

Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity  
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Miloslav Zejda

## **Základy astronomie**

Skripta – verze 0.20  
19. září 2023

Brno 2023

# Obsah

<b>Základy astronomie 1</b>	<b>7</b>
<b>1 Historický úvod</b>	<b>9</b>
1.1 Vznik a význam astronomie . . . . .	9
1.2 Mezníky v dějinách astronomie . . . . .	11
<b>Základy astronomie 1</b>	
<b>2 Základní pojmy v astronomii</b>	<b>22</b>
2.1 Obloha a hvězdná obloha . . . . .	22
2.2 Jak je to jasné? . . . . .	26
2.3 Jednotky hmotnosti, výkonu . . . . .	26
2.4 Vesmírné dálavy . . . . .	28
2.4.1 Astronomické délkové jednotky . . . . .	28
2.4.2 Vzdálenosti ve vesmíru . . . . .	30
<b>3 Souřadnicové soustavy v astronomii</b>	<b>36</b>
3.1 Obzorníková soustava souřadnic . . . . .	39
3.2 Rovníková soustava souřadnic . . . . .	40
3.3 A přece se mění . . . . .	42
<b>4 Čas</b>	<b>46</b>
4.1 Jednotky času . . . . .	46
4.2 Měření času . . . . .	47
4.2.1 Časy v astronomii . . . . .	51
4.3 Doba rotace a doba oběhu . . . . .	54
4.3.1 Den . . . . .	54
4.3.2 Hvězdný čas . . . . .	56
4.3.3 Místní a pásmový čas . . . . .	57
4.3.4 Rok . . . . .	59
4.4 Kalendáře . . . . .	60
<b>5 Hvězdné objekty noční oblohy</b>	<b>64</b>
5.1 Hvězdy a souhvězdí . . . . .	64
5.1.1 Hvězdné mapy a atlasy . . . . .	68
5.1.2 Označování hvězd . . . . .	72
5.1.3 Dvojhvězdy . . . . .	73
5.1.4 Proměnné hvězdy . . . . .	75
5.2 „Nehvězdné“ objekty ze světa hvězd . . . . .	76
5.2.1 Hvězdokupy . . . . .	78
5.2.2 Mlhoviny . . . . .	80
5.3 Naše a cizí galaxie . . . . .	83
5.4 Atmosférické vlivy na astronomická pozorování . . . . .	85

5.4.1	Vlivy při pozorování . . . . .	85
5.4.2	Seeing . . . . .	86
5.4.3	Světelné znečištění . . . . .	87
<b>6</b>	<b>Vesmírní sousedé na obloze</b>	<b>91</b>
6.1	Slunce . . . . .	91
6.1.1	Slunce na obloze . . . . .	93
6.1.2	Slunce na hvězdné obloze . . . . .	95
6.2	Měsíc . . . . .	97
6.2.1	Siderický a synodický měsíc . . . . .	98
6.2.2	Fáze Měsíce . . . . .	99
6.2.3	Měsíční tvář . . . . .	101
6.3	Kosmické divadlo – zatmění . . . . .	105
6.3.1	Zatmění Měsíce . . . . .	105
6.3.2	Zatmění Slunce . . . . .	107
6.3.3	Četnost a pozorovatelnost zatmění . . . . .	109
6.4	Planety, trpasličí planety . . . . .	111
6.4.1	Pozorování planet . . . . .	113
6.4.2	Tanec planet . . . . .	115
6.4.3	Aspekty . . . . .	117
6.5	Planetky . . . . .	118
6.6	Kometry . . . . .	118
6.7	Meteoroidy, meteory, meteority . . . . .	120
6.8	Umělé družice . . . . .	123
<b>7</b>	<b>Informace z vesmíru</b>	<b>126</b>
7.1	Meteority . . . . .	126
7.2	Dovoz vzorků . . . . .	128
7.3	Kosmický vítr aneb „nálety“ částic . . . . .	130
7.3.1	Kosmické záření . . . . .	130
7.3.2	Sluneční vítr . . . . .	131
7.3.3	Neutrino . . . . .	131
7.4	Gravitační vlny . . . . .	133
7.5	Elektromagnetické záření . . . . .	133
7.5.1	Okna do vesmíru . . . . .	134
7.5.2	Jak tělesa září? . . . . .	137
7.5.3	Záření absolutně černého tělesa . . . . .	140
<b>8</b>	<b>Spektroskopie</b>	<b>146</b>
8.1	Počátky astrofyziky . . . . .	147
8.2	Spektroskopie hvězd . . . . .	150
8.3	Spektrální klasifikace hvězd . . . . .	152

<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 . . . . .	178
10.4.2 Světelnost dalekohledu . . . . .	180
10.4.3 Rozlišovací schopnost dalekohledu . . . . .	180
10.4.4 Optické vady dalekohledů . . . . .	182
10.5 Příslušenství dalekohledů . . . . .	184
10.5.1 Okuláry . . . . .	184
10.5.2 Optické filtry . . . . .	185
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 . . . . .	202
11.6 Částicová astronomie . . . . .	206
11.6.1 Kosmické záření . . . . .	206
11.6.2 Neutrinová astronomie . . . . .	206
11.7 Gravitační vlny . . . . .	208
<b>12 Sluneční soustava – přehled</b>	<b>211</b>
12.1 Inventura ve Sluneční soustavě . . . . .	211
12.2 Vývoj Sluneční soustavy . . . . .	212
12.2.1 Vznik Sluneční soustavy . . . . .	212
12.2.2 Stopy předchozího vývoje na tváři planet . . . . .	214
12.3 Základní informace o planetách . . . . .	217
12.3.1 Merkur ☿ . . . . .	217
12.3.2 Venuše ♀ . . . . .	218

12.3.3	Země $\oplus$ . . . . .	220
12.3.4	Mars $\♂$ . . . . .	221
12.3.5	Jupiter $\♃$ . . . . .	224
12.3.6	Saturn $\♄$ . . . . .	226
12.3.7	Uran $\♅$ . . . . .	227
12.3.8	Neptun $\♆$ . . . . .	228
12.4	Malá tělesa Sluneční soustavy . . . . .	229
12.4.1	Trpasličí planety . . . . .	229
12.4.2	Měsíce planet . . . . .	232
12.4.2.1	Země: Měsíc . . . . .	232
12.4.2.2	Mars: Phobos a Deimos . . . . .	233
12.4.2.3	Rodina družic Jupitera . . . . .	233
12.4.2.4	Měsíce Saturna . . . . .	234
12.4.2.5	Společníci Uranu . . . . .	234
12.4.2.6	Neptunovy měsíce . . . . .	235
12.4.3	Planetky . . . . .	236
12.4.4	Komety . . . . .	237
12.5	Modely Sluneční soustavy . . . . .	238
12.5.1	Geocentrický model . . . . .	238
12.5.2	Heliocentrický model . . . . .	239
12.5.3	Tychonův kompromis . . . . .	241
12.6	Keplerovy zákony . . . . .	241
<b>13</b>	<b>Exoplanety</b> . . . . .	<b>245</b>
13.1	Co je (exo)planeta? . . . . .	246
13.2	Exoplanety ve dvojhvězdách . . . . .	249
13.3	Přehled metod pro detekci exoplanet . . . . .	249
13.3.1	Přímé zobrazování . . . . .	249
13.3.2	Astrometrie . . . . .	250
13.3.3	Gravitační mikročochky . . . . .	251
13.3.4	Zpoždování záblesků pulsarů . . . . .	251
13.3.5	Radiální rychlosti . . . . .	252
13.3.6	Tranzity . . . . .	253
13.3.7	TTV,ETV . . . . .	255
<b>14</b>	<b>Život ve vesmíru</b> . . . . .	<b>256</b>
14.1	Vznik života . . . . .	257
14.2	Život ve vesmíru z pohledu astronoma . . . . .	259
14.3	Četnost života ve vesmíru – Drakeova rovnice . . . . .	261
14.3.1	Život na Zemi – typický vzorek? . . . . .	262
14.4	Hledání mimozemského života . . . . .	262
14.4.1	Život ve Sluneční soustavě . . . . .	265
14.5	Kontakt s mimozemšťany . . . . .	266
14.6	Domněnka o vzácné Zemi . . . . .	267
<b>15</b>	<b>Rejstřík osob</b> . . . . .	<b>269</b>

<b>A Appendix: Vývoj astronomie</b>	<b>296</b>
<b>B Appendix: Fotometrické pojmy</b>	<b>311</b>
B.1 Slovníček pojmů z fotometrie . . . . .	311
<b>C Appendix: Kuželosečky</b>	<b>311</b>
<b>D Appendix: Výslovnost latinských slov</b>	<b>312</b>
<b>E Appendix: Řecká abeceda</b>	<b>312</b>

# Základy astronomie 1





# 1 Historický úvod

## 1.1 Vznik a význam astronomie

Temná obloha posetá hvězdami je opravdu kouzelná. Dokáže zaujmout, uchvátit! Z prastarých skalních kreseb je zřejmé, že noční nebe pozoroval už pračlověk v dávných dobách. Všiml si na něm různých skupin hvězd i různých úkazů. V minulosti bylo přímo otázkou života a smrti rozpoznat nejen aktuální počasí a jeho změny, ale i sledovat čas, nástup noci, příchod ročních období. Znalost oblohy, fází Měsíce, jasných hvězd a kalendáře tak předešla písmo o desítky tisíc let!



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

Soubor znalostí o vesmíru, jeho složkách, stavbě, vzniku a vývoji, stejně jako nauku, která se jimi zabývá, označujeme jako **astronomie**. Její vznik 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.

<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.

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 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. Nicméně 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 spolehlivého 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 výtvořiny přírody na Zemi. Lidstvo by však do jisté míry potřebovalo napodobit i výtvořiny 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 tech-

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

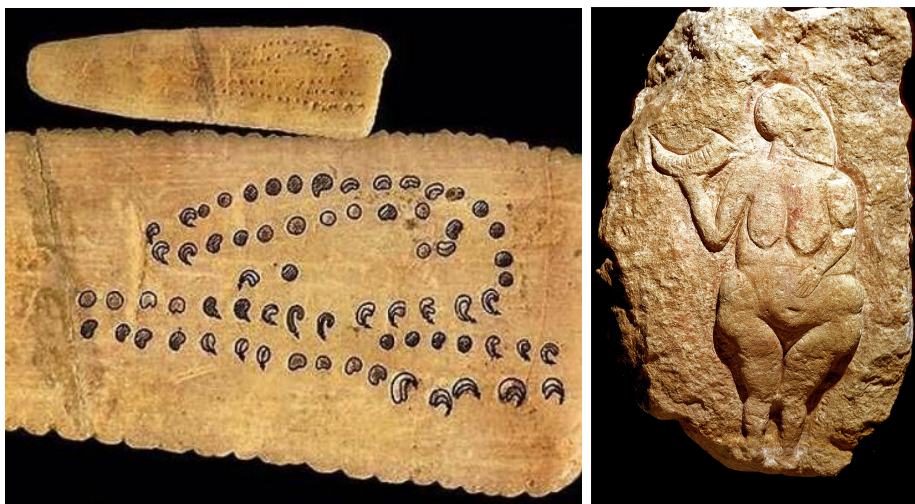
<sup>3</sup>Také Wi-fi, Wi-Fi, wi-fi, wifi, Wireless LAN, WLAN. Původně označení Wi-Fi nemělo nic znamenat, ale později se z něj stala slovní hříčka „wireless fidelity“ (bezdrátová věrnost) k známému Hi-Fi (high fidelity – vysoká věrnost).

nologického rozvoje.

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

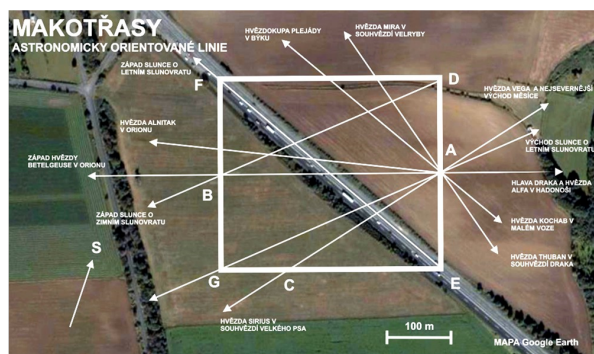


Obrázek 1.2: Ukázky starověkých předmětů s astronomickými motivy. Vlevo: nejstarší lunární kalendář na kosti nalezené v Abri Blanchard (Francie). Stáří se odhaduje až na 34 tisíc let. Vpravo Lausselská Venuše. Na srpku Měsíce je 13 zářezů, což má odpovídat 13 měsíčním/menstruačním cyklům během slunečního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

## 1.2 Mezníky v dějinách astronomie

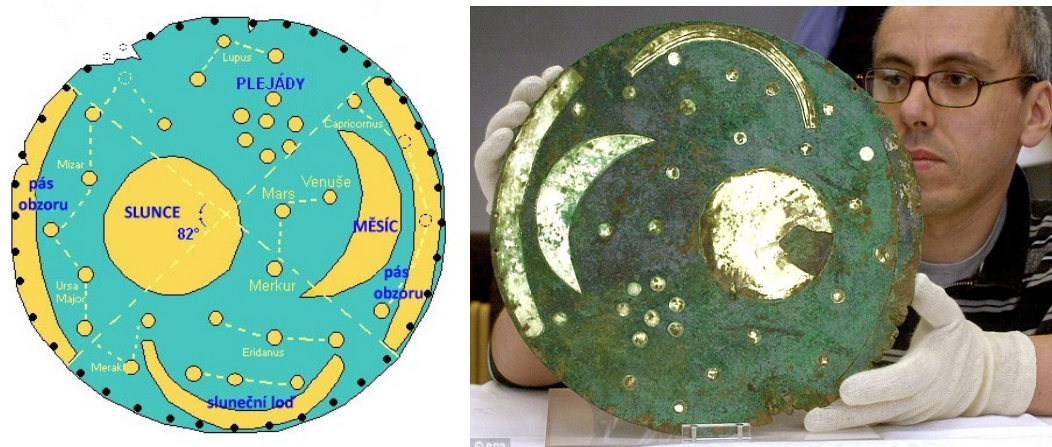
Stanovit nejdůležitější mezníky v dějinách astronomie je obtížné a někdy velmi diskutabilní, a nejen u těch nejstarších. Záleží na pohledu autora, zasazení do kontextu doby a podobně. Zde přinášíme jen stručný přehled, podrobnější seznam významných událostí je uveden příloze A.

- 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 (Göbekli Tepe). 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 zaznamenaná 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, střelením. Tentokrát ale bylo jen dílem náhody a štěstí, že drak Slunce nesežral celé, a tak byli astronomové potrestáni.



Obrázek 1.4: Disk z Nebry. Upomínka 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. Památka UNESCO v programu Paměť světa. Zdroje: <http://www.celticnz.co.nz/NebraSunDisk/NebraSunDisk.htm> (schéma; upraveno), <http://www.dailymail.co.uk/>.

- 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, resp. asterismy.
- 1900 př.n.l. – vznikla svatyně a observatoř Stonehenge v Anglii.



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'ing-ťing (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 *Mathematike Syntaxis* (Matematická soustava) známém jako *Almagest*.
  - 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.



Obrázek 1.6: Jasná hvězda vlevo od Měsíce na skále v kaňonu Chaco (Nové Mexiko, USA) 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, Knížní klub, 2009.



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/>.

- 1054 – zaznamenán výbuch supernovy v centru dnešní Krabí mlhoviny.
- 1542 – Mikuláš Koperník prezentoval heliocentrický model pohybu planet včetně Země.
- 1572 – Tadeáš Hájek z Hájku, Tycho Brahe a další pozorovali supernovu v souhvězdí

Kasiopeja a z její paralaxy odvodili, že se nachází za sférou Měsíce.

- 1582 – papež Řehoř XIII. zavedl reformu kalendáře.



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>.

- 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 1.9: 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 spis 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 (daguerrotypii) 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 Franz Hess objevil kosmické záření.
- 1915 – Albert Einstein publikoval obecnou teorii relativity, známou také jako teorii gravitace.

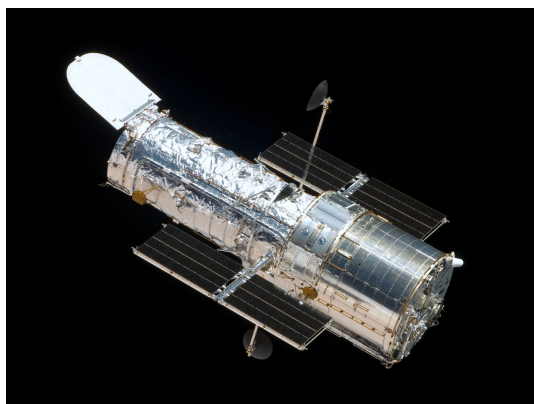
- 1919 – Arthur Eddington na základě pozorování zatmění Slunce potvrdil platnost teorie relativity.
- 1929 – Edwin Hubble formuloval zákon vzdalování galaxií. Zjistil, že rychlost vzdalování je úměrná jejich vzdálenosti.



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>.

- 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.
- 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 spojitě 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 v 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: Hubbleův 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 a pojmenované Albion.
- 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.
- 2004 – získán první snímek exoplanety.

- 2006 – Na valném shromáždění Mezinárodní astronomické unie v Praze byla přijata definice planety a trpasličí planety. Pluto bylo přeřazeno 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.
- 2014 – první potvrzená detekce organických molekul na Marsu.
- 2015 – družice Kepler objevila první exoplanetu velikosti Země v zóně života.
- 2015 – úspěšný průlet sondy New Horizons kolem Pluta.
- 2015 – první přímá detekce gravitačních vln na observatoři LIGO.
- 2016 – publikována první sada měření z družice GAIA.
- 2016 – objevena nejbližší exoplanety Proxima Centauri b.
- 2016 – v Číně dokončen největší radioteleskop na světě (FAST) o průměru 500 m.
- 2017 – detekce srážky neutronových hvězd v galaxii NGC 4993 detekována pomocí gravitačních vln i v různých oborech elektromagnetického spektra. Počátek tzv. „multi-messenger astronomy“.
- 2019 – 1. snímek černé díry v centru galaxie M87 pomocí Event Horizon Telescope (EHT).
- 2019 – čínská sonda Chang'e 4 jako první přistála na odvrácené straně Měsíce.
- 2020 – zhroucení 300m radioteleskopu v Arecibu.
- 2021 – vypuštění Dalekohledu James Webba (JWST – James Webb Space Telescope).
- 2022 – první snímky a měření z JWST.
- 2022 – první test obrany země před vesmírnými projektily. Družice Double Asteroid Redirect Test (DART) úspěšně zasáhla měsíček Dimorphos asteroidu 65803 Didymos.
- 2022 – EHT poskytl 1. snímek černé díry v centru naší Galaxie.

## Použitá a doplňující literatura

- Akvinský, T., 1993, Jsou nebeská tělesa příčinou lidských skutků? *Universum* 10, 47
- Couperová, H., Henbest, N., 2009, Dějiny astronomie, Knížní 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. Pozorovatele tak lze 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 obhlížíme, obzíráme, nazveme **obzorem**. Do našeho obzoru patří nejen přírodní výtvořy v našem okolí – kopce, hory, údolí, ale samozřejmě také lidské výtvořy – 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 uvedená budova bude Slunce při východu zhruba na vodorovné rovině a pokud budeme pozorovat východ Slunce nad obzor z údolí na úpatí hory, může být Slunce dokonce i poměrně vysoko nad vodorovnou rovinou.

Představme si pozorovatele na pozorovacím stanovišti. Obhlíží krajinu kolem sebe a tím vymezuje svůj obzor. Ale co když jeho zrak zamíří nad obzor? Všechny směry vycházející z pozorovatele, z jeho očí, mířící nad obzor, tvoří **oblohu**. Takové určení je

---

<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.



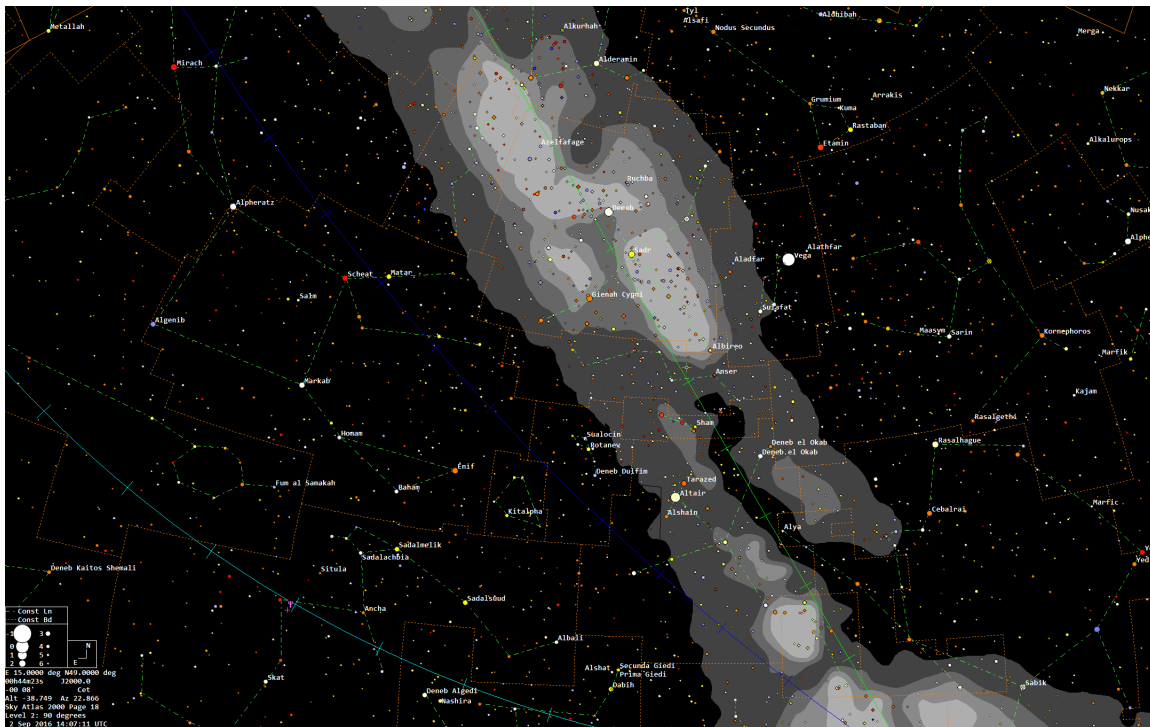
Obrázek 2.1: Obloha s objekty pozemskými (letadlo, mraky) i kosmickými (Měsíc, Venuše, Jupiter). Foto: Michael Wilson. <http://apod.nasa.gov/apod/ap050913.html>.

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 zajímavější, s větším 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, která se pomalu otáčí ve vrcholu nějaké věže. 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  $23,5^\circ$ . Jejich průsečnici zpravidla dělíme na dvě polopřímky s počátkem v místě pozorování. Jednu polopřímku nazýváme **jarní bod**, druhou pak **podzimní bod**. Podivná situace, kdy polopřímku označujeme jako bod, je výsledkem archaické představy o nebeské sféře. Jde o pomyslnou kouli jistého velkého poloměru, na kterou umísťujeme všechny objekty, jejichž polohu nebo pohyby studujeme. Souřadnice i vzájemné vzdálenosti na takové sféře jsou definovány pomocí sférické trigonometrie. V moderní astronomii ale pojem nebeská sféra nepotřebujeme. Ale o tom až v kapitole 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 roztrždit, popsat, oměřit. První a nejčastější otázky v této souvislosti jsou dotazy, jak je ten pozorovaný objekt vlastně jasný a jak je daleko. Svě by vám o těchto dotazech jistě pověděli pracovníci hvězdáren, kteří ukazují hvězdné nebe návštěvníkům. Pokud 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 býval odvozen od mezinárodního etalonu, válce ze slitiny

<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, BIPM) v Sèvres ve Francii (<https://www.bipm.org/en/home>). Nejvyšším „úřadem“ v tomto směru je v České republice Český metrologický institut se sídlem v Brně (<https://www.cmi.cz/>).

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

platiny a iridia. Jak se však ukázalo, jeho hmotnost se za 100 let zmenšila o přibližně 50 mikrogramů, a tak byl kilogram definován nově pomocí pevné hodnoty Planckovy konstanty.<sup>6</sup> Revizí prošly i další definice základních jednotek SI. Celá inovovaná soustava SI vstoupila v platnost 20. května 2020. Do českého právního řádu se tato inovace dostala v zákoně 152/2021 Sb.

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>7</sup>, která doporučuje používat při vyjádřeních rozměrů, hmotností, teplot nebo zářivých 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 (Tiesinga et al., 2021) nebo z brožury BIPM (<https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure>).

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

<sup>6</sup>Kilogram, značka „kg“, je jednotka hmotnosti v SI. Je definována fixací číselné hodnoty Planckovy konstanty  $h$ , aby byla rovna  $6,62607015 \cdot 10^{-34}$ , je-li vyjádřena jednotkou Js, rovnou  $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ , kde metr a sekunda jsou definovány pomocí  $c$  a  $\Delta\nu_{Cs}$ .

<sup>7</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 (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)	$1 M_J = 1,899 \cdot 10^{27} \text{ kg}$

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

## 2.4 Vesmírné dálavy

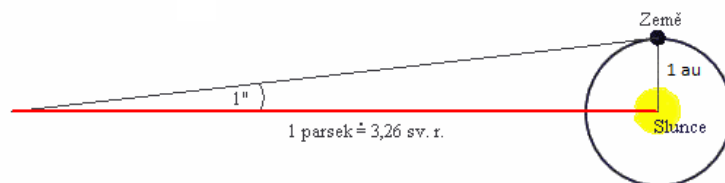
Velká čísla jako by v astronomii neměla konce. Jejich „redukci“ vhodnými jednotkami hmotnosti, zářivého výkonu jsme vyřešili. Ale co vzdálenost? Vzdálenosti ve vesmíru jsou přece tak obrovské, že běžné délkové jednotky nemohou stačit. Ale i tady astronomové mají řešení a dokonce hned několik.

### 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 řadu jednotek schválených pro použití s SI (dříve tzv. vedlejší jednotky). Nepatří sice do SI, ale praxe si v podstatě vynutila jejich vznik a používání. Kromě jednotek času minuta, hodina a den mezi nimi nalezneme i astronomickou jednotku.

**Astronomická jednotka** (au, dříve také AU, a.j.) je definována jako střední vzdálenost



Obrázek 2.4: K definici parseku. Zdroj: <http://hvezdy.astro.cz>.

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 ly (sv.r.) = 63 241 au = 9 460 730 472 580 800 m. Výjimečně se používá i podobně zavedených menších délkových jednotek jako světelný den, světelná hodina atd. Světelný rok se využívá hlavně při popisu vzdáleností ve světě hvězd. Často se ale setkáme také se zcela špatným použitím, kdy někteří laici chápou světelný rok jako časovou jednotku. Marie Rottrová například v písni „Večerem zhýčkaná“ zpívá:

*Večerem zhýčkaná, za sliby provdaná,  
půlnočním kouzlům věrná, hvězdám upsaná.  
Za množinou přání leží nový svět,  
však blíž je kytky 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 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

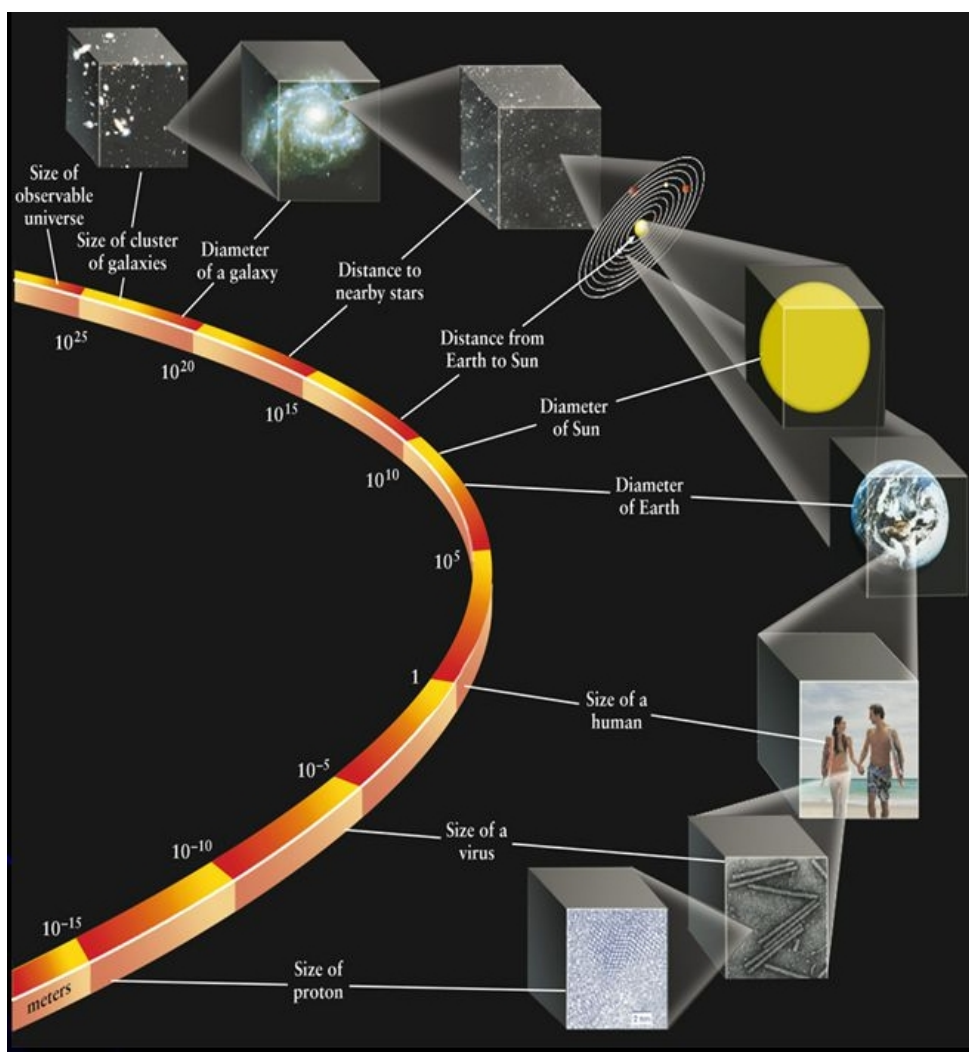
$$\pi = \frac{1}{r}. \quad (2.1)$$

<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.

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).



Obrázek 2.5: Velikosti objektů a vzdálenosti ve vesmíru. Převzato z prezentace Neil F. Comins, William J. Kaufmann III, Discovering the Universe.

## 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.

<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.



Obrázek 2.6: 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.

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). 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,

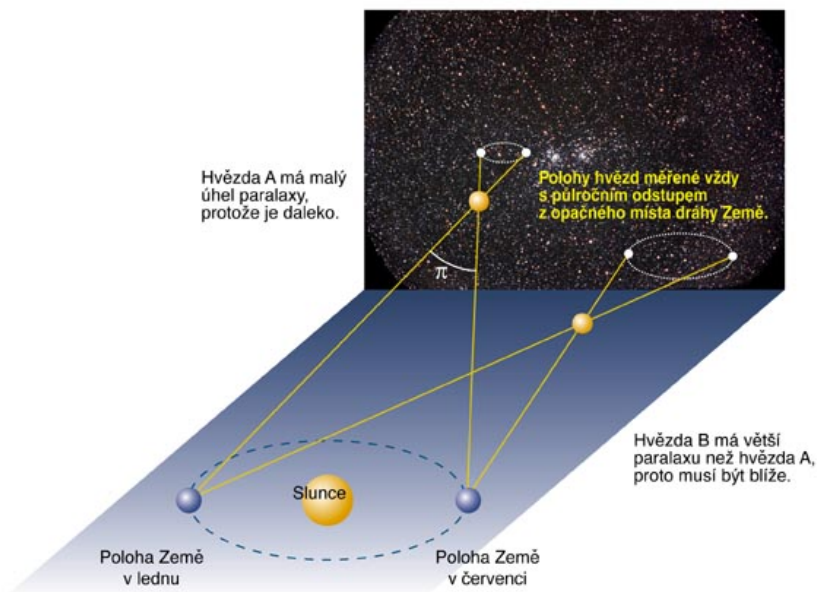
<sup>12</sup>Global Positioning System, česky Globální polohovací systém, zkráceně GPS, je celosvětový družicový polohový systém provozovaný Ministerstvem obrany Spojených států amerických. Ruskou obdobou je systém GLONASS. Evropský systém Galileo je v provozu od r. 2019 a čínský Beidou (globální verze pod jménem COMPASS od r. 2018).

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

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 uvedme velmi stručně jen ty nejdůležitější metody určování vzdáleností ve vesmíru.

### 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 10 %.

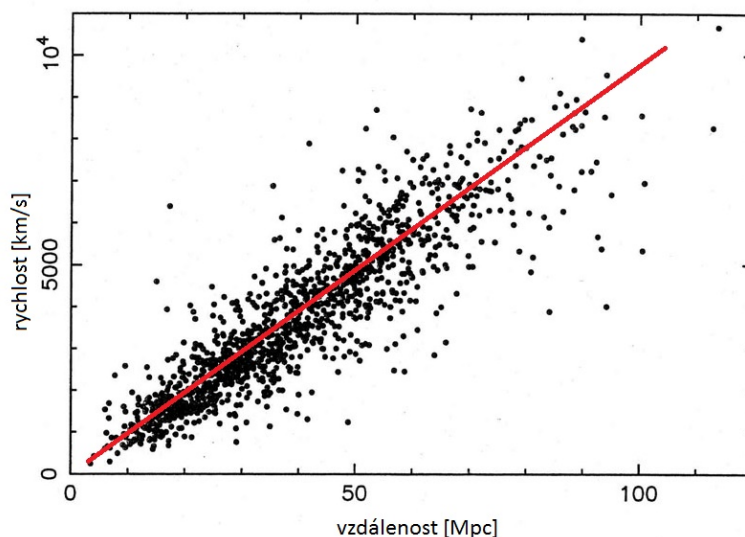


Obrázek 2.7: Trigonometrická metoda pro určování vzdálenosti hvězd. Zdroj: <http://hvezdy.astro.cz>.

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

## 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

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 neutrína	2,3
	$10^{-21}$	zm (zepto-)	7 zm	efektivní rozměr neutrína 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
			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	

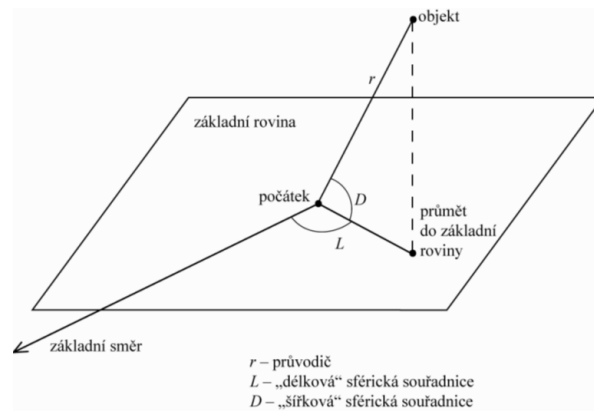
Tabulka byla převzata z anglické verze wikipedie [https://en.wikipedia.org/wiki/Orders\\_of\\_magnitude\\_\(length\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Orders_of_magnitude_(length)) a upravena. Zdroje: 1 – Mohr et al. (2015), 2 – Cowan et al. (1956), 3 – Reines & Cowan (1956), 4 – Pohl et al. (2010), 5 – 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).

- 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
- Tiesinga, E., Mohr, P.J., Newell, D.B., Taylor, B.N. 2021, *Rev. Mod. Phys.* 93, 025010
- 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 starobylých 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 polohu objektů nejen na obloze, ale i na hvězdné obloze s vysokou přesností. Je zřejmé, že přesné určení polohy a času rozhodně není jednoduchou úlohou. Je důležité zvolit správnou vztažnou soustavu, vybrat správný souřadný systém pro danou úlohu, případně přejít z jednoho systému do druhého.

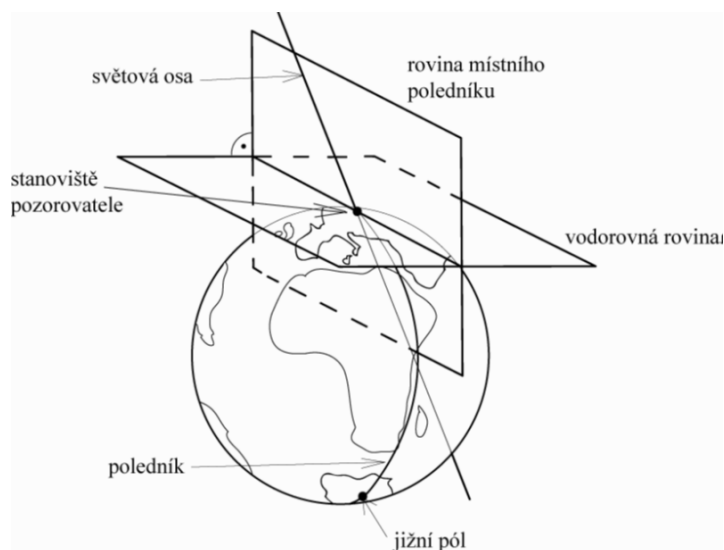
Polohy objektů na obloze i hvězdné obloze budeme určovat pomocí směrů, respektive úhlů mezi dvěma směry. Většinou jsou objekty umístěny na nebeskou sféru – pomyslnou kouli o jistém blíže nespecifikovaném poloměru. Polohu objektu pak udávají soustavy sférických souřadnic. V minulosti byly sférické souřadnice 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).

Počátkem soustavy souřadnic prochází *základní rovina* dané soustavy a na ni kolmá

<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).

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.

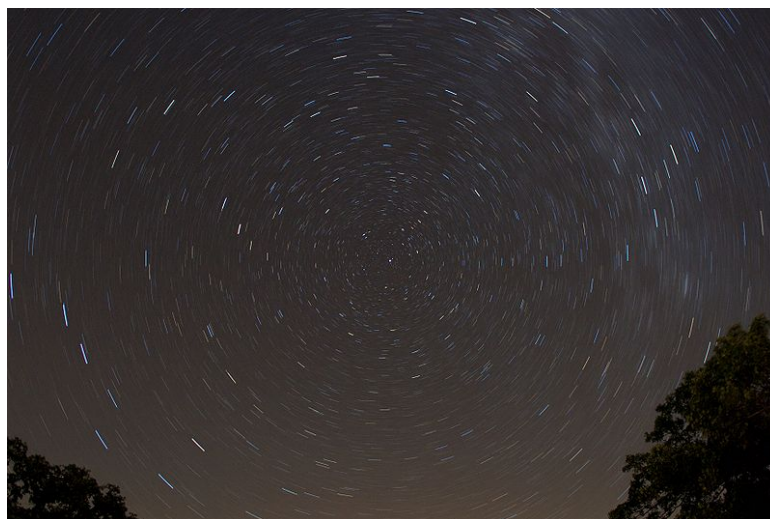
Ale zkusme se nejprve vrátit zpět k učivu zeměpisu a přírodovědy na základních školách, kde jsme se seznamovali se zeměpisnými souřadnicemi. Soustava zeměpisných souřadnic má počátek ve středu Země. Její základní rovinou je rovina zemského rovníku. Základním směrem v této rovině je směr k poledníku procházejícímu 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 sférou (definovanou pomocí hladiny moře), se běžně neuvádí. Zeměpisná délka určuje

<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

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.

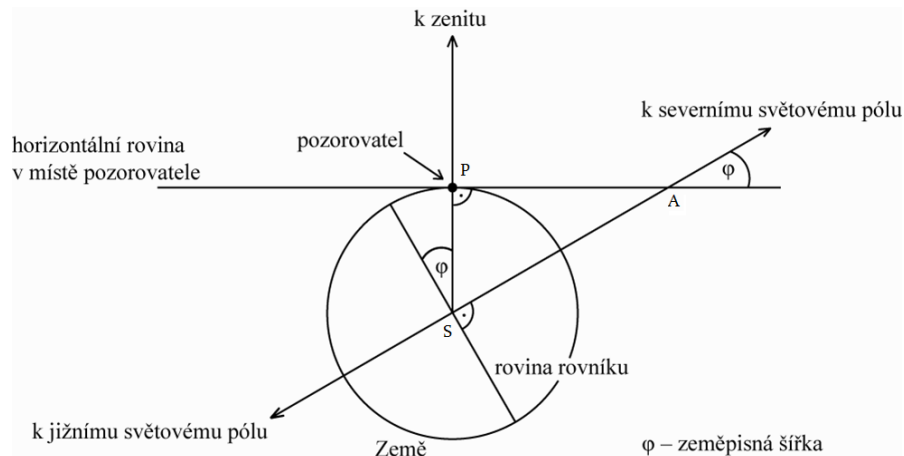


Obrázek 3.3: Hvězdná obloha v okolí severního světového pólu. Znalci hvězdné oblohy jistě neuje Velký vůz nebo hvězdy v souhvězdí Kasiopeja. Převzato z <http://planetarium.ipd.org>.

### 3.1 Obzorníková soustava souřadnic

První soustava astronomických souřadnic nám poslouží pro určování polohy objektu na obloze. Jedná se o soustavu levotočivou a topocentrickou, která 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. 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, Egyptě 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 vy-



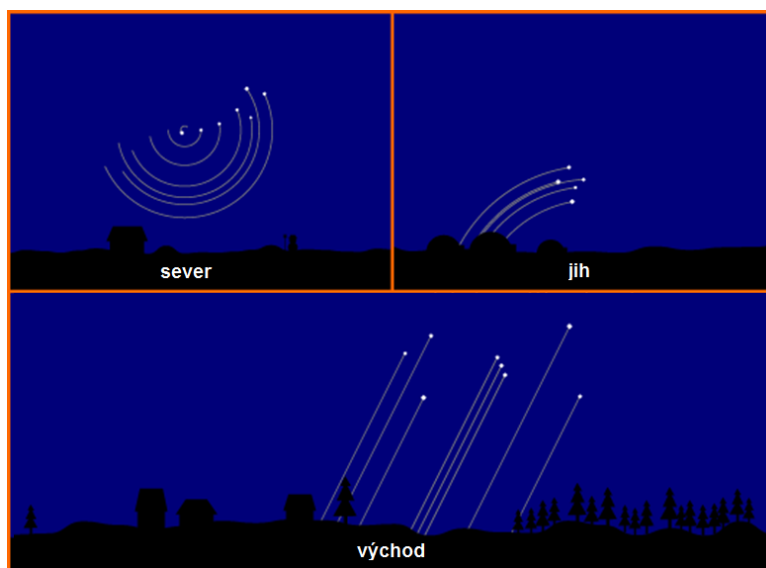
Obrázek 3.4: Odvození závislosti úhlové výšky Polárky na zeměpisné šířce pozorovacího stanoviště.

značíme směr k severnímu pólu a k němu kolmou rovinu 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 zbývající 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.

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

Pokud se bude pozorovatel nacházet na severním pólu, bude mít Polárku a tedy severní světový pól nad hlavou prakticky v zenitu (zeměpisná šířka  $\varphi = 90^\circ$ , úhlová výška Polárky  $h = 90^\circ$ , zatímco na rovníku ( $\varphi = 0^\circ$ ) bude Polárka vidět pouze z vyvýšeného místa vodorovným směrem, tedy v nulové úhlové výšce.

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.

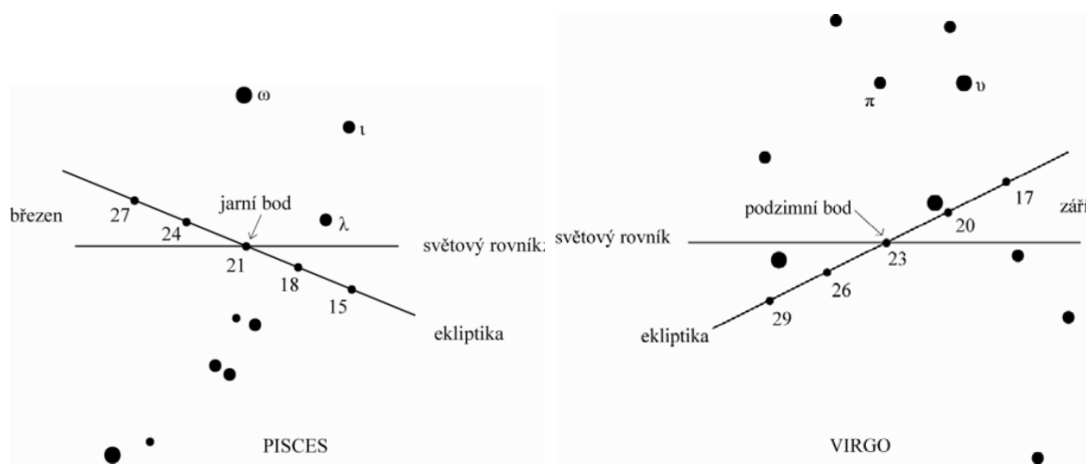
## 3.2 Rovníková soustava souřadnic

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 rovníkosti. V okamžiku podzimní rovníkosti

<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.

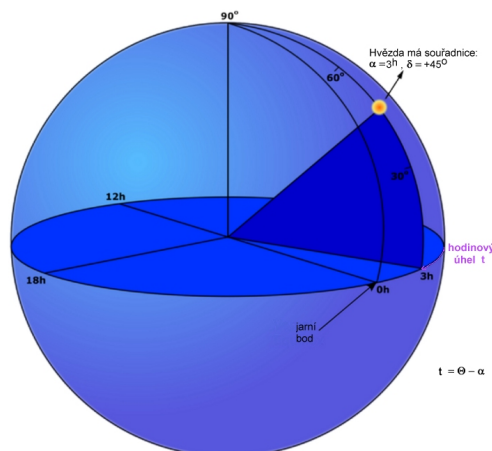
Pro úplnost bychom měli představit i rovníkové souřadnice prvního typu. Jejich základní rovinou je také rovina světového rovníku. Základní směr je ale tentokrát dán pomocí roviny místního poledníku. Zatímco šířková souřadnice, deklinace  $\delta$  je stejná jako pro druhý typ rovníkových souřadnic, délková 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* od *declinare* a znamená odkloňovat.

<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.

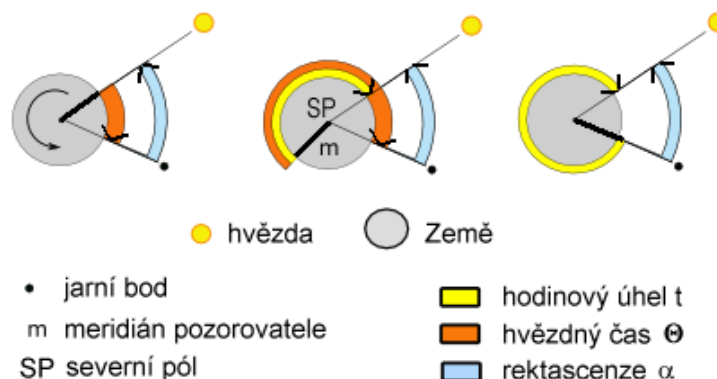
rektascenzi spočívá v tom, že se měří opačným směrem a mění se průběžně s časem! Hodinový úhel je definován jako úhel mezi rovinou deklinační kružnice místního poledníku a rovinou deklinační kružnice objektu (viz obrázek 3.7) a vyjadřuje se podobně jako rektascenze v úhlové nebo časově-úhlové míře. Mezi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

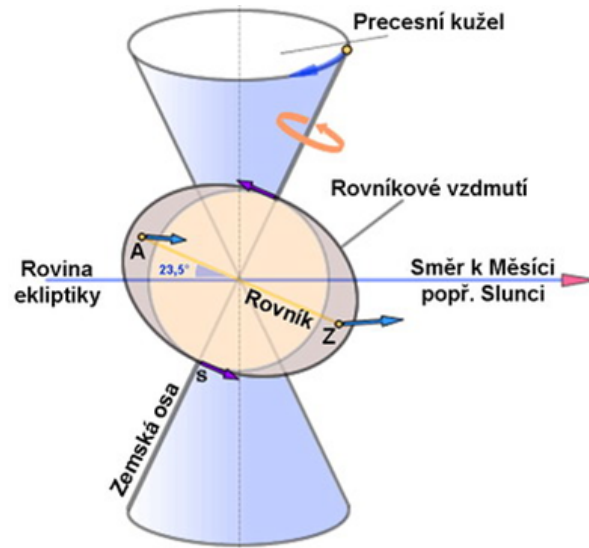
desítkách tisíc let. Takovou simulaci pro známé uskupení Velkého vozu ukazuje obrázek 3.9.



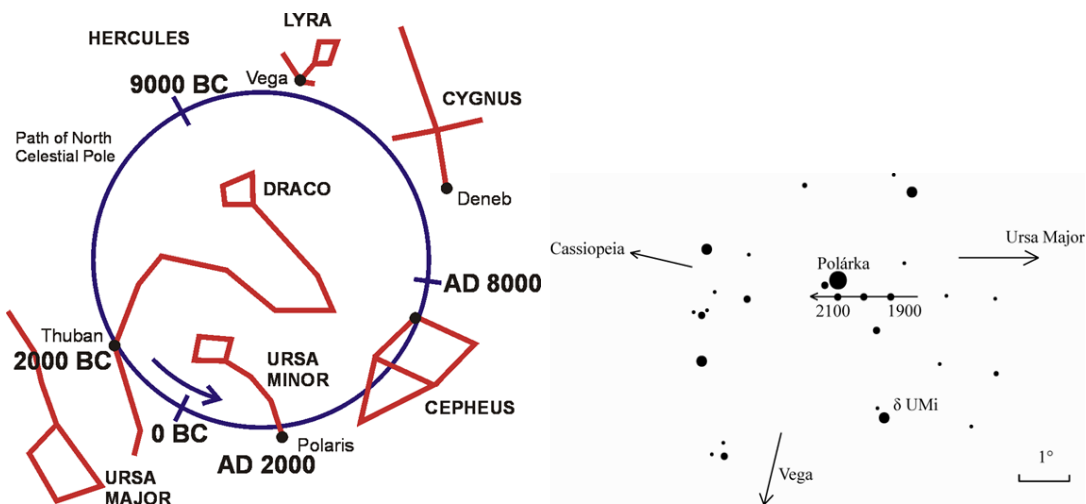
Obrázek 3.9: Změna podoby Velkého vozu (skupiny sedmi jasných hvězd ze souhvězdí Velké medvědice): dnes (vlevo), za 50 000 let a za 100 000 let (vpravo). Převzato z webu <http://astronomia.zcu.cz>.

Rektascenze a deklinace objektu se tedy mění v důsledku jeho vlastních pohybů. Ale nejen to. Mění se v důsledku změny samotné soustavy souřadnic. Vzátažná soustava definovaná pomocí roviny světového rovníku a jarního bodu se totiž také v čase mění! Rotační osa Země 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 152/2021 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 existence i dalších forem života na Zemi je závislý na Slunci, na střídání světla a tmy. Naše „biologické hodiny“ jsou sladěny s otáčením Země vůči

<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 (Tiesinga et al., 2021).

Slunci. Od délky jedné otočky Země je stanovena v soustavě jednotek SI délka jednoho dne, takže  $1 \text{ d} = 24 \text{ h} = 1440 \text{ min} = 86400 \text{ s}$ . Ale jak vlastně měřili délku dne naši předkové? Z historických záznamů můžeme vyčíst, že jeden den si zpravidla dělili na čas denní, noční a soumrak, přičemž čas denní byl dále dělen na 10 částí a k tomu případně ještě dvě soumrakové části – ranní a večerní soumrak. Noční část byla někdy chápána jako jeden celek, někdy byla také dělena na 12 dílů. Proč zrovna dvanáct? Původ tohoto dělení 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, resp. 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.



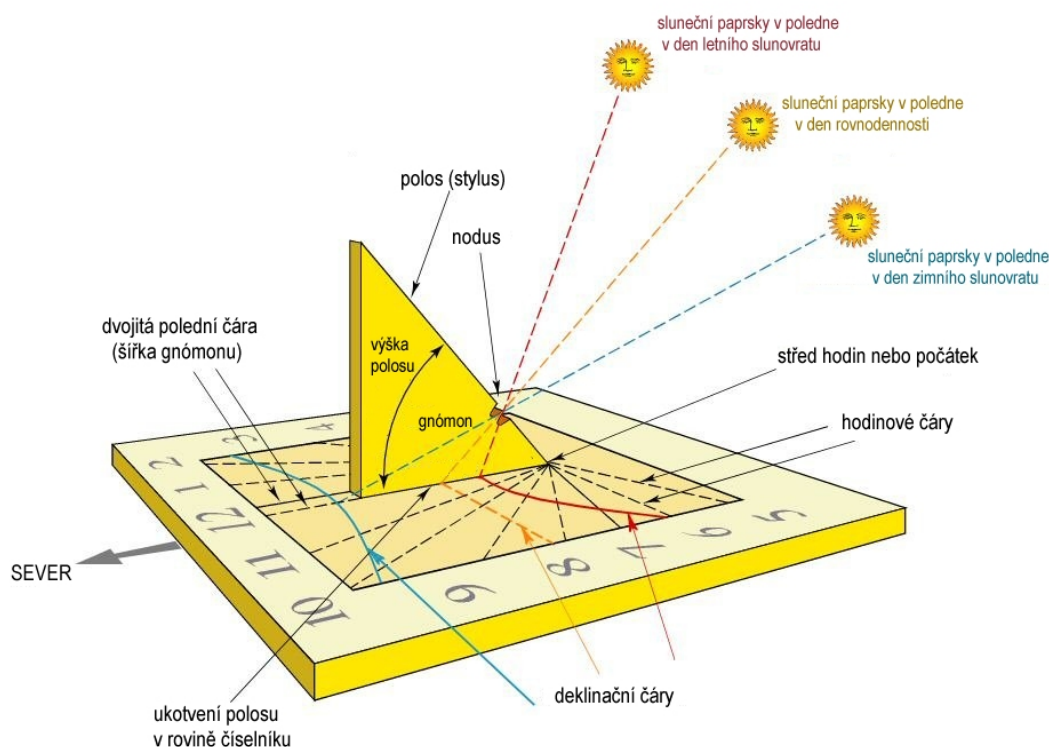
Obrázek 4.2: Část vykopávek chrámu v tureckém Göbekli Tepe. Zdroj: <http://www.perceptions.couk.com/westward.html>.

<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 svíslá 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.

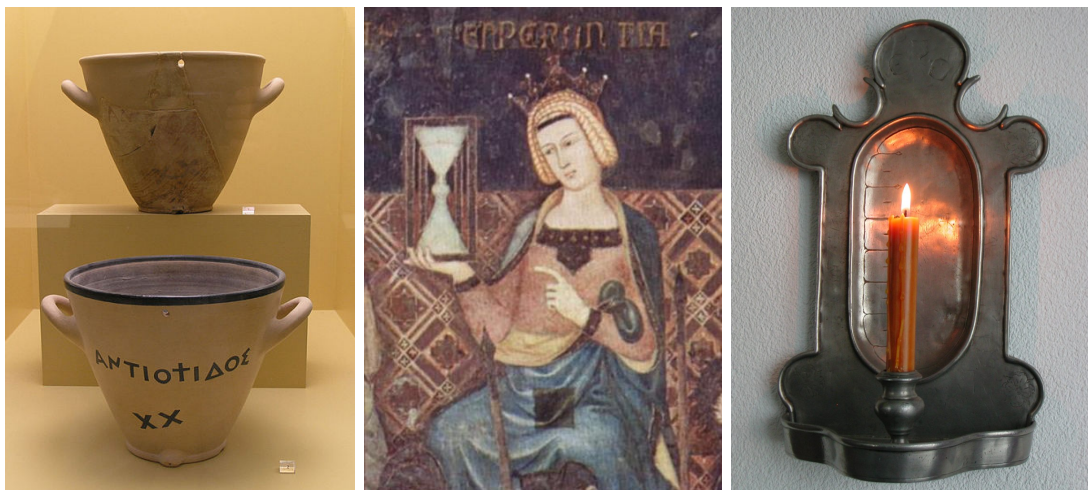


Obrázek 4.3: Schéma vodorovných slunečních hodin pro severní polokouli. Na jižní polokouli jde číselník proti směru hodinových ručiček. Převzato z webu British Sundial Society a upraveno.

<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 v roce 1967 i pro novou definici sekundy, která s mírnou úpravou platí dodnes.<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.<sup>12</sup>

### 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

---

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

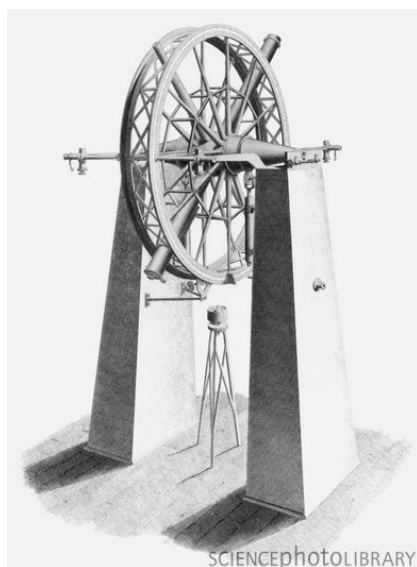
<sup>9</sup>Sestrojení hodin oznámil krátkou zprávou v roce 1657 a podrobně popsal v díle *Horologium oscillatorium* v roce 1673.

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

<sup>11</sup>Do r. 1967 byla sekunda charakterizována jako  $1/86\,400$  středního slunečního dne (viz kapitola 4.3.1).

<sup>12</sup>Zajímavé srovnání tří různých atomových hodin provedli vědci v roce 2021. Výsledky byly publikovány v časopise Nature <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03253-4>.

času používá interferometrických pozorování VLBI<sup>13</sup> velmi vzdálených objektů zvaných kvasary. Dosahuje se přesnosti řádově až milisekundy a je tak možné sledovat i drobné změny v délce jednotlivých otoček Země.



Obrázek 4.5: První pasážník svého druhu vyrobil roku 1806 Edward Troughton (1753-1835) pro anglického astronoma Stephena Groombridge (1755-1832). Obrázek je převzatý z publikace „Úvod do praktické astronomie“, kterou v několika částech vydal v letech 1824-1829 William Pearson.

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 vztahné 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 Ato-

<sup>13</sup>Interferometrická pozorování jsou založena na skládání signálů (optických, rádiových) z více přístrojů (dalekohledů, radioteleskopů). Přesným složením signálů z jednotlivých členů interferometru se získá výsledný signál, jehož rozlišení je podobné jako by tento signál byl pořízen jediným zařízením o rozměrech srovnatelných se vzdáleností členů interferometru. Jedním z největších interferometrů je VLBI (z anglického Very Long Baseline Interferometry), tedy Interferometr s velmi dlouhou základnou.

mic Time). Od roku 1961 je provozován časový standard UTC<sup>14</sup> (Coordinated Universal Time). UTC představuje základ pro občanské měření času, využívají ho například hodiny v počítačích synchronizovaných přes Network Time Protocol (NTP) server. Chod UTC je odvozen od rovnoměrně běžících atomových hodin. Jenže UTC je definován tak, že se nesmí odchýlit od UT1 o více než 0,9 sekundy. Proto je třeba někdy zařadit do UTC tzv. přestupnou sekundu, zpravidla na konci pololetí nebo celého roku. Od zavedení těchto přestupných sekund jich bylo do roku 2021 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>15</sup> datování počítají průběžně jednotlivé dny. K polední 1. ledna 2021 jich bylo už 2 459 215. 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.

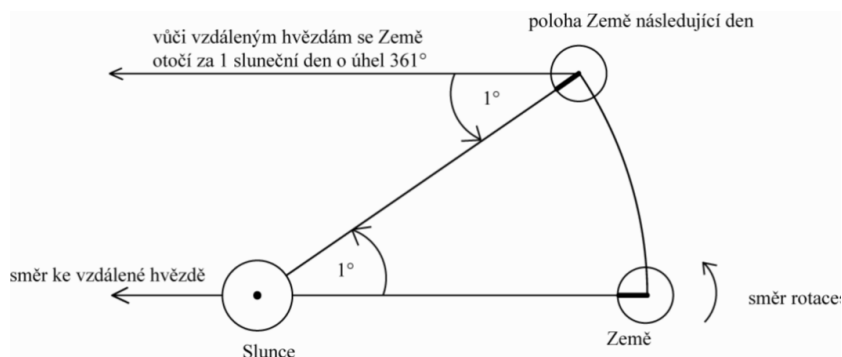
<sup>14</sup>Oficiálně byl takto označen až roku 1967.

<sup>15</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

V soustavě jednotek SI a jednotek schválených pro použití s SI je délka jednoho dne přímo definována (viz kapitola 4.1), ale 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 pohybů 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 kalendářní, hvězdný, sluneční a ten ještě pravý a střední. Ale nepředbíháme.



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>16</sup> jarního bodu<sup>17</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. Jinak řečeno, půjde o dobu mezi dvěma po sobě následujícími okamžiky, kdy je Slunce při pohledu ze stejného místa např. z Brna jižním směrem. 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

<sup>16</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>17</sup>Ani jarní bod není stabilní, ale v důsledku precese se zvolna posouvá. Hvězdný den je tak kratší o 0,009 s než doba otočky Země o  $360^\circ$  (měřeno vůči hvězdám), což odpovídá právě hodnotě denního posunu jarního bodu.

než den hvězdný. Pro větší přehlednost přinášíme i jednoduché převodní vztahy mezi hvězdným a slunečním dnem.

Převodní vztahy:

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

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

ale

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

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

Jak ale víme už ze střední školy, ve vztažné soustavě spojené se Sluncem, obíhá Země kolem Slunce po málo výstředné elipse a to znamená (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**

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

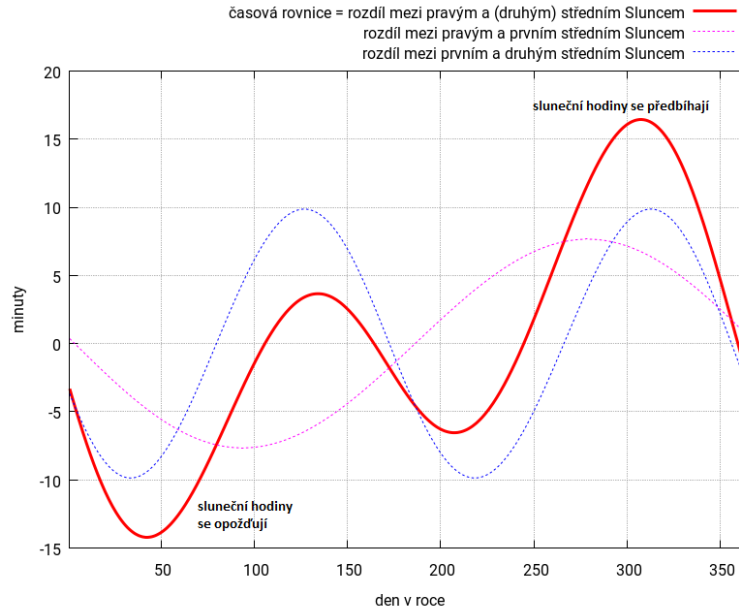
Z výše uvedeného vyplývá, že velikost výsledných hodnot v časové rovnici je dána tím, že se Slunce pohybuje po ekliptice nerovnoměrně a také tím, že čas měříme podél světového rovníku a nikoli podél ekliptiky. Změny velikosti časové rovnice ukazuje obrázek 4.7.

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>18</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>19</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

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

<sup>18</sup>Slovo *siderický* vychází z latinského označení hvězdy (*sidus*) a znamená tedy „hvězdný“.

<sup>19</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.

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

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

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 tím 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>20</sup>

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

<sup>20</sup>Připomeňme, že 1 juliánský rok dle definice IAU je roven 365,25 dne.



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 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 půlnoci (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  $0 \leq S < 24$ . 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>21</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 Pennsylvánii (USA), udržovali hodiny s šesti různými časy. Najít správné spojení v jízdním řádu pak byl docela rébus. A byli to právě zaměstnanci železničních společností, kteří si nejdříve uvědomili nutnost změny. Charles F. Dowd navrhl systém hodinových pásmových časů pro Americké dráhy kolem roku 1863<sup>22</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

<sup>21</sup>Chápáno z pohledu tehdejších cestovatelů. Z dnešního pohledu nás rychlost tehdejších strojů příliš neohromí.

<sup>22</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.

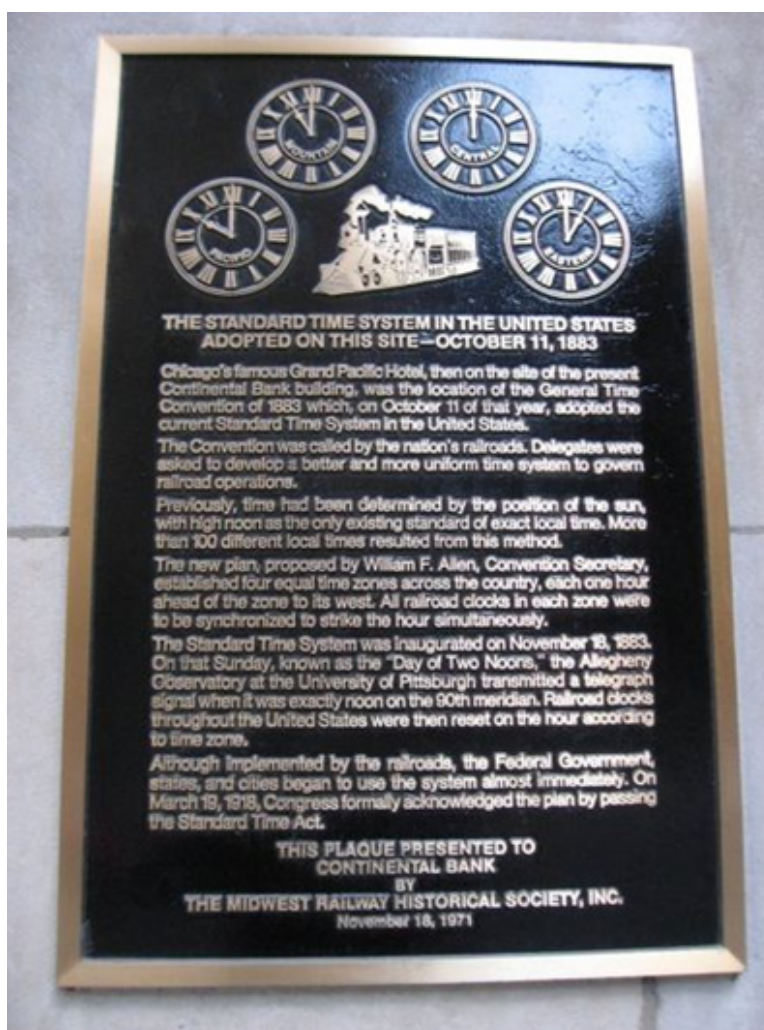
území, rozložení obyvatelstva a podobně. Nejvíce je to patrné v Číně, která se rozkládá na území pěti časových pásem. Ty byly používány do roku 1949. Dnes mají v celé Číně jednotný čas.

Jinými odchylkami od standardního pásmového času jsou časy zimní a letní. Princip podobný letnímu času navrhl (ale ironicky) Benjamin Franklin roku 1784 vydavatelům časopisu *Journal of Paris*<sup>23</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 se občas můžeme dočíst. 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>23</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>24</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. 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, v němž 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 fázi 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>24</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.

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. Tvzení, 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 le-

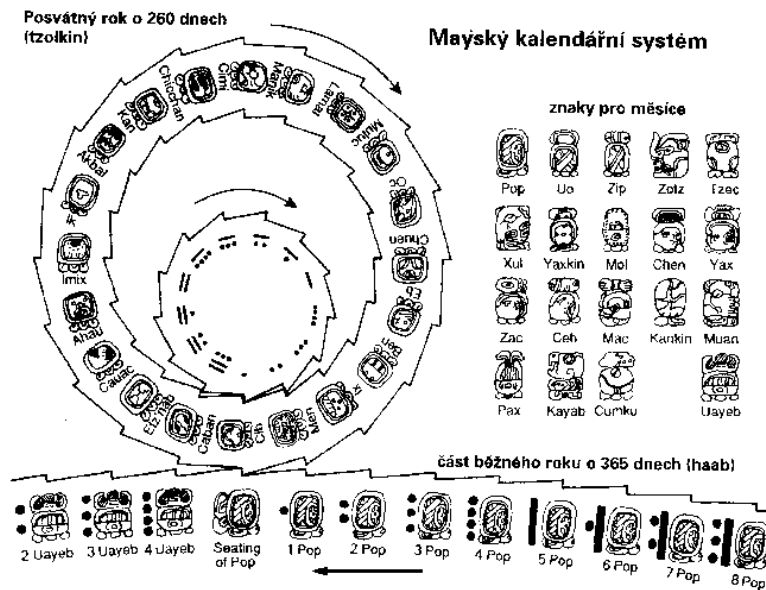
<sup>25</sup>Podrobný přehled zavádění reformy kalendáře lze najít na <https://kalendar.beda.cz/data-prijeti-gregorianskeho-kalendare-v-ruznych-zemich> nebo <https://www.tondering.dk/clauss/cal/gregorian.php#country>.

<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.

topočtem. Roky se ale nečíslovaly průběžně, nýbrž od začátku vlády panujícího faraona. Jeho vznik byl zpočátku vynucen zemědělstvím, stanovením období záplav pomocí heliaktického východu Síria. Později byl vylepšován zejména kvůli účetnictví a daňové evidenci. Roku 266 př.n.l. zavedl Ptolemaios III. přestupné roky. Přestože přímo v Egyptě se tato reforma příliš neujala, později se stala inspirací pro juliánský kalendář.

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

V roce 2012 se často 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. Nejdelší 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

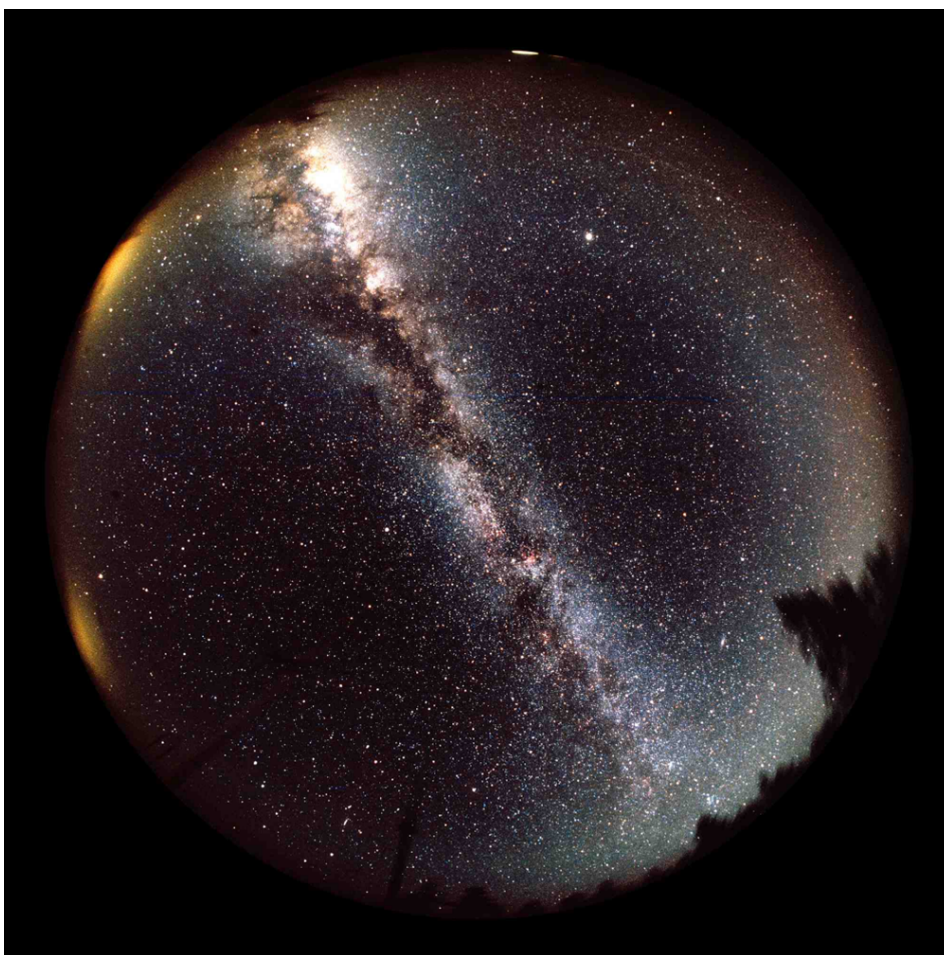
- Bloom, B. J., Nicholson, T. L., Williams, J. R., et al. 2014, *Nature*, 506, 71
- Böhm, V., Böhm, B. 2004, *Vesmír* 83, říjen 2004, 568 - 573
- Brosche, P., Sündermann, J., eds., 1990, *Earth's rotation from eons to days : proceedings of a workshop held at the Centre for Interdisciplinary Research (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
- 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.
- Tiesinga, E., Mohr, P.J., Newell, D.B., Taylor, B.N. 2021, *Rev. Mod. Phys.* 93, 025010

<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.



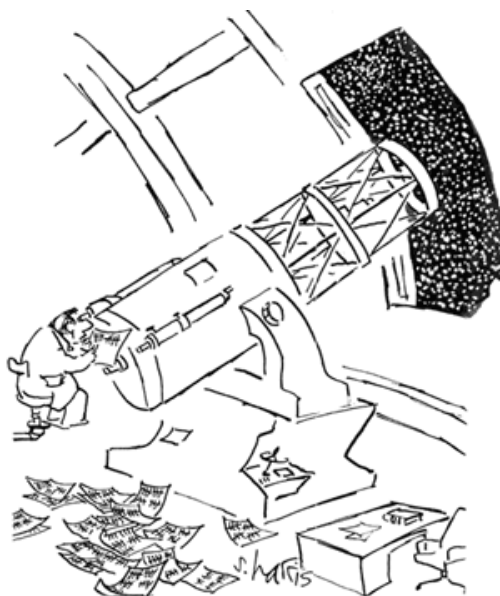
Obrázek 5.1: Hvězdné nebe. Zdroj: <http://mgpc3.as.arizona.edu/images>.

### 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  $0,075 M_{\odot}$  až stovky hmotností Slunce. Spodní hranice hmotnosti odpovídá hmotnosti 78 planet Jupiter ( $78 M_J$ ) a udává se také jako horní limit hmotnosti tzv. **hnědých trpaslíků**, objektů na pomezí mezi hvězdou a planetou<sup>2</sup>. Horní hranice se ještě na počátku století udávala v rozmezí  $60-80 M_{\odot}$ , ale dnes už jsou známy hvězdné objekty s podstatně 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  $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ . Spočteme 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,

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

<sup>2</sup>Spodní hranice hmotnosti hnědých trpaslíků  $13 M_J$  vymezuje současně svět méně hmotných exoplanet.

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 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!

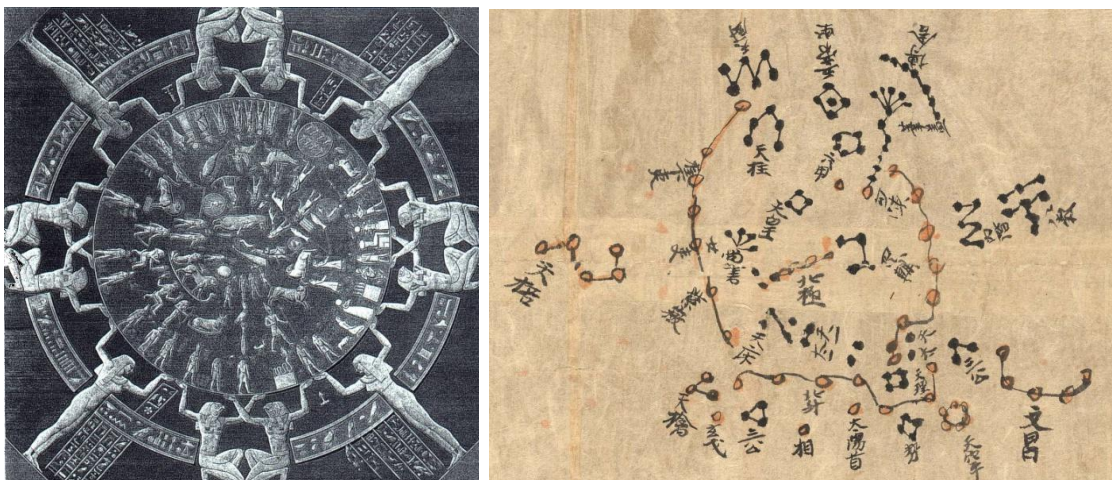
Samozřejmě se situace promění, když si pomůžeme dalekohledem. Malým binokulárním dalekohledem, tzv. triedrem můžeme pozorovat za dobrých podmínek až 200 000 hvězd. Se zvětšujícími se dalekohledy se zvětšuje i počet pozorovatelných hvězd, a to až o několik řádů. Otázkou ale je, proč jsou odhady laiků 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



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>

oblohy se nacházejí jasné hvězdy určitého obrazce a souhvězdí tak převzalo od tohoto uskupení i svůj název. Většina dnešních souhvězdí zejména severní části hvězdného nebe má svůj původ ve starém Řecku. Na jižním hvězdném nebi pak najdeme souhvězdí inspirovaná plavbami mořeplavců v 15. až 17. století. Hranice mezi souhvězdími samozřejmě nelze na nebi pozorovat, ale jsou zakresleny v mapách a atlasech. Hranice souhvězdí jsou tak obdobou hranic mezi státy.



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.

### 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>3</sup> tabulek v roce 1603 Johann Bayer. Známý je i atlas, který na sklonku téhož století v roce 1693 publikoval Johann Hevelius. V podstatě uzavřel období hvězdných map a atlasů konstruovaných na základě pozorování prostým okem. Pro přípravu dalších map, atlasů se už využívaly dalekohledy a posléze nejrůznější záznamová zařízení (fotografie, elektronické čipy). S nástupem techniky přišla snaha 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). Ukázky tištěných atlasů jsou uvedeny na obrázku 5.6.

V dnešní době je ale, zdá se, těmto atlasům odzvoněno. Uživatelé většinou používají digitální atlasy a mapy jako například *Cartes du Ciel* nebo populární *Stellarium*. V této kategorii lze najít i řadu online atlasů od těch určených široké veřejnosti až po atlasy využívané pro výzkum profesionálními astronomy. 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>3</sup>Rudolfské tabulky obsahovaly Keplerův katalog hvězd z roku 1627, připravený s využitím některých pozorovacích dat Tycho Braheho. Tabulky nesou jméno císaře Rudolfa II.

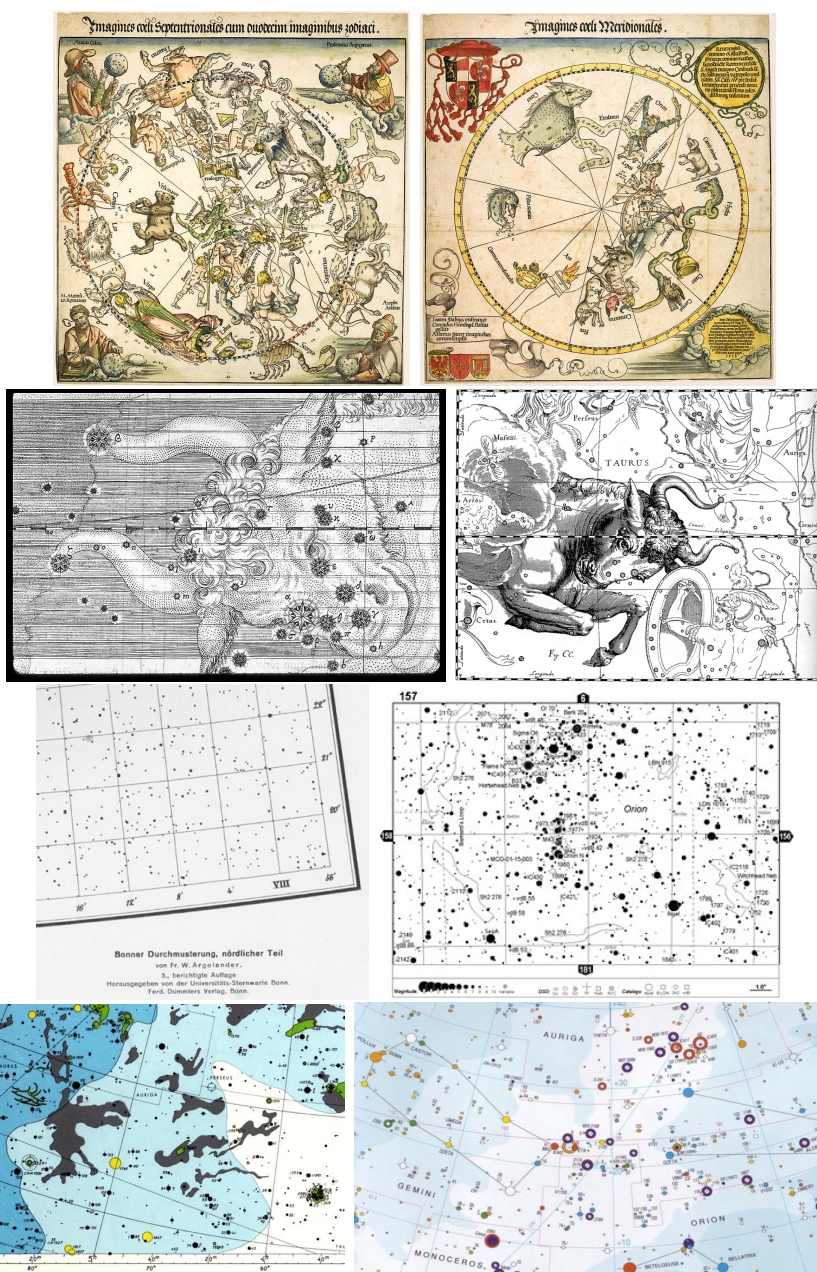
Tabulka 5.1: Seznam souhvězdí. Každé souhvězdí má i své mezinárodní (latinské) jméno a třípísmennou zkratku, které se používají v publikacích. Jejich znalost je nezbytnou výbavou každého astronoma.

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	Aquillae	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 Berenices	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	Honičí 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	Malíř	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	Štřelec	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

---



Obrázek 5.6: Ukázky hvězdných map a atlasů. Nahoře: Severní a jižní hvězdná obloha Albrechta Dürera z r. 1515 (Ridpath, 1988). Níže zleva: Bayerův atlas Uranometria (1603) (Linda Hall Library of Science), 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 *seirios*, 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>4</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>5</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), TESS Input Catalogue (TIC), GAIA a jiné. Některé katalogy jsou spojené s velkými přehlídkovými 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>4</sup>Pěkný přehled o moderním názvosloví hvězd a jeho původu lze najít v Kunitzsch & Smart (2006).

<sup>5</sup>Jak vidíte, je znalost řecké abecedy pro astronoma nezbytná. Najdete ji v příloze E.



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, 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	[HFE83] 1132	TYC 4185-1512-1
AG+64 737	GSC 04185-01512	PPM 19536	2MASS J15395049+6439423
AGKR 14008	HIC 76709	SAO 16806	AAVSO 1538+64
AN 4.1922	HIP 76709	SKY# 28335	Gaia DR1 1641316495126440832
BD+65 1069	IRAS 15391+6449	TIC 202300346	Gaia DR2 1641316499421966848

### 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 tyto hvězdy nemusí být ve stejné vzdálenosti od Země, protože nejsou umístěny na nebeské sféře. Ne všechny pozorované dvojice jsou skutečnými gravitačně vázanými hvězdnými páry. Některé dvojice vznikly prostou projekcí. Jejich složky spolu souvisí jen tím, že se nalézají takřka ve stejném směru od nás. Takovým hvězdným dvojicím říkáme **optické dvojhvězdy**. Gravitačně vázané dvojice hvězd obíhající kolem společného označujeme jako **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 ze souhvězdí Velké medvědice. Mizar se slabším společníkem Alcorem najdeme v oji Velkého vozu. Od nepaměti se tato dvojice používala pro testování kvality zraku. Vidíte-

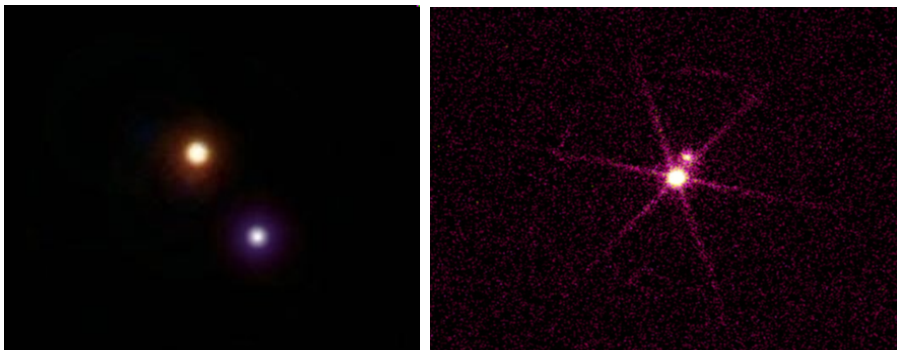
Tabulka 5.2: Vybrané dvojhvězdy pro pozorování.

Označení	Jméno	Typ	Barvy	Hv. velikosti[mag]	Úhlová vzdálenost	Rozlišení
$\zeta$ UMa + + 80 UMa	Mizar a Alcor	viz	obě bílé	2,4+4,0	11,8'	O
$\zeta$ UMa	Mizar	viz	obě bílé	2,4+4,0	14,4''	D
$\alpha$ Cap	Algiedi	opt	obě žluté	4,2+3,6	6,4'	O
$\varepsilon$ Lyr	"Double double"	viz	všechny bílé	(4,7+6,2)+ +(5,1+5,5)	(2,6'')-3,5'- -(2,3'')	O
$\beta$ Cyg	Albireo	opt	oranžová a modrá	3,1+5,1	34,3''	T
$\alpha$ Cen	Toliman	viz	obě bílé	-0,01+1,34	2'' až 22''	D*
$\alpha$ CVn	Cor Caroli	viz	obě bílé	2,9+5,6	19,3''	D
$\vartheta$ Ori	Trapez	viz	všechny bílé	5,4+6,8+ +8,0+6,3	19'' až 9''	D
$\gamma$ And	Alamak	viz	oranžová a modrozelená	2,13+4,84	9,6''	D
$\gamma$ Ari	Mesarthim	viz	obě bílé	4,58+4,64	7,61''	D
$\gamma$ Leo	Algieba	viz	oranž. a žlutá	2,28+3,51	4,24''	D
$\alpha$ Cru	Acrux	viz	obě bílé	1,58+2,09	4,7''	D*
74 UMa+ + 75 UMa	M40	opt	obě bílé	5,4+6,1	20'	D

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

\* - na jižní hvězdné obloze.

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 „posvítí“, 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.



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

### 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 dva milióny proměnných hvězd a hvězd podezřelých z proměnnosti, které jsou uvedeny v katalogu VSX (Watson et al., 2016)<sup>6</sup>. Katalog proměnných hvězd s definitivním označením (viz kapitola 5.1.2) nazvaný *Generální katalog proměnných hvězd* (GCVS) jich ale obsahuje jen zlomek, něco málo přes padesát tisíc (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.

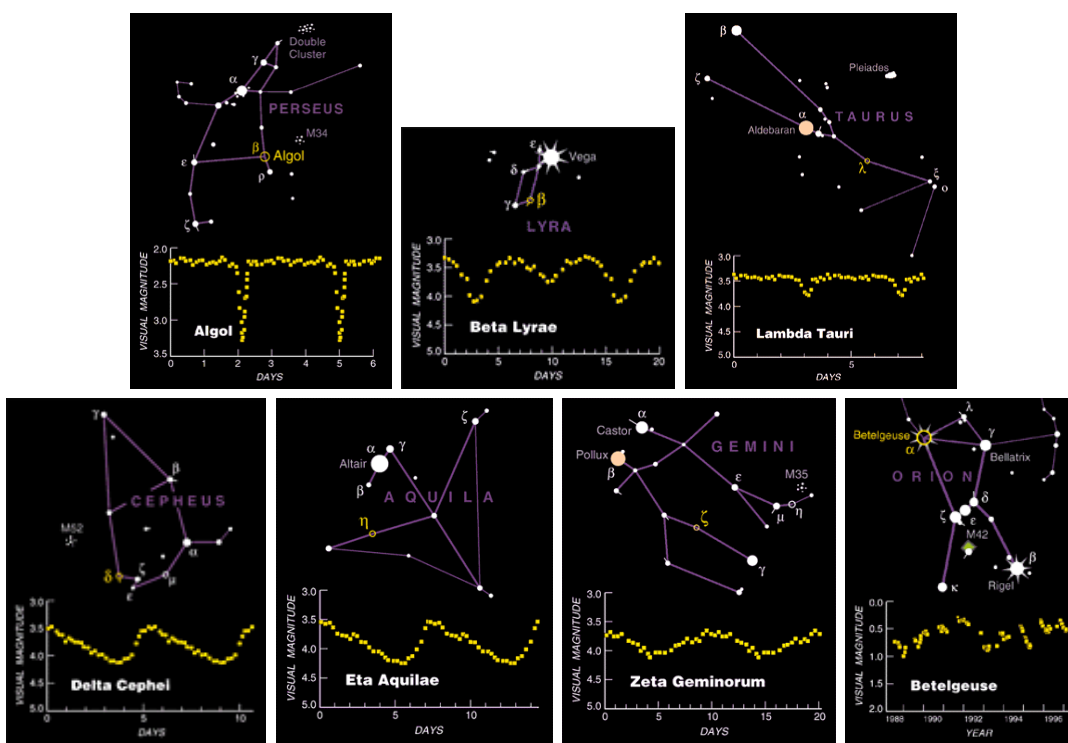
Ke geometrickým proměnným objektům můžeme počítat i takové, kde jsou změny jasnosti způsobené (mikro)čočkováním. Při něm se mezi námi a pozorovaným vzdáleným objektem nachází jiný objekt, který svým gravitačním polem zakřivuje paprsky od zdroje podobně jako spojná čočka. Gravitační čočkou mohou být různé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

<sup>6</sup>Aktuální katalog proměnných hvězd lze najít na <https://www.aavso.org/vsx/>.

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 dnes již klasických proměnných hvězd můžeme pozorovat na noční obloze i pouhými očima bez dalekohledu. Jsou to například zákrytové dvojhvězdy  $\beta$  Per (Algol) a  $\beta$  Lyr (Sheliak) nebo pulsující proměnné hvězdy  $\alpha$  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>7</sup> v roce 1654. Obsahoval 40 položek. Minimálně 19 z nich byly reálné a prokazatelně mlhovinné objekty,

<sup>7</sup>Někde též Giovan Battista Odierna.



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

které 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>8</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. Katalogy byly několikrát revidovány, např. Revised NGC/IC

<sup>8</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
	Gem		5,0	25'	T	
M36		Aur	6,0	10'	D	
M37		Aur	5,6	14'	D	
M38		Aur	6,4	20'	D	
M41			CMi	4,5	40'	T

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

(Steinicke 2021) udává 13 957 objektů<sup>9</sup>

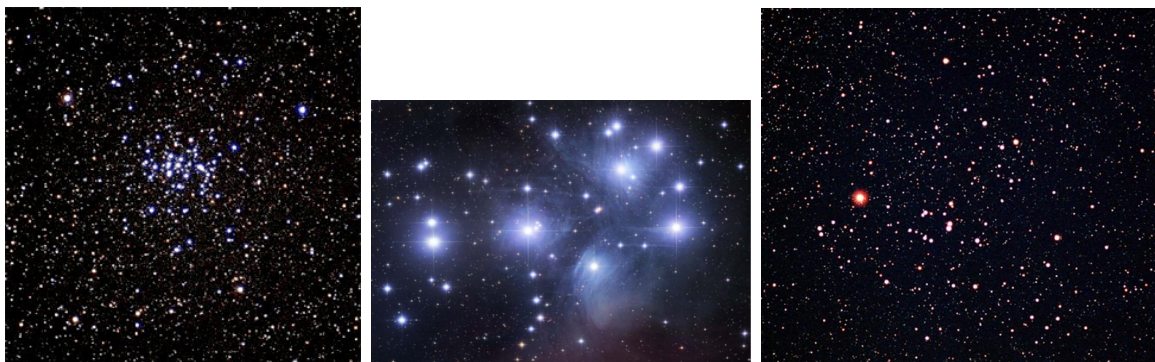
### 5.2.1 Hvězdokupy

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.

K nejstarším vyobrazením otevřené hvězdokupy můžeme řadit malbu v jeskyni Lascaux (obr. 5.3), případně známý disk z Nebry (obrázek 1.4) z 16.–17. století př.n.l. z 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

<sup>9</sup>Více na [http://www.klima-luft.de/steinicke/index\\_e.htm](http://www.klima-luft.de/steinicke/index_e.htm).



Obrázek 5.10: Otevřené hvězdokupy. Zleva Jesličky (M44), Plejády (M45) a Hyády.

zamířil dalekohled na některé mlhavé skvrny zmiňované Ptolemaiem a zjistil, že jsou to ve skutečnosti skupinky hvězd. U známých hvězdokup pak zvýšil počet jejich pozorovaných členů, například místo 6-7 jich v Plejádách našel 50 (Maran & Marschall, 2009). Pravděpodobně prvním objevitelem nových otevřených hvězdokup dalekohledem ale byl sicilský astronom Giovanni Battista Hodierna, který inspirován Galileem objevil roku 1654 objekty dnes označené M41, M47, NGC 2362 a NGC 2451 (Jones, 1986).

V současnosti známe v naší Galaxii zhruba 2 100 otevřených hvězdokup. Jejich přehled lze najít v katalogu DAML02 (Dias et al., 2002, 2012). Jsou to vesměs nestabilní útvary, které se postupně rozpadají. Jejich stáří se pohybuje průměrně v řádech desítek milionů 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

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.

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, roku 1714 hvězdokupu 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. (Vasiliev & Baumgardt, 2021) udávají na základě výsledků družice GAIA 170 kulových hvězdokup.

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 zmiňovaná M13 v souhvězdí Herkula nebo na jižní hvězdné obloze  $\omega$  Centauri. Další lze najít v tabulce 5.4.

### 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 se, že jde o rozsáhlé prostorové útvary – mlhoviny, tvořené mezihvězdným plynem a prachem. Jejich hustota je v pozemských měřítkách opravdu nicotná. Dala by se poměřovat snad jen s hustotou vakua dosaženého v nejlepších pozemských laboratořích<sup>10</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 pro-

<sup>10</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>.

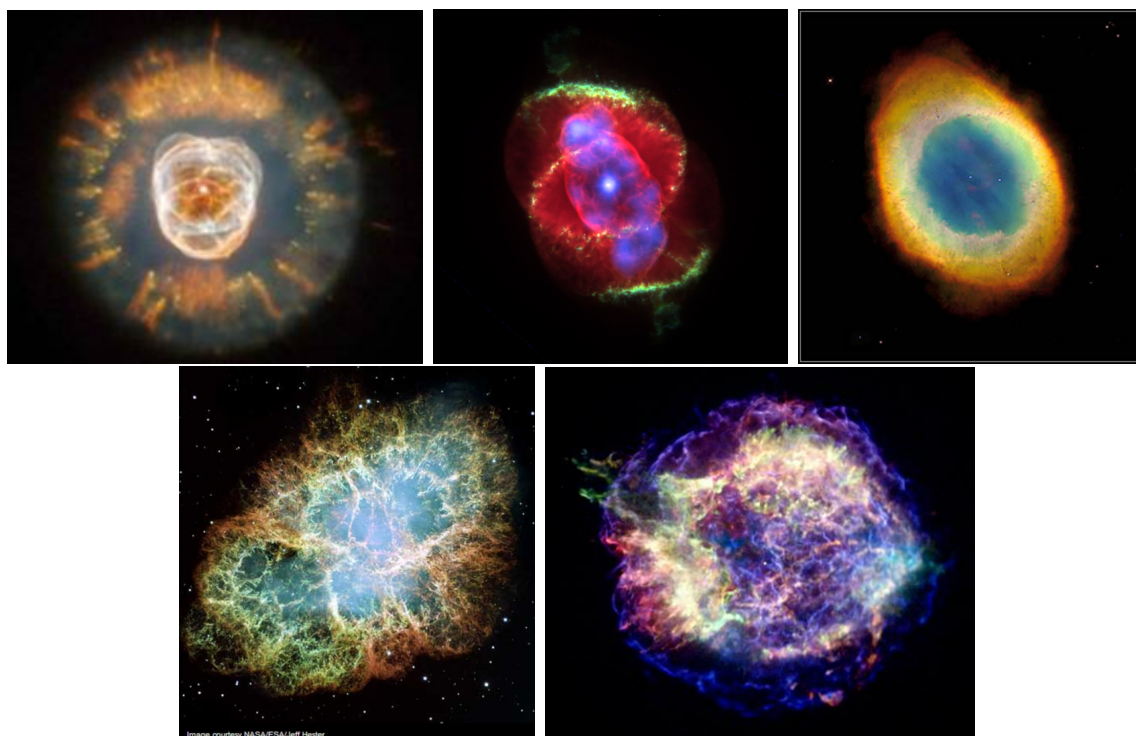


cházející světlo, a tak jsou všechny objekty, nacházející se za ní, výrazně utlumeny. Zeslabování světla, neboli v tomto případě **mezihvězdná extinkce** je samozřejmě největší ve směru do centra naší hvězdné soustavy, naší Galaxie. Tam jde ve vizuálním oboru o více než 30 magnitud!



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.

Kdo první pozoroval na obloze nějakou mlhovinu už zřejmě nikdy nezjistíme. Je-



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.

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 - pouhýmá očima, T - v triedru, D - v dalekohledu, N - z České republiky nepozorovatelná.

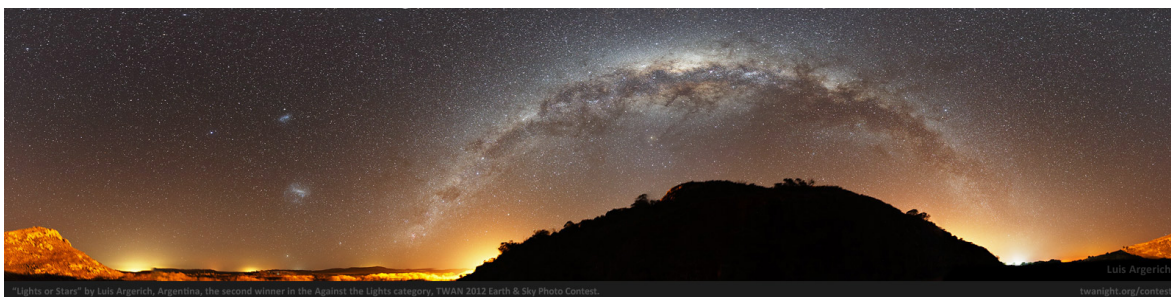
den z nejstarších záznamů o pozorování pěti „mlhavých hvězd“ lze najít v Ptolemaiově Almagestu z období kolem roku 150 n.l. Zmiňuje se také o mlhavém útvaru mezi Velkou medvědicí a Lvem, který nebyl spojen s nějakou hvězdou. Abd al-Rahman al-Sufi v 10. století popsal své pozorování „mlhoviny“ v Andromedě 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 téže mlhoviny pak uskutečnil až roku 1659 Christian Huygens<sup>11</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 Košská hlava v Orionu (obrázek 5.12 uprostřed) 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 vpravo).

Podrobněji se budeme mlhovinám věnovat později, ale je dobré si již nyní uvědomit, že současný mezihvězdný materiál ve vesmíru je tvořen pozůstatky předchozích gene-

<sup>11</sup>Huygens se také domníval, že právě on objevil mlhovinnou povahu tohoto objektu.

rací 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>12</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 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: Okouzující 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

<sup>12</sup>V anglické literatuře se tento typ objektů označuje SNR – supernova remnants.

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>13</sup>. Prvním, kdo rozlišil Mléčnou 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 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>14</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 (viz tabulka 5.6).

<sup>13</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“.

<sup>14</sup>V češtině se používá i označený Malý a Velký Magellanův oblak. V angličtině Small and Large Magellanic Clouds, ve zkratkách SMC a LMC.

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 galaxie	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	Kočíčí oko	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)	Scl	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.

## 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 7.5.1.

### 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>15</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°. Nejmenší (rovna jedné) je samozřejmě v zenitu. Pozorovanou hvězdnou velikost hvězdy lze opravit o vliv extinkce podle vztahu

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

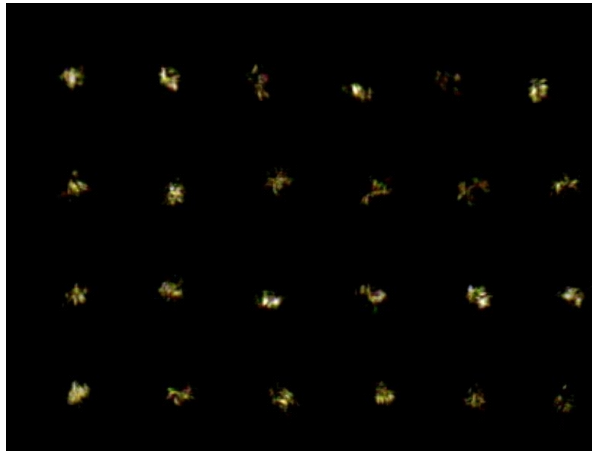
<sup>15</sup>Tam, kde je zcela zřejmé, že jde o zeslabení světla působené zemskou atmosférou, se přívlastek „atmosférická“ vynechává. Obecně je ale nezbytný, abychom tuto extinkci odlišili od té mezihvězdné.

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

### 5.4.2 Seeing

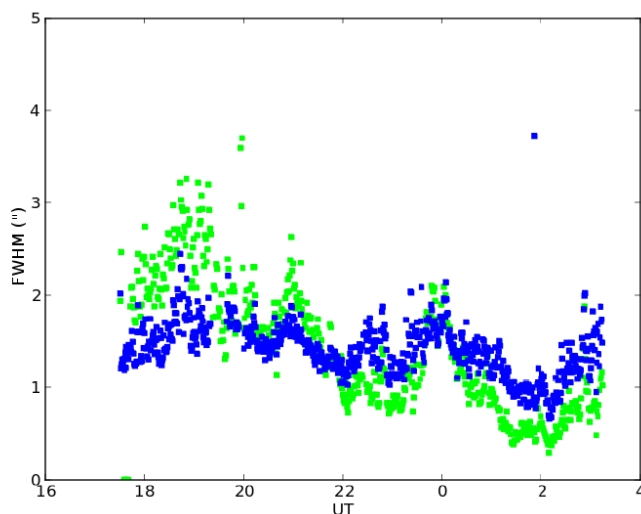
Astronomická pozorování na zemském povrchu bezprostředně ovlivňují nejrůznější meteorologické jevy. Nicméně, i když bude jasná obloha bez mraků, stále budeme hvězdy pozorovat přes neklidnou atmosféru, v níž se mísí vrstvy různých teplot a tedy i různých indexů lomu. Projevem tohoto neklidu je i poblikávání 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>16</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.



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/>.

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.

<sup>16</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.



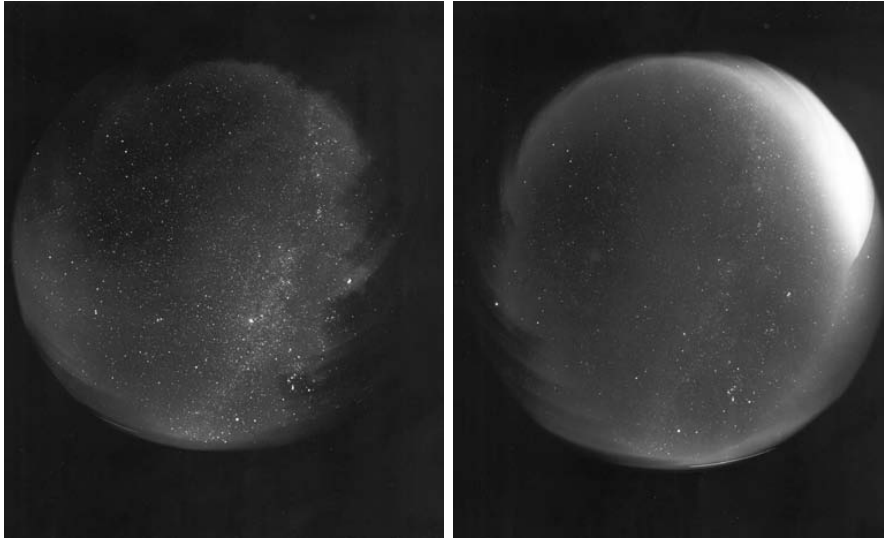
Obrázek 5.17: Změna vlastností atmosféry nad pozorovacím stanovištěm může působit i poměrně rychlé změny v seeingu. Na obrázku je průběh seeingu během noci 9./10. března 2012 na observatoři SAAO v Sutherlandu v Jižní Africe. Barevně jsou odlišeny různé metody měření.

### 5.4.3 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 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>17</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.

<sup>17</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 nevidíte zapadat, ale mizet i 20° nad rovinatým obzorem.



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?“.



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/znecistení> nebo <http://www.darksky.org/>). Bohužel, nové „ekonomické“ zdroje světla a jejich dostupnost celou situaci ve světelném znečištění rychlým tempem zhoršují.

## 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, The Cambridge Guide to the Constellations, Cambridge University Press; New York, NY, USA
- 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, Délimitation 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.
- Galilei G., 1610, Sidereus nuncius. doi:10.3931/e-rara-695
- 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. Prahy a ETC publishing, s. r. o., Praha
- Jones, K. G. 1986, *Journal for the History of Astronomy*, 17, 187
- Karkoschka, E. 2007, "Karkoschkův astronomický atlas hvězdné oblohy", Computer Press, Brno, 160 str.
- Kondziolka, J. 2008, "Světelné znečištění. Co to je?" Leták ČAS, Praha
- Kleczek, J. 2000, "Naše souhvězdí", Albatros, Praha, 411 str.
- Kleczek, J. 2002, *Velká encyklopedie vesmíru*, Academia Praha, 582 str.
- Kleczek, J. 2007, "Naše souhvězdí", Albatros, Praha, CD-ROM
- Kunitzsch, P., & Smart, T. 2006, Wiesbaden: Harrassowitz, 2. vydání
- Messier, Ch. 1781, *Connaissance 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
- Vasiliev E., Baumgardt H., 2021, *MNRAS*, 505, 5978. doi:10.1093/mnras/stab1475
- 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 nad Prahou. Zdroj: <https://www.world-today-news.com/>.

### 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 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

<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)	„typická“ hvězda
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).

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 zastřít pravý stav věcí. Při posuzování nejrůznějších astronomických jevů ve vesmíru je tedy třeba mít se na pozoru.

Vraťme se ke Slunci. Naše hvězda je podle hmotnosti jednotlivých prvků složena zhruba ze 73 % z vodíku a z 25 % z hélia. Zbytek připadá na těžší prvky. Povrchová teplota činí přibližně 5770 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, celosvětová produkce energie na Zemi za celý rok 2018 byla  $1,42 \cdot 10^{21} \text{ J}$  (IEA, 2019)<sup>2,3</sup>, takže pozemská produkce energie za 1 sekundu je o 13 řádů menší než produkce energie na Slunci!

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>4</sup>. Při pozorování Slunce je však nutné dodržovat striktní bezpečnostní pravidla. I letmý pohled přímo na Slunce pouhýma očima bez dalekohledu během dne je při jasné obloze velmi nepříjemný. Je třeba oči chránit. A zejména

<sup>2</sup>Aktuální data zveřejňuje International Energy Agency (IEA) každoročně jako Key World Energy Statistics na webu <https://www.iea.org/>.

<sup>3</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>4</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.

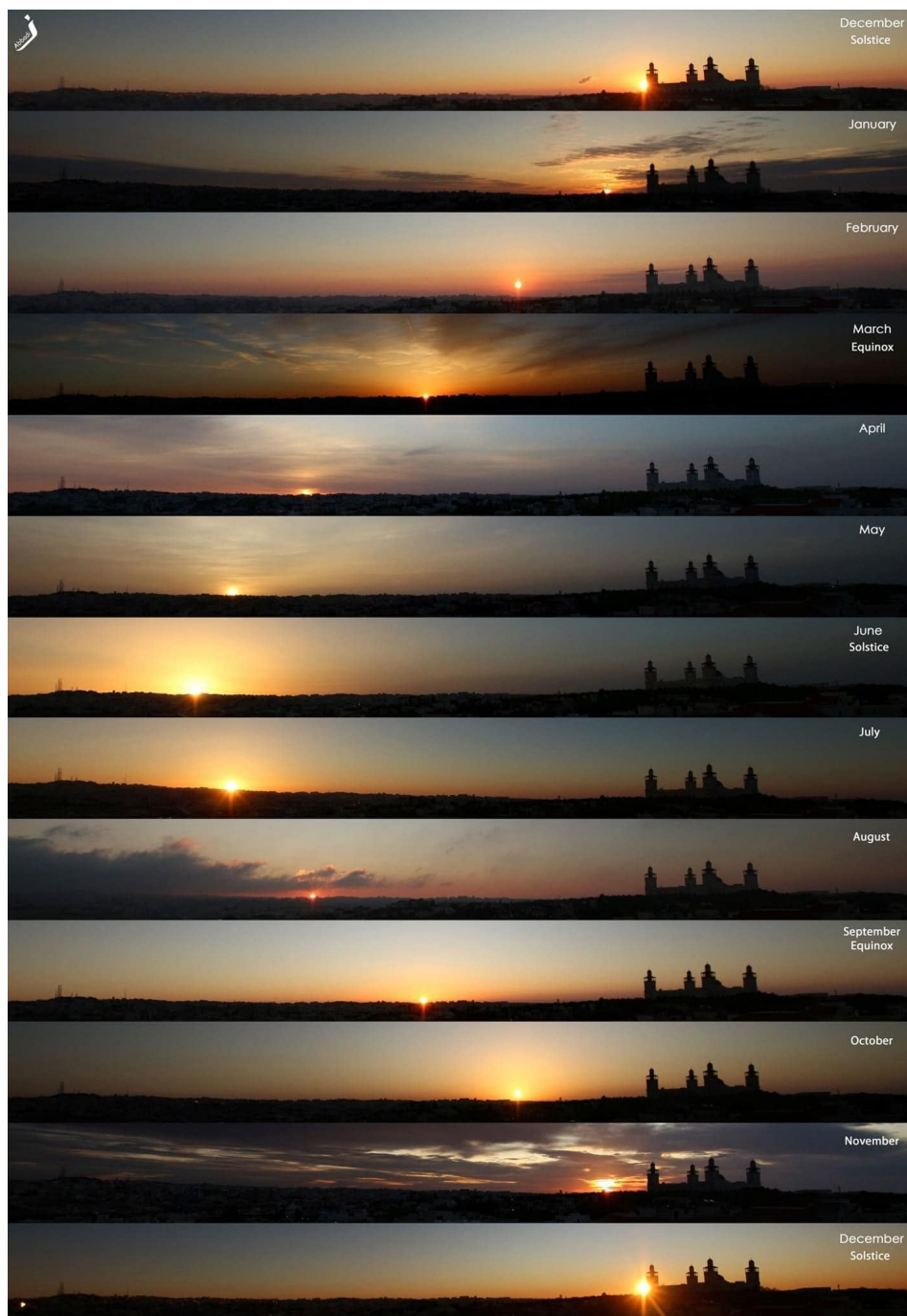
je třeba dávat pozor při pozorování Slunce dalekohledem. Bez řádného slunečního filtru by při přímém pozorování dalekohledem mohlo dojít k vážnému poškození zraku! Rozhodně nedejte na radu jisté léčitelky, která doporučuje civět do Slunce co nejdéle, abyste údajně prostřednictvím fotonů pronikajících 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 pohybu 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

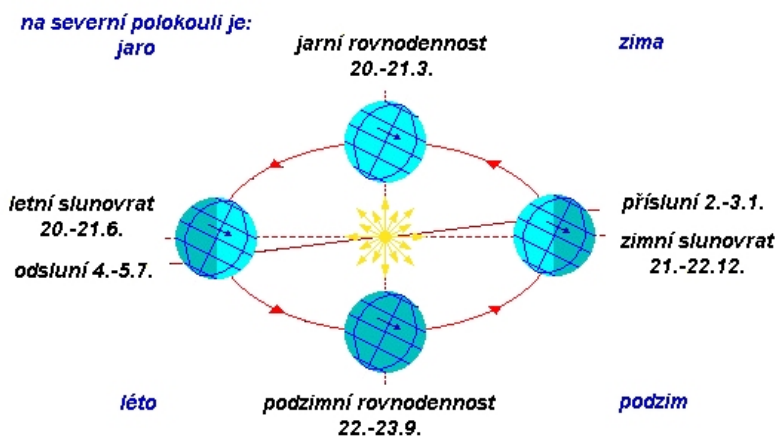


Obrázek 6.2: Východy Slunce v Ammánu (Jordánsko) v průběhu roku 2019; <https://apod.nasa.gov/apod/ap201221.html>. Foto: Zaid M. Al-Abbadi.

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 bod východu i bod západu Slunce příliš 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.

Samozřejmě to vše, co jsme popsali, platí pro Českou republiku, pro území na 50. stupni severní zeměpisné šířky. Pokud se vydáme na daleké cesty severním nebo jižním směrem, pak se výše uvedené okolnosti změní. Při cestě jižním směrem až na rovník si především povšimneme, že přechod mezi dnem a nocí je mimořádně rychlý. Slunce se pohybuje po obloze téměř kolmo k obzoru, takže soumrakové jevy prakticky chybí. Překročíme-li rovník, ocitneme se ve zvláštním světě. Některé věci jsou tam obráceně. Nejen to, že se třeba v Jižní Africe, Austrálii nebo na Novém Zélandu jezdí vlevo. Ale během dne se tam za Sluncem otáčíme směrem doleva, zatímco u nás doma směrem doprava. Slunce je tam v poledne severním směrem a nejlepší svahy vinic jsou orientovány na slunný sever. Ještě dále na jih, na Antarktidě za 60. stupněm jižní zeměpisné šířky, Slunce neklesne hlouběji pod vodorovnou rovinu než  $6^\circ$  až  $10^\circ$ . Totéž platí i pro oblasti Arktidy za 60. stupněm severní zeměpisné šířky. V těchto oblastech dochází ke splýnutí 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.



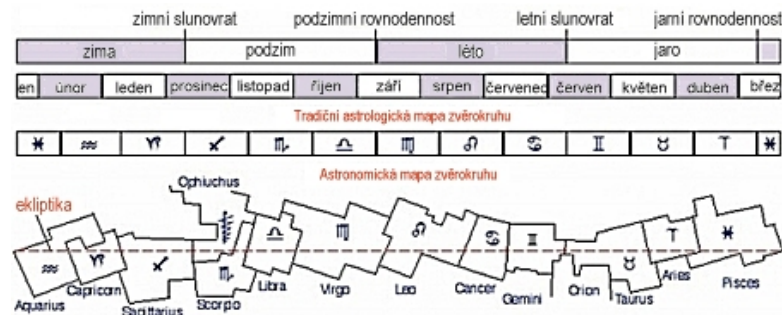
Obrázek 6.3: Střídání ročních období. Původní zdroj: <http://www.observatory.cz/>.

### 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>5</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 astronomická souhvězdí s astrologickými znameními. O 30°, 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.

<sup>5</sup>Podrobněji jsme se této problematice věnovali v kapitole 4.3.1.



## 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 stříbrném 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, který žije v korálových útesech teplého pásma Tichého oceánu.<sup>6</sup>

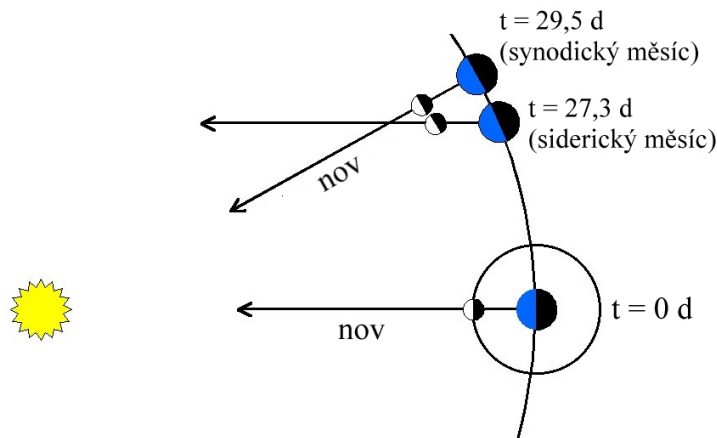
Někteří lidé, ale vliv Měsíce přeceňují. Píší o vlivu Měsíce na počasí, růst hub nebo rostlin. Kam až může lidská hloupost zajít ale ukazuje kniha, kterou v roce 1996 v Německu vydali Johanna Paunggerová a Thomas Poppe. Stala se jedním z bestsellerů a vyšla již ve 20 jazycích, mimo jiné i česky pod názvem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

- „Obnažte svá ňadra 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.“

<sup>6</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.

### 6.2.1 Siderický a synodický měsíc

Při stanovení délky jedné otočky Země kolem její osy, délky jednoho dne, je nutné uvést v jaké vztažné soustavě se vlastně pohybujeme, tedy vůči čemu to otáčení měříme. A stejné je to i s oběhem Měsíce kolem Země 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  $13^\circ$  za den, tedy více než půl stupně za hodinu. Ale  $0,5^\circ$  je úhlový rozměr Měsíce, takže Měsíc se zhruba za hodinu posune o svůj úhlový průměr. Je-li poblíž Měsíce na obloze nějaká jasnější hvězda nebo více hvězd, určitě si jeho 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 6.6: Synodický a siderický měsíc. Zdroj: <http://www.astronomy.ohio-state.edu/>.

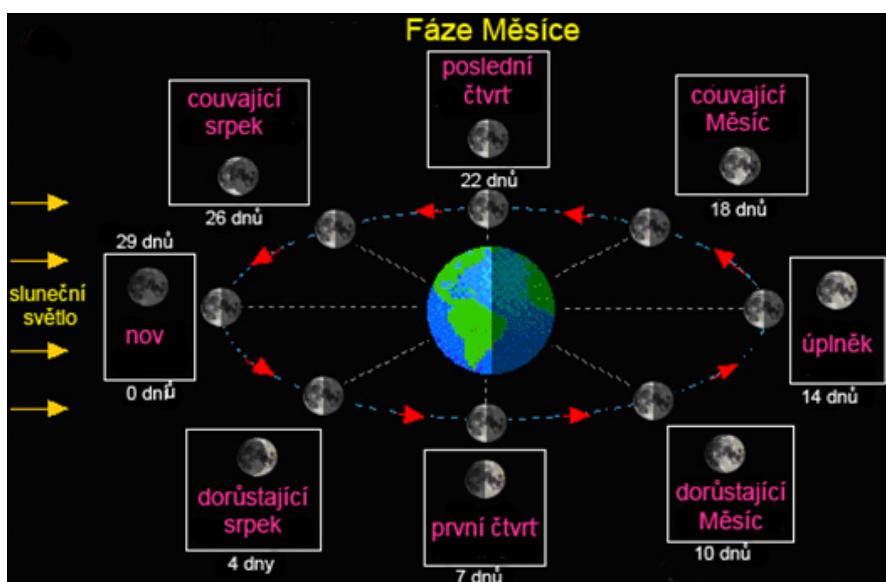
Jenže délka kalendářního měsíce je spíše 30 nebo 31 dní a doba mezi dvěma po sobě následujícími úplňky je 29 a půl dne. Takže siderický měsíc je z tohoto pohledu krátký. Už v úvodu jsme ale upozorňovali na nutnost správné volby vztažné soustavy. Zatímco siderický měsíc je dán oběhem Měsíce vůči hvězdám, 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 6.6).

### 6.2.2 Fáze Měsíce

Jeden z nejznámějších 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 6.7. 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 6.7: Vznik fází Měsíce. Zdroj: <http://leccos.com>.

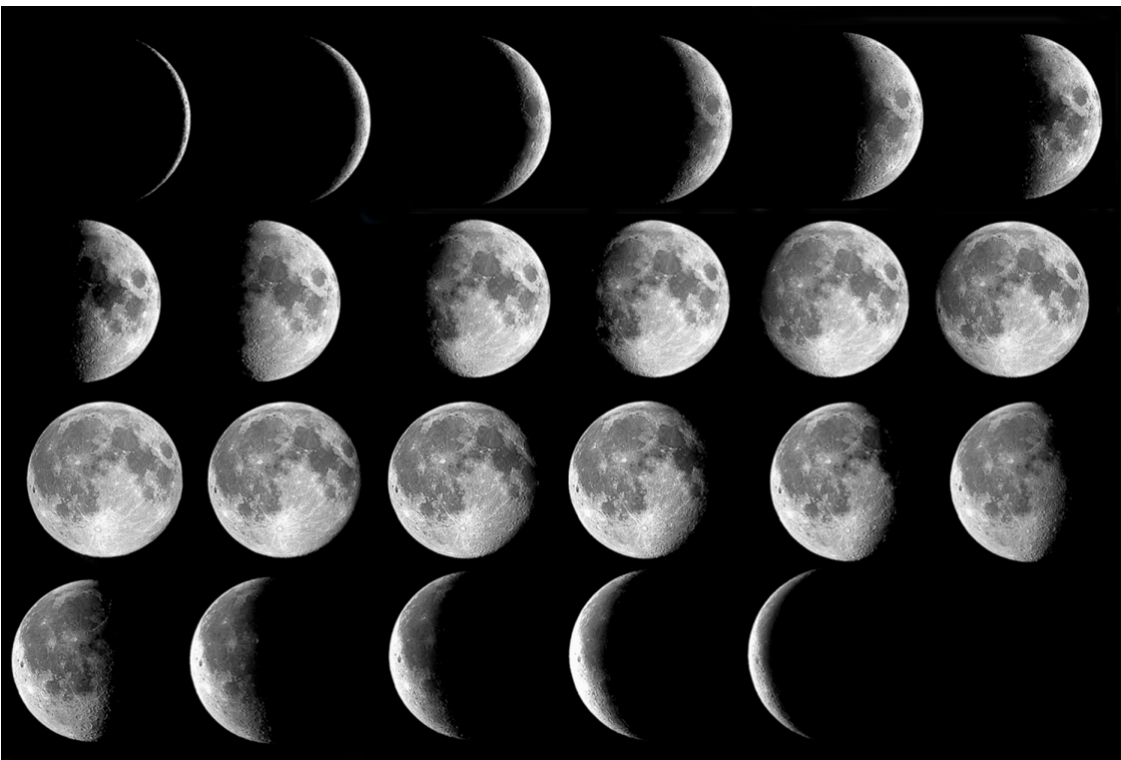
Vzhledem k tomu, že jsou fáze Měsíce úzce spojeny se vzájemnou polohou Slunce,

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

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.

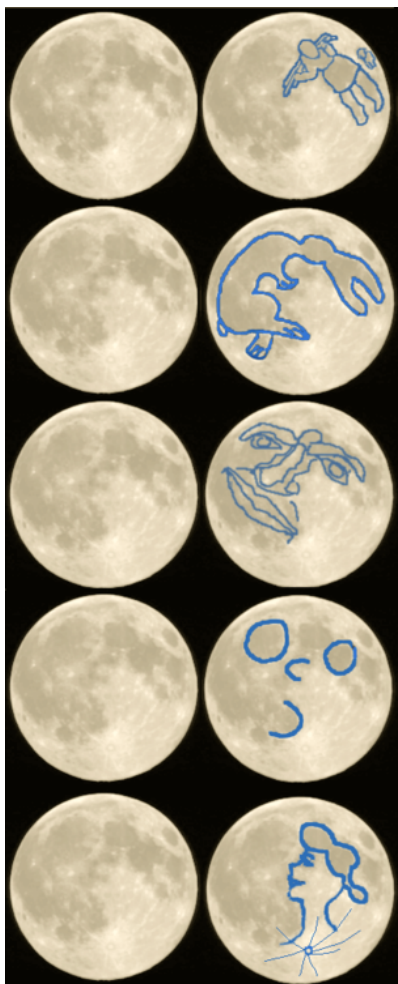
Tak například, pokud je Měsíc v úplňku, znamená to, že je na opačné straně od Země než Slunce. Na obloze je tedy Měsíc o  $180^\circ$  posunutý oproti Slunci. Ve chvíli, kdy Slunce zapadá, Měsíc vychází a bude nad obzorem po celou noc. Po úplňku Měsíc ubývá, říká se také, že couvá, má tvar písmene *C*. 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 6.8: Fáze Měsíce. Foto: A. Cidadao.

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>7</sup>

### 6.2.3 Měsíční tvář



Obrázek 6.9: Tvář Měsíce podle různých představ. Zdroj: <http://www.catherinesvehla.com>.

Člověk sleduje Měsíc od nepaměti. Dalo by se s nadsázkou říci, že jde o nejokoukanější kosmické těleso. Už v dávných dobách si lidé na Měsíc „promítali“ nejrůznější motivy, různé postavy nebo zvířata. Zapojíte-li fantazii jistě tam podobné obrazy uvidíte i vy (viz obrázek 6.9). Nám však nyní půjde o víc. Budeme chtít popsat pozorovaný povrch Měsíce a také vysvětlit, proč nám vlastně Měsíc nastavuje stále stejnou tvář.

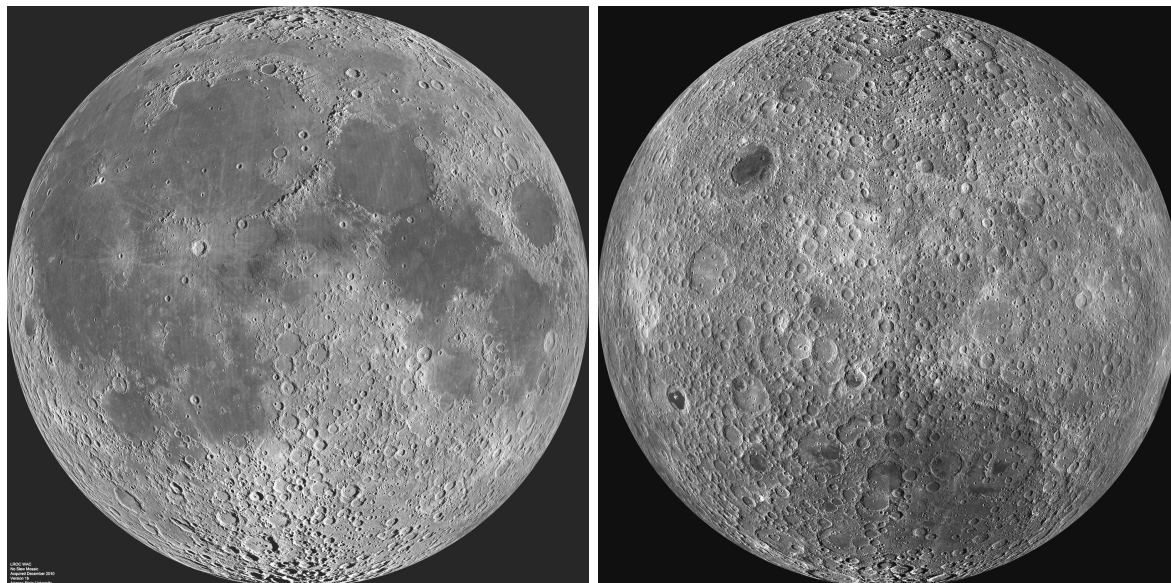
Ze Země skutečně pozorujeme stále stejnou část měsíčního povrchu a tak první snímky odvrácené strany Měsíce, které zaslala na Zemi sovětská sonda Luna 3 v roce 1959, způsobily doslova pozdvižení, i když nebyly zrovna nejostřejší. Dnes už je detailně zmapován celý povrch Měsíce. Na první pohled si všimneme výrazného rozdílu mezi (k Zemi) přivrácenou a odvrácenou stranou Měsíce (obrázek 6.10). 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, bažina a podobně, rozhodně se na povrchu Měsíce s vodou v kapalném stavu neseťkáte<sup>8</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 zaznam

menat 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,

<sup>7</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.

<sup>8</sup>Stopy vody v pevném skupenství zaznamenaly indická sonda Chandrayaan-1 a americká sonda LCROSS v roce 2009.



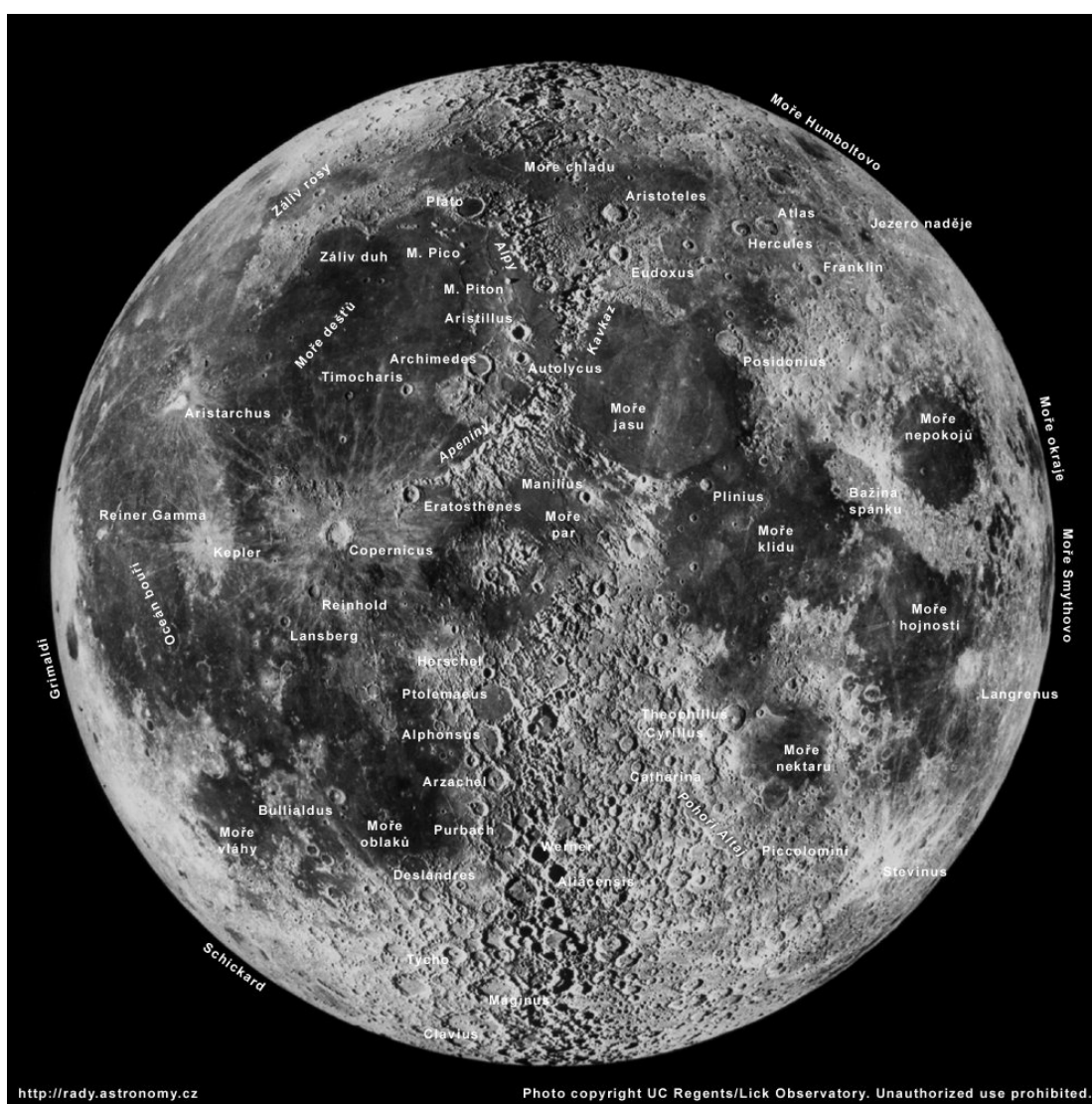
Obrázek 6.10: Přivrácená a odvrácená strana Měsíce ze sondy Lunar Reconnaissance Orbiter. Zdroj: NASA.

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 6.11).

Na východním okraji Měsíce můžeme pozorovat pěkně ohraničené takřka kruhové Moře nepokojů. Jižně od něj Moře plodnosti a ještě více na jih malé Moře nektaru. Na jihozápad až západ od Moře nepokojů leží Moře klidu, na jehož jižním okraji poprvé v 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 jasu. 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>9</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.

<sup>9</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.

Když budete Měsíc pozorovat v průběhu celého cyklu fází, pak při dorůstání Měsíce můžeme doporučit pozorování trojice kráterů Theophilus – Cyrillus – Catharina a dvojice 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 deště je osamělá hora Mt. Pico. Zajímavých zákoutí je samozřejmě mnohem více. Nemůžeme postihnout všechny. Zájemcům doporučujeme navštívit web <http://mesic.astronomie.cz>, interaktivní mapu Měsíce na <https://www.astro.cz/na-obloze/mesic.html#interaktiv> nebo si prostudovat některou z následujících publikací – Sadil (1953); Růkl (1991); Gabzdyl (1997, 2002, 2006).

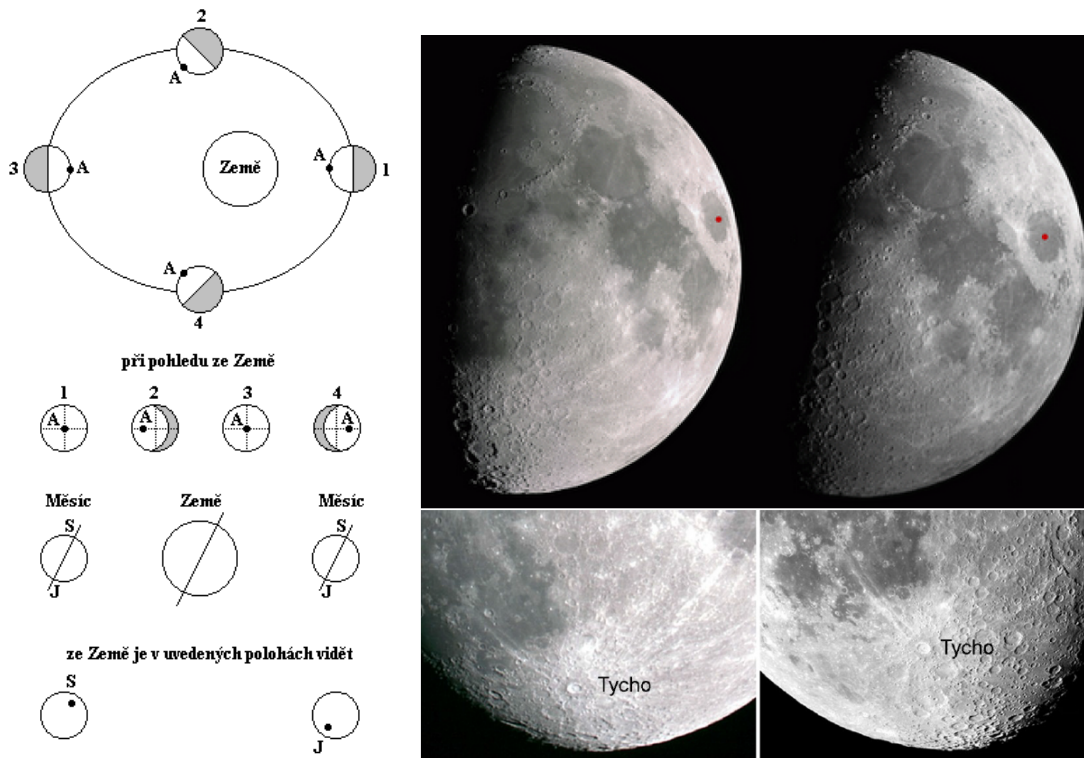


Obrázek 6.11: Mapa přivrácené strany Měsíce. Zdroj: <https://www.astro.cz/>.

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 6.12). 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 6.12: 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).

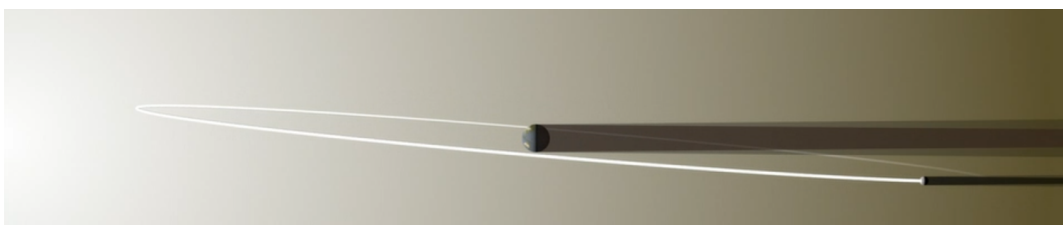


## 6.3 Kosmické divadlo – zatmění

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 6.13). 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 6.14), 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 6.13: Země a Měsíc nasvětlené Sluncem (za levým okrajem obrázku) vrhají do prostoru stíny. Zdroj: NASA.

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>10</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

<sup>10</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>).



Obrázek 6.14: Vznik tří podob zatmění Měsíce. Zdroj: ČAS.

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

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. Jak jsme již uvedli, je rovina oběžné trajektorie Měsíce skloněná 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 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.

Tabulka 6.3: Zatmění Měsíce v letech 2021-2030.

Datum	Typ	Délka [h:mm]	Viditelnost	Max. ČR
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; <b>Ú 1:22</b>	při východu Měsíce	19:12
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; <b>Ú 1:11</b>	téměř celý průběh, večer	17:52
26. června 2029	úplné	Č 3:40; <b>Ú 1:42</b>	při (a po) západu Měsíce	04:22
20. prosince 2029	úplné	Č 3:33; <b>Ú 0:54</b>	celý průběh, před půlnocí	23:42
15. června 2030	částečné	Č 2:24	při východu Měsíce	–
9. prosince 2030	polostínové *	–	celý průběh, před půlnoci	–

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

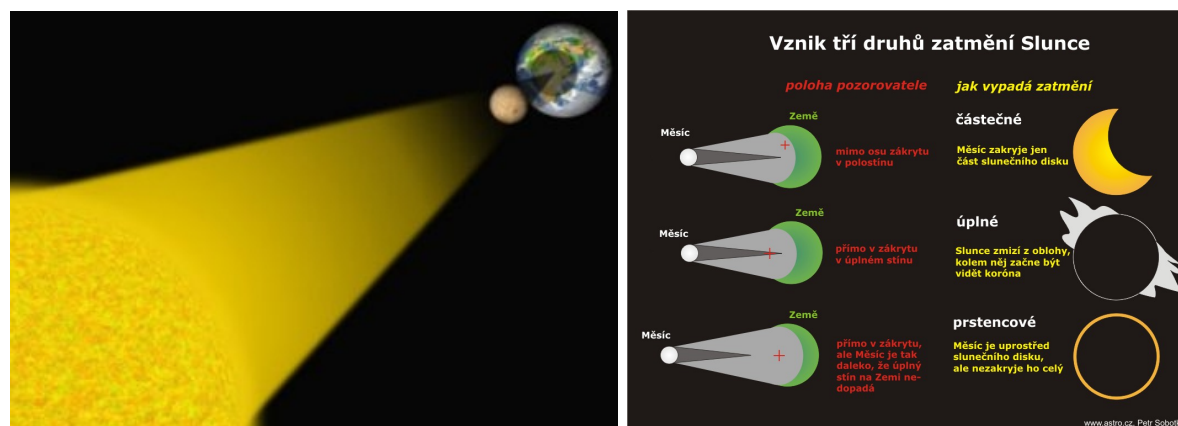
Zatímco zatmění Měsíce by se dalo přirovnat k úspěšnému poměrně často opakovanému představení, zatmění Slunce je vždy hitem sezóny. Můžete si přečíst úžasná líčení zatmění Slunce, jako například to od rakouského spisovatele Adalberta Stiftera<sup>11</sup> (1842), můžete vidět spoustu fotografií, filmů 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>12</sup> S jedním historickým zatměním se pojí i známá legenda. Podle ní měli být v roce 2136 př.n.l.<sup>13</sup> dva astronomové kvůli zatmění Slunce popraveni. Tehdy se věřilo,

<sup>11</sup>Rodný dům Adalberta Stiftera najdete v Horní Plané na Šumavě.

<sup>12</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.

<sup>13</sup>O přesném datování tohoto zatmění se vedou spory. Některé zdroje uvádějí 2134 př.n.l., některé dokonce 2159 př.n.l.



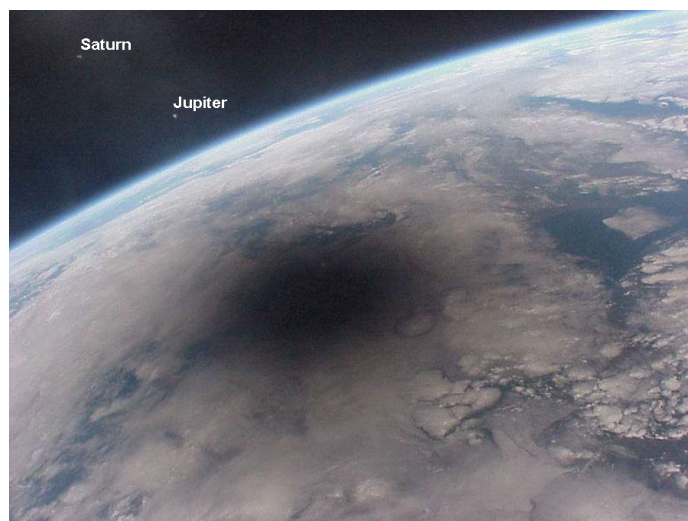
Obrázek 6.16: Schéma vzniku a možné podoby zatmění Slunce. Zdroj: ČAS.

že zatmění způsobuje zlý drak, který žere Slunce. Astronomové měli na zatmění upozorňovat předem, aby bylo možné zlého draka dostatečným hlukem a šípky zahnat. Jenže nešťastní astronomové Ho a Hsi příliš holdovali alkoholu a tak varování před zatměním nevydali.<sup>14</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 6.16). 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 6.17), 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 6.16). 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 6.18). 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.

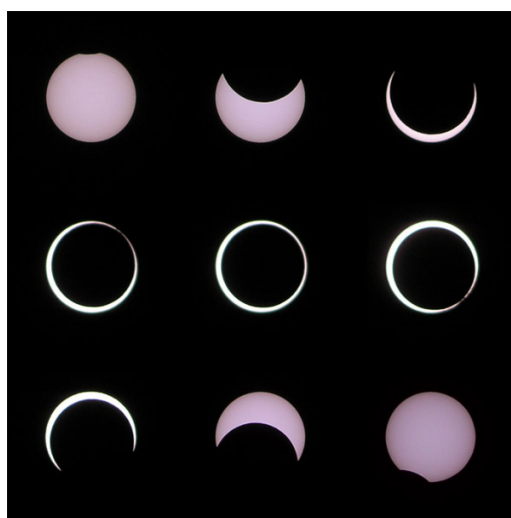
V době úplné fáze úplného zatmění Slunce, trvající až 7 a půl minuty, je sluneční disk zcela zakryt a odstíněn Měsícem a můžeme pozorovat slabou zářící svrchní vrstvu atmosféry Slunce – korónu. Až do poloviny 19. století přitom převládal Keplerův názor, že jde o měsíční atmosféru nasvětlenou Sluncem. Teprve tehdy se však prokázalo, že se kotouč Měsíce pohybuje během zatmění na pozadí této atmosféry. Jedny z nejlepších

<sup>14</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 6.17: 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.

snímků sluneční koróny na světě pořizuje profesor brněnského VUT, matematik a astronom Miloslav Druckmüller (2021), viz například obrázek 6.19.



Obrázek 6.18: 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 staré 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

Tabulka 6.4: Sluneční zatmění v letech 2021-2030.

Datum	Svět				Česká republika		
	Max.	Délka	Typ	Viditelnost	Velikost	Max.	Výška
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).

**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 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 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 6.19: 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.

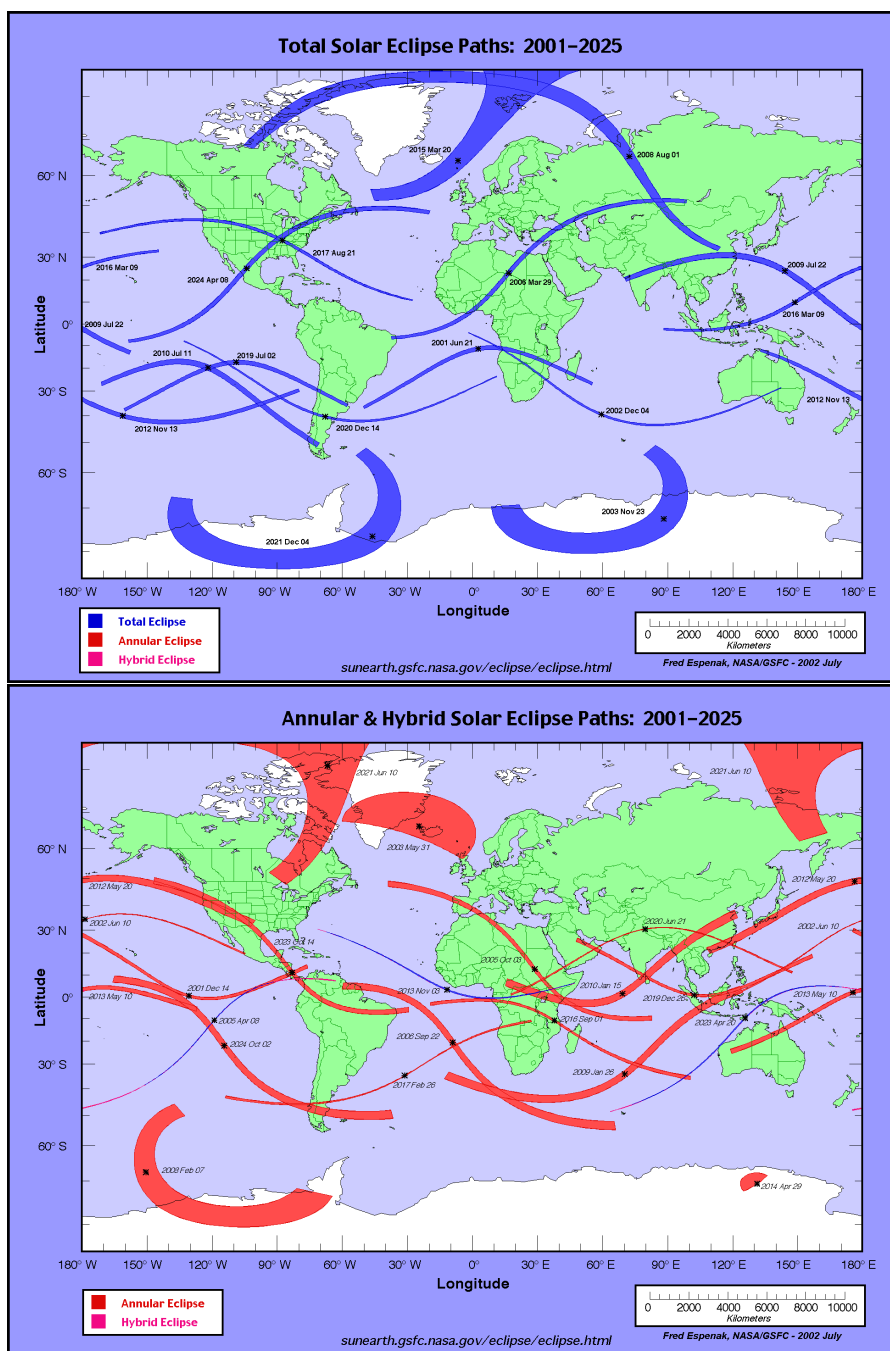
## 6.4 Planety, trpasličí planety

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>15</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>15</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 6.20: 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>16</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>16</sup>Používanou, běžně akceptovanou, ale nepřliř 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 2021) pět objektů: Ceres, Pluto, Makemake, Eris, Haumea. Na čekací listině je několik set objektů, mezi nimi například Orcus, Quaoar, Sedna, Salacia, Gonggong a (307261)2002 MS<sub>4</sub> a v budoucnu nepochybně přibudou další, zejména velká transneptunická tělesa.



Obrázek 6.21: Trpasličí planety a kandidáti.

### 6.4.1 Pozorování planet

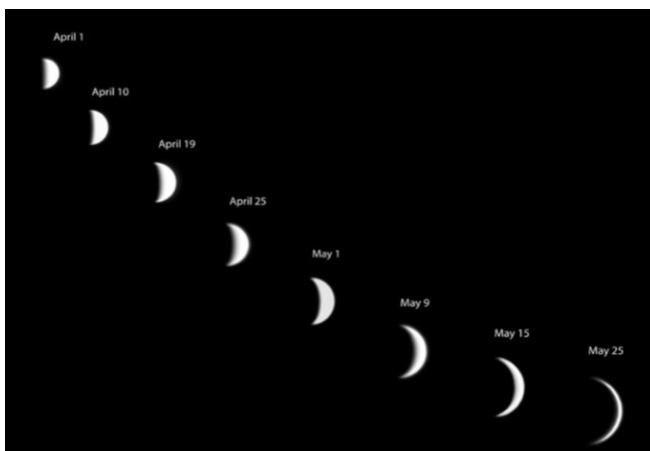
Astronomové z doby před objevením dalekohledu a jeho využitím v astronomii znali 6 planet. Venuše, Jupiter, Saturn i Mars bývají na pozemské obloze poměrně jasné, někdy i nejjasnější jakoby hvězdné objekty. Merkur je pozorovatelný dost obtížně, jen za soumraku, krátce po západu nebo před východem Slunce.<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 prostýma očima jako světelné body podobně jako hvězdy. Jenže hvězdy jsou skutečné bodové zdroje, zatímco planety malé plošky, kotoučky pod rozlišovací schopností oka. A na plošném objektu se změny jasnosti působené neklidem ovzduší průměrují, vyrovnávají. I planeta tedy za silného neklidu atmosféry může jevit scintilaci, ale vždy

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

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 6.22). 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 6.22: Fáze Venuše v dubnu a květnu 2004. Foto: John Rummel.

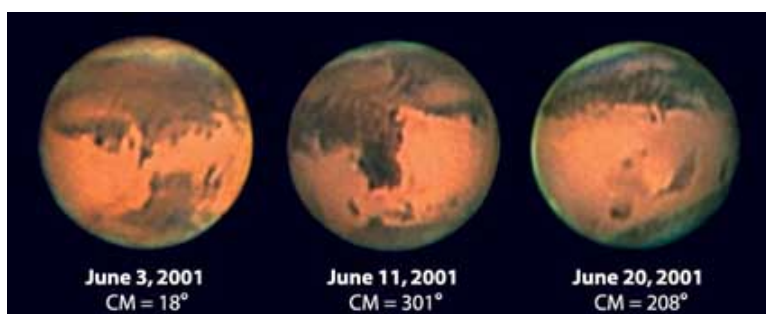
Vnější planety, tedy vzdálenější od Slunce než Země, mohou být pozorovatelné i celou noc. Na Marsu jsou pozorovatelné světlé a tmavé skvrny (obrázek 6.23). Pozorovatelé s připojením na internet mohou využít i jeden z nástrojů na stránkách časopisu Sky&Telescope<sup>18</sup>, který ukazuje jakou část povrchu Marsu můžete právě vidět ve vašem dalekohledu.

Jupiter zaujme především pásovou strukturou pozorovaných vnějších vrstev (obrázek 6.24) a pak soustavou měsíců, z nichž čtyři největší, tzv. Galileovské družice Io, Europa, Ganymed a Callisto, jsou dobře pozorovatelné i menšími přístroji. K identifikaci měsíců i předpovědím polohy tzv. Rudé skvrny lze opět využít nástrojů na již zmíněné stránce časopisu Sky&Telescope.

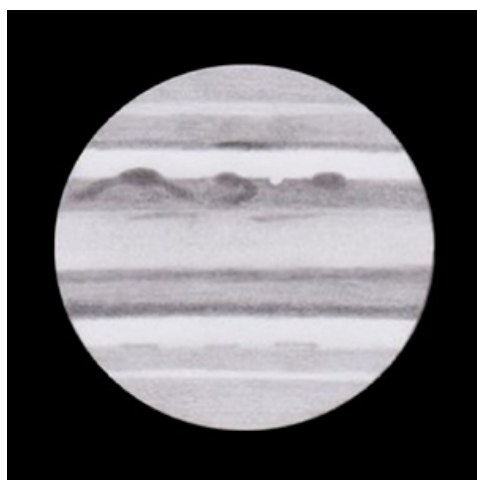
Poslední z prostým okem viditelných planet, Saturn, je krasavec. Jeho prstence jsou v dalekohledu opravdu nádherné. Vidět je i největší Saturnův měsíc Titan.

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 nazelenalý, resp. namodralý malý kotouček. Chceme-li vidět detaily, musíme použít větší

<sup>18</sup>Mars Profiler <https://skyandtelescope.org/observing/interactive-sky-watching-tools/>.



Obrázek 6.23: 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.

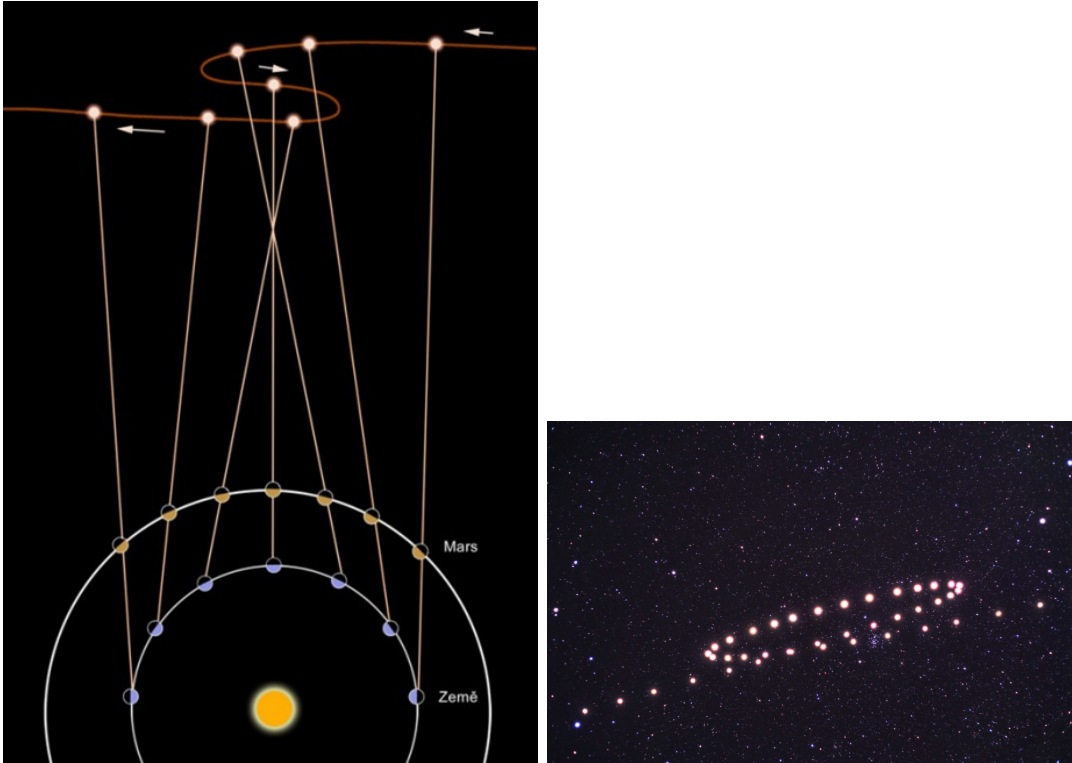


Obrázek 6.24: Kresba Jupitera Petra Skláře. 15. 8. 2009, refraktor 102/1000, zv. 166x, 250x, seeing 8-9/10, čas 22:50 - 23:05 UT (jih dole, západ vlevo). Převzato z <http://www.astro.cz>.

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 6.25.



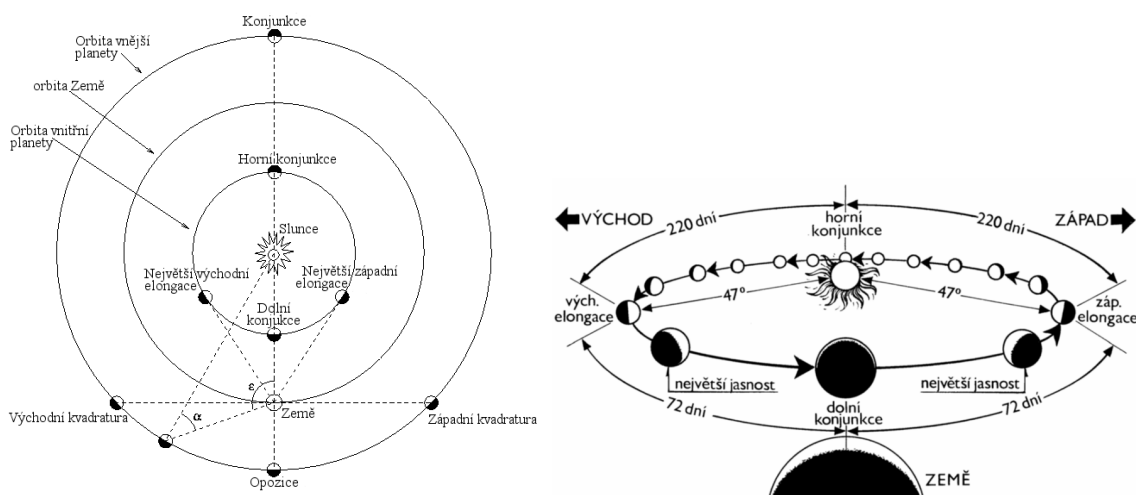
Obrázek 6.25: Vlevo: schematický náčrt vzniku smyček planet na hvězdné obloze. Převzato z Astronomického koutku. Autor: Ota Kéhar. Vpravo: Smyčka planety Mars v souhvězdí Raka v období říjen 2009 až květen 2010. Foto Tunc Tezel.

V kapitole 4.3.1 jsme si všimli rozdílu v délce dne, pokud jej odvodíme od rotace planety vztahené 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 vztahné 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 6.26 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 přívlástek východní nebo západní. Pokud bude planeta ze Země pozorovatelná východně od Slunce, bude ve východní elongaci. Znamená to, že bude vycházet po Slunci a bude pozorovatelná nejlépe večer po západu Slunce.



Obrázek 6.26: Aspekty. Zdroj: wikipedia, Příhoda (2000).

<sup>19</sup>Termín pochází z latinského *elongatio* od *elongare*, 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.

## 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. Až roku 2020 byla objevena první planetka (2020 AV2) obíhající kolem Slunce uvnitř dráhy Venuše.

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 Kleti), 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.

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 6.27 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

<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 planetky. 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).

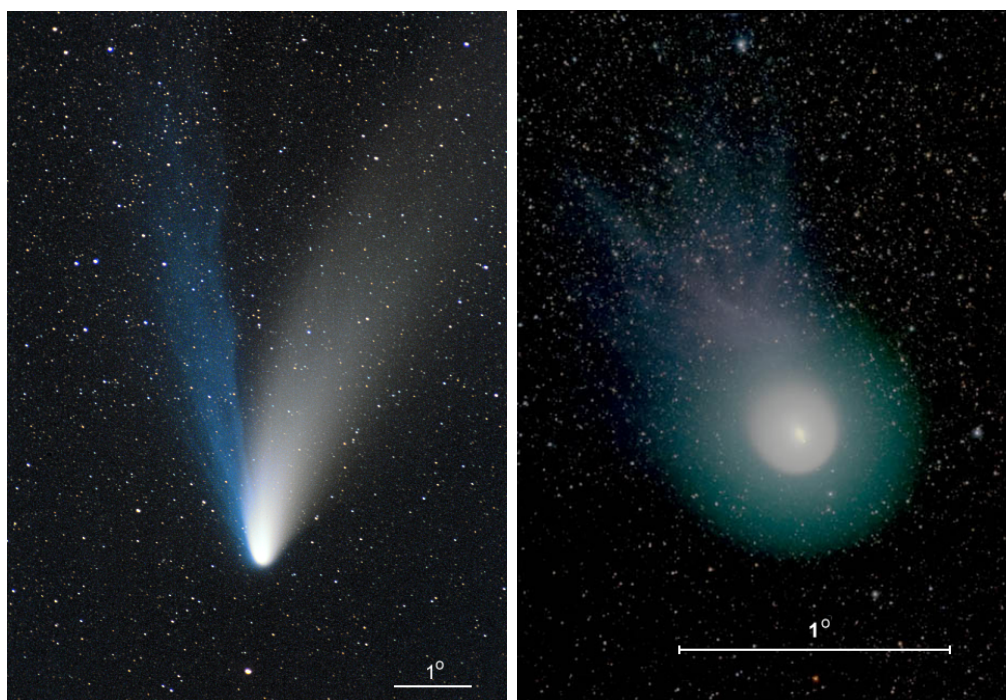
<sup>25</sup>Menší tělesa se označují jako meteoroidy.

<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.

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 4000 byla objevena v červnu 2020. 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. V říjnu 2021 tak seznam všech potvrzených komet obsahuje přes čtyři a půl tisíce položek.<sup>28</sup>



Obrázek 6.27: 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).

<sup>28</sup>Aktuální stav je k dispozici na <https://minorplanetcenter.net>.



Obrázek 6.28: Kometa McNaught na snímku Miloslava Druckmüllera z 28. ledna 2007.

## 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>29</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 5 840 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 6.29). Jedná se o první případ, kdy bylo těleso pozorováno před vstupem do zemské atmosféry jako meteoroid, byl zaznamenán jeho průlet atmosférou jako meteor, jeho výbuch a následně byly nalezeny úlomky, které dopadly až na zem 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.

<sup>29</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 planety.





Obrázek 6.29: 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.



Obrázek 6.30: 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.

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>30</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>31</sup>. Jsou tak jasné, že je možné je pozorovat i ve dne (viz obrázek 6.30 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

<sup>30</sup>Lidové označení „padající hvězda“ s hvězdami samozřejmě nemá nic společného.

<sup>31</sup>Původ slova můžeme hledat v řečtině, kde „bolídos“ značí metací střelu.



Obrázek 6.31: Radiant meteorického roje Lyrid na Sečskou přehradou v roce 2020; <https://apod.nasa.gov/apod/ap200512.html>. Autor: Petr Horálek.

s celým houfem drobných částic. 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 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-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 6.32 vpravo).



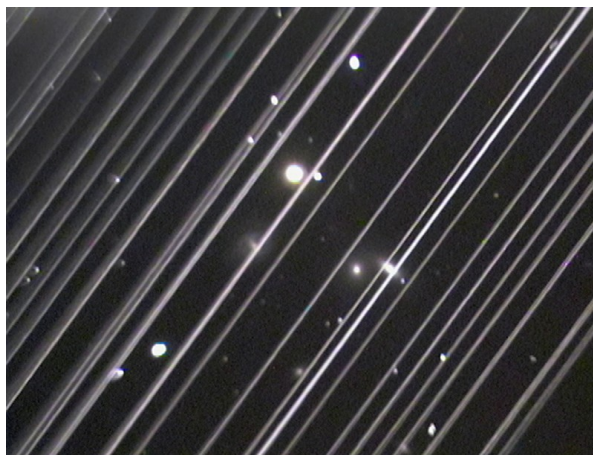
Obrázek 6.32: Meteorický déšť Leonid v roce 1833 na dobové kresbě (zdroj: Samuel J. Wormley) a snímek téhož roje Leonidy, který během maxima 16.11.1998 pořídil Juraj Toth na slovenské observatoři v Modre.



Obrázek 6.33: 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 Kasiopėja. Pod ním je vidět kometa Ikeya-Zhang s malým ohonem. Foto: Carol Lakomiak.

## 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 kos-



Obrázek 6.34: Úhlopříčné čáry na snímku pořízeném na Lowellově observatoři v USA představují odražené světlo od povrchů družic projekt Starlink. Detaily v Witze (2020). Foto: Victoria Girgis/Lowell Observatory.

mická stanice ISS mimořádně jasná a lze ji dobře pozorovat. Družice vypadají na noční obloze jako jasné body, které se tiše sunou mezi hvězdami. Je zřejmé, že to, co pozorujeme v takovém případě, není vlastní světlo svítící z družice na Zemi, ale sluneční světlo odražené od lesklého povrchu družice. Někdy tak může družice díky rotaci „svítit“ i přerušovaně. 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 6.33). Polohy družic a jejich pozorovatelnost v daném místě na Zemi je možné zjistit na <http://www.heavens-above.com/>. Bohužel, v posledních letech přibývá projektů, v nichž je vypouštěno na oběžnou dráhu obrovské množství malých satelitů. Ty pak způsobují astronomům nemalé problémy (viz obrázek 6.34).

## Použitá a doplňující literatura

- Brown, M. 2016, <http://www.gps.caltech.edu/~mbrown/dps.html>  
 Druckmüller, M., 2021, <http://www.zam.fme.vutbr.cz/~druck/>  
 International Energy Agency 2019, Key World Energy Statistics 2018  
 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

- 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
- Witze, A. 2020, Nature 577, 303

## 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 rozborem 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 si zpravidla myslíme.

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 několik stovek (k 15. 9. 2017)<sup>1</sup>, což představuje vzorky měsíčních hornin o celkové hmotnosti několika set kilogramů.

Meteority z Marsu jsou vzácnější. Databáze meteoritů vedená mezinárodní Meteorickou společností<sup>2</sup> uváděla k 18. září 2021, že je registrováno 66 132 pojmenovaných meteoritů a 7 559 meteoritů s provizorními jmény, z toho 12 638 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. Čeští ast-

<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 (<https://meteoritical.org/>).

<sup>3</sup>Detaily lze najít na <https://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.

ronomové 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 ??), 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 chondrule. 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.

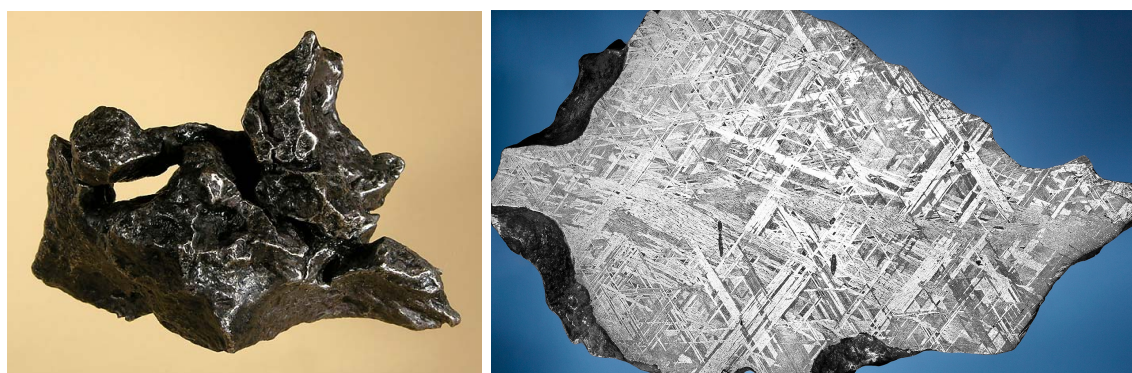
Při studiu meteoritů se už nemusíme omezovat jen na ty pozemské. V lednu 2005 byl oznámen objev prvního meteoritu na jiném kosmické tělese. Vozítko Opportunity našlo na Marsu železný meteorit<sup>5</sup>.

<sup>4</sup>Podrobnosti na <https://dvojka.rozhlas.cz/bolid-benesov-vydal-tajemstvi-video-7531171>.

<sup>5</sup>Detaily o nálezu meteoritu na Marsu na <https://mars.nasa.gov/mer/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 Dovoz 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 celkem 0,32 kg vzorků díky třem automatickým družicím Luna, z nichž ta poslední Luna 24, pracovala v roce 1976. Zatím poslední import měsíční horniny o hmotnosti 1,731 kg se uskutečnil v prosinci 2020 prostřednictvím čínské sondy Chang'e 5.

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





Obrázek 7.4: Největší nalezený fragment meteoritu se nachází v Namíbi. Hmotnost železného meteoritu Hoba se odhaduje na zhruba 66 tun. Snímek byl převzat z <https://www.tripadvisor.com/>.



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.

Stardust, jejíž hlavním úkolem bylo uskutečnit výzkum komety Wild-2 a provést sběr prachových částic v meziplanetárním prostoru a při průletu kómou komety a dopravit je k analýze na Zemi. 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.

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

V září 2016 vyslala americká NASA sondu OSIRIS-REx k planetce 101955 Bennu. V říjnu 2020 se podařil odběr vzorků z povrchu planetky a jejich doručení na Zemi se očekává v roce 2023.



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

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

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 (Pierre Auger Collaboration et al., 2017). Jde o jeden z mnoha významných výsledků, získaných na Observatoři Pierra Augera<sup>8</sup> v Argentině, která je tvořena 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 slunečního větru 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.

### 7.3.3 Neutrino

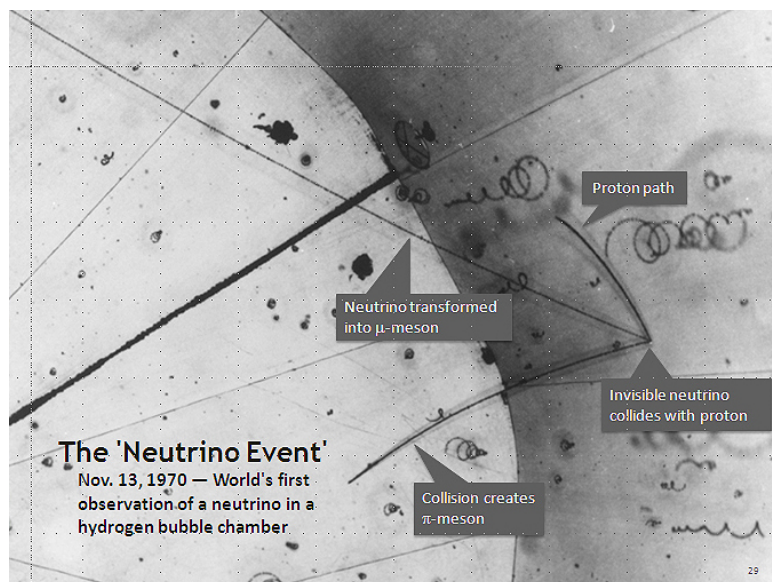
Neutrino patří mezi lehké elementární částice (leptony). Jeho hmotnost je sice ve srovnání s většinou elementárních částic velmi malá, ale nenulová. Na druhou stranu má neutrino nulový elektrický náboj. Jeho spin  $\hbar/2$  jej řadí mezi fermiony. Neutrino je, dalo by se říci, netečná částice. Nijak ji neovlivní silná ani elektromagnetická interakce, netečné je 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 cm<sup>2</sup> 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. Může jím 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

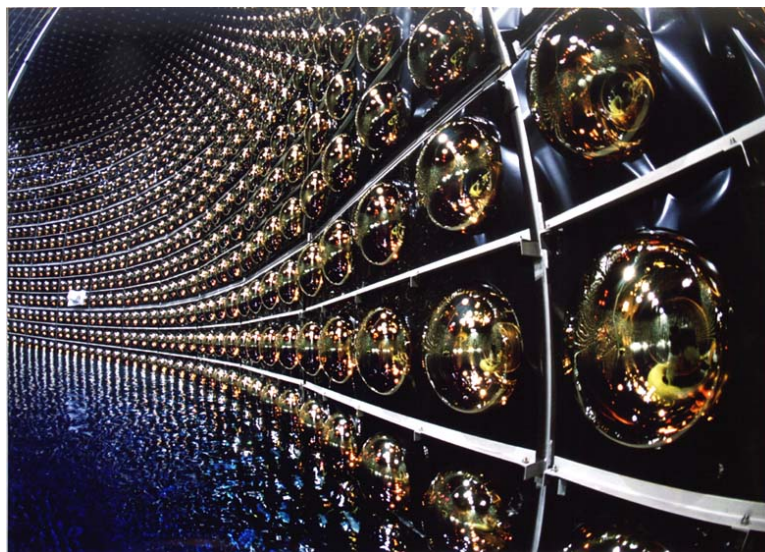
<sup>8</sup>[http://www.auger.org/cosmic\\_rays/](http://www.auger.org/cosmic_rays/)

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



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

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.

## 7.4 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 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 na objevu podílel, Rainer Weiss, Barry C. Barish a Kip S. Thorne dostali za tento objev Nobelovu cenu za fyziku v roce 2017.

Během několika let od první detekce byly gravitační vlny z vesmíru detekovány v desítkách případů. Přelomovým se stal pátý, označený GW170817, který byl důsledkem splnutí dvou neutronových hvězd. Poprvé se také podařilo událost pozorovat i v různých oblastech spektra elektromagnetického záření jako záblesk  $\gamma$  záření GRB170817A či zjasnění (tzv. transient) AT 2017gfo v optické oblasti. K dispozici jsou ale i rentgenová, infračervená, ultrafialová měření. Jde jednoznačně o mezník ve studiu vesmíru, počátek tzv. mnohapásmové astronomie (z anglického „multi-messenger astronomy“).

## 7.5 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 dovezene vzorky, nám přinášejí informace o prostředí jen za našimi kosmickými humny, ale o vesmírných dálavách neříkají zhola nic. Chceme-li pronikat do tajemství hlubin vesmíru, musíme zvládnout analýzu elektromagnetického záření.

Analyzovat elektromagnetické záření není vůbec 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  $h$  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 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.

### 7.5.1 Okna do vesmíru

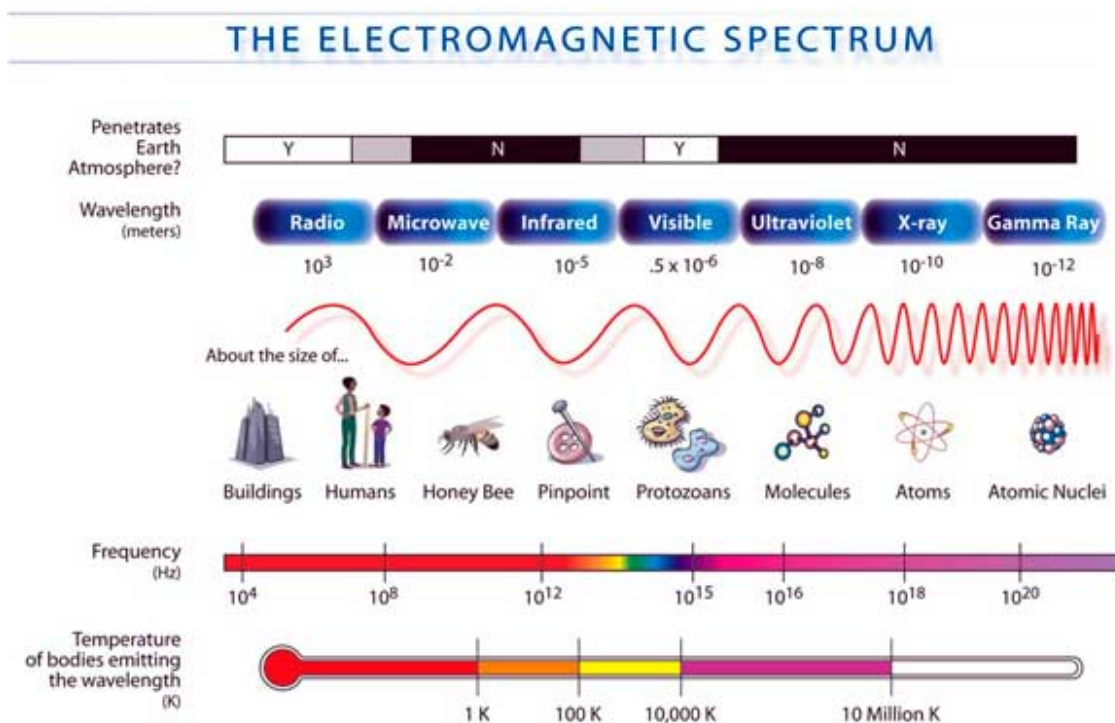
Vesmírná sonda ve volném kosmickém prostoru může měřit intenzity záření v jakékoli části nebo i v celém rozsahu elektromagnetického spektra. Obdobná observatoř na zemském povrchu, na dně vzdušného oceánu, má ale možnosti značně omezené. Atmosféra Země propouští jen určité oblasti, úseky spektra elektromagnetického 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

<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.

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

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



Obrázek 7.9: Elektromagnetické spektrum. Zdroj: NASA.

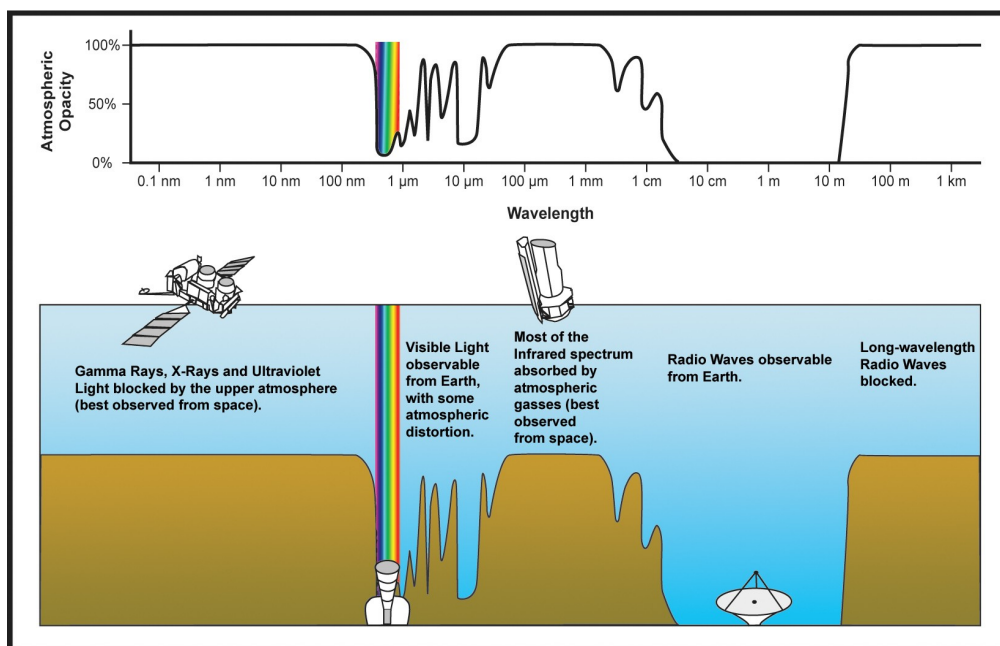
naše znalosti o spektru elektromagnetického záření jen o malé části přimykající se k optické oblasti. K podstatnému rozšíření poznané oblasti spektra přispěl až o desítky let později v roce 1887 Heinrich Hertz, který ve své laboratoři generoval záření o vlnových délkách řádově 10 až 100 m. Lidstvo poznalo rádiové vlny.

Na konci 19. století celá řada fyziků studovala záření ve vakuovaných trubcích emitované 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,

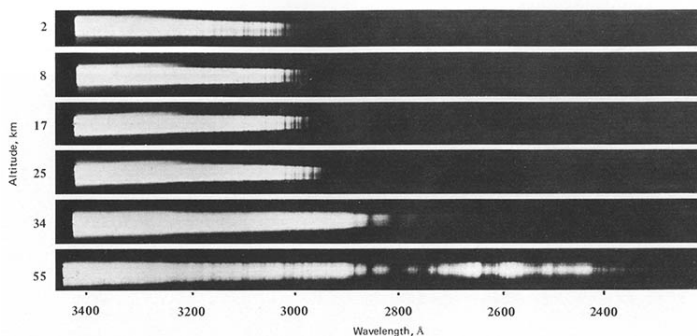
<sup>13</sup>V roce 1901 se Röntgen stal prvním laureátem Nobelovy ceny za fyziku.



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

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 pořízená 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. Skutečné otevírání oken do vesmíru ale nastalo až s počátkem kosmické éry, zejména v šedesátých letech minulého století. Velkou zásluhu na tom má americký astronom Lyman Spitzer, který už v roce 1946 vypracoval studii o dalekohledu umístěném v kosmu na oběžné dráze kolem Země<sup>14</sup> a podílel se na sérii amerických astronomických kosmických observatoří OAO (Orbiting Astronomical Observatory) vypouštěných na přelomu 60. a 70. let minulého století. Hned první z nich v roce 1966 nesla na palubě přístroje pracující v ultrafialové, rentgenové a gama oblasti spektra.

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

### 7.5.2 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**.

Ve fotometrii 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. 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

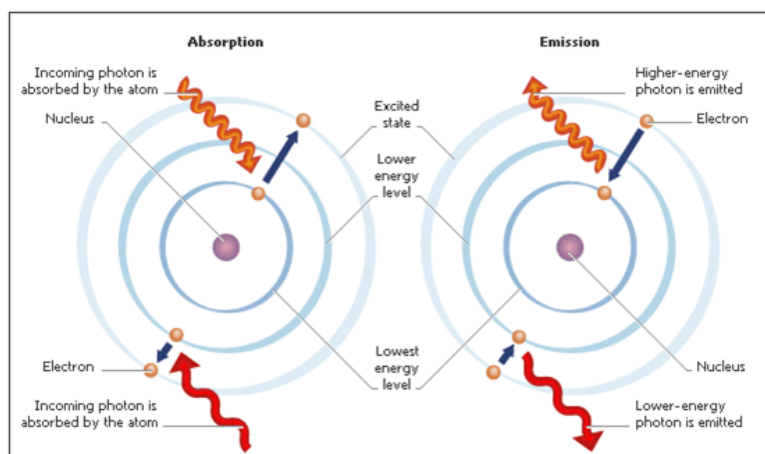
<sup>14</sup>Jak dnes víme, Spitzerova myšlenka byla nakonec realizována. Vyvrcholením jeho dlouholetého úsilí bylo vypuštění Hubbleova kosmického dalekohledu na oběžnou dráhu v roce 1990.

<sup>15</sup>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.

energie, kterou je nějaká částice schopna přijmout nebo vydat, závisí na vzájemné interakci částice a okolí. Vázané částice se musí podvolit zákonitostem kvantové mechaniky a mohou nabývat jen určitých energií. Energie volné částice může nabývat prakticky libovolné hodnoty, protože volným částicím nic nebrání, aby přecházely mezi dvěma prakticky libovolnými energetickými stavy. Podobné je to i v případě, kdy jeden stav je volný a druhý vázaný.

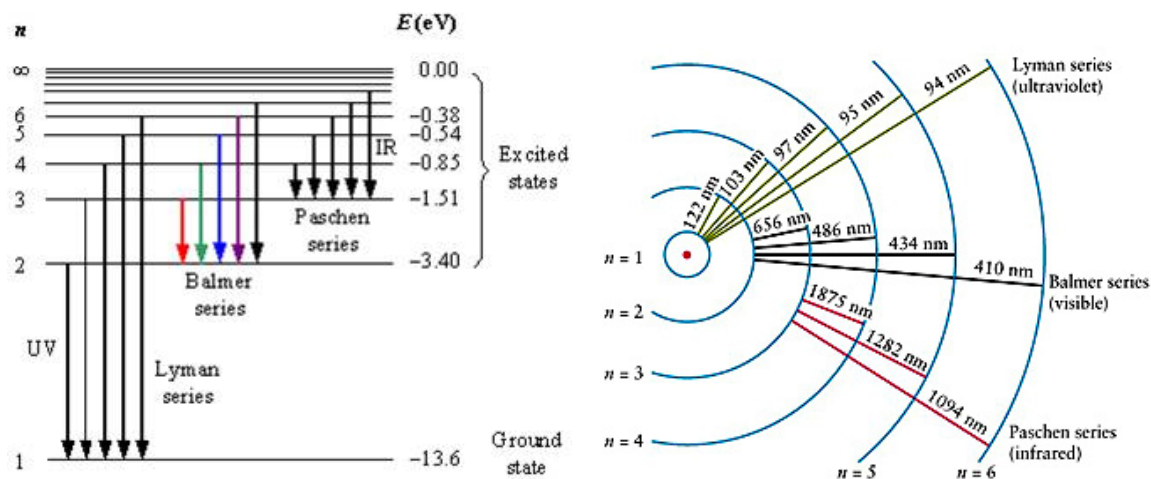
Pokud jsou částice velice nahuštěné a velmi silně interagují (například v pevné látce zahřáté na vysokou teplotu, hustém plazmatu ve hvězdách), vzniká spojité záření, tzv. kontinuum. Spojité spektrum obsahuje záření všech vlnových délek, ale platí, že čím vyšší je teplota emitujícího tělesa, tím vyšší je maximum vyzářené energie. Vlnová délka odpovídající tomuto maximu je nižší, zatímco jeho frekvence 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).

Jestliže 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 rozborem spektrálních čar zjistit složení zdroje záření (více v kapitole o spektroskopii).

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 nejsnáze ovlivnitelný je elektron, bude právě tato částice nejčastějším zdrojem takového



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).

záření. Konkrétním příkladem může být situace, kdy se elektron pohybuje v poli kladně nabitě částice. Vlivem působení kationtu se změni 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 síly

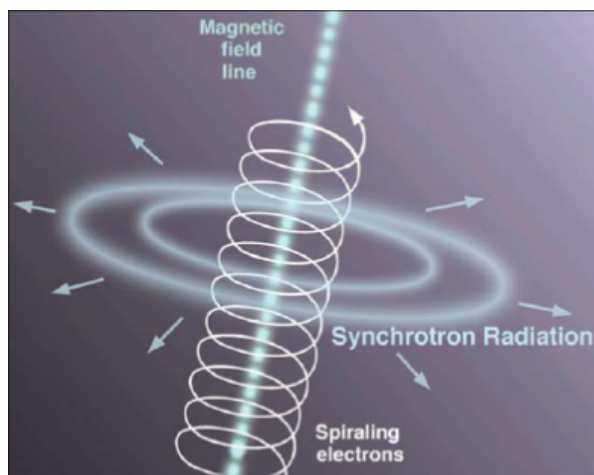
$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B},$$

kde  $q$  je náboj elektronu (obecně, pohybující se nabitě částice),  $\vec{v}$  její rychlost a  $\vec{B}$  intenzita magnetického pole. Lorentzova síla způsobuje zakřívování trajektorie elektronu a tím také i jeho vyzařování. Druh emitovaného záření ale v tomto případě záleží na rychlosti pohybu elektronu. Pokud je rychlost dostatečně malá ve srovnání s rychlostí světla ( $v \ll c$ ), vzniká všesměrové *cyklotronové záření*<sup>17</sup>. Ve vesmíru se s takovým zářením můžeme setkat v mezihvězdné látce nebo v okolí černých děr a slouží nám jako zdroj informací o magnetickém poli v místě jeho vzniku. Jestliže je před vstupem do magnetického pole elektron urychlen na rychlost blízkou rychlosti světla, vznikne jeho pohybem v magnetickém poli tzv. *synchrotronové záření*<sup>18</sup> (obrázek 7.14). 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 (obrázek 7.15). Poprvé bylo detekováno u mohutného výtrysku (jetu) z galaxie M87 (Burbidge, 1956).

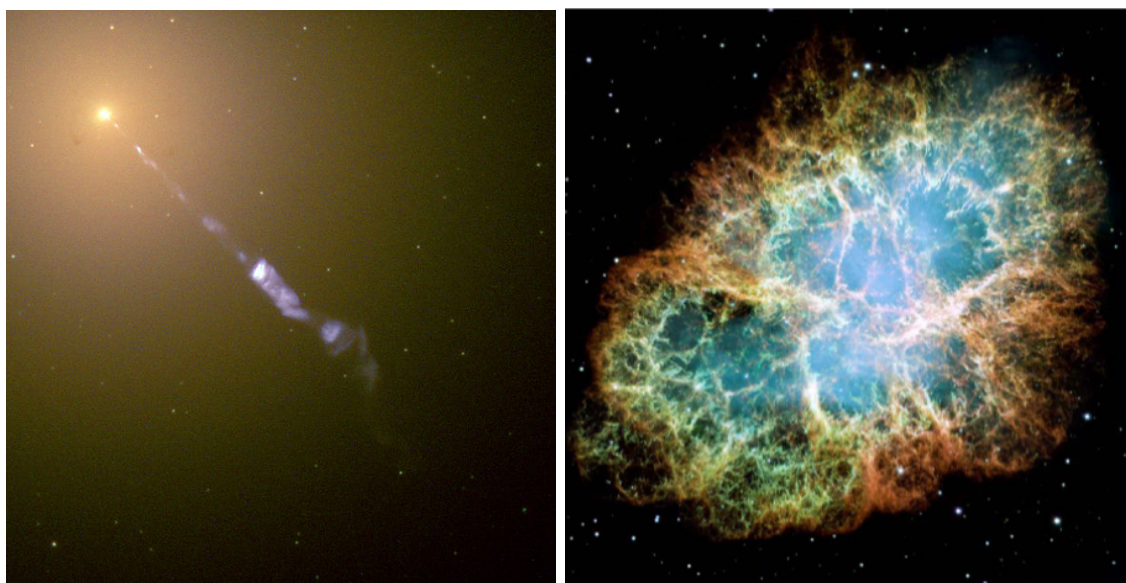
Závěrem kapitoly tedy můžeme konstatovat, že rozborem elektromagnetického záření z kosmu lze zjišťovat také způsob a podmínky vzniku tohoto záření. Jde tak o velmi cenný zdroj informací o vesmíru, na nichž si můžeme ověřovat i základní principy fyziky. Větší laboratoř než náš vesmír prostě nemáme.

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

<sup>18</sup>I tentokrát je název odvozen od typu urychlovačů částic, synchrotronů. Poprvé bylo toto záření detekováno v roce 1946.



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



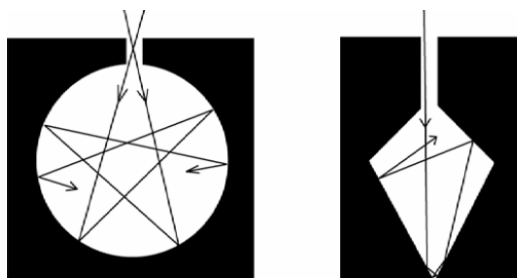
Obrázek 7.15: Zdroje synchrotronového záření. Vlevo: výtrysk u galaxie M87. Vpravo Krabí mlhovina M1. Převzato z wikipedie.

### 7.5.3 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 Štefan<sup>19</sup> závislost mezi intenzitou záření absolutně černého tělesa a jeho (termodynamickou) teplotou (Štefan, 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

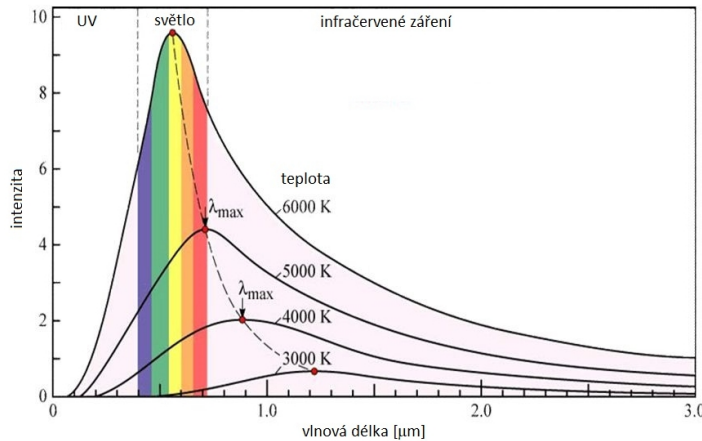
$$F = \sigma T^4 \quad (7.4)$$

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.

<sup>19</sup>Štefan byl občan Rakousko-Uherska, proto se často objevuje přepis jména Josef Stefan. Jednodušší verzi bez háčku budeme nadále používat i my, ale nepaměťme, že výslovnost je stejná v obou případech - "štefan".

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

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



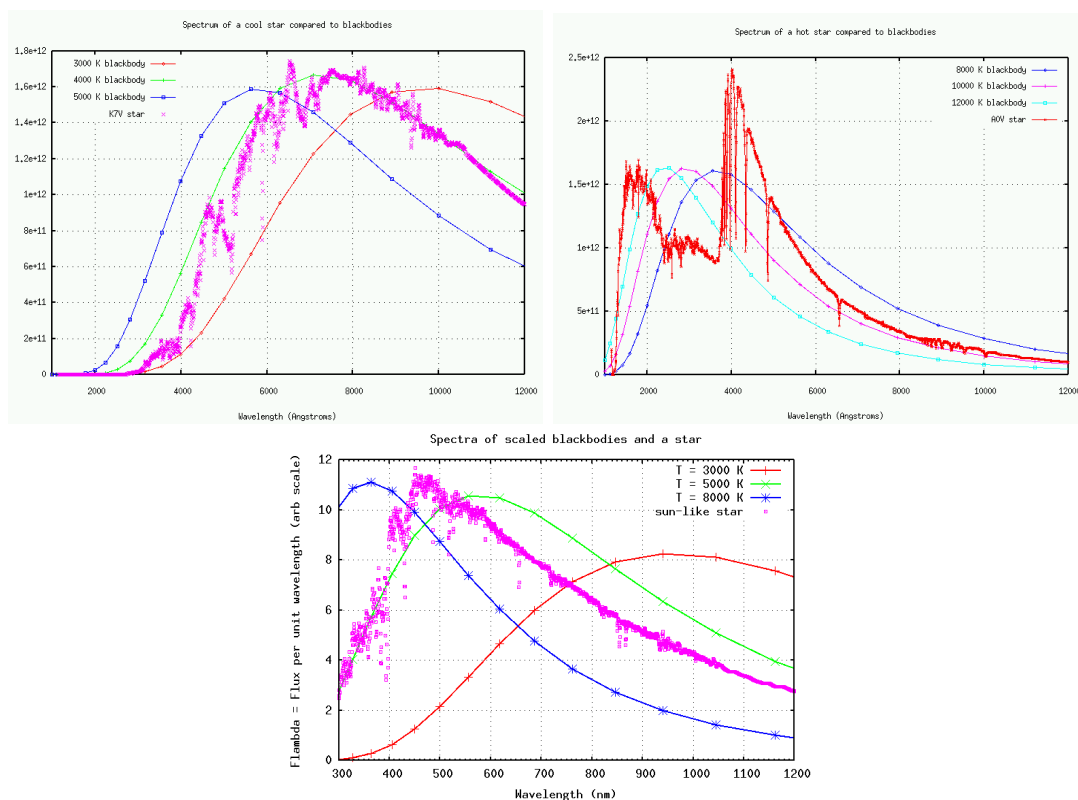
Obrázek 7.17: Křivky množství vyzářené energie pro různé teploty. Převzato od D. Fieldse a upraveno.

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 W. Wien, 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>20</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 rozzhavené 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. 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.

<sup>20</sup>Wilhelm Wien obdržel za svou práci v termodynamice 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>.

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

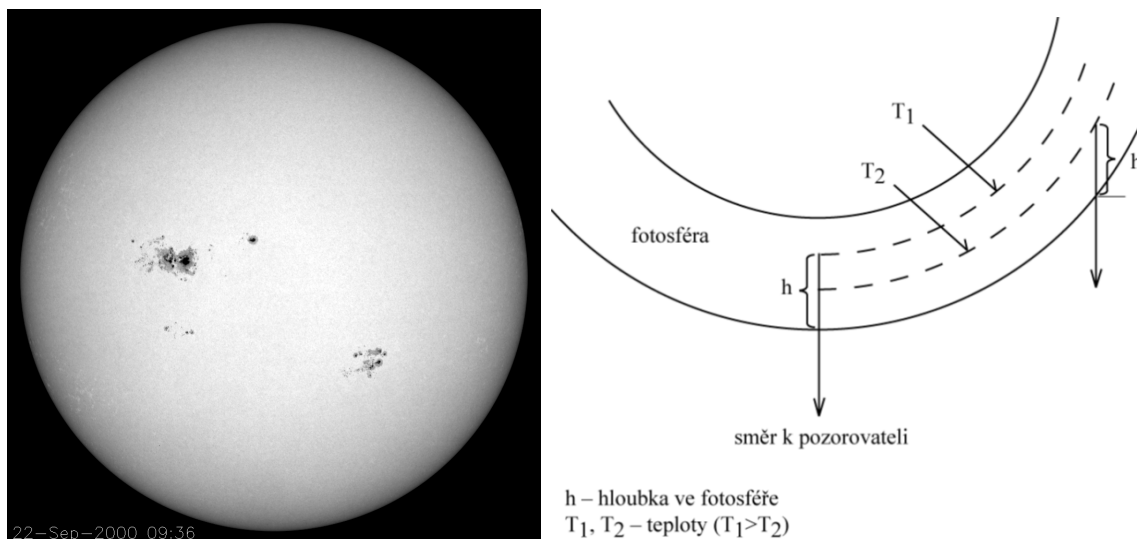
$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad \text{nebo} \quad B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (7.7)$$

odvodil až Max Planck (1900). 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 ideálu 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 rozborem 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/>. 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.



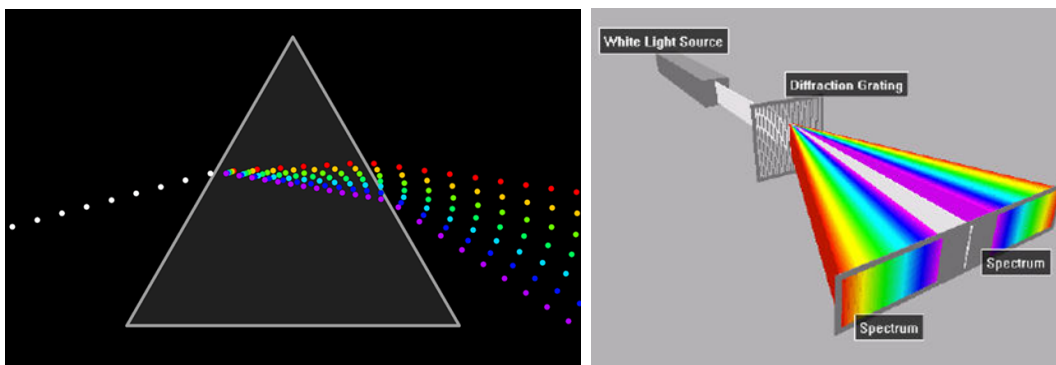
- McSween, H. Y., Jr. 1999, *Meteorites and their Parent Planets*, by Harry Y. McSween, Jr, pp. 322. ISBN 0521587514. Cambridge, UK: Cambridge University Press, February 1999.
- Pierre Auger Collaboration, Aab A., Abreu P., Aglietta M., Samarai I. A., Albuquerque I. F. M., Allekotte I., et al., 2017, *Science*, 357, 1266
- 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 von Fraunhofer sestavil spektroskop a s ním objevil, změnil a zapsal 574 tmavých čar (dnes Fraunhoferovy čáry) a Wollanstonovu hypotézu o hranicích barev vyvrátil.

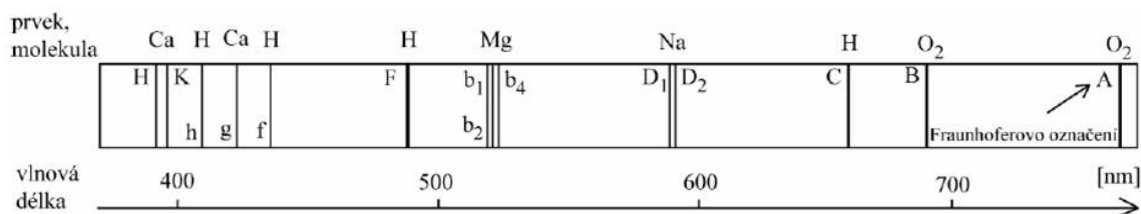
Dnes víme, že za barvu předmětů vděčíme odrazu světla. Jestliže má předmět modrou barvu, pohltí jeho povrch všechno světlo kromě jediného – světla o vlnové délce modrého světla, které odrazil. Bílé světlo je samozřejmě tvořeno všemi barvami, zastoupené jsou rovnoměrně všechny složky spektra, všechny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

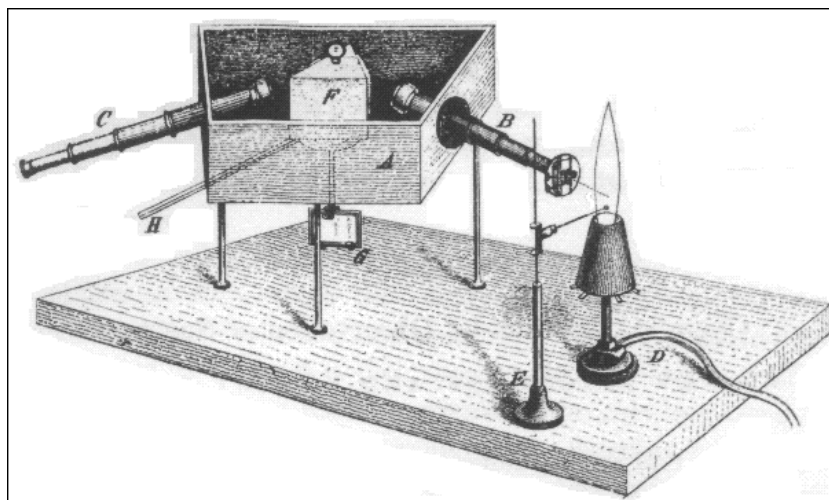


Obrázek 8.2: Fraunhoferovy čáry ve slunečním spektru. Převzato z Pokorný (2006).

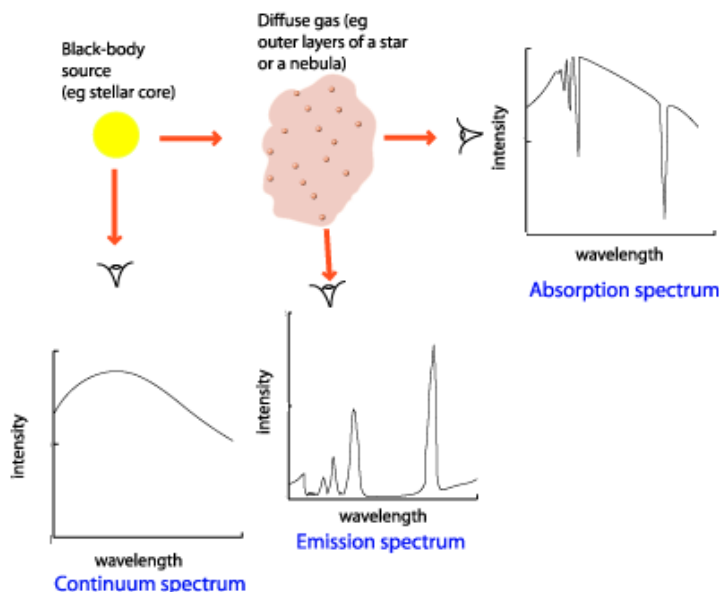
## 8.1 Počátky astrofyziky

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).



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

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 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 rozřídil 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. Platí nejen pro elektromagnetické vlnění v optice, ale i pro zvukové vlny v akustice. Je tak 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. Podobně za-

<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.

znamenáte změnu tónu výstražné signalizace na železničním přejezdu, když se ve vlaku k přejezdu blížíte a když se od něj poté vzdalujete.<sup>5</sup>

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  $v_r < 0$ .

Buys 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. Lze tedy určovat nejen lineární posun objektu, ale i jeho rotaci.

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

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

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 Charles Pickering a „jeho ženy“ (viz obrázek 8.5), zejména Antonia Mauryová a Annie Jump Cannonová popsaly na půl milionu hvězdných spekter! Na základě mnohonásobně většího vzorku spekter, než měl Secchi, se pak zrodila nová klasifikace spekter hvězd (Maury & Pickering, 1897). Všechny výsledky byly v letech 1918-1924 publikovány v katalogu Henryho Drapera<sup>7</sup> (Cannon & Pickering, 1993).



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

## 8.2 Spektroskopie hvězd

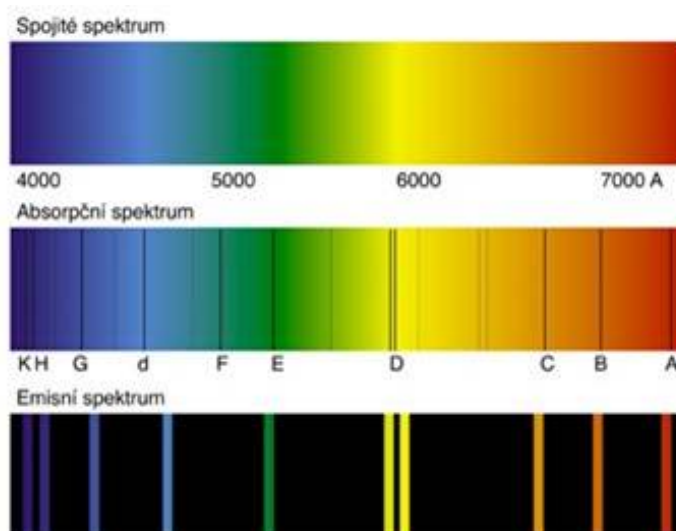
Jednou z nejúčinnějších metod zkoumání hvězd je spektroskopie. Záření hvězd zaznamenané v podobě spektrogramu nám přináší informace o rozdělení energie vyzařované hvězdou v závislosti na vlnové délce  $\lambda$  nebo frekvenci záření  $\nu$ . Právě popis funkce rozdělení energie ve spektru je jedním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

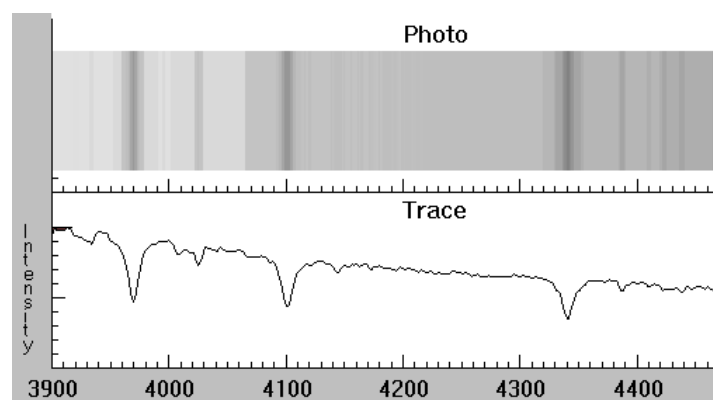
<sup>6</sup>Poprvé termín spektrograf použil sám Draper v roce 1876 (Barker, 1888).

<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.

CCD či CMOS 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).



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 vyneše do grafu v dolní části obrázku. Převzato z Projektu CLEA, <http://public.gettysburg.edu/~marschal/clea/CLEAhome.html>.

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 záření přichází. Podoba spektra tedy nevyovídá nic o celkovém složení sledovaného objektu, hvězdy! U hvězd pomocí spektra můžeme studovat jen jejich atmosféry. Záření





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

Koncem 19. století převládal názor, že spektrum hvězdy bude odrazet její celkové složení. A tak byl například Rigel zařazen mezi hvězdy héliové, které měly ve spektru nejvýraznější héliové čáry. Obdobně byly vytvořeny skupiny hvězd vodíkových (s Vegou), nebo železných, kam bylo zařazeno Slunce. V té době ale ještě nebylo známo, jak 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 Payneová, později Payne-Gaposchkinová (1925). Spektrální třídy v harvardské klasifikaci tedy představují teplotní škálu, kde nejteplejší hvězdy jsou spektrální třídy O a nejchladnější třídy M. V první polovině 20. století se mělo za to, že hvězda vzniká jako velmi žhavý objekt, který s časem chladne. Z této mylné představy vycházelo i nepřesné rozdělení hvězd na hvězdy rané (horké hvězdy, spektrálních tříd O, B, A) a pozdní (chladné, třídy K, M; někdy i F a G). Takové označení hvězd se občas objeví i dnes, ale je 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 OBAFGKM, jak ji stanovila Cannonová, se dost těžko pamatují, vznikla celá řada mnemotechnických pomůcek na jejich zapamatování. Posuďte sami:

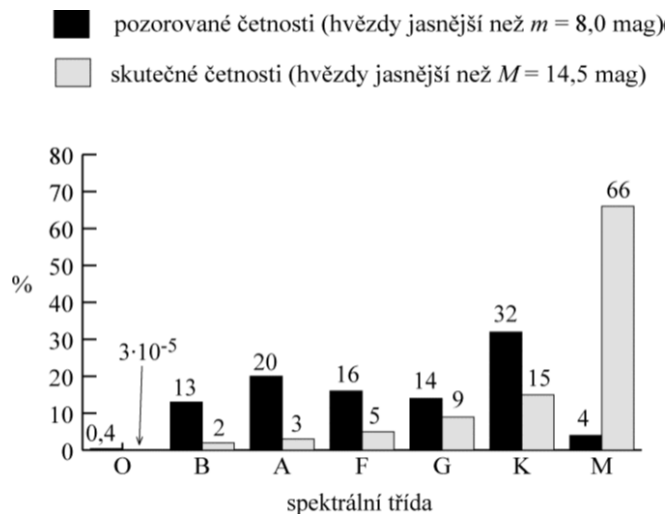
Oh, Be A Fine Girl/Guy, Kiss Me  
 Only Boys Accepting Feminism Get Kissed Meaningfully  
 Only Bad Astronomers Forget Generally Known Mnemonics  
 Olga Brečí A Fňuká, Gustav Krájí Mrkev.

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 oblastí chladných objektů o spektrální typy L, T a Y. Pro ně vznikly nové pomůcky:

Oh Be A Fine Girl/Guy Kiss Me, Less Tongue, Yuck!  
 Only Boring Astronomers Feel Good Knowing Mnemonics Like These (Yawn!)  
 Orion's Belt Asked Faithful Gemini: Kiss Me, Like Taurus Yesterday

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 v četnosti mezi třídami B, A, F, G.

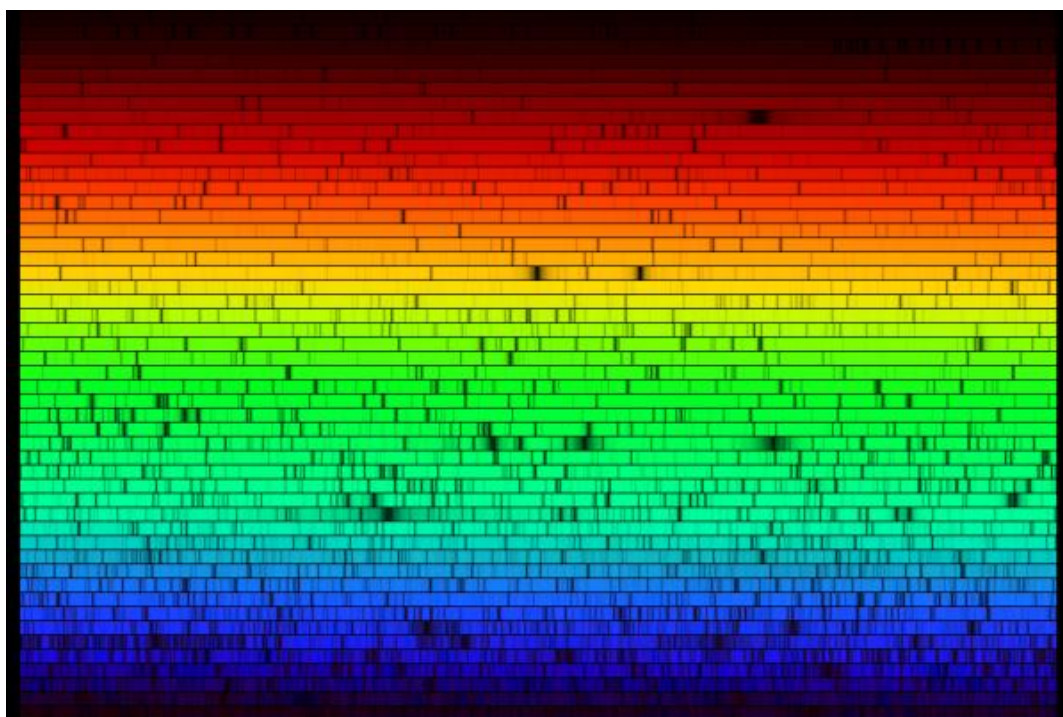


Obrázek 8.9: Četnosti různých spektrálních tříd. Převzato z Pokorný (2006).

<sup>8</sup><http://astro.wsu.edu/worthey/astro/html/mnemonic-trditional.html>,  
<http://www.astro.sunysb.edu/fwalter/AST101/mnemonic.html>, <http://pono.ucsd.edu/~adam/teaching/phys160/obafgkmlty.html>

## Použitá a doplňující literatura

- Barker, G. F. 1888, Memoir of Henry Draper, 1837-1882, <http://www.nasonline.org/publications/biographical-memoirs/memoir-pdfs/draper-henry.pdf>, str. 103
- 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
- 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



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.

- 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>

## 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. Znamější 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 (v souladu s Aristotelovým učením), že hvězdy jsou umístěny na sféře hvězd všechny ve stejné vzdálenosti od nás. Tak bylo logické, 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 numericky nejmenší hvězdnou velikost, která může být dokonce i záporná (viz tabulka 9.1). Dávejte si také pozor

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

a nezaměňujte název veličiny (hvězdná velikost) s její jednotkou (magnituda). Bohužel nalezneme dnes stále mnoho případů nesprávného používání i u renomovaných autorů<sup>4</sup>. Teď už je také zřejmé tvrzení, kterým jsme v kapitole 2 termíny hvězdná velikost a magnituda uvedli: Pokud je jasnost hvězdy stokrát menší než jasnost jiného objektu, je rozdíl hvězdných velikostí přesně 5 magnitud. Z toho mimo jiné vyplývá, že rozdílem jasností dvou objektů lišících se o 1 mag je pátá odmocnina ze sta, to je 2,5118864...

Pogson odvodil vztah 9.2 pro světlo, tedy pro vizuální obor spektra. Pogsonova rovnice ale platí zcela obecně i pro jiné části spektra. Místo jasností (hustot světelného toku) 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.

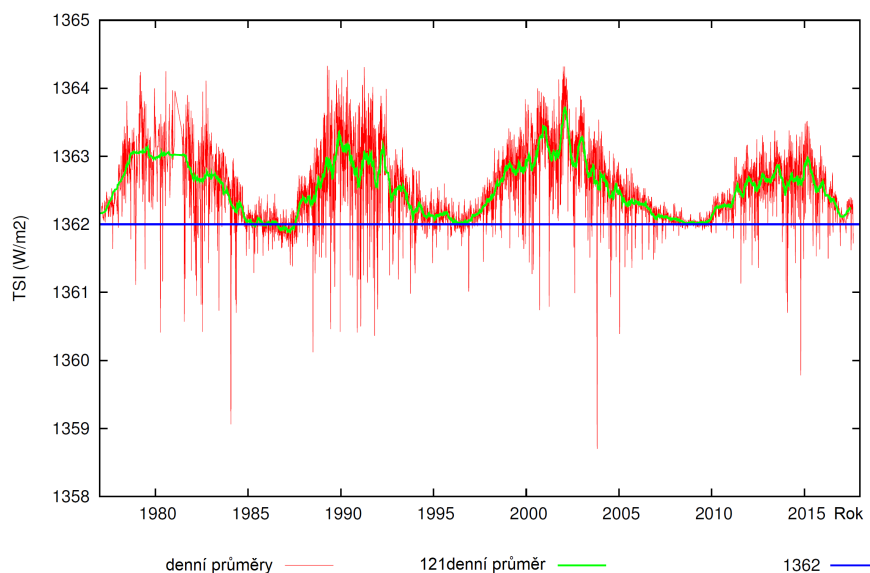
Pozorovaný zdroj vyzáří do svého okolí na všech vlnových délkách za 1 sekundu celkovou energii, kterou označujeme jako **zářivý výkon zdroje**  $L$ . Jeho hodnotu udáváme ve wattech. Jestliže do vzdálenosti  $r$  od zdroje záření umístíme kolmo na směr přicházejících paprsků plochu  $1 \text{ m}^2$ , 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

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

hodnota  $K$  se udává přibližně  $1367 \text{ W m}^{-2}$ . Skutečná hodnota kolísá v důsledku změn 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 (Dewitte & Clerbaux, 2017).

## 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

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

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

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

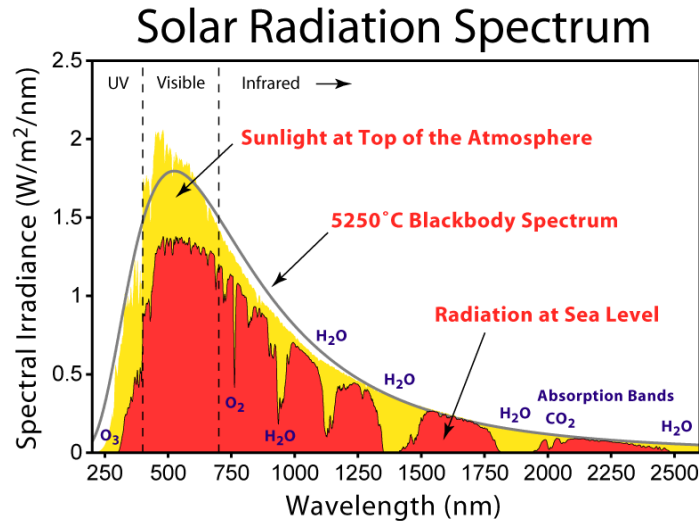
Ale jedná se o jeden objekt se zářivým výkonem  $L$ , který budeme sledovat ze dvou vzdáleností. Řekněme, že  $r_2 = 10$  pc,  $r_1$  je nějaká obecná vzdálenost  $r$ . Pak  $m_1$  je pozorovaná hvězdná velikost  $m$  ze vzdálenosti  $r$  a  $m_2$  odpovídá absolutní hvězdné velikosti  $M$ . Po dosazení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

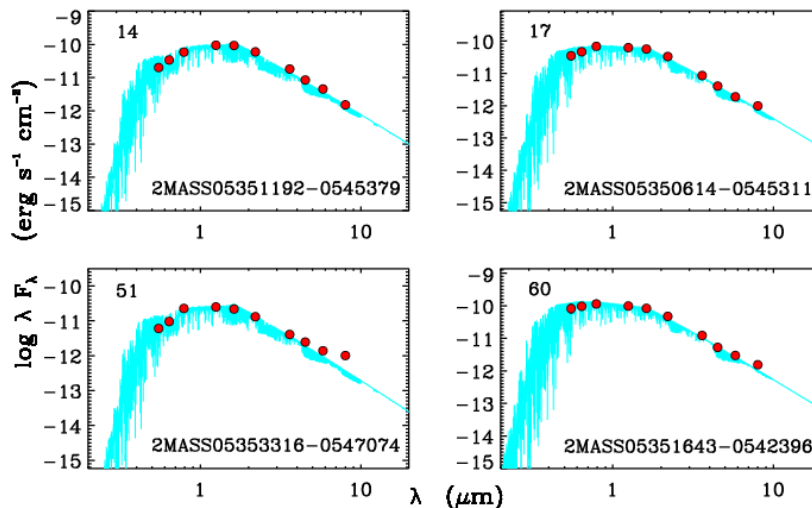
Jedním z hlavních úkolů astrofyziky je studovat rozložení vyzářené energie v závislosti na vlnové délce nebo frekvenci záření kosmických objektů. Jenže pozorovat tyto objekty v celém rozsahu elektromagnetického spektra je, jak už víme, velmi náročné a na



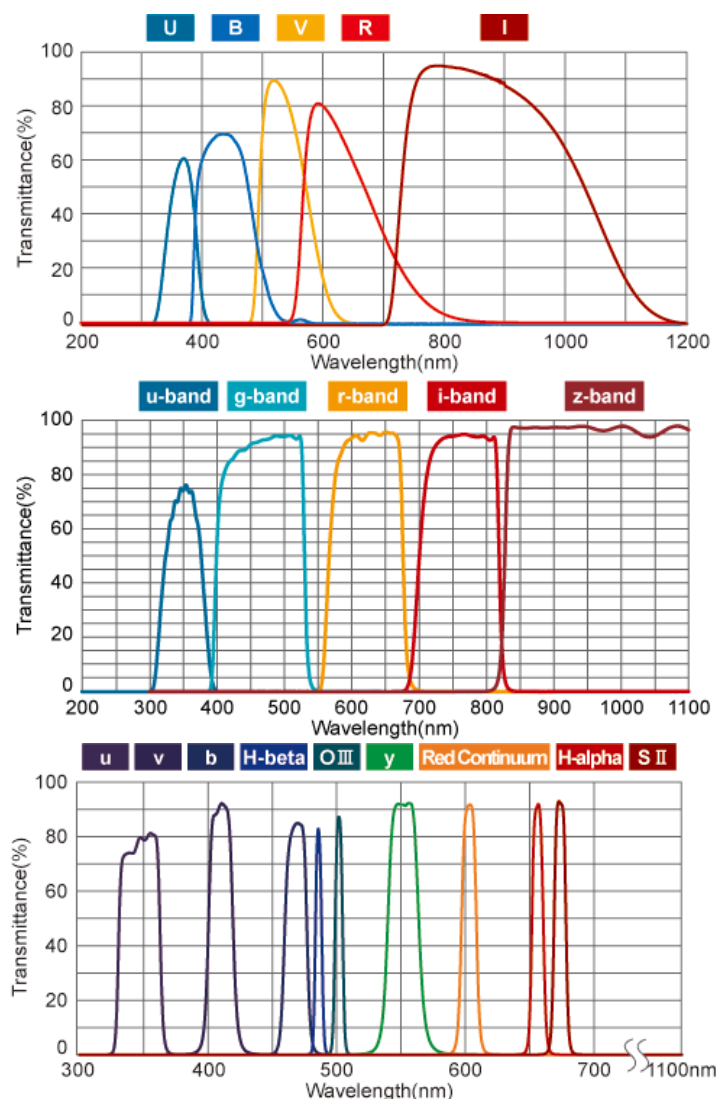
Obrázek 9.2: Spektrum slunečního záření na vrcholu zemské atmosféry (žlutá oblast) a na mořské hladině (červená oblast) ve srovnání se zářením absolutně černého tělesa o teplotě 5250 K, což přibližně odpovídá teplotě sluneční fotosféry. Jak záření prochází zemskou atmosférou, jsou některé jeho části pohlcovány. Dodatečné světlo je naopak výsledkem určitého přerozdělení způsobeného Rayleighovým rozptylem. Zdroj: Robert A. Rohde, Global Warming Art project.

zemském povrchu v principu nerealizovatelné. Navíc většinou máme k dispozici jen vybavení pro fotometrii. Otázkou tedy je, zda vůbec můžeme požadovanou informaci o rozložení vyzařované energie studovaného objektu získat fotometrickým měřením ze zemského povrchu. A pokud ano, jak nejnázorněji to provést. Na obrázku 9.2 vidíme názorně, jak atmosféra pohlcuje určité části spektra (slunečního záření). 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 (vyzářené 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 závalu.

**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* (ultra-violet) 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 vlnou-



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).



Obrázek 9.4: Ukázka křivek propustnosti filtrů různých fotometrických systémů. Nahoře je jedna z variant nejběžnějšího, širokopásmového systému *UBVRI*. Uprostřed systém používaný pro přehlídkový projekt SDSS a dole několik úzkopásmových filtrů. Zdroj: <http://www.asahi-spectra.com>.

vou délku 600 až 700 nm a *I* (infrared) s maximem v 800 až 900 nm. Bohužel existuje několik variant *UBVRI* s odlišnými definicemi maxim propustnosti zejména pro delší vlnové délky (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 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.

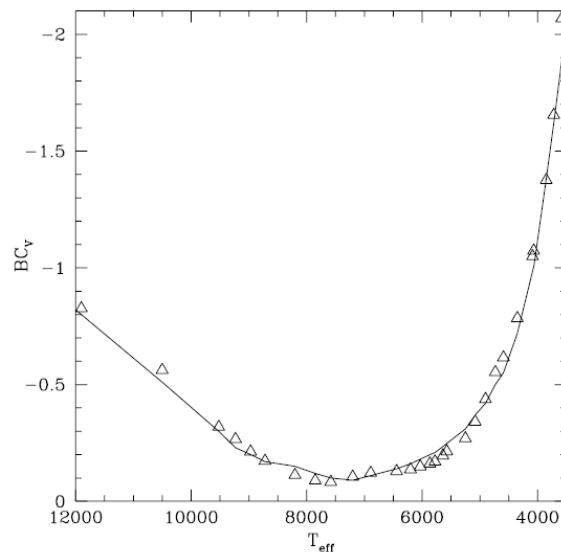
<sup>5</sup>Vždy se jedná o rozdíl hvězdné velikosti pro kratší vlnovou délku mínus hvězdná velikost téhož objektu pro větší vlnovou délku.

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 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, pokud by prostor mezi námi a objektem byl prázdný. Pro vzdálené objekty ale může být hodnota barevného indexu 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



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 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 ( $T_{\text{ef}} = 6\,800$  K). Všechny ostatní hvězdy jsou jasnější bolometricky než vizuálně. Bolometrická korekce je pak záporná! Ale pozor, většina autorů kreslí závislost bolometrické korekce na teplotě s obráceným chodem hodnot na ose  $y$ , stejně jako na převzatém obrázku 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

- Dewitte, S., Clerbaux, N. 2017, *Remote Sensing* 9,1143  
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

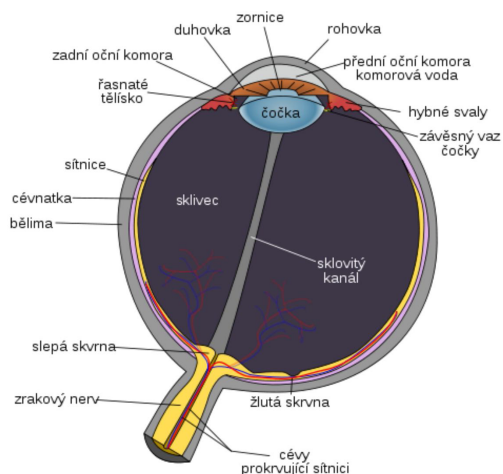
Optická astronomie se zabývá sledováním vesmírných objektů zejména ve vizuální oblasti spektra. Po celá tisíciletí byl základním přístrojem astronoma jeho zrak. Teprve v novověku začal člověk zrak „posilovat“ použitím čoček, dalekohledů a od 19. století i různých detektorů a záznamových zařízení. V současnosti 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

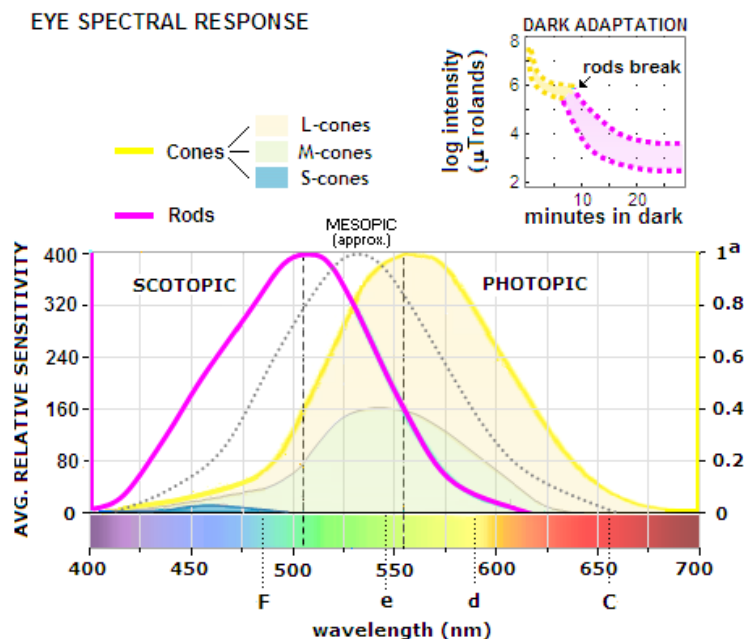
Když se zeptáte návštěvníků hvězdárny: „Co pokládáte za nejcennější přístroj astronoma – a) dalekohled, b) počítač, c) něco jiného?“. Většina zpravidla odpoví, že dalekohled, několik z nich uvede i počítač. Třetí možnost nezvolí nikdo. A přece. Odpověď c) je správně. Nejcennějším přístrojem astronoma 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 uchvázeni krásami nočního nebe posetého hvězdami, které jim zprostředkují jejich oči. Podívejme se nyní do útrob tohoto vynikajícího orgánu a prozradíme si, jak vlastně oko pracuje.

Oko má téměř kulový tvar (viz obrázek 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>.



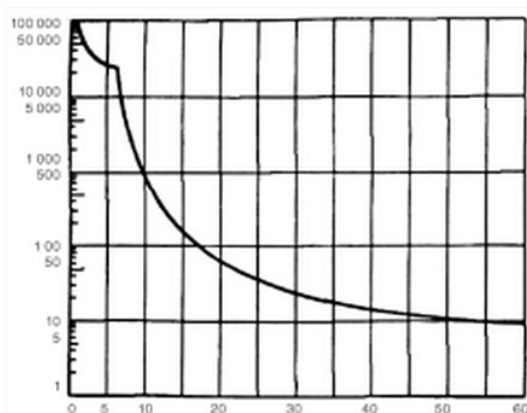
Obrázek 10.2: Spektrální citlivost oka. Vrchol citlivosti čípků je 200krát nižší než vrchol citlivosti tyčinek. Vpravo nahoře: Za špatných světelných podmínkách roste citlivost čípků 30krát až 100krát do doby zhruba 10 minut (čím větší je tma, tím rychleji předávají čípků svoji funkci tyčinkám). V okamžiku, kdy se dominantními receptory stanou tyčinky, zvýší se citlivost na 200krát až 1000krát vyšší hodnotu než byl vrchol citlivosti čípků během 20 minut adaptace (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).

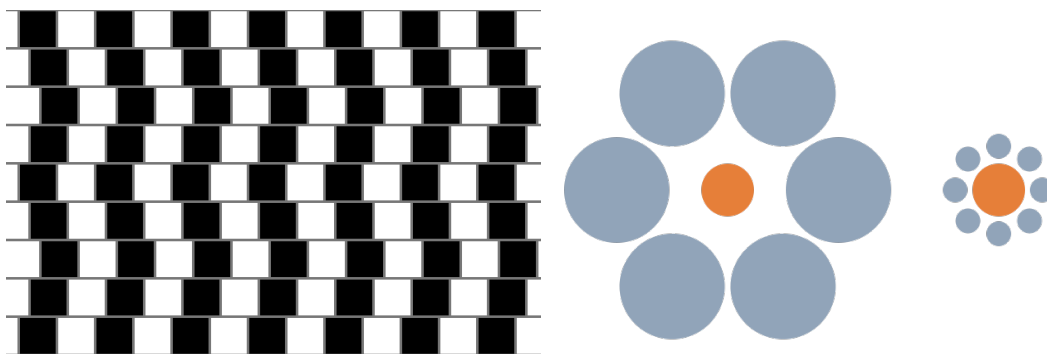
Na noční vizuální pozorování je třeba se řádně připravit. Abychom plně využili schopností oka, musí se na pozorování ve tmě adaptovat. Úplná adaptace trvá necvičenému oku až 60 min (viz obrázek 10.3), ale lze ji zrušit silným osvětlením už během pár sekund.<sup>3</sup> Pokud potřebujete při nočním pozorování 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 *mezí hvězdná velikost*, která vymezuje, jak slabé hvězdy může pozorovatel pouhýma očima v dané chvíli na daném místě pozorovat. U nás je to zcela výjimečně až 7 mag, ale ve městech se spoustou světla třeba i jen 2 až 3 mag.

Uvážíme-li denní i noční vidění, pak oko pracuje v rozsahu asi 30 mag, což značí poměr světelných toků  $1:10^{12}$ ! Pro detektory, jako 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. Vylepsit její kondici pomůže naopak podávání vitamínu A a dostatek kyslíku. Vzhledem k narušené ozónové vrstvě v zemské atmosféře 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 či detektory částic a gravitačních vln 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 („zapaľujících 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 zapaľujících 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“: *„Tato část optiky, pokud je dobře pochopena, nám ukazuje, jak můžeme velmi vzdálené objekty zobrazit tak, aby vypadaly jako by byly umístěny velmi blízko, velké objekty v naší blízkosti jako by byly velmi malé, a také jak bychom mohli malé objekty, umístěné v určité vzdálenosti, zobrazit v jakékoli námi zvolené velikosti, což by nám umožnilo číst i ta nejmenší písmena na neuvěřitelné vzdálenosti nebo spočítat zrnka písku, semena nebo jakékoliv jiné miniaturní předměty.“* Ostatně o dalekohledu píše i jeho známější pokračovatel a žák Roger Bacon. Ve třináctém století vznikaly první brýle. Jsou zaznamenány v Itálii (Pisa, Benátky, Florencie), ale i v Číně. V polovině 14. století je výroba čoček už řemeslnou záležitostí. Nicméně další zprávy o dalekohledu se objeví až v 16. století. Astronom a matematik Thomas Digges v předmluvě k dílu Pantometria (1591) tvrdí, že jeho otec, matematik, zeměměřič a vynálezce teodolitu Leonard Digges sestrojil (mezi roky 1540 až 1559) čočkový i zrcadlový dalekohled. Toto tvrzení dosvědčují i zprávy anglického učenice, alchymisty Johna Deea a popisy Diggesových optických pokusů, které nám zanechal William Bourne. Bohužel, nákresy nebo modely dalekohledů se nedochovaly. Před koncem roku 1574 popisuje svůj dalekohled i turecký astronom Taqi al-Din Muhammad ibn Ma'rif (Takiyüddin) 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 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>5</sup>. A zřejmě nebyl ani prvním, kdo jej použil na astronomická pozorování. Podle svých záznamů provedl první astronomické pozorování dalekohledem Thomas Harriot v červenci 1609. Bohužel kromě jednoho krátkého spisku nepublikoval žádné knihy a tak jeho pozorování na dlouho upadlo v zapomnění. V srpnu 1609 předvedl Galileo svůj dalekohled benátským zákonodárcům a v říjnu provedl první záznamy o svých pozorováních Měsíce. V následujících měsících pozoroval čtyři největší měsíce Jupitera, fáze Venuše, hvězdy v Mléčné dráze a další. V roce 1611 Johannes Kepler popsal ve své „Dioptrice“ optické vlastnosti čoček a navrhl nový typ astronomického dalekohledu se dvěma konvexními (vypuklými) čočkami. Není ale známo, že by dalekohled sám vyrobil. Takové „keplerovské“ dalekohledy sestrojili až roku 1630 Christopher Scheiner a Antonín Maria Šírek (Schyrl, Schyrleus) z Reity.



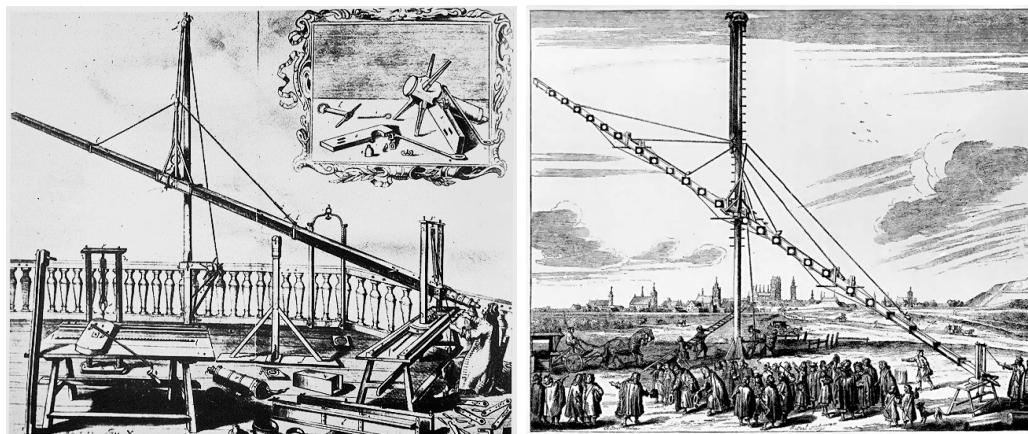
Obrázek 10.5: Nejstarší známý obrázek dalekohledu. Giovanni Battista Della Porta vložil tento náčrt do dopisu v srpnu 1609.

V 17. století a počátkem 18. století se hlavními producenty astronomických dalekohledů stali tři italské optici. 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.

Zcela jinou cestu představovala myšlenka využít jako objektivu odraznou plochu. Prvenství je připisováno Isaacu Newtonovi, který měl v roce 1668 sestrojít první funkční zrcadlový dalekohled s kovovým zrcadlem o průměru 3,25 cm. Nicméně o zrcadlovém

<sup>5</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).

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

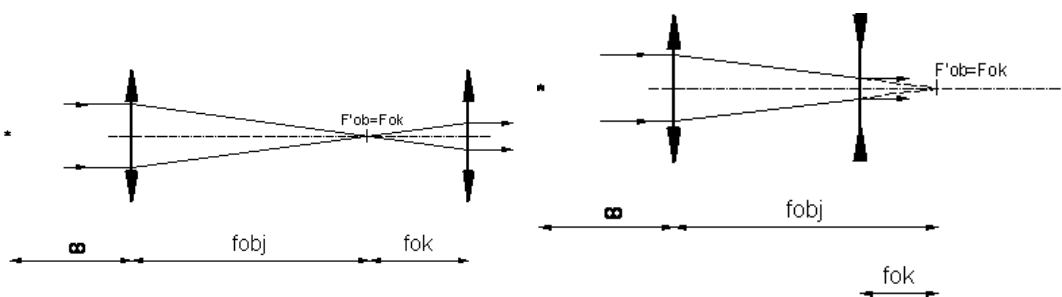
Čas od času lze v novinách v rubrice inzerátů narazit na inzerát, v němž je nabízen k prodeji hvězdářský dalekohled, zvětšující řekněme 150krát, a to bez uvedení dalších parametrů. Z takového inzerátu je okamžitě zřejmé, že jej podával laik, který se v astronomii a dalekohledech vůbec nevyzná. Chybí 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 (obrázek 10.7 vpravo). Jeho okulárem je rozptylka, případně soustava čoček, která tvoří ve výsledku rozptylnou soustavu. V astronomii se už nepoužívá. Oproti konstrukci Keplerova dalekohledu (obrázek 10.7 vlevo) 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  $f_{\text{obj}}$ . Spojka v okuláru má ohniskovou vzdálenost  $f_{\text{ok}} < f_{\text{obj}}$ . 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  $180^\circ$ .

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



Obrázek 10.8: Schéma triedru. Převzato z wikipedie.

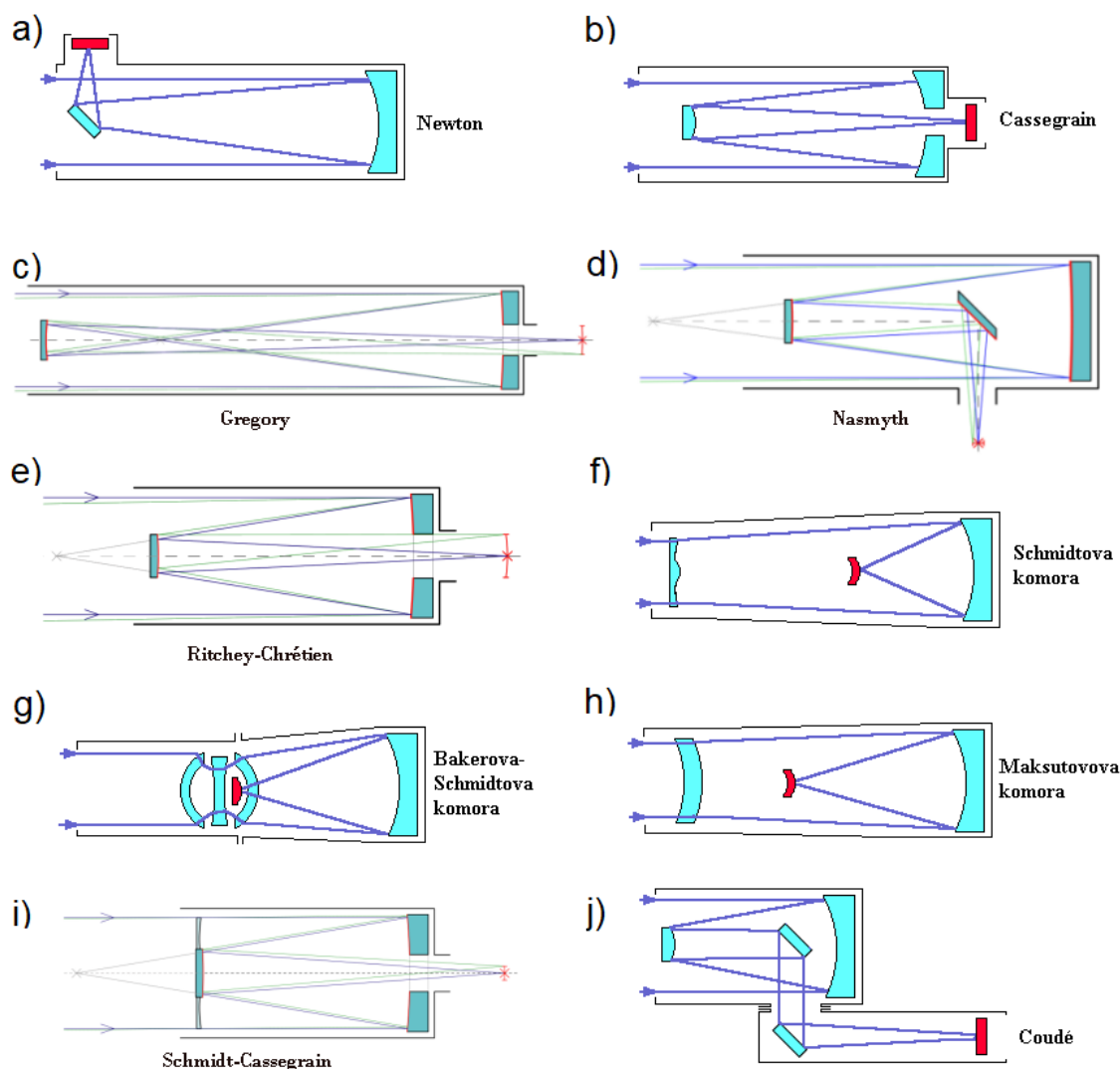
výborné přístroje pro astrofotografii, ale jejich nevýhodou je vyšší pořizovací cena než u reflektorů. Na profesionálních observatořích se používají už jen jako pomocné dalekohledy. Jako hlavní přístroje už se prakticky nepoužívají, protože jsou příliš malé. Největší čočkový dalekohled v provozu byl 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 jednoduchou výrobou a tím 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 zr-



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

cadla. Primární má, stejně jako Newtonův přístroj, tvar rotačního paraboloidu ale se středovým otvorem, kterým paprsky po odrazu na sekundárním hyperbolickém 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>6</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 hyperbolické, 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 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), který má na rozdíl od klasického „cassegraina“ kulové primární zrcadlo a korekční desku. Pro malé rozměry a rozumný poměr cena/výkon je velmi oblíben mezi amatérskými astronomy zejména ve Spojených státech.

<sup>6</sup>Čti „riči-krétien“.



### 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>7</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>8</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.

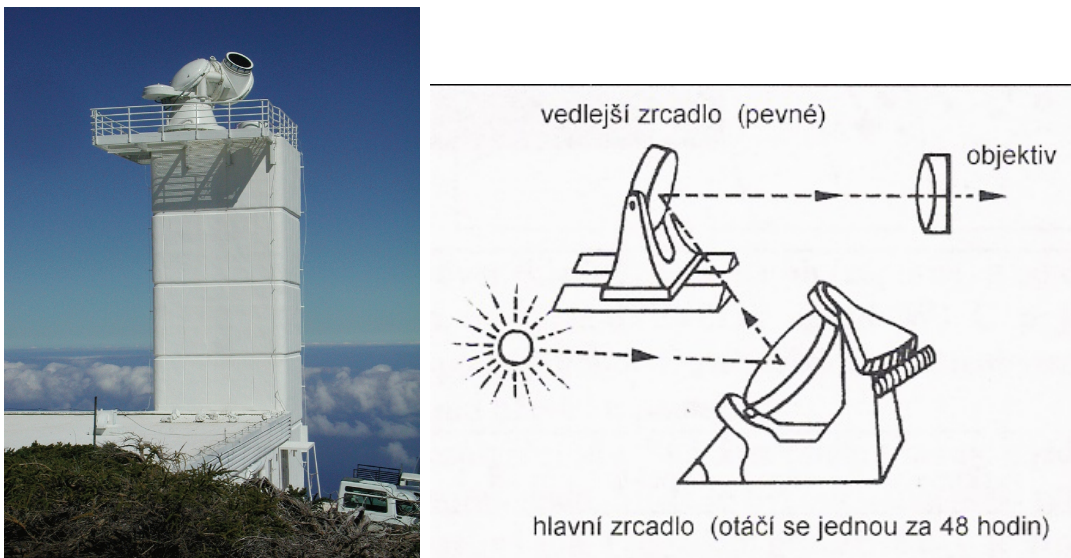
Pro výzkum Slunce je důležité také pozorování svrchní vrstvy sluneční atmosféry, tzv. koróny i v době mimo sluneční zatmění. Sluneční kotouč je ale příliš zářivý a je třeba jej zamlouvat. V roce 1930 sestrojil Bernard Lyot přístroj nazvaný **koronograf**. Pokud je korunograf vybaven filtrem H $\alpha$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

Dnešní velké sluneční observatoře používají speciální *sluneční dalekohledy*, které mají velkou ohniskovou vzdálenost a jsou někdy instalovány vodorovně, svisle nebo šikmo. Světlo Slunce do slunečních věží přivádí tzv. *celostat* (někdy také *coelostat* nebo *heliostat*), který tak nahrazuje otáčení dalekohledu (obrázek 10.10 vpravo). Celostat vy-

<sup>7</sup>Čti kudé.

<sup>8</sup>Galileo Galilei pozoroval Slunce dalekohledem, jen když bylo těsně nad obzorem, ale i tak byla tato pozorování nepřijemná. Záhy objevil možnost pozorování projekcí a nadále už využíval tuto metodu. 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>9</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).

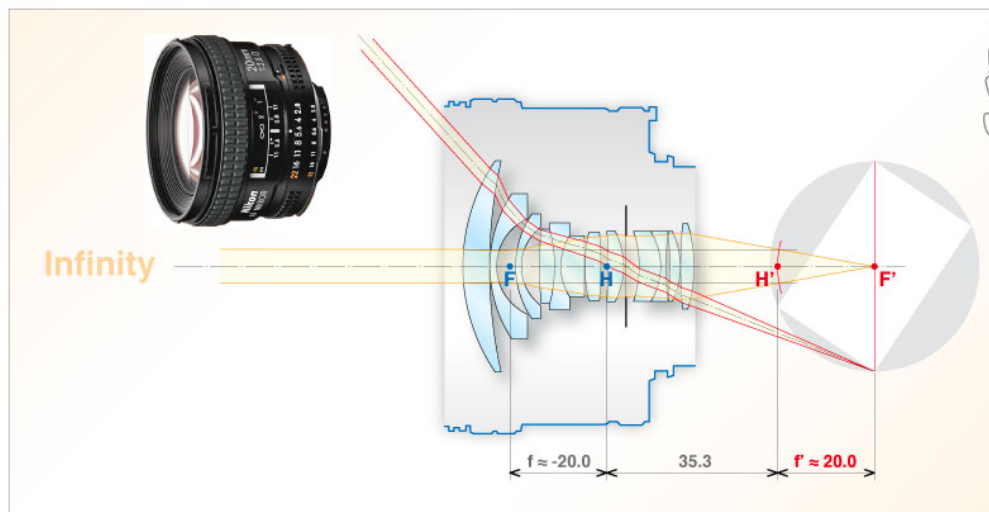
nalezl v roce 1895 Gabriel Lippmann. Tvoří jej dvě rovinná zrcadla. Primární zrcadlo se otáčí rovnoměrně kolem světové osy jednou za 48 hodin. Od něj se odráží paprsky na pevné sekundární zrcadlo a po odrazu jsou namířeny do slunečního dalekohledu (viz obrázek 10.10).

## 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.

### 10.4.1 Zvětšení dalekohledu

Laickou veřejností nejvíce oceňovaným a doslova magickým parametrem dalekohledu je jeho zvětšení. Odhlédněme 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,



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).

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

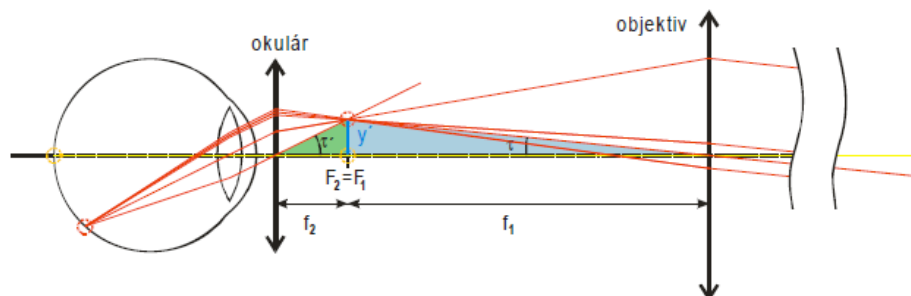
$$\frac{y}{f_{\text{obj}}} = \text{tg } \tau = \tau; \quad \frac{y'}{f_{\text{ok}}} = \text{tg } \tau' = \tau', \quad (10.1)$$

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>10</sup>. Tento vztah jsme sice odvodili pro Keplerův dalekohled, ale je zcela

<sup>10</sup>Uprášení nalezne čtenář v kapitole 10.5.1 věnované okulárům.



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

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.

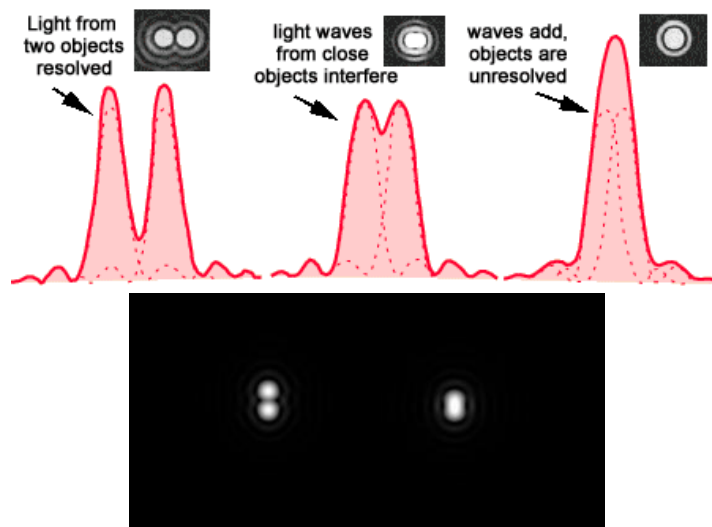
### 10.4.2 Světelnost dalekohledu

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>11</sup> Chceme-li pozorovat nebo fotografovat nějaký plošný objekt (mlhovinu, galaxii), potřebujeme dalekohled s velkou světelností nad asi 1:5 (tedy např. 1:4, 1:3). Matematika je zde jasná. Pokud zvětšíme průměr objektivu dvakrát, zvětší se množství zachyceného světla čtyřikrát. Jestliže ale zvětšíme na dvojnásobek ohniskovou vzdálenost, 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.

### 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,

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



Obrázek 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/>.

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>12</sup>

$$\delta'' = 206265 \frac{1,220\lambda}{D}, \quad (10.3)$$

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

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

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

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

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

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/CMOS kamer můžeme rozlišovací schopnost dalekohledu vyjádřit 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

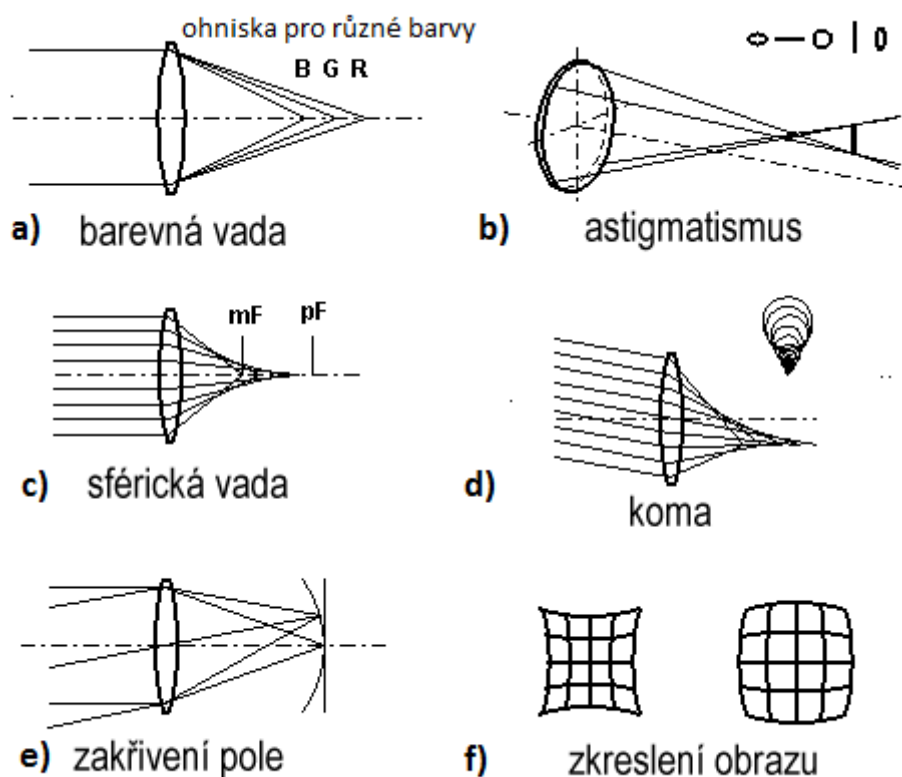
$$\Delta["] = \frac{206\,265 \cdot s}{f} \quad (10.5)$$

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.

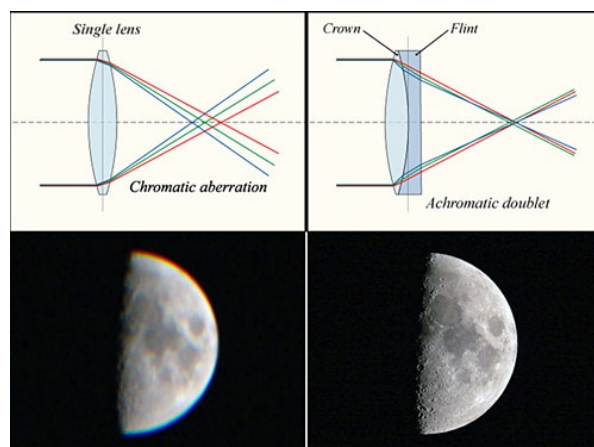
#### 10.4.4 Optické vady dalekohledů

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.

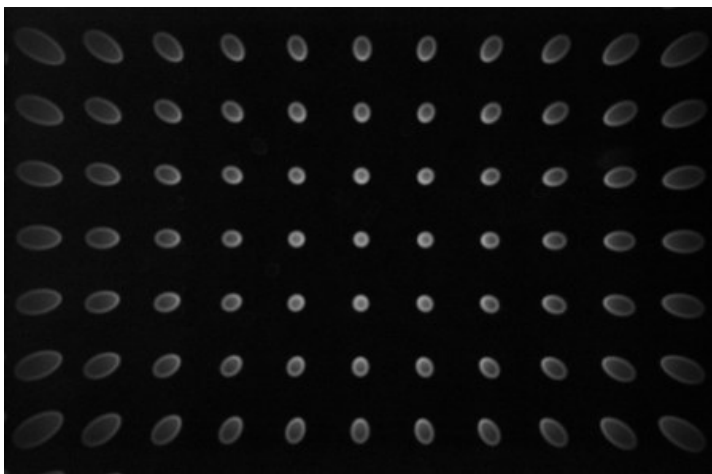
- **Barevná vada** (obrázky 10.14a, 10.15) – Každá barevná složka bílého světla se láme pod jiným úhlem. Jinak řečeno, index lomu skla čočky je různý pro každou barvu, závisí na vlnové délce. Ohniska kratších vlnových délek jsou blíž čočce, než ohniska delších vlnových délek. Pokud by měl dalekohled 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 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



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 dvojitou čočkou. Ohnisko je společné pro modré a červené světlo, ohnisko zeleného světla je lehce posunutě. 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>.

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.

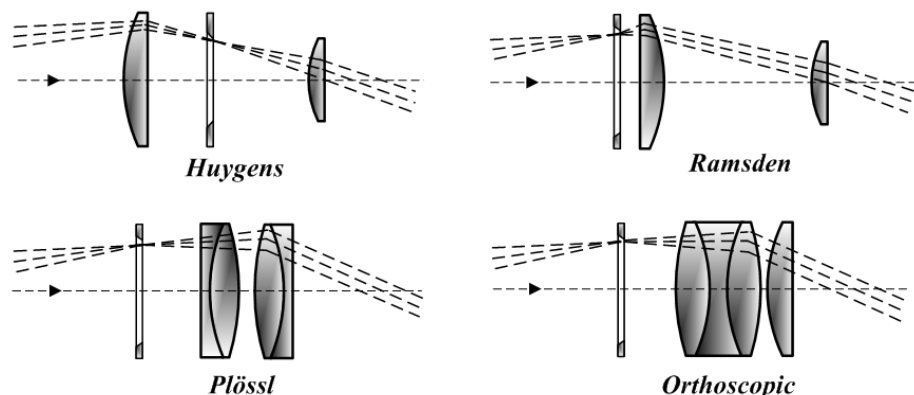
## 10.5 Příslušenství dalekohledů

### 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 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





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.

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 dalekohled 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>14</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° – 50° až po 55° – 90° pro širokouhlé okuláry.

## 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

<sup>14</sup>Zkratka FOV pochází z anglického „field of view“.

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 pohltnou vše ostatní. O potlačení rozptýleného rušivého záření například sodíkových nebo rtuťových výbojek městského osvětlení se starají 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>15</sup> Bodový detektor může měřit v daném okamžiku jen jediný údaj, například jasnost jedné hvězdy v clonce fotometru. Řada bodových detektorů tvoří lineární detektor. V minulosti se takové detektory využívaly zejména pro záznam spekter. Nejrozšířenější jsou dnes plošné detektory – CCD případně CMOS<sup>16</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.

Detektory se liší nejen stavbou, ale také dalšími parametry. Pro zachycení slabých zdrojů záření je u detektoru rozhodující tzv. **kvantová účinnost** QE<sup>17</sup>, která pro danou vlnovou délku ukazuje, jaké procento z fotonů dopadajících na detektor je detektorem zaregistrováno (viz obr. ??). Jinak řečeno, jaká část z dopadajících fotonů je schopna

<sup>15</sup>V neoptické astronomii dokonce pracujeme i s detektory trojrozměrnými.

<sup>16</sup>Zkratka CCD vychází z anglického „Charge Coupled Device“, v překladu nábojově vázané prvky. CMOS značí „Complementary Metal–Oxide–Semiconductor“

<sup>17</sup>Zkratka QE vychází z anglického výrazu „quantum efficiency“.

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>18</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>19</sup> Při srovnání různých detektorů dnes vítězí CCD a CMOS čipy, které mají sice ve většině případů menší dynamický rozsah a nejkratší expozice pouze kolem setiny sekundy, na druhou stranu mohou ty nejlepší čipy 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 (Vera C. Rubin Observatory) v Chile bude vybaven CCD kamerou 3.2 Gpx!<sup>20</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 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

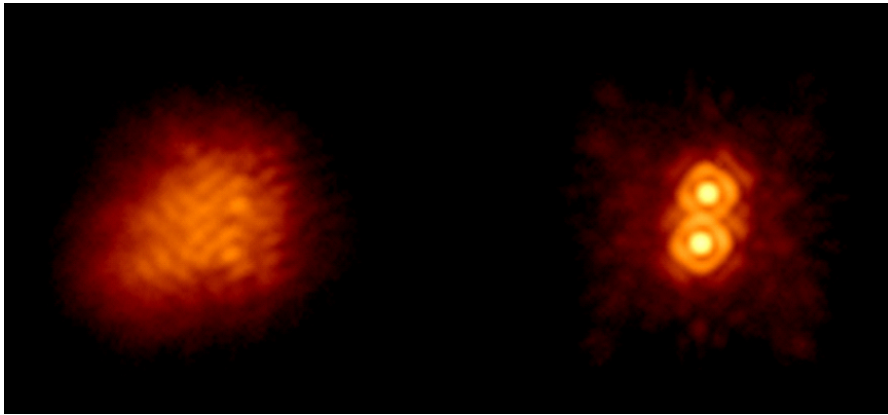
<sup>18</sup>Pod pojmem osvětlení zde rozumíme součin dopadajícího toku záření a expoziční doby.

<sup>19</sup>V některých případech se hodnotí jen použitelný dynamický rozsah, tedy jen lineární oblast charakteristické křivky detektoru.

<sup>20</sup>Pro srovnání, první obrazový čip měl 10 kpx a dnešní fotoaparáty v mobilních telefonech mají běžně desítky Mpx.

způsobuje změny lomu paprsku na rozhraní vrstev vzduchu. Výsledný bodový obraz hvězdy se najednou rozmyje do skvrny a její velikost je dána pozorovacími podmínkami, zejména 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 zesponu 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 IW 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.

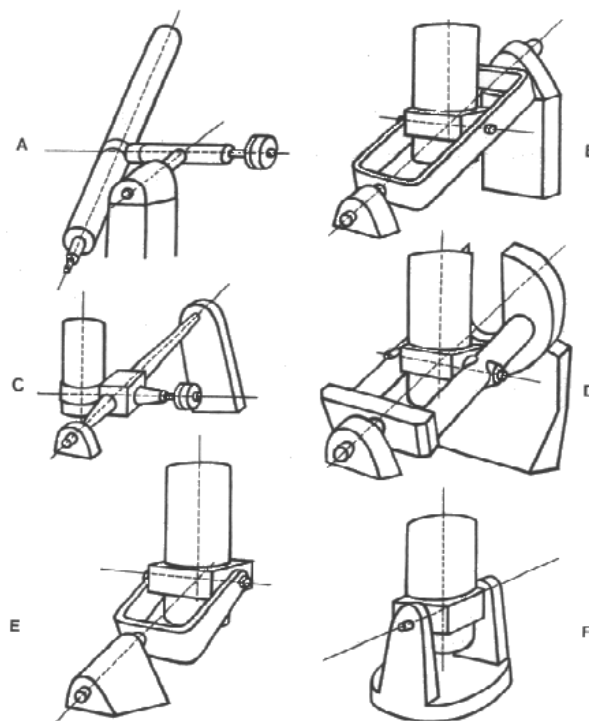
Příkladem azimutální montáže oblíbené zejména mezi amatérskými astronomy je Dobsonova montáž (viz obrázek 10.19), která je velmi nízká a tím i značně stabilní. Proto je vhodná zejména pro dalekohledy typu Newton. Používá se zejména pro vizuální pozorování. Umožňuje pracovat i s velkými zrcadly. Azimutální montáž v jiném provedení nebo s motorickými pohony na obě osy a příslušným programovým vybavením by měla cenu 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.



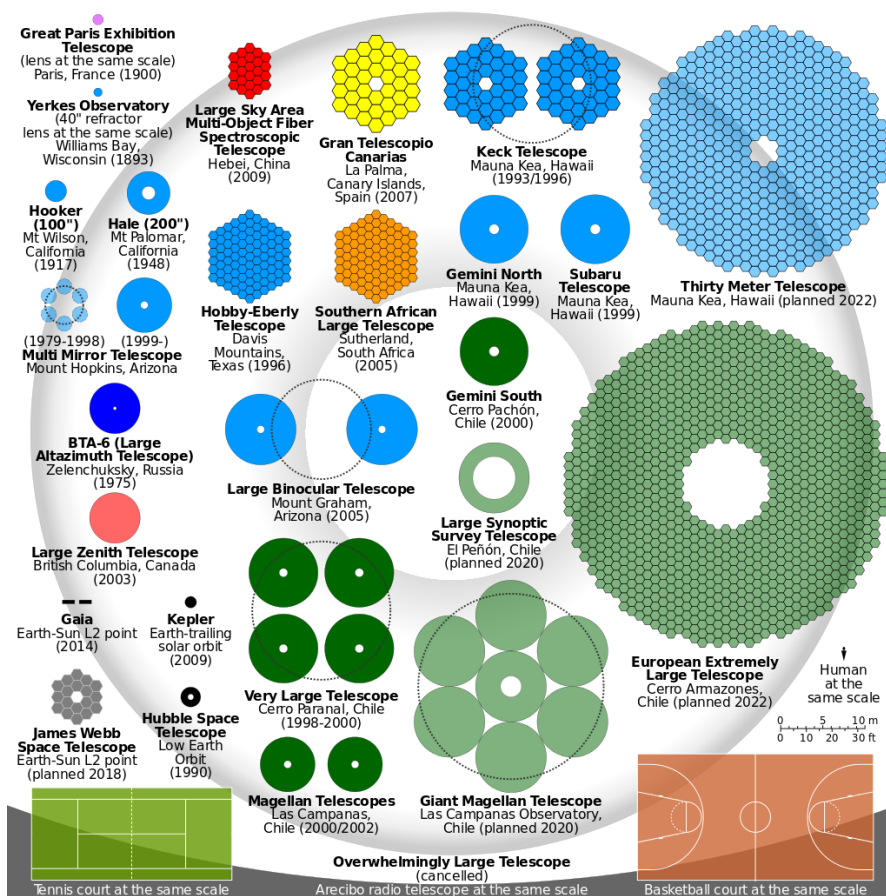
Obrázek 10.20: Montáže dalekohledů. A – E. Paralaktické montáže. A. Německá; B. Anglická rámová; C. Anglická osová; D. Podkovová; E. Vidlicová. F. Azimutální montáž. Převzato z Grygar et al. (1979).

## 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 a dopravou, 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: Srovnání velikostí zrcadel největších dalekohledů světa. Zdroj: wikipedia.

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 deseti-metrový 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 2027.<sup>21</sup>

<sup>21</sup>Ani tento projekt se neubráníl škrtkům, původně zamýšlený teleskop měl mít průměr neuvěřitelných 100 metrů!

Tabulka 10.1: Největší současné 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	jediné	Japonsko	Mauna Kea, Hawaii, USA	1999
VLT UT1 (Antu)	8,2 m	jediné	země ESO, Chile	Paranal, Chile	1998
VLT UT2 (Kueyen)	8,2 m	jediné	země ESO, Chile	Paranal, Chile	1999
VLT UT3 (Melipal)	8,2 m	jediné	země ESO, Chile	Paranal, Chile	2000
VLT UT4 (Yepun)	8,2 m	jediné	země ESO, Chile	Paranal, Chile	2001
Gemini North (Gillett)	8,1 m	jediné	USA, UK, Kanada, Chile, Austrálie, Argentina, Brazílie	Mauna Kea, Hawaii, USA	1999
Gemini South	8,1 m	jediné	USA, UK, Kanada, Chile, Austrálie, Argentina, Brazílie	Cerro Pachón (CTIO), Chile	2001
MMT	6,5 m	jediné	USA	F. L. Whipple Obs., USA	2000
Magellan 1 (Walter Baade)	6,5 m	jediné	USA	Las Campanas Obs., Chile	2000
Magellan 2 (Landon Clay)	6,5 m	jediné	USA	Las Campanas Obs., Chile	2002
BTA-6	6 m	jediné	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	jediné	USA	Palomar Observatory, USA	1948

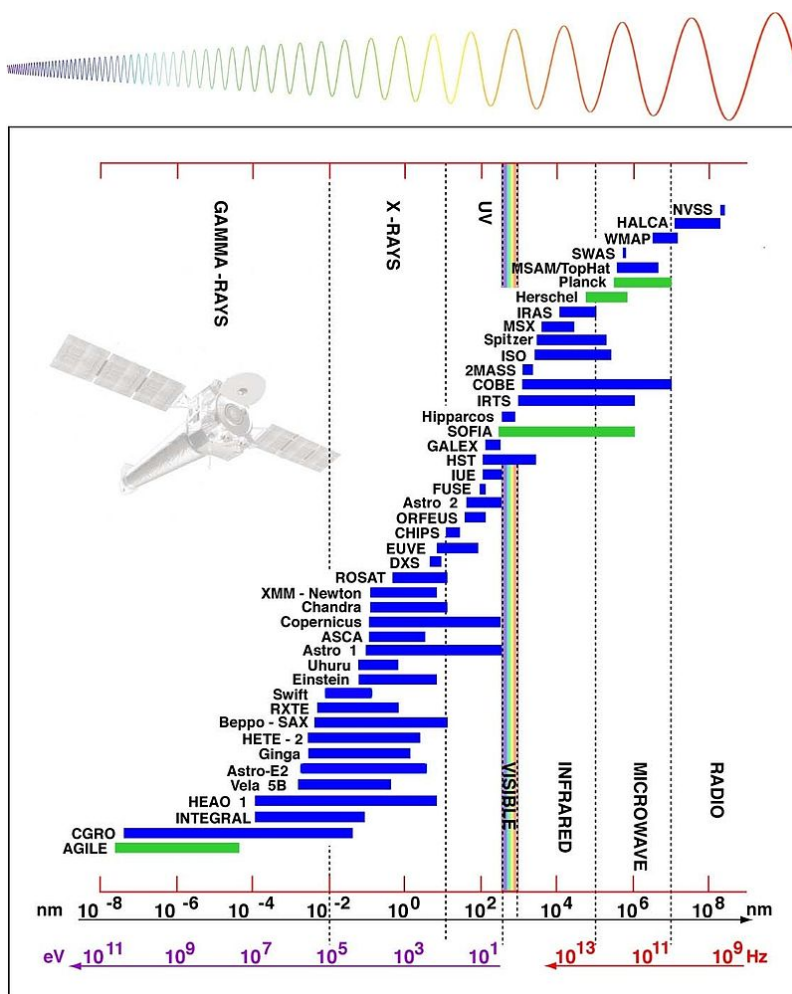
Tabulka 10.2: Dalekohledy ve výstavbě, se schválenou realizací, plánované.

Název	Průměr [m]	Rok dokončení	Poznámka
Schválené projekty, ve výstavbě			
European Extremely Large Telescope	39.3 m	2027	ve výstavbě
Thirty Meter Telescope	30 m	2028	
Giant Magellan Telescope	7x8.4 m zrcadel	2025	= 24.5 m průměr
Large Synoptic Survey Telescope	8.4 m	2023	2022 první světlo
Pan-STARRS	4 x 1.8 m		2 už kompletní
DAG Telescope	4 m	2022	Turecko
Magdalena Ridge Observatory Telescope Array	10 x 1.4 m		
San Pedro Martir Telescope (SPMT)	6.5 m		ve výstavbě
International Liquid Mirror Telescope	4 m		ve výstavbě

## 10.7 Kosmické observatoře

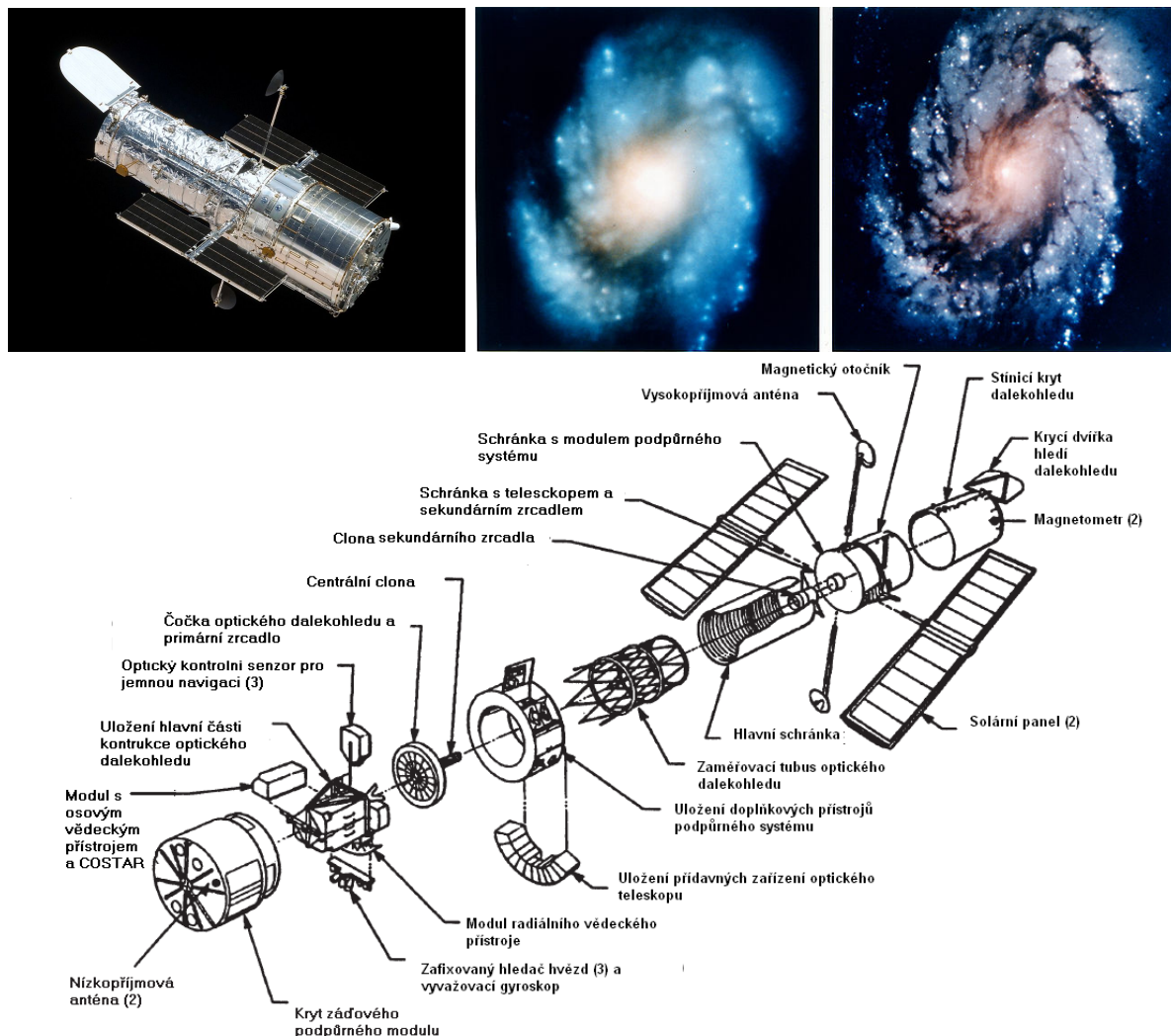
Pozemské observatoře mají své výhody i nevýhody. Ve srovnání s přístroji na družicích jsou pozemské dalekohledy srovnatelné velikosti podstatně levnější. Na druhou stranu je tu výrazné omezení působené zemskou atmosférou, která nám znemožňuje pozorovat v určitých oblastech spektra a v těch, kde nám pozorování 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





Obrázek 10.22: Významné astronomické observatoře v kosmu do r. 2005. Zdroj: <https://www.wikiwand.com>

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 začala reálně uvažovat v roce 1962. Průměr uvažovaného dalekohledu se zejména z finančních důvodů neustále zmenšoval, ale konečně byl projekt i za spoluúčasti Evropské



Obrázek 10.23: 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.

kosmické agentury v roce 1977 schválen. Dalekohled<sup>22</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 tisíc milimetrů. Nepřesné vybroušení se

<sup>22</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.

Tabulka 10.3: Výběr nejvýznamnějších astronomických družic.

Název	Start	Konec mise	Stát/organizace	Obor záření
Hipparcos	8. 8. 1989	III. 1993	ESA	V
COBE	18. 11. 1989	23. 12. 1993	USA	M
EUVE	6. 2. 1992	30. 1. 2001	USA	U
ISO	17. 11. 1995	16. 5. 1998	ESA	I
SOHO	2. 12. 1995	–	USA, ESA	U V
RXTE	30. 12. 1995	3. 1. 2012	USA	X
BeppoSAX	30. 4. 1996	30. 4. 2002	Itálie	X
FUSE	24. 6. 1999	12. 7. 2007	USA, Francie, Kanada	U
Chandra	23. 7. 1999	–	USA	X
Newton XMM	10. 12. 1999	–	ESA	X
WMAP	30. 6. 2001	20. 10. 2010	USA	M
Integral	17. 10. 2002	–	Rusko, ESA	G
GALEX	28. 4. 2003	28. 7. 2013	USA	U
MOST	30. 6. 2003	III. 2019	Kanada	U V
Spitzer	25. 8. 2003	30. 1. 2020	USA	I
Swift	20. 11. 2004	–	USA	G X U V
Akari	21. 2. 2006	24. 11. 2011	Japonsko	I
CoRoT	27. 12. 2006	17. 6. 2014	Francie	U V
Kepler	7. 3. 2009	30. 10. 2018	USA	V
Herschel	14. 5. 2009	29. 4. 2013	ESA	I
Planck	14. 5. 2009	23. 10. 2013	ESA	R
WISE	14. 12. 2009	II.2011-VII.2013 hibernace	NASA	I
GAIA	19.12.2013	–	ESA	V
LISA Pathfinder	3. 12. 2015	30. 6. 2017	ESA	gravitační vlny
TESS	18. 4. 2018	–	NASA	V I
CHEOPS	18. 12. 2019	–	ESA	V
DAMPE (Wukong)	17. 12. 2015	–	Čína	detekce částic
GRBAlpha	22. 3. 2021	–	několik zemí (za ČR MU)	G

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.

podarilo 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 2020 překročil překročil 18 000!<sup>23</sup> Data i nádherné snímky jsou k dispozici na řadě internetových serverů.<sup>24</sup>

Nástupcem HST se stal Vesmírný dalekohled Jamese Webba (JWST; James Webb Space Telescope) se zrcadlem o velikosti 6,5 metru, který pracuje zejména v oblasti dlouhovlnného infračerveného spektra. Po řadě odkladů byl vypuštěn v prosinci 2021. Už první snímky předčily očekávání. Detaily celé mise a snímky jsou k dispozici na adrese <https://webb.nasa.gov/>.

Nicméně kosmický výzkum nelze omezit jen na jeden nebo dva satelity. V uplynulých desetiletích bylo do vesmíru vysláno několik desítek astronomických družic (obrázek 10.22). Mezi ty nejznámější, pracující zejména ve viditelné oblasti spektra, patří astro-metrická družice Hipparcos, případně fotometrické družice MOST, CoRoT a zejména sa-

<sup>23</sup>Aktuální stav lze najít na <https://archive.stsci.edu/hst/bibliography/pubstat.html>.

<sup>24</sup>Snímky z HST lze najít například na <http://www.nasa.gov/hubble/>, <http://hubble.nasa.gov/>, <http://hubblesite.org/>, <http://www.spacetelescope.org/>

telit Kepler, který výrazně rozšířil naše znalosti o exoplanetách i proměnných hvězdách. Současným velkým projektem Evropské kosmické agentury je družice GAIA se dvěma zrcadly 1,45 m × 0,5 m, která má poskytnout velmi přesná měření jasnosti a polohy obrovského množství hvězd. První kompletní fotometrickou přehlídku hvězdné oblohy v kosmu nyní provádí od r. 2018 družice TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite).

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. Připomeňme si i jednu z nejmenších – nanosatelit GRBAlpha, připravený týmem Masarykovy univerzity pod vedením Norberta Wernera, který již detekoval několik gama záblesků.

## 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

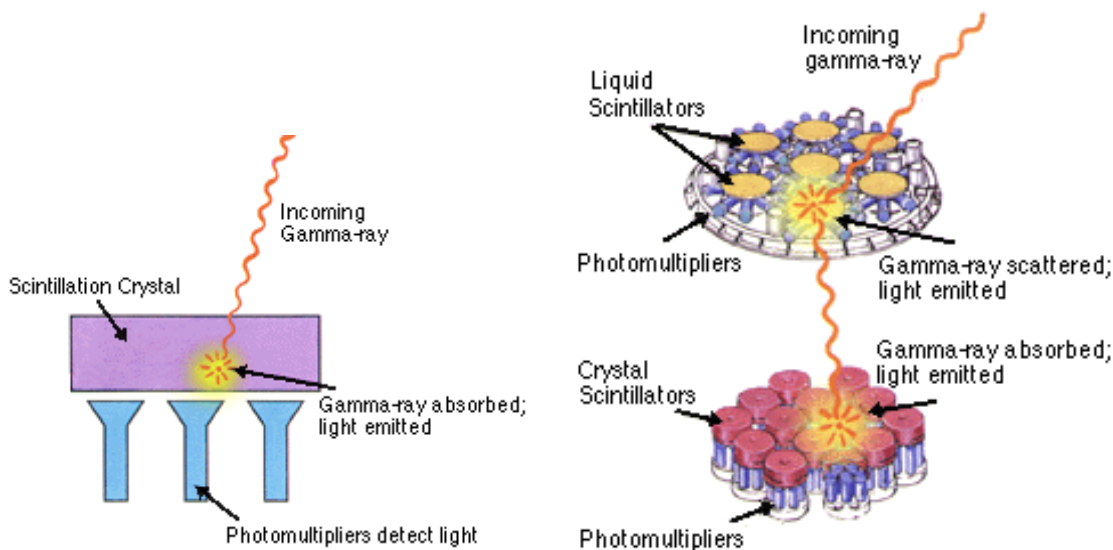
V kapitole o zdrojích našich informací o okolním vesmíru jsme připomněli, že kromě tradiční optické části elektromagnetického spektra můžeme využívat pro studium vesmíru i další části spektra jako infračervenou, rádiovou, ultrafialovou, rentgenovou, případně oblast záření gama. Ale nejen to. Významnou 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 nepřístupná, 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>. 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 anti-hmotou 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-), Neil Gehrels Swift Observatory (dříve Swift Gamma-Ray Burst Mission, 2004-), Fermi Gamma-ray Space Telescope (FGST, dříve GLAST, 2008-) a další. Nejnovějším a současně nejmenším přírůstkem do rodiny těchto satelitů je nanosatelit připravený konsorciem v čele v týmem doc. Wernera z Masarykovy univerzity, který startoval na jaře 2021.

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.

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



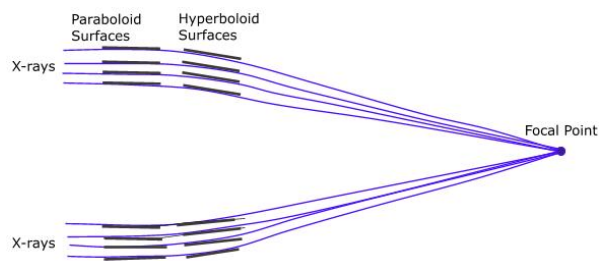
Obrázek 11.1: Scintilační detektor. Schéma dalekohledu využívajícího Comptonův rozptyl. ([http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/how\\_11/gamma\\_detectors.html](http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/how_11/gamma_detectors.html)).

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 observatoří a optických dalekohledů na taková pozorování je celá řada, například H.E.S.S., VERITAS, MAGIC, CANGAROO III nebo HEGRA. Nově k nim v r. 2021 přibýly i dva dalekohledy SST (Small-Sized Telescope) o průměru primárního zrcadla 4,3 metru na Astronomickém ústavu v Ondřejově. Jedná se o jeden z prototypů pro budoucí observatoř Cherenkov Telescope Array (CTA) budovanou v Chile a na Kanárských ostrovech.

## 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. Historie rentgenové astronomie se ale začala psát až 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

<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>.

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 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.

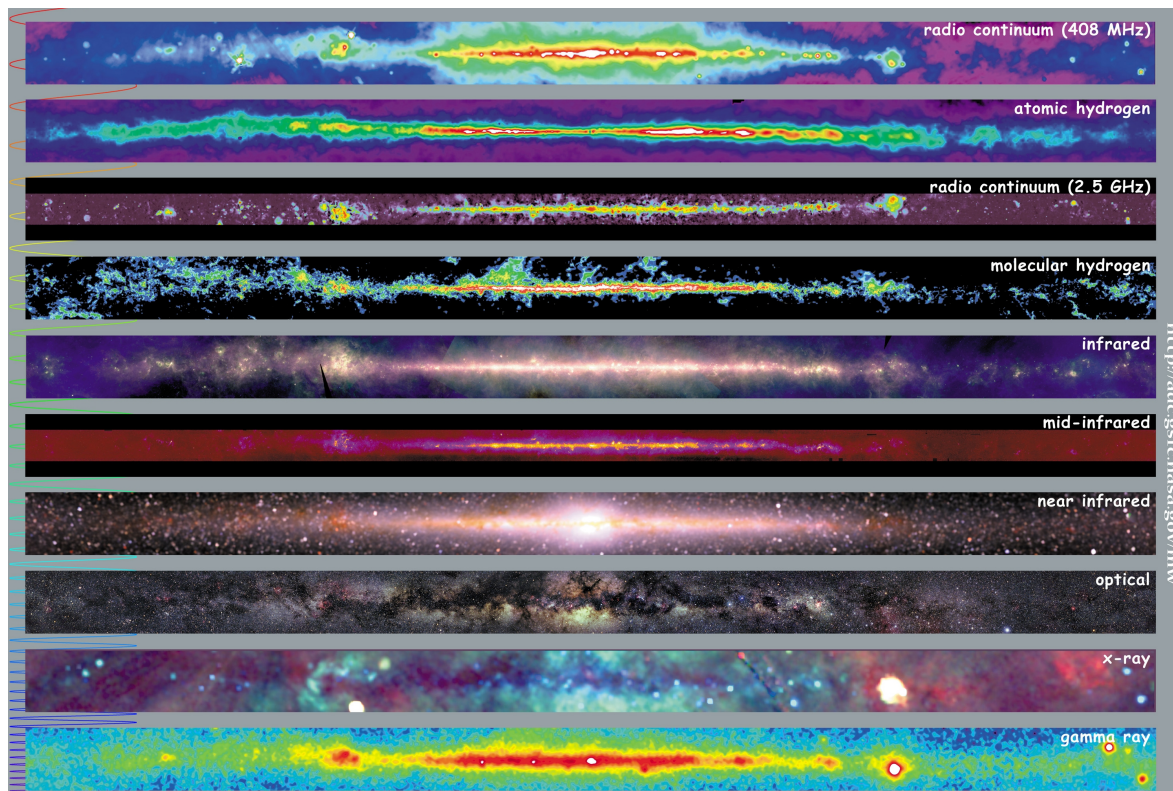
V posledních desetiletích byla vypuštěna řada úspěšných rentgenových družic jako například ROSAT (1990-2011), Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE, 1995-2012), Chandra (1999-), X-ray Multi-Mirror Mission-Newton (1999-), nebo již dříve zmiňované družice INTEGRAL (2002-) a Neil Gehrels Swift Observatory (2004-). 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 Explo-

rer, 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 čísnké 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, resp. infračervené části spektra. V ultrafialové oblasti se nejvíce projevují horké mladé hvězdy nebo obnažená jádra starých hvězd. 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. Na druhou stranu, dostatečně citlivý detektor infračerveného záření pro sledování hvězd se podařilo vyvinout až počátkem 20. století a skutečné počátky praktické infračervené astronomie 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. Pro vzdálenější infračervenou oblast spektra pak bylo nutné vyvinout 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>.

Některé infračervené dalekohledy jsou začleněny do astronomických interferometrů. Při použití společně s adaptivní optikou mohou infračervené interferometry dosáhnout vysokého úhlového rozlišení. Největšími dalekohledy pracujícími i jako součástí interferometru jsou dva 10metrové dalekohledy na Keckově observatoři nebo čtyři 8,2metrové dalekohledy ESO na Paranal.

Z kosmických projektů infračervené astronomie jmenujme alespoň satelity a přístroje nové generace jako HST/NICMOS (2009-), SIRTf (Space Infrared Telescope Facility), dnes Spitzer Space Telescope (2003-2020), nebo WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer, 2009-)<sup>4</sup> 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. Hned první infračervená 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 planet, jejich měsíců, trpasličích planet, planetek či komet. 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).

Velkým odvětvím, kde se výrazně uplatňují infračervené družice, je i výzkum exoplanet. Ty mají být konec konců i jedním z hlavních cílů pro JWST.

---

<sup>3</sup>Přehlídka *Two Micron All Sky Survey* využívala v letech 1997 - 2001 dva robotické dalekohledy – jeden na Mt. Hopkins, USA a druhý na Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO), Chile. Oba pozorovaly 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/>.

<sup>4</sup>Družice byla v rozmezí únor 2011 až červenec 2013 hibernována. Od srpna znovu pracuje pod označením NEOWISE.

## 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, který byl vlastně po zhruba deset let jediným amatérským radioastronomem světa. Velký rozvoj rádiové techniky je spojen s obdobím druhé světové války. Po ní se rádiová technika uplatnila i v astronomii. Připomeňme, že právě radioastronomům vděčí svět za WiFi, neboť pro správné fungování bezdrátového spojení počítačů a telefonů se využívají metody a postupy původně vyvinuté pro radioastronomii (Hamaker et al., 1977). J. O'Sullivan a jeho tým z australské vědecké agentury CSIRO na ně získal v roce 1996 patent.

Velkou výhodou radioastronomie je její nezávislost na počasí a denní či noční době. Naproti tomu výsledek měření je třeba nejdříve vizualizovat, nevidíme jej přímo jako třeba v optické astronomii. Podle způsobu využití rádiových vln můžeme radioastronomii rozdělit na:

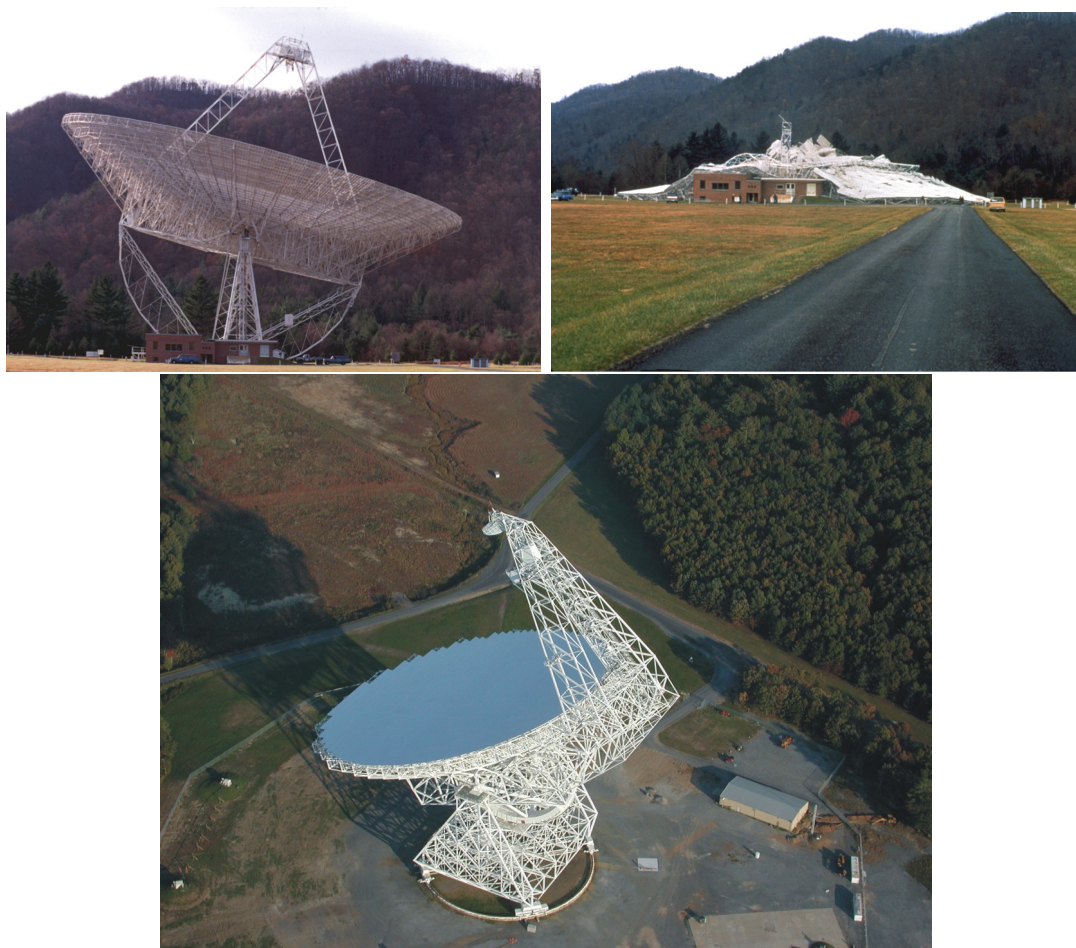
- pasivní, která jen analyzuje pasivně přijímané rádiové vlny z vesmíru. Tímto způsobem lze studovat jak tělesa Sluneční soustavy (např. Slunce, Jupiter), tak i hvězdy, dvojhvězdy, mlhoviny, zbytky supernov, planetární mlhoviny, molekulová oblaka nebo galaxie, galaktická jádra i vzdálené kvazary.
- aktivní (radarová astronomie). Rádiový signál 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 planety.

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

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

kde 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>5</sup> (součást National Radio Astronomy Observatory NRAO, USA) 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. Nacházela se v Arecibu na Portoriku (obrázek 11.5a). Na obdobném principu je založen radioteleskop FAST (Five hundred meter Aperture Spherical Telescope) o průměru 500 metrů,

<sup>5</sup>Tento radioteleskop nahradil předchozí 90m anténu, která se vlastní vahou zborčila 15. 11. 1988.



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.

který zprovoznili na jihovýchodě Číny v roce 2016 (obrázek 11.5b). Bohužel radioteleskop v Arecibu překonali nejen čínští stavitelé, ale také zub času a gravitace. 1. prosince 2020 došlo ke zhroutilí konstrukce a zničení celého ikonického přístroje. 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.

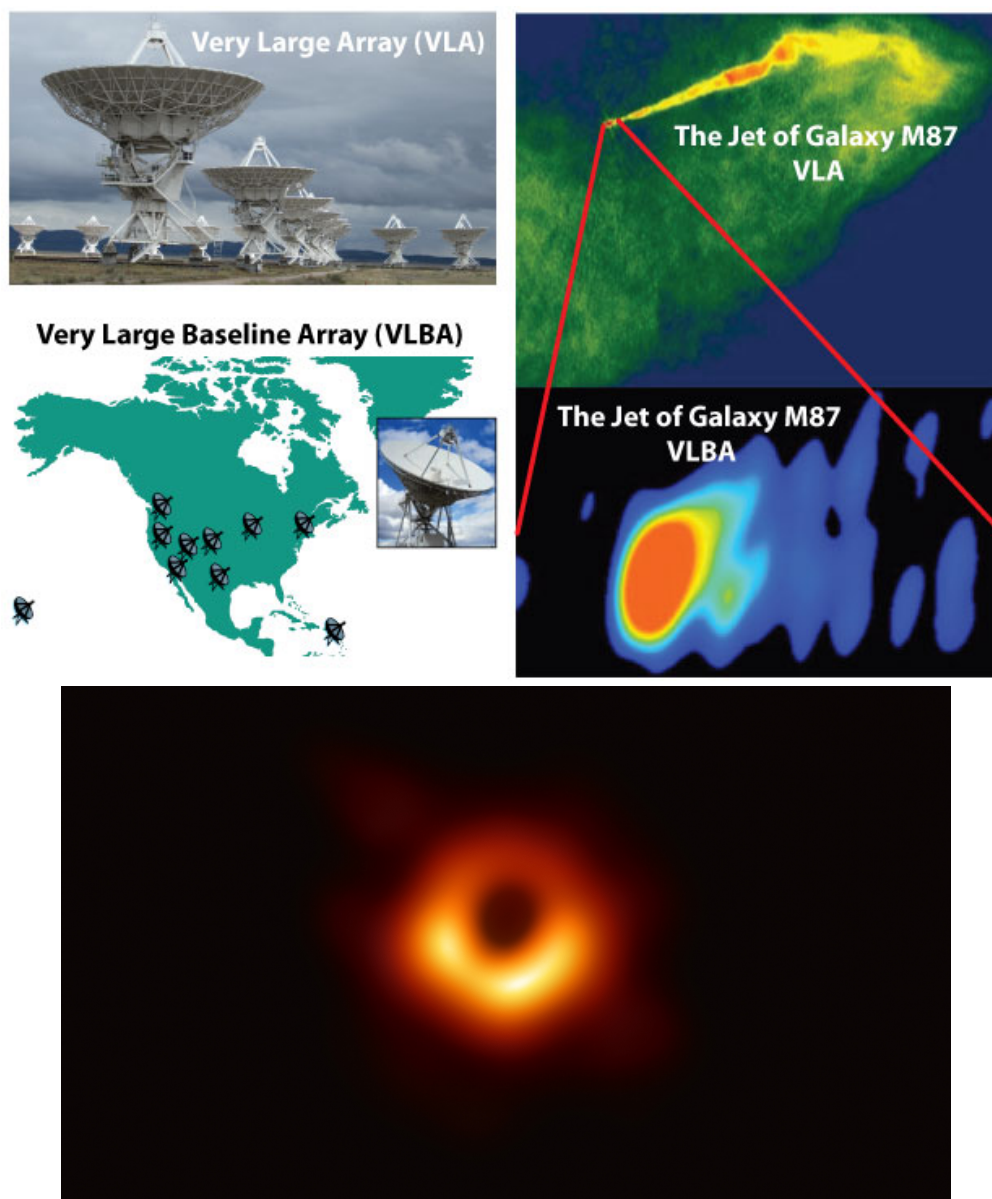
VLBA (Very Long Baseline Array) – 10 teleskopů o průměru 25 m, délka základny až 8611 km.

VLBI (Very Long Base Interferometry) – propojení různých radioteleskopů a jejich soustav po světě a dokonce i na družicích.

ALMA (Atacama Large Millimeter Array) – 66 antén o průměru 12 m a 7 m; největší astronomický projekt současnosti. V 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. EHT (Event Horizon Telescope) – spojení velkých radioteleskopů a jejich soustav po celém světě umožnilo získat první obrázky černé díry v roce 2019.



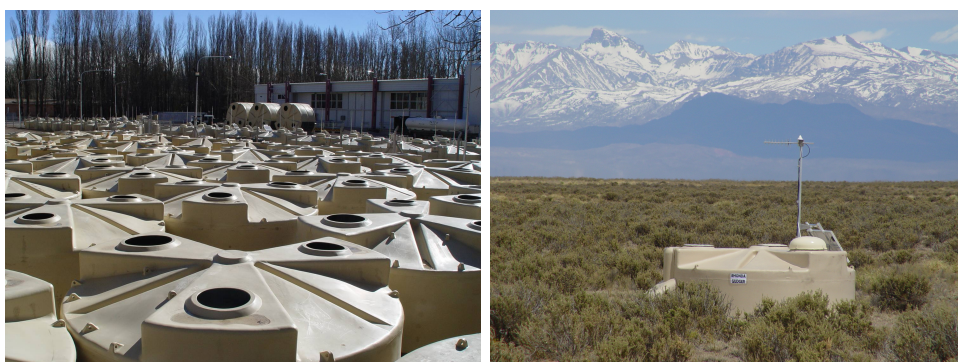
Obrázek 11.6: Nahoře vlevo: radioteleskopy použité v interferometrické soustavě VLA, respektive VLBA. Nahoře vpravo: porovnání výsledků při pozorování výtrysku z galaxie M87. Zdroj: <http://www.erau.edu/>. Dole: První snímek černé díry v centru galaxie M87 pořízený EHT. Zdroj: ESO.

## 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 fyzikálních 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 není zatím zcela jasný. 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. Zakládajícím členem příslušného konsorcia byla i Česká republika. 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, jenže míček je zhruba 40bilionkrát větší. 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 <https://opendata.auger.org/>.



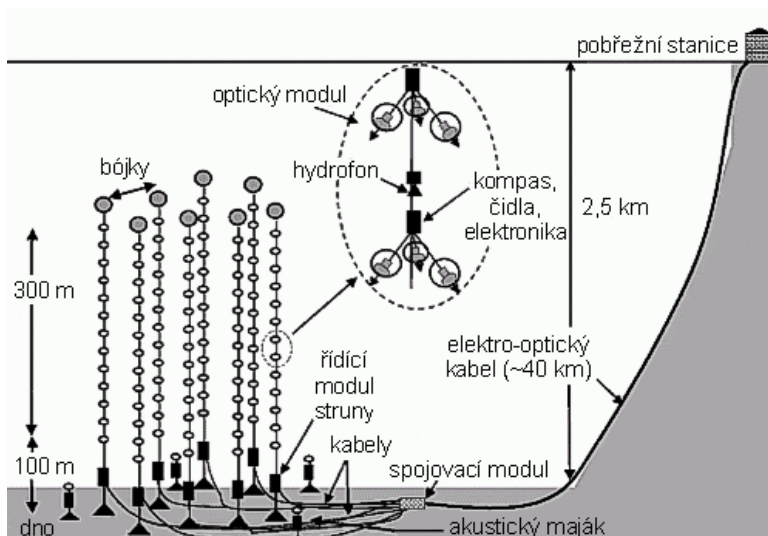
Obrázek 11.7: Observatoř Pierra Augera. Vlevo: Tanky na vodu při přípravě. Vpravo: Jeden z tanků na vodu už zapuštěný do země a připravený k činnosti. Zdroj: <http://www.auger.org>.

### 11.6.2 Neutrinová astronomie

O neutrinech jsme se stručně zmínili v kapitole 7. Zdroji neutrin ve vesmíru, jejich šířením kosmickým prostředím a možnostmi detekce se zabývá neutrinová astronomie. 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).

Vzhledem k vlastnostem neutrin je jejich detekce a studium velice obtížné. 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. Dalšími zdroji jsou pak výbuchy supernov (např. SN1987A), zvláštní typy galaxií tzv. blazary nebo jsou přímo součástí kosmického záření.



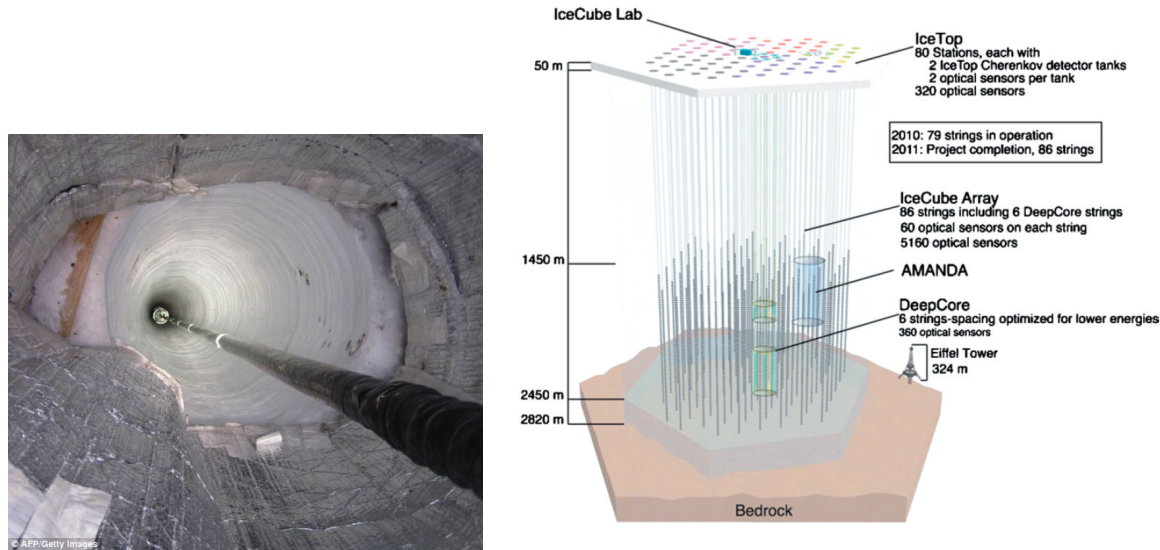
Obrázek 11.8: Schéma neutrinového vodního detektoru v rámci projektu ANTARES. Převzato z <http://www.aldebaran.cz>.

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>6</sup> využívá nádrž s jednou kilotunou těžké vody v hloubce 2 kilometry pod zemí. Japonci v projektu Super-Kamiokande<sup>7</sup> používají v jednom kilometru pod zemí nádrž s průměrem 41 metrů obsahující 50 kilotun superčisté vody. Stěny nádrže jsou pokryty 11 146 fotonásobiči. Jako detekční tekutina se využívá také neon, xenon, galium, helium, tetrachloretylen a další (experimenty SAGE, GALLEX? BOREXINO, DUNE a další). V provozu je i několik projektů, které využívají přirozené nádrže. V rámci podmořských experimentů jako ANTARES, DUMAND, NESTOR, NEMO, KM3NET se do hloubky až několika kilometrů umístí na laně řetězce senzorů (viz obrázek 11.8), které zaznamenávají případnou reakci neutrina s prostředím. 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

<sup>6</sup><https://sno.phy.queensu.ca/>

<sup>7</sup><http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html>

hloubky 2450 metrů umístěny fotonásobiče. Seznam neutrinových experimentů lze najít například na [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_neutrino\\_experiments](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_neutrino_experiments).



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>.

Neutrinová astronomie je velmi náročnou disciplínou, ale zcela nepochybně se vyplácí. Na rozdíl od jiných metod nám umožňuje nahlédnout doslova do hvězdné kuchyně, až do hlubokého nitra hvězd.

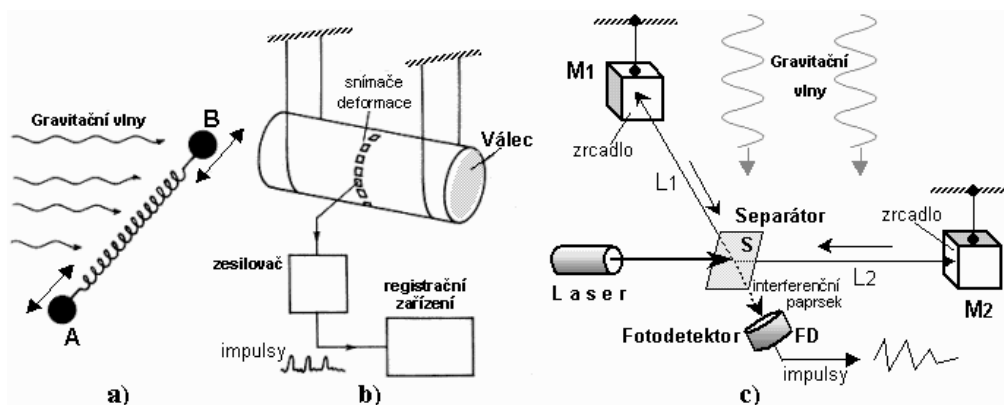
## 11.7 Gravitační vlny

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.

Průkopníkem v oblasti detekce gravitačních vln byl Joseph Weber, který využíval několik zavěšených hliníkových válců o průměru 66 cm a délce 153 cm (obrázek 11.10b). Deformace válce působené nárazem gravitačních vln měla detekovat série piezoelektrických článků. V roce 1972 sice Weber ohlásil úspěšnou detekci gravitačních vln, ale jeho výsledky byly rozporuplné a nebyly přijaty (více například v Ullmann (1986)). První všeobecně uznávané známky existence gravitačních vln tak byly jen nepřímé. Hulse & Taylor (1975) interpretovali zkracování oběžné doby binárních pulsarů, například PSR 1913+16 právě pomocí gravitačních vln. V roce 1993 byli za tento objev odměněni Nobelovou cenou za fyziku.

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 změní 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). Od první detekce bylo do konce roku 2021 zaznamenáno několik desítek gravitačních vln. V případě úkazu GW170817 se dokonce poprvé podařilo detekovat nejen gravitační vlnu, ale také zjasnění v různých oblastech spektra elektromagnetického záření. V této souvislosti se hovoří o počátku mnohobásmové astronomie (multi-messenger astronomy).

Observatoř na detekci gravitačních vln má být zbudována i ve vesmíru. V roce 2015 byla vypuštěna družice 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

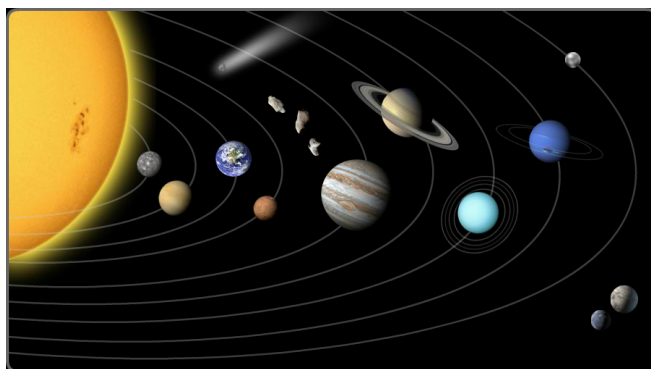
- Cowan, C. L., Jr., Reines, F., Harrison, F. B., Kruse, H. W., & McGuire, A. D. 1956, *Science*, 124, 103
- Cowen, R. 2011, October 5, "Comets take pole position as water bearers". *Nature*.doi:10.1038/news.2011.579
- Dendy, P. P., & Heaton, B., 1999, *Physics for Diagnostic Radiology*. USA: CRC Press. 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
- Hulse, R. A. & Taylor, J. H., 1975, *Astrophysical Journal* 195, L51-L53
- 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. Pojd'me 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 jsou Venuše a 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 roztrdit a definovat.<sup>1</sup> Od roku 2006 tedy máme oficiálně ve Sluneční soustavě mateřskou hvězdu (Slunce), osm planet (Merkur, Venuše, Země, Mars, Jupiter, Saturn, Uran, Neptun), trpasličí planety (například Ceres, Pluto, Makemake, Eris, Haumea), měsíce planet, komety, planetky. Přehled těles Sluneční soustavy lze najít například na <https://solarsystem.nasa.gov/planets/overview/>.

<sup>1</sup>Definice planety a trpasličí planety Sluneční soustavy jsme uvedli v kapitole 6.

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. Svě vlastní jméno nyní získá plutoid s absolutní hvězdnou velikostí<sup>2</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>3</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>4</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 nebo 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>2</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>3</sup>Pluto má sice v katalogu planetek své číslo 134340, ale to se většinou nepoužívá.

<sup>4</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>5</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 milionů 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 milionů let od zapálení reakcí v nitru Slunce, protože následný velmi intenzivní hvězdný vítr „vyfoukal“ ze Sluneční soustavy všechn zbylý materiál zárodečného mračna (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>5</sup>Pro připomenutí a srovnání, Neptun jako nejvzdálenější planeta od Slunce obíhá kolem něj ve vzdálenosti zhruba 30 au.

Jak přesně probíhal vznik naší Sluneční soustavy tedy dosud do detailů nevíme. Objevy extrasolárních planetárních soustav ale stojaté vody mlhovinné teorie z počátku 18. století značně rozvířily. O nových poznatcích, objevech, teoriích si tak můžeme číst poměrně často.

### 12.2.2 Stopy předchozího vývoje na tváři planet

Nejsilněji se na podobě planet podepsaly dva procesy, které probíhaly hned v raných stádiích Sluneční soustavy. Při vzniku planet docházelo k diferenciaci látky podle hustoty a následně byly planety vystaveny intenzivnímu bombardování. Některé navíc prodělaly apokalyptickou srážku s jiným tělesem. 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. V případě 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 Merkuru 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



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

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 4 205 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 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 1,5 km 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.

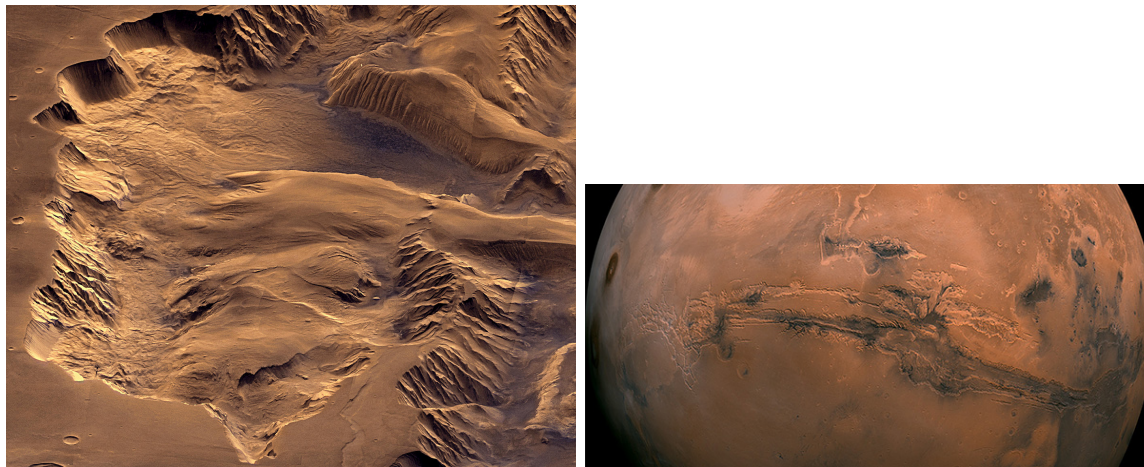


Obrázek 12.3: Impaktní krátery. Vlevo: Barringerův kráter v Arizoně, USA. Vpravo: Měsíční kráter Daedalus. Zdroj: National Geographic, NASA.

## 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>6</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, přece 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.



Obrázek 12.4: Údolí Marineru (Valles Marineris) na Marsu. Zdroj: NASA.

## Praskliny

Tektonické<sup>7</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

<sup>6</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>7</sup>Tektonika je část geologie, zabývající se poruchami zemské kůry, eventuálně kůry dalších těles ve Sluneční soustavě.



Tabulka 12.1: Planety Sluneční soustavy.

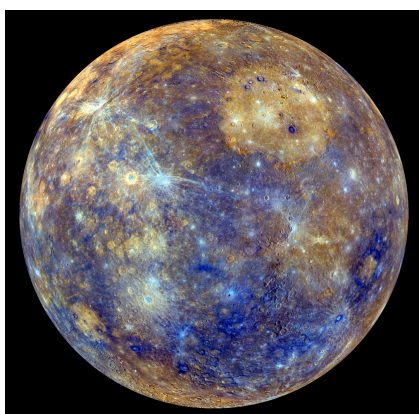
Planeta	Vzdálenost od Sl. [au]	Výstřednost	Doba oběhu kolem Sl.[r]	Rovn.polo- měr [km]	Hmotnost [M <sub>Z</sub> ]	Doba ro- tace [d]	Počet měsíců
Merkur	0,387	0,206	0,241	2 440	0,055	58,646	0
Venuše	0,723	0,007	0,615	6 052	0,815	-243,018	0
Země	1,000	0,017	1,000	6 371	1	0,997	1
Mars	1,524	0,093	1,881	3 390	0,107	1,026	2
Jupiter	5,203	0,048	11,863	69 911	317,828	0,414	79
Saturn	9,581	0,052	29,447	58 232	95,161	0,444	82
Uran	19,231	0,044	84,017	25 362	14,536	-0,718	27
Neptun	30,284	0,013	164,791	24 622	17,148	0,671	14

Poznámky k tabulce:  $M_Z = 5,972 \cdot 10^{24}$  kg, počet přirozených měsíců k roku 2021. Zdroj: <https://solarsystem.nasa.gov/>.

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.

## 12.3 Základní informace o planetách

### 12.3.1 Merkur ☿

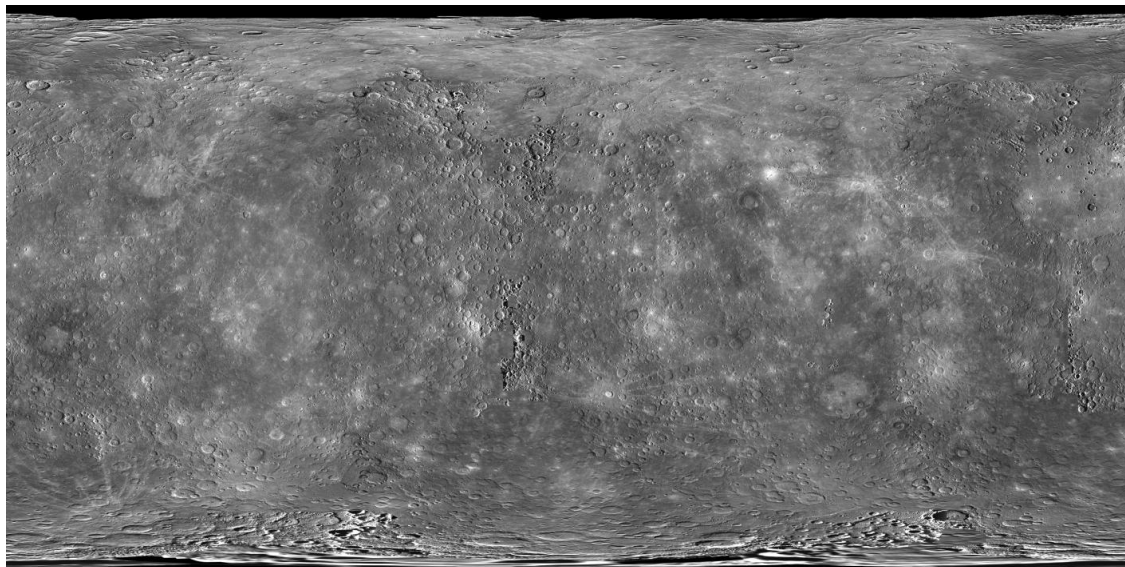


Obrázek 12.5: Snímek Merkuru z širokouhlé kamery sondy Messenger. Zdroj: NASA.

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 tak 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.



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>.

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 severního pólu Merkuru. Na konci roku 2025 by k Merkuru měla dorazit první evropsko-japonská sonda BepiColombo.

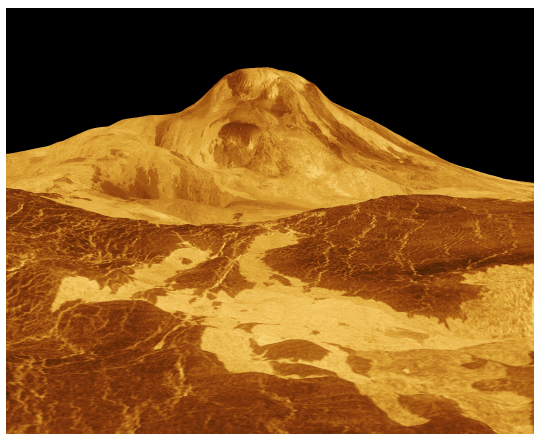
Ze Země je Merkur pozorovatelný jen velmi obtížně, za soumraku. Často zaniká v záři Slunce. V dalekohledu jsou vidět fáze planety. Velmi zřídka lze pozorovat přechod Merkuru přes sluneční disk. Naposledy v roce 2019, další nastanou až roku 2032.

### 12.3.2 Venuše ♀

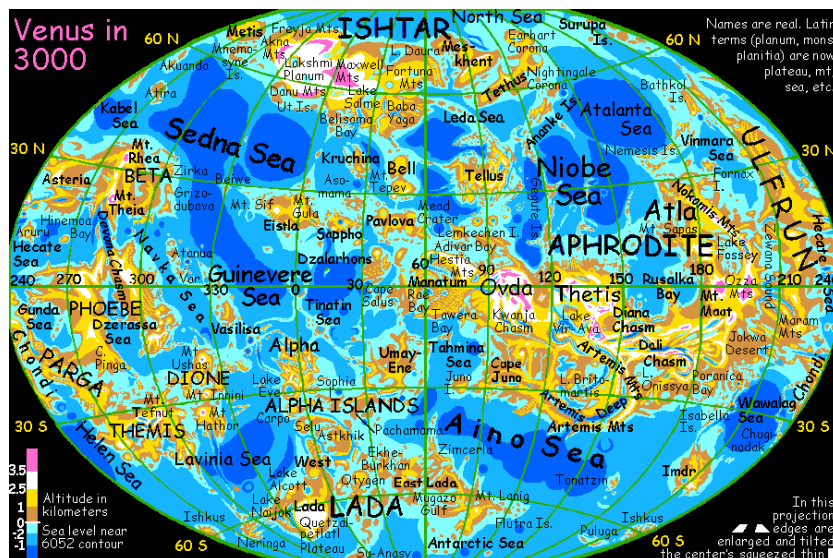


Obrázek 12.7: Snímek povrchu planety Venuše pořízené sondou Veněra 14 v roce 1982. Zdroj: [http://www.mentallandscape.com/C\\_CatalogVenus.htm](http://www.mentallandscape.com/C_CatalogVenus.htm).

O Venuši se často říká, že je sestrou Země. Vždyť je přibližně stejně veliká. Ale rozdíly tu jsou. A veliké! Trajektorie Venuše má nejmenší excentricitu z planet. Kolem Slunce oběhne jednou za 224,7 pozemského dne, ale kolem své osy se otočí za 243,0 dní a navíc opačným směrem než naše Země. 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. Řada studií v posledním desetiletí dokládá přítomnost aktivních vulkánů (například Gülcher et al., 2020).



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 tannými podmínkami (teplota až 500°C, tlak více než devadesátkrát větší než na povrchu Země, agresivní kapičky 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. Kromě několika průletů sond BepiColombo, Solar Orbiter nebo Parker Solar Probe, hostila Venuše v uplynulém desetiletí i dvě družice na oběžné dráze – evropský orbiter Venus Express a japonský Akatsuki.

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>8</sup> se opravdu mnohdy třpytí jako drahokam. V dalekohledu ale uvidíme planetu v různých fázích (obrázek 12.10).



Obrázek 12.10: Fáze Venuše, jak je zaznamenal Richard Addis v období 27. 2. až 14. 5. 2020. Astronomický snímek dne 21.5.2020. Zdroj: <https://apod.nasa.gov>.

### 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.

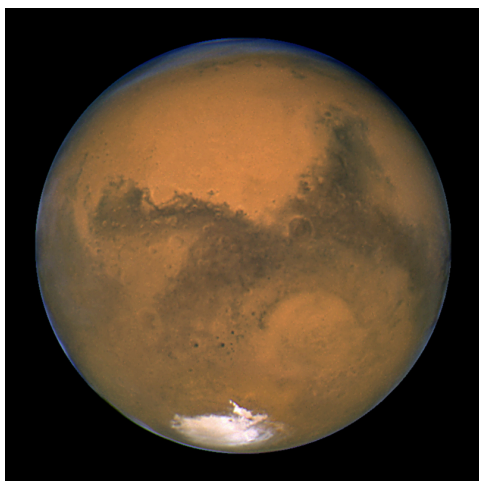
Země vznikla před zhruba 4,6 miliardami let. Krátce poté získala i dnešní Měsíc. Ten výrazně zasáhl do dalších osudů naší Země. Především dlouhodobě stabilizoval sklon zemské osy a pravděpodobně také díky slapovým silám, přílivu a odlivu napomohl přechodu života z moří na souši. Nicméně, zcela zásadní je pro Zemi a život na ní centrální hvězda Sluneční soustavy. Osud Země určuje Slunce. Také v budoucnosti

<sup>8</sup>Maximální elongace (od Slunce) je 45° až 47°.

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 mraků a dostaví se silný skleníkový jev, 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 systematictější. 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.

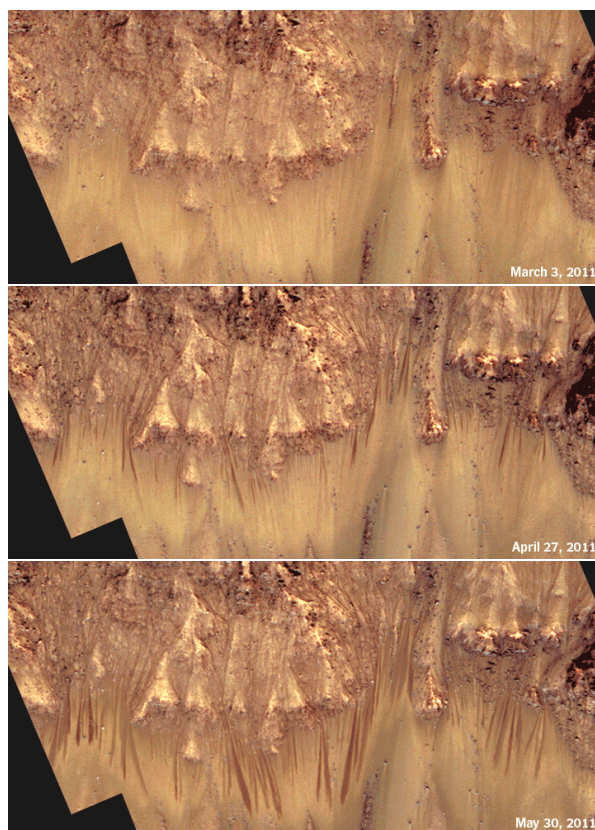
#### 12.3.4 Mars ♂



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 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  $\text{ClO}_4^-$ .

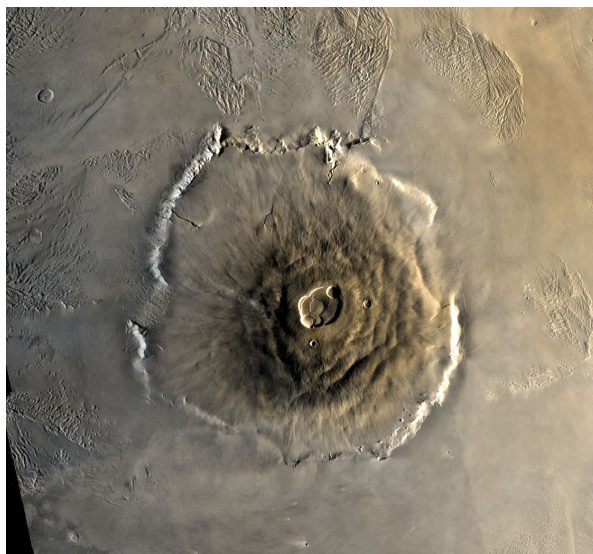


Obrázek 12.13: Stěny kráteru Palikir ukazují, jak se stružky rozšiřují a tmavnou během teplých měsíců. Zdroj:NASA/Jet Propulsion Laboratory/University of Arizona.

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 1 600 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.

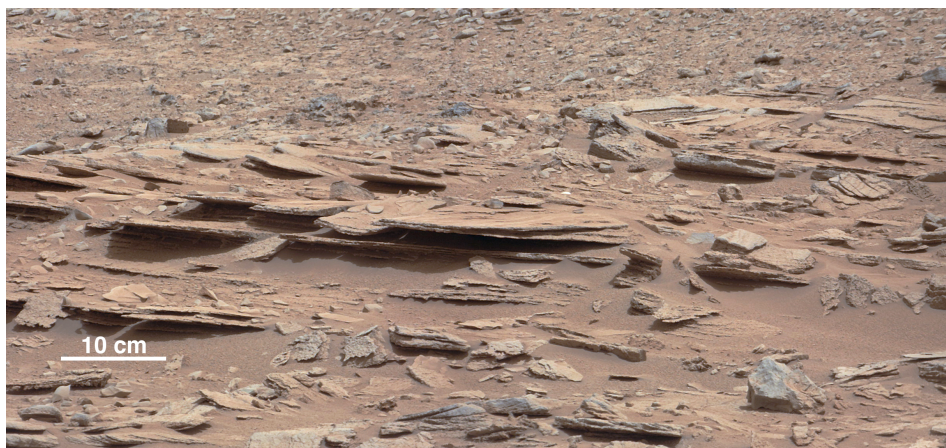
Mars oběhne kolem Slunce za 1,9 pozemského roku. Jedna otočka kolem osy trvá o něco déle než jeden pozemský den. Rotační osa je přitom k rovině ekliptiky skloněna o trochu více, než ta zemská. Střídání dnů a nocí a konec konců i ročních období je tedy velmi podobné jako na Zemi.

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 mili-



Obrázek 12.14: Olympus Mons. Zdroj: NASA.

ardy roků však prvotní sopečná činnost skončila. Koncentrace  $\text{CO}_2$  klesla a postupně docházelo k řidnutí atmosféry, slábnutí skleníkového jevu a chladnutí povrchu. Voda na povrchu zamrzla nebo sublimovala a Mars se zvolna dostal do dnešní podoby. Jestli se v době příhodných podmínek nějaký život na planetě rozvinul zatím nevíme. Nicméně ve fantaziích lidí je Mars 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 mikroorganismů v meteoritu z Marsu ALH84001. Pravdou je, že existují i další náznaky, že život na Marsu, byť v jednoduché formě, mohl existovat. Byly objeveny důkazy, potvrzující přítomnost tekoucí vody. V atmosféře bylo v jed-



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

nom období zjištěno více metanu než se očekávalo vzhledem k jeho rychlému rozpadu. Řada otázek zůstává dosud nezodpovězena a i proto je Mars stále aktuálním cílem pro kosmické agentury z celého světa. Na definitivní potvrzení života na Marsu si prostě budeme ještě muset počkat.

Intenzita výzkumu Marsu neklesá, spíše naopak se zveřejněním plánů na cestu lidí na Mars. K žádnému jinému tělesu se nevydalo tolik sond. Seznam už čítá několik desítek položek.<sup>9</sup> Kolem planety obíhalo několik sond, na povrchu jezdila vozítka a dokonce tam létala malá helikoptéra. K Marsu vysílají své sondy nejen kosmické velmoci jako Spojené státy americké, Rusko nebo Evropská kosmická agentura, ale nově i Čína, Indie a Spojené Arabské Emiráty.

### 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 tisícině 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.

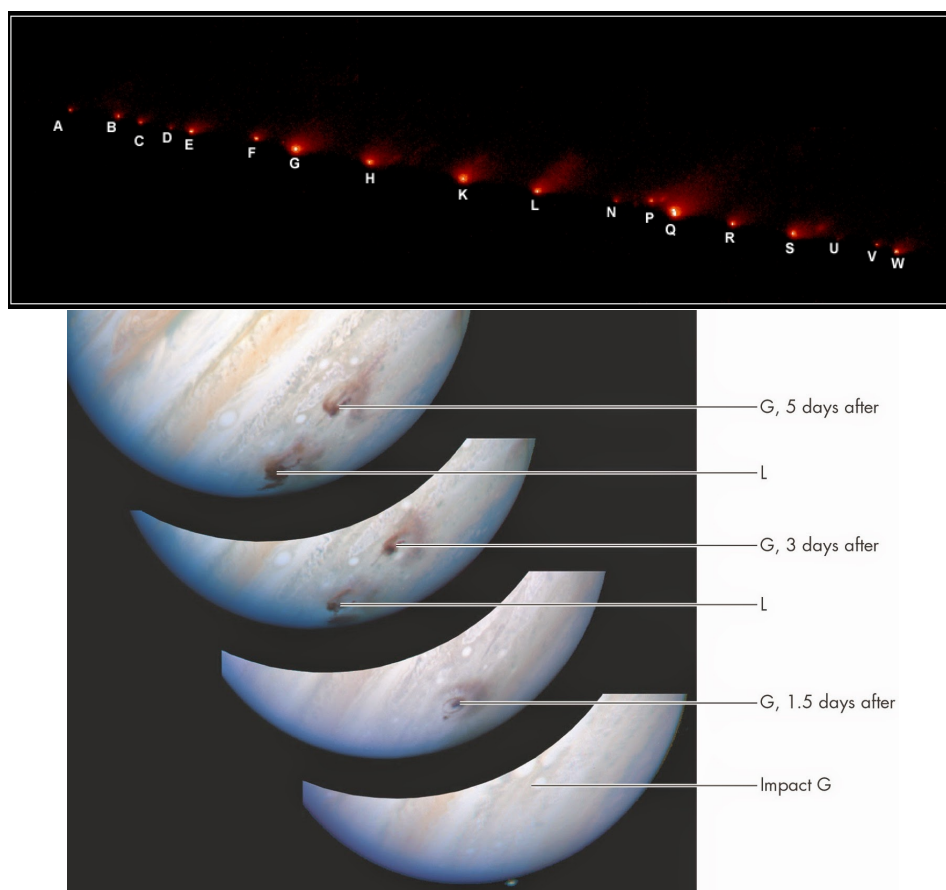
Planeta je složena zejména z vodíku a hélia s příměsí metanu a čpavku. V jejím jádru je vodík pod vysokým tlakem v tekutém stavu. Chová se tak podobně jako kov a mimo jiné generuje poměrně silné magnetické pole. Jupiter nemá pevný povrch. Zpovzdálí vidíme jen svrchní vrstvy atmosféry, která má složitou 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. Na-

<sup>9</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_missions\\_to\\_Mars](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_missions_to_Mars)



jdeme zde i bohatou rodinu<sup>10</sup> vlastních měsíců, které se pohybují v silném radiálním poli. 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 zaměřil i Hubbleův kosmický dalekohled. Ten mimo jiné sledoval nárazy částí komety Shoemaker-Levy 9 do Jupitera v roce 1994 (obrázek 12.17).



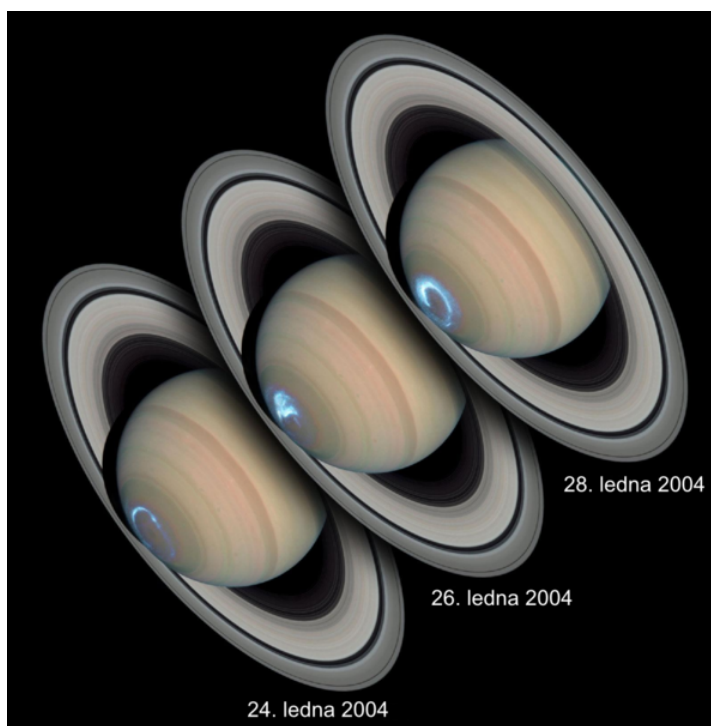
Obrázek 12.17: Úlomky komety Shoemaker-Levy 9 a jejich dopad na Jupitera v roce 1994. Zdroj: NASA.

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.

<sup>10</sup>K říjnu 2021 bylo známo 79 měsíců Jupitera. Aktuální stav je možné nalézt na <https://solarsystem.nasa.gov/planets/overview/>.

### 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 kg/m<sup>3</sup>. 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>11</sup>, které vévodí Titan s hustou atmosférou a jezery s tekutinou na povrchu (více v kapitole 12.4.2).

<sup>11</sup>K říjnu 2021 bylo známo 82 měsíců Saturnu. Aktuální stav je možné nalézt na <https://solarsystem.nasa.gov/planets/overview/>.



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 nejněvnitřnější 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.



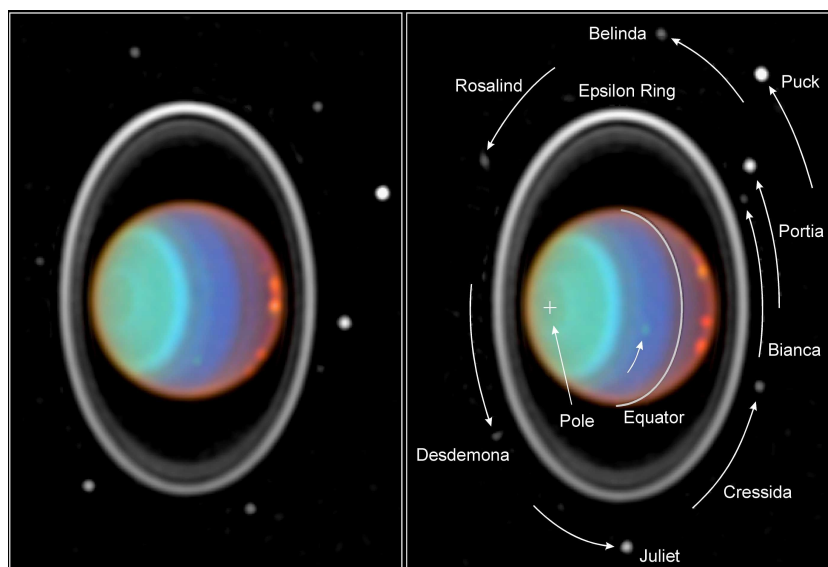
Obrázek 12.20: Snímek Země pořízený sondou Cassini z oběžné dráhy kolem Saturnu 19. 7. 2013. Zdroj: NASA.

### 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>12</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 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,

<sup>12</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.

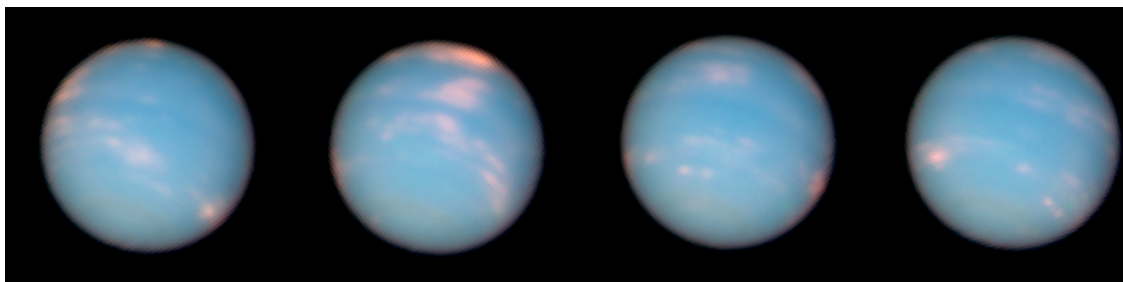
který pohlcuje červené světlo a způsobuje modré zabarvení planety. Atmosféra rotuje rychleji než jádro planety, větrné proudy v atmosféře se pohybují rychlostí až 900 km/h. Osa rotace leží takřka v rovině ekliptiky, takže Uran se jakoby kutálí ve své dráze kolem Slunce, které oběhne jednou za 83,4 let.

Přestože se k možnosti existence prstenců vyjadřoval už Herschel, byly Uranovy prstence objeveny až 10. března 1977 při pozorování zákrytu hvězdy SAO 158678 (Eliot 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>13</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 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.

<sup>13</sup>K říjnu 2021 bylo známo 27 měsíců Uranu. Aktuální stav je možné nalézt na <https://solarsystem.nasa.gov/planets/overview/>.



Obrázek 12.22: „Narozeninové“ snímky Neptunu 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.

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>14</sup>. Největší z nich Triton je zhruba pětina velikosti Země. Více o něm a dalších měsících v kapitole 12.4.2.

## 12.4 Malá tělesa Sluneční soustavy

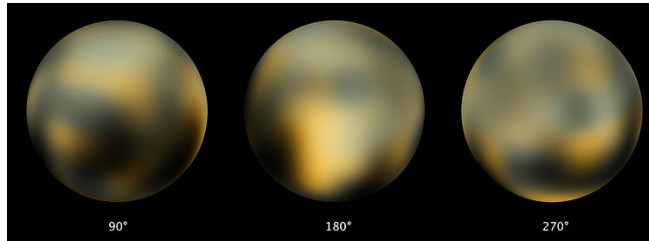
### 12.4.1 Trpasličí planety

#### Pluto

Pluto objevil 18. února 1930 Clyde W. Tombaugh na Lowellově observatoři v USA<sup>15</sup>. Tři čtvrtě století mělo status planety, ale jak víme, je nyní (od roku 2006) řazeno 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. V roce 2015 kolem soustavy proletěla sonda New Horizons. Svými rozměry, stavbou, trajektorií a zřejmě i vznikem patří Pluto mezi tělesa Kuiperova pásu. Povrch Pluta je velmi chladný, v průměru jen 43 K (−230 °C). Pluto má retrogradní rotaci, sklon rotační osy k rovině oběhu je nyní asi 120°, ale zřejmě v řádů miliónů let kolísá v rozsahu 25°. 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

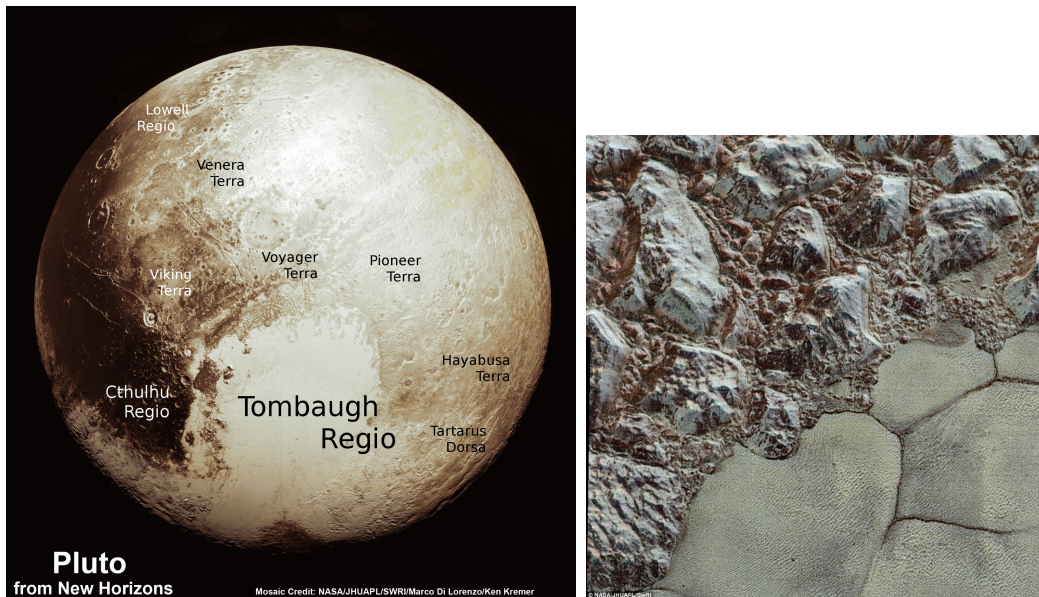
<sup>14</sup>Poslední objev 14. měsíce Neptunu byl oznámen v létě 2013. Aktuální stav je možné nalézt na <https://solarsystem.nasa.gov/planets/overview/>.

<sup>15</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.

obal sublimací zmrzlých plynů, zejména dusíku, oxidu uhličitého a metanu. Ve větších vzdálenostech od Slunce se pak obal postupně ztrácí. Sonda New Horizon také ukázala, že Pluto má relativně hustou a chemicky různorodou atmosféru. 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. Mimo jiné objevila světlé skvrny v kráterech,

kteřé jsou způsobeny slanou vodou vyvěrající z podpovrchových vrstev. Na povrchu Ceresu je také k nám nejbližší kryovulkán.

Eris byla objevena v roce 2003 (Brown et al., 2005). Je jen o málo menší 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 [mejkmeyk].

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.

IAU od zavedení kategorie trpasličích planet tuto kategorii dalšími objekty neobohatila. Přesto existují seznamy kandidátů, některé čítající i stovky těles<sup>16</sup>. Mezi téměř jisté budoucí trpasličí planety můžeme zařadit objekty jako například Sedna, Gonggong (2007 OR<sub>10</sub>), Quaoar, Orcus, Salacia či 2002 MS<sub>4</sub>.



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

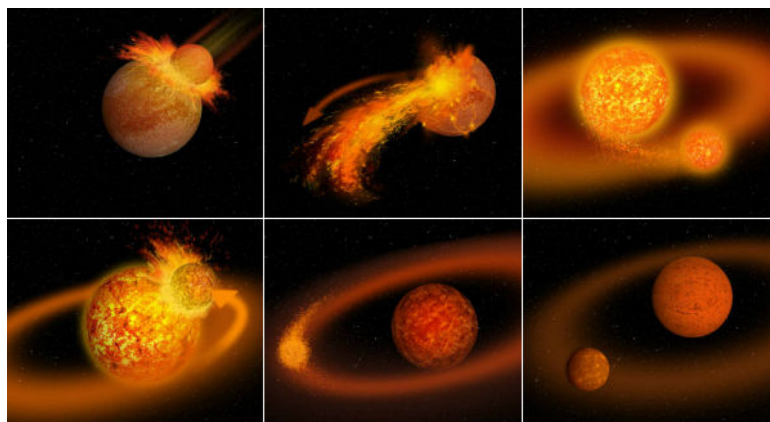
<sup>16</sup>Seznam možných kandidátů na trpasličí planety udržuje například Mike Brown na <http://web.gps.caltech.edu/~mbrown/dps.html>

## 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.



Obrázek 12.26: Simulace vzniku Měsíce při velké srážce s Theiou. Vytvořilo Black Cat Studios.

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 uchvátla Země. Zbýlý materiál byl rozptýlen v okolí Prazemě do obrovského prstence, z něhož v průběhu několika tisíc let vznikl náš Měsíc. Jenže, nové poznatky v posledním desetiletí ukazují, že vše mohlo být i jinak. První srovnání rozborů pozemských a měsíčních hornin vypovídalo o podobném zastoupení izotopů kyslíku, což souhlasilo s modelem velké srážky. O několik desetiletí pozdější rozborů ale ukázaly, že poměry izotopů kyslíku nejsou podobné ale prakticky shodné. K takovému výsledku by ale velká srážka nevedla. Robin Canupová v roce (2012) prezentovala model, který počítal s kolizí dvou oběžnic s polovičními hmotnostmi oproti dnešní Zemi. K debatě o vzniku Měsíce přispěl zajímavou myšlenku i tým vedený Raluou Ruffovou (2017), který předpokládá, že vznik Měsíce nezpůsobila jedna velká kolize, ale desítky menších.



Je tedy vidět, že i u nám nejbližšího kosmického souseda zbývá mnoho nezodpovězených otázek.

#### 12.4.2.2 Mars: Phobos a Deimos

Mars byl ve starověké mytologii bohem války. Tomu odpovídají i jména dvou jeho malých měsíců Phobos a Deimos (obrázek 12.27, v překladu Strach a Hruža. Oba měsíce jsou nepravidelného tvaru s největším rozměrem 27 km, respektive 16 km. Phobos obíhá kolem Marsu na nejnižší oběžné dráze ze všech měsíců ve Sluneční soustavě. Oběžná doba je jen 7,66 hodin.

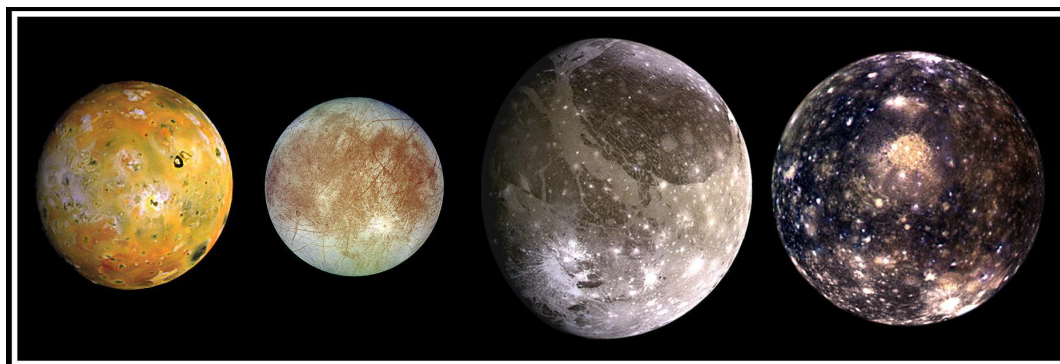
Měsíce objevil v srpnu 1877 americký astronom Asaph Hall na observatoři ve Washingtonu, D.C. O dvou měsících Marsu ale psali dříve například Jonathan Swift v Gulliverových cestách (1726) nebo Voltaire v novele Mikromegas (1752).



Obrázek 12.27: Měsíce Marsu – Phobos a Deimos. Zdroj: NASA.

#### 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.



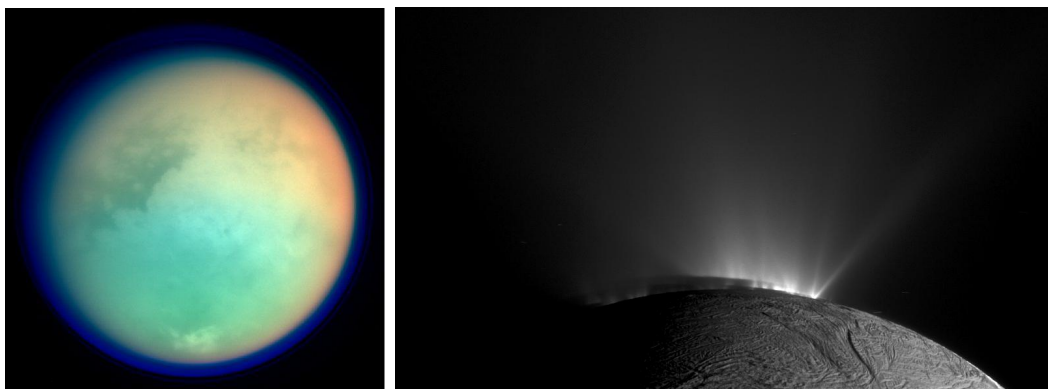
Obrázek 12.28: Galileovské družice Io, Ganymed, Europa, Kallisto. Zdroj: NASA.

Každý z těchto měsíců je výjimečný. Na Ió byly objeveny první aktivní sopky mimo Zemi. Jeho pohyb po eliptické trajektorii kolem Jupiteru způsobuje slapové vlny na povrchu, které generují dostatek energie pro mimořádnou vulkanickou aktivitu. Povrch Europy je pokryt ledovým příkrovem, pod nímž by se měl nacházet oceán s možným výskytem života. K prozkoumání Europy a jejích oceánů se připravuje speciální sonda. Ganymed je největším měsícem ve Sluneční soustavě, je dokonce větší než planeta Merkur. Je to jediný známý měsíc, který má vlastní magnetické pole. Povrch Kallisto je pokryt malými krátery, což svědčí jednak o jeho bohaté dávné impaktní minulosti a jednak o malé povrchové aktivitě.

Jupiterovy měsíce sehrály důležitou roli i v historii fyziky. Jejich zákryty a přechody posloužily Olemu Rømerovi roku 1676 k prvnímu určení konečné rychlosti světla.

#### 12.4.2.4 Měsíce Saturna

Ten největší z nich, Titan, je znám už od roku 1655 (Christian Huygens) 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. Objevil ho roku 1789 William Herschel. Povrch měsíce je nejvíce odražející ve Sluneční soustavě. Proto je mimořádně chladný. Pod ledovou krustou by ale měl být oceán a z něj byly dokonce pozorovány vodní gejzíry. Rozbor kapek pak ukázal na množství látek nezbytných pro vznik života.

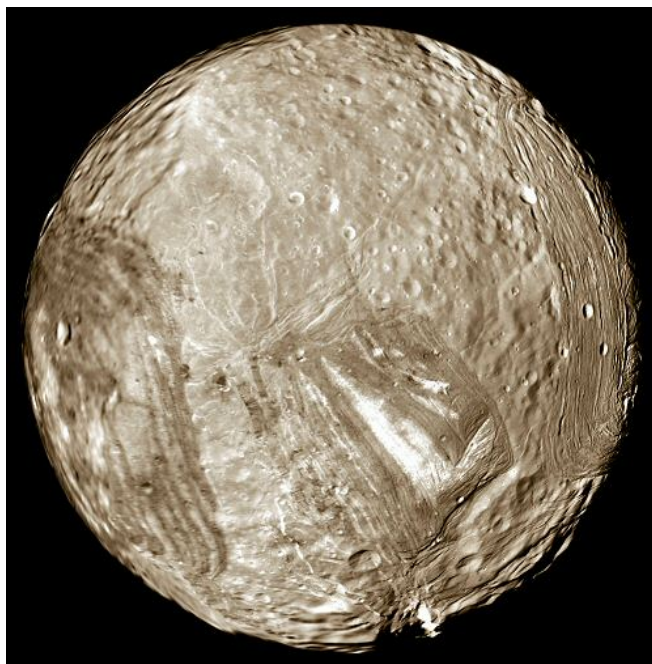


Obrázek 12.29: Vlevo: Složený snímek Titanu (v IR a UV) z 26. října 2004. Vpravo: Výtrysky vody na Enceladu z 30. listopadu 2010. Snímky ze sondy sondy Cassini. Zdroj: NASA.

#### 12.4.2.5 Společníci Uranu

První měsíce planety Uran objevil W. Herschel v roce 1787. Ten nejzajímavější z celé rodiny Uranových měsíců, Miranda ale objevil až roku 1948 Gerard Kuiper. Má průměr jen necelých 500 km, ale na svém povrchu má až 20 km hluboké šrámy (viz obrázek 12.30).

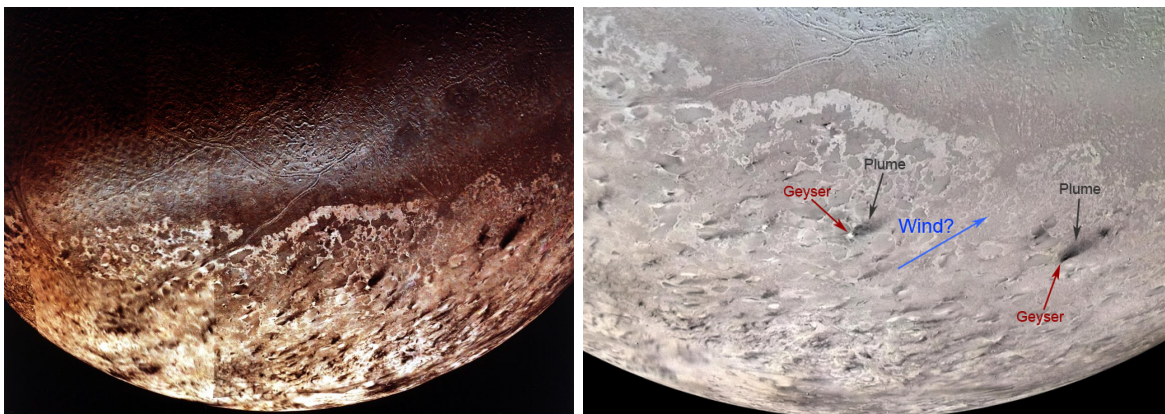
Zajímavé také je, že na rozdíl od jiných rodin měsíců, byly ty Uranovy pojmenovány podle postav z děl Williama Shakespeara a Alexandra Popea.



Obrázek 12.30: 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 ( $-228\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 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 12.31: Vlevo: Povrch největšího Neptunova měsíce – Tritonu. Vpravo: Gejzíry tekutého dusíku poblíž jižního pólu Tritonu. Jak se vyvržený materiál snáší 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 1 113 527 planetek<sup>17</sup>



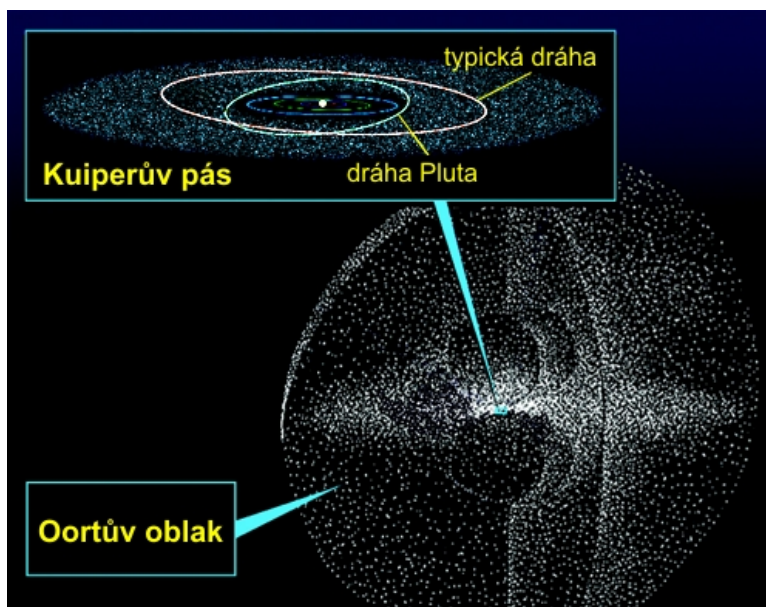
Obrázek 12.32: Eros, jedna z nejbližších blízkozemních planetek na snímku sondy NEAR-Shoemaker. Zdroj: NASA.

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>18</sup>, který se rozkládá ve vzdálenosti zhruba 30 až 50 au. Třetí oblastí výskytu planetek a jader komet je *Oortův oblak*<sup>19</sup> doslova na periferii Sluneční soustavy. Jeho vymezení se liší, ale většinou se pohybuje v rozmezí od zhruba 2 až 5 tisíc au až vzdálenosti zhruba sto až dvě stě tisíc astronomických jednotek.

<sup>17</sup>Stav k prosinci 2021 na <https://solarsystem.nasa.gov/>. Jinou statistiku s mírně odlišnými údaji nabízí <http://www.minorplanetcenter.net>.

<sup>18</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>19</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.



Obrázek 12.33: Kuiperův pás a Oortův oblak. Zdroj: NASA.

#### 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 konci roku 2021 známo téměř 7 000 komet.

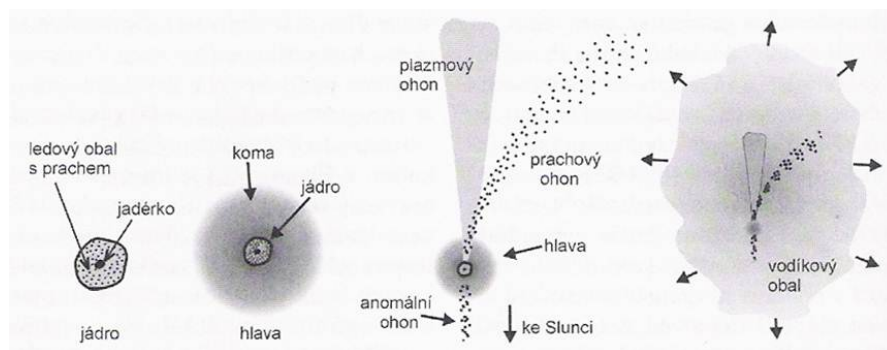
Těleso komety je v principu tvořeno *jádrem*, *komou* a jedním nebo i více *ohony* (viz obrázek 12.34). Jádro je poměrně malý útvar, spletec zmrzlých plynů a hornin o rozměrech stovek metrů až desítek kilometrů. Samotné jádro je ze Země přímo nepozorovatelné. Když se jádro komety přiblíží ke Slunci, začnou se z něj uvolňovat částice plynu a prachu, které utvoří hlavu komety, komu<sup>20</sup>. Její rozměry mohou být opravdu úctyhodné. Mohou být dokonce větší než Slunce. Důkazem takové obří komy byla kometa 17P/Holmes v roce 2007 na obrázku 6.27 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

<sup>20</sup>Slovo *koma* pochází z latiny, kde „coma“ značí kštici, hřívu

u jasné komety Hale-Bopp, jak je patrné na obrázku 6.27 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.

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, které ocas také chybí.



Obrázek 12.34: Schéma komety.

## 12.5 Modely Sluneční soustavy

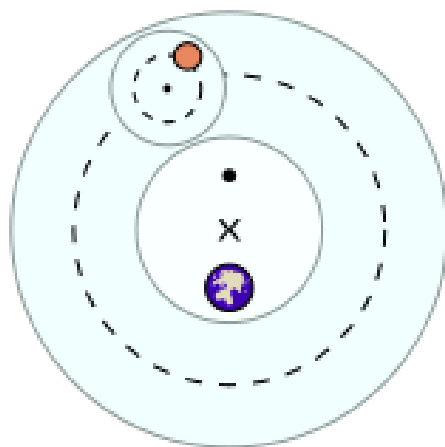
Už starověcí astronomové, jakmile odlišili planety od hvězd, se snažili uspořádat okolní vesmír. Dát mu nějaký řád a vymezit v něm místo pro Slunce, Měsíc, Zemi, další známé planety a hvězdy. Jednotlivé představy uspořádání kosmu se lišily zejména v postavení Země a Slunce. Hlavní názorové proudy vymezují 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 Ptolemaiiova 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.

## 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 pythágořeji 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 Země a lidé na ní jsou středem vesmíru. Odlišné názory byly ostře potlačovány a knihy hlásající heliocentrismus byly církví oficiálně zakázány. Například Koperníkovy spisy katolická církev vyňala ze seznamu zakázaných děl až roku 1835! Mikuláš Koperník tedy rozhodně neměl snadnou pozici. V jeho době ale uzrál čas na reformu a on byl jejím nejhlasilitějším propagátorem. Ve spise *De Revolutionibus 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



Obrázek 12.36: Modely Sluneční soustavy. Vlevo nahoře geocentrická soustava (Christian Aristotelian Cosmos) (Apian, 1524), vpravo nahoře heliocentrická (Koperník, 1543) a dole smíšený systém, který navrhl Tycho Brahe (Hevelius, 1647).

nedávaly lepší výsledky než Ptolemaiovův 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. Tu se ale podařilo změřit až dva tisíce let po Archimédovi, v 19. století díky zlepšení astronomických přístrojů.



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. Například 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.

Paradoxní je, že po Tychonově smrti, Kepler právě s využitím jeho měření prokázal správnost heliocentrického modelu.

## 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 Tycho Brahe, nejlepšího pozorovatele té doby, se Kepler dostal k jeho pozorováním poloh Marsu. Jejich rozborem 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>21</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>22</sup>.

- První Keplerův zákon popisuje trajektorie planet:

**Planety se pohybují po elipsách (málo odlišných od kružnic), v jejichž jednom (společném) ohnisku se nachází Slunce.**

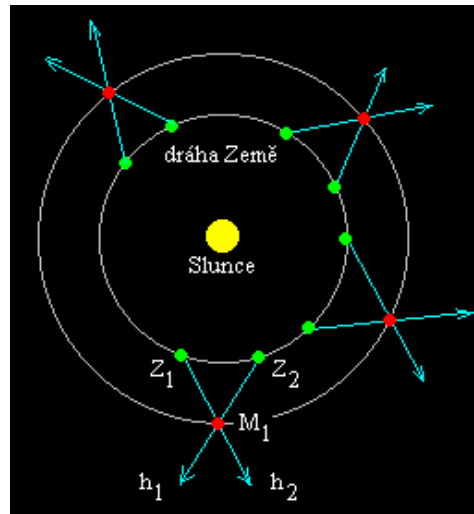
Tuto zákonitost pohybu planet odhalil Kepler na základě rozboru četných Braheho pozorování Marsu. Kepler znal dobu oběhu Marsu 687 dní a věděl, že se po jejich uplynutí Mars vrátí přesně do téhož místa dráhy. A totéž věděl také u Země, jejíž polohu si znázornil den po dni. Když byla Země v bodě  $Z_1$  (viz obrázek 12.37),

<sup>21</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>22</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.

nalezl 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.



Obrázek 12.37: Princip, jakým Kepler odvodil zákonitost o podobě trajektorie planet. Autor: Ota Kéhar.

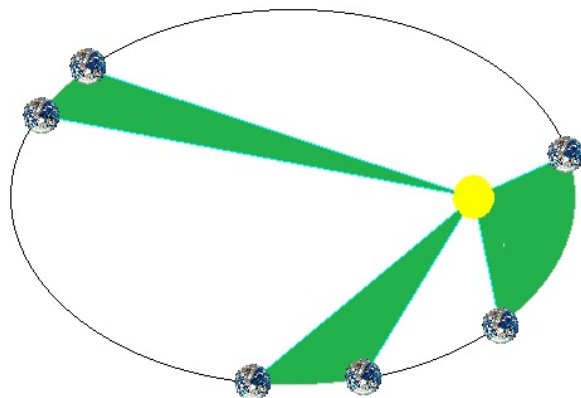
- Druhý zákon sice Kepler také publikoval v díle *Astronomia Nova*, ale znal jej už roku 1602, je tedy historicky nejstarší z trojice. Obsah tvrzení lze formulovat různě. Například:

**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>23</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>23</sup>Označení bodů trajektorie nejbližších a nejdálkových k centrálnímu tělesu pro různé případy včetně připomenutí geometrie elipsy najdete v příloze C.

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 uvažovaných 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

$$P^2 \propto a^3, \quad \text{tedy } P^2 = ka^3, \quad (12.2)$$

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

- Apian, P. 1524, *Cosmographia*
- Bouvier, A., Wadhwa, M. 2010, *Nature Geoscience*, 3, 637-641
- Brown, M. E., Trujillo, C. A., & Rabinowitz, D. L. 2005, *ApJl*, 635, L97
- Canup R. M. 2012, *Science*, 338, 1052
- Canup, R. M., Righter, K., Dauphas, N., et al. 2021, kapitola v knize *Origin of the Moon II*. arXiv:2103.02045
- 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
- Gülcher, A. J. P., Gerya, T. V., Montési, L. G. J. & Munch, J. 2020, *Nature Geoscience*, 13, 547
- Haefner, R., Manfroid, J., & Bouchet, P. 1985, *The Messenger*, 42, 10
- Hartmann, W. K., & Davis, D. R. 1975, *Icarus*, 24, 504
- Hevelius, J., 1647, *Hypothesis Tyconica v Selenographia*, str. 163
- 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.
- Koperník, M. 1543, *De revolutionibus orbium coelestium*
- Kuiper, G. P. 1949, *PASP* 61, 129
- 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
- Rufu, R., Aharonson, O., Perets, H. B. 2017, *Nature Geoscience* 10, 89
- 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 kapitoly o planetách v astronomických učebnicích 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 svá, 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).

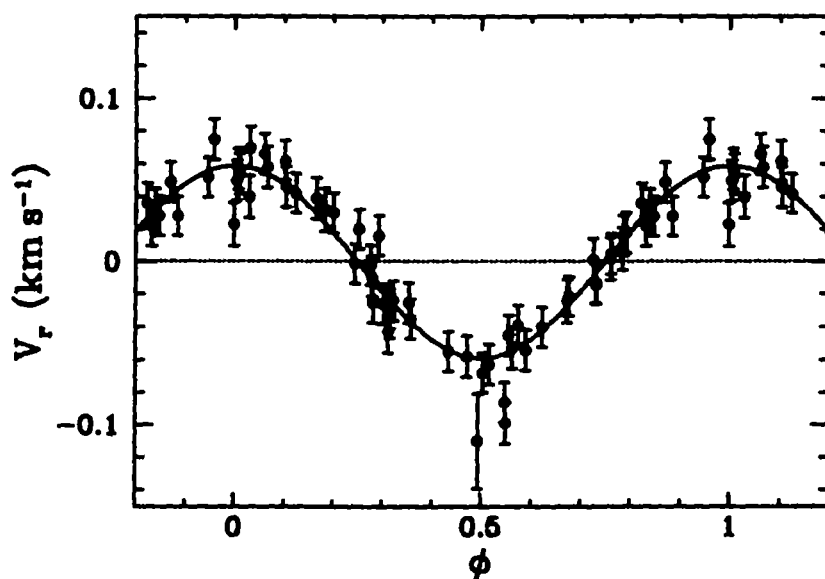
První náznaky potvrzení existence planet mimo Sluneční soustavu přicházejí v polovině 19. století z měření vlastních pohybů hvězd, například v roce 1855 William Stephen Jacob z Madraské observatoře poukázal na možné planetární těleso u dvojhvězdy 70 Ophiuchi. Později Peter van Kamp ohlásil dokonce několik 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 Dalem Frailem, obíhající kolem pulsaru PSR 1257+12.<sup>1,2</sup> Přesto v řadě moderních

<sup>1</sup>Pulsarům se budeme věnovat v 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>2</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.

učebnic 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<sup>3</sup> 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 opět se vzdalovat. Takový pohyb můžeme detekovat v podobě změn radiální rychlosti hvězdy (viz obrázek 13.2).

Od té doby se hon na exoplanety a obecně jejich výzkum staly hitem. Roste počet prací, které se věnují exoplanetám, roste počet jejich pozorování. Významnou měrou zde přispívají i kosmické observatoře. Jmenujme alespoň družice CoRoT, KEPLER, CHEOPS, TESS. Soustředěným úsilím astronomické obce už bylo objeveno přes 3 500 extrasolárních planetárních soustav s téměř 5 000 exoplanetami<sup>4</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 Mayor & Queloz (1996).

## 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 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 přijata rezoluce 26.

<sup>3</sup>Objasnění pojmu a informace o těchto hvězdách v kapitole ??

<sup>4</sup>Aktuální počet objevených exoplanet lze zjistit na <http://www.exoplanet.eu> nebo na <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>.

valného shromáždění Mezinárodní astronomické unie, která definuje planetu jako objekt obíhající kolem Slunce s hmotností dostatečnou na to, 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 roku 2018. Exoplanetou je objekt splňující následující kritéria<sup>5</sup>:

- 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>6</sup>. Pro minimální hmotnost/velikost objektu platí stejné pravidlo jako v naší Sluneční soustavě.
- Objekt obíhá hvězdu, hnědého trpaslíka nebo pozůstatek po hvězdě a má poměr hmotností s centrálním objektem pod mezí nestability L4/L5 ( $M/M_{\text{centr}} < 2/(25 + \sqrt{621}) \approx 1/25$  a nezáleží na tom, jak vznikl.
- Minimum poměru hmotnost/velikost je stejné jako ve Sluneční soustavě.

Je zřejmé, že takovéto vymezení obsahu pojmu exoplaneta je nedostačující a bude třeba přijmout precizní definici. Modely jsou spočteny jen pro sluneční složení objektů a vůbec zde nejsou zahrnuty volně plující planety, „vyhoštěné“ ze svých domovských soustav.

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.
- *excentriční exojupiteři* – tělesa s velice protáhlou trajektorií, které spíše připomínají dráhy krátkoperiodických komet.
- *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 přesahujícími Zemi, ale nepřesahujícími hmotnost 10  $M_Z$ , nebo poloměr 1,75  $R_Z$ .
- *terestrické planety* – kamenné planety zemského typu, s definovaným povrchem a s hmotností menší než 5 až 10  $M_Z$  obíhající hvězdu slunečního typu.
- *exozemě* (v zónách života) – planety velikosti Země obíhající kolem mateřské hvězdy ve vzdálenosti, která by mohla zajistit přítomnost vody v kapalném stavu na povrchu planety. Jejich výzkum je branou k úvahám o možnostech života a rozvoji astrobiologie. Do konce roku 2021 bylo objeveno více než 150 terestrických exoplanet, z nichž některé jsou dokonce menší než Země.

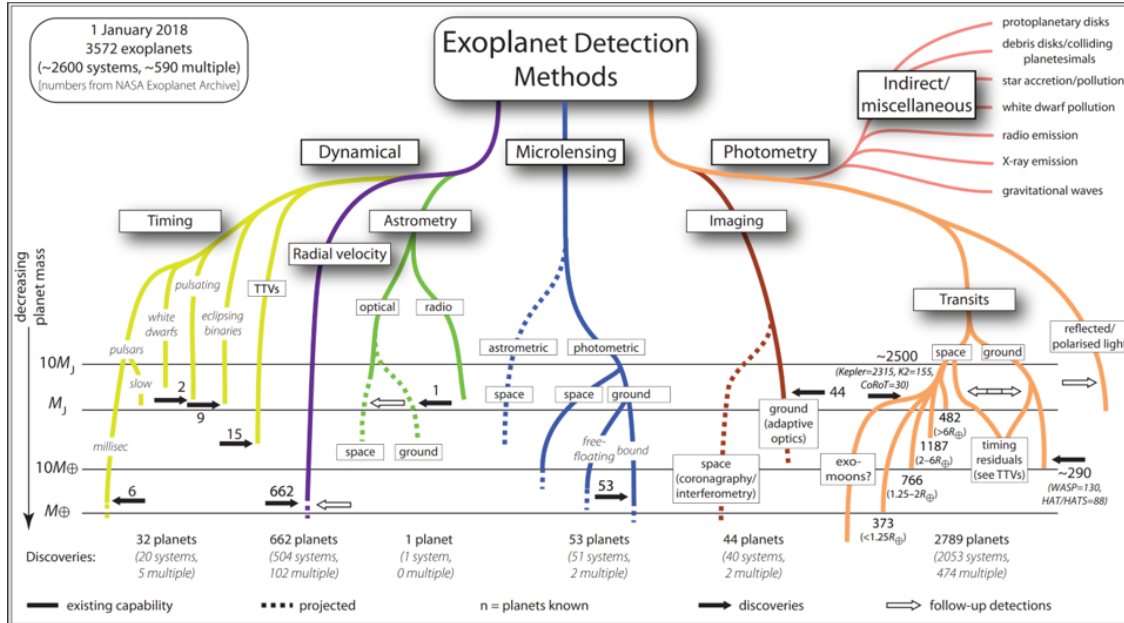
<sup>5</sup>[https://www.iau.org/static/science/scientific\\_bodies/commissions/f2/commission-f2-triennial-report-2018-2021.pdf](https://www.iau.org/static/science/scientific_bodies/commissions/f2/commission-f2-triennial-report-2018-2021.pdf)

<sup>6</sup>Se stejnou metalicitou (obsahem kovů) jako u Slunce – viz kapitola o Slunci.

- *nomádi*<sup>7</sup> – objeveny na jaře 2011 (Sumi et al., 2011). Neobíhají kolem žádné hvězdy, ale volně se pohybují prostorem. Z původního místa vzniku byly vyvrženy díky gravitačním interakcím s ostatními planetami – svými „sourozenci“. Některé z těchto objektů mohly vzniknout i samostatně jako hvězdy a pak jsou označovány jako hnědí podtrpaslíci.

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 Dimidium.<sup>8</sup>

Počty nově objevených exoplanet rychle narůstají. Aktuální stav i dle metod objevu lze najít například na <http://exoplanet.eu/catalog/>.



Obrázek 13.3: Perrymanův diagram metod detekce exoplanet. Stav k 1. 1. 2018. Převzato z ExoverseTeamReport.pdf

<sup>7</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, toulavé planety nebo nomádi.

<sup>8</sup>V minulosti dokonce IAU vyhlásila veřejnou soutěž, kde mohl kdokoli navrhnout jména vybraných exoplanet. Výsledky i ty dříve pojmenované exoplanety lze najít na [https://www.iau.org/public/themes/naming\\_exoplanets/](https://www.iau.org/public/themes/naming_exoplanets/)



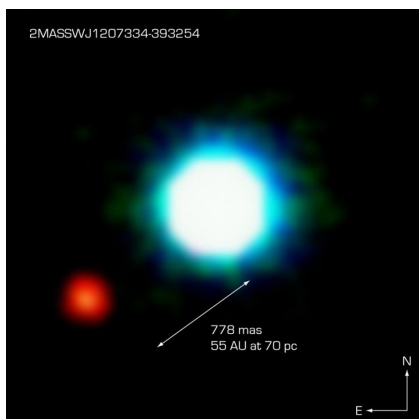
## 13.2 Exoplanety ve dvojhvězdách

V roce 1977 jsme se na plátnech kin poprvé setkali s hrdiny ságy Hvězdné války ve stejnojmenném filmu, který byl později přejmenován na Hvězdné války: Epizoda IV - Nová naděje. Část děje se odehrávala na planetě Tatooine, která obíhala kolem dvou sluncí. V té době nebyla známa ani planeta u jiné hvězdy než Slunce, natož u dvojhvězdy. A přece! Ukázalo se, že tvůrci měli pravdu. Na konci roku 2021 známe více než dvě desítky exoplanet obíhajících dvojhvězdy. Historie objevu exoplanet u dvojhvězd docela kopíruje historii objevu exoplanet u samostatných mateřských hvězd. Také zde byla první planeta detekována u pulsaru PSR B1620-26 A, respektive u dvojice pulsar – bílý trpaslík v kulové hvězdokupě M4 (Thorsett et al., 1993). Teprve později byla objevena exoplaneta u soustavy obsahující hvězdu hlavní posloupnosti HD202206 (Correia et al., 2005). Nejběžnější konfigurace těchto soustav je těsný hvězdný pár, kolem něhož krouží jedna nebo více planet.

## 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



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.

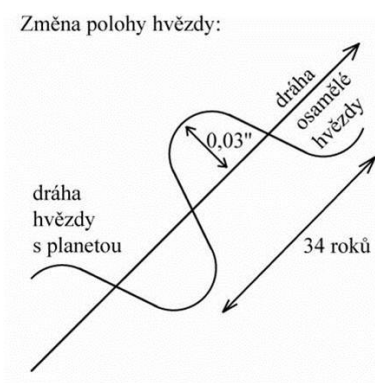
V astronomických knihách minulého století a starších se zcela běžně setkáváme s tvrzením, že přímé pozorování planet obíhajících jiné hvězdy než naše Slunce není možné. Důvody jsou zřejmé. Planety, jak je známe ze Sluneční soustavy, září většinou jen odraženým světlem slunečním. To znamená, že mezi centrální hvězdou a planetami je velký rozdíl jasností. Navíc bude jejich úhlová vzdálenost od centrální hvězdy velmi malá. Pokud bychom například Jupitera nechali obíhat okolo k Slunci nejbližší hvězdě 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 slabší než hvězdy. Nicméně vývoj přístrojové techniky jde kupředu opravdu mílovými kroky. Chauvin et al. (2004) pozorovali pomocí 8,2m 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 konci roku 2021 bylo přímým zobrazením objeveno 114 planetárních soustav s 158 planetami.

### 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. 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 miliónů 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 než 100 000 hvězd s přesností na jednu tisícinu obloukové vteřiny, ale doba měření byla příliš krátká. Družice GAIA, která byla vypuštěna v prosinci 2013, určuje polohy hvězd do 13 mag s přesností na jednu stotisícinu obloukové vteřiny, takže 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 mnohaletém úsilí astrometricky detekovali první exoplanetu obíhající kolem chladného trpaslíka VB10. Na konci roku 2021 bylo astrometricky objeveno už 15 exoplanet.

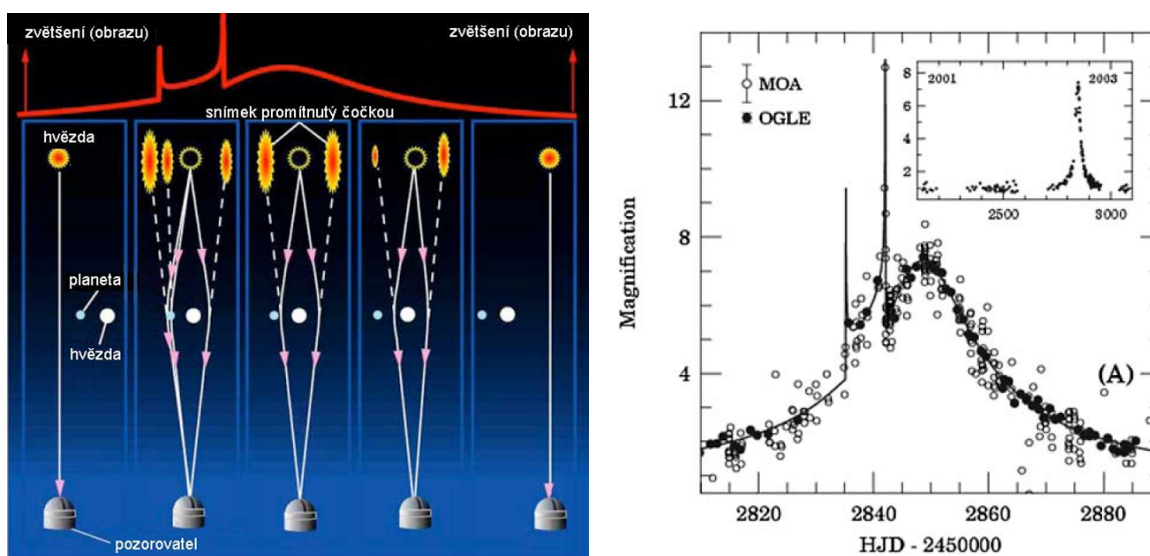


Obrázek 13.5: Možnosti astrometrické detekce exoplanet. Převzato z Pokorný (2006).

### 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. Hmotným objektem, který hraje roli čočky bývá zpravidla galaxie. Může jím být ale i samostatná hvězda, kterou pak označíme jako mikročočku. Pokud navíc kolem takové hvězdy obíhá nějaká planeta, může se na křivce zjasnění objevit ještě další velmi krátké zjasnění, jak je vidět na obrázku 13.6.

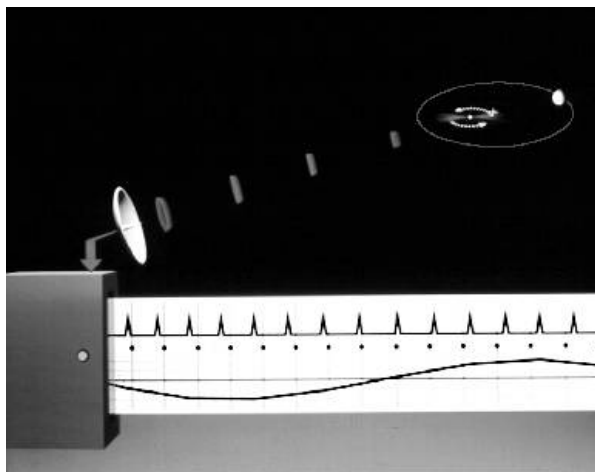
Úskalím metody je ale to, že doba zjasnění záleží na hmotnosti čočkujícího objektu a je obecně velmi krátká. Navíc je to neopakovatelná událost. Takže pravděpodobnost, že něco takového u vybrané hvězdy zaregistrujete, je velmi malá. Přesto se to už podařilo. Od první práce (Bond et al., 2004) je ke konci roku 2021 známo už 165 exoplanet objevených tímto způsobem, a dokonce 8 planetárních soustav.



Obrázek 13.6: Vlevo: Ilustrace metody gravitační mikročočky v detekci exoplanet. Převzato z <http://astronomia.zcu.cz>. Vpravo: 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.

### 13.3.4 Zpoždování záblesků pulsarů

Vzpomenete si na historii objevování exoplanet? První detekci exoplanety, a to dokonce hned systému exoplanet učinili Wolszczan & Frail (1992) v okolí pulsaru 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 přibýly i další planety u pulsarů. Jejich detekce vychází z jednoduchého principu. Planeta obíhající kolem pulsaru na něj gravitačně působí a tak dochází ke zpoždování nebo zrychlování jednotlivých velmi rychlých záblesků, jak vidíme na



Obrázek 13.7: Princip metody zpoždování záblesků pulsarů. Zachycený signál z pulsaru je zpracován například do grafické podoby uvedené ve spodní části obrázku. Časy naměřených hodnot se liší od očekávaných (černé tečky). Z těchto časových rozdílů vznikla křivka zobrazená úplně dole, která poukazuje na těleso obíhající kolem pulsaru. Převzato z <http://astronomia.zcu.cz>.

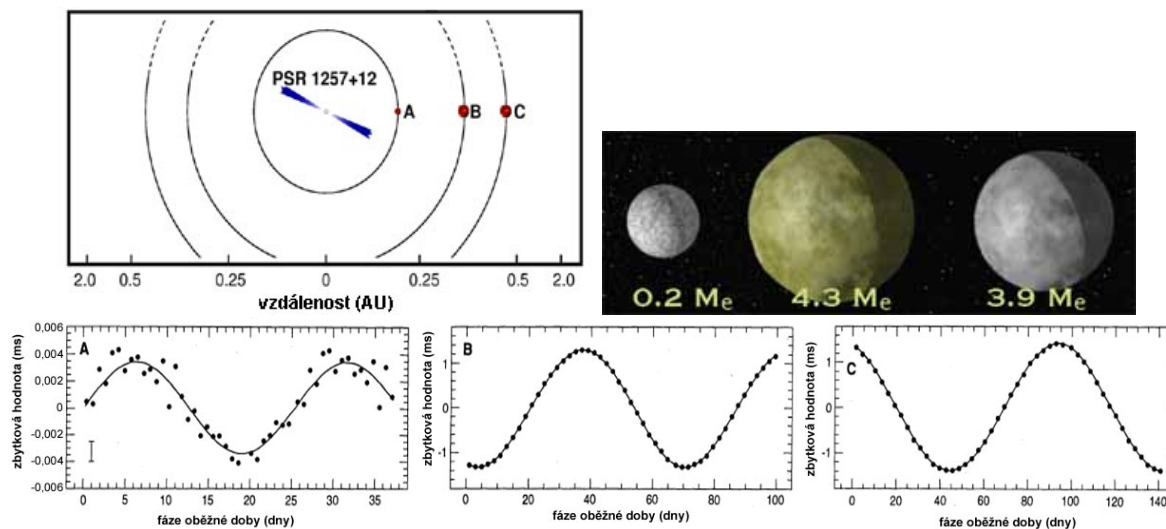
obrázcích 13.7 a 13.8. Metoda analýzy zpoždování záblesků pulsarů<sup>9</sup> vedla zatím k potvrzeným objevům dvou desítek planet (stav z konce roku 2021).

### 13.3.5 Radiální rychlosti

Na projevech gravitačního působení planety na mateřskou hvězdu je založeno několik metod. Z nich je nejúspěšnější 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 či 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 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 konci roku 2021 bylo touto metodou objeveno 721 planetárních systémů s 974 planetami. Pozoruhodné je to, že k tomuto číslu nyní přispívají už i amatérští astronomové (viz obrázek 13.9).

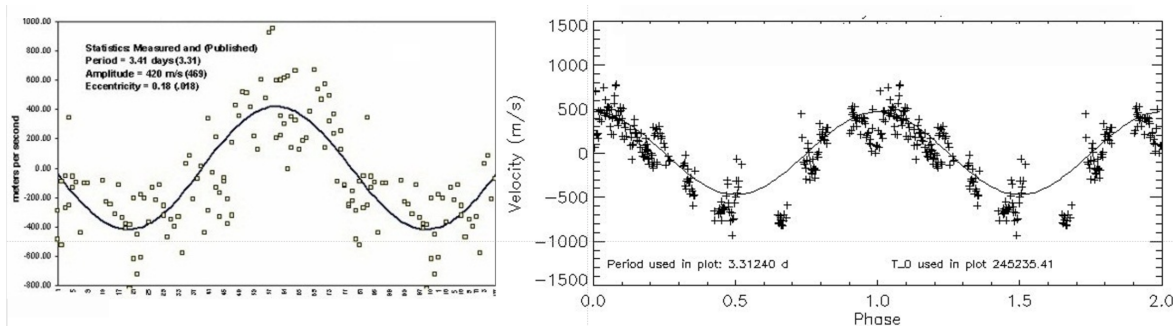
<sup>9</sup>V anglicky psané literatuře se používá termínu „Pulsar timing“.



Obrázek 13.8: Nahoře: Pulsar PSR 1257+12 a jeho planetární soustava. Dole: Zbytkové hodnoty času z měření pulsaru PSR 1257+12, na kterých je vidět vliv oběžných dob 25,34 dne (planeta A; dle později přijatých pravidel planeta b pojmenovaná Draugr), 66,54 dne (planeta B; c, Poltergeist) a 98,22 dne (planeta C; d, Phobetor). 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, která je důsledkem digitálního zpracování signálu. Pro planety B a C jsou nejistoty nepostřehnutelné. Převzato z <http://astronomia.zcu.cz>.

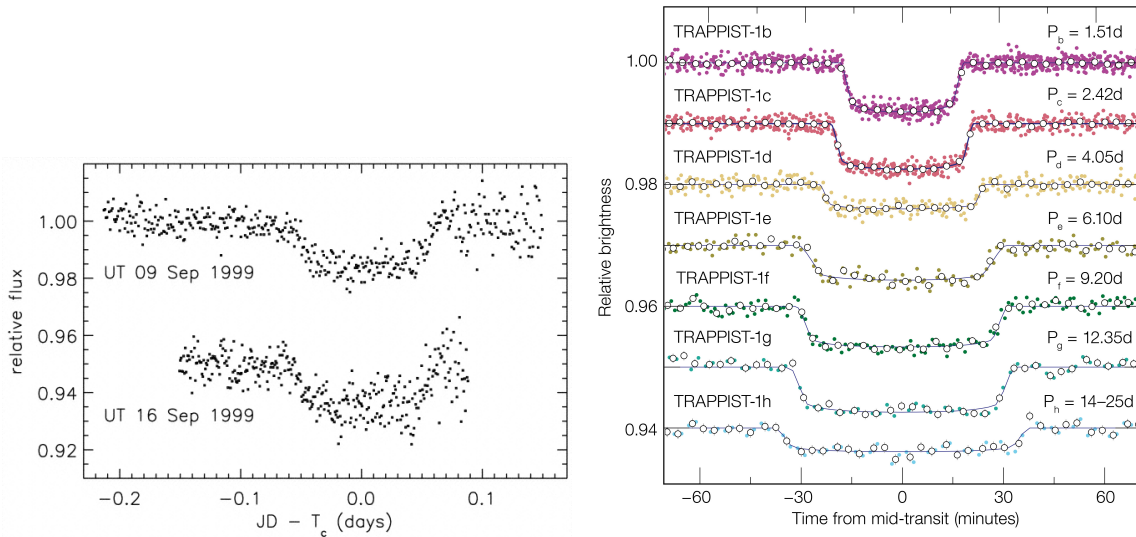
### 13.3.6 Tranzity

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 orientovaná tak, že zorný paprsek ze Země leží v této rovině, pak exoplaneta během oběhu kolem mateřské hvězdy přechází přes disk hvězdy. Přechod temného kotoučku planety přes zářivý disk hvězdy způsobí malíčký pokles jasnosti hvězdy zhruba na úrovni jednoho procenta. Pokles hvězdné velikosti centrální hvězdy takového systému můžeme měřit v milimagnitudách.



Obrázek 13.9: 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>.

Po objevu první exoplanety 51 Pegasi b začaly závody, kdo objeví jako první tranzitující 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 tranzity v září 1999 (viz obrázek 13.10), zatímco Henry et al. (2000) měřili hvězdu až v listopadu téhož roku.



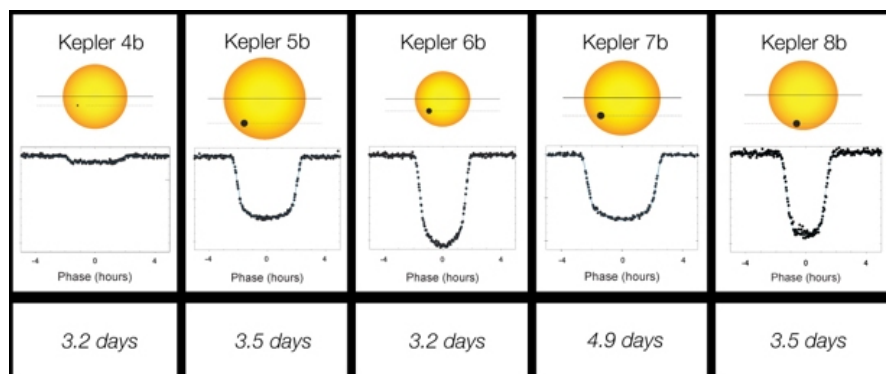
Obrázek 13.10: Vlevo: První zaznamenané tranzity exoplanety HD 209458 b. Zdroj: Charbonneau et al. (2000). Vpravo: Transitní planet v unikátní soustavě TRAPPIST-1. Zdroj: <https://www.eso.org/public/news/eso1706/>

Od té doby se na měření tranzitů vrhli i amatérští pozorovatelé. Dnes už je možné zaznamenávat tranzity exoplanet pomocí digitálních zrcadlovek nebo fotoaparátů v mobilních telefonech. 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 tranzitů ETD (Exoplanet Transit Database) je celosvětově uznávána a využívána například i odborníky NASA.<sup>10</sup> Ve světě existuje řada projektů, zaměřených na hledání exoplanet tímto způsobem, například HAT (Hungarian-made Automated Telescope), TrES (The Transatlantic Exoplanet Survey), WASP (The Wide Area Search for Planets) a další. Nicméně nejvýkonnějším dodavatelem nových objevů byly družice, CoRoT a zejména KEPLER a jejich pokračovatel, družice TESS. Ke konci roku 2021 je potvrzen objev 3615 planetárních soustav s 4891 planetami. Několik tisíc kandidátů ještě čeká na potvrzení. Jen KEPLER a TESS mají na svém kontě přibližně deset tisíc kandidátů a zhruba tři tisíce potvrzených exoplanet.

Připravují se i další specializované družice pro hledání a studium exoplanet. FINESSE (Fast INfrared Exoplanet Spectroscopic Survey Explorer), EXCEDE (EXoplanetary Circumstellar Environments and Disk Explorer), PLATO (PLANetary Transits

<sup>10</sup>Více na stránkách Sekce proměnných hvězd a exoplanet <http://var2.astro.cz>, respektive jejich projektu TRESKA zaměřeného na tranzitující exoplanety <http://var2.astro.cz/tresca/index.php>.

and Oscillations of stars), Twinkle, ARIEL (Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey), Nancy Grace Roman Space Telescope a další. Hodně se také v oblasti výzkumu exoplanet očekává od JWST (James Webb Space Telescope).



Obrázek 13.11: Ukázka tranzitů pěti exoplanet pozorovaných družicí KEPLER. Zdroj: NASA.

### 13.3.7 TTV,ETV

Za poněkud tajemnými zkratkami TTV a ETV se skrývají další metody hledání exoplanet. V tomto případě tam, kde máme k dispozici nějaký periodicky se opakující jev. To jsou například pulzy pulsary, o nichž jsme se už zmínili. Ale mohou to být například periodické změny jasnosti hvězdy v důsledku zákrytů jinou hvězdou nebo i planetou nebo třeba vlastní pulzace hvězdy. Pak můžeme hledat exoplanety pomocí sekulárních změn těchto period, tedy pomocí změn časů zákrytů (Eclipse Timing Variations, ETV) nebo změn časů tranzitů (Transit-Timing Variations, TTV). Tyto metody mají velkou výhodu v tom, že jsou využitelné i u velmi vzdálených objektů.

## Použitá a doplňující literatura

- Bond, I. A., Udalski, A., Jaroszyński, M., et al. 2004, *ApJ Letters*, 606, L155  
 Correia, A. C. M., Udry, S., Mayor, M., et al. 2005, *A&A*, 440, 751  
 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  
 Mayor, M., & Queloz, D. 1996, *Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun*, ASP Conf. Series 109, 35  
 Pokorný, Z., 2006, *Vademecum – Váš průvodce vesmírem*, Hvězdárna a planetárium M. Koperníka v Brně  
 Pravdo, S. H., & Shaklan, S. B. 2009, *ApJ*, 700, 623  
 Thorsett, S. E., Arzoumanian, Z., & Taylor, J. H. 1993, *ApJ Letters*, 412, L33  
 Sumi, T. et al. 2011, *Nature* 473, 349  
 Wolszczan, A., Frail, D. A. 1992, *Nature* 355, 145

## 14 Život ve vesmíru

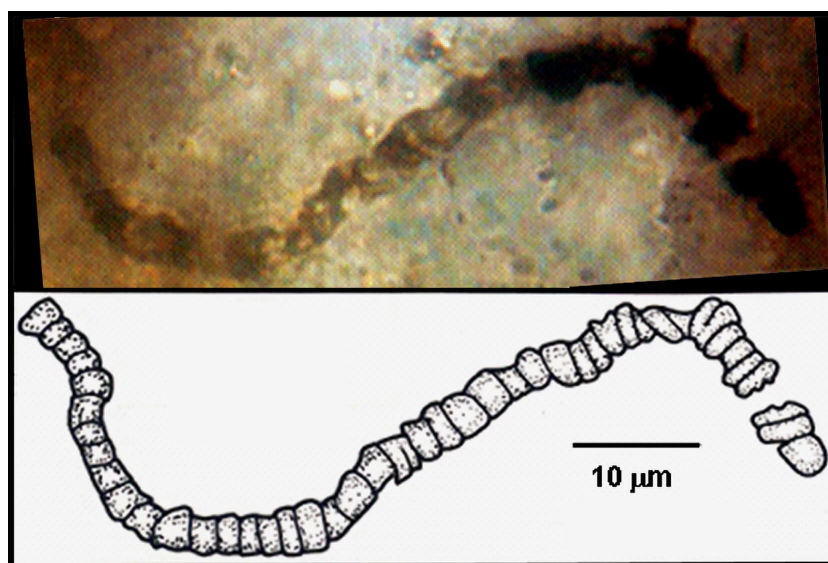
Ve středověku se za myšlenky o mimozemském životě ve vesmíru upalovalo. Před několika desítkami let byly snahy o výzkum mimozemského života spíše brány jako výstřelek. Dnes je astrobiologie jako věda o vzniku, vývoji, rozšíření a budoucnosti života ve vesmíru jednou z nejrychleji se rozvíjejících vědních 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* nebo *Astrobiology Strategy*<sup>1</sup> (Hays et al., 2015) 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? The Physical Aspect of the Living Cell*<sup>2</sup>. 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

<sup>1</sup><https://astrobiology.nasa.gov/roadmap/>

<sup>2</sup>Český překlad (Co je život? Fyzikální pohled na živou buňku) je součástí sbírky tří děl E. Schrödingera, které vydalo nakladatelství VUTIUM v roce 2018.



Obrázek 14.1: Mikrofosílie objevené v r. 1992 v Austrálii. Teprve koncem roku 2017 se podařilo využitím nových metod prokázat, že jde o pozůstatky živých organismů. Jejich stáří bylo určeno na 3,5 miliardy let. Zdroj: J. William Schopf, UCLA.



uspořádání není ani zcela chaotické, ani se nudně neopakuje jako nějaká periodická struktura. Schrödinger proto tyto uvažované nositele genetické informace označuje termínem „aperiodický krystal“. Druhou často zmiňovanou myšlenkou je teze, že hlavním cílem metabolismu není výměna látek či získávání energie, ale to, že se organismus „zbavuje entropie“, kterou během své existence nutně produkuje. Schrödingerovy myšlenky v 50. letech minulého století výrazně pomohly k nalezení genetických molekul. DNA byla sice známa od roku 1869, ale její role v reprodukci a její šroubovicový tvar objevili až Watson & Crick (1953).

V roce 2002 americký biolog a biochemik Stuart Kauffman popsal život jako „fyzikální soustavu schopnou vlastní reprodukce a vykonání alespoň jednoho termodynamického pracovního cyklu“. Později vydali Dirk Schulze-Makuch, s Louisem Nealem Irwinem knihu *Life in Universe* (2008), v níž definují život jako systém tvořený vázaným prostředím v termodynamické nerovnováze s okolím, schopný transformovat energii za účelem snížení entropie, a schopný uchovávat a přenášet informaci. V roce prvního vydání jejich knihy přišla s definicí života i NASA, která jako život označuje chemický systém schopný Darwinovské evoluce. Obecně lze tedy říci, že za živé označujeme systémy, které:

- jsou časově a prostorově ohraničené,
- otevřené – vyměňují s okolím energii, látky a informace,
- hmotné a jednotného chemického základu – především sloučeniny uhlíku (nukleové kyseliny a proteiny),
- mají vysokou organizovanost – nízká entropie,
- mají schopnost:
  - samostatné existence,
  - samostatné údržby,
  - samostatné reprodukce,
  - vývoje.

Jako základní jednotku všech živých soustav chápeme buňku.

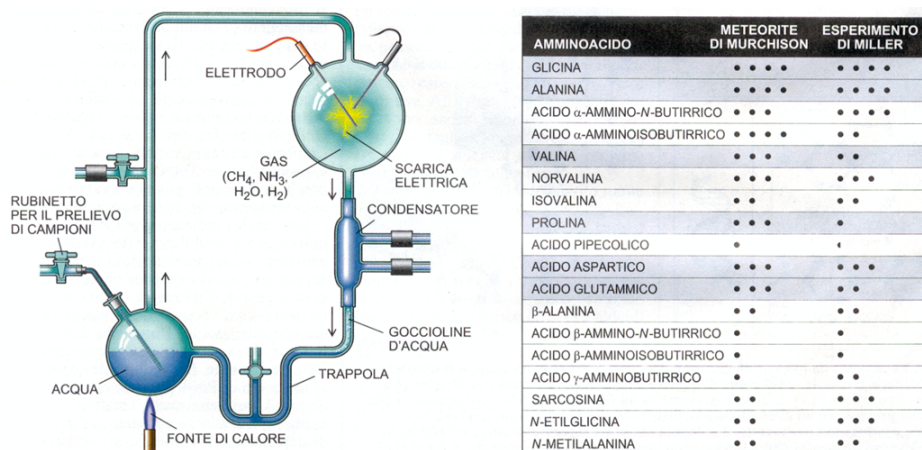
## 14.1 Vznik života

Otázce vzniku života se věnovali lidé od nepaměti. Jde o složitou vědecko-filozoficko-náboženskou otázku, která dodnes není uspokojivě vyřešena. Až do poloviny 18. století mezi učenci převládala naivní abiogeneze, tedy názor, že určité formy života vznikají spontánně z neživé hmoty. Tehdy Francouzská akademie věd vypsalu 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 Anaxagora 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 Hermann von Helmholtz nebo William 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 Francis 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 14.2). Jejich zjištění (Miller, 1953; Miller & Urey, 1959) vyvolala řadu dalších experimentů. Například, Sidney Fox v letech 1959–1960 experimentálně prokázal, 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, provedený po jeho smrti, odhalil více aminokyselin, než on sám uváděl (Lazcano & Bada, 2004).



Obrázek 14.2: 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>.

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 prokázána, ale jejich posloupnost zřejmá není. Moderní teorie, popisující vznik života na Zemi, se tak liší zejména podle důrazu kladeného na jednotlivé atributy:

1. teorie upřednostňující genetický kód sází na „nahé“ geny, které až později získaly vlastnosti buňky;
2. teorie preferující metabolismus pracující 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.

V České republice se vzniku života věnuje například tým profesora Svatopluka Civiše z Akademie věd. S pomocí laseru Asterix simulovali podmínky, jaké panují na Zemi při dopadu meteoritu. Prokázali, že díky energii rázové vlny uvolněné při dopadu meteoritu, ale i působením elektrického výboje na jednoduché plyny jako čpavek či oxid uhelnatý, lze „vyrobit“ základní stavební kameny ribonukleové kyseliny (RNA) – guanin, adenin, cytosin a uracil.

## 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 vzniknout nemůže 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, 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 při teplotách -20°C až +75°C nebo takové, které přežily několikaletý pobyt v kosmickém prostoru. Byly objeveny mikroorganismy, které přeživaly v chladících nádobách jaderných reaktorů. Jedním z takových neuvěřitelně nezdolných tvorečků je želvuška, slovensky pomalka (viz obrázek 14.3), která vydrží dávky radioaktivního záření až 15 000 Gy<sup>3</sup>. Pro srovnání uveďme, že pro člověka je smrtelná dávka už 5 Gy.

Astrobiologové se dnes shodují, že pro život jsou nezbytné následující podmínky:

- existence vody v tekutém stavu (dlouhodobá);
- existence vody ve všech skupenstvích;
- vhodná teplota a tlak;
- desková tektonika.

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>4</sup>. Na obrázku 14.4 jsou vymezeny zóny života

<sup>3</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].

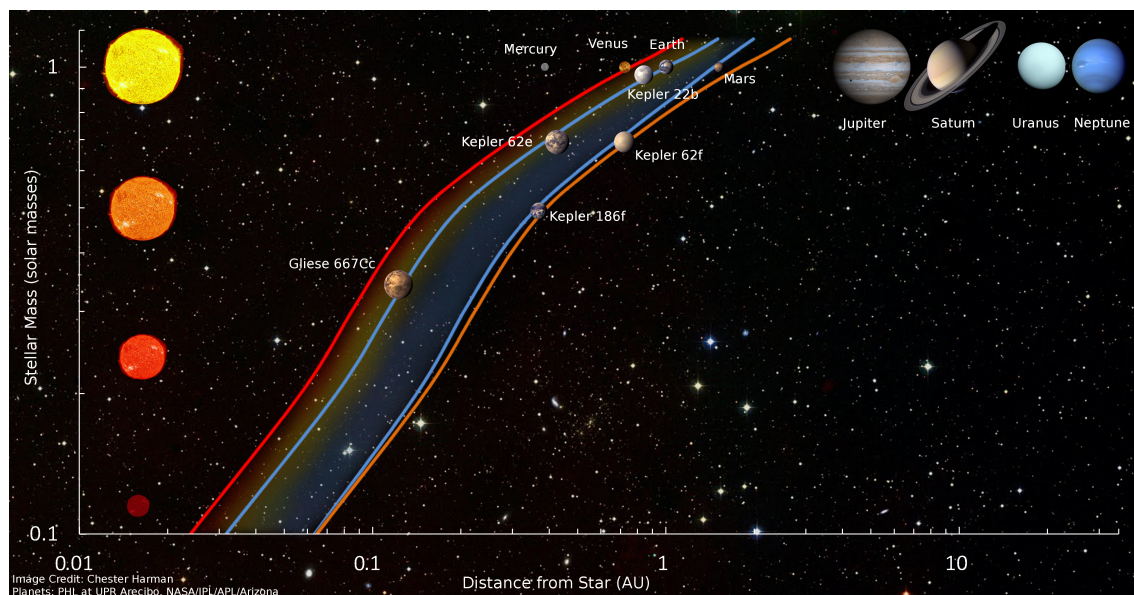
<sup>4</sup>V angličtině se používá termínu „habitable zone“, případně „life supporting zone“.



Obrázek 14.3: Želvušky jsou miniaturní členovci (maximálně 1,5 milimetru velcí). V Česku žije několik desítek druhů. Nejrozšířenější je medvíďátko obecné. Zdroj: <http://www.ekonom.cz>.

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.

Na konci roku 2013 byl publikován odhad počtu takových planet podle výsledků družice KEPLER. Jen v naší galaxii by mělo být v zónách života kolem 40 miliard exoplanet, z toho 11 miliard by jich mělo obíhat kolem Slunci podobných hvězd (Petigura et al., 2013). Stále se rozšiřuje i seznam kandidátů nebo už potvrzených exoplanet v zónách života. Na konci roku 2021 je jich už několik desítek.<sup>5</sup>



Obrázek 14.4: Zóny života u různých typů hvězd. Jejich vzdálenost od mateřské hvězdy a rozsah je ovlivněn její povrchovou teplotou. Autor: S. Harman, NASA/JPL/APL/Arizona.

<sup>5</sup>Aktuální seznam exoplanet v obyvatelných zónách je na <https://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>.

## 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>6</sup>). Nadšený zastánce mimozemského života Frank Drake ve svém příspěvku seznámil přítomné, jak lze jednoduše odhadnout počet civilizací žijících v současné době v naší Galaxii. Základní myšlenka je opravdu jednoduchá. Pro vznik vyspělé civilizace je třeba splnění řady podmínek a jejich pravděpodobnost označíme číselně na škále od 0 (nenastanou nikdy) až po 1 (bude splněno vždy). Výsledná pravděpodobnost je pak dána jako součin pravděpodobností jednotlivých nezávislých okolností. Vznikla tak známá Drakeova rovnice vyjadřující pravděpodobnost výskytu nám podobných civilizací v naší 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 (v různých zdrojích lze nalézt hodnoty 6 – 40; Drakeova hodnota byla 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, neznamená nic. Přesně řečeno, Drakeova rovnice skutečně nemá smysl...“.

<sup>6</sup>Akronym SETI vznikl z anglického názvu projektu „Search for Extra-Terrestrial Intelligence“, tedy Hledání mimozemské inteligence.

### 14.3.1 Život na Zemi – typický vzorek?

Současné výsledky ukazují, že život na Zemi mohl vznikat už v době před 4,4 miliardami let. Podmínky nebyly pro organismy příliš příznivé, ale objevy extremofilních organismů z poslední doby ukazují, že byly pro život přijatelné. Dříve se jako časová hranice vzniku života uvažoval konec 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 pouze to, že „dodávky z vesmíru“ přispěly ke vzniku a rozvoji života na Zemi. 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 (Sagan et al., 1993). Sonda Galileo tak na cestě k Jupiteru prakticky demonstrovala možnost sond při hledání inteligentního života ve vesmíru<sup>7</sup>.

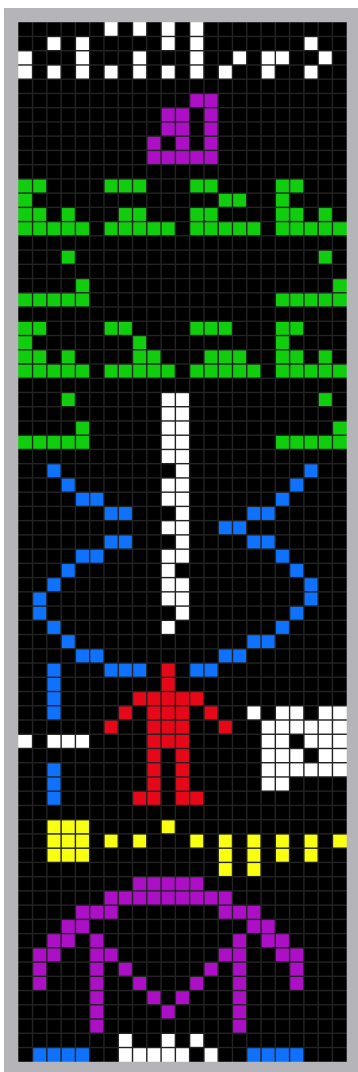
## 14.4 Hledání mimozemského života

Jsou-li ve vesmíru inteligentní bytosti, jak s námi budou komunikovat? Cocconi & Morrison (1959) se v článku „Pátrání po mezihvězdném spojení“ 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  $\varepsilon$  Eri. Během 150 hodin pozorování však nic zajímavého neobjevil. Projekt ale inspiroval i další pracoviště k podobným pokusům. V 60. letech minulého století se do povědomí široké veřejnosti dostaly dvě knihy od významných vědců věnované otázkám mimozemských civilizací. V roce 1962 vydal Josif S. Šklovskij průkopnickou knihu „Vselennaja, žizň, razum“ (Vesmír, život, rozum), kterou později Carl Sagan do-

<sup>7</sup>Sonda se zaměřila na analýzu plynů v atmosféře planety, přítomnost kyslíku a metanu a detekovala samozřejmě i rozsáhlé vysílání v rádiové oblasti.

plnil a jako spoluautor vydal pod názvem „Intelligent Life in the Universe“ (Inteligentní život ve vesmíru). V roce 1966 se kniha stala bestsellerem.

V roce 1971 se konalo v Bjurakanu (Arménie) mezinárodní symposium věnované mimozemským civilizacím. Jednání se účastnili nejen astronomové, ale i biologové, radiotechnici, lingvisté. Závěry široké mezioborové diskuse však byly spíše pesimistické. Optimismus 60. let se vytratil. Přesto se v hledání mimozemských civilizací pokračovalo. V roce 1974 dokonce začal projekt CETI (Communication with extra-terrestrial intelligence), který se snažil přímo o komunikaci s mimozemšťany. Z 305m radioteleskopu v Arecibu byla směrem do kulové hvězdokupy M13 odeslána symbolická zpráva o Sluneční soustavě, Zemi a lidstvu, kterou připravili Frank Drake a Carl Sagan (viz obrázek 14.5).



Obrázek 14.5: Grafická podoba zprávy odvysílané radioteleskopem v Arecibu. Zdroj: wikipedia.

Dosud nejsilnější a nejjasnější signál v rámci projektů SETI byl zachycen 15. srpna 1977 při rutinním monitoringu na radioteleskopu patřícímu Ohio State University. 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. Spekulací o původu signálu je celá řada. Podle některých mohla být zdrojem hvězda slunečního typu 2MASS 19281982-2640123, jiné teorie sázejí na kometu 266P/Christensen.

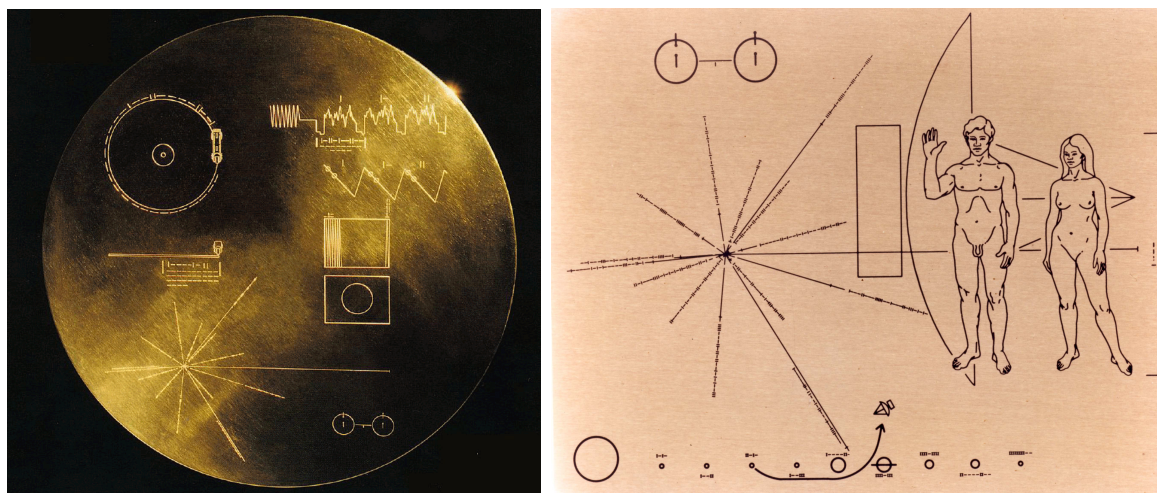
V roce 1984 vznikl institut SETI, oficiálně podporovaný NASA, který řídil několik projektů hledání mimozemského života – například projekty Phoenix nebo SERENDIP. Bohužel, v dnešní době nemá NASA na provoz ústavu peníze a ten tak je financován ze soukromých zdrojů. Nejštědřejším sponzorem je spoluzakladatel firmy Microsoft Paul Allen. Jeho jméno nese soustava radioteleskopů Allen Telescope Array, která 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 ale ve skluzu kvůli potížím s financemi. V roce 2021 je z plánovaných 350 antén stále 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 ráiových 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 mohl každý uživatel počítače připojeného na internet. V době, kdy na počítači běžel jen šetřič obrazovky se spustil program na analýzu malého vzorku dat, který byl automaticky stažen z příslušného serveru. Po skončení analýzy program sám odeslal výsledky a stáhl další balíček dat pro analýzu. Mnoho stolních počítačů a laptopů tak dohromady svým výkonem konkurovalo superpočítačům. Od roku 2005 běžel projekt jako součást BOINC (Berkeley Open Infrastructure for Network Computing) (<https://setiathome.berkeley.edu/>), v 2020 byla ale distribuce balíčků dat pro analýzu zastavena. Finální zpracování dat však pokračuje.

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, které startovaly jen o několik let později v roce 1977, jsou stále aktivní. Řídící 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>8</sup>



Obrázek 14.6: Vlevo: Gramofonová deska, kterou na palubě nese sonda Voyager. Vpravo: Plaketa na palubě sondy Pioneer 10. Zdroj: wikipedia.

<sup>8</sup>Detaily ke zlaté desce na sondě Voyager jsou dostupné na <https://voyager.jpl.nasa.gov/golden-record/>.



Úplně nový pohled na hledání vyspělého mimozemského života prezentovali Gillon et al. (2021). Podle jejich úvah existují starší a vyvinutější civilizace než je ta naše. Takové civilizace by pak do planetárních soustav v určitém perimetru od svého domova umístily monitorovací zařízení, sondy. My bychom se tak měli soustředit na hledání vysílání těchto sond z naší Sluneční soustavy.

### 14.4.1 Život ve Sluneční soustavě

Projekty zmíněné v předchozí kapitole se zaměřují na hledání života ve vzdálenějším vesmíru nebo projevů jeho přítomnosti v našem okolí. Ale nemohl život vzniknout a vyvíjet se podstatně blíže, někde doslova za humny, ještě ve Sluneční soustavě?

Přehled těles, kde by ve Sluneční soustavě mohl být mimozemský život, začneme překvapivě Venuší. Současné podmínky na povrchu přítomnost života v podstatě vylučují. Schulze-Makuch et al. (2002) publikovali práci o možném životě v oblačných vrstvách Venuše. Některé údaje sond Veněra, Pioneer Venus a Magellan (zvláště ve složení vodních kapek v mracích) je možné vysvětlit přítomností mikroorganismů. Kromě toho se v myšlenkách vraťme do minulosti planety. Před čtyřmi miliardami let byl zářivý výkon Slunce o 40 % menší, takže Venuše měla optimální podmínky pro existenci tekuté vody a mohl tam tedy být i život. A co jestli se během dlouhého období přizpůsobil a přestěhoval do vhodné, obyvatelné zóny v atmosféře Venuše?

Další místem, zřejmě nejčastěji zmiňovaným v souvislosti s mimozemským životem, je planeta Mars. O kanálech a tvářích na povrchu Marsu toho bylo napsáno opravdu mnoho. Vždy šlo ale o hru světla a stínu. Žádní Marťané nám vzkaz tímto způsobem neposílají. Příčný 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. Nečekané bylo zejména jeho množství a také to, že dle prvních výsledků to vypadalo na jeho aktivní doplňování do atmosféry. Jenže pak metan vymizel a když v letech 2012 až 2013 měřily obsah metanu v atmosféře přístroje na vozítku Curiosity, žádný metan nezaznamenaly. Občasný výskyt metanu může být známkou přítomnosti nějaké formy živých (mikro)organismů, ale existuje i vysvětlení založené na chemických a geologických procesech.

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 by tu být i jiné zdroje energie, například vulkanismus.

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 Sa-

turnu, Titan. Podmínky na něm jsou podobné těm, které panovaly v minulosti na Zemi. Na povrchu bylo objeveno první kapalně jezero mimo Zemi (asi etanu a/nebo metanu) a podpovrchový oceán z kapalně vody a čpavku.

Je ale možné, že se život nachází i na jiných místech. Konec konců i extrémofilní organismy na Zemi vědce několikrát velice překvapily místem svého výskytu. V několika meteoritech (například Murchison a Jefremovka) byly nalezeny náznaky fosilních bakterií. Takový případ se stal například 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 rozsvivky 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.

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. Jak moc může náš život ovlivnit nepatrný nepřítel v podobě viru ukazuje pandemie covidu-19. 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. Mimoszemští predátoři by mohli lidi zotročit nebo i zcela zlikvidovat. Vzpomeňme jen na historii lidskou. Když se v minulosti setkávaly 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 vědců přelomu 20. a 21. století Stephen 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 F. Drakeovi a známém astronomovi a popularizátorovi C. 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 anebo mimozemšťané neexistují, a proto nebyly na Zemi zjištěny stopy jejich přítomnosti. Jaké řešení je pravdivé a zda vůbec tento paradox existuje, ukáže zřejmě 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
- Gillon, M., Burdanov, A., & Wright, J. T. 2021, arXiv:2111.05334
- Hays, L. et al. 2015, Astrobiology Strategy, [https://nai.nasa.gov/media/medialibrary/2016/04/NASA\\_Astrobiology\\_Strategy\\_2015\\_FINAL\\_041216.pdf](https://nai.nasa.gov/media/medialibrary/2016/04/NASA_Astrobiology_Strategy_2015_FINAL_041216.pdf), 236 str.
- 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

- Petigura, E. A., Howard, A. W., & Marcy, G. W. 2013, *Proceedings of the National Academy of Science*, 110, 19273
- Sagan, C., Thompson, W. R., Carlson, R., Gurnett, D., & Hord, C. 1993, *Nature*, 365, 715
- bibitem[Schrödinger (1944)]schrodinger Schrödinger, E. 1944, český překlad v knize *Co je život?. Duch a hmota. K mému životu*, VUTIUM Brno, 2018
- 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., Samaranayake, A. 2013, *Journal of Cosmology*, 21, No. 37 (10 January 2013)

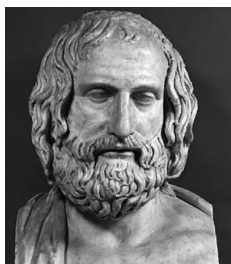
## 15 Rejstřík osob



**Abd al-Rahman al-Sufi** (\*7.12.903 Rey, Írán – †25.5.986 Šíráz, Írán) – známý také jako Abd ar-Rahman as-Sufi, 'Abd al-Rahman Abu al-Husayn, 'Abdul Rahman Sufi, nebo 'Abdurrahman Sufi a na Západě také jako Azophi a Azophi Arabus. Jako první zaznamenal pozorování M31, Magellanova mračna a další objekty. V Knize o souhvězdích stálých hvězd z r. 964 uvedl 48 souhvězdí, která porovnával s řeckými. Věděl o odklonu ekliptiky od světového rovníku. Spočítal délku tropického roku.



**Alhazen** Abú 'Alí al-Hasan ibn al-Hasan ibn al-Hajtham (\*1.7.965 Basra, Irák) – †6.3.1040 Káhira, Egypt) – byl arabský vědec. Zabýval se astronomií, optikou a matematikou. Traduje se, že Alhazen měl prohlašovat, že je schopen vymyslet systém, který by předpovídal a reguloval záplavy na Nilu. Proto jej káhirský chalífa al-Hákim pozval do Egypta. Alhazen však zjistil, že úkol nesplní, začal předstírat šílenství a žil deset let v domácím vězení, aby tak ušel jistému trestu smrti. Během té doby se věnoval přírodovědným studiím. Sepsal vynikající spis o optice a podařilo se mu opravit některé Aristotelovy omyly.).



**Anaxagorás** (\*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).



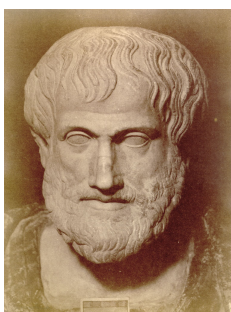
**Andrade**, Edward Neville da Costa (\*27.12.1887 Londýn, Velká Británie - †6.6.1971 Londýn, Velká Británie) – anglický fyzik, spisovatel, básník. Spolu s E. Rutherfordem objevil záření s vyšší energií než rentgenovské záření, které Rutherford označil jako záření gama.



**Argelander**, Friedrich Wilhelm August (\*22.3.1799 Memel, Prusko (dnes Klajpeda, 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).



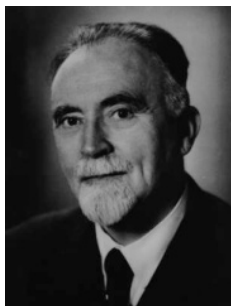
**Cannonová,** Annie Jump (\*11.12.1863 Dover, Delaware, USA – †13.4.1941 Cambridge, Massachusetts, USA) – americká astronomka. V roce 1896 začala pracovat u Pickeringa na Harvard-College-Observatorium. Sama klasifikovala ručně zhruba 350 000 spekter hvězd, což pravděpodobně nikdo jiný nedokázal. S využitím 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.

**Cassegrain,** Laurent (\*1629 Chartres, Francie – †31.8.1693 Chaudon, Eure-et-Loir, Francie) – francouzský katolický kněz, fyzik a vynálezce. Pro astronomy je jeho jméno synonymem jednoho z nejběžnějších typů dalekohledů. Kdo je autorem tohoto optického systému se podařilo vypátrat až roku 1977.

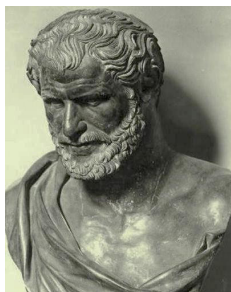


**Cassini,** Giovanni Domenico, také Jean-Dominique (\*8.6.1625 Perinaldo, Janovská republika (dnešní Itálie) – †14.9.1712 Paříž, Francie – italsko-francouzský astronom a inženýr. Spoluobjevil rudou skvrnu na Jupiteru, objevil 4 Saturnovy měsíce, dělení prstenců. Poprvé pozoroval diferenciální rotaci Jupiteru. Spolu s kolegou změřili paralaxu Marsu a určili jeho vzdálenost. Poprvé tak ukázali skutečné vzdálenosti ve Sluneční soustavě. Založil Pařížskou hvězdárnu v r. 1671).

**Ču** Kong, také Chou Kung (11. st. př.n.l.) – čínský vědec, určil poměrně přesně úhel sklonu ekliptiky k rovníku.

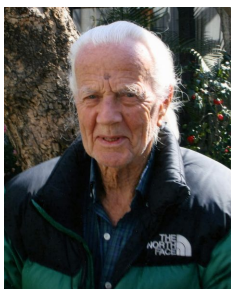


**Delporte,** Eugène Joseph (\*10.1.1882 Genappe, Belgie – †19.10.1955 Ukkel, Belgie) – objevitel komet a 66 asteroidů. Na základě jeho návrhu schválila IAU hranice souhvězdí.



**Démokritos** z Abdér (460 př.n.l. - 370 př.n.l.) – významný řecký předsokratovský filozof, jeden ze zakladatelů atomismu. O jeho životě je málo známo, z díla se zachovaly jen zlomky.

**Digges, Leonard** (\*1515? – †1559? – anglický matematik a zeměměřič, velký popularizátor vědy). Několik poznámek z různých zdrojů potvrzuje, že Digges vynalezl čočkový i zrcadlový dalekohled jako pomůcku potřebnou pro zeměměřičské práce. Bohužel žádný model se nedochoval. Za účast v povstání byl odsouzen k smrti a propadnutí majetku. Po letech sporů dosáhl navrácení majetku, ale zřejmě krátce nato zemřel.



**Dobson, John Lowry** (\*14.9.1915 Peking, Čína – †15.1.2014 Burbank, USA) – americký amatérský astronom, který je znám jako autor levné, azimutální montáže pro dalekohledy typu Newton.



**Doppler, Christian Andreas** (\*29.11.1803 Salzburg, Rakousko – †17.3.1853 Benátky, Itálie) – význačný rakouský fyzik a matematik. Je po něm pojmenován Dopplerův jev. V roce 1835 se Doppler stal profesorem matematiky na reálce v Praze a roku 1836 konal na technice nepovinné přednášky z vyšší matematiky. V roce 1842 publikoval v *Abhandlungen der königliche böhmischen Gessellschaft der Wissenschaften* práci *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels*, ve které je popsán jev známý dnes pod jeho jménem.



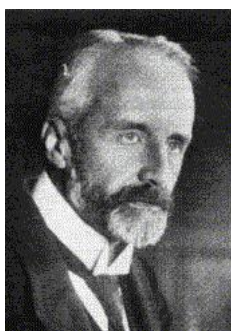
**Drake, Frank Donald** (\*28.5.1930, Chicago, USA – †2.9.2022 Aptos, USA) – americký astrofyzik. Průkopník hledání mimozemské inteligence, podílel se na založení SETI a prvních pokusech o komunikaci s mimozemskou inteligencí. Je tvůrcem Drakeovy rovnice. Spoluvytvořil zprávu pro mimozemské civilizace odeslanou z radioteleskopu v Arecibu, v níž je zakódován astronomický a biologický popis Země a jejích životních forem.



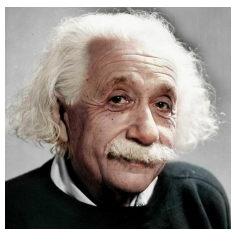
**Draper, Henry** (\*7.3.1837, Prince Edward County, Virginia, USA – †20. 11.1882, New York, USA) – americký fyzik a astronom amatér, člen Národní AV USA (1877). Nejznámější jsou jeho průkopnické práce z oblasti astrofotografie a spektrografie. Získal první fotografii spektra hvězdy Vega a je po něm nazván katalog hvězdných spekter Henry Draper Catalogue. Jeho dalekohled je nyní na observatoři Univerzity Mikuláše Kopernika v Piwnicach u Toruně v Polsku.



**Dreyer,** John Louis Emil Dreyer (\*13.2.1852 Kodaň, Dánsko – †14.9.1926 Oxford, Velká Británie) – dánsko-irský astronom, původní jméno Johan Ludvig Emil. Sestavil katalog objektů hlubokého vesmíru New General Catalogue (NGC) s dvěma dodatky Index Catalogue (IC). Je také autorem knih o historii astronomie.



**Eberhard,** Gustav; Julius, Paul Alexander (\*10.8.1867 Gotha, Německo - †3.1.1940 Postupim, Německo) – německý astronom na observatoři v Postupimi. Zabýval se astrofyzikou, spektroskopií a fotografickou fotogrammetrií. Objevil přítomnost čár K a H ve slunečním spektru, známku aktivity na povrchu hvězdy. Byl po něm pojmenován fotografický efekt.



**Einstein,** Albert (\*14.3.1879 Ulm, Německo - †18.4.1955 Princeton, USA) – jeden z nejvýznamnějších vědců lidské historie, autor obecné a speciální teorie relativity. Zabýval se kvantováním elektromagnetického pole, vysvětlil fotoelektrický jev, Brownův pohyb. Nositel Nobelovy ceny za fyziku v roce 1921. Zajímavostí je, že je spolu s Leó Szilárdem spoluautorem patentu na nový typ chladničky.

**Empedoklés** (\*490 př.n.l. Agrigento, řecké město na Sicílii - † kolem 430 př.n.l.) – definoval čtyři substance základní látky všeho bytí: oheň, vodu, vzduch a zemi. Jeho práce inspirovala Platóna.

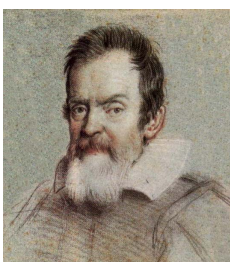


**Fabricius,** David nebo David Faber, David Goldschmidt (\*9.3.1564, Esens, Německo - †7.5.1617, Osteel, Německo) – německý teolog, dva velké objevy udělal se svým synem, Johannem (1587-1615). Objevil první periodickou proměnnou hvězdu Míru Ceti v srpnu 1596. Pozoroval sluneční skvrny a předpokládal, že se Slunce otáčí kolem své osy. Jeho smrt je do jisté míry kuriózní. Při kázání prohlásil, že zná identitu zloděje drůbeže, 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 pomínulo a šel se projít. Místní rolník Frerik Hoyer jej napadl rýčem a zabil.

**Filoláos** (\*470 př.n.l. - †399 př.n.l.) – první, kdo přesunul Zemi z centra vesmíru, kam umístil centrální oheň, kolem něhož obíhají Země, Slunce, Měsíc a planety. Slunce oběhne kolem centrálního ohně za jeden rok. Hvězdy jsou naproti tomu nehybné. Uvažoval i tom, že Země rotuje kolem své osy.



**Fraunhofer**, Joseph Ritter 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 Fran- cise 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.



**Gregory**, James (\*listopad 1638 Drumoak u Aberdeenu, Skotsko – †říjen 1675 Edinburgh, Skotsko (dnešní Velká Británie) – skotský matematik a astronom. V knize *Optica Promota* (1663) popsal nový typ zrcadlového dalekohledu. Popsal také metodu využití přechodu Venuše přes Slunce pro měření vzdálenosti Země od Slunce. Tato metoda byla později připisována Edmundu Halleymu a byla přijata jako základ pro 1. efektivní měření astronomické jednotky.).



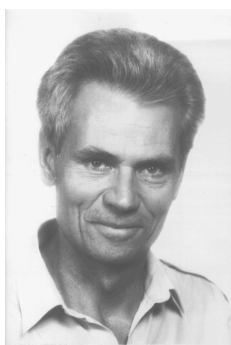
**Grosseteste**, Robert, známý také jako Robert Greathead nebo Robert z Lincolnu (\*kolem 1175 Stradbroke, Suffolk (Velká Británie) – †9.10. 1253 Lincoln, Velká Británie – anglický učenec, teolog, profesor univerzity v Oxfordu a biskup v Lincolnu. Zabýval se filozofií, teologií, geometrií. Ve spise o optice uvádí popis dalekohledu. Na jeho práce v optice navázal Roger Bacon.



**Hájek z Hájků**, 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.



**Harriot**, Thomas (\*asi 1560 Oxford, Anglie – †2.7.1621 Londýn, Velká Británie) – anglický astronom, matematik, etnograf a překladatel. Věnoval se balistice, optice. V matematice studoval komplexní čísla. Počátkem r. 1609 si pořídil z Holandska dalekohled a 26. července 1609 vykonal první zaznamenané pozorování Měsíce dalekohledem (několik měsíců před Galileem).



**Hawking**, Stephen William (\*8.1.1942 Oxford, Velká Británie - †14.3.2018 Cambridge, Velká Británie) – anglický teoretický fyzik, kosmolog a spisovatel. Během vysokoškolského studia mu bylo diagnostikována amyotrofická laterální skleróza, která jej nakonec zcela paralyzovala. Přesto dokázal pracovat a stal se jedním z nejvýznamnějších fyziků.



**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.

**Helmholtz, Hermann Ludwig Ferdinand von** – viz von Helmholtz, Hermann Ludwig Ferdinand



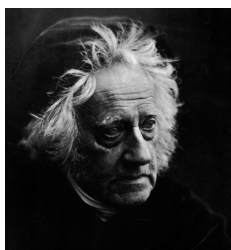
**Hevelius**, Heweliusz Jan, někdy též Johann Hewelcke, Hewel, Hewelke, Höfelcke, Hövellius, Höwelcke (\*28.1.1611 Gdaňsk - †28.1.1687 Gdaňsk, Polsko) – polský astronom, pivovarník a po mnohá léta člen tamější městské rady. Je znám také jako Johannes Hevelius, Johann Hewelke, Johannes Hewel. Je považován 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 pekuliárních 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“.



**Hertz**, Heinrich Rudolf (\*22.2.1857 Hamburg, Německo - †1.1.1894 Bonn, Německo) – německý fyzik, jako první potvrdil experimentálně existenci elektromagnetického vlnění, které předpověděl Maxwell. Zabýval se i pružností, pevností a fluorescencí látek. Je po něm pojmenována jednotka pro frekvenci – Hz. Zemřel na komplikace po operaci, která měla řešit jeho těžké migrény.





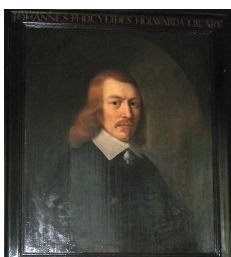
**Hertzsprung**, Ejnar (\*8.10.1873 Frederiksberg, Kodaň, Dánsko - †21.10.1967 Roskilde, Dánsko) – chemik a astronom. Zjistil, že ze změny šířek spektrálních čar lze usuzovat na typ hvězdy (trpaslík, obr, hvězda hlavní posloupnosti), které vedly k vytvoření známého diagramu. Jako první kalibroval závislost perioda-svitivost pro cefeidy a použil ji pro určení vzdálenosti k Malému Magellanovu mračnu. Určil vlastní pohyby, hvězdné velikosti, barevné indexy pro tisíce hvězd v Plejádách a změřil kolem jednoho milionu pozic dvojhvězd na fotografických deskách.



**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 balónovém 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.



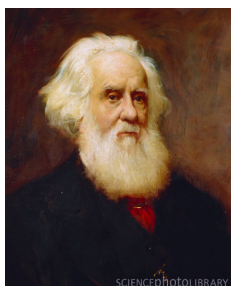
**Hipparchos** (\*asi 190 př.n.l. Nikaia (Nikáj, Nicaea), dnešní Turecko – †asi 120 př.n.l. Rhodos, Řecko) – jeden z největších antických astronomů. Zvýšil přesnost pozorování, vynalezl přístroje pro měření výšky hvězd, určil sklon zemské osy k rovině ekliptiky, přesně délku slunečního roku, precesi, 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.



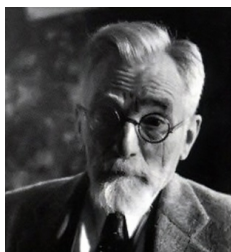
**Holwarda**, John Phocylides, též Jan Fokkens, Johannes Fokkes Holwarda, Jan Fokkes van Holwerd, Johann Phocylides (\*19.2.1618 Holwerd, Nizozemí - †22.1.1651 Franeker, Nizozemí) – fríský astronom, fyzik a filosof. Známy je zejména znovuobjevením proměnnosti Míry Ceti a určením délky cyklu její proměnnosti 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.



**Chrétien**, Henri Jacques (\*1.2.1879 Paříž, Francie – †6.2.1956 Washington, USA) – francouzský astronom a vynálezce. Spolu s G.W. Ritcheyem spoluvynalezl Ritcheyho–Chrétienův systém dalekohledu, který se nyní používá u velkých teleskopů. Chrétien také vynalezl a nechal patentovat systém pro natáčení širokoúhlých filmů později označený jako CinemaScope.



**Jansky**, Karl Guthe (\*22.10.1905 Norman, Oklahoma, USA – †14.2.1950 Red Bank, New Jersey, USA) – americký fyzik a radioinženýr s českými kořeny. V srpnu 1931 objevil rádiové vlny vycházející z centra naší Galaxie. Je považován za jednu ze zakládajících postav radioastronomie. Je po něm pojmenována jednotka používaná v radioastronomii pro sílu (husnotu toku) rádiových zdrojů  $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ .



**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.



**Kant,** Immanuel (\*22.4.1724, Královec – †12.2.1804 Královec, dnes Kaliningrad, Rusko) – německý filosof, jeden z nejvýznamnějších evropských myslitelů a poslední z představitelů osvícenství. Byl mj. profesorem matematiky, logiky, fyziky, geografie, antropologie, práva. Věnoval se i přírodním vědám. Formuloval s Laplacem teorii vzniku vesmíru, vyslovil hypotézu o vzniku sluneční soustavy.

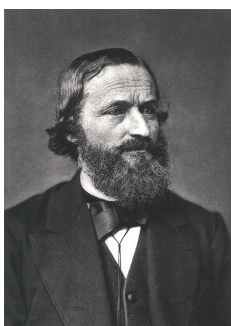


**Keenan,** čti [ki:nan] Philip Childs (\*31.3.1908 Bellevue , Pennsylvania, USA – †20.4.2000 Columbus, Ohio, USA) – americký astronom, spolu s W.W.Morganem vytvořili klasifikaci hvězd podle jejich spekter. Publikoval odborné články po 70 let (1929-1999), tedy déle než řada astronomů žije.

**Kelvin,** lord – viz William, Thomson, lord Kelvin z Largsu.

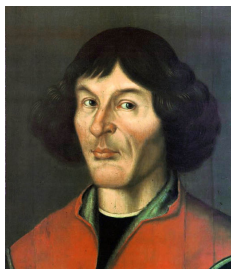


**Kepler,** Johannes, někdy počestěné Jan (\*27.12.1571 Weil der Stadt, Německo – †15.11.1630 Řezno, Německo) – německý astronom, astrolog a matematik. Sestavil čočkový dalekohled. Během působení v Praze na dvoře císaře Rudolfa II. formuloval dva ze tří zákonů popisujících pohyb planet. Jeho matka byla obviněna z čarodějnictví, ale po 14 měsících byla propuštěna i díky obhajobě svého syna.

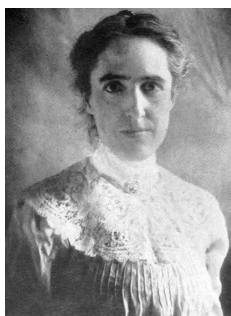


**Kirchhoff,** Gustav Robert (\*12.3.1824 Königsberg, Prusko, nyní Kaliningrad, Rusko - †17.10.1887 Berlín, Německo) – německý fyzik, který se zabýval především elektřinou, spektroskopii a zářením zahřátých objektů. Jako první použil termín záření „černého tělesa“. Formulací zákonů spektroskopie (s Bunsem) 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.



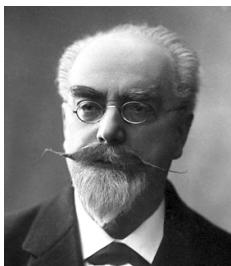
**Leavittová**, Henrietta Swan, čti *levitová* (\*4.7.1868 Lancaster, Massachusetts – †12.12.1921 Cambridge, Massachusetts, USA) – americká astronomka. Na observatoři Harvard College Observatory v Massachusetts objevila na deskách Malého Magellanova mračna přes dva a půl tisíce proměnných hvězd. Z nich 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 na základě pozorování odhalil E. Hubble v roce 1929. Od r. 2018 by se tato závislost měla označovat Hubbleův-Lemaîtreův zákon. Lemaître je často označován za otce teorie velkého třesku. Počáteční stav vesmíru označoval jako „priordial atom“ nebo „kosmické vejce“.



**Lippershey**, Hans, též Hans Lipperhey nebo Johann Lippershey z Middelburgu (\*asi 1570 Wesel, Německo – †29.9.1619 Middelburg, Nizozemí) – německo-nizozemský brusič skla a výrobce brýlí. Býval považován za vynálezce dalekohledu. Jako první požádal o patent na dalekohled.

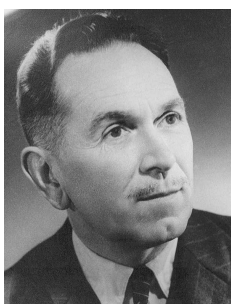


**Lippmann,** Jonas Ferdinand Gabriel (\*16.8.1845 Bonnevoie/Bouneweg, Luxembourg – †13.7.1921 na palubě parníku France, Atlantský oceán) – francouzský fyzik, nositel Nobelovy ceny za fyziku za rok 1908 za metodu fotografické reprodukce barev pomocí interference. Vynalezl celostat).

**lord Kelvin,** – viz William, Thomson, lord Kelvin z Largsu.



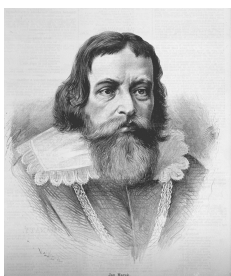
**Lummer,** Otto Richard (\*17.7.1860 Gera, Německo – †5.7.1925 Breslau, Prusko (dnešní Wrocław, Polsko)) – německý fyzik. Věnoval se zejména optice a tepelnému záření. Lummerova zjištění vedla spolu s jinými M. Plancka v r. 1900 ke konceptu Planckova zákona záření absolutně černého tělesa a základů kvantové hypotézy.



**Lyot,** Bernard Ferdinand (\*27.2.1897 Paříž, Francie – †2.4.1952 Káhira, Egypt) – francouzský astronom. Odborník na polarizované a monochromatické světlo, což využil např. k objevu prachových bouří na Marsu. Zkonstruoval koronograf, který mu umožnil jako prvnímu člověku pozorovat sluneční korónu mimo zatmění Slunce. Zemřel při návratu z expedice za zatměním Slunce v Súdánu.



**Maksutov,** Dmitrij Dmitrijevič (\*23.4.1896 Oděsa, Rusko (dnes Ukrajina) – †12.8.1964 Petrohrad, Sovětský Svaz, dnes Rusko) – sovětský optický inženýr a amatérský astronom. V roce 1944 představil v knize Nové katadioptrické čočkové systémy nový typ dalekohledu, který je po něm pojmenován. Zakladatel Laboratoře astronomické optiky na Státním optickém institutu v Leningradu, dnes Petrohradu. Jeho dědeček byl posledním ruským gubernérem Aljašky, než byla prodána Američanům.).



**Marci,** Jan Marek z Kronland, v latině Ioannes Marcus Marci (\*13.6.1595 Lanškroun – †10.4.1667 Praha) – renesanční lékař, fyzik a matematik, jeden z posledních českých polyhistorů. Zajímal se o jazyky, přírodní vědy, geometrii a matematiku. Věnoval se rozkladu světla. Za své zásluhy mj. při obléhání Prahy Švédy roku 1648 byl císařem Ferdinandem III. povýšen šlechtického stavu a byl mu udělen erb, ve kterém se objevila i duha v narážce na jeho studie o lomu a rozkladu světla. Byl osobním lékařem dvou císařů, profesorem a děkanem Karlovy univerzity.



**Maury**, Antonia Caetana de Paiva Pereira (\*21.3.1866 Cold Spring, New York, USA - †8.1.1952 Dobbs Ferry, New York, USA) – byla členkou Pickeringova týmu počtářek. Měla zásadní podíl na spektrální klasifikaci hvězd, kterou mj. využil Hertzsprung ke konstrukci HR diagramu. Nejslavnější prací je kromě katalogu hvězdných spekter i spektroskopická analýza dvojhvězdy beta Lyrae.



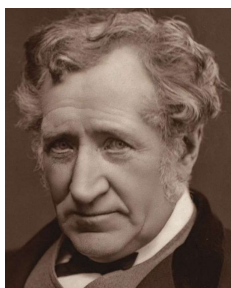
**Maunder**, Edward Walter (\*12.4.1851 Londýn, Anglie – †21.3.1928 Londýn, Velká Británie) – anglický astronom známý studiem slunečních skvrn a slunečního magnetického cyklu, které mj. vedly ke zjištění, že v období let 1645 – 1715 bylo Slunce v období dlouhého minima činnosti (Maunderovo minimum). 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.



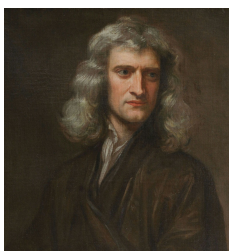
**Montanari**, Geminiano (\*1.6.1633 Modena, Itálie – †13.10.1687 Padova, Itálie) – byl italský astronom, výrobce čoček, ekonom a zastánce experimentálních vědeckých metod. Věnoval se i výuce astronomie. V r. 1667 pozoroval změny jasnosti Algolu.



**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*.



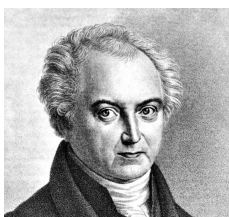
**Nasmyth**, James Hall (\*19.8.1808 Edinburgh, Skotsko – †7.5.1890 Londýn, Velká Británie) – skotský inženýr, filozof, umělec a amatérský astronom. Vynalezl bucharu (parní kladivo), spolupuzalozil firmu na výrobu těžkých strojů. Už v 48 letech ale odešel do důchodu a věnoval se astronomii a fotografii. Sestrojil 50cm dalekohled vlastní konstrukce, která je po něm pojmenována a věnoval se zejména pozorování Měsíce.).



**Newton, Isaac** (\*4.1.1643 Woolsthorpe Manor, Anglie – †31.3.1727 Kensington, Velká Británie) – anglický fyzik, matematik, astronom, alchymista a teolog. Jedna z nejvýznamnějších postav světové vědy. Působil na Trinity College v Cambridge. Spis *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* z r. 1687 položil základy klasické mechaniky. Dnes je řazen mezi nejdůležitější knihy v historii vědy.



**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.



**Olbers, Heinrich Wilhelm Matthias** (\*11.10.1758 Arbergen, Německo - †2.3.1840 Brémy, Německo) – německý astronom a lékař. Vyvinul metody pro výpočet drah nebeských těles. Objevil planetky Pallas a Vesta, šest komety. V r. 1823 zformuloval paradox temné oblohy, který je po něm pojmenován.



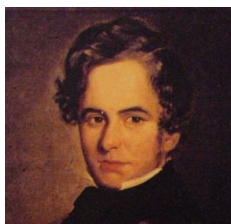
**Oort, Jan Hendrik** (\*28.4.1900 Franeker, Nizozemí - †5.11.1992 Leiden, Nizozemí) – nizozemský astronom. Studoval naši Galaxii, objevil galaktické halo, určil vzdálenost ke středu Galaxie. Při popisu rotace Galaxie si v . 1932 jako první uvědomil, že zde musí být mnohem více hmoty než vidíme. Poukázal tak na temnou hmotu, jejíž prokázání je spojováno až s V. Rubinovou o desítky let později. Zabýval se i výzkumem Sluneční soustavy, původem komet. Významně přispěl k rozvoji radioastronomie.



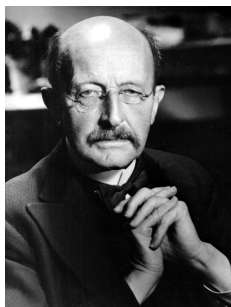
**Paczynski, Bohdan** (\*8.2.1940 Wilno, Polsko (nyní Vilnius, Litva) - †19.4.2007 Princeton, USA) – polský astronom. Zabýval se polarizací a absorpcí v Galaxii, vývojem hvězd a akrečními disky v těsných dvojhvězdách. Zdroje  $\gamma$  záblesků „odsunul“ do kosmologických vzdáleností. Vypracoval teorii hypernov. Navrhl využívat gravitační mikročočky pro detekci kompaktních objektů v galaktickém halo. Vedl dva přehlídkové projekty - OGLE a ASAS.



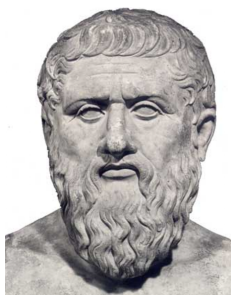
**Pickering**, Edward Charles (\*19.7.1846 Boston, USA - †3.2.1919 Cambridge, Massachusetts, USA) – americký astronom a fyzik, věnoval se stelární astronomii, proměnným hvězdám a spektroskopii. Spolu s C. Vogelem objevil spektroskopické dvojhvězdy. Je znám tím, že zaměstnával skupinu žen, které zpracovávaly ohromné množství pozorovacích dat, vyhodnocovaly spektra hvězd. Mezi jinými byly v té skupině „kalkulaček“ i A. Mauryová nebo A. J. Cannonová.



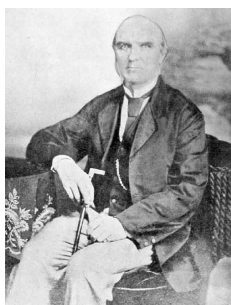
**Pigott**, Edward (\*27.3.1753 asi Whitton, Middlesex, Anglie – †27.6.1825 Bath, Anglie) – anglický astronom. Objevil proměnnost  $\eta$  Aql, mlhovinu M64 a velkou kometu 1783. Později pracoval se sousedem a přítelem J. Goodrickem. Se-stavil první „katalog“ 12 tehdy známých proměnných hvězd.



**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.

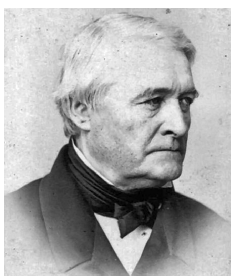


**Platón**, (\*428/427 př.n.l. Atény nebo Aigina, Řecko - †348/347 př.n.l. Atény, Řecko) – antický myslitel a filosof. Platón (v latinské verzi Plato) je všeobecně používaný pseudonym, původně přezdívka, jeho jméno však bylo Aristoklés. V Aténách založil Akademii, která byla později vzorem evropským univerzitám a vědeckým institucím.

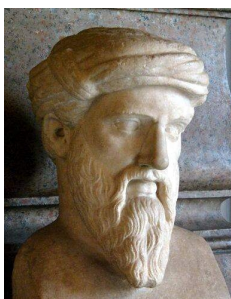


**Pogson**, Norman Robert (\*23.3.1829 Nottingham, Velká Británie - †23.6.1891 Madrás (dnes Chennai, česky Čennaí), Indie) – anglický astronom, pozorovatel na různých observatořích. Školu opustil v 16 letech a vzdělával se samostatně. V r. 1854 publikoval katalog tehdy známých proměnných hvězd. Nejznámějším 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 Crotona 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 vyzařovacích 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.



**Ranyard**, Arthur Cowper (\*21.6.1845 Swanscombe, Kent, Anglie – †14.12.1894 Londýn, Velká Británie) – anglický právník a astronom amatér. Zabýval se zejména Sluncem a jako první si na základě vlastních pozorování i historických záznamů povšiml souvislosti tvaru koróny se slunečním cyklem. Navrhl systém coudé pro zrcadlové dalekohledy.).



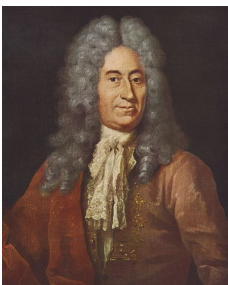
**Ritchey**, George Willis (\*31.12.1864 Tuppens Plains, Ohio, USA – †4.11.1945 Azusa, Kalifornie, USA – vyučený truhlář, ale později optik a konstruktér dalekohledů. Spolu s H. Chrétienem spoluvynalezl zrcadlový dalekohled nové konstrukce, která se používá v současnosti u nových profesionálních dalekohledů.



**Ritter**, Johann Wilhelm (\*16.12.1776 Samitz bei Haynau, Slezsko (nyní Chojnów, Polsko) - †23.1.1810 Mnichov, Německo) – německý chemik, fyzik a filozof. Objevil ultrafialové záření. Sestrojil první akumulátor. Prováděl řadu elektrochemických pokusů, některé i na sobě a to zřejmě přispělo k jeho časnému úmrtí.



**Reber**, Grote (\*22.12.1911 Wheaton, Illinois, USA – 20.12.2002, Ouse, Tasmánie, Austrálie) – americko-australský astronom, průkopník radioastronomie, tvůrce prvního radioteleskopu na světě v r. 1937. Měřil 9,4 metru a až do konce druhé světové války šlo o jediný přístroj svého druhu na světě. Roku 1942 vytvořil první radiovou mapu vesmíru.



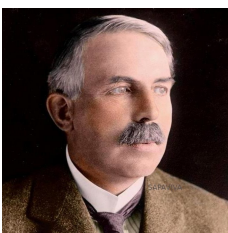
**Rømer**, Ole Christensen (\*25.9.1644, Aarhus, Dánsko – 19.9.1710, Kodaň, Dánsko) – dánský astronom, fyzik, matematik, soudce a politik. Na základě pozorování zákrytů Jupiterova měsíce Io v roce 1676 dokázal, že rychlost světla je konečná. Později byl ve vedení kodaňské policie, stal se starostou Kodaně a vystupoval i v dalších funkcích.



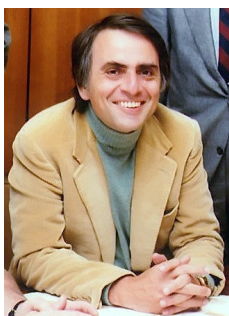
**Rubin**, Vera Cooper (\*23.7.1928 Filadelfie, Pensylvánie, USA – †25.12.2016 Princeton, USA) – americká astronomka. Věnovala se studiu rotace Galaxie. Její objev „ploché rotační křivky“ je dodnes považován za nejpřímější a nejprůkaznější důkaz existence temné hmoty. V r. 2019 po ní byla pojmenována observatoř dříve označovaná LSST.



**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.



**Rutherford**, Ernest, 1. baron Rutherford z Nelsonu (\*30.8.1871 Brightwater, Nový Zéland - †19.10.1937 Cambridge, Velká Británie) – britský fyzik novozélandského původu. Bývá považován za zakladatele jaderné fyziky. Nositel Nobelovy ceny za fyziku v r. 1908.



**Sagan, Carl**; (\*9.11.1934, Brooklyn, USA – †20.12.1996 Seattle, USA) – astronom, spisovatel popularizátor astronomie. Podporoval hledání mimozemských civilizací. Je autorem oceňovaného seriálu *Cosmos: Cesta do neznáma*. Podílel se na přípravě robotických misí zkoumajících planety Sluneční soustavy. Navrhl vybavit sondy Pioneer a Voyager zprávami pro mimozemské civilizace.



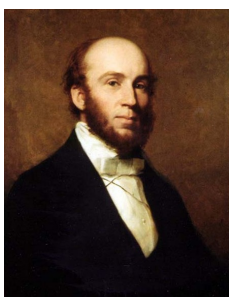
**Secchi, čti [sekki] Pietro Angelo** (\*29.6.1818 Reggio nell'Emilia, Itálie – †26.2.1878 Řím, Itálie) – italský jezuitský kněz a astronom. Byl průkopníkem astronomické spektroskopie, sestavil klasifikace hvězd podle jejich spekter. Jako jeden z prvních vědců považoval Slunce za hvězdu.



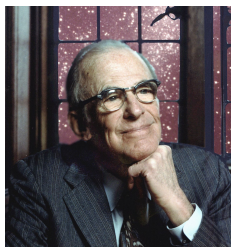
**Shapley, Harlow** (\*2.11.1885 Nashville, USA - † 20.10.1972 Colorado, USA) – americký astronom. V r. 1918 použil k určení velikosti naší Galaxie pulsující proměnné hvězdy typu RR Lyr a určil i pozici Slunce v Galaxii. V r. 1953 navrhl teorii „pásu tekuté vody“, nyní známých jako zóny života. Věnoval 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.



**Schmidt, Bernhard Voldemar** (\*11.4.1879 Naissaar, Estonsko, tehdy Ruská říše (dle julián. kalendáře 30.3.1879 – †1.12.1935 Hamburg, Německo) – estonsko-německý optik. Zkonstruoval dalekohled, který má velké zorné pole a byl tak využíván pro velké fotografické přehlídky oblohy. Dalekohled nese Schmidtovo jméno.).



**Smyth, Charles Piazzini** (\*3.1.1819 Neapol, Itálie - †21.2.1900 Ripon, Anglie) – britský astronom. Jméno Piazzini dostal po svém kmotru, italském astronomovi Giuseppe Piazzim. V roce 1856 detekoval infračervené záření ve svitu Měsíce. Byl průkopníkem stavby observatoří na vysoce položených místech, protože zjistil, že je to výhodnější pro pozorování. Je to možné považovat za první známky poznání, že zemská atmosféra pohlcuje část infračerveného záření z vesmíru.



**Spitzer**, Lyman Strong (\*26.6.1914 Toledo, Ohio, USA - †31.3.1997 Princeton, New Jersey, USA) – americký teoretický fyzik a astronom. Věnoval se fyzice plazmatu a mezihvězdné látky. V r. 1946 vypracoval koncepci astronomických observatoří v kosmu, která posloužila i při přípravě HST. Je po něm pojmenována astronomická družice (dříve SIRTf) pracující v IR oblasti spektra.



**Spörer**, Friedrich 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.

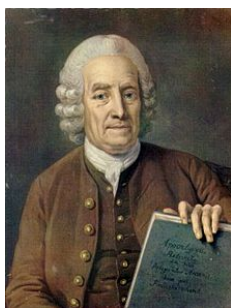


**Stebbins**, Joel (\*30.7.1878 Omaha, Nebraska, USA - †16.3.1966 Palo Alto, Kalifornie, USA) – americký astronom. Jeden z průkopníků fotoelektrické fotometrie. Spolu s kolegy, zejména s Albertem Whitfordem použil novou techniku k výzkumu zejména zákrytových dvojhvězd. Studoval zčervenání světla hvězd mezihvězdným prachem, barevné indexy galaxií, různé typy proměnných hvězd.

**Stefan**, Joseph – viz Štefan, Jozef.

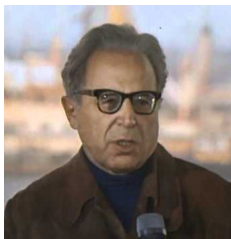


**Strömberg**, Bengt Georg Daniel (\*21.1.1908 Gothenburg, Švédsko – †4.7.1987 Kodaň, Dánsko) – dánský astronom a astrofyzik. Zjistil, že chemické složení hvězd je mnohem rozdílnější, než se dříve myslelo. Na konci 30. let minulého století zjistil, že hvězdy jsou zhruba ze 70 % z vodíku a 27 % z hélia. 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 sestavovat 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.



**Šklovskij**, Josif Samuilovič (\*18. června(jul.)/ 1. července 1916(greg.), Hluchiv, Ukrajina v Ruském impériu, dnes Ukrajina – †3.3.1985 Moskva, Sovětský svaz (Rusko)) – sovětský astrofyzik. Věnoval se teoretické astrofyzice a radioastronomii. Jeho kniha z roku 1962 o mimozemském životě byla významným milníkem v oboru.



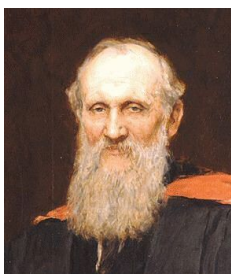
**Štefan**, Jožef, něm. Joseph Stefan, čti [jozef štefán] (\*24.3.1835 ves St. Peter (slovensky Sveti Peter, tehdejší Rakousko-Uhersko, dnes jde o součást Klagenfurtu v Rakousku - †7.1.1893 Vídeň, Rakousko) – slovenský fyzik (oba rodiče byli Slovinci), matematik a básník. Zabýval se kinetickou teorií plynů a hydrodynamikou. V roce 1879 objevil závislost energie záření absolutně černého tělesa na jeho absolutní teplotě.



**Takiyüddin** Taqi ad-Din Muhammad ibn Ma'ruf ash-Shami al-Asadi (\*1526 Damašek, Osmanská říše (dnes Sýrie) – †1585 Istanbul, Osmanská říše (dnešní Turecko) – osmanský polyhistor. Byl autorem více než devadesáti knih o široké škále témat, včetně astronomie, hodin, inženýrství, matematiky, mechaniky, optiky a přírodní filozofie.



**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.



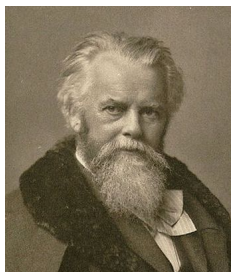
**Thomson**, William, lord Kelvin z Largsu (\*26.6.1824 Belfast, Spojené království Velké Británie a Irska - †17.12.1907 Netherhall u Largsu, Skotsko) – britský matematik, fyzik, inženýr a vynálezce. Zabýval se fyzikou, matematickou analýzou elektřiny, formuloval 1. a 2. termodynamický zákon. Sestrojil řadu vynálezů, je po něm pojmenována jednotka termodynamické teploty kelvin (K). V letech 1857–1866 se osobně podílel na kladení transatlantických podmořských kabelů, za což byl královnou Viktorií pasován na rytíře.



**Tousey**, Richard (\*18.5.1908 Somerville, Massachusetts, USA - †15.4.1997 Prince Georges County, Maryland, USA) – americký astronom. Byl průkopníkem v ultrafialové astronomii. V r. 1946 získal první UV spektrum Slunce pomocí německé rakety V2. Později vyvíjel přístroje pro UV astronomii používané na družicích nebo orbitální stanici Skylab.



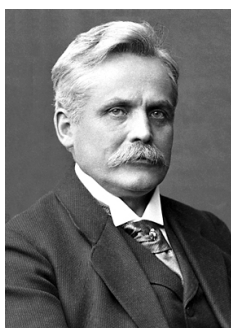
**Villard**, Paul Ulrich (\*28.9.1860 Lyon, Francie - †13.1.1934 Bayonne, Francie) – francouzský chemik a fyzik. Při studiu záření emitovaného rádiem objevil, že některé záření nepodléhá vlivu magnetického pole. Rutherford jej označil jako záření gama.



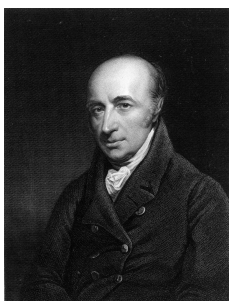
**Vogel**, Hermann Wilhelm (\*26.3.1834 Dobrilugk, dnes Doberlug-Kirchhain, Německo - †17.12.1898 Charlottenburg, Berlín, Německo) – německý fotochemik a fotograf, který hrál klíčovou roli ve vývoji praktické fotografie. Významně se podílel na vývoji barevné fotografie. Nezávisle na E. Ch. Pickeringovi objevil spektroskopické dvojhvězdy.



**von Helmholtz**, Hermann Ludwig Ferdinand (\*31.8.1821 Postupim, Prusko – †8.9.1894 Charlottenburg, Berlín, Německo) – německý fyziolog, lékař, matematik, fyzik, meteorolog a filozof. Jedna z vůdčích postav vědy 19. století. Jeho dílo zasáhlo do vývoje mnoha přírodních věd.



**Wien**, Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz (\*13.1.1864 Fischhausen, východní Prusko, dnes Primorsk, Kalininská 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, Československo, dnes Česká republika) – astronom, učitel astronomie. Dlouholetý pozorovatel proměnných hvězd. Zabývá se zejména zákrytovými dvojhvězdami, otevřenými hvězdokupami a okrajově i chemicky pekuliárními hvězdami.



**Zucchi,** Niccolò (\*6.12.1586 Parma, Parmské vévodství (dnes Itálie) – †21.5.1670 Řím, Itálie) – italský jezuita, fyzik a astronom. V r. 1616 sestrojil zrcadlový dalekohled, s nímž údajně pozoroval pruhy na Jupiteru nebo skvrny na Marsu.

## A Appendix: Vývoj astronomie

Tabulka A.1: Vývoj astronomie. Tabulka byla převzata z <http://geneze.info/astronomie>

DATE	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 konjunkce 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 vládce 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 t'üan - používání hedvábí jako materiálu na psaní	Čína
19.3. 721 př.n.l.	první zpráva o zatmění měsíce	Mezopotámie
cca 700 př.n.l.	vodní hodiny	Čína
7. stol.př.n.l.	knihovna asyrského krále Aššurbanipala obsahovala velké množství prepisů starších textů až z doby okolo r. 1900 př.n.l. - např. astronomický opis (originál z doby Chammurapiho) obsahuje základní fakta z deskriptivní astronomie (východ a západ hvězd, pohyby planet, poznatky o Slunci, Měsíci i planetách, délka dne v jednotlivých ročních obdobích, seznamy stálic)	Mezopotámie
cca 680 př.n.l.	vypočtena střední délka synodického měsíce: 29 dní 12 hodin 44 minut a 7,5 s (tato hodnota se od dnešní liší v řádech sekund); sledování pohybu nebeských těles s velkou přesností: úhly s přesností na 6 min a časové úseky na 3/4 min; pozorování vzájemného postavení Měsíce a Slunce - určení délky periody (tzv. saros) ve které se opakují určité vzájemné postavení v ekliptice	Mezopotámie
18.5. 603 př.n.l.	v Egyptě pozorováno velké zatmění Slunce, na jeho základě a při znalosti periodicity slunečních zatmění, předpovězeno zatmění na r. 585 př.n.l.	Thalés z Milétu
6. stol.př.n.l.	nejstarší soukromé knihovny - Polykratova a knihovna Peisistratovců - soubory papyrusových svitků (lat. volumen) uložené v hliněných pouzdrech (lat. capsula) a svázané pergameny (lat. codices)	Řecko
6. stol.př.n.l.	nejstarší soukromé knihovny - knihovna Euripidova - soubory papyrusových svitků (lat. volumen) uložené v hliněných pouzdrech (lat. capsula) a svázané pergameny (lat. codices)	Řecko
6. stol.př.n.l.	nejstarší známá řecká mapa sestavená na základě vlastních cest (opravena Hekataiosem z Milétu)	Anaximandros z Milétu
585 př.n.l.	učení o Zemi jako desce, plovoucí ve vodách oceánu	Thalés z Milétu
28.5. 585 př.n.l.	dochází k předpovězenému zatmění Slunce z r. 603 př.n.l.	Thalés z Milétu

cca 550 př.n.l.	v knize Periégésis (Cesty po světě) popsán celý tehdy známý (Řekům) svět; doplněn mapou	Hekataios Milétu	z
4. stol.př.n.l.	znalost nepravidelnosti zdánlivého pohybu planet	Platón	
4. stol.př.n.l.	geocentrický model pohybu planet Slunce a Měsíce se vzájemnou závislostí pohybu jednotlivých sfér	Eudoxos	
4. stol.př.n.l.	katalog hvězd, obsahující kolem 800 objektů	Čína	
4. stol.př.n.l.	knihy Ken-Š' sing-ting (Základy určování hvězd)	Čína	
4. stol.př.n.l.	nejstarší soukromé knihovny - knihovna Aristotelova - soubory papyrusových svitků (lat. volumen) uložené v hliněných pouzdrech (lat. capsula) a svázané pergameny (lat. codices)	Řecko	
kolem 350 př.n.l.	zevšeobecnění empirické kosmologie a vytvoření geocentrického modelu s oblastí sublunární (vyplňují ji 4 elementy: oheň, vzduch, voda a země) mezi Zemí a Měsícem a sférou supralunární (vyplněna éterem) nad sférou Měsíce	Aristoteles	
320 př.n.l.	vytvořena nová mapa známého světa (na základě poznatků helenistických vojenských výpadů)	Dikaiarchos Messény	z
3. stol.př.n.l.	nejstarší soukromé knihovny - sbírka alexandrijského Museionu - soubory papyrusových svitků (lat. volumen) uložené v hliněných pouzdrech (lat. capsula) a svázané pergameny (lat. codices)	Řecko	
3. stol.př.n.l.	veřejné sluneční hodiny; zdokonalení klepsydry (vodní hodiny)	Řecko	
3. stol.př.n.l.	vrchol řecké kartografie - tzv. Eratosthenova 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; aiginskotický - 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. 102	popis jevu astronomická refrakce 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	Ptolemaios Cchaj-Lun
137 500 - 1000	Almagest – katalog souhvězdí	Ptolemaios
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 kompédia "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 obíha Slunce o kolem Slunce planety	T. de Brahe
1572, 11.11.	supernova v souhv. Kasiopeja - tzv. Tychova 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 první 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 vyplynulo, 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 teorie	I.Kant
1756	známo 57 hvězd s vlastním pohybem	viz r. 1718
1757	zkonstruován první achromatický objektiv dalekohledu	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 jasů)	J.Goodricke
1783	objev vlastní 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 kalendář" - 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 objektů, 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 rozborem 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 Síría objevena slabá hvězda, která způsobuje padesátiletou periodicitu v pohybu Síría; 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 rakety)	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.Čichačev, 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 naší soustavu a nese sebou zlatou destičku s množstvím informací o Zemi i o jejích obyvatelích - pro případ jejího zachycení mimozemskou civilizací	
1972	k Venuši vyslána sonda Venera 8, kde také 22.7. přistála	
1973	antropický princip	B.Carter
1973	objeveny zábleskové zdroje záření gama	družice Vela
1973	4.12.; první měření Jupitera během průletu sondy Pioneer 10 (USA)	
1974	29.3.; první měření Merkuru během průletu sondy Mariner 10 (USA)	
1976	20.7.; první měření na povrchu Marsu - Viking 1 (USA)	
1978	vytvořena dokonalejší a citlivější rtg observatoř na družici, tzv. Einsteinova laboratoř - HEAO-2	R.Giacconi
1979	gravitátory	
1979	1.9.; první měření Saturnu během průletu sondy Pioneer 11 (USA)	
1981	teorie inflace vesmíru	A.Guth
1986	první měření Uranu během průletu sondy Voyager 2 (USA)	
1989	24.8.; první měření Neptunu během průletu sondy Voyager 2 (USA)	

1989	18.12.; vypuštěna družice COBE	
1990	24.4.; vypuštěn Hubbleův teleskop	
1993	inflační teorie (potvrzení)	družice COBE
1995	trigonometricky určené vzdálenosti cca 10 tisíc hvězd (vzdálených do 150 ly)	
1997	trigonometricky určené paralaxy cca 100 tisíc hvězd (vzdálených až 600 ly)	družice Hipparcos
1999	vypuštěna družice Chandra	
2002	vypuštěna družice Integral	
2006	Mezinárodní astronomická unie přijala novou definici planet ve Sluneční soustavě. Pluto se stalo jen trpasličí planetou.	
2008	TC3 se stal prvním meteoroidem dopadajícím na Zemi, který byl pozorován a sledován ještě před dopadem.	
2013	detekováno 1. těleso mimo Sluneční soustavu, které obsahuje vodu v tekutém nebo pevném skupenství.	
2014	začala výstavba dalekohledu E-ELT s průměrem zrcadla 39 m.	
2015	úspěšný průlet sondy New Horizons kolem Pluta.	
2015	1. detekce gravitačních vln.	LIGO
2015	družice Kepler objevila první exoplanetu velikosti Země v zóně života.	
2016	objev nejbližší exoplanety k naší Sluneční soustavě - Proxima Centauri b.	
2016	publikována první sada měření.	družice GAIA
2016	v Číně dokončen největší radioteleskop na světě o průměru 500 m.	FAST
2017	srážka neutronových hvězd byla zaznamenána detektory gravitačních vln i elektromagnetického záření v různých částech spektra. Počátek „multimessenger astronomy“.	
2019	čínská sonda Chang'e 4 jako první přistála na odvrácené straně Měsíce.	
2019	Event Horizon Telescope získal 1. snímek černé díry v centru galaxie M87.	EHT
2020	zhroucení 300m radioteleskopu v Arecibu.	
2021	start Vesmírného dalekohledu Jamese Webba	JWST

## 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 zřakového 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

## 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,

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-),

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 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-]. Dvojhlásku *ph* čteme jako *f*: Cepheus [-efe-]. *D*, *t*, *n* se vyslovují vždy tvrdě: Canis [-ny-], *s* čteme vždy jako *s*: Mensa, Perseus.

## E 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]