!



Obrázek 22.12: Penzias a Wilson

Relikt ní záření z kosmu

1983 sovětská družice – projekt RELIKT -1, výsledky 1992

1989 - COBE (Cosmic Background Explorer) – za 8 min 1. výsledek: relikt ní záření = záření AČT o teplotě 2,73 K s přesností  $10^{-3}$  objevy: anisotropie reliktního záření + fluktuace teploty záření odchylky od průměru  $10^{-5}$

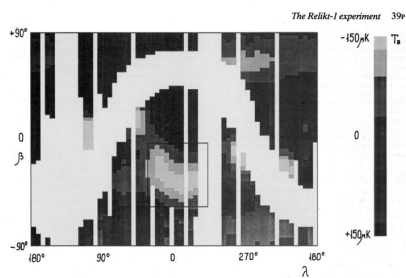
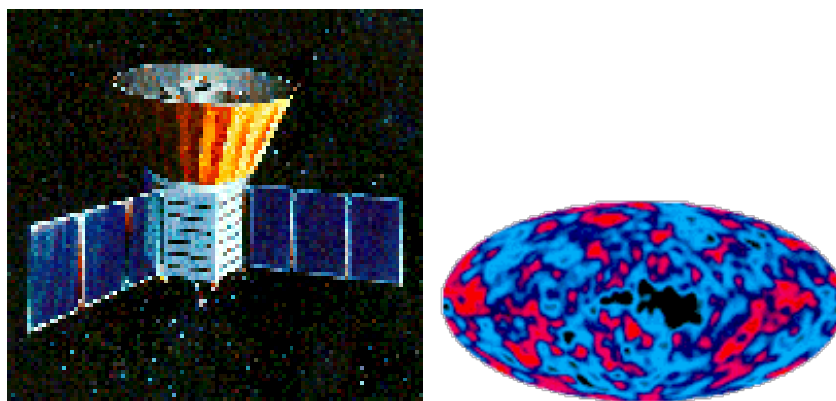


Figure 1. Relikt-1 sky map at a frequency of 37 GHz (galactic coordinates). A cosmic dipole anisotropy of  $3.16 \text{ mK}$  (RA=111 $^{\circ}$ , Dec=-75, Smoot et al. 1987) and a dipole anisotropy due to satellite and Earth orbital velocities and effect have been subtracted from the map. The observing angle is  $\theta_0 = 12^{\circ}$ . The region of detected signal is inside the dark rectangular area. White parts of the map have statistical weight zero and correspond to the Galactic plane and the region with significant Moon and Earth contamination.

Obrázek 22.13: Výsledky z projektu RELIKT-1

rozlišovací schopnost:  $7^{\circ}$

Smoot & Mather - Nobelova cena (2006)

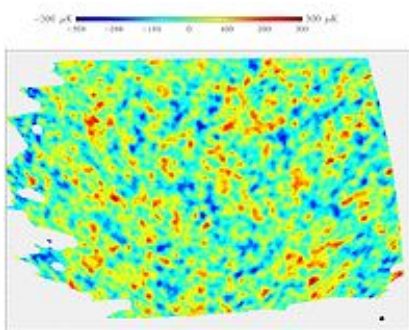


Obrázek 22.14: COBE

1998 – 2000 - balónová měření (BOOMERang, MAXIMA a další)

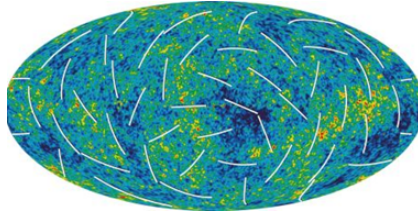
rozlišovací schopnost: cca  $1/6^{\circ}$ .

zpřesnění teploty reliktního záření a hodnoty fluktuací ( $70 \mu\text{K}$ ) => podpora inflační teorie a plochosti našeho vesmíru



Obrázek 22.15: BOOMERang

2001-2010 - WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)  
 studium anisotropie, fluktuací a polarizace reliktního záření;  
 úhlové rozlišení:  $0,3^\circ$ ; teplotní citlivost  $20 \mu\text{K}$   
 rozbor spektra fluktuací reliktního záření  $\Rightarrow$  dosud nejpřesnější určení parametrů našeho vesmíru

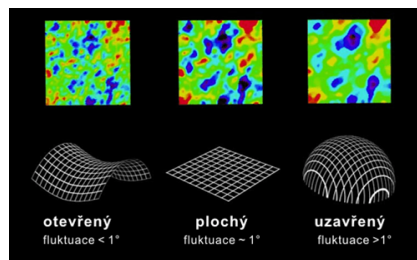


Obrázek 22.16: WMAP

2009 - Planck – evropský projekt  
 úhlové rozlišení:  $0,17^\circ$ ; teplotní citlivost  $2 \mu\text{K}$

souhrn všech projektů zkoumajících CMB <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/expt/>

Ověření geometrie vesmíru



Obrázek 22.17: Geometrie vesmíru - ověření z měření

### 22.5.3 Problémy standardního modelu

problém počáteční singularity – nekonečná teplota singularity; řešení inflací  
 problém plochosti vesmíru – geometrie vesmíru závisí na jeho hustotě  
 současná  $\approx$  kritická  $\Rightarrow$  plochý vesmír nastavení v minulosti mimořádně přesné – je to možné?

problém horizontu – vesmír o velikosti  $R$  se rozpínal –  $R \propto t^{1/2}$ , ale horizont informace  $R_H \propto t$  řeší inflace

Zvídavé otázky tvůrcům standardního modelu

problém baryonové asymetrie (proč ve vesmíru nepozorujeme antihmotu?)  
 problém magnetických monopolů (kde jsou?)



kde se vzaly počáteční fluktuace nutné k tvorbě galaxií?  
 proč je dimenze vesmíru právě 4 (tři prostorové dimenze a jedna časová)?

\*\*\*\*\* konec kosmologie 1/2

## 22.6 Modely vesmíru

standardní model – model  $\Lambda$ CDM, Lambda-CDM (Lambda-Cold Dark Matter), Big Bang theory – většina astronomů

model kvazistacionárního vesmíru (Steady State theory) – Bondi, Gold, Hoyle (1948)  
 - vesmír plochý, nekonečně velký, nekonečně starý, homogenní a izotropní v čase i prostoru; pro udržení hustoty při rozpínání povoluje tvorbu hmoty

## 22.7 Jak starý je vesmír?

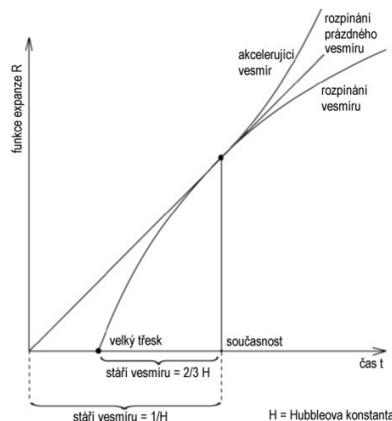
odhad pomocí Hubbleovy konstanty

úvaha: rozpínající se vesmír => rychlost rozpínání ovlivněna jedinou silou: gravitační  
 => prázdný vesmír se rozpíná konstantní rychlostí => odhad stáří vesmíru:  $1/H$

reálný vesmír: stáří menší v důsledku brzdění rozpínání gravitační silou pro standardní kosmologický model - doba existence vesmíru =  $2/3 \ 1/H$

13.75 ( $\pm 0.11$ ).  $10^9$  let

ověření – dle stáří nejstarších hvězdných objektů - kulové hvězdokupy, někteří bílí trpaslíci – stáří alespoň 12 mld let



Obrázek 22.18: Stáří vesmíru

## 22.8 Vývoj vesmíru

### 22.8.1 Velmi raný vesmír

do  $10^{-43}$  s – Planckova epocha není jednotný popis, více teorií; všechny fyzikální interakce jsou spojeny v jediné univerzální

$10^{-43}$ – $10^{-36}$  s – epocha velkého sjednocení vesmír chladne a rozpíná se; oddělení gravitační interakce

$10^{-36}$ – $10^{-12}$  s – elektroslabá epocha začíná oddělením elektroslabé a silné interakce, měly by vzniknout mg. monopóly – nepozorují se – > vyřešeno zavedením inflace v inflačním modelu konec epochy v čase  $10^{-32}$  s

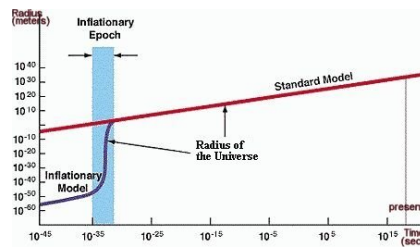
cca  $10^{-36}$  –  $10^{-32}$  – inflační epocha překotné rozepnutí/nafouknutí vesmíru (inflace vesmíru) – zvětšení objemu vesmíru o nejméně 78 řádů! (1980 Alan Guth, 1981 Katsuhiko Sato)

příčina? - odpudivé gravitační síly vyvolané působením záporného tlaku vakua. Souběžně s nafukováním vznikala ve vesmíru i nová hmota

na konci: ve vesmíru kvark-gluonové plazma

řeší nedostatky standardního modelu

baryogeneze - tvorba baryonů: nevysvětlená nerovnováha hmota - anti-hmota



Obrázek 22.19: Vývoj vesmíru - inflace

### 22.8.2 Raný vesmír

méně spekulací, více fyzikálního zdůvodnění; supersymetrie vlastností vesmíru => pak porušení při energii  $\lesssim 1$  TeV

$10^{-12}$  –  $10^{-6}$  s - kvarková éra  
všechny interakce odděleny; částice získávají hmotu ale teplota příliš vysoká, aby se kvarky spojily v hadrony

$10^{-6}$  - 1 s - hadronová éra  
tvoří se hadrony (protony, neutrony) ; oddělily se neutrony – volně putují vesmírem =>

kosmické neutrinové pozadí (obdoba mikrovlnného pozadí, reliktního záření – uvolněno později) na konci – většina hadronů a antihadronů anihilovala

hadrony - baryony (poločíselný spin, 3 kvarky nebo 3 antikvarky) a mezony (celočíselný spin = bosony - kvark+antikvark)

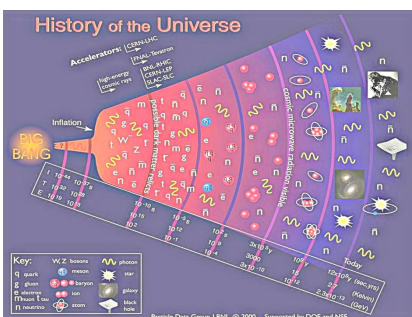
1 – 10 s – leptonová éra

ve vesmíru dominovaly leptony a anti-leptony; na konci – konec tvorby nových párů lepton-antilepton, většina stávajících anihilovala, zůstal jen malý zbytek leptonů; vesmír byl neprůhledný (rozptyl na volných elektronech);

leptony - nepůsobí na ně silná jaderná síla (silná interakce); nabité (elektron, mion, tauon) + neutrina

10 s – 380 000 let – fotonová éra

většina energie vesmíru ve fotonech, které interagovaly s protony, elektrony a event. jádry, na konci - oddělení záření od látky – vznik reliktního záření; před tím vesmír zcela neprůhledný, hustota  $2 \cdot 10^9$  větší, teplota 3 000 K; ve vesmíru zárodky kup galaxií a buněčné struktury



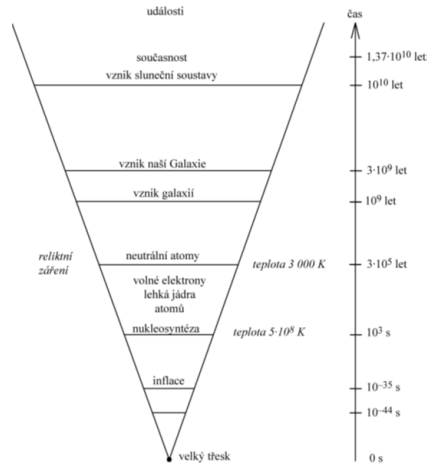
Obrázek 22.20: Vývoj vesmíru

Nukleosyntéza (3 min - 20 min) během fotonové éry tvorba atomových jader až po  $\text{He}^4$ , kde skončila většina neutronů hmotnostně 3x více H než He, ostatní – jen stopové množství konec jaderného vývoje: chladnutí a řídnutí velmi rychlé (jaderné reakce nemohou probíhat)

Převaha hmoty (70 000 let) hustota nerelativistické hmoty (atomová jádra) = hustotě relativistického záření (fotony); vytvářejí se malé struktury hmoty, dominuje chladná temná hmota – její chování a vývoj není jednoznačně popsán

Rekombinace: cca 377 000 let na počátku H, He ionizovány, bez elektronů; vesmír se rozpínal => řídl a chladnul => elektrony zachytávány ionty => hustota vesmíru klesá, tvorba neutrálních atomů H a He (rekombinace) při 3000 K => fotony se naposledy rozptýlily na elektronech => nesou informaci o tehdejší rozdělení látky ve vesmíru; fotony mohou volně cestovat => vesmír zprůhledněl! = oddělení záření od látky reliktní

záření = otisk tehdejšího vesmíru!



Obrázek 22.21: Vývoj vesmíru - klin

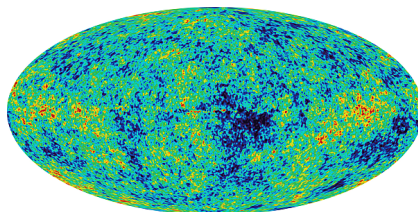
### Konec fotonové éry

stav: volně se pohybující elektrony zachyceny atomovými jádry => vesmír průhledný pro záření (neutrální atomy pohlcují a rozptylují záření podstatně méně než volné elektrony) => oddělení fotonů a látky => počátek samostatné existence reliktního záření

reliktní záření - ze všech směrů téměř rovnoměrně, ale... COBE, WMAP - odchylky od izotropie => už v raném vesmíru zárodečné chuchvalce látky => z nich houbovitá struktura (vlákna a stěny galaxií); překotný vznik protogalaxií – v nich hvězdy první generace - začátek jejich relativně pomalého vývoje

na konci fotonové éry: vesmír průhledný ale prázdný – nejsou zdroje záření!

elektrony se dostaly do atomů, už nebyly volné a fotony se tak neměly na čem rozptylovat!



Obrázek 22.22: Reliktní záření - WMAP

### 22.8.3 Temný věk

= doba mezi vznikem reliktního záření a zrodem prvních hvězd, které začnou epochu reionizace atomů doba trvání: odhadem 150 milionů až 800 milionů let po VT;

teplota vesmíru – cca 1000 K

Baryonická hmota ve vesmíru je tvořena ionizovaným plazmatem => neutrální jen získáním volných elektronů během „rekombinace“ => uvolní se fotony vytvářející reliktní záření => uvolnění fotonů => vesmír zprůhledněl; v té chvíli jediné uvolněné záření - záření neutrálního vodíku na vlnové délce 21 cm

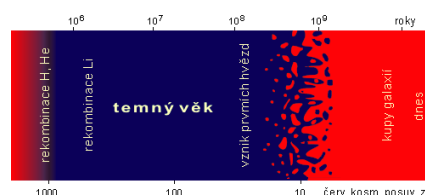
důkaz konce: výskyt ionizovaného vodíku, který vesmír zneprůhlednil; k ionizaci vodíku mohly přispět pouze hvězdy, které se po období temnoty začaly houfně objevovat.

pozorování:

první hvězdy - teoreticky pozorovatelné, ale zčervenělé a velmi slabé

říjen 2010 – objev galaxie UDFy-38135539 – první galaxie, která musela existovat během následující reionizační éry => okno do této doby

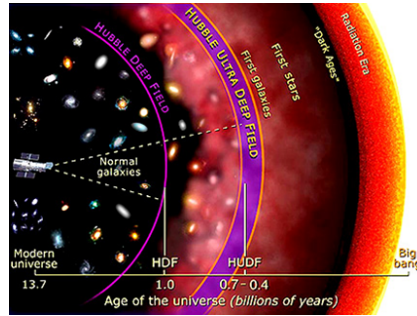
leden 2011 – jiná galaxie, která existovala 480 milionů let po VT



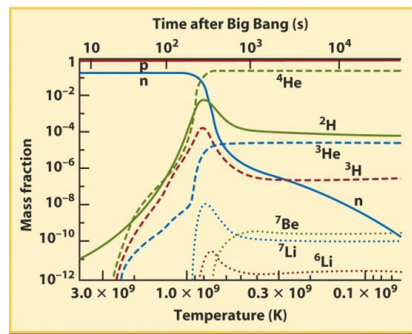
Obrázek 22.23: Temný věk



Obrázek 22.24: Jedna z nejstarších galaxií, které pozorujeme.



Obrázek 22.25: Dosah HST



Obrázek 22.26: Hmotnostní zastoupení prvků na počátku vesmíru

## 22.8.4 Vytváření struktur

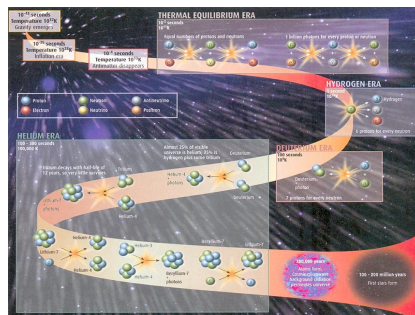
tvorba hierarchická – od malých k větším první struktury – kvasary = jasné aktivní galaxie a hvězdy populace III

Reionizace: 150 milionů - 1 miliarda let  
první hvězdy a kvasary, jejich intenzivní záření reionizuje okolní vesmír od té doby je většina vesmíru tvořena plazmatem

Tvorba hvězd  
první hvězdy (populace III) – začátek procesu lehkých prvků na těžší zatím jen modely tvorby a vývoje, žádné pozorované

Tvorba galaxií  
velké objemy hmoty kolabovaly => vznik galaxií vznik hvězd populace II a později hvězd populace I  
kvasar CFHQS 1641+3755 ve vzdálenosti 12.7 Gly (7% současného stáří vesmíru)  
2007 - Keck II – 6 galaxií cca 13.2 Gly daleko (vesmír jen 500 milionů let starý)  
Hubble Ultra Deep Field – malé galaxie, které se spojují ve větší (13 Gly, jen 5% současného stáří vesmíru); tenký disk Galaxie zformován před  $8.8 \pm 1.7$  mld let

Vytvoření skupin, kup a nadkup  
gravitační interakce – galaxie se shlukují do skupin, kup, nadkup



Obrázek 22.27: Schématický vývoj první prvků ve vesmíru

utváření Sluneční soustavy: před 8 mld let, naše Slunce před 4.56 mld let

Dnes: 13.7 mld let

(nejlepší odhad stáří vesmíru:  $13.75 \pm 0.11$  mld let od velkého třesku) rozpínání vesmíru se zrychluje => největší struktura ve vesmíru je „cosmic web“ – pěnová struktura; zrychlující se expanze =>

- žádné další inflační struktury nepřekročí horizont událostí
- nevytvoří se žádné takové gravitačně vázané struktury

## 22.9 Výhled do budoucnosti

korektní předpovědi za hranicemi současné fyziky => ve hře různé scénáře

Velké zamrznutí (Big freeze):  $10^{14}$  let a dále  
nejpravděpodobnější, vyplývá ze současné expanze za cca  $10^{14}$  let – existující hvězdy vyhoří, tvorba nových hvězd ustane, vesmír potmění  
za mnohem delší dobu - galaxie a černé díry se vypaří;  
podle některých - za  $10^{34}$  let – rozpad protonů => zbylý mezihvězdný materiál a zbytky hvězd – > leptony (pozitrony a elektrony) a fotony, pozitrony a elektrony – > fotony  
=>vesmír ve stavu vysoké entropie; neví se zda dosáhne termodynamické rovnováhy

Velký krach (Big Crunch): 100+ mld let od současnosti  
hustota energie skryté energie záporná nebo vesmír uzavřený => rozpínání vesmíru se obrátí a vesmír se bude smršťovat do horkého, hustého stavu; možná část oscilujícího, cyklického vesmíru podle současných pozorování nepravděpodobný scénář

Velké rozervání (Big Rip): 20+ mld let od současnosti  
2003 – Robert Caldwell hustota skryté energie roste s časem bez omezení (tzv. phantom energy - nepodobá se žádné známé formě energie) => rychlost rozpínání vesmíru se zvětšuje => gravitačně vázané systémy (kupy galaxií, galaxie a nakonec i Sluneční soustava) budou rozděleny; nakonec rozpínání tak rychlé, že budou roztrhány i atomy a molekuly => vesmír skončí jako nezvyklý druh gravitační singularity, když dosáhne

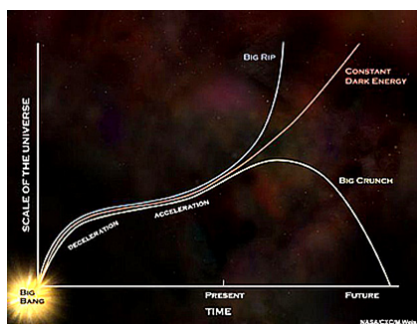
rychlost rozpínání nekonečné velikosti

Metastabilita vakua

náš vesmír v dlouhotrvajícím falešném vakuu => malá oblast vesmíru může protunelovat do stavu s nižší energií => okamžitě se zničí všechny struktury v této malé oblasti a oblast expanduje takřka rychlostí světla

Tepelná smrt (Heat death):  $10^{150}+$  let od současnosti

možný závěrečný stav vesmíru za cca  $10^{150}$  let – vesmír nemá žádnou volnou termodynamickou energii, aby umožnil pohyb nebo život  $\equiv$  dosáhne maximální entropie  
hypotéza tepelné smrti vesmíru pochází z 50. let 19. st. - myšlenky William Thomson (Lord Kelvin)



Obrázek 22.28: Modely - [http://scienceblogs.com/startswithabang/2011/05/the\\_fate\\_of\\_the\\_universe.php](http://scienceblogs.com/startswithabang/2011/05/the_fate_of_the_universe.php)



JEDINÉ, CO VE VESMÍRU NEEXPANDUJE,  
JE MŮJ PLAT!

(Podle Mercury May-June 1981, 88.)

Obrázek 22.29: Vtip

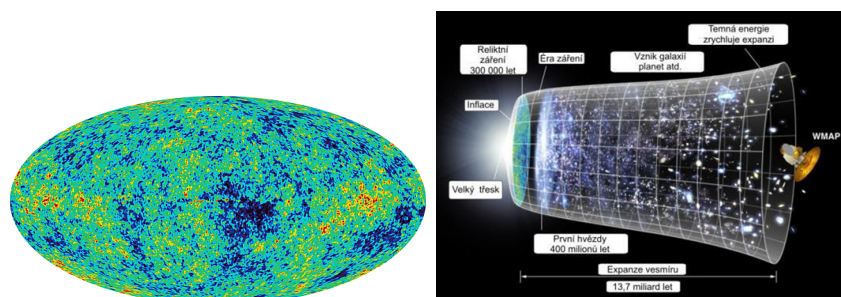


## 22.10 V jakém vesmíru žijeme?

Lze to zjistit?

V principu ano.

1. dle vzdáleností kup galaxií  
ale je tu problém určování přesných vzdáleností kup galaxií
2. podle křivosti vesmíru – lze měřit z fluktuací teploty reliktního záření
3. podle hustoty vesmíru  
uzavřený vesmír => střední hustota látky > *kritická* (odpovídá 1 atomu vodíku asi v jednom  $\text{dm}^3$  prostoru), jenže ve vesmíru registrujeme našimi přístroji jen několik procent hmoty (paradox skryté hmoty - znám už od 30. let 20. století)



Obrázek 22.30: WMAPvesmir

## 22.11 Pozorovací kosmologie

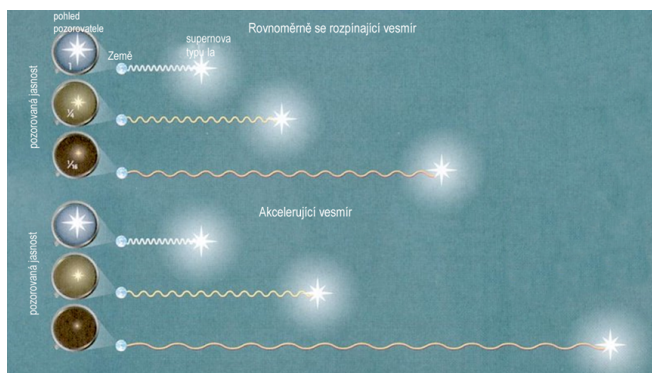
Pozorování, experimenty:

dřívější – Hubble, kosmický žebřík vzdáleností, spektroskopie, objev reliktního záření  
současné  
plánované

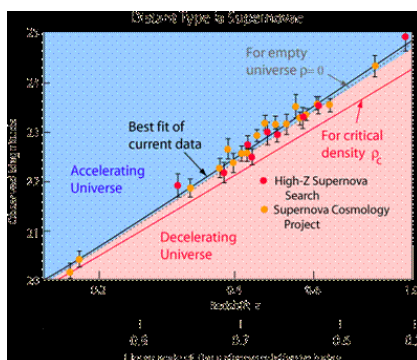
### 22.11.1 Současná pozorovací kosmologie

#### 22.11.1.1 Akcelerující vesmír

1998 - dva týmy – ze studia supernov typu Ia rozpínání vesmíru zrychluje  
Nobelova cena za fyziku 2011



Obrázek 22.31: V roce 1998 dva týmy objevily, že rozpínání vesmíru zrychluje na základě studia supernov typu Ia. Hvězdná velikost supernovy indikuje její vzdálenost a barva její červený posun kvůli rozpínání vesmíru. Nahoře: V rovnoměrně expandujícím vesmíru vzdálenost roste (jasnost se zmenšuje), stejně jako se zvětšuje červený posun, jak je ukázáno. Dole: Vztah mezi vzdáleností a červeným posunem se mění v akcelerujícím vesmíru. Supernova s vysokým červeným posunem se jeví mnohem vzdálenější (a tím i slabší) než v případě rovnoměrného rozpínání.



Obrázek 22.32: Supernovy

### 22.11.1.2 Červený posun - přehlídkové projekty

1977 – 1982 CfA Redshift Survey

1997-2002 - výsledky 2dF Galaxy Redshift Survey – určení velkých struktur v jedné části vesmíru, horní mez pro hmotnost neutrin, hodnota hustotního parametru  $\Omega$  nerelativ. hmoty

od r. 2000 - Sloan Digital Sky Survey (SDSS) - 100 milionů objektů, pro galaxie z až 0.4, detekce kvasarů až za  $z = 6$ ; mnoho projektů volná data

2001-2004 DEEP2 Redshift Survey – Keckovy dalekohledy, doplňující k SDSS a 2dF

### 22.11.1.3 Reliktní záření

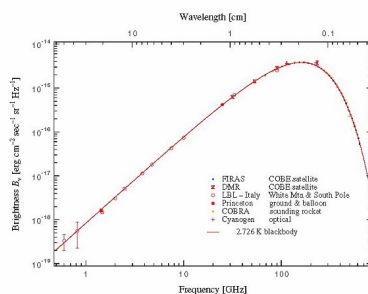
1989 - COBE (Cosmic Background Explorer) zjištění: reliktní záření = záření AČT  $T = 2,73$  K

objevy: anisotropie reliktního záření

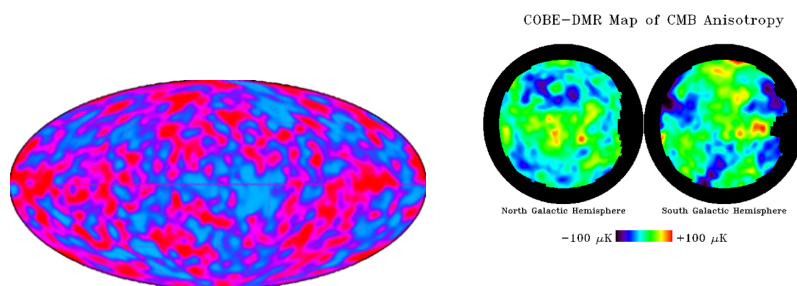


Obrázek 22.33: sloan

fluktuační teploty záření  
Smoot & Mather - Nobelova cena (2006)



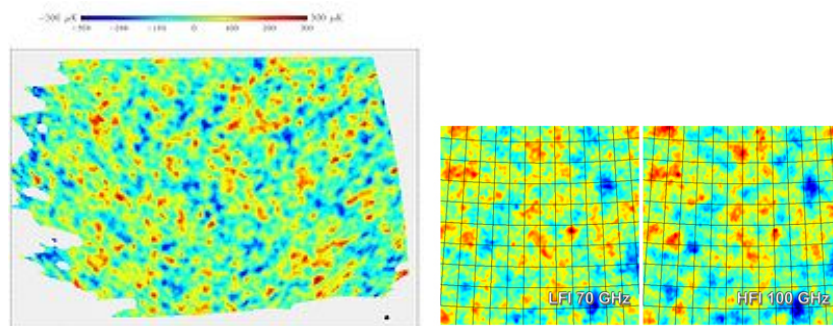
Obrázek 22.34: Křivka záření AČT o teplotě 2.73 K.



Obrázek 22.35: Výsledky z COBE

1998 – 2000 – balónová měření (BOOMERang, MAXIMA a další)  
zpřesnění teploty reliktního záření a hodnoty fluktuací ( $70 \mu\text{K}$ )  $\Rightarrow$  podpora inflační

teorie a plochosti našeho vesmíru



Obrázek 22.36: Výsledky z balónových měření, a z družice Planck - viz <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=45533>

2001-2010 - WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)

- zmapování CMB s největší přesností
- určení stáří vesmíru 13.73 mld let s 1% přesností (0.12 mld let)
- rozložení látky ve vesmíru: baryonová hmota  $4.6 \pm 0.1$  %, temná hmota  $23.3 \pm 1.3$  %, skrytá energie  $72.1 \pm 1.5$  %
- přímá detekce předhvězdného hélia, zastoupení lehkých prvků
- detekce klíčových znaků inflace
- limity pro vlastnosti skryté energie a geometrii vesmíru
- limity pro počty neutrinových částic v raném vesmíru
- průzkum velkých struktur, polarizace záření kosmického pozadí
- dosud nejpřesnější určení parametrů našeho vesmíru

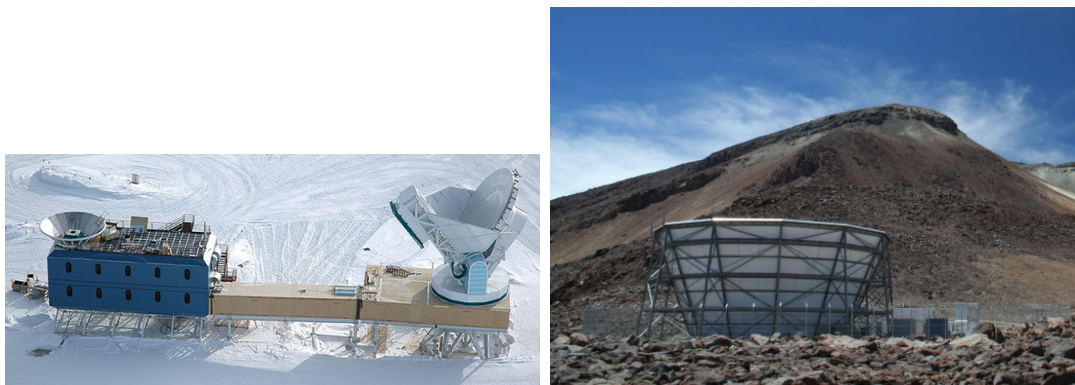
2009 - Planck – evropský projekt

souhrn všech projektů zkoumajících CMB <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/expt/>

Pozemská měření

Pozemská měření South Pole Telescope (SPT) – 10m dalekohled na Amundsen-Scott South Pole Station, Antarktida; pozorování v oborech mikro-, mm- sub-mm- vln elmag. spektra

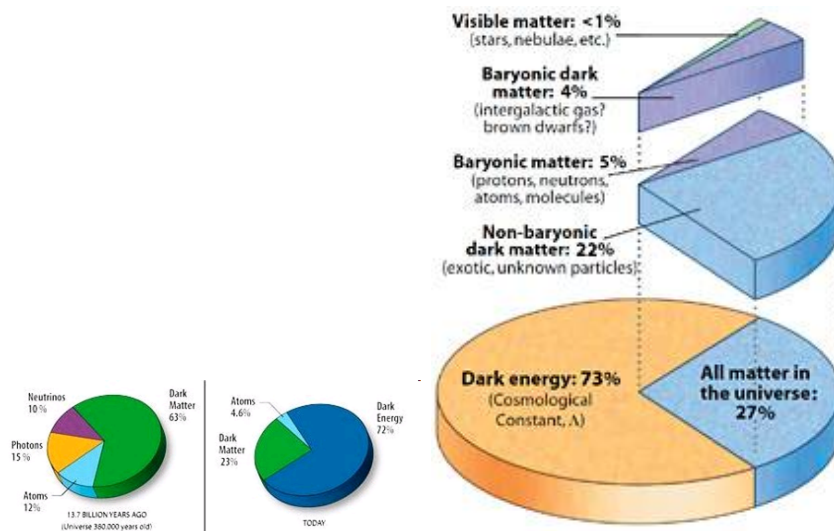
Atacama Cosmology Telescope (ACT) - 6m dalekohled na Cerro Toco v poušti Atacama (sever Chile) mikrovlny



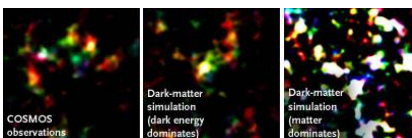
Obrázek 22.37: Pozemní dalekohledu na CMB

#### 22.11.1.4 Současný vesmír

Temná hmota, temná energie

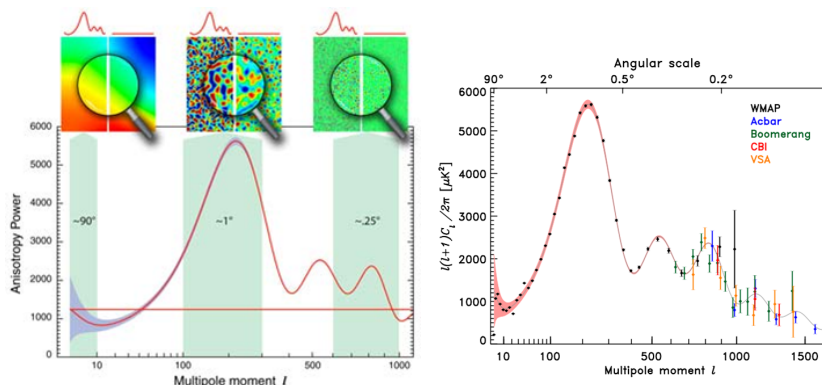


Obrázek 22.38: Složení vesmíru



Obrázek 22.39: A comparison of the mass map obtained from Hubble's COSMOS (left) survey with two simulated model maps. The statistical properties (the overall number of mass peaks and how they cluster) of the model dominated by dark energy is the best match for the Hubble observations. NASA / ESA / J. Hartlap / P. Simon / T. Schrabback

### 22.11.1.5 Velikost fluktuací



Obrázek 22.40: Fluktuace

### 22.11.1.6 Baryonové akustické oscilace

Baryonové akustické oscilace BAO (Baryonic Acoustic Oscillations)

= pravidelné periodické fluktuace v hustotě viditelné baryonické hmoty (způsobeno akustickými vlnami v raném vesmíru) původní fluktuace v reliktním záření => velko-rozměrové struktury vesmíru

BAO slouží jako "standardní pravítko" pro délkovou škálu v kosmologii (délka 490 Mly v dnešním vesmíru)

měření BAO – pomoc při pochopení podstaty skryté energie (akcelerace vesmíru) stanovením mezí kosmologických parametrů

## 22.11.2 Plánovaná pozorování

Temná hmota

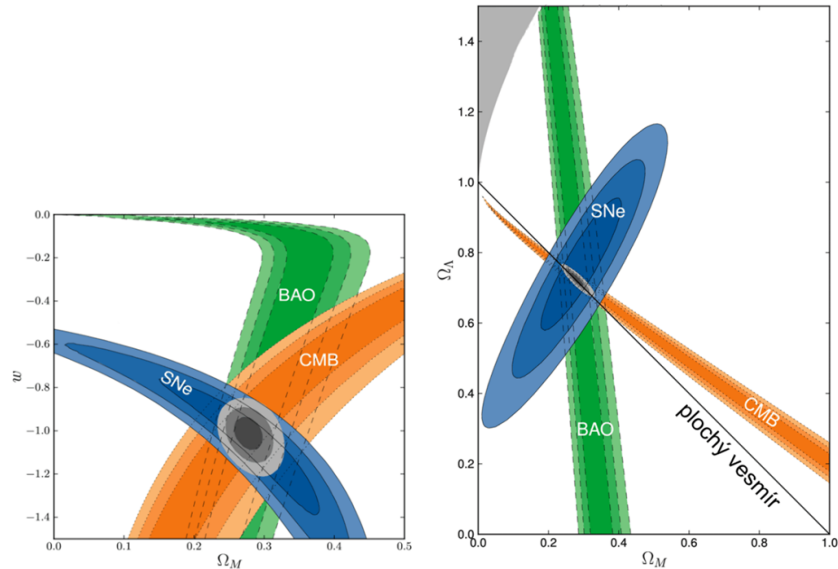
řada experimentů už probíhá – Kanada, Itálie, Španělsko, USA; detekce – skrytá hmota v Galaxii tvořena WIMPy (Weakly Interacting Massive Particles) => tisíce WIMPů musí procházet každým  $\text{cm}^2$  Země za 1s

Kosmická neutrina

snaha o detekci neutrinového záření kosmického pozadí (podobné reliktnímu mikro-vlnnému záření, ale z doby 2 s po VT) => okno do velmi raného vesmíru problém: taková neutrina nyní velmi chladná (1.95 K) => přímo prakticky nepozorovatelná

Gravitační vlny

kosmické gravitační vlny pozadí – pozůstatek kosmické inflace možnosti měření – přímo



Obrázek 22.41: BAO

i nepřímo zkoumáním polarizace CMB

## 22.12 Jiné pohledy na vývoj vesmíru

Ekpyrotický model

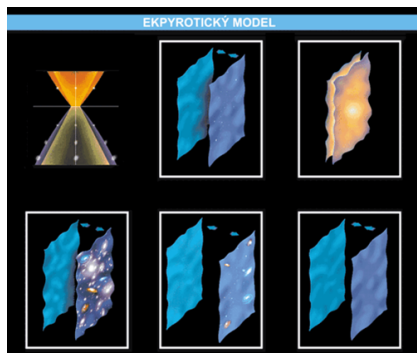
Název znamená „z ohně pocházející“. Základní přírodní konstanty (gravitační, Planckova, rychlost světla) mohou být v různých bránách různé.

2001 Neil Turok, Paul Steinhardt, Burt Ovrut a Justin Khoury - alternativa k inflačnímu modelu;

ze strunové teorie => částice = lineární útvary v mnohorozměrném světě vesmír = méněrozměrný objekt ve vícerozměrném světě (tzv. brána)

počátek vesmíru = setkání dvou bran v místě největší kvantové fluktuace -i, prudká expanze a následná tvorba galaxií -i rozpínání pokračuje => zředění látky v bráně a gravitační síla přitáhne opět druhou bránu => další dotyk => jednoduchý model dvou oscilujících bran

důkaz: při dotyku bran vzniknou gravitační vlny - detekce



Obrázek 22.42: Ekpyrotický model

## 22.13 Mnohovesmír

multivesmír, multiversum, ang. multiverse

1895 – poprvé - americký filozof a psycholog William James

teorie o existenci mnoha paralelních vesmírů; důsledek některých kosmologických teorií, event. interpretace kvantové teorie ("mnohosvětová" interpretace).

paralelní vesmíry = známý vesmír je jen jedním z mnoha; mezi paralelními vesmíry lze cestovat (červí díry); případně by mohly mít i odlišné přírodní zákony, než má vesmír náš

## Použitá a doplňující literatura

Copernicus, N. 1543, De revolutionibus orbium coelestium, Norimbergae, apud Ioh. Petreium, 1543



## 23 Nebezpečí z kosmu

Za zdmi svého domova se člověk většinou cítí bezpečně. Ale platí to také v kosmickém měřítku? Je náš kosmický domov, naše rodná planeta bezpečným místem pro život? Nehrozí nám z kosmu nějaké nebezpečí? Ještě před několika desítkami let by drtivá většina odpovědí vyjadřovala přesvědčení o tom, že na zemském povrchu jsme před kosmickými vlivy v naprostém bezpečí. Jenže pak se objevila teorie o vymizení dinosaurů před 65 milióny let v důsledku katastrofy způsobené dopadem vesmírného tělesa. Ale nezůstalo jen u teorie. Nejdříve byla objevena vrstva iridia, které bylo na Zemi dopraveno v kosmu a doslova v jediném okamžiku distribuováno po celé zeměkouli. Nakonec byl nalezen i samotný dopadový kráter. Ale dnes už řada vědců věří, že i na dřívějších hromadných vymíráních živočichů a rostlin má silnou "zásluhu" okolní vesmír. Vesmír je tichým hráčem v naší ruletě o život. Je dobré o něm i jeho vlivu na nás vědět co nejvíce.

### 23.1 Střet Země s cizím tělesem

Téma srážky země s cizím tělesem zajímalo astronomy už dlouho. Do širšího povědomí veřejnosti se dostalo až s úspěšnými Hollywoodskými filmy jako Armageddon nebo Drtivý dopad. Nehledě na nepřesnosti a faktické chyby v těchto filmech, jisté je, že problém možné srážky Země s cizím tělesem a ochranu Země před takovými nevídanými návštěvníky zpopularizovala. A zřejmě nejen to. Právě v té době totiž americký Kongres schválil prostředky na projekt "Spaceguard". V poslední době se stále více hovoří nejen o "klasických" tělesech, které by se mohly srazit se Zemí jako kometách nebo planetkách, ale dokonce také o setkání Země s černou (mini)dírou potulující se vesmírem.



Obrázek 23.1: Srážka Země s cizím tělesem. Zdroj: wikipedia

#### 23.1.1 Srážka s planetkou, kometou

Ve Sluneční soustavě se už z dob jejího formování nachází velké množství těles, které se mohou připlést Zemi do cesty. Taková, která se ke Slunci přiblíží na méně než 1.3 AU Označujeme jako blízkozemní objekty tzv. NEOs (z anglického Near Earth Objects). Mezi ně řadíme tzv. NEAs (Near Earth Asteroids), tedy různé planetky, komety, menší tělesa (meteoroidy nebo dokonce i družice obíhající kolem Slunce). Nicméně ne všechny blízkozemní objekty jsou pro nás nebezpečné. Pokud má vesmírný projektil před vstupem do atmosféry rozměr do 20 centimetrů, pak se při průletu atmosférou zpravidla

odpaří. Při velikosti řádově metry se odpaří z větší části. Zbytek původního tělesa však dopadne na zemský povrch v podobě meteoritu. Větší škody ale nenapáchá. Pro objekty větší než řádově metry už naše atmosféra není překážkou. Po dopadu může takový meteorit způsobit lokální škody. Přitom dopad třicetimetrového tělesa, který způsobí totální zkázu zasaženého území nastává statisticky každých 500 let. Naposledy se takovou událost odehrála roku 1908. Skutečné nebezpečí pro celou Zemi ale hrozí od těles větších než 1 kilometr. Například desetikilometrové těleso by bylo schopno zcela sterilizovat Zemi. K takovému setkání má docházet jednou za 100 miliónů let. NASA proto na pokyn Kongresu začala s vyhledáváním a katalogizací všech objektů větších než 1 kilometr, které by mohly způsobit globální katastrofu. Podobných přehlídek, či projektů, které pátrají po NEOs je více, nejen amerických. Jmenujme alespoň Lincoln Near-Earth Asteroid Research (LINEAR), Spacewatch, Near-Earth Asteroid Tracking (NEAT), Lowell Observatory Near-Earth-Object Search (LONEOS), Catalina Sky Survey, Campo Imperatore Near-Earth Objects Survey (CINEOS), Japanese Spaceguard Association, italský Asiago-DLR Asteroid Survey nebo nejnovější americký projekt NEOWISE spuštěný roku 2011. V květnu 2012 bylo objeveno 843 blízkozemních objektů větších než jeden kilometr, ale jen 152 z nich je potenciálně nebezpečných. Celkově bylo ke stejnému datu známo 8 971 NEOs, z čehož 91 je blízkozemních komet<sup>1</sup>. Krátkoperiodické středně periodické komety ve Sluneční soustavě jsou celkem dobře detekovány a katalogizovány. Nejnebezpečnější jsou ale komety s dlouhými oběžnými dobami, které se k nám dostávají z Oortova mračna na okraji Sluneční soustavy. Tito vesmírní tuláci jsou pozorovatelní teprve, když se začne vytvářet jejich typický ohon, přibližně ve vzdálenosti Marsu. To nám přece jen dává nějaký čas na přípravu případného setkání, i když čas velmi krátký.

V každém případě, pokud budeme mít před srážkou dostatek času, je dnes už technologicky možné se účinně bránit a nepříjemnému setkání se vyhnout. Jednou z možností je robotická sonda, která by asteroid řízeným nárazem vychýlila z dráhy. nemusí jít ale jen o sebevražednou misi ve stylu kamikadze. Odborníci z NASA spočítali, že by bylo možné pomocí 20tunová kosmické lodi odklonit asteroid o průměru 200 metrů jednoduše vznášením se v jeho blízkosti. Gravitační působení lodi na asteroid změnilo jeho trajektorii, a tak lze pomalým pohybem kosmické lodi odtáhnout asteroid z nebezpečné trajektorie. Výhodou takového gravitačním traktoru je nepochybně to, že by pracoval bez ohledu na strukturu asteroidu nebo na jeho povrchové vlastnosti. V úvahu připadá i „vojenské řešení“, vystřelení zneškodňující rakety, pravděpodobně s jadernými hlavicemi. A nesmíme zapomenout ani na jednoduchý princip sluneční plachetnice nebo tzv. zrcadlové včely, kdy by se natočila zrcadla celého roje družic tak, aby sluneční paprsky zahřívaly jedno místo povrchu nezvaného návštěvníka a odpařovaný materiál vytvořil raketový pohon asteroidu. Všechny metody ale mají jedno společné, potřebu dostatečně dopředu vědět o blížícím se nebezpečí. Ne vždy se to ale daří. V roce 2008 bylo těleso 2008 TC3 objeveno jen 19 hodin před vstupem do atmosféry. Naštěstí šlo o objekt „jen“ velikosti auta, který navíc dopadl do pustiny v Súdánu. Ale jsou tu i další problémy. Každé určení trajektorie NEOs je vždy s jistou nepřesností, a tak původní projektil přestane být časem nebezpečný a naopak. Má veřejnost vědět o všech potenciálních srážkách? Takový poplach by mohl znamenat zásadní narušení života všech lidí, možnou hysterii, rabování, kolaps států a civilizace. Naopak množství planých poplachů by mohlo

<sup>1</sup>Nové údaje lze najít na stránkách <http://neo.jpl.nasa.gov/stats/>.

způsobit netečnost lidí při skutečném nebezpečí. Zarážející ale je, že dosud neexistuje jednotný plán, například v rámci OSN, co dělat, když se objeví asteroid v kolizním kurzu se Zemí. Vědecké konference na téma srážky Země s cizím tělesem probíhají, ale je zapotřebí součinnosti vědců, politiků, novinářů, psychologů, zákonodárců dalších významných profesí. V moderní době lidstvo globální katastrofě ještě nečelilo, ale setkání Země s kosmickými projektily se odehrály a jsou zdokumentovány.

V dávné minulosti země jsou přinejmenším dvě epochy, kdy došlo náhle k masivnímu vymírání živočichů a rostlin a život na naší planetě byl takřka zahuben. První kataklyzmická událost se datuje do doby před 250 milióny let. Jedna z vysvětlujících hypotéz mluví i o dopadu planetky. Podle posledních zjištění, ale byl na vině s největší pravděpodobností supervulkán v oblasti dnešní Sibíře<sup>2</sup>. Nicméně další katastrofická epizoda v historii Země z doby před 65 milióny let je už jednoznačně připisována srážce Země s planetkou o průměru zhruba 10 km<sup>3</sup>. Při dopadu tělesa srovnatelného velikostí s marsovským měsícem Deimos byla uvolněna energie 100 teratun TNT<sup>4</sup>. Pro srovnání, bomba svržená na Hirošimu uvolnila při výbuchu energii "jen" 13 kilotun TNT, byla tedy několik miliardkrát slabší než onen dopad planetky, při němž vznikl kráter o velikosti přibližně 200 kilometrů, který se nachází u vesničky Puerto Chicxulub<sup>5</sup> na Yucatánském poloostrově v Mexiku. Dopad planetky vyvolal obrovskou přílivovou vlnu doprovázenou zemětřeseními a požáry. Při impaktu bylo vysoko do ovzduší vymrštěno obrovské množství prachu, který se rozptýlil a zahalil planetu na několik let. V důsledku toho poklesla teplota a přísun slunečního záření. Fotosyntéza rostlin se takřka zastavila. Hladina kyslíku v atmosféře se rapidně snížila, podle některých modelů až na 10 procent úrovně před srážkou. Bezprostředně při srážce došlo ke zničení většiny druhohorních živočišných a rostlinných druhů. Potravní řetězce byly přerušeny. V nastalém období zimy vymíraly přeživší druhy hladem nebo v důsledku velmi nízké hladiny kyslíku. Dopad planetky ukončil éru dinosaurů.

#### Meteorické krátery, frekvence srážek v porovnání s Měsícem

V novodobé historii je zřejmě nejznámější případ Tunguzského meteoritu z roku 1908. 30. června toho roku explodoval nad opuštěnou oblastí Sibíře, v oblasti říčky Podkamennaja Tunguzka (epicentrum 60.886°S, 101.894°V) ve výšce 8,5 kilometru kamenný asteroid o průměru přibližně 45-70 metrů. Exploze o síle 10 megatun TNT zdevastovala území zhruba 2150 kilometrů čtverečních (viz obrázek 23.2).

Z období po druhé světové válce můžeme jmenovat hned několik setkání Země s tělesy o rozměrech řádově metry až desítky metrů. 12. února 1947 pozorovali lidé poblíže

<sup>2</sup>Odhaduje se, že tenkrát během 5 milionů let vyvrhly sopky na Sibíři tolik čedičové lávy, že by pokryla území Spojených států amerických vrstvou jeden a půl kilometru silnou. Při těchto erupcích bylo ale uvolněno zejména obrovské množství oxidu uhličitého a oxidu siřičitého, který se v atmosféře měnil na kyselinu sírovou. Kyselý déšť a zejména následné období zimy zničilo přes 90 procent života na zemi.

<sup>3</sup>Původcem myšlenky o náhlém zániku většiny pozemské flory a fauny způsobeném dopadem kosmického tělesa je tým v čele s nositelem Nobelovy ceny za fyziku Luisem Alvarezem a jeho synem, geologem Waltrem Alvarezem (Alvarez et al., 1980).

<sup>4</sup>Energie uvolněná při výbuchu se vyjadřuje pomocí ekvivalentní hmotnosti vysoce výbušného trinitrotoluenu TNT, přičemž platí, že 1 tuna TNT uvolní při výbuchu energii  $4,18 \cdot 10^9$  J.

<sup>5</sup>Čti [čiksulub].



Obrázek 23.2: První expedice pod vedením Leonida Kulika se dostala na místo katastrofy až roku 1921. I po 13 letech od události Kulikův snímek vypovídá o mohutnosti události.

v Sichote-Alinské oblasti u Vladivostoku (Rusko) bolid jasnější než Slunce. Těleso o původní hmotnosti až 100 tun se rozpadlo na velké množství úlomků, které zasáhly oblast 1,5 km<sup>2</sup>. 8. března 1976 byla meteorickým deštěm zasažena oblast 500 km<sup>2</sup> v Jilinu (Čína)<sup>6</sup>

3. srpna 1963 dopadlo do oceánu mezi Afrikou a Antarktidou těleso, které při dopadu uvolnilo energii odpovídající 25 Hirošimským pumám. 6. 6. 2002 explodovalo při průletu atmosférou těleso o velikosti přibližně 10 metrů. Výbuch nad Středozemním mořem mezi Řeckem a Libyí uvolnil energii 26 kilotun TNT. Zhruba dvakrát větší energie byla uvolněna při podobné události, která se odehrála 8. října 2009 nad Indonésií.

V některých publikacích se můžeme setkat i s událostí datovanou na 22. září 1979. Blízko rozhraní jižního Atlantiku a Indického oceánu zaznamenaly americké vojenské družice Vela výbuch. Ani po letech výzkumu není jasné, zda šlo o utajený test nukleární zbraně nebo o zaznamenaný zánik kosmického tělesa.

Zatím jsme se věnovali tělesům, která mohou způsobit obrovské škody, dokonce i zkázu života na Zemi. Ale pokud hovoříme o nebezpečí z kosmu, máme se obávat zásahu malého meteoritu? Dokumentovaných dopadů meteoritů je více než tisíc a nalézáných meteoritů v poušti nebo na ledových pláních Antarktidy ještě mnohem více. Byl ale někdy zasažen nějaký člověk? A přežil?

První známý případ v moderní historii, kdy byl člověk zraněn dopadem meteoritu, je zaznamenán 30. listopadu 1954 v malém městečku Sylacauga v Alabamě (USA). Čtyřkilogramový chondrit proletěl střechou domku až do obývacího pokoje, kde těžce zranil Ann Hodgesovou. 12. června 2009 zasáhl meteorit o velikost ořechu čtrnáctiletého chlapce z německého Essenu cestou do školy. Do ruda rozžhavený kus vesmírné horniny jej lehce trefil do ruky a poté vytvořil asi třiceticentimetrový kráter v zemi.

<sup>6</sup>Připomeňme, že podobná událost mnohem menšího rozsahu, meteorický deštěk, zasáhl oblast obce Stonařov na Jihlavsku 22. května 1808.



Obrázek 23.3: Sedadlo a tlumič výfuku auta Edwarda McCaina zasažené meteoritem 29. 9. 1938 v městečku Benld, Illinois (USA).



Obrázek 23.4: Autor: Ladislav Šmelcer.

### 23.1.2 Kolize Země s černou dírou

V roce 1973 navrhli fyzici Texaské univerzity Albert A. Jackson a Michael P. Ryan, že možným vysvětlením pro Tunguzskou událost roku 1908 by byl průlet malé černé díry o hmotnosti přibližně  $10^{17}$  až  $10^{19}$  kg skrz Zemi (Jackson & Ryan, 1973). Jejich hypotéza však byla odmítnuta. Podobný průlet by byl doprovázen dvěma událostmi - při vstupu černé díry do Země a při výstupu na opačné straně. Jenže seismické stanice, které byly mnohem blíže odhadnuté oblasti výstupu v severním Atlantiku než k Tunguzce, žádnou druhou událost nezaznamenaly. Navíc by se tím nijak nevysvětlil původ mimozemského materiálu, prachové stopy v ovzduší a výskyt magnetických kuliček s vysokým obsahem niklu v dopadové oblasti (Beasley & Tinsley, 1974).

Ale, co když budeme uvažovat mnohem menší projektily, například tak zvané primordiální černé díry, které měly vznikat v raných fázích vývoje vesmíru? Jejich hmota je srovnatelná s hmotností asteroidů, ale jejich průměr je odpovídá velikosti atomového jádra. Průlet takové černé díry Zemí by vyvolal seismickou vlnu, která by zasáhla současně všechna místa na povrchu naší planety a mohla by způsobit zemětřesení až o síle 4. stupně Richterovy škály. Nicméně studie (Luo et al., 2012) uvádí, že k podobnému střetu dochází jednou za 10 miliónů let. Do blízkosti Země se ale tyto černé

díry měly dostávat v průměru jednou za 100 tisíc let. Existují ale i studie, jaký vliv by mělo setkání prvotní černé díry se Sluncem. Projevy bychom měli být schopni současnou technikou bez problémů zachytit.

Jenže, než se primordiální černá díra dostane k zemi nebo ke Slunci, projde Kuiperovým pásem. Shatskii (2008) ukázal, že v důsledku toho dojde k podstatným změnám trajektorie některých asteroidů v pásu a tato tělesa se pak mohou vydat do vnitřních částí Sluneční soustavy, kde se mohou i setkat se Zemí. A kdoví, zda Tunguzskou událost nezpůsobilo právě takové těleso. I s černými děrami je tedy třeba ve výčtu kosmických nebezpečí počítat.

## 23.2 Slunce

krátkodobé změny zářivého toku - sluneční aktivita

Sluneční bouře představují hrozbu pro nás, pro naši technologii. Dostatečně silná sluneční bouře by mohla vyřadit vyřadit z provozu naši moderní infrastrukturu a uvrhnout nás zpět do pre-industriální doby. Následná panika a chaos by zničily lidstvo.

v období zvýšené aktivity – narušení zemské magnetosféry (např. 10. 1. 1997)

- > přepětí indukovaná v elektrických rozvodných sítích,
- > ohrožení posádek vysoko létajících letounů nebo kosmonautů,
- > poruchy či zničení elektroniky na družicích,
- > výpadek telekomunikačních sítí (nefunkční telefony, banky, navigace)

## 23.3 Přemíra záření

### 23.3.1 Výbuch blízké supernovy

Jestliže nějaká velká hvězda vybuchne nedaleko naší Sluneční soustavy, výsledný výbuch by doslova serval ze Země svrchní vrstvy do hloubky několika kilometrů. Žádný život by v tomto koutu vesmíru nezůstal, oblast Sluneční soustavy by byla zcela sežehnuta.

Důsledky a stopy exploze supernovy blízko naší Sluneční soustavy nebo obecně nějakého planetárního systému zkoumali vědci od poloviny padesátých let minulého století (Schindewolf 1954; Krasovskii & Shklovskii 1957; Terry & Tucker 1968; Laster et al. 1968; Benítez et al. 2002). Řešení otázek souvisejících s vlivem supernovy na Zemi je poměrně rozsáhlé a přispívají k němu oblasti astrofyziky, geologie a astrobiologie. Ruderman (1974) poukázal na primární efekt, který způsobí totální zničení ozónové vrstvy (např. Ruderman 1974; Crutzen & Brühl 1996; Gehrels et al. 2003), ale byly potvrzeny i další efekty (např. Fields & Ellis 1999). Výbuch supernovy ve vhodné vzdálenosti by například mohl vést k podstatnému ovlivnění biosféry a případně i prospěšné genetické modifikaci organismů (Karam 2002a, 2002b). Ze zhodnocení všech vlivů vyplývá, že minimální bezpečná vzdálenost od supernovy je přibližně 8 pc (Ellis & Schramm 1995; Gehrels et al. 2003).Fields et al. (2008)

1962 Otto Schindewolf – velké vymírání před 250 mil. roky dílem supernovy

1999 – objev „spadu ze supernovy“ na dně oceánu (jižní Pacifik)

- supernova ve vzdálenosti 10 sv. r.
  - zničení ozónové vrstvy na stovky let,
  - proud nabitých částic a neutronů – > dokonalá sterilizace planety,
  - UV záření – > omezení fotosyntézy => přebytek CO<sub>2</sub> => mohutný skleníkový jev
- supernova 100 sv.r daleko – tok záření dvojnásobný oproti normálu

seznamy nejbližších hvězd – > žádná není natolik hmotná, aby vybuchla jako supernova, ale nemusí jít jen o supernovu! – 27. 8. 1998 –  $\gamma$  záření z magnetaru v Orlu (ochromení družic)

pozitivní role supernov:

- nastartování vývoje života
- Geminga (před 340 000 lety) – vyfoukla zbytky => výhled do okolního vesmíru

### 23.3.2 Záblesky $\gamma$ záření

nemusí jít jen o supernovu!



Obrázek 23.5: Záblesk  $\gamma$  záření. Zdroj:<http://cow-flipper.hubpages.com/hub/Dangers-From-Space>

K zábleskům  $\gamma$  záření dochází, když se velká hvězda dostává do fáze supernovy. Výsledný výbuch vyvolá rázovou vlnu  $\gamma$  záření. Jestliže se taková událost odehraje v naší Galaxii, sterilizuje náš svět. Záblesk zbaví naši zemi ochranné ozónové vrstvy a vše živé by zemřelo následkem mohutné dávky rentgenovského záření. V podstatě bychom byli doslova upečení zaživa.

Podobné účinky by měl také záblesk pocházející z tzv. magnetaru, neutronové hvězdy s extrémně silným magnetickým polem. Jejich existenci předpověděli Duncan & Thompson (1992). V současnosti jich známe 23<sup>7</sup>. Zatímco Země má magnetické pole 30-60 mikrotlesů, magnetar může mít magnetické pole o síle až 10 GT, tedy  $10^{15} \times$  silnější! Tak silné magnetické pole (zhruba tisíckrát silnější než magnetické pole běžné neutronové hvězdy) je schopno smazat data z kreditní karty z poloviční vzdálenosti Měsíce od Země. Pokud bychom byli do vzdálenosti 1000 kilometrů od magnetaru, je náš osud zpečetěn. Všechny atomy v našem těle by se působící silou zdeformovaly. Naštěstí nejbližší známý magnetar 1E 1048.1-5937 v souhvězdí Lodního kýlu je od nás zhruba 9 000 ly daleko. Ale znamená to, že jsme v bezpečí? Bohužel ne. Magnetar občas v důsledku hvězdotřesení a rekonexe magnetického pole vysílá do prostoru intenzivní pulsy, záblesky. Poslední takový záblesk byl zaznamenán 27. 12. 2004 z magnetaru SGR 1806–20. Absolutní hvězdná velikost záblesku v oblasti  $\gamma$  záření byla -29 mag. Předpokládá se, že šlo o největší explozi pozorovanou lidmi od Keplerovy supernovy v roce 1604. Magnetar uvolnil v jedné desetíně sekundy energii  $1.3 \cdot 10^{39}$  J, tedy více energie než naše Slunce za 100 000 let. I když je od nás vzdálen 50 000 ly, dokázal ionizovat svrchní vrstvy atmosféry. problémy měly i některé družice. Podobný výbuch ve vzdálenosti zhruba 10 světelných let od Země by zničil ozónovou vrstvu. Měl by stejný efekt, jako kdybychom odpálili jadernou hlavice o síle 12 kiloton TNT (50 TJ) ve výšce 7.5 kilometru.

## 23.4 Černá díra za humny

Hvězdná černá díra je výsledkem vývoje velmi hmotné hvězdy. Většinou se soudilo, že jsou více méně nehybné, ale bylo zjištěno že se pohybují napříč Galaxií a dokonce byly odhaleny i takové, které byly vymršťeny ven z Galaxie a to nejen ty hvězdné. O supermasívní černé díře, která byla vyvržena ze svého místa v Galaxii, píše například Civano et al. (2012). Kdyby taková černá díra vstoupila do Sluneční soustavy, zaznamenali bychom její působení okamžitě a záhy bychom byli vtaženi pod její horizont událostí.

## 23.5 Kontakt s mimozemským životem

Mimozemský život, jeho existence a případné setkání člověka s ním škádlí lidskou mysl už velmi dlouho. Autoři vědecko-fantastické literatury probrali nejrůznější varianty - od těch, kdy jsou hodní návštěvníci lidstvu pomohou až katastrofické scénáře, kdy je lidská rasa zahubena predátory z vesmíru.

Nebezpečí mohou ale představovat i jen zavlečené bakterie, viry (možnost epidemie) a to nejen z kosmu, ale naše pozemské organismy z horních vrstev atmosféry, které mohou vlivem záření z kosmu zmutovat.

Častá je představa vesmírných predátorů, kteří útočí na Zemi a lidstvo z různých pohnutek. Vesmírní dobyvatelé budou jistě zástupci rozvinutější civilizace než je ta naše. Mohou nám přinést zkázu. Má se tedy lidstvo pokoušet o kontakt s cizími civilizacemi? Rada osobností světové vědy včetně například Stewena Hawkinga si myslí, že nikoli.

<sup>7</sup>Aktuální stav lze nalézt v online katalogu McGill Pulsar Group <http://www.physics.mcgill.ca/~pulsar/magnetar/main.html>.





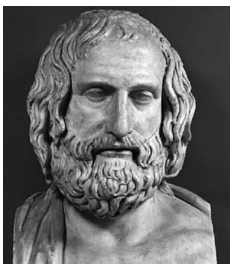
Obrázek 23.6: Černá díra. Zdroj:<http://cow-flipper.hubpages.com/hub/Dangers-From-Space>

Je ovšem otázka, zda by i dobře míněná pomoc od těch "hodných" nezralému lidstvu nakonec nezlomila vaz.

## Použitá a doplňující literatura

- Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F., & Michel, H. V. 1980, *Science*, 208, 1095  
Athanassiadou, T., & Fields, B. D. 2011, *New Astronomy*, 16, 229  
Beasley, W. H., & Tinsley, B. A. 1974, *Nature*, 250, 555  
Beech, M. 2011, *Astrophysics and Space Science*, 336, 287  
Civano, F., Elvis, M., Lanzuisi, G., et al. 2012, *ApJ*, 752, 49  
Duncan, R. C., & Thompson, C. 1992, *ApJ Letters*, 392, L9  
Fields, B. D., Athanassiadou, T., & Johnson, S. R. 2008, *ApJ*, 678, 549  
Jackson, A. A., & Ryan, M. P. 1973, *Nature*, 245, 88  
Luo, Y., Hanasoge, S., Tromp, J., & Pretorius, F. 2012, *Apj*, 751, 16  
Shatskii, A. A. 2008, *Moscow University Physics Bulletin*, 63, 276

## 24 Rejstřík osob



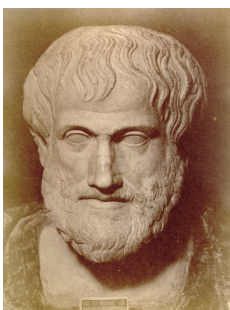
**Anaxagoras** (\*asi 500 nebo 510 př.n.l. Klazomenai (dnešní Urla, Turecko) – †428 př.n.l. Lampsakos (dnešní Lapseki, Turecko) – řecký filozof. Pokusil se založit filozofickou školu v Aténách. Nebeské úkazy se pokoušel vysvětlit racionální cestou, což nakonec vedlo k jeho obvinění z bezbožnosti a nutnému odchodu do exilu do Lampsaku (u dnešní obce Lapseki, Turecko).



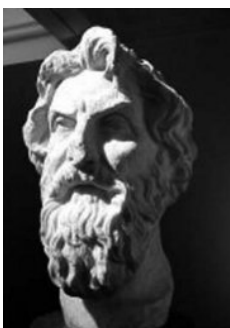
**Argelander**, Friedrich Wilhelm August (\*22.3.1799 Memel, Prusko (dnes Klaipėda, Litva) - †17.2.1875 Bonn, Německo) – pruský astronom (otec Fin, matka Němka), Besselův žák. Vypracoval (spolu s Krügerem a Schönfeldem) rozsáhlý katalog hvězd Bonner Durchmusterung, studoval pohyby hvězd a určil pohyb Slunce mezi nimi. Systematicky studoval proměnné hvězdy, vypracoval metodu na jejich pozorování a navrhl systém jejich označování.



**Albertus Magnus**; též Svatý Albert Veliký, Albert z Böllstadtu (\*1193 nebo 1206/1207 Lauingen, Německo – †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, poloostrov Chalkidiki, Řecko - †322 př.n.l. Chalkida na ostrově Euboia, Řecko) – filozof vrcholného období řecké filozofie, nejvýznamnější žák Platonův a vychovatel Alexandra Makedonského. Jeho rozsáhlé encyklopedické dílo položilo základy mnoha věd.



**Aristarchos** ze Samu (\*asi 320 př.n.l. ostrov Samos, Řecko – †250 př.n.l. Alexandreia, Řecko) – řecký matematik a astronom, tvůrce heliocentrického modelu vesmíru. Z velikosti zemského stínu na Měsíci při zatmění vyvodil, že Slunce musí být mnohem větší než Země. 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 Hamm, Německo - †12.1.1986 Mnichov, Německo) – 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**, Ludwig Eduard (\*20.2.1844 Vídeň, Rakousko - †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** [čti bugér], Pierre (\*16. 2. 1698 Le Croisic, Francie – †15.8. 1758 Paříž, Francie) – 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** [čti buljó], Ismaël nebo Boulliau, případně v latině Bullialdus (\*28.9.1605 Loudun, Francie - †25.11.1694 Paříž, Francie) – francouzský knihovník, astronom a kněz, amatérský matematik. Navrhl před Newtonem pro gravitační zákon vyjádření velikosti přitažlivé síly nepřímo úměrné na čtverci vzdálenosti.



**Boyle**, Willard Sterling (\*19.8.1924 Amherst, Kanada - †7.5.2011 Wallace, Kanada) - 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. Část života strávil v Praze a je zde také v Týnském chrámu pochován.



**Brewster**, Sir David (\*11.12.1781 Jedburgh, Skotsko – †10.2.1868 Gattonside, Skotsko) – 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, Itálie – †17. února 1600, Řím, Itálie) – byl nejen filozofem, ale též spisovatelem (básníkem a komediografem), astronomem a zabýval se také mnemotechnikou.



**Bunsen**, Robert Wilhelm Eberhard (\*31.3.1811 Göttingen, Německo – †16.8. 1899 Heidelberg, Německo) – 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. Sama klasifikovala ručně zhruba 350 000 spekter hvězd, což pravděpodobně nikdo jiný nedokázal. S využitím výsledků Nettie Farrarové, Williaminy Flemingové, Antonie Mauryové, se jí podařilo uspořádat spektra hvězd do tříd O, B, A, F, G, K, M. Vymyslela údajně i mnemotechnickou pomůcku „Oh, Be A Fine Girl - Kiss Me!“. Objevila 300 proměnných hvězd, 5 nov a jednu spektroskopickou dvojhvězdu. Vydala také katalog proměnných hvězd.

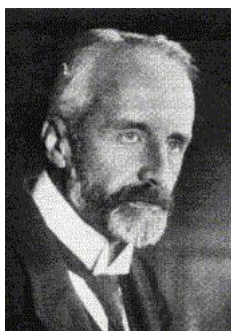
**Ču** Kong, také Chou Kung (11. st. př.n.l.) – čínský vědec, určil poměrně přesně úhel sklonu ekliptiky k rovníku.



**Doppler,** Christian Andreas (\*29.11.1803 Salzburg, Rakousko – †17.3.1853 Benátky, Itálie) – významný 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 Gesselschaft 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. Jeho dalekohled je nyní na observatoři Univerzity Mikuláše Kopernika v Piwnicach u Toruně v Polsku.



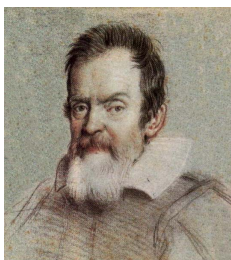
**Eberhard,** Gustav; Julius, Paul Alexander (\*10.8.1867 Gotha, Německo – †3.1.1940 Postupim, Německo) – německý astronom na observatoři v Postupimi. Zabýval se astrofyzikou, spektroskopii a fotografickou fotogrammetrií. Objevil přítomnost čár K a H ve slunečním spektru, známku aktivity na povrchu hvězdy. Byl po něm pojmenován fotografický efekt.



**Fabricius,** David nebo David Faber, David Goldschmidt (\*9.3.1564, Esens, Německo - †7.5.1617, Osteel, Německo) – německý teolog, dva velké objevy udělal se svým synem, Johannem (1587-1615). Objevil první periodickou proměnnou hvězdu Miru Ceti v srpnu 1596. Pozoroval sluneční skvrny a předpokládali, že se Slunce otáčí kolem své osy. Jeho smrt je do jisté míry kuriózní. Při kázání prohlásil, že zná identitu zloděje drubeže, ale neprozradil ji. Ve vlastnoručně sestaveném horoskopu předpověděl nehodu na 7. 5. 1617, zůstal proto celý den ve svém domě. Večer si myslel, že nebezpečí pominulo a šel se projít. Místní rolník Frerik Hoyer jej napadl rýčem a zabil.



**Fraunhofer,** Joseph von - (\*6.3.1787 Straubing, Německo - †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.



**Galilei,** Galileo; plným jménem Galileo di Vincenzo Bonaiuti de'Galilei (\*15.2.1564, Pisa, Itálie - †8.1.1642, Arcetri, Itálie) – 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.



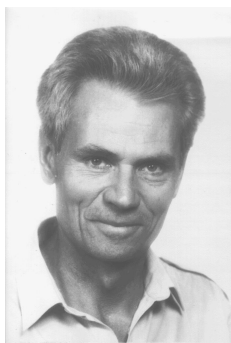
**Goodricke,** John (\*17.9.1764 Groningen, Nizozemsko - †20.4.1786 York, hrabství Yorkshire, Anglie) – holandsko-anglický amatérský astronom. V r. 1782 pozoroval proměnnou hvězdu Algol ( $\beta$  Persei) a vysvětlil správně její proměnnost jako důsledek zakrývání složek dvojhvězdy. Objevil i další proměnné 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**, čti [hæli] Edmond (\*8.11.1656 Haggerston, Shoreditch, Anglie - †14.1.1742 Greenwich, Anglie) – 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. Halley se nezávisle na Newtonovi zabýval teorií gravitace. Když zjistil, že Newton už řešení v podobě gravitačního zákona zformuloval, ale výsledky nepublikoval, přesvědčil ho, aby sepsal knihu *Principia mathematica philosophiae naturalis*, kterou v r. 1687 na své náklady vydal.



**Harmanec, Petr** (\*18.9.1942 Kolín) – významný český stelární astronom, odborník na dvojhvězdy, fotometrická a spektroskopická pozorování a jejich zpracování. Zabývá se horkými hvězdami a hvězdami se závojem. Svou první práci publikoval pod jménem Kratochvíl.



**Haro**, Guillermo (\*21.3.1913 Mexico City - †26.4.1988 Mexico City, Mexiko) – 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.



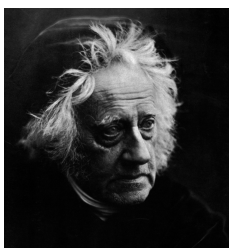
**Helvecius, Heweliusz Jan** (\*28.1.1611 Gdaňsk - †28.1.1687 Gdaňsk, Polsko) – polský astronom, pivovarník a po mnohá léta člen tamější městské rady. Je znám také jako Johannes Hevelius, Johann Hewelke, Johannes Hewel. Je považován za zakladatele lunární topografie. Objevil libraci Měsíce.



**Herbig, George Howard** (\*2.1.1920 Wheeling, USA - †12.10.2013 Honolulu, USA) – americký astrofyzik. Věnoval se studiu mladých hvězd, tvorby hvězd a mezihvězdné látky. Objevil a studoval mnoho objektů s  $H_{\alpha}$  emisí, hvězd typu T Tauri a peculiárních 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, Velká Británie) – jeden z nejúspěšnějších astronomů všech dob a nejlepších konstruktérů zrcadlových dalekohledů své doby. Také fyzik a hudebník. Roku 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, Velká Británie – †11.5.1871 Hawkhurst, Kent, Velká Británie) – 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“.



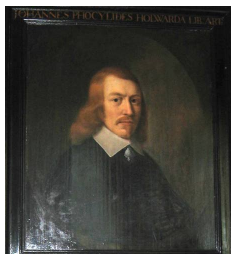
**Hertzsprung**, Ejnar (\*8.10.1873 Frederiksberg, Kodaň, Dánsko - †21.10.1967 Roskilde, Dánsko) – chemik a astronom. Zjistil, že ze změny šířek spektrálních čar lze usuzovat na typ hvězdy (trpaslík, obr, hvězda hlavní posloupnosti), které vedly k vytvoření známého diagramu. Jako první kalibroval závislost perioda-svívitost 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.



**Hess**, Victor Franz (\*24.6.1883 Deutschfeistritz, dnes Rakousko - †17.12.1964 Mount Vernon, USA) – rakouský fyzik, od r. 1938 v USA. V r. 1912 při balonovém výstupu v Ústí nad Labem objevil kosmické záření, které nazval Höhenstrahlung – výškové záření, neboť intenzita tohoto ionizujícího záření rostla s výškou. V r. 1936 mu byla za tento objev udělena (spolu s C. D. Andersonem) Nobelova cena za fyziku.



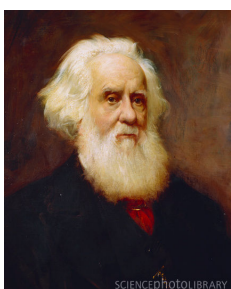
**Hipparchos** (\*asi 190 př.n.l. Nikaia (Nikáj, Nicaea), dnešní Turecko - †asi 120 př.n.l. Rhodos, Řecko) – jeden z největších antických astronomů. Zvýšil přesnost pozorování, vynalezl přístroje pro měření výšky hvězd, určil sklon zemské osy k rovině ekliptiky, přesně délku slunečního roku, precesi, 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 (\*19.2.1618 Holwerd, Nizozemí - †22.1.1651 Franeker, Nizozemí) – fríský astronom, fyzik a filosof. Známy je zejména znovuobjevením proměnnosti Miry Ceti a určením délky cyklu její proměnnosti na 330 dní. Byl výrazným zastáncem a průkopníkem atomismu.



**Hubble**, Edwin Powell (\*20.11.1889 Marshfield, USA – †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. V mládí byl znám především spíše jako vynikající sportovec než nadaný student. Původně studoval práva, po smrti otce rok učil na střední škole a teprve poté vystudoval astronomii. Na vlastní žádost byl pohřben bez obřadu na neznámém místě.



**Huggins**, Sir William (\*7.2.1824 Cornhill, Middlesex, Velká Británie – †12.5.1910 Tulse Hill, Londýn, Anglie) – anglický astronom známý zejména pro svoji průkopnickou práci v astronomické spektroskopii. Začínal jako astronom-amatér. 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.



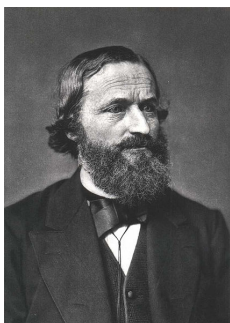
**Johnson**, Harold Lester (\*17.4.1921 Denver, Colorado, USA - †2.4.1980 Mexico City, Mexiko) – americký astronom. Jeho jméno je spojeno se zavedením širokopásmového systému fotometrických filtrů *UBV* (někdy označovaného jako Johnsonův nebo Johnsonův-Morganův systém) v roce 1953. Později systém rozšířil do infračervené oblasti. Stal se jedním ze zakladatelů IR astronomie. Provedl velmi mnoho přesných fotometrických měření. Zemřel na infarkt.



**Keenan**, čti [ki:nan] Philip Childs (\*31.3.1908 Bellevue, Pennsylvania, USA – †20.4.2000 Columbus, Ohio, USA) – americký astronom, spolu s W.W.Morganem vytvořili klasifikaci hvězd podle jejich spekter. Publikoval odborné články po 70 let (1929-1999), tedy déle než řada astronomů žije.

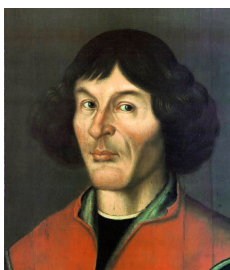


**Kepler, Johannes**, někdy počestěné Jan (\*27.12.1571 Weil der Stadt, Německo – †15.11.1630 Řezno, Německo) – německý astronom, astrolog a matematik. Sestavil čočkový dalekohled. Během působení v Praze na dvoře císaře Rudolfa II. formuloval dva ze tří zákonů popisujících pohyb planet. Jeho matka byla obviněna z čarodějnictví, ale po 14 měsících byla propuštěna i díky obhajobě svého syna.

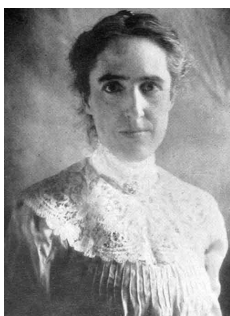


**Kirchhoff, Gustav Robert** (\*12.3.1824 Königsberg, Prusko, nyní Kaliningrad, Rusko – †17.10.1887 Berlín, Německo) – německý fyzik, který se zabýval především elektřinou, spektroskopií a zářením zahřátých objektů. Jako první použil termín záření „černého tělesa“. Formulací zákonů spektroskopie (s Bunsem) položil základy astrofyziky. Mezi jeho studenty patřili např. Max Planck nebo Dmitrij Ivanovič Mendělejev.

**Kidinnu** také Kidinnu, Cidenas, Kidynas (2. pol. 6. st.př.n.l.) – chaldejský učenec, který se zabýval pohybem planet a Měsíce. Mimo jiné tvrdil, že rychlost pohybu planet je nerovnoměrná, ale během roku postupně roste a pak zase klesá. Určil délku měsíce na (přepočteno) 29.530594 d.



**Koperník, Mikuláš** (19.2.1473 Toruň, Polsko – 24. května 1543, Frombork, Polsko) – byl vystudoval právo a medicínu, ale znám je spíše jako astronom. Působil jako římskokatolický duchovní a novodobý autor heliocentrické teorie. Jeho kniha o pohybu planet *De Revolutionibus* byla na seznamu zakázaných knih katolické církve v letech 1616 až 1835. Vedou se spory, zda byl polské nebo německé národnosti.



**Leavittová, Henrietta Swan**, čti *levitová* (\*4.7.1868 Lancaster, Massachusetts – †12.12.1921 Cambridge, Massachusetts, USA) – 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.



**Lemaître,** Georges Henri Joseph Édouard, čti [žorž lemétr] (\*17.7.1894 Charleroi, Belgie – †20.6.1966 Lovaň (Leuven), Belgie) – belgický římskokatolický kněz, astronom, kosmolog a profesor fyziky na univerzitě v Leuvenu. Nezávisle na A. Fridmanovi odvodil v roce 1927 relativistické nestacionární modely vesmíru s velkým třeskem a dal je jako první do přímé souvislosti s expanzí vesmíru, kterou objevil E. Hubble v roce 1929. Lemaître počáteční stav označoval jako „prior-dial atom“ nebo „kosmické vejce“. Často je označován za otce teorie velkého třesku.



**Lummer,** Otto Richard (\*17.7.1860 Gera, Německo – †5.7.1925 Breslau, Prusko (dnešní Wrocław, Polsko)) – 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, Anglie – †21.3.1928 Londýn, Velká Británie) – anglický astronom známý studii slunečních skvrn a slunečního magnetického cyklu, které mj. 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*. S bratrem se významně zasloužil o založení British Astronomical Association.



**Montanari,** Geminiano (\*1.6.1633 Modena, Itálie – †13.10.1687 Padova, Itálie) – byl italský astronom, výrobce čoček, ekonom a zastávce experimentálních vědeckých metod. Věnoval se i výuce astronomie. V r. 1667 pozoroval změny jasnosti Algolu.



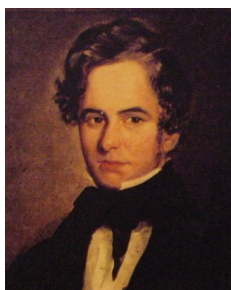
**Morgan,** William Wilson (\*3.1.1906 Bethesda, Tennessee, USA - †21.6.1994 Williams Bay, Wisconsin, USA) – americký astronom. Studoval klasifikace hvězd a galaxií. Spolu P. Keenanem vyvinul systém pro spektrální klasifikaci hvězd. Vyvinul i několik morfologických systémů klasifikace galaxií. Podílel se zavedení širokopásmového fotometrického systému *UBV*.



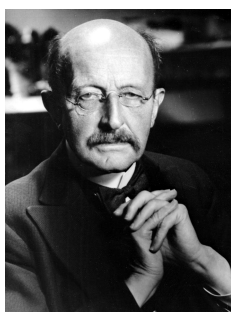
**O'Sullivan, John** (\*31.1.1947) – australský elektroinženýr, jehož práce o Fourierových transformacích v radioastronomii se stala základem pro dnešní standardy bezdrátového připojení Wi-Fi. Spolu s kolegy a organizací CSIRO vlastní příslušné patenty. V r. 2017 byl tváří kampaně automobilky Škoda v Austrálii.



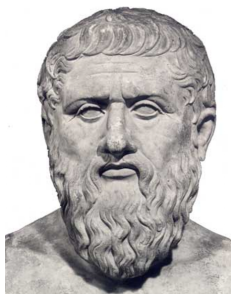
**Paczynski, Bohdan** (\*8.2.1940 Wilno, Polsko (nyní Vilnius, Litva) - †19.4.2007 Princeton, USA) – polský astronom. Zabýval se polarizací a absorpcí v Galaxii, vývojem hvězd a akrečními disky v těsných dvojhvězdách. Zdroje  $\gamma$  záblesků „odsunul“ do kosmologických vzdáleností. Vypracoval teorii hypernov. Navrhl využívat gravitační mikročočky pro detekci kompaktních objektů v galaktickém halu. Vedl dva přehlídkové projekty - OGLE a ASAS.



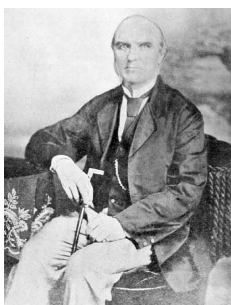
**Pigott, Edward** (\*27.3.1753 asi Whitton, Middlesex, Anglie – †27.6.1825 Bath, Anglie) – anglický astronom. Objevil proměnnost  $\eta$  Aql, mlhovinu M64 a velkou kometu 1783. Později pracoval se sousedem a přítelem J. Goodrickem. Se-stavil první „katalog“ 12 tehdy známých proměnných hvězd.



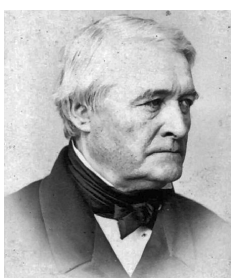
**Planck, Max Karl Ernst Ludwig** (\*23.4.1858 Kiel, Německo - †4.10.1947 Göttingen, Německo) – německý teoretický fyzik. Byl také výborným hudebníkem a v mládí se rozhodoval, zda se věnovat hudbě nebo fyzice. Přes odpor profesora fyziky Filipa von Jolly, který mu tvrdil, že vše už bylo objeveno se dal na fyziku. Planck prý něchtěl objevovat, ale jen pochopit, co vše bylo objeveno. Stal se jedním ze zakladatelů kvantové fyziky. Objevil základní fyzikální konstantu, dnes Planckova konstanta. R. 1900 publikoval zákon popisující záření absolutně černého tělesa (dnes Planckův zákon), za něj dostal v r. 1918 Nobelovu cenu.



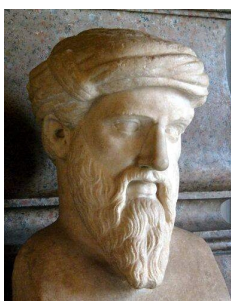
**Platón,** (\*428/427 př.n.l. Atény nebo Aigina, Řecko - †348/347 př.n.l. Atény, Řecko) – antický myslitel a filosof. Platón (v latinské verzi Plato) je všeobecně používaný pseudonym, původně přezdívka, jeho jméno však bylo Aristoklés. V Aténách založil Akademii, která byla později vzorem evropským univerzitám a vědeckým institucím.



**Pogson**, Norman Robert (\*23.3.1829 Nottingham, Velká Británie - †23.6.1891 Madrás (dnes Chennai, česky Čennaí), Indie) – anglický astronom, pozorovatel na různých observatořích. Školu opustil v 16 letech a vzdělával se samostatně. V r. 1854 publikoval katalog tehdy známých proměnných hvězd. Nejznámějším počinem je ale návrh systému hvězdných velikostí a sestavení rovnice, dnes známé jako Pogsonova. Objevil 8 asteroidů, R Cyg a 18 dalších proměnných hvězd a navrhl metoda pozorování proměnných hvězd.



**Pouillet**, Claude Servais Mathias (\*16.2.1790 Cusance, Doubs, Francie - †14.6.1868, Paříž, Francie) – francouzský fyzik. Navrhl galvanometry. V letech 1837-8 nezávisle na Johnu F. W. Herschelovi provedl první kvantitativní měření tepla vyzářeného Sluncem, určil tzv. sluneční konstantu a na jeho základě odhadl teplotu Slunce.



**Pythagoras** ze Samu (také Pýthagorás (\*okolo 570 př.n.l. ostrov Samos, Řecko – †510 př.n.l. Metapontum, Itálie) – řecký filozof, matematik a astronom. Zprávy a údaje o něm a jeho učení se často rozcházejí. Z jeho díla se nic nezachovalo. Založil velmi významnou školu ve městě Kroton (dnes Crotone na jihu Itálie) a výklady i legendy jeho následovníků překryly jeho původní myšlenky, takže se velmi obtížně rekonstruují.



**Rayleigh** lord, John William Strutt, 3. baron Rayleigh (\*12.11.1842 Langford Grove, Essex, Anglie – †30.6.1919 Terling Place, Witham, Essex, Anglie) – anglický fyzik. Zabýval se vlastnostmi plynů a kapalin, optikou a kmitáním, teorií zvuku, vlnovou teorií, zkoumal i elektřinu a magnetismus a také fotografii. Formuloval jeden z vyzářovacích zákonů. Za objev argonu obdržel v r. 1904 Nobelovu cenu. Publikoval přes čtyři stovky odborných článků. Zajímal se i o metafyziku, telekinezi. Jeho švagrem byl britský premiér A. J. Balfour.



**Russell**, Henry Norris (\*25.10.1877 Oyster Bay, New York, USA - †18.2.1957 Princeton, New Jersey, USA) – americký astronom. S E. Hertzsprungem nezávisle vytvořili graf závislosti zářivého výkonu na povrchové teplotě hvězd (dnes Hertzsprungův–Russellův diagram). V r. 1923 společně s F. Saundersem popsal spin-orbitální vazbu. Věnoval se vývoji hvězd, studoval dvojhvězdy a zejména zákrytové dvojhvězdy.



**Secchi**, čti [sekki] Pietro Angelo (\*29.6.1818 Reggio nell'Emilia, Itálie – †26.2.1878 Řím, Itálie) – italský jezuitský kněz a astronom. Byl průkopníkem astronomické spektroskopie, sestavil klasifikace hvězd podle jejich spekter. Jako jeden z prvních vědců považoval Slunce za hvězdu.



**Shapley**, Harlow (\*2.11.1885 Nashville, USA - † 20.10.1972 Colorado, USA) – americký astronom. V r. 1918 použil k určení velikosti naší Galaxie pulsující proměnné hvězdy typu RR Lyr a určil i pozici Slunce v Galaxii. V r. 1953 navrhl teorii „pásu tekuté vody“, nyní známých jako zóny života. Věnoval se i studiu dvojhvězd. Astronomii se začal věnovat náhodou. Chtěl studovat žurnalistiku, ale otevření oboru na univerzitě bylo o rok odloženo, tak si vybíral náhradní obor podle abecedy. Zamítl archeologii (měl potíže to vyslovit) a další v pořadí byla astronomie.



**Spörer**, Friederich Wilhelm Gustav (\*23.10.1822 Berlín – †7.7.1895 Gießen, Německo) – 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 Spörerovo se označuje minimum aktivity Slunce 1420-1570.



**Stebbins**, Joel (\*30.7.1878 Omaha, Nebraska, USA - †16.3.1966 Palo Alto, Kalifornie, USA) – americký astronom. Jeden z průkopníků fotoelektrické fotometrie. Spolu s kolegy, zejména s Albertem Whitfordem použil novou techniku k výzkumu zejména zákrytových dvojhvězd. Studoval zčervenání světla hvězd mezihvězdným prachem, barevné indexy galaxií, různé typy proměnných hvězd.

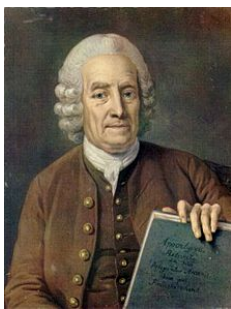


**Stefan**, Jozef, někde Joseph, čti [jozef štefán] (\*24.3.1835 ves St. Peter (slovensky Sveti Peter, tehdejší Rakousko-Uhersko, dnes jde o součást Klagenfurtu v Rakousku - †7.1.1893 Vídeň, Rakousko) – slovenský fyzik (oba rodiče byli Slovinci), matematik a básník. Zabýval se kinetickou teorií plynů a hydrodynamikou. V roce 1879 objevil závislost energie záření absolutně černého tělesa na jeho absolutní teplotě.





**Strömberg**, Bengt Georg Daniel (\*21.1.1908 Gothenburg, Švédsko – †4.7.1987 Kodaň, Dánsko) – 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. Strömbergovy sféry – velké mezihvězdné obálky ionizovaného vodíku kolem hvězd. V 50. a 60. letech se zabýval fotoelektrickou fotometrií a zavedl nový čtyřbarevný fotometrický systém, známý nyní pod jeho jménem. Svůj 1. odborný článek publikoval ve 14 letech.

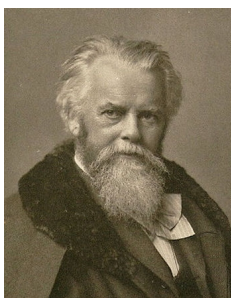


**Swedenborg**, Emanuel (\*29.1.1688 Stockholm, Švédsko – †29.3.1772 Londýn, Anglie) – švédský vědec, vynálezce, teolog a mystik, autor mnoha latinských spisů. Oblast jeho zájmů je velmi široká, zajímal se o praktickou mechaniku, učil se sestrojovat hodiny, vázat knihy, rytectví i konstrukci dechových nástrojů. Jeho studia zahrnují kosmologii, matematiku, anatomii, fyziologii, politiku, ekonomii, metalurgii, mineralogii, geologii, důlní inženýrství a chemii.

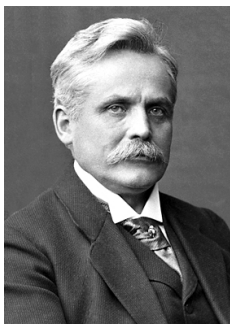
**Ši Šen** angl. Shih Shen, také Shi Shenfu (\*4. st. př.n.l. stát Wei, dnešní Čína) – čínský astronom. Vytvořil (možná s kolektivem spolupracovníků) první známý hvězdný katalog obsahující polohy 809 hvězd. Připisuje se mu i první záznam pozorování slunečních skvrn z r. 364 př.n.l., které považoval za úkazy na Slunci.



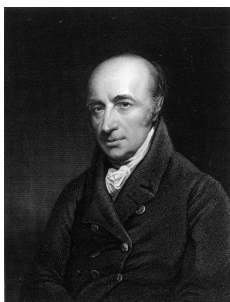
**Thalés**, z Milétu; (\*okolo 624 př.n.l. Milétos – †okolo 548 př.n.l. Milétos, dnešní Turecko) – řecký filozof, geometr a astronom. Byl pokládán za zakladatele řecké filozofie (zahrnovala také matematiku a vědy). Z jeho díla se zachovaly pouze zlomky. Připisuje se mu řada objevů v geometrii (například Thaletova věta), v astronomii a v kosmologii.



**Vogel**, Hermann Wilhelm (\*26.3.1834 Dobrilugk, dnes Doberlug-Kirchhain, Německo – †17.12.1898 Charlottenburg, Berlín, Německo) – německý fotochemik a fotograf, který hrál klíčovou roli ve vývoji praktické fotografie. Významně se podílel na vývoji barevné fotografie. Nezávisle na E. Ch. Pickeringovi objevil spektroskopické dvojhvězdy.



**Wien,** Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz (\*13.1.1864 Fischhausen, východní Prusko, dnes Primorsk, Kalinin-gradská oblast, Rusko - †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, Velká Británie – †22.12.1828 Chislehurst, Velká Británie – anglický astronom, chemik a fyzik. Objevil palladium a rhodium. Vynul postup získávání platiny z rudy. Ve slunečním spektru objevil tmavé čáry, později pojmenované po Fraunhoferovi. Vynalezl optické zařízení zvané *camera lucida*, které umožňuje přesné kreslení tvarů předmětů.



**Zejda,** Miloslav; \*14.11.1965, Třebíč – astronom, učitel astronomie. Dlouholetý pozorovatel proměnných hvězd. Zabývá se zejména zákrytovými dvojhvězdami, otevřenými hvězdokupami a okrajově i chemicky pekuliárními hvězdami.

## A Appendix: Vývoj astronomie

Tabulka A.1: Vývoj astronomie. Tabulka byla převzata z <http://geneze.info/astronomie>

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'ing-ting (Základy určování hvězd)	Čína	
4. stol.př.n.l.	nejstarší soukromé knihovny - knihovna Aristotelova - soubory papyrusových svitků (lat. volumen) uložené v hliněných pouzdech (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 pouzdech (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 spojité 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	objevy 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 = Hubbleova 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]