

Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Miloslav Zejda

Základy astronomie

Skripta – verze 0.18
28. května 2018

Brno 2018



Obsah

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

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

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

12.3.3	Země ☿	219
12.3.4	Mars ♂	220
12.3.5	Jupiter ♃	223
12.3.6	Saturn ♄	225
12.3.7	Uran ♅	226
12.3.8	Neptun ♆	227
12.4	Malá tělesa Sluneční soustavy	228
12.4.1	Trpasličí planety	228
12.4.2	Měsíce planet	231
12.4.2.1	Země: Měsíc	231
12.4.2.2	Mars: Phobos a Deimos	231
12.4.2.3	Rodina družic Jupitera	232
12.4.2.4	Měsíce Saturna	232
12.4.2.5	Společníci Uranu	233
12.4.2.6	Neptunovy měsíce	233
12.4.3	Planetky	234
12.4.4	Kometry	235
12.5	Modely Sluneční soustavy	236
12.5.1	Geocentrický model	237
12.5.2	Heliocentrický model	238
12.5.3	Tychonův kompromis	239
12.6	Keplerovy zákony	239
13	Exoplanety	243
13.1	Co je (exo)planeta?	244
13.2	Exoplanety ve dvojhvězdách	247
13.3	Přehled metod pro detekci exoplanet	247
13.3.1	Přímé zobrazování	247
13.3.2	Astrometrie	248
13.3.3	Gravitační mikročočky	249
13.3.4	Zpoždování záblesků pulsarů	249
13.3.5	Radiální rychlosti	251
13.3.6	Transity	251
14	Život ve vesmíru	254
14.1	Vznik života	255
14.2	Život ve vesmíru z pohledu astronoma	257
14.3	Četnost života ve vesmíru – Drakeova rovnice	258
14.3.1	Život na Zemi – typický vzorek?	259
14.4	Hledání mimozemského života	260
14.4.1	Život ve Sluneční soustavě	262
14.5	Kontakt s mimozemšťany	264
14.6	Domněnka o vzácné Zemi	265

Základy astronomie 2 267

Základy astronomie 2

15 Hvězdy zpozvdáli	269
15.1 Fotometrie	269
15.1.1 Vizualní fotometrie	269
15.1.2 Fotografická fotometrie	271
15.1.3 Fotoelektrická fotometrie	272
15.1.4 CCD fotometrie	273
15.2 Astronomická interferometrie	277
15.3 Spektroskopie	279
15.4 Dvojhvězdné studnice informací	281
15.4.1 Vizualní dvojhvězdy	281
15.4.2 Astrometrické dvojhvězdy	282
15.4.3 Spektroskopické dvojhvězdy	283
15.4.4 Zákrytové dvojhvězdy	285
15.5 Hvězdný diagram	288
15.5.1 Historie	289
15.5.2 Podoby HRD	290
15.5.3 Barevný diagram	297
16 Hvězdy zblízka	300
16.1 Svítící koule	300
16.2 Modely hvězd	301
16.3 Anatomie hvězdy	304
16.3.1 Nitro hvězdy	304
16.3.2 Atmosféra hvězdy	306
16.4 Proč hvězdy září?	307
16.5 Jaderné reakce v nitru hvězd	309
16.5.1 Proton-protonový řetězec (p-p řetězec)	309
16.5.2 CNO (uhlíkový) cyklus	311
16.5.3 3α proces	312
16.6 Přenos tepla	314
16.6.1 Přenos energie zářením (zářivou difúzí)	314
16.6.2 Konvekce	315
16.6.3 Přenos tepla vedením	316
16.6.4 Proud neutrin	316
17 Slunce jako vzorová hvězda	318
17.1 Chemické složení Slunce	318
17.2 Model Slunce	319
17.3 Sluneční atmosféra a projevy aktivity Slunce	322
17.4 Projevy aktivity Slunce	325
17.4.1 Sluneční skvrny	326

17.4.2	Granulace (zrnitost)	328
17.4.3	Fakule (pochodně)	328
17.4.4	Erupce	328
17.4.5	Sluncetřesení	329
17.4.6	Flokule a spikule	330
17.4.7	Protuberance	330
17.4.8	Koróna	330
17.4.9	Sluneční vítr	331
17.5	Heliosféra	333
18	Zrození, život a skon hvězd	336
18.1	Mezihvězdná látka	336
18.2	Akt zrození aneb 7 kroků ke vzniku hvězdy	338
18.2.1	Vznik protohvězdy	340
18.2.2	Od protohvězdy k hvězdě hlavní posloupnosti	344
18.3	Protohvězdy rozdílné hmotnosti	346
18.3.1	Protohvězdy s nadváhou	347
18.3.2	Subtilní protohvězdy	347
18.3.3	Objekty pod míru	348
18.4	Hvězdy na hlavní posloupnosti	349
18.5	Vývoj hvězd po opuštění hlavní posloupnosti	351
18.6	Závěrečná stadia vývoje hvězd	352
18.7	Konečný osud hvězd	353
18.7.1	Stabilní řešení - chladnoucí trpaslíci	353
18.7.2	Nestabilní řešení - supernovy, hypernovy	354
18.8	Zvláštnosti vývoje těsných dvojhvězd	356
18.8.1	Novy	359
19	Hvězdná uskupení	362
19.1	Málopočetné skupiny hvězd – hvězdné soustavy (multiple stars)	362
19.1.1	Dvojhvězdy	364
19.2	Hvězdotupy	365
19.2.1	Kulové hvězdotupy	366
19.2.2	Otevřené hvězdotupy	366
19.2.3	Hybridní? - zvláštní?	368
19.2.4	Hvězdné asociace	369
20	Galaxie a galaxie	371
20.1	Naše Galaxie se představuje	371
20.1.1	Historie výzkumu	372
20.1.2	Velká debata	373
20.1.3	Galaktická souřadnicová soustava	374
20.1.4	Anatomie naší Galaxie	374
20.1.4.1	Disková a plochá složka	376
20.1.4.2	Jádro Galaxie	377
20.1.5	Rotace Galaxie	379

20.2	V říši galaxií	380
20.2.0.1	Spirální galaxie	383
20.2.0.2	Eliptické galaxie	384
20.2.0.3	Čočkovité galaxie	384
20.2.0.4	Nepravidelné galaxie	385
20.3	Aktivní galaxie - AGN	387
20.3.1	Typy aktivních galaxií	389
20.3.1.1	Seyfertovy galaxie	390
20.3.1.2	Kvasary	390
20.3.1.3	Rádiové galaxie (radiogalaxie)	391
20.3.1.4	Nový typ AGN	392
20.4	Kanibalismus galaxií	392
21	Velkorozměrové struktury ve vesmíru	394
21.1	Vesmír velkých měřítek	394
21.2	Kupy galaxií	394
21.3	Velké struktury	396
21.3.1	Větší než nadkupy	396
22	Kosmologie	398
22.1	První představy a první paradoxy	398
22.2	Newtonův model vesmíru	401
22.3	Standardní model	402
22.3.1	Geometrie vesmíru	403
22.4	Rozpínání vesmíru a Hubblův vztah	404
22.5	Rozpínání vesmíru	406
22.5.1	Rozpínání vesmíru - tam a zpět	407
22.5.2	Důkazy teorie velkého třesku	407
22.5.2.1	Reliktní záření	408
22.5.3	Problémy standardního modelu	411
22.6	Modely vesmíru	412
22.7	Jak starý je vesmír?	412
22.8	Vývoj vesmíru	413
22.8.1	Velmi raný vesmír	413
22.8.2	Raný vesmír	413
22.8.3	Temný věk	416
22.8.4	Vytváření struktur	417
22.9	Výhled do budoucnosti	418
22.10	V jakém vesmíru žijeme?	420
22.11	Pozorovací kosmologie	420
22.11.1	Současná pozorovací kosmologie	420
22.11.1.1	Akcelerující vesmír	420
22.11.1.2	Červený posun - přehlídkové projekty	421
22.11.1.3	Reliktní záření	421
22.11.1.4	Současný vesmír	424
22.11.1.5	Velikost fluktuací	425

22.11.1.6 Baryonové akustické oscilace	425
22.11.2 Plánovaná pozorování	425
22.12 Jiné pohledy na vývoj vesmíru	426
22.13 Mnohovesmír	427
23 Nebezpečí z kosmu	428
23.1 Střet Země s cizím tělesem	428
23.1.1 Srážka s planetkou, kometou	428
23.1.2 Kolize Země s černou dírou	432
23.2 Slunce	433
23.3 Přemíra záření	433
23.3.1 Výbuch blízké supernovy	433
23.3.2 Záblesky γ záření	434
23.4 Černá díra za humny	435
23.5 Kontakt s mimozemským životem	435
24 Rejstřík osob	437
A Appendix: Vývoj astronomie	454
B Appendix: Fotometrické pojmy	468
B.1 Slovníček pojmů z fotometrie	468
C Appendix: Kuželosečky	469
D Appendix: Metody měření vzdáleností ve vesmíru	469
E Appendix: Výslovnost latinských slov	470
F Appendix: Řecká abeceda	470

Základy astronomie 2

15 Hvězdy zpovzdáli

Hvězdy jsou základními stavebními kameny vesmíru. Pro nás představují velmi vzdálené světy, o nichž ale chceme vědět a zjistit co nejvíce. Ale jak? Nelze je studovat přímo. Nelze odebírat vzorky, nelze je měřit nebo vážit v nějaké laboratoři. Přesto existují nástroje, pomocí nichž jsme schopni zjistit řadu parametrů hvězd i na dálku. Jaké jsou možnosti dálkového průzkumu hvězd? Co můžeme zjistit ze Země nebo jejího blízkého okolí o vzdálených hvězdách?

V minulosti byly naše možnosti omezeny v podstatě jen na vizuální fotometrii. Člověk se mohl spolehnout jen na svůj zrak a poměřoval pozorované hvězdy jen svýma očima. Při představě nebeské sféry, na níž jsou všechny hvězdy ve stejné vzdálenosti, nutně musel dojít k názoru, že čím je hvězda jasnější, tím je větší. Tak vznikl fotometrický pojem "hvězdných velikostí", který však, jak víme, se skutečnou velikostí nemá nic společného a slouží k potrápení studentů a zájemců o astronomii. S nástupem záznamové techniky – fotografie a později elektronických čipů jsme měření jasností a určování hvězdných velikostí zpřesňovali, prováděli v různých oblastech spektra, v různých barvách, a zejména jsme měření zaznamenávali a ukládali do archivů. Zásadní zvrát v dálkovém průzkumu hvězd přinesla spektroskopie. Studium rozloženého světla nebo obecně spektra elektromagnetického záření bylo najednou možné zjistit složení povrchových vrstev hvězd, zjistit jejich teplotu, tlak, přítomnost magnetického pole, ale také jak se hvězda pohybuje, zda se od nás vzdaluje nebo se k nám přibližuje, jak rychle se otáčí. Pokud je hvězda navíc součástí dvojhvězdy nebo vícenásobného systému, lze kombinací spektroskopických a fotometrických dat zjistit hmotnosti složek dvojhvězdy, jejich vzájemnou vzdálenost i vzdálenost od nás, jejich poloměry a další parametry. Dnes už nemusí jít jen o soustavu hvězda–hvězda, může jít o planety obíhající kolem mateřské hvězdy, které lze detekovat a studovat v podstatě stejnými metodami. Ještě na konci 20. století se zdálo, že exoplanety budeme schopni maximálně detekovat. Na konci druhé dekády 21. století však už pomocí spektroskopie studujeme složení jejich atmosfér.

Astronomové nezůstali jen u klasických nástrojů fotometrie a spektroskopie. Už v minulém století dokázali přímo měřit rozměry hvězd pomocí interferometrie nebo studovat jejich vlastnosti pomocí detekce vysokoenergetických částic rentgenovského či gama záření nebo neutrin. Nástrojů na dálkový průzkum světa hvězd máme tedy dnes k dispozici velké množství. Jde ale nejen o to, naměřit určité veličiny, ale také je interpretovat a porovnat s modely hvězdné stavby a našimi představami o vzniku, vývoji a zániku hvězd. Významným nástrojem při poznávání hvězd je i nejvýznamnější astrofyzikální diagram – Hertzsprungův-Russellův diagram.

15.1 Fotometrie

15.1.1 Vizuální fotometrie

Nejstarší vizuální pozorování proměnných hvězd byla prováděna různými metodami. Například William Herschel zaznamenával výsledky srovnání jasnosti proměnné hvězdy s jinou hvězdou v okolí slovně. První kvantitativní metodu pozorování proměnných hvězd publikoval až Friedrich Wilhelm August Argelander (1844). Při srovnání dvou

hvězd - proměnné a srovnávací zavedl hodnocení rozdílů jejich jasností pomocí škály jasně definovaných odhadních stupňů 0 až 4. Velikost stupně je přitom individuální a závisí na zkušenosti a aktivitě pozorovatele. U začátečníka odpovídá jeden odhadní stupeň 0,1 až 0,2 mag, zatímco zkušený pozorovatel dosahuje až 0,05 mag, zcela výjimečně i 0,02 mag.¹

Argelander hrál velmi významnou roli při výzkumu proměnných hvězd. Jeho metoda nabídla snadnou a rychlou možnost sledování proměnných hvězd, což vedlo ke zpopularizování stelární astronomie. Dnes se používá jak původní metoda, tak i různé modifikace. Nejvíce se využívá místo jedné srovnávací hvězdy dvojice hvězd a určuje se rozdíl jasností mezi slabší srovnávací hvězdou, proměnnou hvězdou a jasnější srovnávací hvězdou - místo odhadu se tedy provádí najednou dvojodhad. Je ale možné využít i více srovnávacích hvězd nebo jemnější škálu s více odhadními stupni. Spolu s Argelanderovou metodou se v bývalém Československu od 60. let minulého století velmi využívala také Nijlandova-Blažkova metoda. Princip odhadů zůstává v této metodě stejný jako u Argelanderovy metody. Pozorovatel využívá odhadních stupňů ke srovnání jasností proměnné hvězdy s dvojicí srovnávacích hvězd. Odhady určují nejen rozdíly jasností v odhadních stupních, ale odhadní stupně jsou také v poměru podle pozorovaných jasností. Svou metodu pozorování proměnných hvězd zavedl i Edward Charles Pickering (1882, 1883). Jeho metoda spočívala ve srovnávání jasností proměnné hvězdy s dvojicí srovnávacích hvězd, jejichž rozdíl v odhadních stupních byl vždy deset. Odhadní stupeň pak byl vlastně při každém (dvoj)odhadu různě veliký, což byla značná nevýhoda metody. Ještě uveďme Pogsonovu metodu, která je založena na tom, že znám hvězdné velikosti srovnávacích hvězd ve vizuálním oboru a při dvojodhadu interpoluji mezi jejich hvězdnými velikostmi. Výsledkem je pak přímo hvězdná velikost proměnné ve vizuálním oboru. Úskalí metody je v tom, že musím znát hvězdné velikosti srovnávacích hvězd a navíc musím mít jistotu, že jsou to hvězdy neproměnné. Při této metodě se totiž jako jediný výsledek dvojodhadu uchovává jen hvězdná velikost proměnné hvězdy v čase pozorování. Pokud se však jedna srovnávací hvězda také mění, jsou všechna taková pozorování znehodnocena. Příkladem je pozorování supernovy SN1993J vyhlášené v rámci kampaně americkou společností pozorovatelů proměnných hvězd AAVSO². Dva čeští pozorovatelé si všimli, že jedna z doporučených srovnávacích hvězd je ve skutečnosti proměnná (dnes označená jako ES UMa). Bohužel to znamenalo, že všechna pozorování provedená Pogsonovou metodou, která tuto hvězdu použila jako srovnávací, se musela vyhodit.

Vizuální fotometrie nepochybně splnila svou historickou úlohu. Předností je její snadnost a rychlost. Bohužel jde o metodu subjektivní, zatíženou mnoha vlivy a tudíž s menší přesností a spolehlivostí. V dnešní době se pozorovatelé (i ti amatérští) dávají raději na cestu objektivní fotometrie s využitím CCD kamer, DSLR³ fotoaparátů nebo dokonce snímačů v mobilních telefonech nebo webkamerách. Přesto se s výsledky vizuálních pozorování setkáte zejména ve starších publikacích a je nutné vědět, jak vznikala a jaká jsou nebezpečí jejich použití při studiu chování například proměnných hvězd. Podrobněji se této problematice věnuje publikace *Pozorování proměnných hvězd I* (Zejda et al., 1994).

¹Mezi zcela výjimečné vizuální pozorovatele patří například Sebastian Otero, Kamil Hornoch nebo Pavol A. Dubovský. I oni však, pokud mohou, dávají přednost snažším a objektivnějším metodám pozorování.

²<http://www.aavso.org>

³DSLR neboli Digital Single Lens Reflex camera je běžné označení pro digitální zrcadlovku.

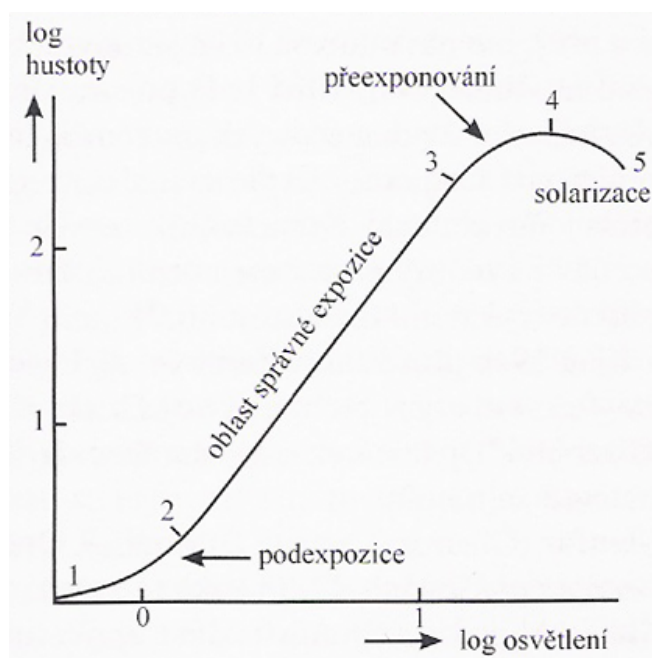
15.1.2 Fotografická fotometrie

První snahou o nahrazení subjektivního vizuálního pozorování bylo využití fotografie a její následné proměřování. K jejímu širokému uplatnění vedla ale dlouhá cesta. První astrofotografii (snímek Měsíce) pořídil 23. března 1840 John William Draper. Nedlouho poté byly pořízeny první fotografické záznamy slunečního spektra. Úspěšnými fotografy byli Alexandre-Edmond Becquerel a opět J. W. Draper. 17. července 1850 pak John Adams Whipple a George Phillips Bond pořídili první snímek hvězdy. Na jejich daguerotypii byla zachycena Vega. G. Bond pořídil i první koloidní snímek hvězd (Alkora a Mizara) 27. dubna 1857. Pořád však šlo o snímky poměrně jasných objektů. Teprve v roce 1881 zaznamenal Henry Draper na snímku mlhoviny v Orionu hvězdy až do 14,7 mag. V té době už dva roky Andrew Ainslie Common experimentoval se suchými deskami. Na řadě snímků téže mlhoviny (nejlepším z roku 1883) ukázal, že dlouhými expozicemi na suchých fotografických deskách je možné získat obrazy hvězd, které nejsou stejným dalekohledem vizuálně pozorovatelné (podrobnosti viz Hearnshaw, 1996). Taková fotografie už představovala značný pokrok a přinášela oproti vizuálnímu pozorování řadu výhod. Záznam na fotografii je trvalý⁴, lze se k němu po čase vrátit a znovu proměřit. Na fotografii jsou objektivně zachyceny polohy i hvězdné velikosti všech objektů. A především, mohu světlo z hvězd zaznamenávat a integrovat po dlouhou dobu. V astronomii se uplatňovaly hlavně skleněné fotografické desky, na nichž byla nanesena vrstvička světlocitlivé emulze. Folie s citlivou vrstvou nebo běžné filmy nejsou příliš vhodné. Snadno se deformují, takže znemožňují přesnou astrometrii. Fotometrické informace získávané z fotografických desek jsou založeny na velikosti odezvy fotografické emulze na světlo. Mírou této odezvy je denzita⁵, někdy též hustota zčernání nebo opacita. Její závislost na délce expozice a tedy množství osvětlení není lineární (viz obrázek 15.1). Fotografická emulze tedy není lineární detektor. Také spektrální citlivost je omezena, i když ji lze vhodným chemickým složením rozšířit až na rozsah od 250 nm do 900 nm. Obecně je ale citlivost větší v modré části tohoto intervalu. Kvantová účinnost fotografie se pohybuje jen v řádu několik procent a to ještě zpravidla po procesu hypersenzibilace.

Získávání a proměřování fotografií bylo nejrozšířenější fotometrickou metodou zhruba do poloviny minulého století. Po druhé světové válce se pro přesná měření jasností zejména jasných hvězd začala více využívat fotoelektrická fotometrie. Fotografie zůstala doménou amatérské astronomie, prakticky až do konce 20. století. Přestože, je klasická fotografie dnes už spíše historickou záležitostí, patří její znalost k základní výbavě astronoma. Z dob minulých máme k dispozici rozsáhlé archivy desítek tisíc fotografických desek, z nichž můžete získat unikátní informace o chování například proměnných hvězd, v době, kdy se ještě nevědělo, že jsou proměnné a že by bylo vhodné je sledovat.

⁴Ukazuje se, že fotografické emulze stárnou a degradují. Pokud nebudou rozsáhlé skleněné archivy fotografických desek brzy digitalizovány, budou v minulosti získané snímky nenávratně ztraceny.

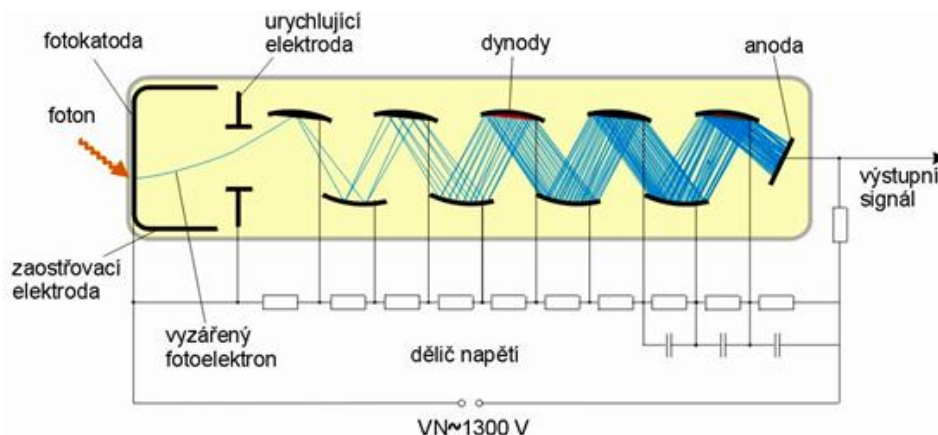
⁵Dříve se velikost zčernání desky určovala tak, že se snímek prosvětoval tenkým svazkem světla a měřil se světelný tok na opačné straně desky.



Obrázek 15.1: Charakteristická gradační křivka fotografické emulze. Je charakterizována sklonem (gradací) lineární části. Převzato z Kleczek (2002).

15.1.3 Fotoelektrická fotometrie

Na konci 19. století, v době, kdy fotografie přesvědčila o svých kvalitách a možnostech, začínají také první pokusy o přímé měření světla hvězd. První elektrickou detekci světla hvězd provedl pomocí fotonky v Dublinu roku 1892 William Monck. Roku 1907 vyzkoušel Američan Joel Stebbins seleniový odporový fotočlánek a následovaly další pokusy. Hlavními průkopníky fotoelektrické fotometrie byli Paul Guthnick a Richard Prager v Berlíně a Joel Stebbins a jeho kolegové v USA, kteří původní fyzikálně technické pokusy povýšili na metodu, která přinášela vědecké výsledky (podrobnosti viz Hearnshaw, 1996). Přesto byla fotoelektrická fotometrie v první polovině 20. století do značné míry uměním. Jednotlivá, jakkoli přesná, měření většinou nebyla příliš reprodukovatelná a nebylo možné je opakovat na jiné observatoři. Počátkem 50. let minulého století přišli Johnson & Morgan (1953) s jasně definovanými spektrálními filtry *UBV*, které umožnily měřit jasnosti hvězd ve třech oblastech spektra a po řádném zpracování tato měření porovnávat s jinými, provedenými s jiným přístrojem na jiné observatoři. Teprve tehdy se fotoelektrická fotometrie začala prosazovat pro přesná měření jasností hvězd na profesionálních observatořích. Základem fotoelektrického fotometru je fotonásobič (z anglického „photomultiplier“, ale užívá se i „electron multiplier tube“ nebo „PMT“) schematicky zobrazený na obrázku 15.2. V přední části evakuované trubice se nachází fotokatoda. Foton s dostatečně vysokou energií uvolní při dopadu na fotokatodu jeden nebo více elektronů dle vnějšího fotoelektrického jevu. Za katodou je umístěna soustava dynod, přičemž každá je připojena k vyššímu napětí než předchozí dynoda. Elektrony uvolněné z fotokatody jsou při cestě k dynodě urychleny, při nárazu uvolní další elektrony, které jsou urychlovány na cestě k další dynodě a tak dále. Než dorazí na anodu na



Obrázek 15.2: Schéma fotonásobiče. Převzato z <http://fyzika.jreichl.com>.

konci trubice je jejich počet až desetimilionkrát větší. Na anodě se pak registrují velmi krátké miliampérové proudové pulzy. Počítáním těchto pulzů lze pak měřit jasnost pozorovaných hvězd. Cesta k výsledné hvězdné velikosti ale není vůbec jednoduchá. Při samotném měření je třeba měřit i jas pozadí (oblohy bez hvězd) a také proměřovat řadu srovnávacích a kontrolních hvězd. Při zpracování je třeba brát v úvahu polohu hvězdy na obloze, její spektrální typ a vliv extinkce a jejích změn (podrobnosti viz Harmanec et al., 1994; Janík & Mikulášek, 2012; Mikulášek & Zejda, 2012).

Výhodou fotoelektrické fotometrie je velká přesnost (až 0,001 mag v časovém rozlišení milisekundy) a zejména velký dynamický rozsah. Fotometry pracují v rozsahu vlnových délek 200-650 nm (zejména v modrém světle). Úpravami chemického složení fotokatody lze ale rozšířit použitelnost až na interval od 150 nm do 1700 nm, tedy od ultrafialového až po infračervené záření. Na druhou stranu ale vysoká cena, malá kvantová účinnost (méně než 20 procent podle typu a spektrální oblasti) a náročné pozorování i zpracování mluví proti dalšímu využívání fotoelektrické fotometrie.

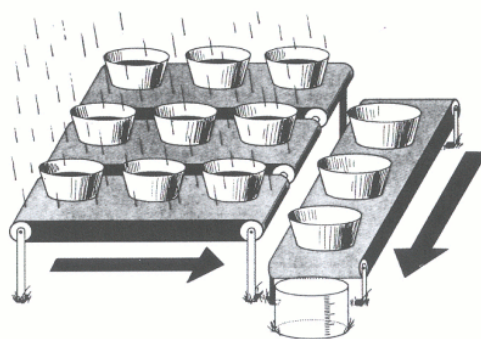
15.1.4 CCD fotometrie

Relativně vysoká pořizovací cena, náročnost pozorování a zpracování spolu s možností pozorovat jen relativně jasné hvězdy byla příčinou toho, že fotoelektrická fotometrie byla v druhé polovině 20. století takřka výhradně záležitostí velkých profesionálních observatoří. Na konci 20. století se však objevila jiná možnost, jak fotometricky pozorovat vesmírné objekty, a tak byla fotoelektrická fotometrie odeslána do výslužby. Nejúčinnějším a nejrozšířenějším detektorem pro měření jasnosti hvězd se staly CCD kamery.

Oproti fotonásobičům představují kamery s křemíkovými čipy zcela jinou dimenzi, a to doslova. Zatímco výsledkem měření fotoelektrického fotometru s fotonásobičem byl časový sled hodnot, u CCD získáváme jako výsledek dvourozměrný obrázek pozorované části hvězdné oblohy, dvourozměrnou matici hodnot naměřených intenzit. Základním elementem takové matice je jeden pixel (px).

Myšlenka CCD křemíkového čipu se zrodila v hlavách dvou pracovníků Bellových

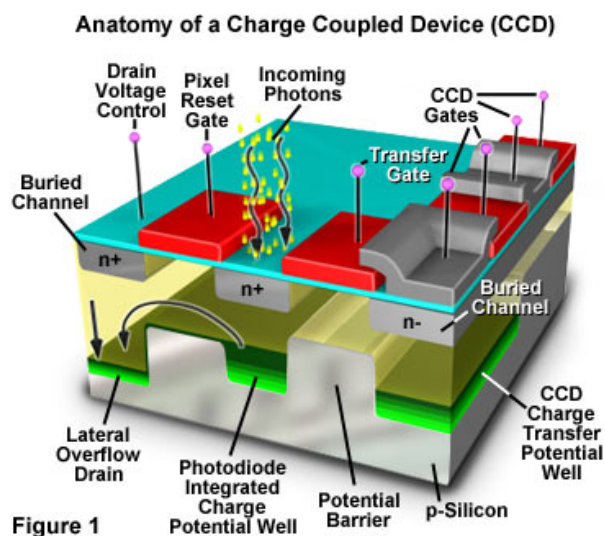
laboratoří v roce 1969. Původně šlo o jednorozměrný čip, který měl sloužit jako elektronická paměť. Willard Boyle a George Elwood si záhy uvědomili zobrazovací potenciál těchto prvků a tak už v následujícím roce sestrojili první CCD kameru. První komerční CCD zobrazovací prvky o rozměru 100 x 100 zobrazovacích elementů (pixelů) se začaly vyrábět v roce 1974. V astronomii byl CCD prvek (chlazený čip RCA 320x512 LN₂) poprvé použit v roce 1979 na metrovém dalekohledu na Kitt Peak National Observatory. Tehdy začala éra „křemíkové astronomie“. 40 let po prvotním nápadu dostali autoři CCD čipu za svůj objev Nobelovu cenu.



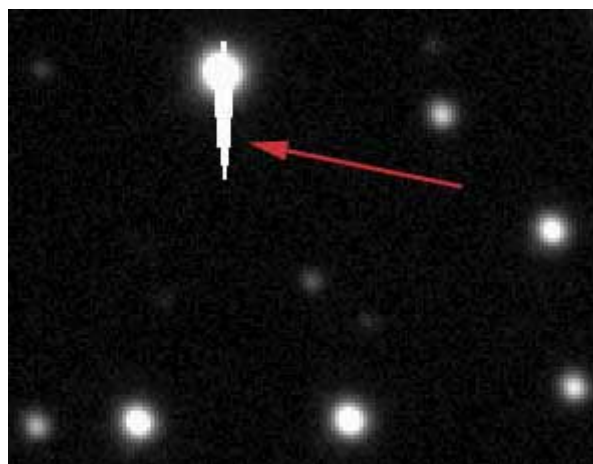
Obrázek 15.3: CCD čip můžeme přirovnat k sadě nádobek, které během deště měří množství srážek. Po dešti se nádobky posouvají na dopravníkových páscech k měřicí stanici. Voda shromážděná v každé nádobce je pak přelita do měřící nádobky, množství je změřeno a na výstupu dostaneme údaj o množství vody v každé jedné nádobce. Převzato z Janesick & Blouke, *Sky and Telescope*, vol. 74, p. 238.

Jádrem CCD kamery je čip s destičkou polovodivého materiálu, nejčastěji křemíku. Na povrchu čipu je rozmístěna soustava kladných elektrod, na spodní stranu je přivedeno záporné napětí (viz obrázek 15.4). Samotné lapání dopadajících fotonů pak opět využívá fotoelektrického jevu. Velmi zjednodušeně bychom si princip činnosti CCD čipu mohli představit pomocí analogie zobrazené na obrázku 15.3. Dopadne-li na plochu čipu foton s dostatečnou energií, uvolní elektron(y), který spadne, případně spadnou, do nějaké nádobky. Je zřejmé, že jedna naše nádobka představuje jeden pixel ve výsledném CCD snímku. Po ukončení expozice se zavře závěrka kamery, na čip nedopadá žádné světlo a je třeba zjistit obsah jednotlivých nádobek, respektive změřit naakumulovaný náboj v každém pixelu. Podobně jako na obrázku 15.3 je třeba postupně přesouvat obsah pixelů na okraj čipu k tzv. registrům. Prakticky toho docílíme periodickou změnou napětí na anodách. Elektrony budou ve vlnách přesouvány do registrů, kde je pro každý pixel změřen příslušný náboj a převeden na číselnou hodnotu v jednotkách ADU (z angl. *analog-to-digital unit*). Pokud je zdroj fotonů příliš intenzivní, může být pomyslná nádobka s elektrony zaplněna a ty začnou přetékat do sousedních nádobek v jednom směru. Na snímku pak pozorujeme protažení obrazu jasných objektů, tzv. *blooming* (viz obrázek 15.5).

I ty nejjednodušší čipy dosahují dnes při pečlivém zpracování přesnosti větší než 0,01 mag. Profesionální přístroje i o několik řádů větší. Spektrální citlivost se pohybuje



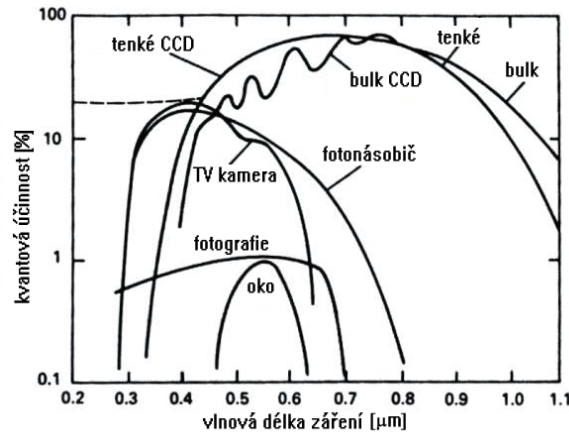
Obrázek 15.4: Anatomie CCD čipu. Převzato z <http://www.circuitstoday.com/2010>.



Obrázek 15.5: Blooming se projevuje charakteristickými „ocásky“ kolem jasných hvězd. Převzato z <http://www.ccd.com>.

přibližně od 400 do 1200 nm s maximem pro červenou oblast spektra kolem 700 nm. U prvních kamer byla kvantová účinnost čipů srovnatelná s fotografickou deskou, dnes může pro vhodnou vlnovou délku přesáhnout i 90%. Srovnání s ostatními detektory je zobrazeno na obr. 15.6).

CCD pozorování ale vyžaduje provádět sérii základních korekcí snímků, kterým říkáme redukce snímků. I kdybychom snímali rovnoměrně osvětlené pozadí, dostali bychom snímek, který by měl v každém zobrazovacím elementu, pixelu, zaznamenanou jinou intenzitu. Každý pixel má totiž trochu jinou sensitivitu. Navíc se mohou na snímku projevit i nečistoty optiky a podobně. To je možné zkorrigovat takzvaným flat snímkem, který se získává snímáním rovnoměrně osvětlené plochy nebo bezoblačné oblohy za soumraku. Všechny snímky navíc v sobě obsahují šum, který vzniká buď přímo







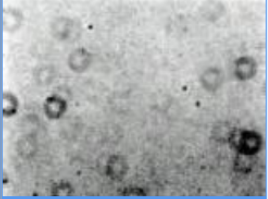

Obrázek 15.6: Srovnání kvantové účinnosti detektorů. Převzato z Howell (2000).

v čipu tepelným pohybem elektronů nebo při vyčítání signálu z čipu. To znamená, že i když je zavřena závěrka kamery, přesto je zachycen na snímku šum určité intenzity. Také ten je možné ze snímků sledovaného objektu (tzv. snímků pole) odfiltrovat. Pořídíme sérii temných (dark) snímků se stejnou expoziční dobou a při stejné teplotě čipu jako byly snímky pole a pak tyto temné snímky od snímků pole odečteme. Pokud se nám nepodaří pořádit snímky se stejnou expoziční dobou, musíme ještě pořádit tzv. bias snímky na korekci vyčítacího šumu. Jedná se o snímky při zavřené závěrky kamery s nulovou délkou expozice. Řada kamer už automaticky bias korekci provádí a pokud je dodrženo výše uvedené pravidlo pro temné snímky, není třeba bias snímky používat. Obecně ale celý proces redukce lze zapsat takto

$$\text{redukovaný snímek} = \frac{(\text{surový snímek} - \text{master bias} - \text{master dark})}{\text{master flat}}, \quad (15.1)$$

kde master flat, master dark či master bias jsou zpravidla normované mediány sady flat korekčních snímků opravených o temné snímky, sady temných nebo bias snímků. O přesnosti výsledné fotometrie případné astrometrie zásadním způsobem rozhoduje kvalita korekčních snímků. Jejich pořizování je tedy třeba věnovat patřičnou pozornost. Podobu snímků hvězdného pole a kalibračních snímků ukazuje obrázek 15.7.

CCD kamery našly v astronomii obrovské uplatnění. S jejich masovým rozšířením začali i amatérští pozorovatelé získávat fotometrická a astrometrická data i pro slabší objekty a to s přesností vyhrazenou dříve jen profesionálním observatořím s velkými dalekohledy. Navíc je možné snímky velmi snadno archivovat, sdílet, automaticky zpracovávat. V případě potřeby je možné zpracování kdykoli zopakovat. Přitom všem získáváme údaje nejen o sledovaném objektu, ale o všech objektech na snímku. Nevýhodou je pro nejmasověji rozšířené kamery menší přesnost než u profesionálních kamer nebo fotoelektrických fotometrů a zejména to, že po záměně fotometrů za CCD kamery nelze pozorovat jasné hvězdy, což vede k přerušení dlouhodobých pozorovacích řad. Ještě před několika lety byla za nevýhodu označována i malá plocha CCD čipů, ale vývoj elektronické fotografie jde kupředu opravdu velmi rychle a tak dnes startují projekty, které využívají čipy

	Frame	Data	Measured magnitude of RX Andromedae
Bias			10.0 +/- .4 Vmag
Dark			10.2 +/- .1 Vmag
Flat			10.25 +/- .05 Vmag

Obrázek 15.7: Ukázka vlivu použití kalibračních snímků na snímek pole proměnné hvězdy RX And. Převzato ze CCD Manual 2010, <http://www.aavso.org>.

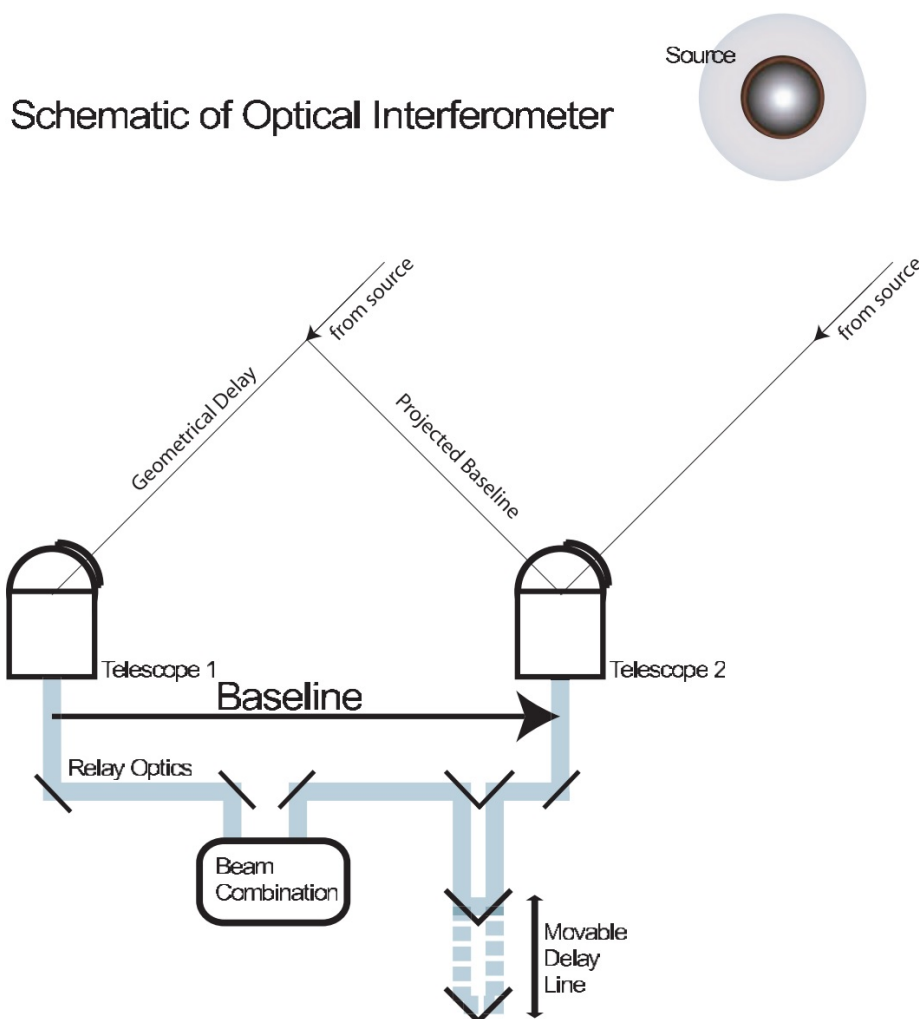
o velikosti řádově gigapixely. Čeká nás tak opravdová záplava dat.

15.2 Astronomická interferometrie

V kapitole o dalekohledech jsme uvedli, že jedním ze základních parametrů dalekohledů je jejich úhlové rozlišení. To je dáno difrakčním limitem a je úměrné průměru dalekohledu. Samozřejmě, čím větší dalekohled, tím větší úhlové rozlišení. Jenže náklady na stavbu dalekohledu se zvyšujícím se průměrem strmě rostou. Řešení ale existuje. Jmenuje se astronomická interferometrie. Místo jednoho gigantického dalekohledu se využívá řada menších, levnějších dalekohledů. Signály z jednotlivých dalekohledů jsou pak složeny do výsledného obrazce. Tím vzniká efektivně dalekohled o velkém průměru s vysokým úhlovým rozlišením.

Myšlenka hvězdného interferometru byla popsána v roce 1890 Albertem Abrahamem Michelsonem (na základě návrhu Hippolyta Fizeaua z roku 1868). První hvězdný interferometr byl sestaven na observatoři Mount Wilson. Michelson a Francis Gladheim Pease jej využili k prvnímu přímému měření rozměrů hvězdy. V prosinci 1920 určili průměr Betelgeuse na přibližně 380 milionů kilometrů (Michelson & Pease, 1921).

Základní jednotkou pro astronomickou interferometrii je dvojice dalekohledů. Nyní už se ale používá i více dalekohledů spojených do celé sítě. Interferometrické systémy pracují na povrchu Země, ale i ve vesmíru. Nejde v žádném případě jen o optickou část spektra. Spíše naopak. Je třeba si uvědomit, že čím delší je vlnová délka přicházejícího

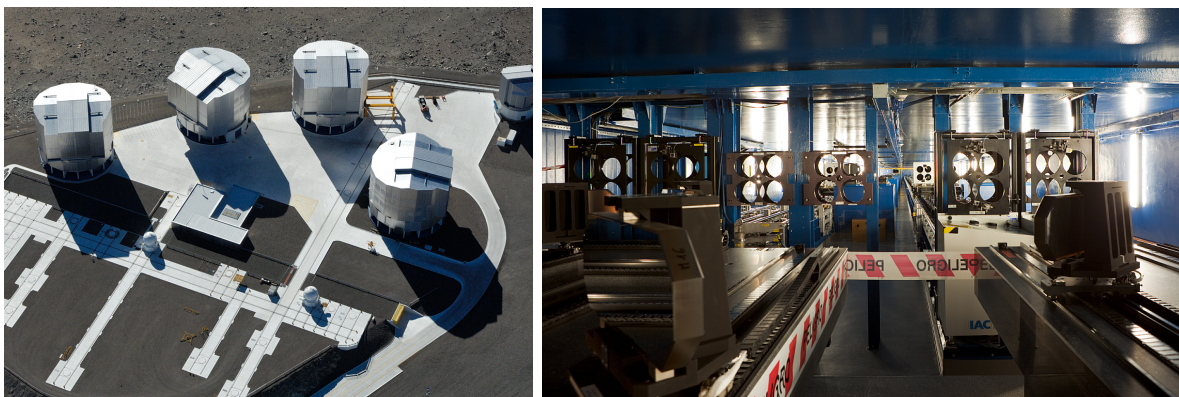


Obrázek 15.8: Schéma moderního optického interferometru. Zdroj Monnier (2003).

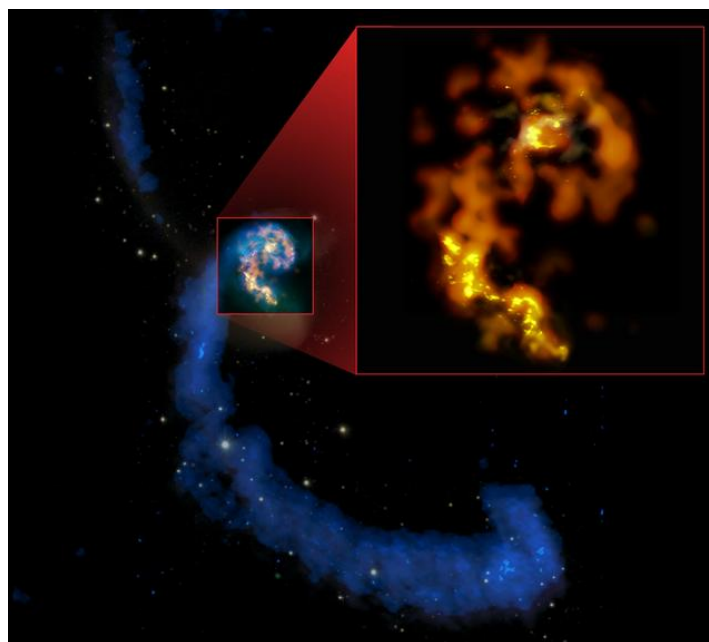
záření, tím snazší je měření jeho fázové informace. První interferometrické systémy byly takřka výhradně tvořeny radioteleskopy pro příjem dlouhovlnného rádiového záření (například VLA (Very Large Array) nebo MERLIN). Nicméně, jak se zlepšovaly technologie a zpřesňovala měření, bylo možné měřit i v oblasti kratších vlnových délek. V optické oblasti pracuje řada interferometrů, například CHARA, VLTI⁶. Od roku 2012 je v provozu interferometrický systém ALMA (Atacama Large Millimeter Array), který pracuje v pásmu vlnových délek 0,3 mm až 9,6 mm. Na projektu se aktivně podílí i vědci z České republiky.

Interferometrie je tedy výborným pomocníkem při studiu vzdálených světů. Můžeme s její pomocí například přímo určovat průměry hvězd, rozlišovat dvojhvězdné páry, hledat exoplanety, studovat detaily v oblastech tvorby hvězd a podobně. Na druhou stranu pomocí interferometrie sledujeme rychlost rotace Země vůči velmi vzdáleným objektům a tak zpřesňujeme náš časový rámeček.

⁶viz http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_astronomical_interferometers_at_visible_and_infrared_wavelengths



Obrázek 15.9: Vlevo: Letecký pohled na Very Large Telescope (VLT) array ESO na vrcholu hory Cerro Paranal v Chile. Největší budovy jsou kopule čtyř dalekohledů o průměru 8,2 metru. Uprostřed je laboratoř VLT Interferometer (VLTI), kam je sváděn signál z těchto dalekohledů. Pohled do tunelu VLTI je vpravo. Zdroj: ESO.



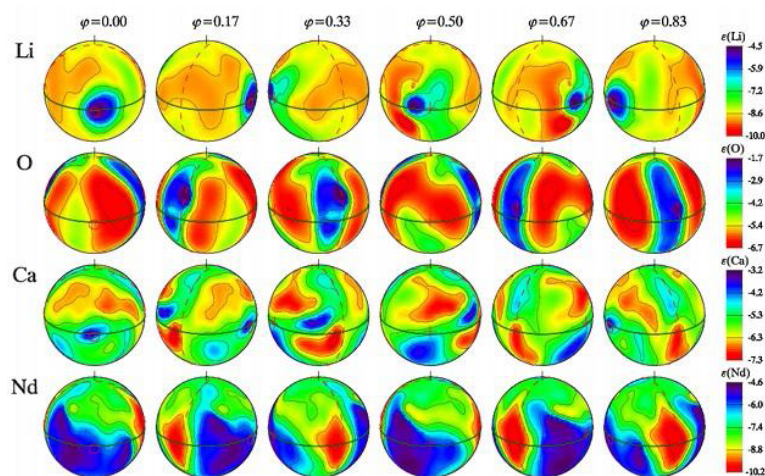
Obrázek 15.10: Složený pohled na interagující galaxie NGC 4038/4039 Tykadla, který ukazuje slapový ohon v rádiové oblasti (modrá), rodící se hvězdy v optické části (bílá a růžová) a ve vybraném čtverci současné oblasti tvorby nových hvězd v milimetrové a submilimetrové části spektra (oranžová a žlutá). Vložený obrázek je první mm/submm testovací pohled ALMA ve třech oblastech spektra zachycující mimořádné detaily. Zdroj: <http://www.almaobservatory.org>.

15.3 Spektroskopie

V kapitole 8 jsme se věnovali základům spektroskopie a historii jejího využití v astronomii. V počátcích bylo možné studovat ve spektrech hvězd a obecně vesmírných objektů jen ty nejvýraznější jevy a charakteristiky. Spektrální klasifikace z přelomu 19. a 20.

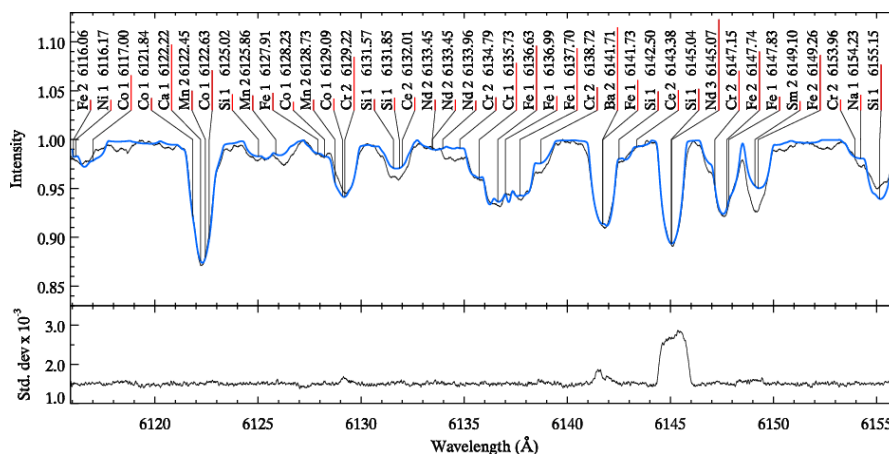
století se konec konců používá dodnes, i když s různými doplňky a rozšířeními. Nicméně rozvoj pozorovací techniky a metod zpracování pozorování vedl k obrovskému pokroku a umožnil nám nyní detekovat například změny radiálních rychlostí v řádu dm/s nebo drobné změny chemického složení studovaného objektu nebo jeho částí. Například ze spekter hvězd je možné získávat následující informace o:

- složení atmosfér hvězd,
- rotaci hvězd, její rychlosti a změnách,
- skvrnách na povrchu hvězd, jejich rozmístění a složení,
- vzájemné rychlosti hvězdy a pozorovatele,
- složení, směru, intenzitě hvězdného větru,
- složkách dvojhvězd, jejich radiálních rychlostech, poměrech hmotností,
- exoplanetách z měření radiálních rychlostí,
- složení atmosfér exoplanet.



Obrázek 15.11: Rozložení skvrn prvků na povrchu Ap hvězdy HR 3831 detekovaných ze spektroskopie. Zdroj: <http://www.almaobservatory.org>.

A jak takový spektrální výzkum vlastně probíhá? Po základním zpracování spektrogramu, což je dnes vlastně v naprosté většině CCD snímek, se získá průběh intenzity v závislosti na vlnové délce. Pak zkoumáme celý spektrogram, úroveň a průběh kontinua, ale i jednotlivé úseky nebo i samostatné spektrální čáry, jejich umístění i podobu. Profil čáry, zejména její šířka nás informují o teplotě, turbulenci, rychlosti rotace, hustotě (tlaku) či intenzitě magnetického pole v místě vzniku záření. Přítomnost a intenzita čar vypovídají o teplotě a zastoupení chemických prvků v místě vzniku záření. Z polohy čar, respektive jejich posunu vůči laboratornímu srovnávacímu spektru, pak určíme zda se objekt od nás vzdaluje nebo se k nám blíží a jakou rychlostí. Při analýze spekter objektu používáme nejen srovnávací laboratorní spektra, ale zpravidla také teoretická (syntetická) spektra, vypočítaná pro daný objekt (viz obr. 15.12).



Obrázek 15.12: Srovnání napozorovaného spektra hvězdy HR 3831 (tenká čára) se syntetickým spektrem v oblasti 611.6-615.6 nm. Nejsilnější spektrální čáry jsou identifikovány. Zdroj: Kochukhov (2006).

15.4 Dvojhvězdné studnice informací

V přehlídce objektů pozorovatelných na obloze jsme v kapitole 5.1 představili dvojhvězdy a jejich základní rozdělení na optické dvojice a fyzické páry. Nás nyní budou zajímat fyzické dvojhvězdy, tedy případy, kdy dvě hvězdy obíhají kolem společného těžiště. Právě takové případy jsou nesmírně cenným zdrojem informací ze světa hvězd, často i takových, které bychom jinak s takovou přesností získat nemohli. Hvězdy žijící v páru toho prostě na sebe prozradí více.

Podle metod, nebo chcete-li způsobu pozorování, je můžeme rozdělit do skupin na:

- vizuální,
- astrometrické,
- spektroskopické,
- zákrytové.

15.4.1 Vizuální dvojhvězdy

Na rozdíl od optické dvojhvězdy, kdy se dvě spolu nijak nesouvisející hvězdy náhodně vyskytují takřka ve stejném směru a pozorovatel pak má dojem hvězdného páru, vizuální dvojhvězda je tvořena skutečným, fyzickým párem dvou hvězd obíhajících kolem společného těžiště. Přívlástek "vizuální" je zde používán proto, že vzdálenost dvojhvězdy od nás je poměrně malá a tak můžeme rozlišit prostýma očima nebo s pomocí dalekohledu obě složky dvojhvězdy. Jednou z nejznámějších vizuálních dvojhvězd je Mizar a jeho průvodce Alkor v oji Velkého vozu.

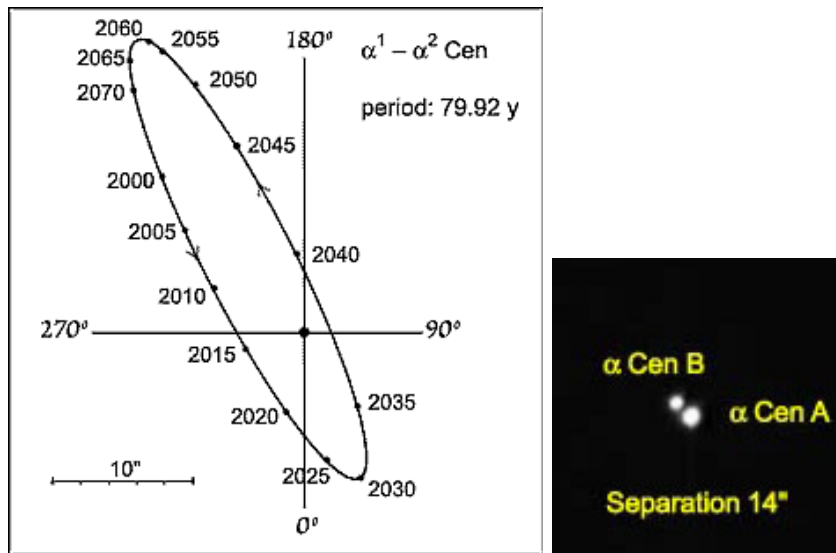
První záznamy o pozorování vizuálních dvojhvězd najdeme v korespondenci Benedetto Castellioho a jeho učitele Galilea Galileiho z let 1616-1617⁷. V 17. i 18. století si astronomové mysleli, že takové dvojice hvězd vznikají jen náhodou a navíc,

⁷Podrobněji si o pátrání po prvních pozorování vizuálních dvojhvězd můžete přečíst na webu Leoše Ondry <http://www.leosondra.cz/mizar/>.

že všechny hvězdy jsou stejně zářivé a jejich rozdílná pozorovaná hvězdná velikost je jen důsledkem jejich odlišné vzdálenosti. Proto se William Herschel rozhodl využít dvojhvězd ke změření paralaxy hvězd a začal je roku 1779 soustavně sledovat. Vydal celkem 3 katalogy s několika stovkami dvojhvězd. Jeho současník, anglický přírodovědec John Michell ale jednoduchou úvahou a jedním z prvních statistických výpočtů prokázal, že pozorujeme mnohem více dvojhvězd než by odpovídalo náhodnému rozložení hvězd a tedy, že dvojhvězdy, které pozorujeme, musí být zčásti skutečnými fyzickými páry (Michell, 1767). V roce 1797 Herschel znovu proměřil katalogizované dvojhvězdy a zjistil, že vzájemná poloha hvězd ve dvojhvězdách se změnila. V katalogu různých objektů Herschel (1802) vyslovil domněnku, že tato změna není důsledkem pohybu Země, ale že pozorujeme skutečné "dvojité hvězdné systémy", kde dvě hvězdy obíhají kolem hmotného středu. O čtvrt století později vypočítal Francouz Félix Savary (1827) poprvé na základě pozorování trajektorii složek dvojhvězdy, konkrétně se jednalo o ξ UMa.

Pokud známe u vizuální dvojhvězdy periodu oběhu P jejich složek kolem těžiště soustavy a velkou poloosu a jejich trajektorie, lze poměrně jednoduše zjistit vzdálenost soustavy tzv. *dynamickou paralaxu dvojhvězdy* i hmotnosti obou složek.

V dnešní době je známo přes sto tisíc vizuálních dvojhvězd, které jsou uvedeny ve Washingtonském katalogu vizuálních dvojhvězd WDS (<http://ad.usno.navy.mil/wds/>).

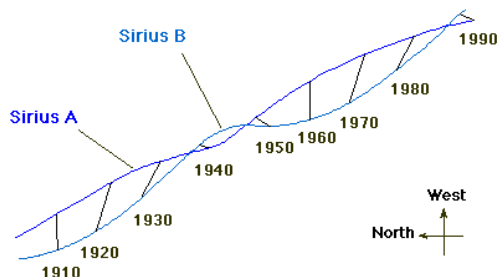


Obrázek 15.13: Relativní trajektorie složek dvojhvězdy α Cen A a B. Jasnější složka α Cen A je v počátku a kolem ní je vykreslena trajektorie slabší složky α Cen B. Ve skutečnosti obě složky obíhají kolem hmotného středu soustavy. Předpovězené polohy slabší hvězdy jsou vykresleny v pětiletých intervalech. Vpravo CCD snímek dvojhvězdy. Převzato z <http://outreach.atnf.csiro.au>.

15.4.2 Astrometrické dvojhvězdy

Německý matematik a astronom Fridrich Bessel se věnoval mimo jiné astrometrickým pozorováním hvězd. Soutěžil s jinými astronomy své doby o to, kdo první změří pa-

ralaxu hvězdy a Bessell tento pomyslný závod v roce 1838 vyhrál určením paralaxy hvězdy 61 Cygni. Nabyté zkušenosti – kritický pohled na starší měření poloh hvězd a vlastní přesná měření ho v roce 1843 přivedly ke zjištění, že v měřeních rektascenze Síria a deklinace Prokyonu jsou větší odchylky, než by vyplývalo z pouhých chyb pozorování. Po důkladné analýze všech dat dospěl k závěru, že tyto odchylky jsou způsobeny přítomností neviditelných průvodců u těchto hvězd (Bessell, 1844). Důkazu své hypotézy se bohužel nedočkal, to se podařilo až o dvacet let později. Americký výrobce dalekohledů a astronom Alvan Graham Clark pozoroval Síriova průvodce (nyní Sírius B) 31. ledna 1862 během testování tehdy největšího refraktoru o průměru 0,47 m. Na odhalení souputníka Prokyonu museli astronomové čekat až do roku 1896, kdy jej pozoroval John Martin Schaeberle refraktorem Lickovy observatoře o průměru 0,91 m. Sírius i Prokyon jsou typičtí představitelé tzv. astrometrických dvojhvězd. Jedná se o gravitačně vázané dvojice hvězd obíhající kolem společného těžiště, z nichž vidíme jen jednu, jasnější složku. Hvězdy se obecně pohybují prostorem naší Galaxie. Na časových škálách desítek let lze tento pohyb považovat za rovnoměrný a přímočarý. Pokud je ale hvězda gravitačně vázána ve dvojhvězdném systému, není její vlastní pohyb přímočarý. ”Skrytá” složka způsobuje zvlnění vlastního pohybu jasnější složky (viz obrázek 15.14). Stejným způsobem je možné pátrat i po exoplanetách, ale tyto výchylky jsou velmi malé. Například, všechny planety Sluneční soustavy vychýlí Slunce maximálně až o dva jeho poloměry, což při pozorování z dostatečného odstupů je velmi malá výchylka.

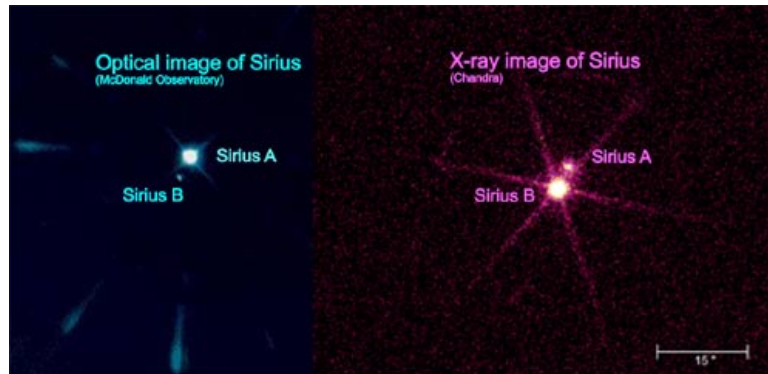


Obrázek 15.14: Vlastní pohyb soustavy Síria v průběhu 80 let. Sírius byl nejdříve detekován jako astrometrická dvojhvězda, ale nyní už je považován za vizuální soustavu, jak ukazuje též následující obrázek. Převzato z <http://outreach.atnf.csiro.au>.

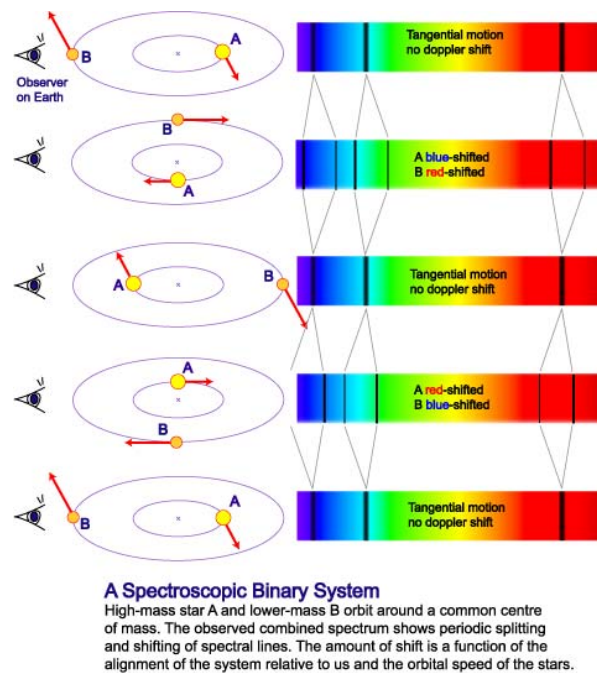
Katalog astrometrických dvojhvězd lze najít na <http://ad.usno.navy.mil/wds/> (Mason et al., 2001).

15.4.3 Spektroskopické dvojhvězdy

Někdy hvězdy svůj dvojhvězdný charakter prozradí změnami ve spektru. Jak dvojice hvězd obíhá kolem těžiště soustavy, jednotlivé složky se vůči nám střídavě přibližují a vzdalují, což se v důsledku Dopplerova jevu projeví periodickým posunem spektrálních čar k modrému a červenému konci spektra. Ideální je, pokud vidíme ve spektru čáry obou složek a detekujeme jejich pohyb. Takovým soustavám se říká dvousložkové spektroskopické dvojhvězdy (v ang. double-lined spectroscopic binary, SB2). Často se ale stává, že slabší složka dvojhvězdy je natolik slabá, že není ve spektru detekovatelná a pozorujeme pouze pohyb jedné skupiny spektrálních čar. Takové dvojhvězdy, resp. jejich spektrum



Obrázek 15.15: Zajímavé srovnání pohledů na soustavu Síria pozemským dalekohledem a přístroji rentgenovské družice Chandra. Zatímco v optické oblasti spektra je Sírius A ($T_{\text{eff}}=10\,000\text{ K}$) $100\,000\times$ jasnější než Sírius B, v rentgenovské oblasti je mnohem jasnější Sírius B, protože je velmi žhavý ($25\,000\text{ K}$) a produkuje i nízkoenergetické rentgenovské záření. Převzato z <http://outreach.atnf.csiro.au>.

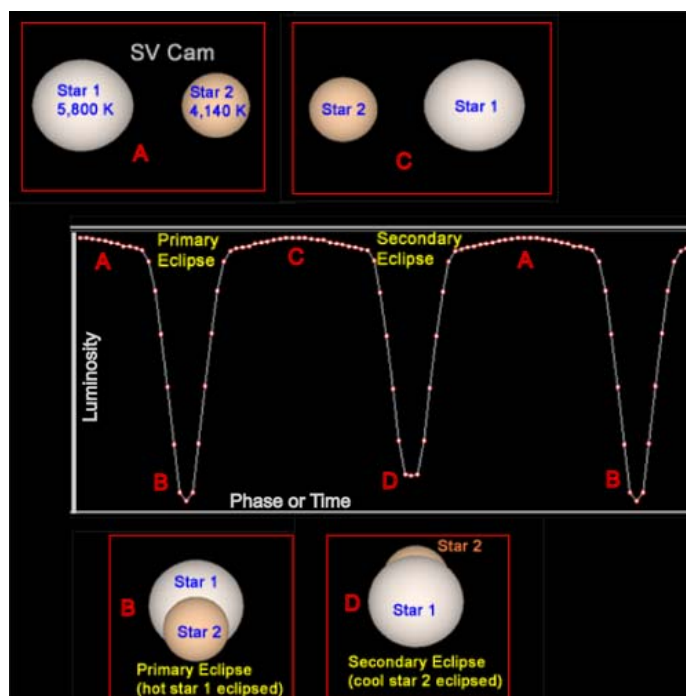


Obrázek 15.16: Spektroskopická dvojhvězda. Převzato z <http://outreach.atnf.csiro.au>.

pak označujeme jako jednosložkové (single-line spectroscopic binary, SB1). Prvním, kdo si povšiml těchto periodických změn poloh čar ve spektru byl Edward Pickering. Tím vlastně v roce 1887 objevil první spektroskopickou dvojhvězdu – ζ UMa (Mizar). Poté, co se Antonia Mauryová stala členkou tzv. Pickeringova harému (skupiny asistentek), dostala za úkol spočítat trajektorii Mizara (ζ UMa). Mauryová nezávisle objevila druhou spektroskopickou dvojhvězdu β Aurigae a pro obě hvězdy poprvé spočítala trajektorii (Pickering, 1890).

15.4.4 Zákrytové dvojhvězdy

Opravdu nenahraditelným zdrojem informací ze světa hvězd jsou dvojhvězdy. Nejvýznamnější studnicí jsou z tohoto pohledu zákrytové dvojhvězdy, tedy soustavy, kde se nám při pohledu ze Země jejich složky při oběhu kolem těžiště soustavy vzájemně zakrývají. Zpravidla jsou tak daleko, že složky dvojhvězdy nerozlišíme jako jednotlivé hvězdy, ale pozorujeme jen společné světlo obou hvězd, respektive jeho zeslabení při zákrytech. První pozorování zákrytové dvojhvězdy (Algolu) zaznamenal roku 1667 italský astronom Geminiano Montanari. Nicméně se má za to, že nebyl prvním, kdo změny jasnosti Algolu pozoroval. Znalost jeho proměnnosti je často připisována arabským astronomům z přelomu 1. a 2. tisíciletí n. l., někdy dokonce i učencům a kněžím starověkého Egypta či Babylónie. Změny β Persei znovu objevil John Goodricke a v letech 1782-3 hvězdu systematicky pozoroval. Určil periodu změn na necelé tři dny a dokonce správně vysvětlil příčinu světelných změn. Bohužel tyto výsledky nenašly větší odezvu. Teprve v roce 1880 oprášíl Edward Pickering Goodrickovu domněnku o dvojhvězdné povaze proměnné hvězdy a z tvaru světelné křivky odvodil i relativní rozměry obou složek. V roce 1888 Hermann Vogel, zjistil, že Algol je jednosložková spektroskopická dvojhvězda, jejíž křivka radiální rychlosti přesně odpovídá dvojhvězdnému modelu. Mechanismus proměnnosti tak byl konečně kombinací fotometrických a spektroskopických pozorování jasně prokázán. Nicméně ještě zhruba století trvalo, než byly složky Algolu rozlišeny interferometricky, nejprve v rádiovém oboru a posléze i opticky (Lestrade et al., 1999; Csizmadia et al., 2009).

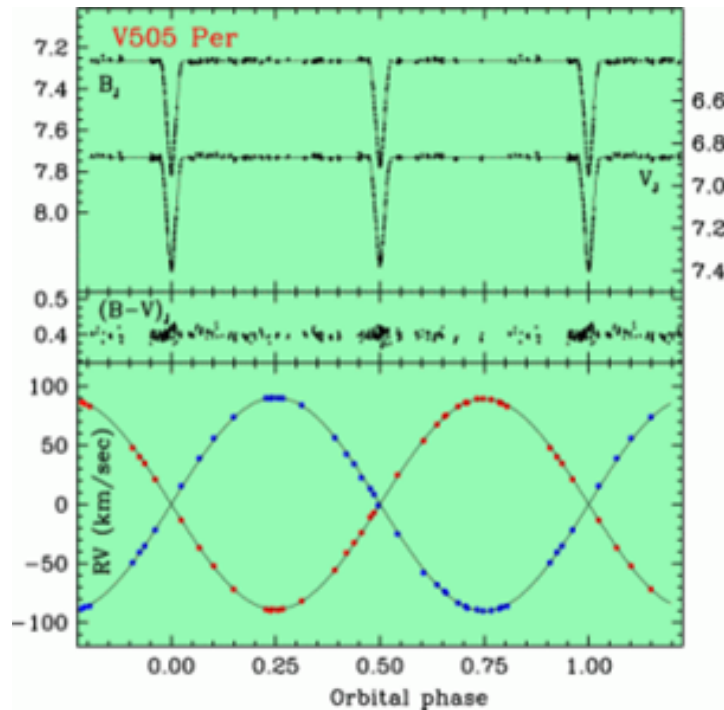


Obrázek 15.17: Počítačová simulace světelné křivky zákrytové dvojhvězdy SV Cam. Pověšimněte si deformace primární složky dvojhvězdy. Převzato z <http://outreach.atnf.csiro.au>.

Z prostého fotometrického sledování změn celkové jasnosti zákrytové soustavy můžeme určit zejména poměry hmotností, rozměrů, zářivých výkonů složek a sklon trajekto-

rie. Pokud přidáme i výsledky spektroskopických pozorování, zejména křivku radiálních rychlostí, můžeme určit zásadní parametry jako hmotnosti a poloměry v absolutních hodnotách, tedy přímo v kilogramech a metrech. Pro tzv. řešení světelné křivky i křivky radiálních rychlostí existuje celá řada programů (PHOEBE, Nightfall, WD, FOTEL a další), které jsou až na výjimku volně k dispozici a zájemce se může do modelování dvojhvězdných soustav hned pustit. Výsledkem je sada parametrů, s nimiž je pak spočtena umělá světelná křivka pro každou barvu fotometrických měření a křivky radiálních rychlostí (viz obrázek 15.18).

V některých případech umožňují tyto programy použít i další typy pozorování (astrometrická, interferometrická, případně okamžiky minim jasnosti). Pokud jsou použita pozorování dostatečně přesná, je možné získat hodnoty parametrů složek dvojhvězdy s přesností lepší než 1 %, což je základní předpoklad k tomu, abychom mohli takové výsledky použít pro verifikaci například modelů hvězdné stavby nebo hvězdného vývoje. Stejně komplexní informace o hvězdách s podobnou přesností zatím není možné získávat jinak.



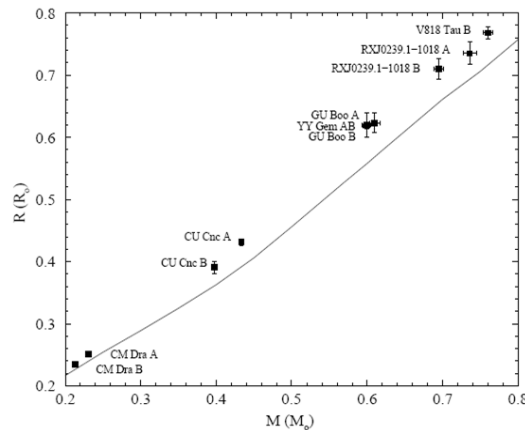
Obrázek 15.18: Světelné křivky v B , V , $(B-V)$, křivky radiálních rychlostí zákrytové dvojhvězdy V505 Persei. Zdroj: <http://www.pd.astro.it/oapd>.

Přestože známe zákrytové proměnné hvězdy velmi dlouho, některá jejich tajemství zůstávají stále neodhalena. Povšimněme si alespoň těch tří nejzávažnějších:

1. Velmi hmotné hvězdy – Poznat jejich vývoj, vnitřní stavbu a chování je důležité například pro studium emise ionizujícího záření, chemický vývoj galaxie, energetické fenomény. Potřebujeme znát co nejpřesněji jejich parametry, abychom mohli přesně popsat jejich vývoj po opuštění hlavní posloupnosti nulového stáří (ZAMS). Hlavní problém je dosud bohužel v tom, že klasické metody analýzy světelných

křivek a křivek radiálních rychlostí a následný model dávají pro parametry popisující konvekci uvnitř těchto hvězd odlišné výsledky než vyplývají z astroseismologických studií.

2. Hvězdy s malou hmotností - Naše představy o těchto hvězdách ve dvojhvězdách neodpovídají pozorováním. Modelové poloměry hvězd jsou podhodnocené o zhruba 10%, zatímco modelové teploty teploty jsou o přibližně 5 % nadhodnocené (viz obrázek 15.19). Graf závislosti hmotnosti na svítivosti pak ale na první pohled vypadá v pořádku. Nejčastěji zmiňovaným vysvětlením je hvězdná aktivita složek dvojhvězdy nízké hmotnosti, která velmi ztěžuje přesné určení fyzických vlastností těchto hvězd. Navíc jich bylo dosud detailně prozkoumáno jen málo, přestože řada z nich je i v dosahu menších přístrojů, jako například YY Gem, CM Dra, CU Cnc nebo GU Boo.
3. Dvojhvězdy typu W UMa - Jsou velmi snadno pozorovatelné, mají poměrně krátké periody, ale přesto jsou záhadné. Doposud se přesně neví, jak tyto dotykové nebo přesahující⁸ soustavy vznikají a jak se dále vyvíjejí, zda a za jakých podmínek například mohou složky takové dvojhvězdy splynout.



Obrázek 15.19: Graf závislosti poloměru na hmotnosti pro složky zákrytových dvojhvězd v dolní části hlavní posloupnosti určené s přesností lepší než 3%. Čára v grafu znázorňuje teoretickou izochronu 300 milionů let podle modelu Baraffe et al. (1998).

Zákrytové dvojhvězdy jsou v jistém slova smyslu doslova astrofyzikální laboratoře. Můžeme v nich na dálku získávat informace a testovat naše znalosti z různých oblastí. V řadě případů jde o zásadní informace, které nelze jinak zjistit:

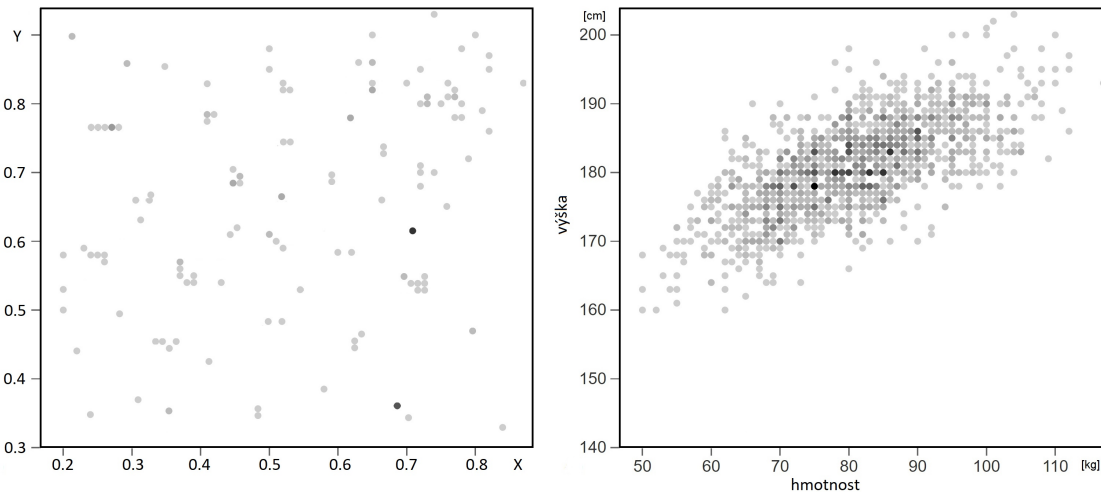
- zmíněné základní parametry složek dvojhvězdy,
- údaje o hvězdných atmosférách (okrajové ztemnění, gravitační zjasnění), studium atmosférických zákrytů,
- detaily o hvězdných nitrech, struktuře a konvektivní vrstvě (pomocí apsidálního pohybu, dvojhvězd s excentrickou trajektorií, modelů),

⁸Přívlastky vycházejí z anglických označení „contact“ a „overcontact“.

- parametry popisující hvězdné magnetické dynamo a magnetické aktivity (z rentgenovských, ultrafialových, optických a radiových pozorování - mapování zákrytů, hvězdné korony a chromosféry, střídavé změny periody),
- pro fyziku plazmatu (dvojhvězdy s akrečním diskem, plynné proudy),
- pro relativistickou fyziku, kosmologii (černé díry ve dvojhvězdách - potvrzení existence, získání informací o jejich hmotnostech, věku a vlastnostech; stáčení periastra)
- vzdálenosti ve vesmíru - nezávislé určení vzdáleností, „standardní svíčky“.

15.5 Hvězdný diagram

Vykreslení získaných dat do grafu, moderně řečeno - jejich vizualizace, je jedním ze základních nástrojů vědecké práce. Konec konců se říká, že jeden obrázek vydá za tisíc slov. V astronomii, kde často pracujeme s nezvykle velkými čísly a jejich relacemi, to platí dvojnásob. Začneme ale dvěma jednoduchými příklady. Mějme například dvě veličiny - X a Y , o kterých nevíme, zda je mezi nimi nějaká závislost. Po zakreslení do grafu (viz obrázek 15.20 vlevo) je vše jasné. Mezi veličinami X a Y žádný vztah není. A nyní si vezměte jiné dvě veličiny, například výšku a hmotnost osob v malé skupině lidí. Jak vyplývá z obrázku 15.20 vpravo, naše očekávání se potvrdilo. Mezi výškou a hmotností lidí ve skupině je zřejmá závislost. Zpravidla bude mít vyšší člověk i větší hmotnost, ale jsou jistě i výjimky. Nicméně existují jisté fyzické limity, a tak nelze očekávat třímetrového obra s hmotností 20 kilogramů nebo malého trpaslíka, kterému váha ukazuje 350 kilogramů.



Obrázek 15.20: Vlevo: Náhodné rozložení dvou veličin. Vpravo: Závislost mezi výškou a hmotností sportovců na zimních olympijských hrách 2018. Zdroj: <http://www.idnes.cz>.

A podobné je to i ve světě hvězd. I zde najdeme hvězdy droboučké (ve srovnání s ostatními hvězdami), ale i velmi rozměrné, hvězdy relativně málo hmotné, i hvězdy s nadváhou. Správné grafické zobrazení vztahů mezi parametry hvězd nám při studiu světa hvězd výrazně pomůže.

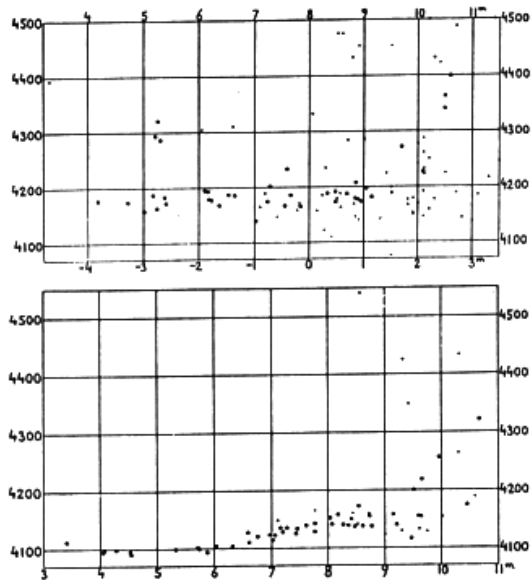
15.5.1 Historie

Nejznámější hvězdný diagram je zpravidla spojován se jmény - Ejnar Hertzsprung a Henry Norris Russell. Historie však byla, jak už to bývá, trochu složitější. Prvním, kdo si všiml odlišných vlastností hvězd na základě fotografií hvězdných polí a měření hvězdných velikostí a jejich souvislosti se zářivým výkonem hvězd, byl Carl Vilhelm Ludvig Charlier, který výsledky shrnul do tabulek už v roce 1889. Bohužel práce Charlier (1889) nezbudila větší pozornost. Počátkem minulého století vyšla v neastronomickém časopise práce (Hertzsprung, 1905), v níž se autor zabýval souvislostmi mezi jasnostmi, spektrálními třídami a paralaxami hvězd. O rok později na Štědrý den 1906 odeslal pokračování práce (Hertzsprung, 1907a), jejíž závěry lze shrnout do následujících bodů:

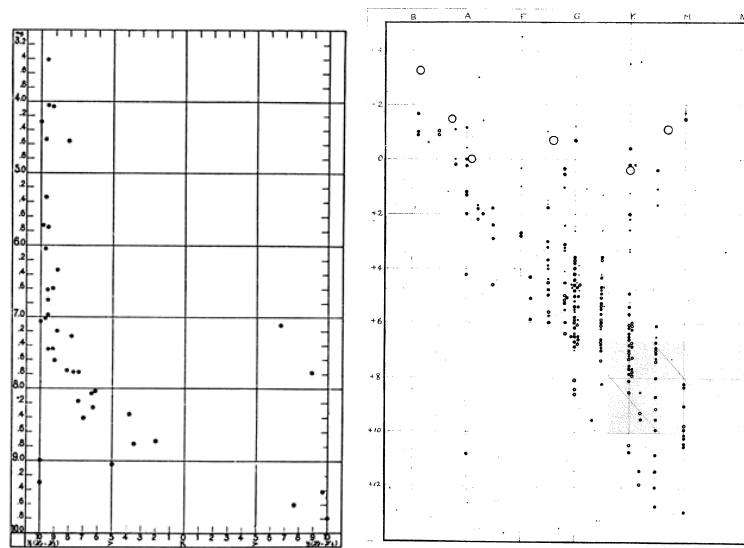
- Hvězdy spektrálních tříd G, K a M lze rozdělit do dvou skupin s odlišnou svítivostí, jedna je dnes známa jako hlavní posloupnost a v druhé jsou zastoupeny velmi zářivé hvězdy.
- Zářivé červené hvězdy musí být velmi velké.
- Malý počet těchto červených obrů (takové označení ale Hertzsprung nepoužil) ukazuje, že tyto hvězdy jsou v rychlé fázi svého vývoje. Předpokládal, že musí být souvislost mezi spektrem a zářivým výkonem hvězd.
- Ukázal, že hvězdy s ostrými a hlubokými absorpčními čarami, jsou zářivější než ostatní. Tento objev je základem pro určování zářivého výkonu hvězdy z jejího spektra, tedy pro metodu určování tzv. spektroskopické paralaxy.

Výše zmíněné Hertzsprungovy práce neobsahují ilustraci výsledků v grafické podobě, žádný diagram. Je však známo, že Hertzsprung vytvořil takový graf pro Plejády už v roce 1906. V další práci (Hertzsprung, 1907b) využil svých znalostí z oblasti fotografie a snažil se nashromážděná data astrofyzikálně interpretovat. Otevřené hvězdokupy mu připadaly jako správný nástroj pro studium závislosti mezi zářivým výkonem hvězd a jejich barvou. Protože jsou hvězdy z jedné otevřené hvězdokupy členy stejného uskupení a jsou od nás všechny přibližně stejně daleko, je možné zkoumat vztah mezi jejich pozorovanou hvězdnou velikostí a barvou. Poslal článek Karlu Schwarzschildovi a ten jej roku 1909 pozval do Göttingenu ke spolupráci. Tam také Hertzsprung Schwarzschildovi ukázal svůj diagram. Pro Plejády a Hyády jej však publikoval až o dva roky později (Hertzsprung, 1911). Nicméně Schwarzschildovou zásluhou (na jeho přímé doporučení) se problémem začal zabývat také Hans Rosenberg, který publikoval svůj diagram závislosti pozorované hvězdné velikosti na spektrálním typu pro hvězdy v Plejádách o rok dříve (Rosenberg, 1910) (viz obrázek 15.22). Za oceánem se podobným otázkám věnoval Henry Norris Russell a nezávisle došel ke stejným výsledkům jako Hertzsprung nebo Rosenberg⁹. Svůj diagram Russell poprvé prezentoval v červnu 1913 na zasedání Královské astronomické společnosti. Záznam přednášky byl publikován v Russell (1913). Uvádí zde, že dvou skupin červených hvězd si dříve povšiml Hertzsprung a ten je také nazval "trpaslíky" a "obry". V textu Russell jasně uvádí, že jediné, co udělal jinak než Hertzsprung je, že použil bohatší pozorovací materiál. Druhé veřejné představení diagramu provedl Russell v závěru roku 1913, v textové podobě v Russell (1914a,b). Delší dobu pak byl diagram znám jako Russellův. Teprve od roku 1933 se podle návrhu Bengta Strömgrena používá označení *Hertzsprungův-Russellův diagram* nebo jednoduše *HR diagram*.

⁹Zajímavé je, že se Russell v roce 1910 setkal se Schwarzschildem během jeho cesty po USA.



Obrázek 15.21: Podoba HR diagramu pro Plejády a Hyády (Hertzsprung, 1911). Na vodorovné ose je pozorovaná hvězdná velikost a na ose y efektivní vlnová délka v angströmech.



Obrázek 15.22: Vlevo: Nejstarší podoba HR diagramu pro Plejády (Rosenberg, 1910). Na vodorovné ose jsou spektrální třídy a na ose y pozorovaná hvězdná velikost v magnitudách. Vpravo: Russellova podoba HR diagramu (Russell, 1914a).

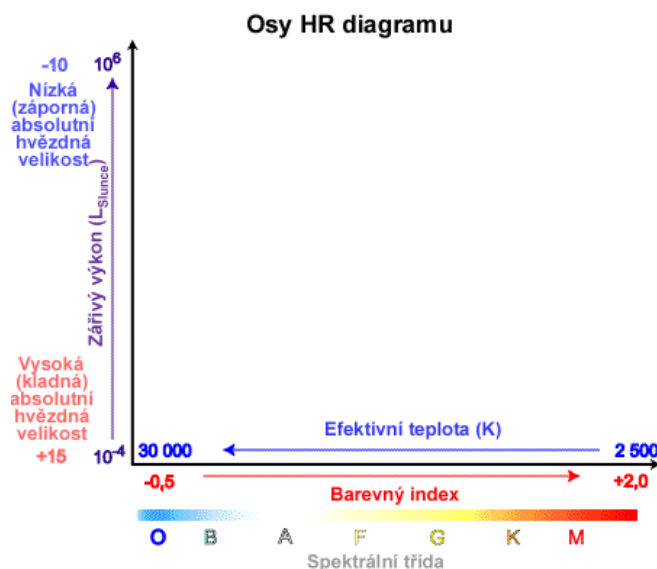
15.5.2 Podoby HRD

Historická kapitola o vzniku HR diagramu nám mimo jiné ukázala, že první podoby diagramu byly trochu odlišné. Vědci si teprve uvědomovali vzájemné souvislosti a význam HR diagramu. Dnes je zřejmé, že HR diagram představuje nejdůležitější astrofyzikální diagram a to i přesto, že podává tak trochu klamný obraz o světě hvězd. Ale o tom až

za chvíli. Nyní si povšimněme různorodosti s jakou je HR diagram prezentován. Jeho podoby se liší. Začneme u os diagramu (viz obrázek 15.23). Na vodorovné ose se zpravidla setkáme s popisem pomocí spektrálních tříd, které zleva doprava jdou podle Harvardské spektrální klasifikace od třídy *O* až po třídu *M* (*O-B-A-F-G-K-M*), eventuálně další nově zaváděné třídy (viz kapitola 8.3). Každou třídu můžeme v intencích zavedeného dělení ještě zjemnit na desetiny. Spektrální třídy poskytují informaci o teplotě místa vzniku záření a někdy je výhodnější pracovat přímo s efektivními teplotami. Pak je ale stupnice teplot na ose *x* obrácená, než jsme zvyklí, směrem doprava teplota klesá (viz obrázek 15.23). Teplotu hvězd lze vyjádřit i pomocí tzv. *barevného indexu*, což je vlastně rozdíl naměřených hvězdných velikostí ve dvou různých částech spektra. A hodnota barevného indexu už se chová dle očekávání a směrem zleva doprava roste.

Na osu *y* zpravidla vynášíme zářivý výkon hvězdy *L* vyjádřený buď v absolutní jednotkách (ve wattch) nebo v jednotkách zářivého výkonu nominálního Slunce L_{\odot} . V obou případech hodnoty směrem vzhůru rostou. Ekvivalentním vyjádřením zářivého výkonu je absolutní hvězdná velikost v magnitudách. Čím má potom hvězda větší zářivý výkon, tím je číselná hodnota hvězdné velikosti menší a hodnoty na ose tak směrem vzhůru klesají (viz obrázek 15.23). Absolutní hvězdná velikost poměřuje hvězdy v nominální vzdálenosti deseti parseků, ale v principu to může být jakákoli vzdálenost. Jen musíme zaručit, že pro všechny zakreslované objekty bude stejná. Takový předpoklad je splněn v případě hvězdokup. Jejich rozměry jsou zpravidla vzhledem k jejich vzdálenosti od nás zanedbatelné. Pak můžeme na svislou osu dokonce vynášet pozorované hvězdné velikosti, ale i zde bude směrem vzhůru číselná hodnota klesat. Variantě HR diagramu, kde jsou vynášeny na vodorovné ose barevné indexy a na svislé ose pozorované hvězdné velikosti, říkáme *barevný diagram*.

HR diagram má tedy rozmanité podoby, možnosti zápisu veličin, ale všechny tyto varianty mají jedno společné - vyjadřují závislost zářivého výkonu hvězd na jejich povr-



Obrázek 15.23: Různé podoby os HR diagramu. Převzato z <http://outreach.atnf.csiro.au> a upraveno

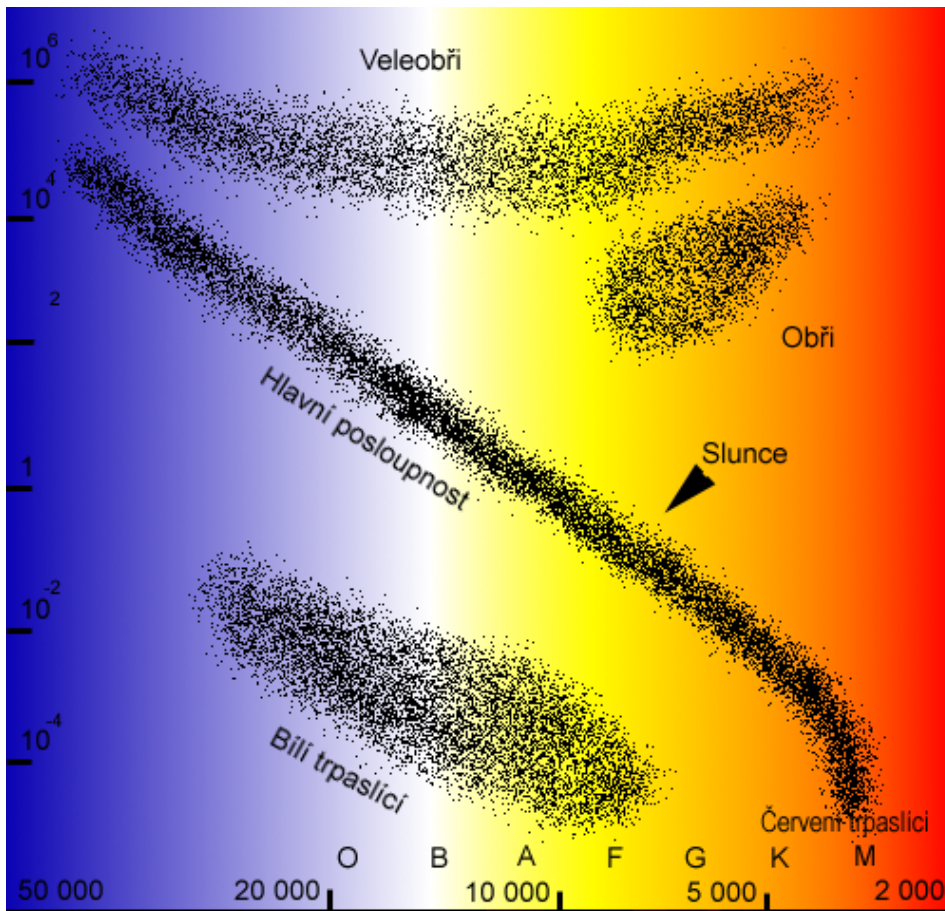
chové teplotě. Hvězdy se v HR diagramu seskupují na několika místech, naopak některé části HR diagramu doslova zejí prázdnotou. Podíváme-li se na HR diagram (obrázek 15.24) najdeme v něm zejména čtyři seskupení hvězd:

hlavní posloupnost – pás, který probíhá od horkých a zářivých hvězd k chladným hvězdám s malým výkonem; soustřeďuje přes 90 % všech hvězd

obři (červení obři) a **veleobři** - obří hvězdy s vysokými zářivými výkony a většinou relativně nízkými povrchovými teplotami,

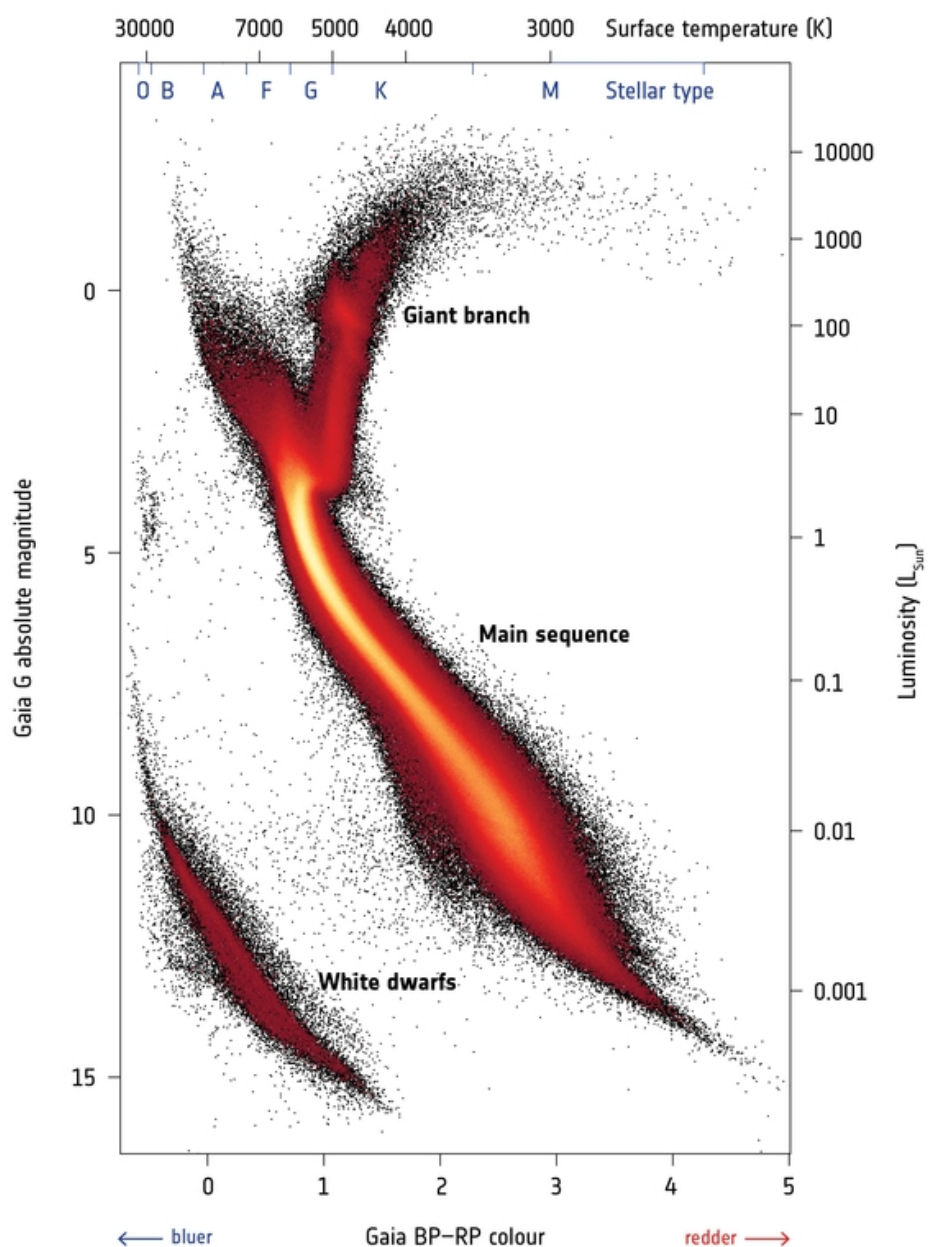
bílí trpaslíci - hvězdy malých rozměrů, typické jsou malé zářivé výkony a vysoké povrchové teploty,

červení trpaslíci - malé hvězdy na spodním konci hlavní posloupnosti spektrálních tříd K a M s malým zářivým výkonem.



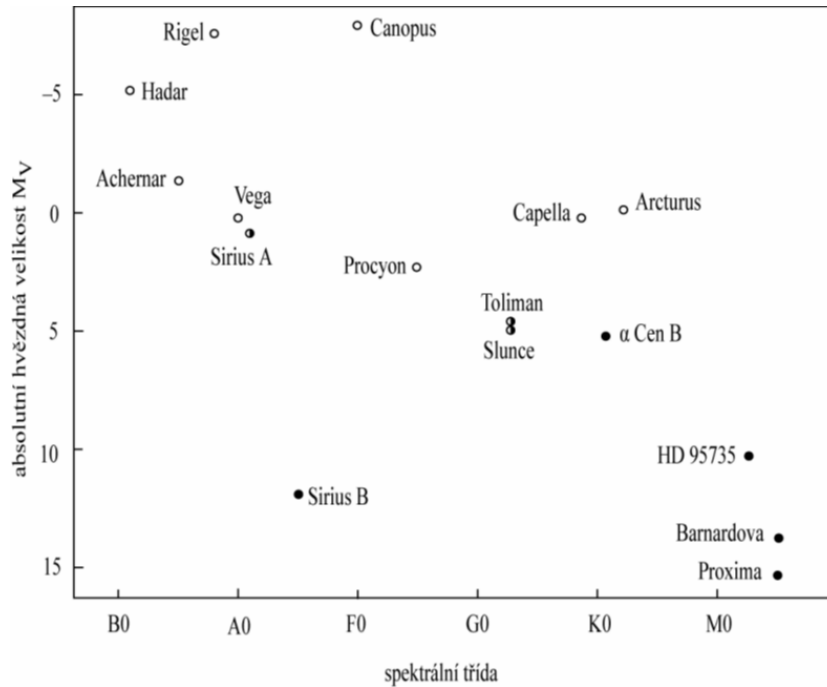
Obrázek 15.24: Schématický HR diagram. Zdroj: wikipedia. Upraveno.

Potíž s HR diagramem je však v tom, že nám ukazuje značně zkreslený obraz světa hvězd. Stačí si HR diagram vykreslit pro nejjasnější hvězdy naší hvězdné oblohy a pak pro hvězdy k Slunci nejbližší. Rázem dostanete dvě odlišné podoby (viz obrázek 15.26). Která je ale ta správná? Které máme věřit? Správné jsou, možná pro někoho překvapivě, obě podoby. Při vytváření diagramu se silně uplatňuje výběrový efekt. Pokud upřednostníme nejjasnější hvězdy nebe, budou to hvězdy velmi jasné, zářivé, obři a



Obrázek 15.25: HR diagram na základě měření družice GAIA v 2. datovém balíčku (2018). Zdroj: ESA/Gaia/DPAC.

veleobři, které se zobrazí v levé horní části HR diagramu. Těch malých a slabých hvězd bude velmi málo. Naproti tomu v bezprostředním okolí Slunce jsou spíše malé, málo zářivé hvězdy, které najdeme spíše v pravé dolní části HR diagramu.

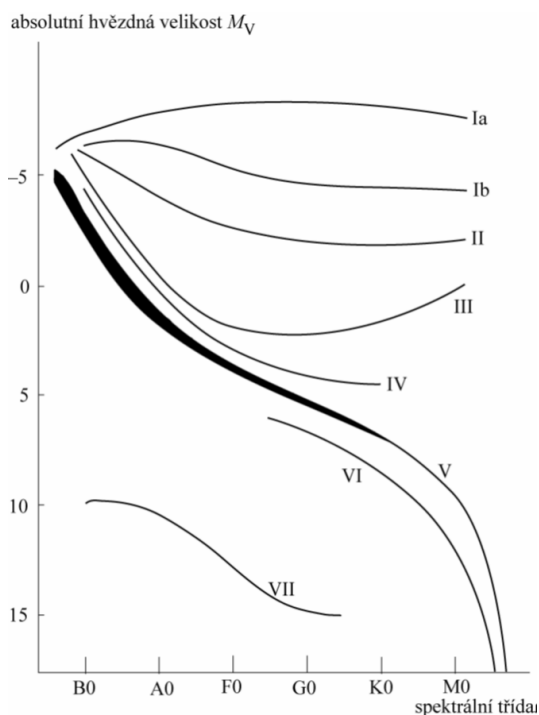


Obrázek 15.26: Hertzsprungův-Russellův diagram pro nejjasnější hvězdy (prázdné kotoučky) a nejbližší hvězdy (plné kotoučky).

Při popisu HR diagramu je tedy nutné dávat pozor z jaké množiny hvězd byl ten který HR diagram vytvořen. Pokud do něj zakreslíme co nejvíce všech hvězd, snadno zjistíme, že v HR diagramu lze odhalit jemnější rozdělení, než jsme dosud uvedli. Hvězdy jsou v něm zobrazeny v několika skupinách, které odpovídají luminositním třídám Morganovy-Keenanovy klasifikace (viz obrázek 15.27). Tato klasifikace zjemňuje spektrální typologii hvězd. Označení jednotlivých tříd (viz tabulka 15.1) se přidává za spektrální typ, případně podtyp v podobě římské číslice, například K2III, G2V. Takové rozdělení ale není samoúčelné. Určuje se podle profilu spektrálních čar ionizovaných prvků, citlivých na tlak v atmosféře hvězdy, takže zatímco spektrální typ přináší informaci o povrchové teplotě hvězdy, luminositní třída poukazuje na tlak v atmosféře hvězdy. Dohromady pak spektrální typ a luminositní třída poskytují rámcovou informaci o velikosti hvězdy.

Tabulka 15.1: Luminositní třídy klasifikace, kterou zavedli Morgan, Keenan & Kellman (1943); Morgan & Keenan (1973). V dnešní době se většinou k původním třídám I až VII přidává ještě další dosud neoznačená, která zahrnuje hnědé trpaslíky a malé červené trpaslíky.

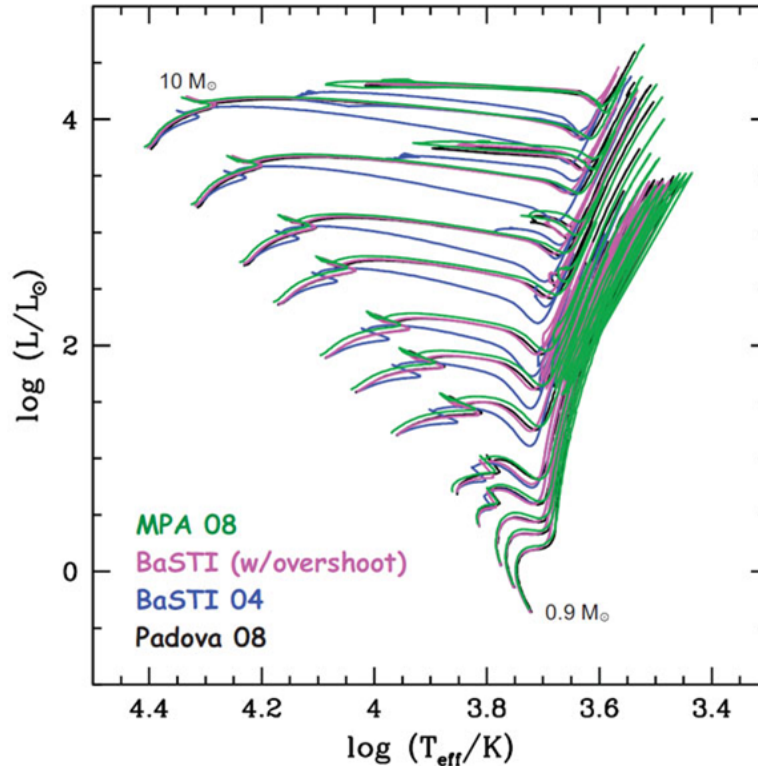
Lum. třída	Hvězda	Příklad
0	extrémně zářiví veleobři (hyperobři)	η Carinae
Ia	jasní veleobři	Betelgeuze
Ib	(normální) veleobři	Antares
II	jasní obři (někdy označení jako nadobři)	Canopus
III	(normální) obři	Aldebaran
IV	podobři	Procyon
V	hvězdy hlavní posloupnosti (a červení trpaslíci)	Slunce
VI	podtrpaslíci	Kapteynova hvězda
VII	bílí trpaslíci červení, hnědí trpaslíci	Sírius B



Obrázek 15.27: Luminositní třídy - Morganova-Keenanova (MK) klasifikace

I přes výše uvedené obtíže s výběrovým efektem je HR diagram vcelku oprávněně označován jako nejdůležitější astrofyzikální diagram. Jeho užití v astrofyzikální praxi je opravdu široké. Například je možné jej využít pro odhad vzdálenosti hvězdy. Pokud známe z pozorování hvězdnou velikost a spektrální typ, respektive spektrální třídu hvězdy, vyneseme hvězdu do HR diagramu dle spektrálních charakteristik (hodnotu osy

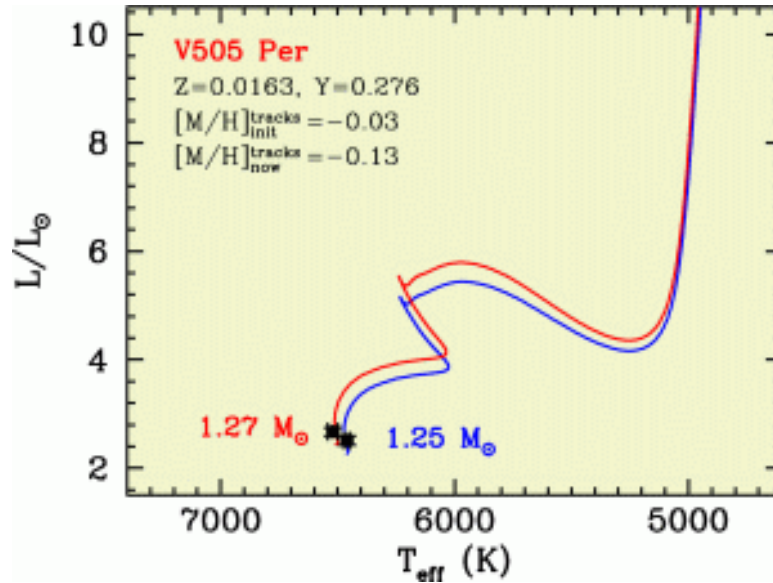
x dle spektrálního typu a pořadnici umístění dle typu (hvězda hlavní posloupnosti, obr, trpaslík). Z HR diagramu pak odečteme absolutní hvězdnou velikost a z pozorované hvězdné velikosti spočteme náš odhad vzdálenosti. Takto určená vzdálenost hvězdy se někdy označuje jako spektroskopická paralaxa.



Obrázek 15.28: Vývojové cesty hvězd v HR diagramu.

Mezi nejdůležitější využití HR diagramu lze nepochybně patřit testy platnosti teorií stavby a vývoje hvězd. Jak se hvězda vyvíjí, mění se její parametry a tím nutně i její postavení v HR diagramu. Pro hvězdy různé hmotnosti pak můžeme v HR diagramu zaznamenávat různé vývojové stopy a následně při pozorování zjišťovat, zda v HR diagramu existují takové objekty, jaké předpovídá teorie. Možných vývojových modelů hvězd existuje více, jak je například vidět na obrázku 15.28. Pro srovnání teoretických modelů s pozorovanými daty je třeba, aby základní parametry hvězdy byly určeny s přesností alespoň 1 %. Zatím nejspolehlivějším zdrojem takových dat je analýza fotometrických a spektroskopických pozorování těsných dvojhvězd (viz obr. 15.29).

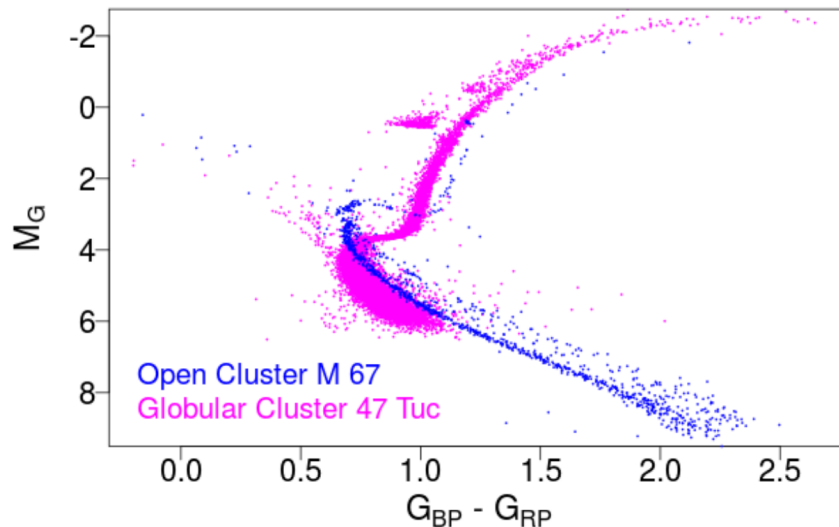
Na internetu lze najít jak hotové modely, sítě dat pro různé kombinace hvězdných parametrů, tak i programy, které umožní seznámit se blíže s HR diagramem a vývojovými stopami hvězd v něm, například http://sunshine.chpc.utah.edu/labs/star_life/support/HR_animated.swf, <http://leo.astronomy.cz/sclock/sclock.html>, <http://www.astro.ubc.ca/~scharein/a311/Sim/hr/HRdiagram.html> a další.



Obrázek 15.29: Srovnání vývojových stop modelu BaSTI s pozorovanými parametry V505 Per, které byly určeny z pozorování viz obrázek 15.18. Zdroj: <http://www.pd.astro.it/oapd>.

15.5.3 Barevný diagram

Barevný diagram je modifikací HR diagramu. Jak už víme, lze na osu x vynášet místo teploty, respektive spektrální třídy barevný index. Pokud jej doplní na ose y pozorovaná hvězdná velikost místo absolutní, mluvíme právě o barevném diagramu. Jenže pozor, takový diagram lze smysluplně vytvořit jen tehdy, budou-li všechny hvězdy v něm zakreslené od nás stejně daleko. Taková situace nastává pro hvězdy ve hvězdokupách, případně v galaxiích mimo naší Galaxie.

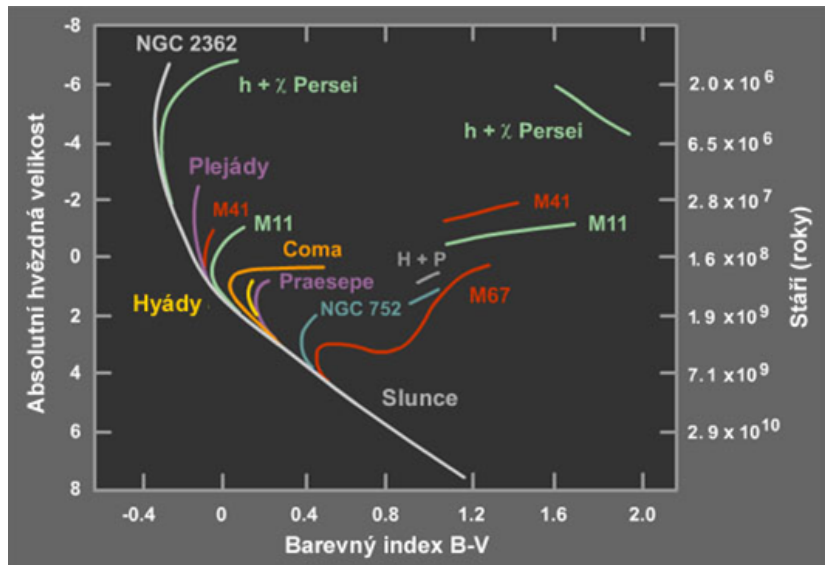


Obrázek 15.30: Barevný diagram otevřené hvězdokupy M67 (NGC 2682) a kulové hvězdokupy 47 Tucanae (NGC 104) z měření družice GAIA (Gaia Collaboration et al., 2018).

Barevný diagram je velmi účinná pomůcka. Elegantně nám pomůže nahradit značný deficit spektroskopických pozorování slabších objektů ve vzdálených hvězdokupách nebo galaxiích. Pořídít vícebarevnou fotometrii pro tyto objekty je totiž podstatně jednodušší.

Barevný diagram pak můžeme použít k tomu, abychom odlišili hvězdy, které jsou skutečně členy hvězdokupy, od těch, které se do stejného místa hvězdného nebe jen promítají. Lze je také využít k určení vzdálenosti hvězdokupy. Předpokládáme-li, že rozměry hvězdokupy vůči vzdálenosti k Zemi jsou zanedbatelné, pak všechny hvězdy hvězdokupy mají od Země stejnou vzdálenost. Pak stačí porovnat napozorované hvězdné velikosti hvězd s těmi absolutními pro hvězdy známé vzdálenosti (nebo modelové hvězdy). Rozdíl mezi hlavními posloupnostmi obou skupin hvězd na ose y představuje vlastně modul vzdálenosti, takže pak lze hledanou vzdálenost studované hvězdokupy snadno spočítat.

Z HR diagramu nebo i barevného diagramu můžeme snadno určit také stáří hvězdokupy pomocí tzv. *bodu obratu*. Jak je vidět na obrázku 15.31 pro různé hvězdokupy se místo výskytu nejvíce hvězd odchyloje od hlavní posloupnosti v různém místě. Čím je tento bod obratu na hlavní posloupnosti níže, tím starší je daná hvězdokupa. Takže lze v podstatě velmi jednoduchým fotometrickým pozorováním hvězdokup určovat tak významný údaj, jako je jejich stáří.



Obrázek 15.31: HRD pro různé otevřené hvězdokupy.

Použitá a doplňující literatura

- Argelander F. W. A., 1844, "Aufforderung an Freunde der Astronomie", Schumacher's Jahrbuch 1844, 123-254
 Bessel, F. 1844, MNRAS 6, 136
 Csizmadia, S., Borkovits, T., Paragi, Z., et al. 2009, ApJ 705, 436
 Gaia Collaboration, Babusiaux, C., van Leeuwen, F., et al. 2018, arXiv:1804.09378
 Harmanec P., Horn J., Juza K. 1994, Astron. Astrophys. Suppl. **104**, 121

- Hearnshaw, J. B. 1996, Cambridge University Press
- Herschel, W. 1802, Royal Society of London Philosophical Transactions Series I, 92, 477
- Hertzsprung, E. 1905, Zeitschrift für Wissenschaftliche Photographie, Photophysik und Photochemie, (článek "Zur Strahlung der Sterne"), Vol. 3, No. 2, 429-442
- Hertzsprung, E. 1907, Zeitschrift für Wissenschaftliche Photographie, Photophysik und Photochemie, (článek "Zur Strahlung der Sterne II"), Vol. 5, No. 3, 86-107
- Hertzsprung, E. 1907, Astronomische Nachrichten, 176, 49
- Hertzsprung, E. 1911, Publikationen des Astrophysikalischen Observatoriums zu Potsdam, 63,
- Howell, S.B., 2000, Handbook of CCD astronomy, Cambridge University Press
- Charlier, C. V. L. 1889, Publicationen der Astronomischen Gesellschaft XIX. Leipzig, vyd. W. Engelmann, 1889.
- Janík, J., Mikulášek, Z., 2012, Astronomické pozorování, učební text, Masarykova univerzita
- Johnson, H. L., Morgan, W.W., 1953, ApJ 117, 313
- Kleczek, J., 2002 Velká encyklopedie vesmíru. Academia, Praha
- Kochukhov, O. 2006, A&A, 446, 1051
- Lestrade, J.-F., Preston, R. A., Jones, D. L., et al. 1999, A&A 344, 1014
- Mason, B. D., Wycoff, G. L., Hartkopf, W. I., Douglass, G. G., & Worley, C. E. 2001, AJ 122, 3466
- Michell, J. 1767, Royal Society of London Philosophical Transactions Series I, 57, 234
- Michelson, A. A., & Pease, F. G. 1921, ApJ 53, 249
- Mikulášek, Z., Zejda, M., 2012, Proměnné hvězdy, učební text, Masarykova univerzita
- Monnier, J. D., 2003 Rep. Prog. Phys. 66, 789–857
- Morgan, W. W., & Keenan, P. C. 1973, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 11, 29
- Morgan, W. W., Keenan, P. C., & Kellman, E. 1943, Chicago, Ill., The University of Chicago press [1943]
- Pickering, E. C. 1882, The Sidereal Messenger
- Pickering, E. C. 1883, The Observatory, 6, 79
- Pickering E. Ch., 1890, "On the Spectrum of Zeta Ursae Majoris", American Journal of Science, 3rd Ser., vol. 39, 46-47
- Rosenberg, H. 1910, Astronomische Nachrichten, 186, 71
- Russell, H. N. 1913, The Observatory, 36, 324
- Russell, H. N. 1914a, Popular Astronomy, 22, 275
- Russell, H. N. 1914b, Popular Astronomy, 22, 331
- Savary, F., 1827, "Sur la détermination des orbites que décrivent autour de leur centre de gravité deux étoiles très rapprochées l'une de l'autre" v *Connaissance des Temps*
- Zejda, M., Borovička, J., Hájek, P., et al. 1994, Pozorování proměnných hvězd I, HaP MK Brno
- Zhu, L.-Y., Zejda, M., Mikulášek, Z., et al. 2012, AJ, 144, 37

16 Hvězdy zblízka

16.1 Svítící koule

Ve vesmíru lze nalézt velké množství rozmanitých objektů, které se liší v rozměrech nebo hmotnostech o mnoho řádů. Který z nich vybrat a považovat jej za nejběžnější, za základní objekt makrosvěta?

Základní stavebními prvky alespoň té viditelné hmoty ve vesmíru jsou objekty o hmotnostech v rozmezí několika setin hmotnosti Slunce až řádově $100 M_{\odot}$ ¹. Takové objekty označujeme jako **hvězdy**. Jejich svět je velmi různorodý a na první pohled by nezasvěcenému mohl připomínat svět pohádkový - setkáme se zde totiž s trpaslíky, obry, dokonce i nadobry nebo veleobry. Ve vesmíru se vyskytují jak osamoceně tak ve dvojicích, případně vícenásobných soustavách. Shluky hvězd pak vytváření hvězdokupy a následně galaxie.

Nám nejbližší hvězdou je Slunce, které se také stará o to, abychom ve dne žádnou jinou hvězdu na obloze neviděli. Teprve v noci můžeme pozorovat ostatní hvězdy. Všechny pozorovatelné pouhýma očima patří mezi hvězdy naší Galaxie.

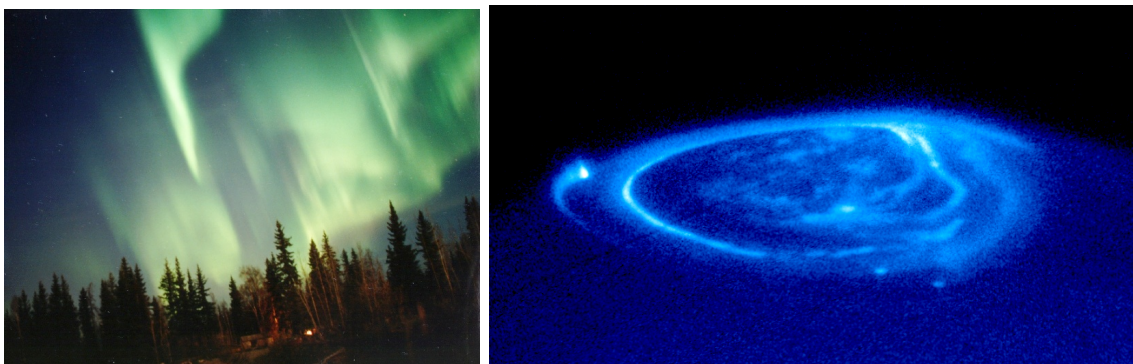
Nejstarší generace řeckých filozofů, například Anaximandros z Milétu v 6. st. př.n.l., považovali hvězdy za útvary stlačeného vzduchu vyplněného ohněm. Motiv centrálního ohně se pak objevuje po řadu století, i když například Anaxagorás z Klazomen v 5. st. př.n.l. považoval Slunce za rozžhavenou kamennou kouli. Ještě na konci 18. století anglický filozof Thomas Wright z Durhamu tvrdil, že hvězdy jsou obří vulkány soptící v temnotách. V té době už ale vznikaly první fyzikální představy o vzniku Slunce a planet. Na počátku 19. století začali astronomové měřit vzdálenosti hvězd, přemýšleli o zdroji energie v jejich nitru. Hvězdy byly stále více chápány jako fyzická tělesa, která je možné měřit a studovat. Konečně v polovině 19. století dostali astronomové do rukou i nástroj, jak zkoumat hvězdy na dálku – spektroskopii. Bylo odhalováno složení povrchových vrstev hvězd, zkoumány rychlosti jejich pohybu vůči Zemi, ale teprve v roce 1925 přišla Cecilia Payne-Gaposchkinová ve své dizertační práci s tvrzením, že většina hvězd je ze tří čtvrtin složena z vodíku. Krátce nato Eddington navrhl jako možný zdroj energie ve Slunci jadernou syntézu vodíku na hélium. V letech 1937-9 se pak Hansi Bethemu a Carlu von Weizsäckerovi podařilo definovat základní jaderné procesy v nitru hvězd. Poznávání hvězd samozřejmě pokračovalo a pokračuje neustále, ale základy byly položeny.

Můžeme tedy konstatovat, že hvězdy jsou objekty zpravidla kulového tvaru² o hmotnostech přibližně $0,03 M_{\odot}$ až řádově $100 M_{\odot}$. Jsou tvořeny plazmatem³, ionizovaným plynem složeným z iontů, elektronů (a případně neutrálních částic, atomů a molekul),

¹Nejhmotnější známá hvězda je R136a1 v galaxii Velké Magellanovo mračno s hmotností $315 M_{\odot}$. V naší Galaxii pak HD 15558A o hmotnosti přibližně $150 M_{\odot}$.

²Nekulový tvar hvězd můžeme najít u složek těsných dvojhvězd a v případě velmi rychle rotujících hvězd.

³Slovo *plazma* pochází z řečtiny, znamená „dávající tvar“ nebo „dávající formu“. V biologickém významu jej pro označení tekutiny vzniklé po odstranění všech částic z krve v polovině 19. století použil Jan Evangelista Purkyně (1787–1869). Pak se skloňuje podle rodu ženského. Ve fyzikálním významu použil termín *plazma* poprvé Irving Langmuir (1881–1957) v roce 1922. Jde o formu látky, o plazmatu se mluví často jako o čtvrtém skupenství hmoty. V tomto případě se používá v češtině rodu středního.



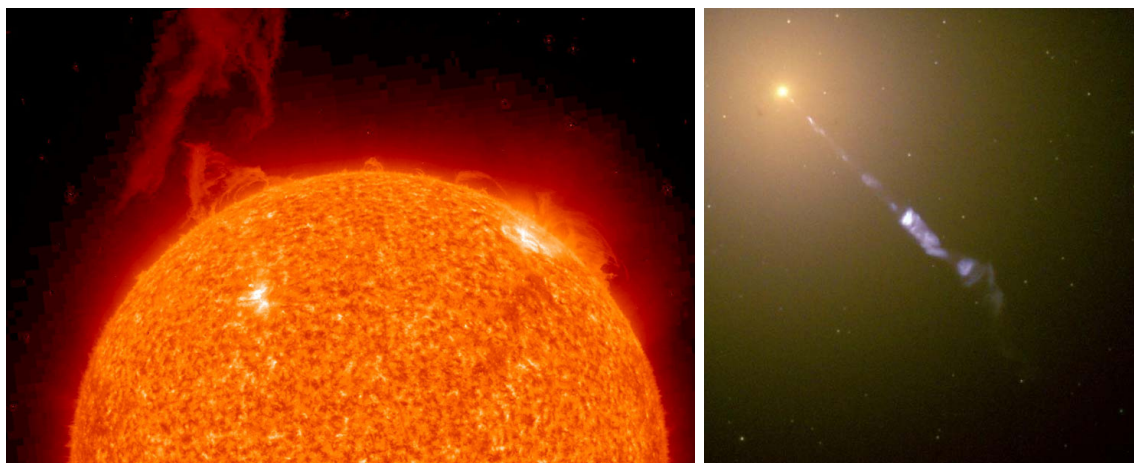
Obrázek 16.1: Vlevo: Polární záře z okolí Fairbanks. Foto: Jan Curtis <http://www.geo.mtu.edu/weather/aurora/images/aurora/jan.curtis/index.html>. Vpravo: Polární záře na Jupiteru z kosmického dalekohledu Hubble Space Telescope v ultrafialovém světle. Bližší popis <http://apod.gsfc.nasa.gov/apod/ap001219.html> Foto: John T. Clarke (U. Michigan), ESA, NASA

který je kvazineutrální a navíc vykazuje kolektivní chování. V plazmatu se nachází volné nosiče náboje, takže je plazma vodivé a reaguje na elektrická a magnetická pole. V makroskopických měřítkách ale obsahuje zhruba stejný počet kladných a záporných nabitých částic, takže se chová podobně jako neutrální tekutina, bez náboje. Kolektivním chováním se pak rozumí, že plazma je schopné jako celek na jednu stranu svými projevy generovat globální elektrická a magnetická pole a na druhou stranu na takováto globální pole reagovat. Jinak řečeno nabitě částice v plazmatu jsou schopny ovlivňovat pohyb dalších nabitých částic na poměrně velkou vzdálenost. Působí na sebe coulombovskými silami, které klesají se čtvercem vzdálenosti ($\sim 1/r^2$). Naproti tomu částice plynu na sebe působí až při těsném přiblížení prakticky v okamžiku srážky. Působící síla je zde nepřímo úměrná r^6 .

Ve hvězdách se setkáváme s plazmatem natolik hustým, že zde často dochází ke srážkám částic. Navenek se pak hvězdné plazma chová jako tekutina (kapalina nebo plyn). V mezihvězdném prostředí nalezneme opačný případ. Plazma je tak řídké, že coulombovské síly mezi jednotlivými nabitými částicemi plazmatu jsou menší než síly vnějšího elektrického a zejména magnetického pole. V naší Sluneční soustavě se setkáte plazmatem ve slunečním větru, v magnetosférách planet, komet, ale zejména ve Slunci.

16.2 Modely hvězd

Hvězd ve vesmíru je obrovské množství. Jen v naší Galaxii jich najdeme asi 100 miliard. Jak už jsme prozradili v minulé kapitole, jde o velmi rozmanitý svět. Pohádkové označení trpaslíků a obrů je zde zcela na místě. Nejmenší hvězdy mají v průměru zhruba desítky kilometrů, ale ty největší nabobtnají až do rozměrů řádově tisíckrát větších než je naše Slunce (tedy až 1,5 miliardy kilometrů). O rozmezí hmotností jsme už mluvili. Je vůbec za těchto podmínek možné jednotným způsobem popsat, co se děje v nitru všech hvězd, vytvořit nějaký konzistentní model hvězdy? Odpověď na takovou otázku je velmi složitá, samozřejmě popsat komplexně děje v nitru všech hvězd není docela dobře možné, jinak

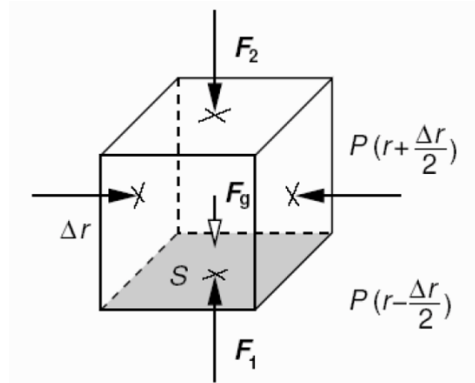


Obrázek 16.2: Vlevo: Sluneční protuberance 26.–27. září 2009. Foto: STEREO Project, NASA. Vpravo: Radiová galaxie M 87 ve viditelném světle a relativistický výtrysk plazmatu. Foto: Hubble Space Telescope (HST)

jsou zařízeny útroby trpaslíka, jinak obra či normální hvězdy. Ve většině případů se bere jako etalon naše Slunce, které je sice mírně nadprůměrnou hvězdou, ale na druhou stranu nejlépe prostudovanou hvězdou.

A jak je to s těmi modely hvězd? Rozhodně tady nemáme na mysli různě barevné koule, jak jsou hvězdy představovány třeba dětem. Modelem zde rozumíme určitou idealizovanou, zjednodušenou představu, případně matematický popis objektu a jeho chování. Můžeme postupovat od nejjednodušších variant modelu až po velmi složité modely popisující i jemné detaily a charakteristiky a zahrnující kdejakou fyzikální vazbu mezi nimi. Výpočet takového modelu pak bude samozřejmě velmi složitý a náročný. Modelování v tomto smyslu se používá v řadě vědních odvětví. V běžném životě se nejvíce setkáváme s modelem předpovědi počasí. V astrofyzice nám modelování umožní studovat nejen současný stav hvězd a jejich vývoj, vznik planetárních soustav, vývoj galaxií, jejich pohyb, srážky ale i vývoj celého vesmíru. Vesměs jde o popis nepřístupných míst a velmi dlouhé děje, které bychom nemohli během lidského života postihnout. Zásadní ovšem je vždy srovnávat modelové výpočty s reálnými daty. To nám může odhalit jak (ne)správnost našeho modelu, tak i vazby a souvislosti, které by jinak zůstaly skryté.

Modelové výpočty pro hvězdy jsou založeny na rovnicích hvězdné stavby, což jsou stavová rovnice, zákon zachování hmoty, rovnice hydrostatické rovnováhy, rovnice tepelné rovnováhy a rovnice přenosu energie. Jejich řešením se však nyní zabývat nebudeme. Podívejme se blíže jen na to, co vlastně udržuje hvězdy takové, jaké jsou. Jinak řečeno zkusme na následujících řádcích odpovědět na otázku: „Proč se hvězdy nezhroutí?“. Z našich představ (samozřejmě podpořených modelovými výpočty) vyplývá, že u hvězd se látka směrem ke středu silně koncentruje. To znamená, že můžeme hvězdy považovat za „hmotné body“. Zejména to platí u obrů a veleobrů. Když je však hmota tak silně



Obrázek 16.3: Objemový element. Převzato z Mikulášek & Krtička (2005).

koncentrována ke středu, proč se do středu nezhroutí veškerá hmota hvězdy? Co jí v tom brání? Obvyklá školácká chyba, kterou však můžeme najít v řadě populárních astronomických knih, je, že hvězdy se nezhroutí proto, že proti gravitační síle působí tlak. Jenže tlak je přece veličina skalární a gravitační síla vektorová, takže **proti gravitační síle působí** nikoli tlak, ale rozdíl, chcete-li **gradient tlaku, tedy vztlaková síla**. Půjdeme-li směrem ke středu hvězdy, bude se zvyšovat teplota, hustota i tlak, což znamená, že na každý objemový element uvnitř hvězdy působí zdola větší tlak než shora. Rozdíl tlaků (vztlaková síla) tak brání, aby gravitační síla stáhla objemový element do středu hvězdy. Na vztlakové síle se podílí dvě složky – tlak plynu a tlak záření. Tlak plynu je dán vzájemnými srážkami částic, z nichž je hvězda složena. Tlak záření si můžeme představit jako tlak fotonového plynu. Pro většinu hvězd je zanedbatelný a uplatní se jen u velmi hmotných hvězd, například u Slunce představuje tlak záření v nejlepším případě jen promile celkového tlaku.

Kdyby ve hvězdě působila jen gravitační síla, materiál hvězdy by se velmi rychle zhroutil. Například u Slunce by kolaps trval jen asi půl hodiny. Naštěstí je tu vztlaková síla, která udržuje hvězdu ve stavu hydrostatické rovnováhy. Zkusme si tento stav popsat matematicky. Představme si, že máme samostatnou, (pro jednoduchost) nerotující hvězdu a v ní elementární objem ve tvaru kvádru s dolní a horní podstavou o ploše S a výšce Δr . Těžiště našeho objemového elementu leží ve vzdálenosti r od středu hvězdy, v místě s hustotou materiálu $\rho(r)$, kde je gravitační zrychlení $\mathbf{g}(r)$. Na elementární kvádr působí gravitační síla \mathbf{F}_g

$$\vec{F}_g = m\vec{g}(r) = \rho(r) S\Delta r\vec{g}(r) = -\rho(r) S\Delta r\vec{g}(r) \frac{\vec{r}}{r}. \quad (16.1)$$

V posledním kroku úpravy se objevilo znaménko minus, protože gravitační síla je opačně orientovaná než polohový vektor \mathbf{r} . Proti gravitační síle působí vztlaková síla \mathbf{F}_t , která

je výslednicí tlakových sil působících na dolní a horní podstavu kvádrů

$$\begin{aligned}\vec{F}_t = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 &= S \left[P \left(r - \frac{\Delta r}{2} \right) - P \left(r + \frac{\Delta r}{2} \right) \right] \frac{\vec{r}}{r} \\ &\cong S \left[P(r) - \frac{dP}{dr} \frac{\Delta r}{2} - P(r) - \frac{dP}{dr} \frac{\Delta r}{2} \right] \frac{\vec{r}}{r}.\end{aligned}\tag{16.2}$$

Po úpravách

$$\vec{F}_t = -S \frac{dP}{dr} \Delta r \frac{\vec{r}}{r}.\tag{16.3}$$

Aby byl zvolený objemový element v klidu, musí být výslednice sil, které na něj působí nulová $\vec{F}_t + \vec{F}_g = \vec{0}$, takže

$$\vec{F}_t + \vec{F}_g = \left(-\frac{dP}{dr} - \rho(r) g(r) \right) S \Delta r \frac{\vec{r}}{r} = \vec{0}.\tag{16.4}$$

Odtud po úpravě dostaneme první rovnici hvězdné stavby, rovnici hydrostatické rovnováhy

$$\frac{dP}{dr} = -\rho(r) g(r).\tag{16.5}$$

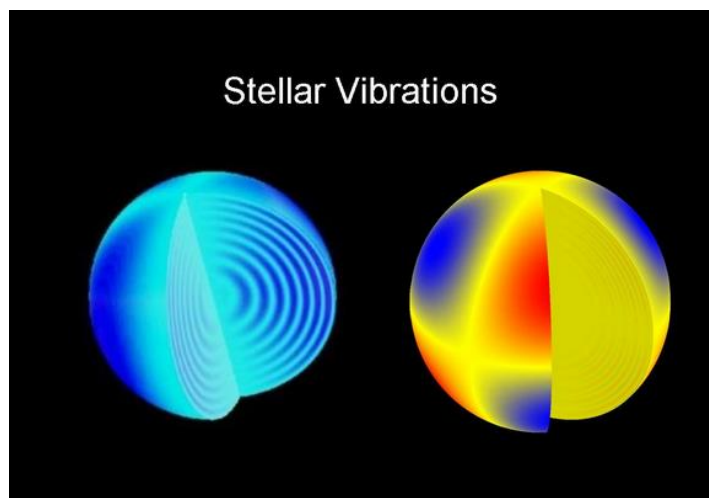
Výsledný vztah platí zcela obecně, tedy pro libovolná statická tělesa nacházející se v obecném gravitačním poli. Rovnice hvězdné stavby a vlastně celé modelování nitra hvězd představuje pro astronoma podobně účinný nástroj při studiu vesmíru jako dalekohled.

16.3 Anatomie hvězdy

Většina hvězd pro nás představuje stále jen zářící body. Jako malé plošky dokážeme rozlišit a zobrazit jen několik málo nejbližších veleobrů. Můžeme tak studovat detaily na jejich "povrchu". Ale ani u mnohem bližší a nejlépe prostudované hvězdy – našeho Slunce se pod zářivou, povrchovou slupku nepodíváme. V principu lze tedy hvězdy rozdělit na dvě části – přímo nepozorovatelné nitro a hvězdnou atmosféru. Předělem je tenká vrstva, odkud k nám přichází záření hvězd. Jde o nejspodnější vrstvu hvězdné atmosféry tzv. fotosféru, která je také považována za "povrch hvězdy". Poloměr hvězdy je tedy dán vzdáleností fotosféry od středu hvězdy.

16.3.1 Nitro hvězdy

Hvězdným nitrem budeme rozumět části hvězdy, které nikdy nemůžeme přímo pozorovat. V roce 1926 Arthur Eddington v publikaci „The Internal Constitution of the Stars“ napsal: „Už na první pohled se zdá, že vnitřek Slunce a hvězd je méně dostupný vědeckému zkoumání než jakákoli jiná oblast vesmíru. Naše dalekohledy mohou zkoumat vzdálenější a vzdálenější hlubiny vesmíru, ale jak lze vůbec získat nějakou povědomost

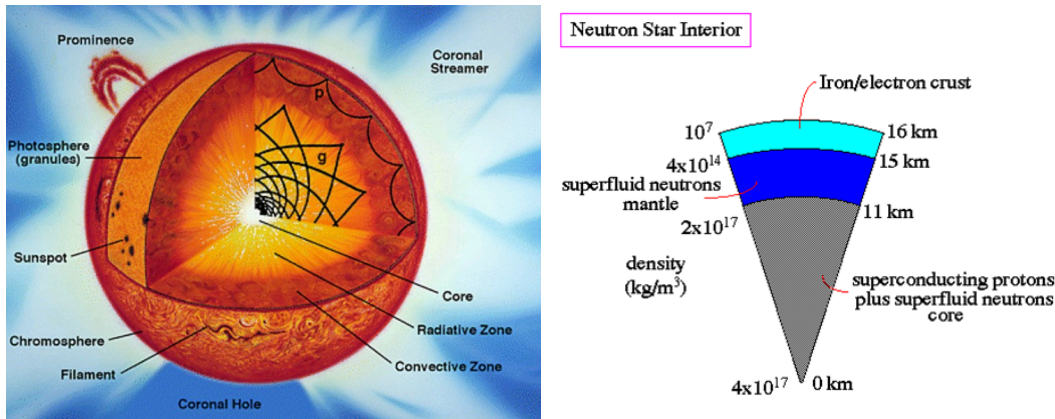


Obrázek 16.4: Změny jasnosti hvězd je možné interpretovat jako vibrace nebo oscilace v jejich nitru užitím techniky zvané asteroseismologie. Oscilace odhalují informace o vnitřní struktuře hvězd, víceméně stejným způsobem jako seismologové používají zemětřesení k poznávání nitra Země. Zdroj: Astroseismologický tým družice Kepler.

o tom, co je skryto pod tak důkladnými překážkami? Jaký přístroj je schopen proniknout svrchními vrstvami hvězdy a zjistit jaké podmínky panují uvnitř?⁴ Je pravda, že z nitra Slunce k nám nepronikne jediný foton. Hmotou hvězdy projdou jen těžko polapitelná neutrina. Nicméně kromě nich a už představeného modelování máme pro studium hvězd ještě přinejmenším jeden nástroj a tím je helioseismologie. Vnitřek Slunce a hvězd můžeme alespoň částečně "vidět" pomocí zvukových vln. Ty proniknou hmotou hvězdy a tak díky nim můžeme zkoumat vnitřní strukturu a dynamiku Slunce. Poprvé zaznamenali zvukové kmity Slunce s charakteristickou periodou 5 minut Leighton et al. (1962). Později se ukázalo, že frekvence pozorovaných oscilací závisí na různých vlastnostech slunečního nitra, na rychlosti zvuku, hustotě materiálu, úhlové rychlosti rotace a dalších. Se stále se zpřesňujícími přístroji pro pozorování hvězd zejména na družicích jako KEPLER, Corot, můžeme nyní tyto drobné oscilace registrovat nejen u Slunce, ale i u dalších hvězd. Obor studia má také širší název asteroseismologie.

Současné výsledky modelových výpočtů a našich pozorování ukazují, že hvězdné nitro vypadá rozdílně pro různé typy hvězd. Na obrázku 16.5 můžete porovnat stavbu hvězdy hlavní posloupnosti podobné Slunci se stavbou neutronové hvězdy. Ty však představují naprosto extrémní případ hvězdy. Podrobněji o nich budeme mluvit v následující kapitole. Obecně nalezneme ve středu každé hvězdy jádro. Pro většinu hvězd platí, že právě v něm se vyrábí energie, která je posléze vyzářena hvězdným povrchem. Teplota v jádru hvězdy dosahuje milionů až miliard kelvinů, což znamená, že vodík a helium jsou zcela ionizovány, a u těžších prvků je ionizace velmi silná. Spolu s vysokou hustotou (řádově 10^4 až 10^9 kg/m³) to vede k tomu, že dochází k častým srážkám částic a hvězdná látka se pak chová jako ideální plyn. V některých fázích hvězdného vývoje se hustota látky

⁴Převzato z kongresových novin Valného shromáždění IAU v Praze 2006 Nuncius Sidereus III. Překlad Michal Varady.



Obrázek 16.5: Vlevo: Nitro hvězdy hlavní posloupnosti. Vpravo: Nitro neutronové hvězdy

ještě zvětší, elektronové skořápky atomů jsou narušeny, částice spolu začnou interagovat i v době mezi vzájemnými srážkami a začnou se uplatňovat efekty kvantové fyziky, látka degeneruje⁵. Nejvýznamnější interakcí se stanou kvantově mechanické efekty působící mezi nejlhčími fermiony – volnými elektrony. Uplatňuje se Pauliho vylučovací princip, který dvěma různým fermionům v soustavě zakazuje zaujmout stejný kvantový stav. Taková látka svými mechanickými, tepelnými a elektrickými vlastnostmi připomíná pozemské kovy, má vysokou hustotu, je obtížně stlačitelná, a je to dokonalý vodič elektriny a tepla. Označujeme ji jako *elektronově degenerovaný plyn*. Setkáme se s ním celkem běžně v jádrech hvězd, která mají už svá nejlepší léta na hlavní posloupnosti za sebou, v nitrech bílých, červených i hnědých trpaslíků a ve svrchních vrstvách neutronových hvězd.⁶

16.3.2 Atmosféra hvězdy

Na rozdíl od nitra hvězdy je vnější obálka hvězdy, její atmosféra, přístupná našemu pozorování. Nejlépe prostudovanou hvězdnou atmosférou je samozřejmě atmosféra našeho Slunce. Atmosféry ostatních hvězd můžeme studovat ze spektroskopických nebo fotometrických pozorování, případně pomocí modelů hvězdného větru. Nejvíce nám o sobě hvězda prozradí, pokud se její jasnost mění. Z pozorování lze určovat teplotu, hustotu, tlak a složení atmosfér, přítomnost magnetického pole, ale také horkých a chladných skvrn a další vlastnosti. Jak již bylo uvedeno v kapitole o spektroskopii, spodní husté a horké vrstvy atmosféry, zejména fotosféry, vytvářejí ve spektru tzv. kontinuum. Chladnější a řidší materiál nad touto vrstvou způsobí, že se ve spektru objeví temné absorpční čáry. Naopak teplejší útvary mají za následek přítomnost jasných emisních čar. Lze tedy studovat i průběh teplot v atmosféře hvězd. U Slunce máme navíc ještě možnost přímého odběru vzorků slunečního větru a jeho analýzy.

⁵Latinsky *degenerare* znamená upadat, zvrtnout se, pozbývat dobrých vlastností.

⁶Tlak elektronově degenerovaného plynu na rozdíl od ideálního plynu velmi silně závisí na koncentraci volných elektronů, tedy na hustotě a jen minimálně na teplotě $p_{\text{eldeg}} \sim \rho^{5/3}$.

Obecně rozlišujeme v atmosférách hvězd tři vrstvy. Nejnižší je uložena **fotosféra**, v níž vznikají fotony, které pozorujeme. Tam vzniká optické spektrum hvězdy a tam pokládáme povrch hvězdy. Fotosféry různých typů hvězd mají různou tloušťku i různou teplotu. Zatímco naše Slunce má fotosféru 135-200 km silnou, u obrů a veleobrů dosahuje až řádově poloměrů Slunce a naopak pro bílé trpaslíky má řádově jen několik metrů. V ještě větším rozpětí se mění hustoty fotosféry. Pro bílého trpaslíka je to zhruba $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, ale u Slunce už jen $3\cdot 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, což odpovídá hustotě zemské atmosféry ve výšce asi 60 km nad hladinou moře, a pro veleobry bychom museli ještě několik řádů ubrat. Teplota fotosféry směrem od středu hvězdy klesá. Pro Slunce jde o pokles necelých 3000 kelvinů na zhruba 200 km. Důkazem takového průběhu teploty je i pozorované okrajové ztemnění disku hvězd. Celá fotosféra hvězdy je ve stavu energetické rovnováhy. V ustáleném stavu musí projít touto vrstvou v každém okamžiku právě tolik tepla, kolik ho uvnitř koule pod fotosférou vznikne.

Fotosféra přechází v **chromosféru**, která je několikrát silnější. Teplotní spád se zde otáčí a teplota se vzrůstající vzdáleností od povrchu mírně roste. U Slunce jde o nárůst zhruba 20 000 kelvinů na 2 000 km tloušťky vrstvy. Z toho ale vyplývá, že zde vznikají zejména emisní čáry spektra, zejména nejsilnější Fraunhoferovy čáry (u hvězd spektrální třídy M).

Nejsvrchnější vrstvou hvězdné atmosféry je **koróna**. Její hustota je už velmi malá. Tloušťka koróny se například u Slunce udává až 10^6 km, ale není zde žádné hranice. Koróna v podstatě volně přechází do hvězdného větru v okolohvězdném prostoru. I zde podobně jako ve chromosféře je chod teploty obrácený a se vzrůstající vzdáleností od hvězdy roste. U Slunce dosahuje až jednoho milionu kelvinů, takže je zdrojem rentgenového záření hvězd. Nicméně její zářivý výkon je ve srovnání s fotosférou malý.

16.4 Proč hvězdy září?

Doposud jsme se stále zabývali otázkou, z čeho jsou hvězdy složeny, jaká je jejich stavba. Ale pomíjeli jsme zásadní otázku: „Proč vlastně hvězdy září?“. Někdo možná začne spekulovat o tom, co se děje v nitru hvězd, ale odpověď na položenou otázku je velmi prostá. Lakonicky se dá říci, že *hvězdy září proto, že jsou žhavé!* Samozřejmě ruku v ruce s takovou odpovědí přichází další otázka: „A proč jsou žhavé.“ Teď už je zcela na místě zabývat se otázkou, co vlastně zahřívá hvězdy a zejména jejich nitro. Zdroj energie musí být tak vydatný, že hvězdu nejen vyhřeje na vysokou teplotu, ale tuto teplotu také udržuje po poměrnou dlouhou dobu navzdory tomu, že fotosférou odchází z hvězdy obrovské množství energie. Kdyby fotosféra nebyla tajně „sponzorována“ zevnitř hvězdy, brzy by se na ní výdej energie projevil, ale nic takového u hvězd nepozorujeme. Takže skrytý dárce energie musí být opravdu dost „bohatý“.

V minulosti byla předložena řada teorií vysvětlující zdroj energie hvězd. V antice se například Anaximandros domníval, že naše Slunce je dobřela rozhavený železný kotouč. To ale odpovídalo jen na otázku, co Slunce je, ale ne, kde vzalo svou energii. Až v polovině 19. století navrhli nezávisle přírodovědec Helmholtz (1854) s astronomem J. Herschelem jako zdroj energie hvězd chemické hoření. Astronom amatér J. Mayer (1846) se domníval, že Slunce je dotováno dopady meteoritů. A objevila se i hypotéza, že spotřeba energie hvězd je kryta jejich smršťováním, tedy na úkor potenciální energie.

S touto myšlenkou přišli Helmholtz s lordem Kelvinem. Dá se velmi rychle ukázat, že bohužel ani jedna z představ není správná. Žádná z nich neposkytuje dostatek energie po dostatečně dlouhou dobu. Posledně uvedenou teorii gravitačního smršťování ale alespoň částečně můžeme omilostnit, protože v určitých fázích vývoje hvězdy se o přísun energie skutečně stará. Pátrání po zdroji energie tedy pokračovalo. Na počátku 20. století se objevil názor, že ve hvězdách dochází k rozpadu uranu ^{235}U . Jenže v roce 1925 Paynová-Gaposchkinová prokázala, že hvězdy se skládají ze tří čtvrtin z vodíku a později se ukázalo, že zbývající čtvrtina připadá takřka celá na hélium. Uran je velmi těžký prvek a ve Slunci i dalších hvězdách je ho žalostně málo. Nicméně právě Paynová-Gaposchkinová a její práce byla prvním krokem správným směrem. Eddington sice už po úspěšných pokusech Rutherforda v roce 1919, při nichž se podařilo uskutečnit první umělou přeměnu atomu, tušil, že zdrojem energie ve hvězdách by mohly být jaderné reakce – nikoli štěpení těžkých prvků, ale naopak syntéza těch nejlehčích, tedy zejména vodíku. Jenže až Paynová-Gaposchkinová prokázala, že jaderného paliva – vodíku je ve hvězdách dostatek. Ve 30. letech minulého století už byla hypotéza jaderné syntézy v jádru hvězd všeobecně akceptována. Jak ale takový proces probíhá u hvězd jako Slunce a hmotnějších, popsali v letech 1937-9 Hans Bethe a Carl von Weizsäcker. K reakcím dochází jen v místě s opravdu vysokou teplotou, tedy v bezprostředním okolí středu hvězdy, v samém jádru. Pro Slunce tvoří oblast jaderného hoření jen zhruba jedno procento objemu.

Hlavním zdrojem energie hvězd je tedy jaderné hoření, ale spíš bychom měli asi říkat „jaderné doutnání“ v centrálních oblastech. Ale je-li relativně malý zdroj uložen hluboko v nitru hvězdy, znamená to, že se energie z něj musí nějak dostávat na povrch - až do fotosféry. Z toho jednak vyplývá existence teplotního spádu s rostoucí vzdáleností od centra hvězdy a jednak stav energetické rovnováhy fotosféry, která musí zvládnout odvést veškerou dodanou energii do okolního prostoru. Jenže ten pohled lze i otočit, vrstvy hvězd pod fotosférou jsou vlastně dokonalými izolanty, které v samém středu ukrývají dokonale seřízený atomový reaktor. Po miliardy let se v něm mění podmínky jen nepatrně. Rychlost jaderných reakcí je silně závislá na teplotě. Když se například výkon reaktoru malinko zvýší, oblast hoření se rozepne a mírně ochladí, což vede ke snížení výkonu a návratu teploty na rovnovážnou hodnotu. Takto se uvnitř hvězd udržuje teplota s přesností na tisíce stupně a to při teplotách řádově milióny až desítky miliónů kelvinů. O tak přesné regulaci si mohou „nechat zdát“ všechny termoventily ústředního topení.

Na první pohled to vypadá, že jaderné reakce v nitru hvězd jsou vysoce účinnými zdroji energie, ale není to pravda. Účinnost reakcí při hoření vodíku je dokonce velmi malá. Běžná elektrická kamínka mají měrný výkon miliónkrát větší než je účinnost jaderných kamen v centru Slunce. Přesto se lidé snaží i tento typ jaderných reakcí ovládnout. Člověk zatím využívá štěpení těžších prvků na lehčí ať již nekontrolované v podobě jaderných výbuchů bomb nebo kontrolované v jaderných reaktorech elektráren. Ve hvězdách jde ale o syntézu lehčích jader atomů, při níž vznikají těžší atomy. Předpokládá se, že zvládnutí jaderné syntézy by mohlo vést k řešení energetických potřeb naší civilizace. A to je také jeden z důvodů, proč je dotován astronomický výzkum spolu s výzkumy jaderných fyziků, tedy dvě odvětví, která používají největší a nejdražší vědecké přístroje současnosti.

Dobrá, jak vypadají reakce v nitru hvězd, snad víme. V čem je tedy problém? Proč není možné tyto reakce prostě napodobit? Odpověď je zřejmá. Podmínkou pro průběh jaderné syntézy je vysoká teplota a velký tlak, což znamená, že jádra prvků se pohybují velkými rychlostmi a protože je jich tam velké množství, prudce do sebe narážejí. Vysoká kinetická energie částic je nezbytná pro překonání elektrostatických sil, které jádra odpuzují. A vytvoření takových podmínek po delší dobu v nějakém zařízení na Zemi představuje opravdu problém. Zatím se daří na srovnatelné rychlosti urychlit jednotlivé částice nebo svazky částic, ale nikoli uzavřít tak horké plazma v malém objemu na dobu delší než zlomky sekundy. Pokud bychom i podobných jaderných reakcí jako v nitru hvězd dosáhli, je potřeba je jednak spolehlivě řídit a jednak izolovat od okolí a bránit tak rychlému vychladnutí. Zdá se, že vhodnou cestou pro napodobení podmínek v nitru hvězd je vysoce výkonný laser, urychlovač a magnetická past. Česká republika k tomuto výzkumu přispívá účastí na výzkumu v evropském středisku jaderného výzkumu v CERN ve Švýcarsku nebo v projektu HiPER ale i vybudováním dalšího evropského centra, které obsahovat nejvýkonnější laser světa ELI (Extreme Light Infrastructure) v Dolních Břežanech u Prahy.⁷ Výsledky ELI se budou doplňovat s výsledky výzkumného laserového zařízení projektu HiPER (High Power Energy Research Facility) ve Velké Británii. Oba projekty mají zkoumat zcela novou technologii, která by měla být v budoucnu použita pro výrobu elektrické energie, tzv. termojadernou fúzi zažehávanou lasery. Laserové pulsy při tom stlačí palivo (deuterium a tritium) na extrémní hustotu a laser je pak ohřeje až na teplotu fúze zhruba 100 miliónů kelvinů. Jenže takové podmínky vydrží zatím jen po několik tisíc nanosekund.

16.5 Jaderné reakce v nitru hvězd

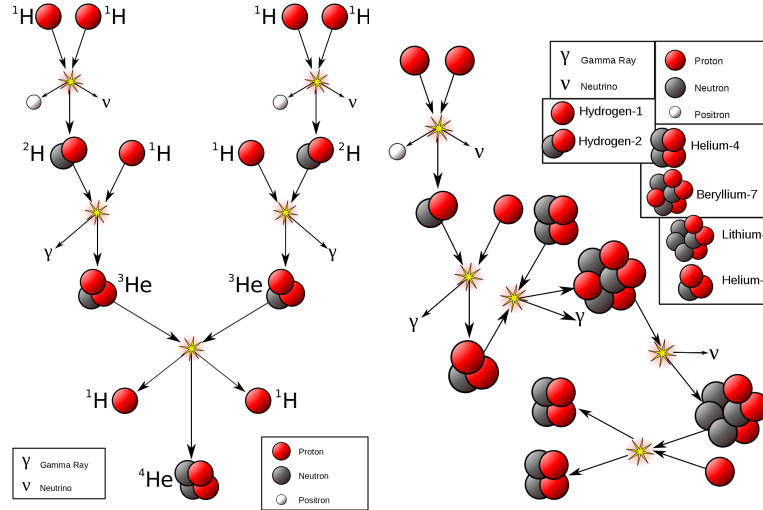
Jaderné hoření v samém srdci hvězdy má spíše charakter doutnání, jak jsme již uvedli. Navíc, kdybychom vzali, že například Slunce jako celek o hmotnosti 2.10^{30} kg produkuje zářivý výkon 4.10^{26} W, snadno zjistíme, že na jeden kilogram sluneční hmoty připadá výkon jen 0.0002 W! Přitom spálením jednoho kilogramu dřeva lze uvolnit přes 10 MJ energie. Teoreticky bychom tedy reakce v nitru Slunce mohli nahradit spalováním dostatečného množství nějakých věcí. Jenže tak jednoduché to zase není. Je tu ale přece jen zásadní rozdíl. Hvězdy umí své palivo spalovat po miliardy let! Každý kilogram Slunce tak vyprodukuje za dobu existence naší mateřské hvězdy odhadem 60 terajoulů energie. Jen jediný proces, pokud víme, je schopen produkovat energii tím nepříliš výkonným a pomalým, ale stabilním a dlouhodobým způsobem – jaderná fúze.

16.5.1 Proton-protonový řetězec (p-p řetězec)

Jaderná fúze v nitru hvězd znamená, že dochází ke slučování několika jader lehčích prvků na jádra těžších prvků. Přitom součet hmotností lehčích jader je větší než hmotnost těžšího jádra, které z nich vzniklo. Hmota se samozřejmě nikam neztratila, ale podle Einsteinova vztahu ekvivalence hmotnosti a energie $E = mc^2$ se přemění na energii, která je při reakci uvolněna. Způsobů provedení jaderné fúze si příroda zvolila hned několik. Nejjednodušší je přeměna vodíku na hélium. Nedochozí k ní při jediné reakci.

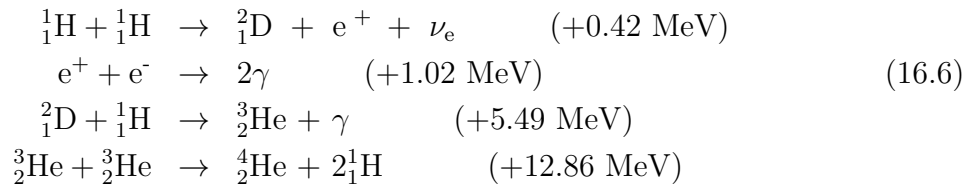
⁷Projekt ELI má být spuštěn v roce 2018. Detaily na <http://www.eli-beams.eu/>.

Jaderná fúze je výsledkem sledu reakcí, které probíhají každá různou rychlostí a s různou pravděpodobností podle částic, které do dané reakce vstupují.



Obrázek 16.6: Proton-protonový řetězec. Základní varianta je zobrazena vlevo. Zdroj: wikipedia.

Pro hvězdy s hmotností do přibližně $1.3 M_{\odot}$ až $1.7 M_{\odot}$ ⁸ probíhá jaderná fúze v jejich nitru v podobě proton-protonové řetězce⁹, kdy se 4 protony (jádra vodíku) sloučí na 2 protony a 2 neutrony a vytvoří jedno jádro hélia a uvolní přitom energii v podobě fotonu, pozitronu a neutrina. Reakce ale probíhá ve třech krocích:

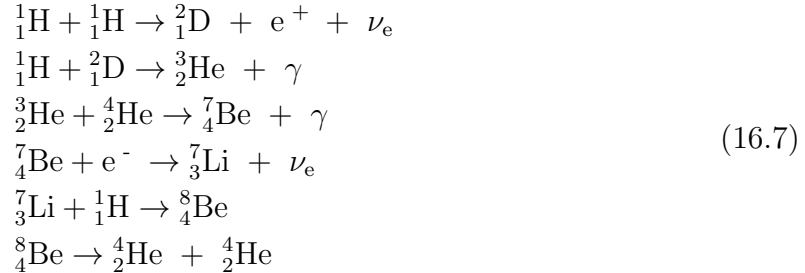


Pozitron vzešlý z první reakce ale okamžitě anihiluje s elektronem (viz 16.6) a vzniknou dva vysoce energetické fotony gama záření. Neutrino s hmotou nereaguje a bez obtíží unikne z místa vzniku do kosmického prostoru. První reakce je velmi pomalá, má malou pravděpodobnost. Dvě vodíková jádra čekají zhruba jednu miliardu let, než dojde k jejich fúzi. Druhá reakce, sloučení protonu s deuteriem, je naproti tomu velmi rychlá, běžně postačí jedna sekunda. Třetí reakce, například v podobě uvedené výše, potřebuje k realizaci přibližně milión let. Nicméně možnost, jak z izotopu hélia ${}^3\text{He}$ získat hélium ${}^4\text{He}$, je více. V každém případě tato reakce musí pro vznik jednoho héliového jádra proběhnout dvakrát.

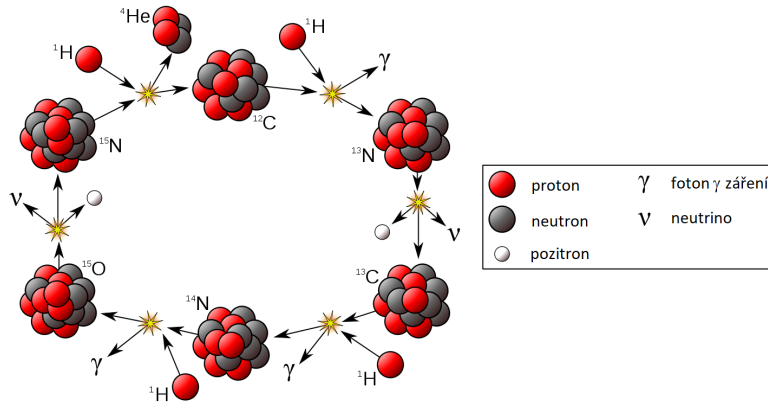
⁸Neurčitost vyplývá z odlišných výpočtu modelů popisujících nitro hvězd.

⁹Poprvé se myšlenka jaderné syntézy v nejjednodušší podobě objevila v pracích Eddingtona (1920, 1926). Jeho odpůrci namítali, že hvězdy nejsou dost horké na to, aby částice překonaly Coulombovské bariéry a mohlo k syntéze dojít. Teprve po rozvinutí kvantové fyziky se ukázalo, že díky tunelovému jevu je podobná námitka neopodstatněná. Přesný průběh reakcí popsali Atkinson s Houtermansem (1929).

V centru našeho Slunce takto probíhají přibližně dvě třetiny reakcí, další třetina probíhá trochu složitějším způsobem.



Celková energie uvolněná při proton-protonovém řetězci je závislá na hustotě materiálu a jeho teplotě, přesněji mocnině teploty. Zpravidla se udává $E \sim \rho T^4$, ale exponent někdy může dosáhnout až 5 nebo 6. Jeho skutečná hodnota závisí na teplotě. Podle modelových výpočtů je účinnost proton-protonového řetězce nejvyšší při teplotě pod $20 \cdot 10^6$ K. Ještě citlivější na teplotu je uhlíkový cyklus. Nicméně proton-protonový cyklus se vyskytuje v nitru hvězd s hmotností do $1.3\text{--}1.7 M_\odot$ a to je naprostá většina hvězd.



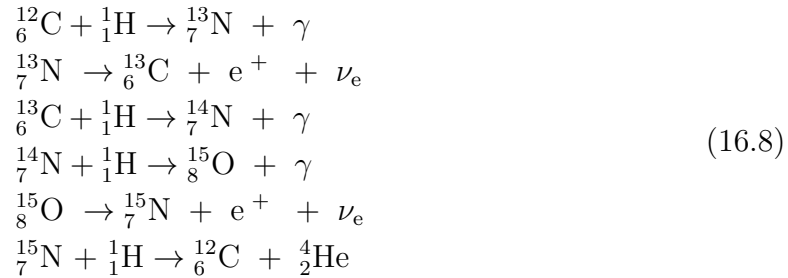
Obrázek 16.7: CNO cyklus. Zdroj: wikipedia.

16.5.2 CNO (uhlíkový) cyklus

Nadprůměrné hvězdy, větší než naše Slunce, mají k dispozici nejen proton-protonový řetězec. Od vodíku k heliu vede i jiná cesta, s pomocí katalyzátorů uhlíku, dusíku a kyslíku, tzv. uhlíkový nebo také CNO cyklus. Jeho průběh popsali von Weizsäcker (1937, 1938) a Bethe (1939), jen několik let po objevu neutronu. Zatímco pro rozběhnutí proton-protonového řetězce stačí teplota zhruba čtyř miliónů kelvinů, CNO cyklus se může spustit až při 15 miliónech kelvinů. Produkce energie i zde závisí na hustotě a mocnině teploty, ale teplotní závislost je mnohem prudší $E \sim \rho T^{18}$, přičemž exponent se u teploty může měnit dle teploty a použitého modelu v rozmezí hodnot 15-18. Z toho vyplývá, že už při teplotě $17 \cdot 10^6$ K se CNO cyklus stává majoritním zdrojem energie hvězdy. Naše Slunce má teplotu jádra něco málo přes 15 miliónů kelvinů. CNO cyklus

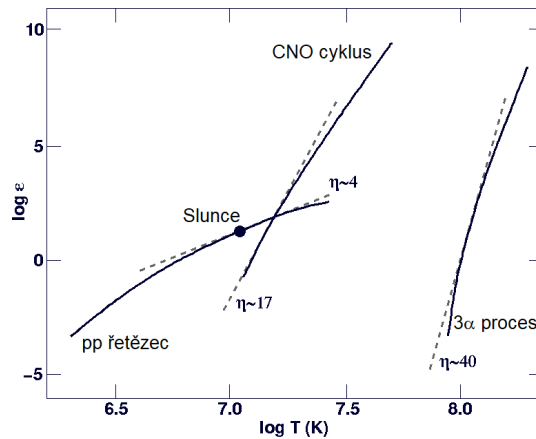
v něm tedy může probíhat, ale dle modelů jen necelá dvě procenta slunečních jader hélia je výsledkem CNO cyklu. V průběhu pobytu hvězdy na hlavní posloupnosti se její centrální teplota zvolna zvyšuje a s tím roste i podíl CNO cyklu na produkci energie hvězdy. U hvězd spektrální třídy *F* se například proton-protonový řetězec a CNO cyklus podílejí na celkové produkci energie hvězdy zhruba stejným dílem.

Podobně jako u proton-protonového řetězce vedou k cíli různé cesty, zde navíc s použitím různých katalyzátorů, i zde se jednoduše řečeno přemění čtyři protony na jedno jádro hélia.

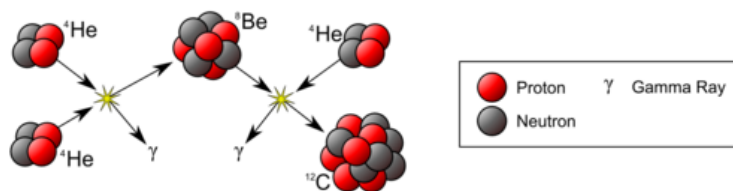


16.5.3 3α proces

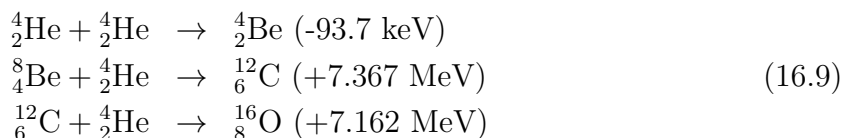
Hvězdy během svého pobytu na hlavní posloupnosti spalují vodík a vzniká hélium. Pokud jsou dostatečně hmotné, dosáhne za jistých okolností centrální teplota po opuštění hlavní posloupnosti řádově až 100 milionů kelvinů. Pak je možné zapálení dalšího typu jaderných reakcí v nitru. Spustí se 3α reakce, někdy také označovaná Salpeterův proces. Při něm vzniká ze tří héliových jader (α částic) atom uhlíku a gama záření. Za teploty 10^8 K mají héliová jádra dostatečnou energii, aby překonala Coulombovskou bariéru. Dvě α částice se spojí a s přispěním malého množství energie utvoří jádro berylia. Jde tedy o endogenní reakci, kterou je třeba energeticky dotovat. Nicméně jádro berylia



Obrázek 16.8: Míra produkce energie na jednotku hmoty za jednotku času při hoření vodíku a hélia v závislosti na teplotě. V určitém intervalu teplot můžeme skutečnou závislost aproximovat mocninnou křivkou naznačenou v obrázku. $\varepsilon \sim T^\eta$, kde T je teplota v místě hoření. Převzato z <http://www.vikdhillon.staff.shef.ac.uk> a upraveno.

Obrázek 16.9: 3α cyklus. Zdroj: wikipedia.

je nestabilní a během zlomku sekundy se opět rozpadá. Reakce, která vede ke vzniku beryliových jader je však dostatečně rychlá, aby v nitru hvězdy bylo vždy dostatek berylia a Salpeterův proces mohl pokračovat spojením jádra berylia s dalším jádrem hélia. Vzniká stabilní atom uhlíku a uvolní se i kvantum γ záření. Jako vedlejší efekt může docházet i k další reakci, při níž z atomů uhlíku a hélia vzniká stabilní izotop kyslíku, opět s emisí γ záření. Pokud jsou v nitru hvězdy příhodné podmínky, tedy zejména, pokud je hvězda na počátku dostatečně hmotná, pokračuje řetězec jaderných α reakcí dále až po nikl a železo.



3α proces je sice velice nepravděpodobný, ale uhlík ve vesmíru je. Je tu i život na bázi uhlíku a víme, že uhlík nemohl vzniknout při Velkém třesku. Jenže situace není tak beznadějná. Základní stav berylia má skoro přesně stejnou energii jako dvě héliová jádra a podobně i součet energie berylia a třetí alfa částice se takřka shoduje s energií uhlíku. A právě tato rezonance významně zvyšuje pravděpodobnost Salpeterova procesu. Spalování hélia ale neprobíhá tak poklidně jako předcházející syntéza vodíku. Pro hvězdy o hmotnosti přibližně $2.25 M_{\odot}$ dojde po spálení vodíku v jádru k elektronové degeneraci materiálu jádra. Zapálení Salpeterova procesu pak vede k okamžitému sejmutí degenerace a spálení většiny (60 až 80 %) hélia během několika sekund. U hvězdy dojde k tak zvanému héliovému záblesku. Obecně se tedy Salpeterovy reakce spouští při teplotách řádově stovky miliónů kelvinů a vyprodukované množství energie je úměrné $\sim 10^{30}$ J.

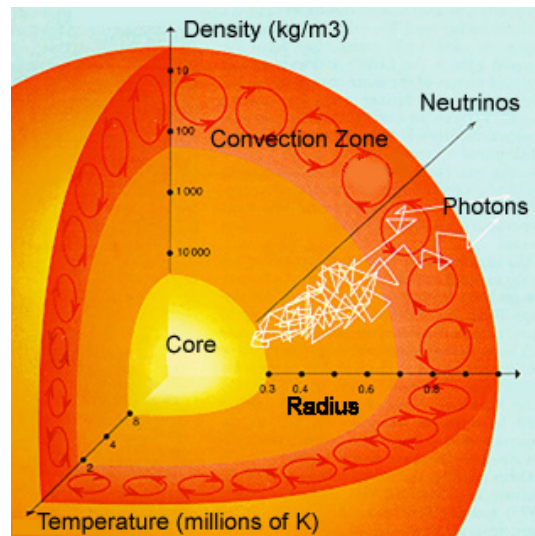
Historie objevu 3α reakcí odpovídá tak trochu překotnosti jejich průběhu. Syntézu uhlíku ze tří jader hélia popsali Öpik (1951) a Salpeter (1952, 2002). Teprve Hoyle (1954) ale našel způsob, jak mohou takové reakce probíhat za dostatečně krátkou dobu. Objevil přitom zvláštní excitovaný stav jádra uhlíku, který Fowler¹⁰ s kolegy experimentálně prokázal (Cook et al., 1957). Pak už se podařilo kolektivu z Kellogg Radiation Laboratory (Kalifornský technologický institut) poměrně rychle odhalit celou síť jaderných reakcí, kterými se v nitru hvězd syntetizují všechny prvky až po železo (Burbidge, Fowler a Hoyle, 1957). Jedna nejasnost v procesech jaderné syntézy ale přetrvala až do 21. století. Teprve nedávno se podařilo skupině německých fyziků Epelbaum et al. (2011) Hoyleův stav jádra atomu uhlíku popsat matematicky. Výpočet na superpočítači trval týden, ale výsledky výpočtu jsou ve skvělé shodě s experimenty.

¹⁰Jedná se amerického astrofyzika Williama Alfreda "Willy" Fowlera, nositele Nobelovy ceny za fyziku v roce 1983. Nezaměňovat s britským astronomem Alfredem Fowlerem.

16.6 Přenos tepla

V předchozí kapitole jsme popsali reakce probíhající v samém nitru hvězd. Tyto reakce jaderné syntézy jsou hlavním zdrojem energie hvězdy. Rozhodujícím parametrem pro jejich „nasazení“ je teplota. Ta také výrazně ovlivňuje energetickou výtěžnost spuštěných reakcí, což znamená, že se tyto reakce budou spouštět a odehrávat jen v místech s nejvyšší teplotou a tedy zejména v centrálních oblastech. Vyrobenou energii je pak nutné přenést z nitra hvězdy na povrch a odeslat do kosmického prostoru, což nutně vede ke vzniku teplotního spádu uvnitř hvězdy. Přenos energie ve hvězdě je realizován v podstatě čtyřmi způsoby:

- zářením,
- prouděním,
- vedením,
- zářením neutrin.



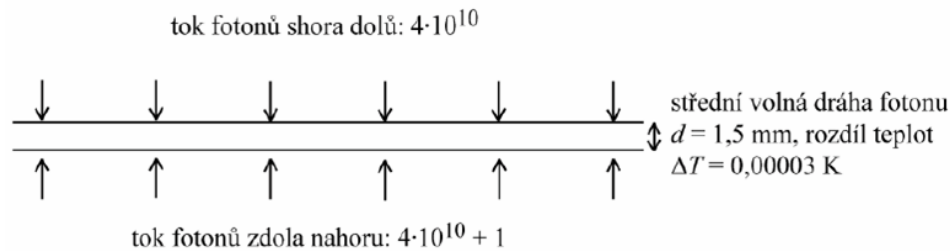
Obrázek 16.10: Vnitřní stavba hvězdy slunečního typu. Mezi jádrem a konvektivní vrstvou se energie přenáší zářením, fotony. Zdroj: Center for Science Education, přes <http://teller.dnp.fmph.uniba.sk/jeskovsky>

16.6.1 Přenos energie zářením (zářivou difúzí)

Při jaderných reakcích v nitru hvězd vznikají fotony γ záření, které odnášejí energii z centra hvězdy. Přenos energie probíhá zářením neboli zářivou difúzí. Jenže, kdo by očekával, že takový foton prostě nabere správný směr a při rychlosti světla zanedlouho opustí hvězdu a vydá se do kosmického prostoru, ten by se šeredně mýlil. Zářivá difúze takto funguje se stoprocentní účinností jen v prázdném kosmickém prostoru. Nitro hvězd ale prázdné není. Fotonům v cestě brání materiál hvězdy a tak je jeho střední volná dráha řádově jen velmi krátká, ve Slunci řádově jen několik milimetrů. Foton je zachycen

elektronem, vzápětí opět vyzářen, ale už nikoli v původním směru. Fotony tak vykonávají značně neuspořádaný pohyb (viz obr. 16.10). Směr ven z hvězdy však převládá, například v polovině vzdálenosti od středu Slunce k povrchu připadá na $4 \cdot 10^{10}$ částic pohybujících se směrem k centru $4 \cdot 10^{10} + 1$ částic směřujících ven z hvězdy (viz obr. 16.11). Přitom na vzdálenosti odpovídající střední volné dráze fotonu v této vzdálenosti od středu Slunce je teplotní gradient $0.000\,03$ K. Blíže k centru, v teplejších oblastech je vždy fotonů více a mají vyšší energii. Na povrch hvězdy nebo do oblastí, kde se začne uplatňovat přenos energie konvekcí se tak dostává méně fotonů a ty už navíc nejsou vysokoenergetické. Maximum vyzařované energie se přesunulo z oblasti γ záření do vizuální oblasti spektra. Celý proces přenosu energie zářivou difúzí je ale velmi pomalý.

příklad: nitro Slunce, vzdálenost $r = 0,5 R_{\odot}$, teplota $T = 3,5 \cdot 10^6$ K



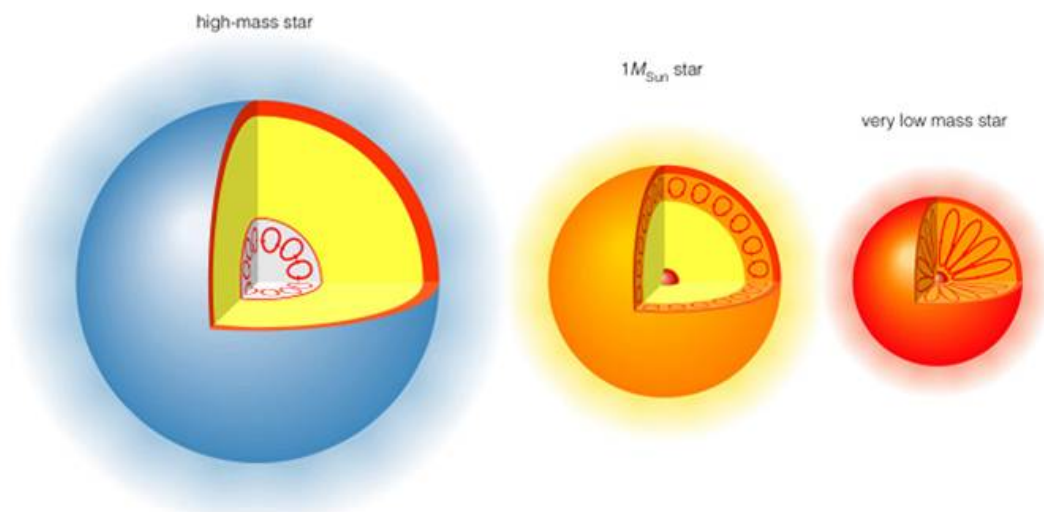
Obrázek 16.11: Přenos energie zářením.

16.6.2 Konvekce

Ve většině běžných hvězd je energie z nitra přenášena zářivou difúzí. Někdy je ale produkce energie ve hvězdě příliš velká nebo probíhá ve velmi malém objemu, takže fotony nestačí vyrobenou energii odnášet pryč. Materiál hvězdy se pak nahřeje a začne „vřít“, začne se chovat jako vroucí voda, v níž směrem vzhůru se pohybuje horký, ohřátý materiál, na hladině se ochladí a pak klesá směrem dolů. Konvekce¹¹ ve hvězdě vypadá obdobně. Konvekce je poměrně efektivní způsob přenosu energie, protože se děje v přímém směru. Proudů teplého plazmatu stoupají vzhůru k fotosféře hvězdy a po ochlazení vyzářením opět klesají dolů, směrem ke středu hvězdy.

Ke vzniku konvekce v nitru hvězdy je zapotřebí splnění určitých podmínek. Prouděním se bude přenášet energie z nitra hvězdy na povrch, pokud je materiál hvězdy příliš neprůhledný, má vysokou opacitu. To platí vesměs pro hvězdy s hmotností pod $1.5 M_{\odot}$. Díky konvekci je u těchto menších hvězd zajištěna i dodávka čerstvého materiálu do místa jaderného hoření. Konvekce důkladně promíchává celou hvězdu. Je-li ve větší hvězdě zdroj energie ve velmi malém objemu, nestačí malý povrch odvádět vyrobené teplo. Směrem od tohoto energetického centra vzniká prudký teplotní spád, který vede ke spuštění konvekce. Hloubka konvektivní vrstvy pod fotosférou přitom závisí na hmotnosti hvězdy. Čím je hvězda méně hmotná, tím je konvektivní vrstva silnější (viz obrázek 16.12). U Slunce je konvektivní vrstva silná asi 200 000 kilometrů, takže je konvekcí

¹¹Slovo „konvekce“ je odvozeno z latinského *convehere*, což znamená dovážet, svážet, *convectio* pak znamená přívod.



Obrázek 16.12: Přenos energie konvekcí.

ovlivněno asi 70 % hmoty. Vrcholky výstupných konvektivních proudů můžeme dokonce pozorovat ve sluneční fotosféře v podobě tzv. *granulace*.

16.6.3 Přenos tepla vedením

Vedení neboli kondukce je způsob, jakým se přenáší teplo zejména v kovech. U většiny hvězd se s kondukcí nesetkáme. Důvod je jednoduchý. Materiál běžných hvězd se chová přibližně jako ideální plyn a má dobré tepelně-izolační vlastnosti. Během vývoje hvězd ale dochází k situacím, že je materiál velmi silně stlačen a dochází k jeho degeneraci. Bílí trpaslíci, neutronové hvězdy nebo jádra velmi hmotných hvězd se pak chovají jako kovy s volnými elektrony, které mohou teplo přenášet. Materiál hvězd se stane velmi dobrým vodičem tepla. Jenže k takovým situacím dochází až na konci hvězdného vývoje, kdy hvězda nemá jaderný zdroj energie a nedochází ani k jejímu smršťování. Veškeré výdaje energie hvězdy jsou poté hrazeny ze zásob. Jinak řečeno, hvězda velmi zvolna chladne. U bílého trpaslíka může takový proces chladnutí trvat až desítky miliard let. Důvod je zřejmý – relativně velmi malý povrch hvězdy.

16.6.4 Proud neutrin

Zpravidla se udávají tři způsoby přenosu energie ve hvězdách. Často se totiž zapomíná na proud neutrin. Neutrína proudí i z našeho Slunce, ale jejich role z hlediska přenosu energie nabývá na významu zejména v pozdních stádiích života velmi hmotných hvězd, kdy je třeba přenést více energie než je možné pomocí fotonů nebo konvekcí. Tehdy je do prostoru mimo hvězdu přeneseno velké množství energie právě prostřednictvím záření neutrin. Takový přenos energie představuje dominantní metodu ochlazování masivních hvězd v pokročilých stádiích jaderného hoření a klíčovou roli hraje například při výbuchu supernovy.

Použitá a doplňující literatura

- Atkinson, R. D. E., & Houtermans, F. G. 1929, *Zeitschrift fur Physik*, 54, 656
- Bethe, H. A. 1939, *Physical Review*, 55, 434-456
- Cook, C. W., Fowler, W. A., Lauritsen, C. C., & Lauritsen, T. 1957, *Physical Review*, 107, 508
- Burbidge, E. M., Burbidge, G. R., Fowler, W. A., & Hoyle, F. 1957, *Reviews of Modern Physics*, 29, 547
- Eddington, A. S. 1920, *The Observatory*, Vol. 43, p. 341-358
- Eddington, A. S. 1926, *The Internal Constitution of the Stars*, Cambridge: Cambridge University Press, 1926. ISBN 9780521337083
- Epelbaum, E., Krebs, H., Lee, D., Meißner, U.-G. 2011, *Phys. Rev. Lett.* 106, 192501
- Hoyle, F. 1954, *ApJ Suppl.*, 1, 121
- Leighton, R. B., Noyes, R. W., & Simon, G. W. 1962, *ApJ*, 135, 474
- Mikulášek, Z., Krtička, J. 2005, *Základy fyziky hvězd, učební text*
- Öpik E. J. 1951. *Proc. R. Irish Acad. A* 54,49
- Salpeter, E. E. 1952, *ApJ* 115, 326
- Salpeter, E. E. 2002, *ARA&A* 40, 1
- von Weizsäcker, C. F. 1937, *Physikalische Zeitschrift* 38, 176-191
- von Weizsäcker, C. F. 1938, *Physikalische Zeitschrift* 39, 633-646

17 Slunce jako vzorová hvězda

Slunce je k nám nejbližší hvězda. Můžeme říci, že je také zřejmě nejpodrobněji a nejlépe prozkoumanou hvězdou. Z toho často pramení snaha porovnávat ostatní hvězdy se Sluncem. Poloměry hvězd vyjadřujeme v poloměrech Slunce ($1 \mathcal{R}_{\odot} = 6,957 \cdot 10^8 \text{ m}$), hmotnosti ve hmotnostech Slunce ($1 M_{\odot} = 1,9891 \cdot 10^{30} \text{ kg}$)¹, zářivý výkon v zářivých výkonech Slunce ($1 \mathcal{L}_{\odot} = 3,828 \cdot 10^{26} \text{ W}$). Až potud je vše v pořádku. Někteří autoři ale na tomto místě sklouznou k tvrzení, že Slunce je zcela obyčejná, tuctová, průměrná hvězda. Ale tak to rozhodně není! Jak jsme už dříve uvedli, je Slunce hvězdou neobyčejnou, vždyť jí vděčíme za naši existenci, a také nadprůměrnou, pokud ji srovnáváme s běžnou hvězdou naší Galaxie. Pojďme si nyní naše Slunce prohlédnout trochu důkladněji.

17.1 Chemické složení Slunce

Slunce patří mezi hvězdy hlavní posloupnosti. Vypovídá nám o tom spektrální klasifikace G2V, z níž se dozvíme, že povrchová teplota je přibližně 5 000 až 6 000 kelvinů a ve spektru jsou patrné slabé čáry vodíku, ale také velmi silné čáry H a K ionizovaného vápníku² CaII a kovů, zejména železa a neutrálních kovů. Jenže, jak víme z předchozího povídání o spektroskopii a dálkovém průzkumu hvězd, poskytuje nám spektrum informací jen o složení povrchových vrstev hvězdy, zejména tzv. fotosféry, odkud je z hvězdy uvolňováno záření. Skutečné složení hvězdy je ale jiné! Většina hvězd je namíchána ze dvou prvků – ze tří čtvrtin vodíku a jedné čtvrtiny hélia a to vše okořeněné špetkou těžších prvků. Konkrétně pro Slunce na základě 3D hydrodynamického modelu uvádí Grevesse et al. (2010), že 73,8 % hmotnosti Slunce připadá na vodík, 24,85 % na hélium a jen 1,34 % na těžší prvky (zejména kyslík, uhlík, železo, neon, dusík, křemík a další). Poměrné zastoupení jednotlivých prvků ve hvězdách označujeme jako *abundance*. Může se uvádět jako početní zastoupení, tedy v logaritmech počtu atomů vztažených vůči takovému množství látky, v němž je obsaženo právě 10^{12} atomů vodíku, případně v 10^{12} kg vodíku a pak mluvíme hmotnostním zastoupením. Stručně se zapisuje tak, že abundance vodíku se označí jako X, hélia Y a abundance těžších prvků Z.³ Abundance těžších prvků se navíc označuje jako tzv. *metalicita*. Pro Slunce se běžně po léta udávala 2 %, dle posledních modelů je však nižší, $Z=0,0134$ ($X = 0,7380$, $Y = 0,2485$) (Grevesse et al., 2010).

Pro lepší představu si můžeme přepočítat složení Slunce na počty atomů. Potom na 1 000 atomů vodíku v povrchových vrstvách Slunce připadá jen 85 atomů hélia, 1,2 atomu lehčích prvků, tj. kyslíku, uhlíku, dusíku nebo neonu, 0,14 atomu těžších prvků. V centrálních oblastech, v jádru Slunce, je složení jiné. Zhruba polovinu vodíku už strávily jaderné reakce a přeměnily jej na hélium. Na hmotnosti jádra Slunce se tak dle našich předpokladů podílí vodík 35 procenty. Naopak hélia je 63 % a jen přibližně 2 % prvků jako uhlík, dusík, kyslík a další.

¹Připomeňme, že tato nominální hmotnost Slunce vychází dle rezoluce B3 (IAU 2015) z hodnoty gravitační konstanty $G = 6,67408 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$, která byla převzata z CODATA 2015 (?).

²Pozor na záměnu. V tomto místě se jedná o čáry ionizovaného vápníku označené písmeny H a K. Nejde o označení prvků vodíku a draslíku!

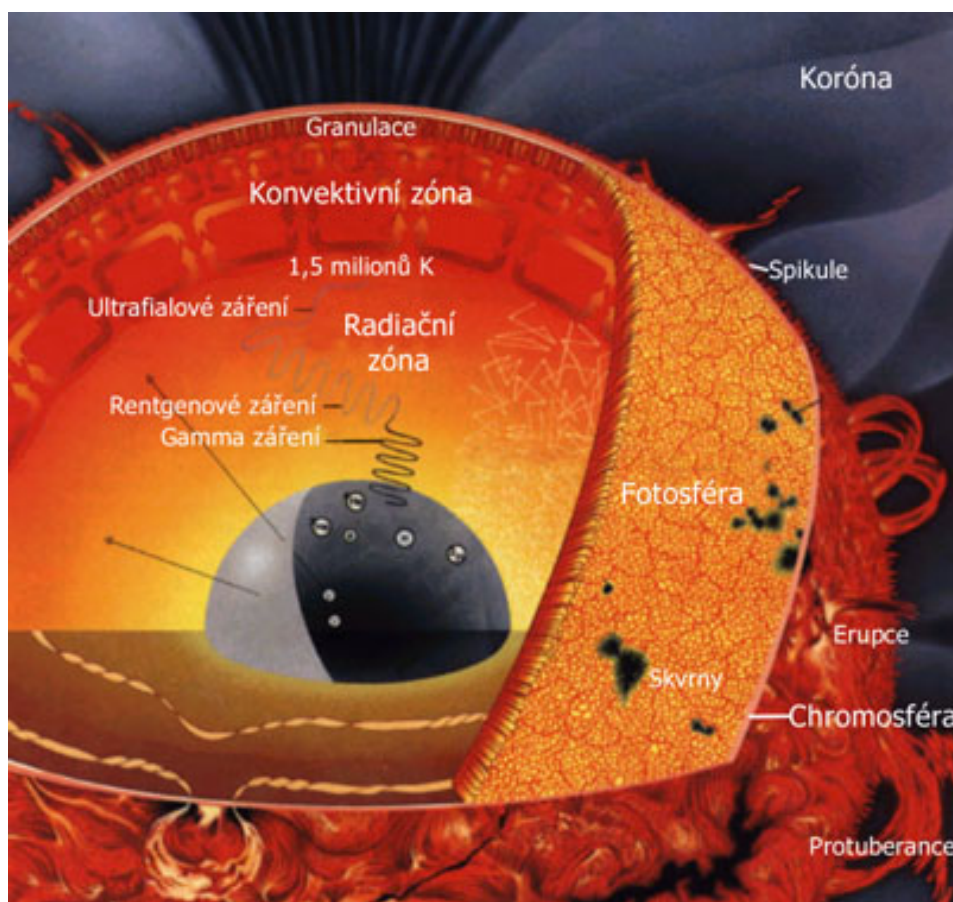
³Samozřejmě vždy $X + Y + Z = 1$.

17.2 Model Slunce

Už jsme se zmínili, že chemické složení celého Slunce vychází z vypočtených modelů. Modely umožňují nejen stanovit chemické složení, ale také stavbu Slunce a fyzikální podmínky v jeho nitru. Vzhledem k tomu, že je Slunce k Zemi nejbližší hvězdou, lze některé výsledky slunečního modelu relativně snadno (rozhodně snáze než pro ostatní hvězdy) ověřit pomocí pozorování – fotometrických, spektroskopických, ale také třeba pomocí lapačů neutrin v podzemí.

Podle našich současných představ lze sluneční nitro rozdělit do čtyř částí:

1. jádro,
2. zářivá vrstva (vrstva v zářivé rovnováze),
3. tachoklina,
4. konvektivní vrstva.



Obrázek 17.1: Sluneční nitro. Zdroj: Vik Dhillon.

Veškerá energie Slunce je generována v jádře, které sahá až do vzdálenosti zhruba jedné čtvrtiny poloměru Slunce. Tato energie pak prostupuje dalšími vrstvami až k povrchu Slunce (sluneční fotosféře), přičemž míra propustnosti těchto vrstev velmi úzce souvisí s výkonem jádra. Z jádra odchází fotony vysoce energetického záření (gama

a rentgenové), které jsou po cestě k povrchu pohlcovány a znovu vyzařovány až jsou nakonec vyzářeny ze sluneční fotosféry jako fotony viditelného světla.

Slunce je hvězdou hlavní posloupnosti, takže v jeho jádru dochází k jaderné přeměně vodíku na hélium za teploty přibližně 15 milionů kelvinů (viz obrázek 17.2a). Hustota materiálu jádra je podle našich představ 150 g/cm^3 , řádově desetkrát větší než hustota zlata nebo olova (viz obrázek 17.2b). Obě veličiny – tlak i teplota směrem od centra klesají. Ve vzdálenosti 175 000 km od středu klesne teplota na polovinu a hustota na desetinu centrální hodnoty. Jaderné reakce zde zcela ustávají.

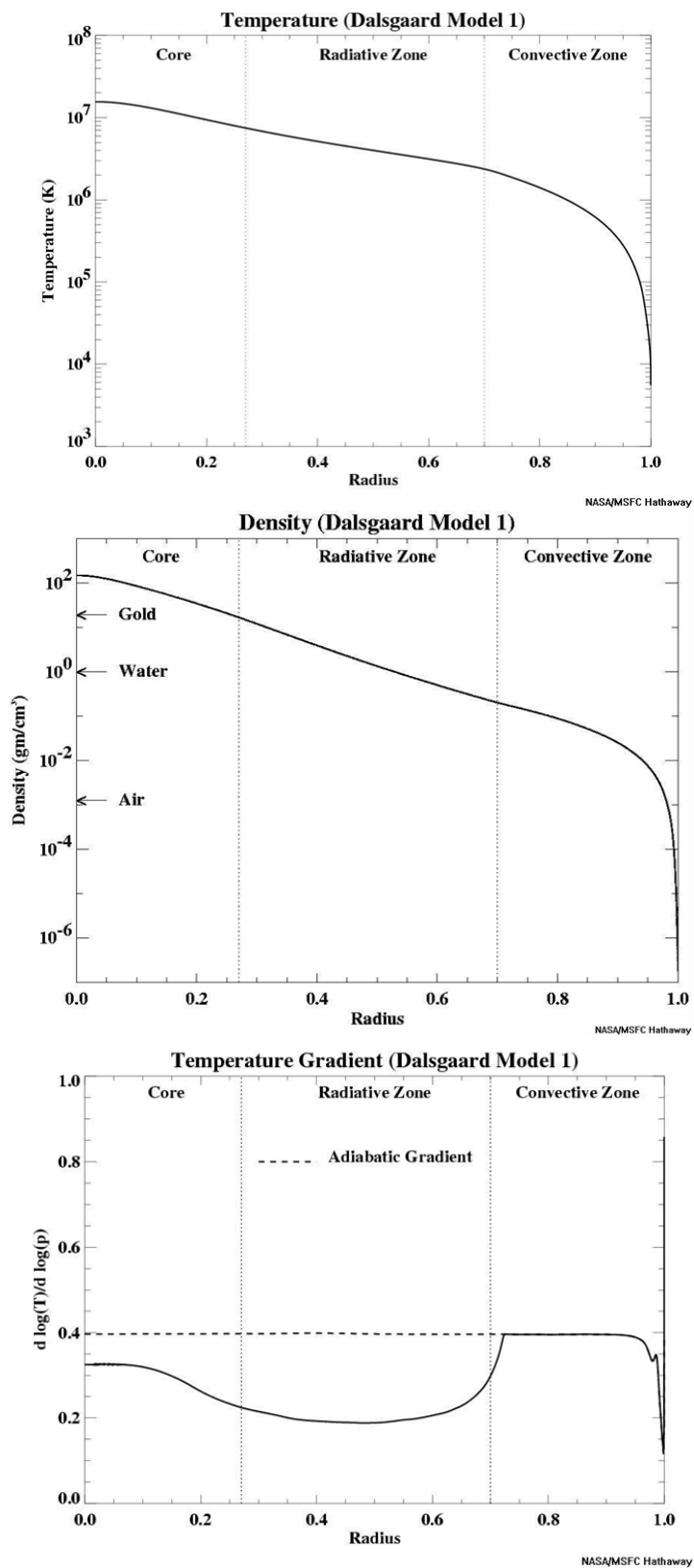
Zatímco o vrstvách nad jádrem nám informace přináší zvukové vlny procházející Sluncem a tedy helioseismologie, o nitru Slunce nám informace zprostředkují neutrina, která vznikají při jaderných reakcích. O jejich detekci jsme hovořili v kapitole 11.6.2. Jenže počet zachycených slunečních neutrin byl dlouhodobě menší (jen asi jedna třetina), než by odpovídalo našim modelovým představám. Problém chybějících slunečních neutrin byl jednou z největších záhad astrofyziky konce minulého století. Dnes už víme, že vysvětlení spočívá v odhalení existence více forem neutrin, které se navíc mění i během jejich letu od Slunce k Zemi. A protože starší detektory dokázaly místo tří detekovat jen jeden typ neutrin, byla anomálie na světě.

Nad jádrem, zhruba v rozmezí $0.25 R_{\odot}$ - $0.7 R_{\odot}$ se v nitru Slunce nachází vrstva v zářivé rovnováze, kde se energie z nitra přenáší zářením, resp. zářivou difúzí. Fotony ve vakuu cestují rychlostí světla, v materiálu o hustotě srovnatelné s hustotou zlata ($19\,320 \text{ kg/m}^3$) se však velmi často sráží s částicemi látky, jsou pohlcovány a znovu vyzařovány. I když svrchní část vrstvy v zářivé rovnováze má hustotu už jen 200 kg/m^3 fotonů zabere průchod celou vrstvou řádově miliony let. Jak se fotony vzdalují od centra Slunce, zmenšuje se nejen hustota prostředí, v němž se pohybují, ale také jeho teplota. Zatímco u jádra má vrstva v zářivé rovnováze teplotu kolem 7 milionů kelvinů, na opačné straně už jen dva miliony kelvinů (viz obrázek 17.2a).

Podpovrchové vrstvy Slunce jsou promíchávány konvekcí, ale než se foton z nitra dostane do konvektivní oblasti, musí projít přes tenkou přechodovou vrstvou, tzv. tachoklinu⁴. Její význam pro děje v posledních letech roste s tím, jak jsou odhalovány její vlastnosti. Nyní se například předpokládá, že právě v této vrstvě je magnetickým dynamem generováno magnetické pole Slunce.

Vnější vrstvou slunečního nitra je konvektivní obálka nad tachoklinou o tloušťce zhruba 200 000 km. Dno konvektivní vrstvy má teplotu $2 \cdot 10^6 \text{ K}$, což je sice z pohledu běžného člověka velmi vysoká teplota, ale pro těžké ionty je dost nízká na to, aby si ionty uhlíku, dusíku, kyslíku, vápníku nebo železa udržely alespoň část svých elektronů. V důsledku toho se zvýší opacita materiálu. Záření už nemůže tak snadno procházet méně průhlednou látkou a „rozpohybuje“ materiál Slunce, který zde začne doslova vřít a pohybovat se směrem vzhůru k povrchu a přenášet tak energii. Jak materiál stoupá k povrchu, rozpíná se a ochlazuje. Na viditelném povrchu Slunce už má hustotu jen 0.2 g/cm^3 (tedy zhruba jednu desetitisícinu hustoty vzduchu na mořské hladině) a teplotu $5\,700 \text{ K}$. Samotný konvektivní pohyb je už pozorovatelný přímo na povrchu Slunce v podobě tzv. granulace (viz následující kapitola).

⁴Termín „tachocline“ v angličtině zavedli Spiegel & Zahn (1992).



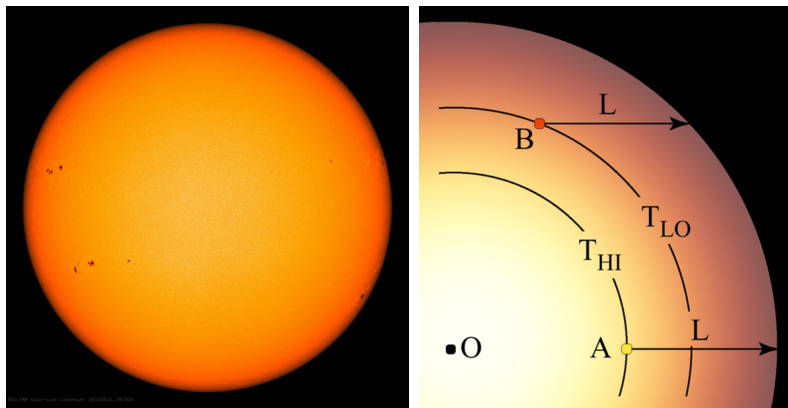
Obrázek 17.2: Výsledky modelových výpočtů slunečního nitra dle Christensen-Dalsgaard et al. (1996). Zdroj: NASA.

17.3 Sluneční atmosféra a projevy aktivity Slunce

Na rozdíl od slunečního nitra je atmosféra Slunce přímo pozorovatelná. Díky družicím a moderní technice můžeme děje ve sluneční atmosféře a projevy aktivity Slunce sledovat v nepřetržitém přímém přenosu. Je tedy zřejmé, že nejlépe prostudovanou hvězdnou atmosférou je atmosféra Slunce.

Celou sluneční atmosféru můžeme rozdělit na čtyři oblasti – fotosféru, chromosféru, korónu a heliosféru. Dno sluneční atmosféry tvoří fotosféra, vrstva, kde vzniká většina záření přicházejícího ze Slunce. Vzhledem k tomu, že je tato vrstva ve srovnání s poloměrem Slunce velmi tenká (řádově jen stovky kilometrů), má pozorovatel ze Země dojem, že Slunce má pevný povrch. Tak tomu ale není, Slunce je přece v podstatě plynná koule. Navíc, záření různé vlnové délky vzniká v různé výšce v atmosféře Slunce, takže tloušťka fotosféry závisí také na tom, zda se jedná o fotosféru vizuálního záření, infračerveného záření atp. Proto také můžeme nalézt pro tloušťku fotosféry odlišné údaje v literatuře až do zhruba 1000 km. Spodní hranice pro tloušťku fotosféry ve vizuální oblasti spektra je dána tím, že ze Země vidíme dalekohledy ostrý okraj Slunce a to odpovídá síle vrstvy přibližně 130 km.

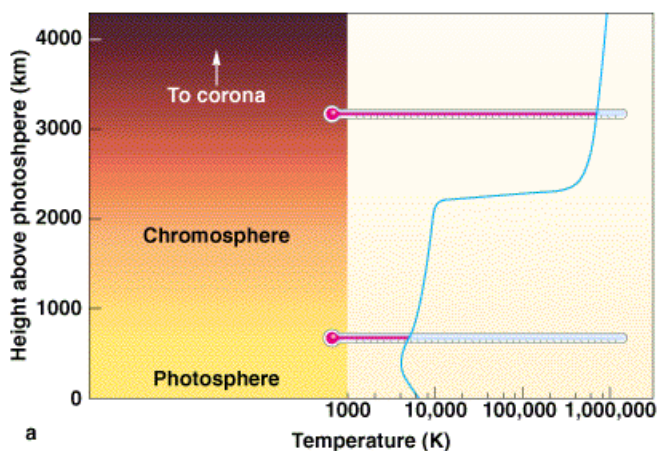
Teplota ve sluneční fotosféře zvolna klesá od 9000 K do 4400 K ve výšce kolem 500 km (viz obrázek 17.4). Důsledkem takového průběhu teploty ve fotosféře je jev označovaný jako *okrajové ztemnění*. Na slunečním disku je zřetelně vidět, že okraje jsou tmavší než střed disku (viz např. obrázek 17.3 vlevo). Vysvětlení jevu je zřejmé z obrázku 17.3. Na okrajích disku se totiž díváme do oblastí s nižší teplotou, které tak pro nás budou tmavší. Při pohledu do středu disku se ve stejné hloubce (kam dohlédneme) nacházejí teplejší oblasti, z nichž k nám jde větší množství vyzařované energie. Střed disku tedy září více než okraje a bude se jevit světlejší.



Obrázek 17.3: Vlevo: Fotografie Slunce. Vpravo: Schéma vzniku okrajového ztemnění. T_{LO} nižší teplota, T_{HI} vyšší teplota. Zdroj: NASA.

Fotosféra má na svém vrcholu teplotu kolem čtyř a půl tisíce kelvinů. Člověk by očekával, že bude i nadále klesat, ale opak je pravdou. V následujících dvou vrstvách sluneční atmosféry se chod teploty obrací a v chromosféře roste až na přibližně 10 000 K ve výšce kolem 2000 km. Pozorujeme-li chromosféru za okrajem slunečního kotouče, projevuje se charakteristickými emisními čarami, na pozadí disku jde naopak o temné

čáry ve slunečním spektru. Celkový zářivý výkon chromosféry ale činí jen 0,0001 zářivého výkonu fotosféry. A podobně zaniká v záři fotosféry i sluneční koróna. I přesto, že její teplota dosahuje dvou až tří milionů kelvinů, její zářivý výkon je ve srovnání s fotosférou asi milionkrát menší. To je způsobeno zejména velmi malou hustotou, která je až 10^{-12} krát menší než hustota fotosféry. Podobně jako chromosféru můžeme tedy korónu pozorovat jen v době úplného zatmění Slunce nebo speciálními přístroji, např. koronografem.



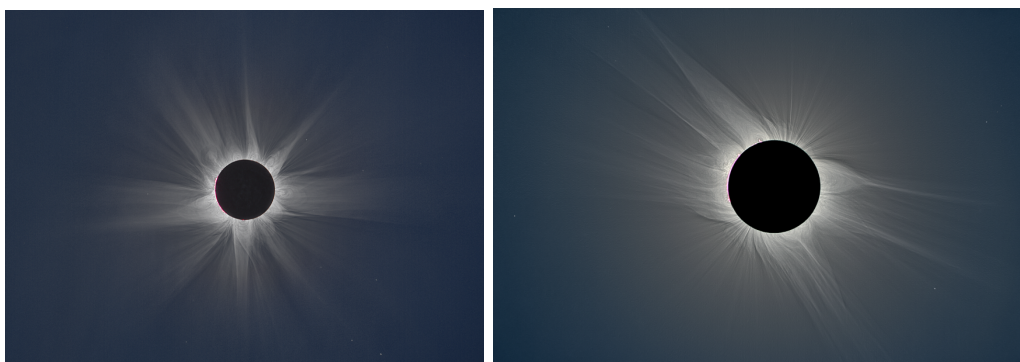
Obrázek 17.4: Chod teploty v atmosféře Slunce. Zdroj: Brooks/Cole Publishing Company/ITP.

Zdrojem energie pro extrémní nahřívání horních vrstev sluneční atmosféry mají být dle práce Schatzman (1949) akustické nebo magnetohydrodynamické rázové vlny generované na povrchu Slunce konvekcí. V současné době se má spíše za to, že koróna je ohřívána elektrickým proudem generovaným změnami magnetického pole, procesem tzv. magnetické rekonexe. Siločáry magnetických polí odlišných domén se mohou náhle spojit, přestavět se a tím přerušit dosavadní elektrické proudy. Při takovém náhlém přerušení se energie elektrického proudu uvolní do koróny a ohřeje ji.⁵ V lednu 2013 zveřejnila NASA (tisková zpráva 13-030) první výsledky z dalekohledu Hi-C (High Resolution Coronal Imager). Na dosud nejlepších detailních záběrech koróny (obrázek 17.6) se podařilo poprvé přímo pozorovat „magnetické stužky“.

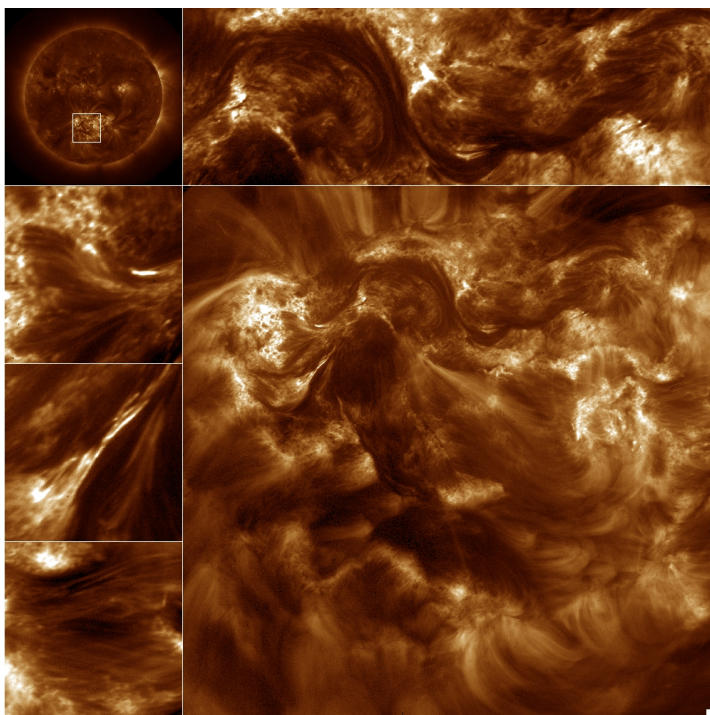
Vysoká teplota koróny a její nízká hustota vedou k tomu, že materiál koróny je velmi difúzní. Rychlost částic často překoná i únikovou rychlost, vzniká tak nepřetržitý proud částic ze Slunce – tzv. sluneční vítr. Sluneční vítr tvoří typicky jen 5 až 10 částic v jednom cm^3 , ale ročně jím Slunce ztrácí 10^{-13} své hmotnosti, tedy zhruba 10^{17} kg látky. Pro srovnání je to zhruba hmotnost Marsova měsíce Phobos, která je ročně slunečním větrem distribuována do okolí Slunce. Ztráta částic koróny je kontinuálně nahrazována z chromosféry.

Velikost koróny se mění v závislosti na aktivitě Slunce. Zhruba ve vzdálenosti 2.3 R_{\odot} poklesne ale její hustota natolik, že zde můžeme položit vnější okraj koróny. Hranice to není nijak ostrá, koróna prostě volně přechází do slunečního větru a okolního prostoru, tzv. heliosféry, v níž je Slunce dominantním tělesem.

⁵O teorii magnetické rekonexe a její historii si lze přečíst zejména v Priest & Forbes (2000).



Obrázek 17.5: Sluneční koróna během úplného zatmění Slunce. Tvar koróny se mění – v době maxima sluneční činnosti má pravidelný tvar (snímek vlevo, zatmění z roku 2012 pozorované v Austrálii), zatímco v období minima sluneční činnosti je zúžená v rovině slunečního rovníku (snímek vlevo, 2006 Turecko). Snímky zabírají odlišnou část hvězdné oblohy, proto má Slunce různý průměr. Zdroj: M. Druckmüller.

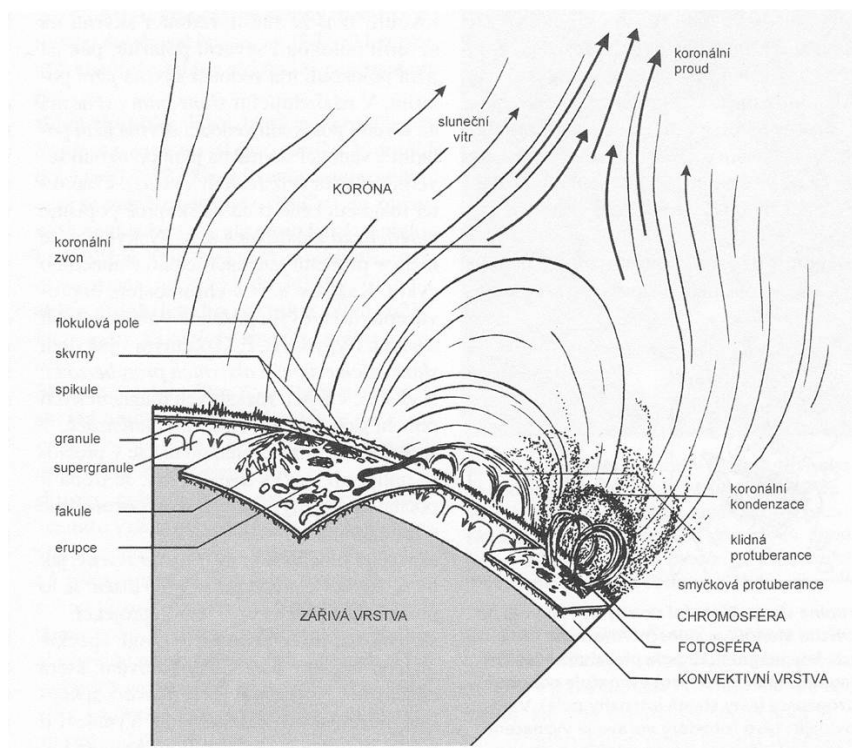


Obrázek 17.6: Záběry z koronární kamery s vysokým rozlišením (Hi-C, Hi-resolution Coronal Imager) ukazují vývoj aktivní oblasti na Slunci vyznačené na obrázku z přístroje AIA (Atmospheric Imaging Assembly) vlevo nahoře. Menší obrázky ukazují několik detailů: část kanálu filamentu (vpravo nahoře), lemované těleso (vlevo 2. obr. shora), příklad magnetické rekonexea erupce (vlevo, 3. shora), a jemné vláknité smyčky (vlevo dole). Obrázky z Hi-C jsou v rozlišení 0.2'' nebo 150 km. Zdroj: NASA.

17.4 Projevy aktivity Slunce

Přestože Slunce nepatří mezi nějak zvlášť aktivní hvězdy, můžeme sledovat nejrůznější projevy jeho činnosti ve všech vrstvách sluneční atmosféry. I když některé projevy nejsou omezeny jen na jednu vrstvu atmosféry, uvádí je následující přehled vždy jen v hlavních oblastech výskytu:

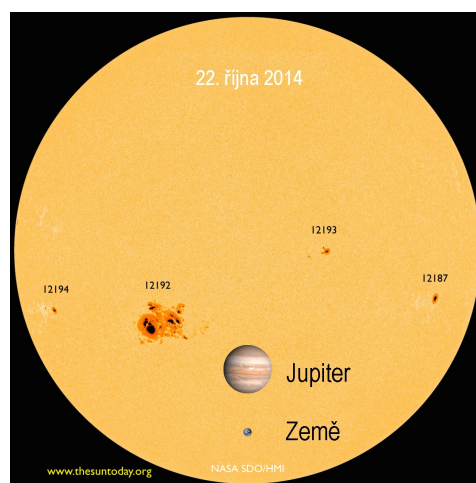
- fotosféra
 - sluneční skvrny
 - granulace
 - fakule
- chromosféra
 - erupce
 - spikule
 - flokule
 - sluncetřesení
- koróna
 - protuberance (filamenty)
 - koronární transienty, kondenzace, výbuchy, díry
- heliosféra
 - sluneční vítr
 - koronární proudy



Obrázek 17.7: Aktivity Slunce.

17.4.1 Sluneční skvrny

Nejnápadnějším a proto i nejdéle známým projev sluneční činnosti jsou sluneční skvrny. Známe je i z období před vynálezem dalekohledu. Ty největší z nich mají průměr desítky tisíc kilometrů. V roce 2014 jsme mohli pozorovat skvrnu průměrem srovnatelnou s Jupiterem (viz obrázek 17.8), nicméně velká skvrna v roce 1947 byla ještě třikrát větší.



Obrázek 17.8: Největší sluneční skvrna v průběhu slunečního cyklu 24 zachycená přístrojem HMI na družici Solar Dynamics Observatory. Zdroj: „www.thesuntoday.org“.

První zaznamenaná pozorování slunečních skvrn pocházejí z roku 466 př. n.l. od Anaxagora z Klazomen. Čínská pozorování z let 301 – 1205 shrnul v prvním katalogu Číňan Ma Tuan-sien, který shromáždil informace o 45 záznamech. Středověk v Evropě příliš ovlivňovala Aristotelovský pohled na svět a tak nemáme z této doby mnoho astronomických záznamů včetně těch o Slunci. Výjimkou jsou tři známé záznamy. První pochází z roku 807, kdy tajemník a rádce Karla Velikého Einhard popsal v kronice domnělý přechod Merkuru přes Slunce. Ve skutečnosti však šlo o několikadenní pozorování velké sluneční skvrny. Druhý záznam o středověkém pozorování sluneční skvrny a její první vyobrazení pochází z roku 1128 od Johna z Worcesteru a můžeme jej nalézt v kronice uložené v Oxfordu v Corpus Christi College. Pro nás může být zajímavé, že také v Kosmově kronice můžeme objevit zmínku o pozorování sluneční skvrny, a to v roce 1139. Řadu pozorování ukrývají i arabské spisy.

Navzdory těmto historickým záznamům je objev slunečních skvrn oficiálně datován až do éry po objevu dalekohledu. Za objevitele jsou považováni David Fabricius a jeho syn Johann, kteří pozorovali sluneční skvrny 9. března 1611 a svá pozorování bezprostředně publikovali. Až poměrně nedávno se zjistilo, že skvrny na Slunci pozoroval 8. prosince 1610 anglický matematik a filozof Thomas Harriot, avšak bohužel bez publikace.

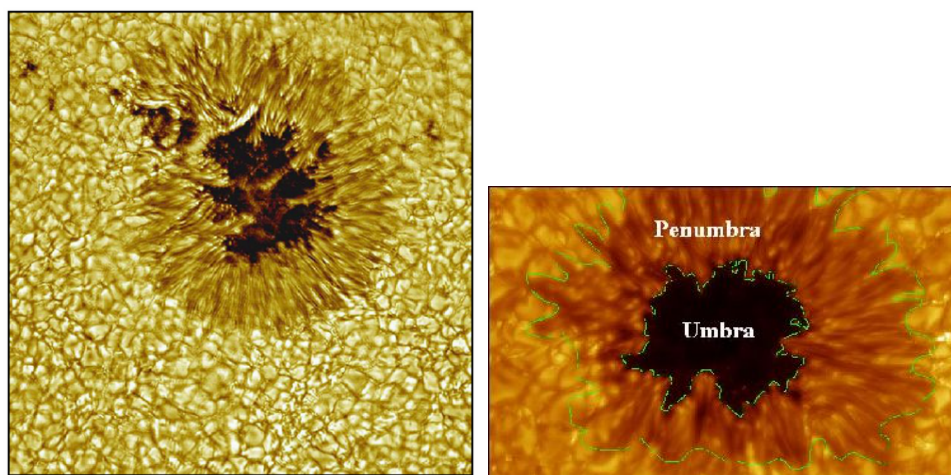
místo vzniku – fotosféra

části

- - umbra (neboli stín),

- - penumbra (polostín) – vlákna

doba trvání - hodiny až měsíce tvar i velikost skvrn se s časem mění



Obrázek 17.9: Sluneční skvrny.

Co jsou zač?

Herschel - průduchy v atmosféře; Herschel: skvrny jsou díry v horké sluneční atmosféře, kterými se díváme na pevný povrch Slunce, na kterém mohou žít organismy vznikají interakcemi magnetického pole Slunce a vzhledem k nižší teplotě se jeví jako tmavé oblasti.

velikost – mohou převyšovat velikost Země

pozorování

- dalekohledem
- volným okem

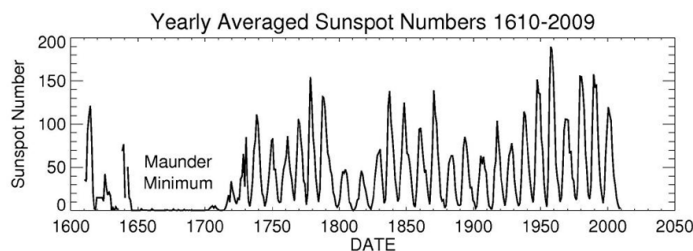
k čemu jsou dobré?

- určení rotace Slunce – objev diferenciální rotace – 27.3 d

Slunce nerotuje jako tuhé těleso, ale různou úhlovou rychlostí v různých vzdálenostech od rovníku. Na rovníku je rotace nejrychlejší a směrem k pólům klesá. Tak například v šířce 17 stupňů činí asi 27 a jednu třetinu dne; toto číslo se obvykle udává v tabulkách jako doba rotace Slunce vzhledem k Zemi.

Počet skvrn – příznak aktivity Slunce

periodické změny – odhad $P \approx 10$ let (1844 Heinrich Samuel Schwabe); dnešní hodnota v průměru asi 11,3 roku



Obrázek 17.10: Počty slunečních skvrn.

poslední maximum - 2001, příští 2013 - (poznámka o průběhu maxima, zpoždění)

výrazná minima = Slunce beze skvrn - 1645 – 1715 Maunderovo minimum, 1450-1550 Spörerovo minimum (objevil německý astronom-amatér – původním povoláním lékárník Gustav Spörer a Edward Maunder)

1848 Johann Rudolf Wolf – relativní číslo množství skvrn na Slunci:

$$R = 10 * g + n, \quad (17.1)$$

kde g je počet skupin skvrn, n celkový počet jednotlivých skvrn.

17.4.2 Granulace (zrnitost)

granule - zrna o velikosti cca 700-1000 km; vrcholky vzestupných proudů plazmatu
životnost - 6 až 8 minut;
Pozorování - dalekohledem

17.4.3 Fakule (pochodně)

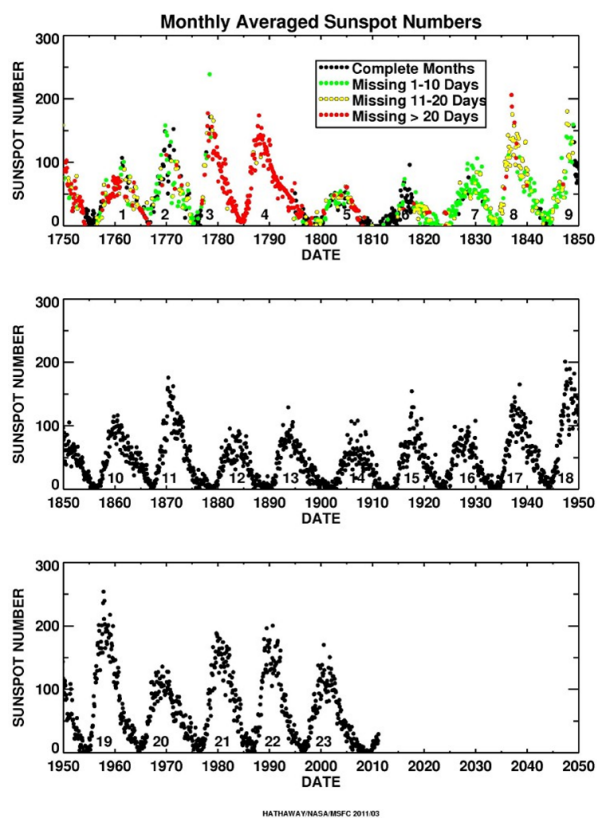
světlé skvrnky nejnápadnější na okraji slunečního kotouče interpretace - místa s poněkud vyšší teplotou než okolní fotosféra

Pozorování - dalekohledem

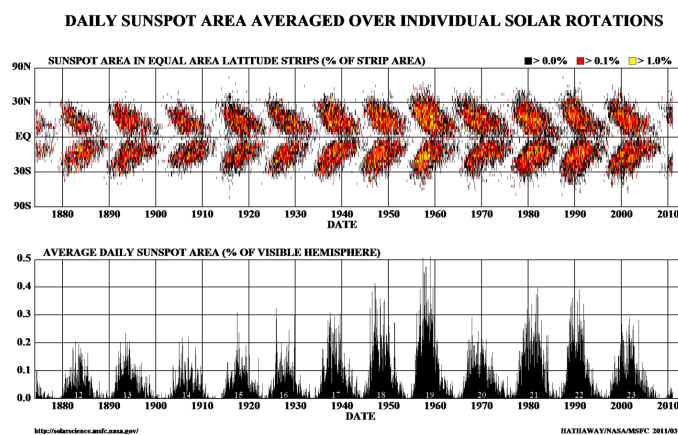
17.4.4 Erupce

Místo vzniku - chromosféra

Náhlá zjasnění chromosféry, doprovázená silným vyzařováním na různých frekvencích a výronem nabitých částic do meziplanetárního prostoru. Erupce vznikají v místech silných magnetických polí. Doba trvání - několik desítek minut



Obrázek 17.11: Sluneční skvrny

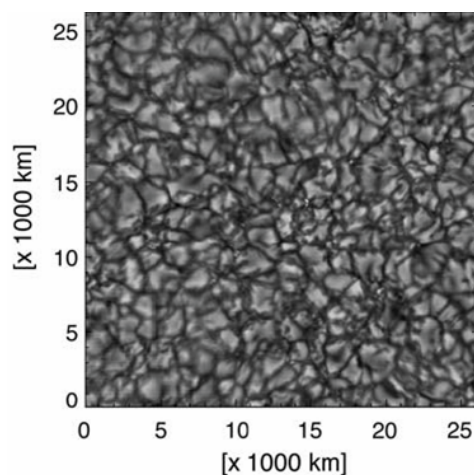


Obrázek 17.12: Motýlkový diagram.

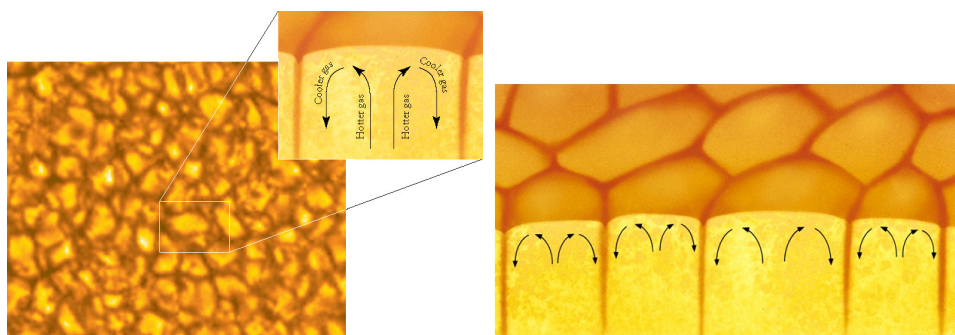
17.4.5 Sluncetřesení

video: 9 July 1996 - sluncetřesení

sérii obrázků + vysvětlení



Obrázek 17.13: Granulace.

Obrázek 17.14: Granulace. Schéma. Zdroj: http://www.ualberta.ca/~pogosyan/teaching/ASTRO_122/lect9/lecture9.html.

17.4.6 Flokule a spikule

Flokule jsou jasná místa ve chromosféře, tvoří chromosférickou síť.

Spikule - vrcholky flokulí, velmi dobře pozorovatelné v čáře H-alfa.

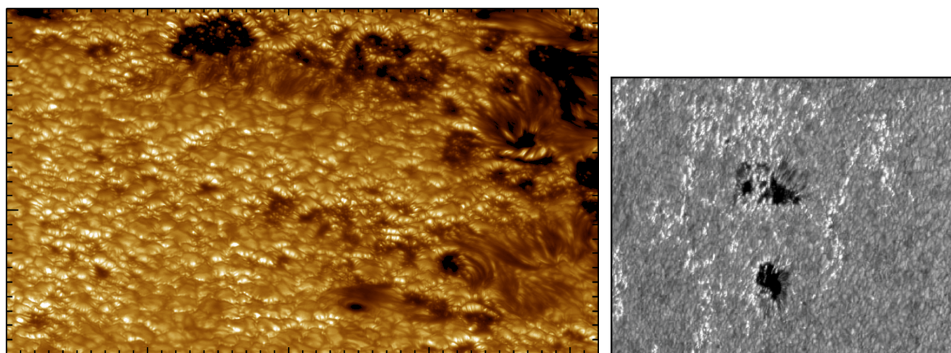
Výtrysky z chromosféry do koróny – 10000 K, průměr vláken 1000 km; „hořící prérie“

17.4.7 Protuberance

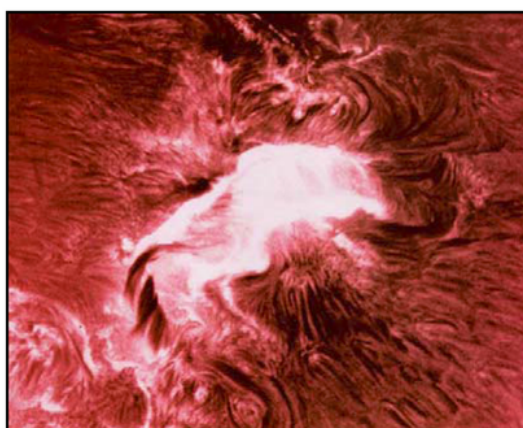
shluky plazmatu - vystupují z chromosféry do koróny desítky tisíc km vysoko
klidná protuberance x eruptivní protuberance

17.4.8 Koróna

velmi řídký plyn obklopující Slunce, září zhruba milionkrát méně než fotosféra



Obrázek 17.15: Fakule.



Obrázek 17.16: Erupce.

pozorování - při úplném zatmění Slunce, koronograf

- bez vnější hranice
- přechází do okolního prostoru
- sluneční vítr
- výtrysky částic (CME) – vliv na Zemi ($20 - 3200 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$)

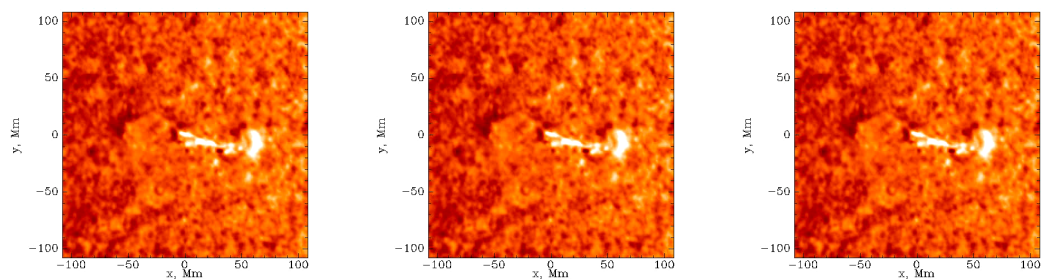
17.4.9 Sluneční vítr

přesné chemické složení Slunce – přímým rozborem slunečního větru pomocí družic nebo kosmických sond.

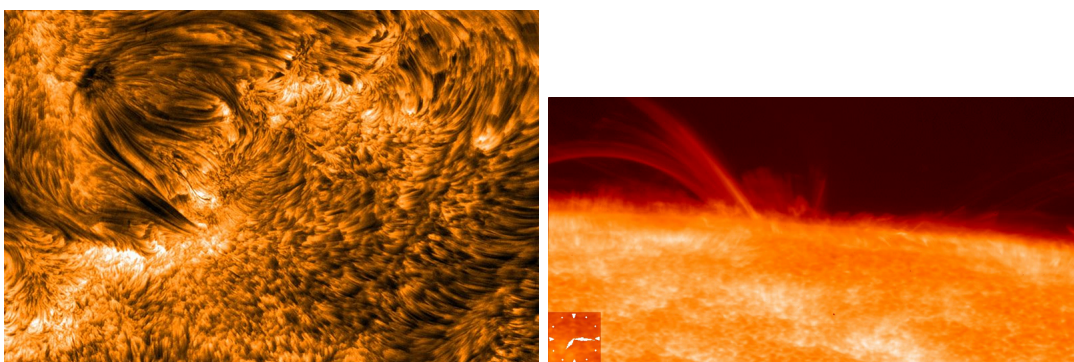
pomalý (stacionární) – $300 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$

rychlý (kvazistacionární) – nad koronárními děrami ($700\text{-}800 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$)

velmi rychlý – přechodný, při výbuších Slunce – vede k tzv. meziplanetární bouři



Obrázek 17.17: Sluncetřesení.



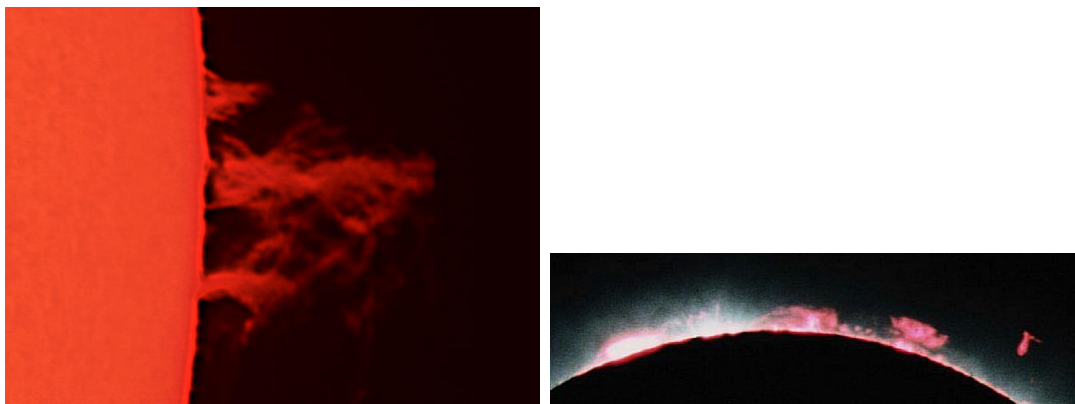
Obrázek 17.18: Flokule a spikule

Slunečním větrem = stálý proud částic, unikající ze Slunce; v okolí Země - hustota několik částic/cm³, - rychlost - několik set km·s⁻¹, sahá daleko za dráhu Země.

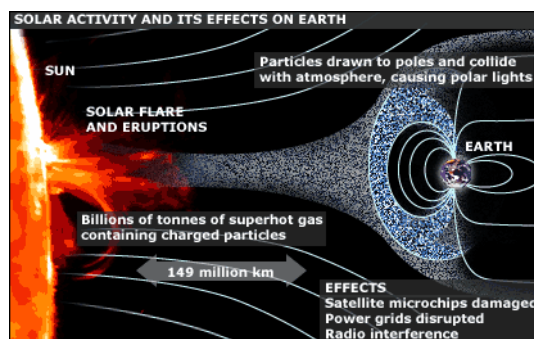
Sluneční vítr - přímá informace o chemickém složení svrchní vrstvy Slunce, (už po promíchání) => odpovídá celkovému chemickému složení Slunce

Tabulka 17.1: Složení slunečního větru

Prvek:	Relativní množství ve slunečním větru:
vodík	0,96
helium 3	$1,7 \cdot 10^{-5}$
helium 4	0,04
kyslík	$5 \cdot 10^{-4}$
neon	$7,5 \cdot 10^{-5}$
křemík	$7,5 \cdot 10^{-5}$
argon	$3,0 \cdot 10^{-6}$
železo	$4,7 \cdot 10^{-5}$



Obrázek 17.19: Protuberance.



Obrázek 17.20: Aktivita Slunce a její vliv na Zemi.

17.5 Heliosféra

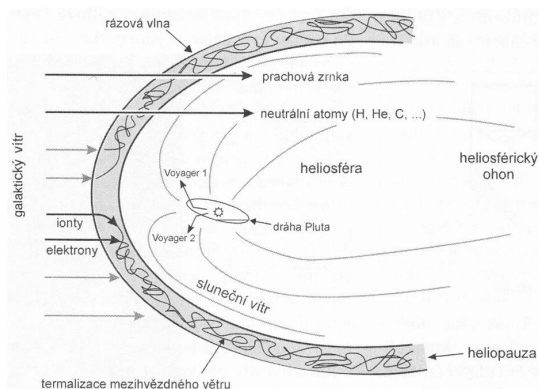
Heliospheric current sheet (HCS)

Zvlněné proudové vrstvy uvnitř Sluneční soustavy – oddělují opačně orientované meziplanetární magnetická pole

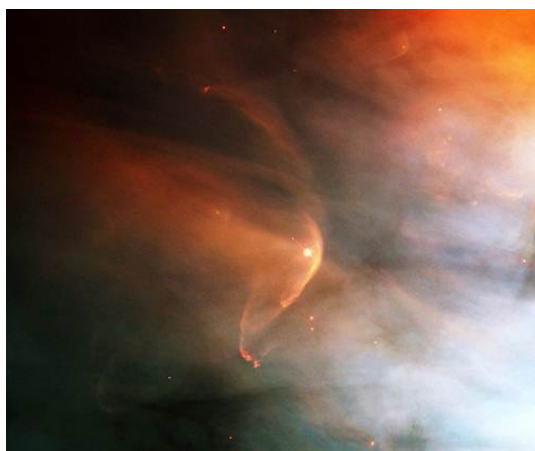
největší útvar ve Sluneční soustavě
 vychází z roviny slunečního rovníku
 tvar – výsledek rotace mg. pole Slunce a působení slunečního větru
 tloušťka vrstvy – cca 10 000 km
 el. proudy s hustotou 10^{-10} A/m²

Použitá a doplňující literatura

Grevesse, N., Asplund, M., Sauval, A. J., & Scott, P. 2010, *Astroph. & Space Sci.*, 328, 179

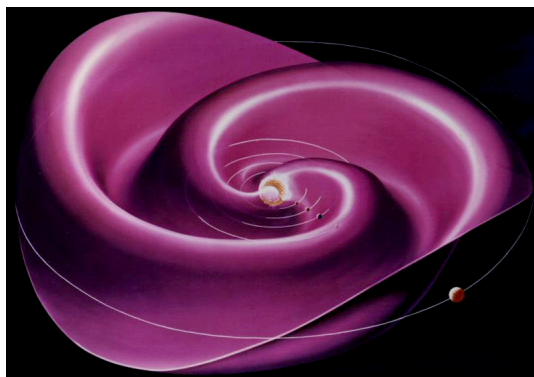


Obrázek 17.21: Schéma heliosféry. Na heliosféru působí galaktický vítr, tok mezihvězdné hmoty pohybující se od středu Galaxie vůči Slunci rychlostí 25 km/s. Převzato z Kleczek (2002).



Obrázek 17.22: HST poskytl v únoru 1995 pohled na rázovou vlnu o rozměru zhruba půl světelného roku, která vznikla u hvězdy LL Orionis. Jak rychlý hvězdný vítr naráží do pomalu se pohybujícího plynu Mlhoviny v Orionu, vzniká rázová vlna, podobně u letadla, které letí nadzvukovou rychlostí. Zdroj: Astronomický snímek dne 15.11.2003. NASA.

- Christensen-Dalsgaard, J., Dappen, W., Ajukov, S. V., et al. 1996, *Science*, 272, 1286
 Kleczek, J., 2002 *Velká encyklopedie vesmíru*. Academia, Praha
 Leighton, R. B., Noyes, R. W., & Simon, G. W. 1962, *ApJ*, 135, 474
 Priest, E., & Forbes, T. 2000, *Magnetic Reconnection*, by Eric Priest and Terry Forbes, pp. 612. ISBN 0521481791. Cambridge, UK: Cambridge University Press, June 2000.
 Schatzman, E. 1949, *Annales d'Astrophysique*, 12, 203
 Spiegel, E. A., & Zahn, J.-P. 1992, *A&A*, 265, 106
 Svalgaard, L., & Wilcox, J. M. 1976, *Nature* 262, 766



Obrázek 17.23: Heliosférická proudová vrstva. Jeden z prvních 3D modelů se objevil v článku (Svalgaard & Wilcox, 1976).

18 Zrození, život a skon hvězd

Vývoj hvězdy je ve srovnání s délkou lidského života ba i existencí člověka velmi dlouhý proces. Naše pozorování v délce maximálně stovek let představuje jen okamžik z celého vývoje určité hvězdy. Jsou to momentky ze života hvězd. Představte si ale, že byste například měli sérii fotografií (momentek) z určitých vývojových stádií různých druhů hmyzu a měli je poskládat ve správném pořadí, aby vznikl dokumentární sled obrázků ukazující vývoj společné i odlišné cesty vývoje různých druhů hmyzu. Bez široké škály biologických znalostí je to těžko řešitelný úkol. Astrofyzikové ale řeší úkol velmi podobný. Ze zachycených momentek různých hvězd se snaží poskládat obraz vývoje hvězd různých typů. Jenže náš pohled do vesmíru a tím i pořizování oněch momentek je silně zatížen výběrovým efektem. Stejně hvězdy se nám z různých vzdáleností jeví odlišně, jako četnější se budou jevit zářivější hvězdy a nezapomínejme ani na nepravidelně rozmístěný mezihvězdný materiál, který může náš pohled do vesmíru také výrazně zkreslit. Nicméně i přes nastražené obtíže se astronomům skutečně podařil husarský kousek a vývojovou sekvenci pro různé hvězdy opravdu sestavili.

Než se však pustíme do samotného vývoje hvězd, věnujme se na chvíli jednomu z fenomenů, který náš pohled do okolního vesmíru silně ovlivňuje a který je také nezbytný pro vznik hvězd.

18.1 Mezihvězdná látka

O mezihvězdné látce jsme se v kurzu už několikrát zmiňovali, ale podívejme se na ni trochu detailněji. Mezihvězdná látka je tvořena plynem s teplotou většinou do 100 K většinou z atomů a molekul vodíku a hélia s příměsí prachových zrn. Nejhmotnější složkou je plyn, který představuje až 99 % hmoty mezihvězdné látky. Vodík je zastoupen zhruba 70 procenty, 28 % tvoří hélium a zbytek ostatní prvky. Vodík se v mezihvězdném prostředí vyskytuje jak v základním, tak i excitovaném stavu.

Neutrální vodík tvořící oblasti H I, které jsou detekovatelné na vlnové délce 21,1 cm, tedy na frekvenci 1420 MHz. Tato oblaka jsou ale dost chladná (do 100 K), takže většina vodíku se vyskytuje v podobě molekul. Hustota je v těchto uskupeních většinou desítky atomů v jednom centimetru krychlovém, ale mohou se vyskytnout i zhustky s hustotou až 10^6 částic/cm³. Rozměry obřích molekulárních mračen dosahují až několika set světelných let a hmotností až $10^7 M_{\odot}$.

Chladná oblaka mezihvězdné látky můžeme pozorovat jako temné nezářící mlhoviny. Typickými příklady jsou mlhoviny Koňská hlava v Orionu, Dýmka v Hadonoši (viz obr. 5.12) nebo Uhelný pytel v souhvězdí Jižního kříže.

V okolí žhavých hvězd je mezihvězdná látka vystavena intenzivnímu záření, které vodík ionizuje. Pak hovoříme o oblastech H II s teplotou několika tisíc kelvinů. Tyto oblasti mezihvězdné látky jsou zpravidla řidší než oblasti H I. jsou pozorovatelné zpravidla jako červeně zářící emisní mlhoviny (viz obrázek 18.1 vpravo).

Mezihvězdný prach tvoří jen jedno procento mezihvězdné látky, ale jeho role je velmi významná. Je tvořen zrnky o velikosti 0.1 μm z uhlíku, křemičitanů, různých kovů a ledu. Jedno takové zrnko je vyskytuje v prostoru 10 až 100 m³. Přestože je hustota mezihvězdného prachu velmi nízká, právě na jeho částicích dochází k absorpci

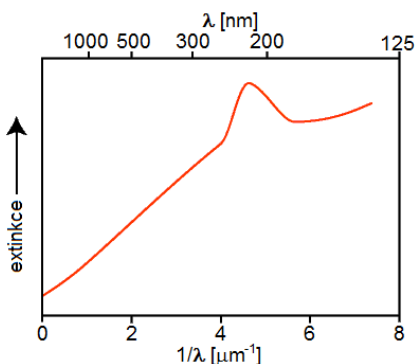


Obrázek 18.1: Mléčná dráha a oblast HII v mlhovině M17 Omega. Zdroj: Sid Leach a Martin Altmann & Jürgen Schmoll.

a rozptylu procházejícího záření. Rozptyl a absorpce jsou totiž nejúčinnější na částicích srovnatelných s vlnovou délkou procházejícího záření. To znamená, že zatímco dlouhovlnné a infračervené záření prochází těmito oblaky bez potíží, pro krátkovlnné a ultrafialové záření neprůhledná. To samozřejmě vede k celkovému zeslabení záření po průchodu mezihvězdnou látkou, k tzv. *mezihvězdné extinkci*. Ve známém vztahu pro modul vzdálenosti pak vystupuje i extinkční člen A_V , který vlastně říká o kolik magnitud je hvězda slabší kvůli mezihvězdné extinkci.

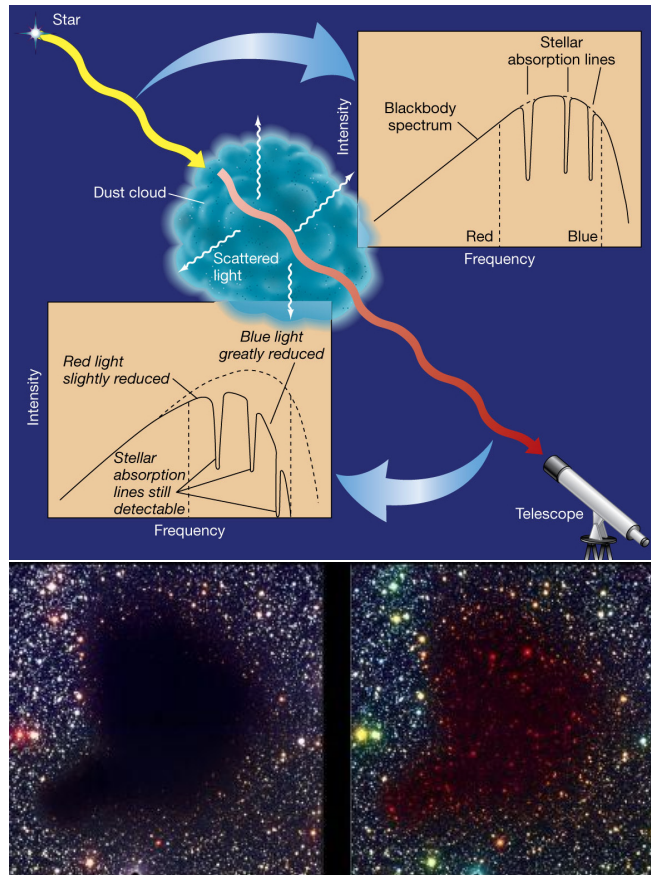
$$m_V - M_V = 5 \log r - 5 + A_V \quad (18.1)$$

Ve směru do středu naší Galaxie může extinkce ve vizuální oblasti spektra dosáhnout až 30 mag!



Obrázek 18.2: Graf mezihvězdné extinkce v závislosti na vlnové délce λ , respektive vlnočtu $1/\lambda$. Zdroj: <http://www.jb.man.ac.uk/>

Extinkce není ale jediný efekt, který prostředí s mezihvězdným prachem způsobuje. Tím, že je prakticky neprůhledné pro krátkovlnné záření, tedy modrou složku světla, bude se světlo po průchodu tímto prostředím jevit červenější, dojde k tzv. *mezihvězdnému zčervenání*. Připomeňme, že toto zčervenání nemá nic společného s Dopplerovým červeným posunem.

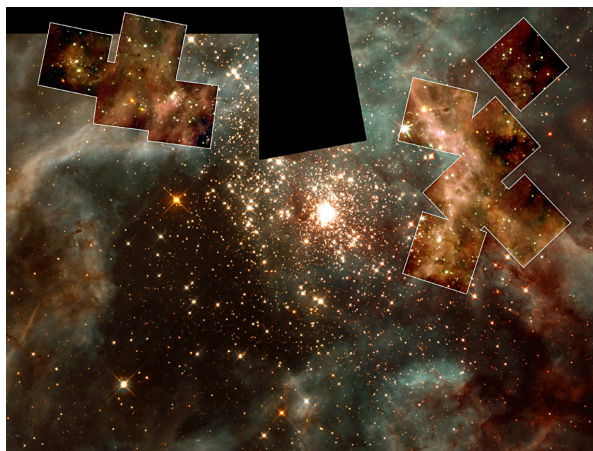


Obrázek 18.3: Nahoře: Působení mezihvězdného prachu na procházející záření. Dole: Záběry temné mlhoviny Barnard 68 v souhvězdí Hadonoše na snímcích z VLT na ESO. Vlevo je snímek v optické a vpravo v infračervené oblasti spektra. Zdroj: Chaisson/McMillan: *Astronomy Today*. Pearson a ESO.

18.2 Akt zrození aneb 7 kroků ke vzniku hvězdy

Hvězdy jsou základními stavebními kameny ve vesmíru. Měli bychom tedy vědět odkud se vzaly, jak se vyvíjejí a jak zaniknou. Vývoj hvězd je v každém případě nevratný proces. Ale koncem vývoje jedné hvězdy začíná vlastně vývoj hvězd(y) další generace. Ve vesmíru funguje prakticky dokonalá recyklace. Uvědomme si, že i všechny věci, které nás obklopují, dokonce i my sami jsme složeni z částic, které kdysi dávno byly součástí hvězd. Z. Mikulášek to vyjádřil tvrzením, že člověk je jen myslícím prachem supernov. Cesta částic z hvězdného nitra až k lidskému tělu je však hodně dlouhá.

Detailní odpověď popisující důkladně mechanismy vývoje hvězd i samotný „motor“ hvězdného vývoje je nad rámec tohoto kurzu, prozatím vystačíme s tvrzením, že vývoj (osamocených) hvězd je diktován změnami jejich chemického složení, k nimž dochází v důsledku jaderných reakcí probíhajících v nitru hvězdy (viz kapitola 16.5). Tyto reakce jsou, jak víme, také hlavním zdrojem energie hvězdy. Jejich roli se budeme věnovat podrobněji, ale už nyní můžeme konstatovat: jaderné reakce probíhají zejména v jádru hvězd, stav jádra tak určuje zářivý výkon, celkovou stavbu i vývoj hvězdy. Jaké reakce se tam odehrávají a jak rychle, to závisí především na počáteční, dalo by se říci



Obrázek 18.4: Místo zrodu velmi hmotných hvězd, mlhovina 30 Doradus. Zdroj: HST, NASA.

porodní, hmotnosti hvězdy. Začněme tedy popis hvězdného vývoje jejich vznikem ve hvězdné porodnici. Než se ale narodí hvězda, je třeba udělat 7 kroků, projít sedm stádií prenatalního vývoje hvězdy:

1. Fragmentace oblaku mezihvězdné látky.
2. Samostatný kolaps fragmentu.
3. Vznik protohvězdy (konec fragmentace).
4. Kelvinova-Helmholtzova kontrakční fáze.
5. Pobyť na Hayashiho stopě.
6. Zážeh (zrození nové hvězdy).
7. Dosednutí hvězdy na hlavní posloupnost.

Výše zmíněné kroky jsou nezbytné k tomu, aby se ustavila jednak hydrostatická rovnováha, kdy je vyrovnána gravitační síla s gradientem tlaku ve vznikající protohvězdě, a jednak tepelná rovnováha, kdy hvězda vyzáří tolik energie, kolik se vyrobí v jejím jádru. Tepelná rovnováha je ustavena ve fázi těsně před dosednutím nové hvězdy na hlavní posloupnost.

Tabulka 18.1: Počáteční fáze vývoje hvězdy slunečního typu.

Fáze	doba trvání fáze [roky]	centrální teplota [K]	povrchová teplota [K]	centrální hustota [částice/m ³]	rozměr [km]	objekt
1	$2 \cdot 10^6$	10	10	10^9	10^{14}	mezihvězdný oblak
2	$3 \cdot 10^4$	100	10	10^{12}	10^{12}	část oblaku -"/protohvězda
3	10^5	10^4	100	10^{18}	10^{10}	
4	10^6	10^6	3000	10^{24}	10^8	protohvězda
5	10^7	$5 \cdot 10^6$	4000	10^{28}	10^7	protohvězda
6	$3 \cdot 10^7$	10^7	4500	10^{31}	$2 \cdot 10^6$	hvězda
7	10^{10}	$15 \cdot 10^6$	6000	10^{32}	$1,5 \cdot 10^6$	hvězda hlavní posloupnosti

18.2.1 Vznik protohvězdy

Ke vzniku hvězdy potřebujeme především dostatečné množství stavebního materiálu. Ten se, jak víme, nachází v mezihvězdném prostředí v podobě mračen plynu a prachu. Hvězdné porodnice budeme hledat právě tam, kde se nachází velké množství mezihvězdné látky. V horkém, řídkém, difúzním atomárním vodíku jsou „vložená“ obří neforemná oblaka chladného, relativně hustého molekulárního vodíku. V anglické literatuře se označují jako GMC (z *giant molecular cloud*). Parametry těchto obřích molekulárních mračen jsou vskutku úctyhodná. Rozměry se pohybují mezi 10 až 50 parseky (30 až 160 ly). Zatímco malé zárodečné oblaky mají hmotnosti řádově srovnatelné s hmotností Slunce, obří molekulová mračna mohou mít až $10^7 M_{\odot}$. Jejich hustota je zpravidla stovky až tisíce částic v jednom centimetru krychlovém, v místech zhuštění až 10^6 částic/cm³.¹ V průměru má zárodečný molekulární mrak mezihvězdné látky hustotu zhruba 10^{20} krát menší než hvězda, která z něj vznikne. Připomeňme, že naprostá většina zárodečné látky je tvořena vodíkem (někdy je to až 99 %). Mezihvězdný prach může tvořit jen 1 až 10 % látky. Zpravidla několik procent zárodečného materiálu zabírá helium a jen zlomek připadá na těžší prvky. Metalicita této zárodečné směsi o teplotě jen kolem 15 K je ale velmi důležitá a rozhoduje o tom, jak se obří molekulový oblak rozdělí, fragmentuje na jednotlivé zárodečné mlhoviny pro vznik hvězd. Z jednoho oblaku mohou dle jeho velikosti vzniknout desítky až tisíce nových hvězd. V poslední době se ukazuje, že naprostá většina hvězd, ne-li všechny hvězdy v naší Galaxii vznikly v otevřených hvězdokupách.

Na počátku vývoje můžeme nalézt obří molekulový mrak GMC v hydrostatické rovnováze. Proti gravitačnímu smršťování působí gradient tlaku tvořený různými složkami, přispívá k němu gradient tlaku plynu, teplota materiálu, jeho pohyb, rotace kolem středu oblaku, magnetické pole a pod. Matematicky se tato rovnováha pro stabilní gravitačně vázaný systém dá zapsat jako tzv. viriálový teorém

$$2K + U = 0, \quad (18.2)$$

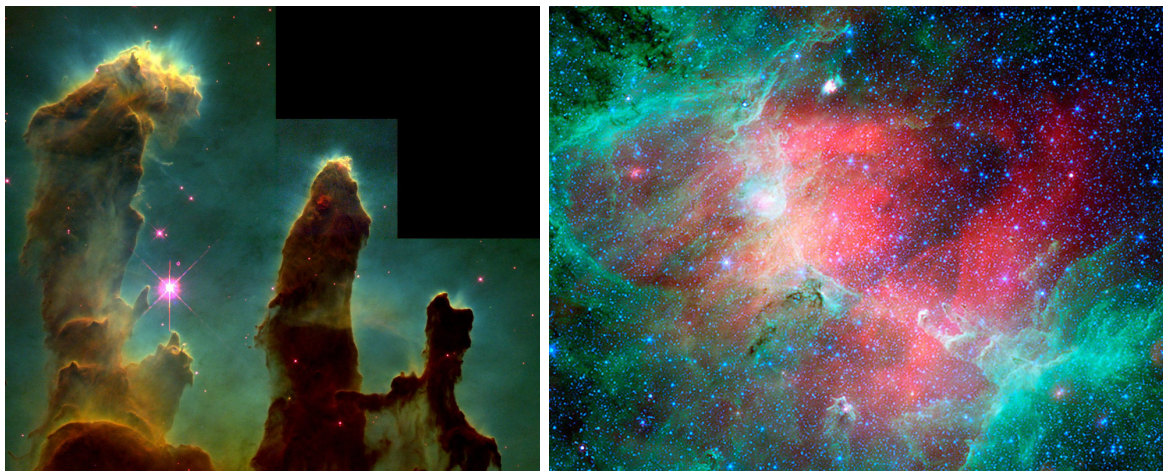
kde K je střední kinetická energie oblaku a U jeho střední potenciální energie².

Z poklidného rovnovážného stavu se GMC dostane poměrně náhle změnou vnějších podmínek. Nezbytným impulsem zvenčí může být srážka s jiným mračnem, rázová vlna vzniklá výbuchem blízké supernovy, případně blízký vznik velmi hmotné hvězdy spektrálních typů O nebo B, ale také jím může být průchod mračna spirálními rameny Galaxie. Výsledek takového vnějšího působení je ale stejný, vzniklá nestabilita oblaku vede k tomu, že převáží gravitace a začíná gravitační kolaps mračna. Velmi zjednodušeně (a zjevně nereálně) se zde většinou předpokládá, že částice GMC podléhající gravitačnímu kolapsu padají do středu volným pádem a veškerá získaná energie se vyzáří, takže teplota oblaku se nemění. Doba volného pádu nezávisí na počátečním rozměru mračna, ale jen nepřímo úměrně na počáteční hustotě. Jestliže budeme uvažovat počáteční oblak jako homogenní, doba kolapsu bude pro všechny části oblaku stejná a hustota během něj poroste všude stejnou měrou. Takto probíhající prvotní fáze se zpravidla označuje jako *homologický kolaps*. Samotný GMC ale není homogenní, obsahuje

¹Pro srovnání v pozemských laboratořích se prostředí s počtem 10^4 až 10^9 molekul/cm³ považuje za ultravysoké vakuum.

²Střední hodnoty jsou získány průměrováním v čase.

malé „hrudky“, zahuštěná místa o rozměrech zhruba $0,1 \text{ pc}^3$. Pak ovšem bude doba volného pádu kratší u míst s větší hustotou, takže u zmíněných zhustků proběhne gravitační kolaps dříve a rychleji. Tím ovšem dojde k dělení mračna, jeho fragmentaci na řadu částí s hustšími jádry o hmotnostech srovnatelných s hmotností Slunce.⁴ V každém případě délka tohoto prvního kroku ke vzniku hvězdy trvá řádově statisíce až miliony let.



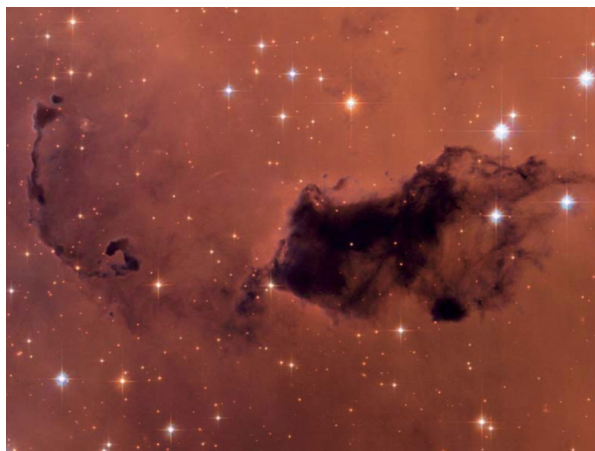
Obrázek 18.5: Snímek tzv. pilířů stvoření z HST z roku 1995 (vlevo) ukazuje vypařující se plynné globule, které se vynořují z pilířů molekulárního plynu a prachu v oblasti Orlí mlhoviny a otevřené hvězdokupy M16. V pilířích několik světelných let dlouhých dochází ke vzniku nových hvězd. Intenzivní záření jasných hvězd na konci každého pilíře způsobuje, že se materiál s nízkou hustotou odpařuje a zanechává hvězdné porodnice plné odkrytých hvězdných zárodků. V roce 2007 zachytil stejnou oblast v infračerveném záření Spitzerův kosmický dalekohled (snímek vpravo). Tři známé pilíře poblíž centra snímku jsou obklopeny prachem ohřátým pravděpodobně výbuchem blízké supernovy. Zdroj: NASA.

V druhém kroku při vzniku hvězdy budeme sledovat vývoj jediného fragmentu z původního obřího molekulového mračna a to fragmentu, z něhož posléze vznikne hvězda velikosti našeho Slunce. V dalším tedy budeme popisovat a mít na mysli vznik hvězdy slunečního typu. Zárodečný chomáč hmoty je v takovém případě asi stokrát větší než Sluneční soustava a jeho hmotnost je mezi 1 až $2 M_{\odot}$. Hustota ve středu této plynné koule dosahuje přibližně 10^{12} částic/ m^3 a centrální teplota se zvýšila na zhruba 100 K. Oproti tomu teplota vnějších částí fragmentu zůstává stále nízká, materiál je opticky tenký a tak prakticky veškerá energie získaná v nitru zárodečného chomáče snadno unikne do prostoru.

Náš prvotní předpoklad, že smršťování je izotermické ale není zjevně správný. Část energie přece jen zůstává v nitru kolabujícího fragmentu. V centru tak roste nejen hustota, ale i teplota. Výsledkem je zastavení procesu fragmentace, nicméně gravitační smršťování velmi rychle pokračuje i nadále a to až do chvíle, kdy materiál v centru začne být neprůhledný. V době, kdy se původní fragment smrští přibližně na velikost naší Sluneční soustavy, jsou fotony odnášející energii z centra zachyceny do neprůhledné

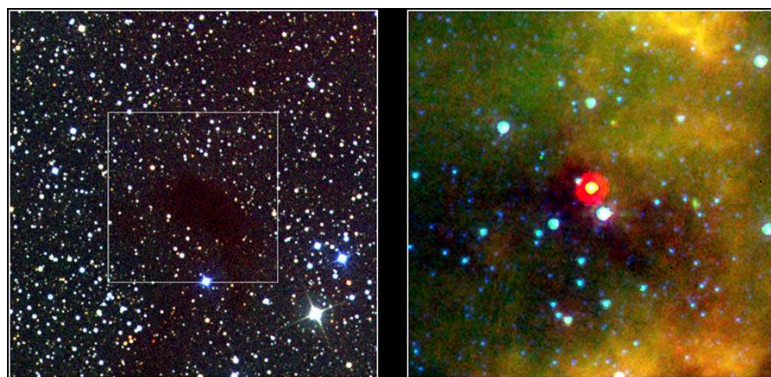
³V anglicky psané literatuře se těmito zhustkům říká „clumps“.

⁴V angličtině se tento proces označuje jako „inside-out collapse“.

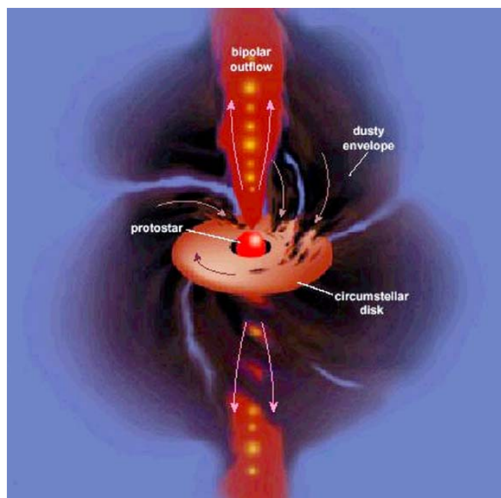


Obrázek 18.6: V infračerveném oboru vyhlíží jinak tmavá globule docela prapodivně: toto je pohled na globuli v emisní mlhovině IC 1396 v souhvězdí Cephea, jak jej zprostředkoval Spitzerův kosmický dalekohled v prosinci 2003.

pasti. Teplota a tlak centra začnou výrazněji růst až na 10 000 K a zhruba 10^{18} částic/m³. V centrální části se ustaví hydrostatická rovnováha, vzniká protohvězda. Z vnějších oblastí, které jsou stále chladnější a opticky tenké, dopadají na zárodek hvězdy další a další částice. Hmotnost zárodka stále roste, ale současně se stále mírně smršťuje. Zachytit nějaký objekt v této fázi vývoje se podařilo až nedávno (Chen et al., 2010) týmu, který použil výsledky družice Spitzer a Submilimetrové observatoře SMA. Objekt L1448-IRS2E lze považovat za skutečné hvězdné embryo. Je, zdá se, ještě tak mladé, že ani nedosáhlo stádia protohvězdy, takže jde velmi pravděpodobně o jeden z nejmladších pozorovaných hvězdných objektů. Pro okolí je vznikající protohvězda ukryta v zárodečném materiálu, takže je velmi slabá a navíc, jak tato fáze, tak i samotná fáze protohvězdy jsou velmi krátké, jen 10^4 až 10^5 let.



Obrázek 18.7: Srovnání pohledu na protohvězdu L1014 ve viditelném světle (vlevo) a v infračerveném záření ze Spitzerova dalekohledu (vpravo). Jasný žlutý objekt v centru obrázku je vznikající hvězda, kterou pozoroval Spitzer díky své schopnosti proniknout opticky hustým materiálem v okolí protohvězdného jádra. Červený kroužek kolem objektu je artefakt, který vznikl kvůli omezené prostorové rozlišovací schopnosti dalekohledu na 24 mikronech. Zdroj: NASA.

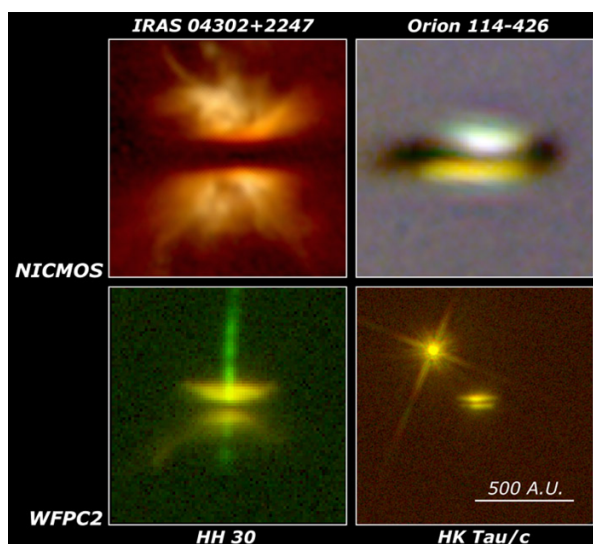


Obrázek 18.8: Model vznikající hvězdy s diskem. Zdroj: Greene (2001).

V centru protohvězdy se ustaví hydrostatická rovnováha. Ta ovšem neplatí v celém tělese a není zde ustavena ani rovnováha teplotná. Zatímco v centru protohvězdy a jejím blízkém okolí se při teplotě vyšší než 2000 K vypaří prachové částice, na vnějších oblastech zůstávají podstatně chladnější. Protože protohvězda je stále „uložena“ hluboko v nitru zárodečné látky, lze ji pozorovat jen v infračervené oblasti spektra (viz obrázek 18.7).

Průběh kolapsu zárodečné látky a vznik protohvězdy ovlivňuje nejen gravitace ale i působení dalších sil. Při smršťování zárodečného materiálu se zachování moment hybnosti, to znamená, že celý fragment se se zmenšujícím rozměrem více roztáčí. Částice v oblasti pólů pak padají jen volným pádem,

zatímco na rovníku jsou bržděny odstředivou silou, což vede k tomu, že se celý zárodečný chomáč zplošťuje. V rovníkové oblasti se vytváří disk kolem protohvězdy, jak je vidět na modelu na obrázku 18.8. Takové disky tvořené prachem a dalšími zbytky zárodečného materiálu skutečně u velmi mladých hvězdných objektů pozorujeme (obrázek 18.9). Právě disky jsou odpovědné za většinu záření vycházejícího od protohvězdy. Zdrojem energie je samozřejmě akrece. Díky ní protohvězda během typicky zhruba 100 000 let dosáhne své konečné počáteční hmotnosti. Souběžně s akrecí dochází ke stabilnímu odtoku materiálu v podobě silného větru, který z polárních oblastí vznikající hvězdy (viz obrázky 18.8, 18.10). Právě tyto polární výtrysky nám pomáhají odhalit místa, kde



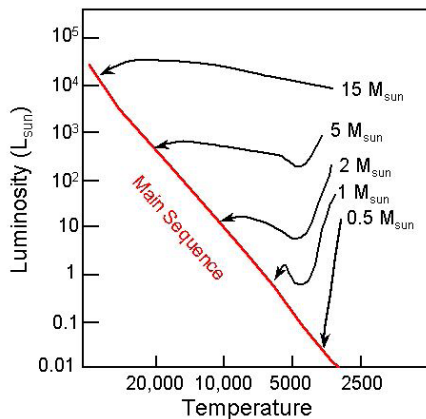
Obrázek 18.9: Na záběrech z HST jsou blízké disky kolem vznikajících hvězd. Všechny snímky mají stejné měřítko, každý z nich ukazuje oblast asi 20krát větší než je průměr oběžné trajektorie Neptunu. Zdroj: NASA.

právě vznikají nové hvězdy. Pro astronomy fungují jako signalizační majáky, ale pro samotnou protohvězdu slouží k odklizení přebytečné hmoty a energie za systému. Ne-spotřebovaný materiál v okolí vznikající hvězdy je zlikvidován zhruba do 6 miliónů let. Část spadne na protohvězdu, část poslouží k formování planetární soustavy a zbytek je později odvanut z okolí hvězdy po zapálení jaderných reakcí v jejím centru.



Obrázek 18.10: HH 46/47 je jeden mladých hvězdných objektů (YSO), které vytvářejí bipolární výtrysky. Centrální protohvězda leží v tzv. Bokově globuli, ve vizuální oblasti není pozorovatelná (vložený obrázek). Zdroj: NASA.

18.2.2 Od protohvězdy k hvězdě hlavní posloupnosti



Obrázek 18.11: Vznikající hvězdy v HR diagramu v Kelvinově - Helmholtzově kontrakční fázi. Zdroj: <http://www.astronomy.ohio-state.edu/>.

Protohvězdy září, protože jsou teplejší než okolí, ale většina tohoto záření přichází z jejich disků. Centrální teplota je stále příliš malá na to, aby zde probíhaly jaderné reakce, takže jediným zdrojem, který dotuje energetické výdaje protohvězdy, je akrece. Na rozdíl od předchozí fáze rychlé kontrakce, nyní probíhá smršťování podstatně pomaleji. Období vývoje hvězdy od počátku této fáze až po dosednutí na hlavní posloupnost nulového stáří ZAMS⁵ se označuje jako Kelvinova-Helmholtzova kontrakční fáze. Zdrojem energie pro zahřívání protohvězdy a její vyzařování je gravitační kolaps a tedy potenciální energie. Podle viriálového teorému se polovina takto získané energie vyzáří a polovina využije ke zvýšení vnitřní energie systému, tedy k jeho zahřátí. Porovnáním vyzářené energie L a potenciální energie zárodečného chomáče hmoty o poloměru R a hmotnosti M lze odvodit délku

⁵Běžně užívaný akronym vznikl z anglického označení Zero Age Main Sequence, tedy skutečně hlavní posloupnost nulového stáří.

Kelvinovy-Helmholtzovy kontrakční fáze

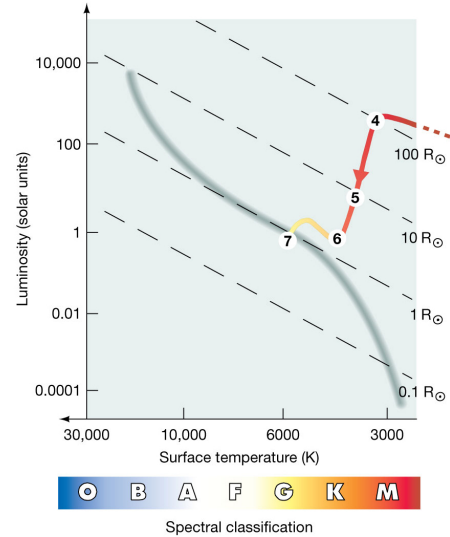
$$\tau_{\text{KH}} \propto \frac{M^2}{RL}. \quad (18.3)$$

Pro hvězdu o hmotnosti Slunce je to přibližně $3 \cdot 10^7$ let. V průběhu této fáze dochází v důsledku smršťování k dalšímu růstu hustoty a teploty v centru. Při dosažení teploty zhruba 0,5 až 5 milionů kelvinů se nitru vznikající hvězdy zapalují první jaderné reakce, při nichž postupně v relativně krátké době vyhoří deuterium, lithium a bór. Nejedná se ale o stabilní jaderné reakce. Jejich výsledkem je jednak vznik hélia a jednak zpomalení kontrakce hvězdy⁶. Budoucí hvězda o velikosti Slunce má rozměry srovnatelné s oběžnou trajektorií Merkuru a zářivý výkon zhruba $1\,000 L_{\odot}$, a to i přesto, že povrchová efektivní teplota T_{eff} je ve srovnání se Sluncem jen poloviční (kolem 3 000 K).

Kelvinova-Helmholtzova časová škála také v podstatě určuje čas, za který se vznikající hvězda dostane v HR diagramu na hlavní posloupnost (viz obrázek 18.11). Část této cesty v HR diagramu absolvuje protohvězda po tzv. Hayashiho stopě, jak je vyznačeno mezi body 4 až 6 na obrázku 18.12. Protohvězda se v této fázi vývoje stále smršťuje až na velikost zhruba desetinásobku dnešní velikosti Slunce⁷. Centrální teplota dosáhne $5 \cdot 10^6$ K, ale žádné trvalé jaderné reakce v centru neprobíhají. Na povrchu se ustálila teplota na 4 000 K, dále už téměř neroste. Se zmenšujícím se poloměrem to znamená, že zářivý výkon klesá až na zhruba $10 L_{\odot}$. V HR diagramu tak protohvězda „klesá“ dolů do oblasti nižších zářivých výkonů, ale při zachované povrchové teplotě (obrázky 18.11, 18.12). Tento proces trvá zhruba jeden milion let.

Podmínky ve hvězdě vedou nyní k tomu, že materiál protohvězdy je prakticky neprůhledný, energie se přenáší mohutnou konvekcí, která zasahuje celý objekt. Protohvězda je tak dokonale promíchána a je chemicky stejnorodá. Konvekce ale s sebou nese velmi silnou povrchovou aktivitu a silný hvězdný vítr. Protohvězda se v této fázi vývoje podobá objektu T Tauri, proto je jako fáze T Tauri někdy označováno celé toto období vývoje.

Ani ve stádiu T Tauri není v centru vznikající hvězdy dostatečná teplota k zapálení a trvalému udržení jaderných reakcí. Pro její dosažení je v této fázi možná překvapivě dostatečně intenzivní vyzařování z povrchu. Do okolního prostoru odchází část tepelné energie z nitra a tato ztráta umožní, aby gravitační smršťování pokračovalo. Zisk energie z gravitačního kolapsu se přitom dělí rovným dílem. Jak víme, dle viriálového teorému



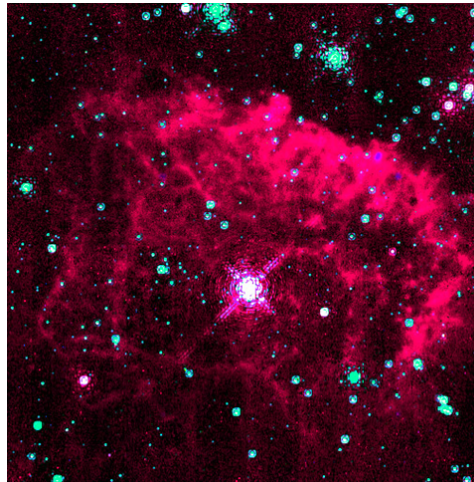
Obrázek 18.12: Vývojová cesta nově vznikající hvězdy HR diagramem. Úsek mezi body 4 až 6 nazýváme Hayashiho vývojová stopa. Vpravo od této linie je v HRD oblast, kde nemůže existovat stabilní objekt. Zdroj: Chaisson & McMillan (2005).

⁶Pro zárodky nízké hmotnosti vede dokonce k zastavení kontrakce.

⁷Připomínáme, že stále v této části hovoříme o vzniku hvězdy srovnatelné se Sluncem nebo chcete-li o vzniku Slunce. Pro menší nebo větší hvězdy budou uváděné údaje samozřejmě odlišné.

se polovina vyzáří a polovina použije na zvýšení vnitřní energie. Po zhruba 30 miliónech let se hvězda srovnatelná se Sluncem dopravuje k centrální teplotě vyšší než 10 milionů kelvinů a to už stačí pro trvalé hoření vodíku v proton-protonovém řetězci. Zapálením těchto reakcí se zrodila nová hvězda. Její hmotnost je zhruba sluneční⁸, poloměr je o málo větší (zhruba 1 000 000 km) a povrchová teplota menší (4500 K), než jaké má Slunce dnes. Také zářivý výkon je kvůli chladnější fotosféře menší, jen asi dvě třetiny současného zářivého výkonu Slunce. Hvězda se nyní nachází v bodě 6 na HR diagramu na obrázku 18.12. Zatím ještě stále není plně v hydrostatické rovnováze, její vnitřní stavba dosud není ukončena. Stačí ale nějakých 30 miliónů let, aby v jádru dosáhla hustota 10^5 kg/m^3 , teplota $15 \cdot 10^6 \text{ K}$ a povrchová teplota vystoupala na přibližně 6 000 K. Hvězda už není plně konvektivní, energie z nitra se předává zářivou difúzí. V celé hvězdě se konečně ustaví hydrostatická a tepelná rovnováha. Hvězda dosedla na hlavní posloupnost, přesněji na hlavní posloupnost nulového stáří (viz bod 7 na obrázku). Její parametry odpovídají zhruba současným parametrům Slunce. Po dobu na hlavní posloupnosti se budou měnit jen velmi, velmi zvolna.

Celý vývoj hvězdy slunečního typu od počátečního mračna a jeho fragmentace až po dosažení hlavní posloupnosti (etapy 1-7) trval 40-50 miliónů let, což z předpokládané celkové doby života Slunce kolem 10 miliard let představuje méně než jedno procento. Pro lepší představu, pokud bychom celý život Slunce smrskli do jediného dne, pak počáteční fáze jeho vývoje až po hlavní posloupnost by trvaly jen 6 až 7 minut.



Obrázek 18.13: Pistolová hvězda na snímku pořízeném HST pomocí infračervené kamery. Hvězda je blízko středu Galaxie ukryta v závoji mezihvězdného plynu a prachu. Nicméně její zářivý výkon je $10^7 L_{\odot}$. Zdroj: NASA.

18.3 Protohvězdy rozdílné hmotnosti

Předchozí popisu vzniku hvězdy byl zejména popisem hvězdy srovnatelné se Sluncem. Podívejme se nyní trochu podrobněji na zvláštnosti vývoje hvězd s menší a větší počáteční hmotností.

⁸Pořád uvažujeme hvězdu, která je srovnatelná se Sluncem, nebo chcete-li mluvíme o vzniku Slunce.

18.3.1 Protohvězdy s nadváhou

Začneme s nadprůměrnými hvězdami. Mírně nadprůměrné je i naše Slunce, ale teď budou zajímat opravdoví cvalíci mezi hvězdami. Obecně platí, že čím je počáteční hmotnost hvězdy větší, tím kratší život ji čeká a tím rychleji probíhá jednotlivá období svého života. Celkový čas od počáteční fragmentace oblaku až po dosednutí hvězdy na hlavní posloupnost je například pro hvězdu o hmotnosti $3 M_{\odot}$ asi 50krát kratší než pro Slunce, tedy necelý milion let. Pro hvězdu o hmotnosti $30 M_{\odot}$ však počáteční vývojové fáze zaberou méně než 10 000 let. Pro takové hvězdy gravitační kolaps způsobí nárůst centrální teploty až na desítky milionů kelvinů, takže dojde rychle k zapálení vodíku a jeho hoření v proton-protonovém řetězci a posléze i v CNO cyklu. Masivní hvězda se tak velmi rychle rozzáří, ionizuje látku a odfoukne zbylý materiál ze svého okolí.

Horní hranice hmotnosti hvězd se udává různě, většinou v rozmezí $100\text{--}150 M_{\odot}$. Má se totiž za to, že pro objekty nad touto hranicí by jádro bylo příliš žhavé, takže by gradient tlaku záření překonal gravitaci, hvězda by se stala nestabilní a sama by se začala rozpadat na menší části. Velmi hmotné hvězdy jsou v naší galaxii velmi vzácné. Mezi supertěžké hvězdy v naší Galaxii patří například hvězda WR 102ka s hmotností větší než $150 M_{\odot}$, η Carinae nebo Pistolová hvězda na obrázku 18.13. V sousední galaxii Velkém Magellanově mračnu nalezneme ale celou hvězdokupu obřích hvězd R136. Nejtěžší hvězdy zde přesahují výše zmíněný limit velmi výrazně - R136a1 má mít hmotnost $265 M_{\odot}$, R136a2 $195 M_{\odot}$ a R136c $175 M_{\odot}$. Jde o trojlístek nejhmotnějších dosud známých hvězd ve vesmíru.



Obrázek 18.14: Jen asi 100 000 let stará hvězdokupa R136 tvořená velmi hmotnými hvězdami v mlhovině Tarantule v LMC obsahuje nejhmotnější známou hvězdu R136a1, která je 265krát těžší než naše Slunce. Zdroj: ESO, Crowther et al. (2010).

18.3.2 Subtilní protohvězdy

V případě hvězd o hmotnosti menší než sluneční, tedy pro průměrné hvězdy naší galaxie a menší, platí stejná závislost rychlosti vývoje na počáteční hmotnosti. Zatímco gravitační kolaps Protoslunce trvá asi 30 milionů let, pro hvězdy s hmotností $0.2 M_{\odot}$ až 1 miliardu let! Nárůst teploty v centru je při takto pomalé kontrakci velmi pozvolný.

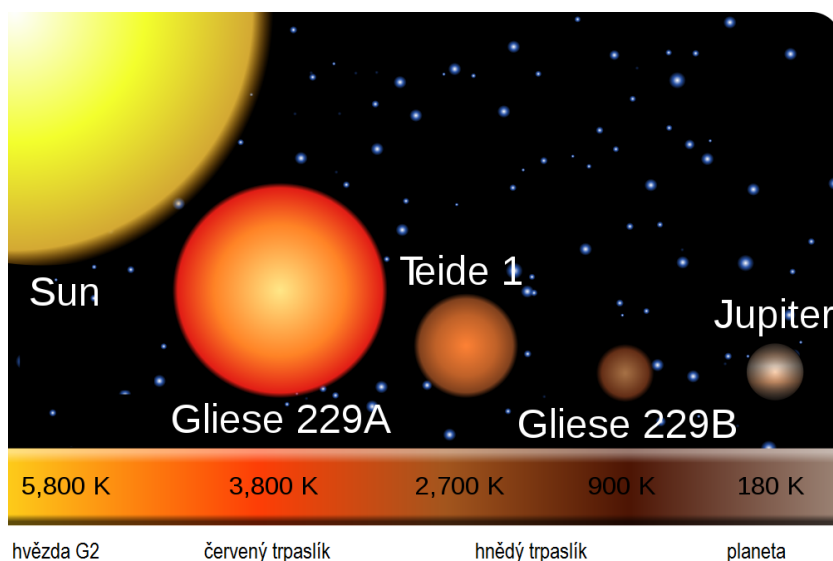
Jakmile ale teplota jádra dosáhne přibližně 10^7 K, spustí proton-protonový řetězec hoření vodíku. Hvězdný vítr pak odvane zbytky zárodečného kokonu hvězdy i hvězdného disku a hvězda zvolna dosedá na hlavní posloupnost.

18.3.3 Objekty pod míru

Smůlu mají objekty, které mají hmotnost zhruba $0.075 M_{\odot}$ a menší. Jsou totiž tak malé, že se v jejich jádru nikdy nezapálí jaderné reakce, při nichž by došlo k syntéze vodíku. Nemůžeme zde mluvit o jaderném hoření jako u objektů s větší hmotností. V objektu o hmotnosti do zhruba 80 hmotností Jupiteru se může spalovat lithium, případně deuterium, ale jen krátkodobě a navíc k energetické produkci objektu to přispívá jen minimálně. Hlavním zdrojem energie je energie získaná z gravitačního kolapsu.

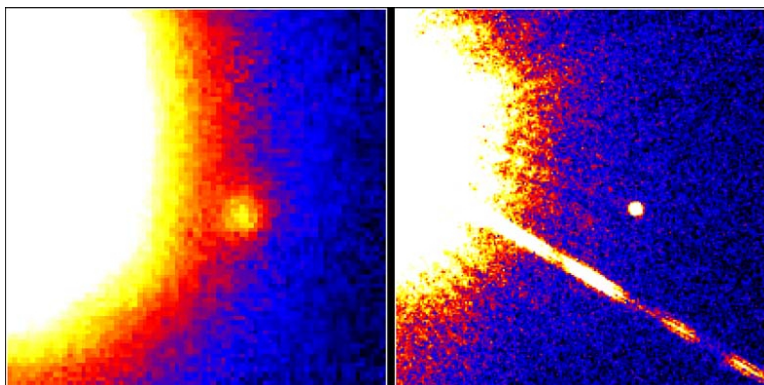
Objekt, o kterém nyní mluvíme, označila před lety Jill Cornell Tarterová jako *hnědý trpaslík*⁹. Hnědí trpaslíci se tedy mohou podobat „superjupiterům“ z rodiny exoplanet, ale existuje tu hranice, která obě skupiny těles odděluje. Přestože se o podobu hranice mezi exoplanetami a hnědými trpaslíky vedou spory, všeobecně se akceptuje jako limitní hmotnost $13 M_J$. Objekty s hmotností menší pak řadíme mezi exoplanety.

Přestože se o objektech s hmotností hnědých trpaslíků začalo spekulovat v 60. letech minulého století, k objevu prvních exemplářů došlo až v polovině 90. let – Teide 1 (Rebolo et al., 1995), Gliese 229B (Nakajima et al., 1995). Detekce hnědých trpaslíků je velmi obtížná, protože jsou velmi slabí a září v infračervené oblasti spektra. V současné době je jich známo několik set, ale s rozvojem pozorovací techniky počet rychle roste.



Obrázek 18.15: Porovnání velikostí Slunce, hnědých trpaslíků Gl 229B, Teide 1 a Jupiteru. Převzato z NASA a upraveno.

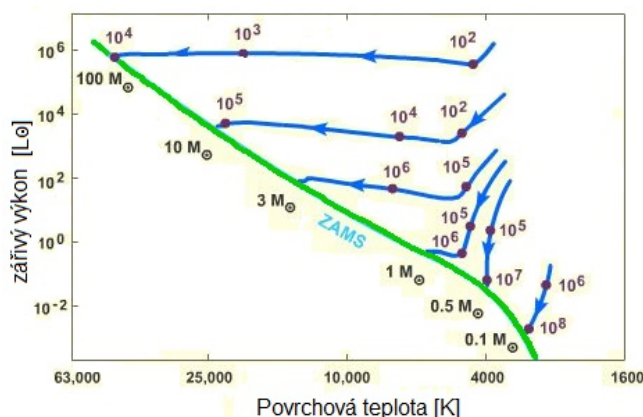
⁹Autorka termínu se dlouhá léta věnovala hledání mimozemských civilizací a stala se také předobrazem hlavní hrdinky románu Carla Sagana a posléze i stejnojmenného filmu Kontakt.



Obrázek 18.16: První snímky hnědého trpaslíka pořízené na observatoři Mount Palomar (27. 10. 1994, vlevo) a HST (17.11.1995, vpravo). Hnědý trpaslík Gliese 229B (GL229B) je malý souputník chladné trpasličí hvězdy Gliese 229, která se nachází ve vzdálenosti 19 ly od Země v souhvězdí Zajíce. V době objevu byl tento hnědý trpaslík nejslabším pozorovaným objektem, který obíhá hvězdu. Zdroj: NASA.

18.4 Hvězdy na hlavní posloupnosti

Poloha hvězdy na HR diagramu do značné míry vypovídá o jejím vývojovém stádiu. Mladé hvězdné objekty (YSO) se pohybují v pravé horní části HRD a dle své počáteční hmotnosti buď klesají po Hayashiho linii dolů k hlavní posloupnosti nebo se k ní přibližují zprava (viz obrázek 18.17). Dosednutí hvězdy na hlavní posloupnost HR diagramu, resp. hlavní posloupnost nulového stáří ZAMS, signalizuje, že se ve hvězdě ustavily rovnovážné stavy. Ve hvězdě nyní panuje hydrostatická rovnováha, při níž je působení gravitace a gradient tlaku v rovnováze, hvězda se tak ani nerozpíná ani nesmršťuje. Jaderné hoření vodíku v jádru jako hlavní a v podstatě jediný zdroj energie napomohlo ustavení energiové rovnováhy, kdy přenos energie z jádra a její vyzáření je v rovnováze s produkcí energie. Jinak řečeno, ztráty energie hvězdy vyzářováním do okolí jsou velmi přesně nahrazovány produkcí energie v nitru. Vyrábí se přesně tolik energie, kolik je třeba.



Obrázek 18.17: Fáze kontrakce hvězdy před hlavní posloupností. Převzato z webu <http://csep10.phys.utk.edu/> a upraveno.

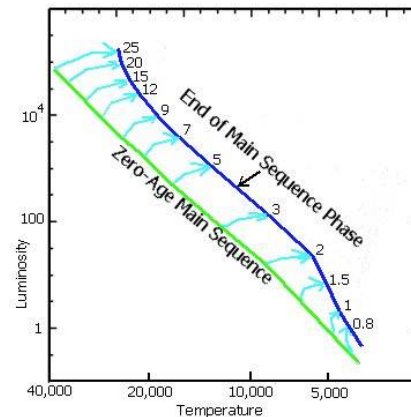
veličiny									jednotky
T_{ef}	30 20 15 10 8 6 5 4								kK
spekt	O5 B0 B5 A0 F0 G0 K0 M0								
M_V	-4 -2 0 2 4 6 8								mag
M_b	-8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8								mag
L	E5 E4 E3 E2 10 1 E-1								L_S
M	30 20 10 5 3 2 1 0,6								M_S
R	15 10 5 3,5 2 1 0,8								R_S
ρ	0,02 0,1 0,3 0,5 1 2								$t \cdot m^{-3}$
τ	E6 E7 E8 E9 E10 E11								rok
$(B-V)$	-0,3 -0,2 0,0 0,2 0,5 1,0								mag

Obrázek 18.18: Parametry hvězd na hlavní posloupnosti. Hvězdy hlavní posloupnosti. T_{ef} efektivní teplota hvězdy, spektrální třída, M_V absolutní vizuální hvězdná velikost, M_b absolutní bolometrická hv. velikost, L zářivý výkon, M hmotnost, R poloměr, ρ střední hustota, τ doba setrvání na hlavní posloupnosti, $(B-V)$ barevný index. Převzato z Pokorný (2006).

Před stádiem hvězdy na hlavní posloupnosti se vlivem masivních konvektivních pohybů celá hvězda důkladně promíchala, můžeme tedy říci, že na počátku svého života má hvězda stejné složení ve fotosféře jako v nitru. Je to jediné období, kdy můžeme výsledky analýzy složení fotosféry hvězdy vztáhnout na celou hvězdu. Kdykoli později se tyto výsledky budou týkat výhradně jen atmosféry hvězdy, ale nikoli jejího nitra.

Na počátku je hvězda zpravidla tvořena z 60 až 90 procent z vodíku, 5 až 35 procent připadá na hélium a zbytek tvoří těžší prvky. Platí přitom, že, starší hvězdy mají zpravidla menší obsah těžších prvků, menší metalicitu. Od okamžiku zapálení jaderného hoření vodíku v nitru se ale postupně bude chemické složení hvězdy měnit. Můžeme říci, že právě změna chemického složení hvězdy je motorem dalšího vývoje.

Na hlavní posloupnosti hvězda stráví nejlepší léta svého života. Je to také nejdelší etapa její existence (až 85 %). Celkově jde o klidnou etapu bez nějakých překotných změn. Odpovídající charakteristiky hvězd hlavní posloupnosti lze najít na obrázku 18.18. Během pobytu na hlavní posloupnosti probíhá jaderné hoření vodíku v jádře. To způsobuje pozvolnou změnu chemického složení v jádře, kde ubývá vodíku a přibývá hélia. Velmi zvolna se mění také průměr a zářivý výkon hvězdy. Když se v nitru hvězdy zažehne jaderné hoření vodíku, hvězda dosedne na hlavní posloupnost nulového stáří ZAMS. Během pobytu na hlavní posloupnosti se hvězda pomalu posouvá napříč hlavní posloupností na její druhou stranu až k linii TAMS (z anglického Terminal-Age Main Sequence), vyznačující konec pobytu na hlavní posloupnosti a tedy konec vyčerpání vodíku v



Obrázek 18.19: Pohyb hvězdy po hlavní posloupnosti od ZAMS k TAMS. Zdroj: <http://www.uni.edu/morgans>.

jádře (viz obrázek 18.19). Dobu τ_{HP} , kterou hvězda s počáteční hmotností M stráví na hlavní posloupnosti, lze přibližně určit dle vztahu

$$\tau_{\text{HP}} = 10^{10} \left(\frac{1}{M} \right)^{2.5}, \quad (18.4)$$

kde hmotnost udáváme v hmotnostech Slunce. Několik vypočtených hodnot pro různé hvězdy udává tabulka 18.2. Opět můžeme vidět silnou závislost délky fáze hlavní posloupnosti na počáteční hmotnosti hvězdy. Důvod je zřejmý. Hmotnost přece, jak víme, rozhoduje o tom, jaký bude tlak a teplota v nitru hvězdy, a určuje tak i rychlost jaderného hoření. Čím intenzivnější jsou jaderné reakce v nitru, tím rychleji se zásoba vodíku v jádru hvězdy vyčerpá.

Naše Slunce je hvězdou spektrální třídy G2V. Dle modelů hvězdné stavby a hvězdného vývoje je hvězdou v nejlepších letech. Má za sebou asi polovinu etapy na hlavní posloupnosti. Do kolonky stáří můžeme zapsat 4.6 miliardy let.

Tabulka 18.2: Doba strávená na hlavní posloupnosti

Hmotnost [M_{\odot}]	Spektrální třída	Doba strávená na HP [roky]
25	O7	$6.4 \cdot 10^6$
20	O9	$8.1 \cdot 10^6$
15	B0	$11.6 \cdot 10^6$
12	B1	$16.0 \cdot 10^6$
9	B2	$26.4 \cdot 10^6$
7	B4	$43.1 \cdot 10^6$
5	B6	$94.3 \cdot 10^6$
3	A0	$351.7 \cdot 10^6$
2	A5	$1.1 \cdot 10^9$
1.5	F2	$2.7 \cdot 10^9$
1	G2	$9.4 \cdot 10^9$
0.8	K0	$22.8 \cdot 10^9$

18.5 Vývoj hvězd po opuštění hlavní posloupnosti

Konec klidu na HP

kdy k němu dojde? – až začne docházet palivo!

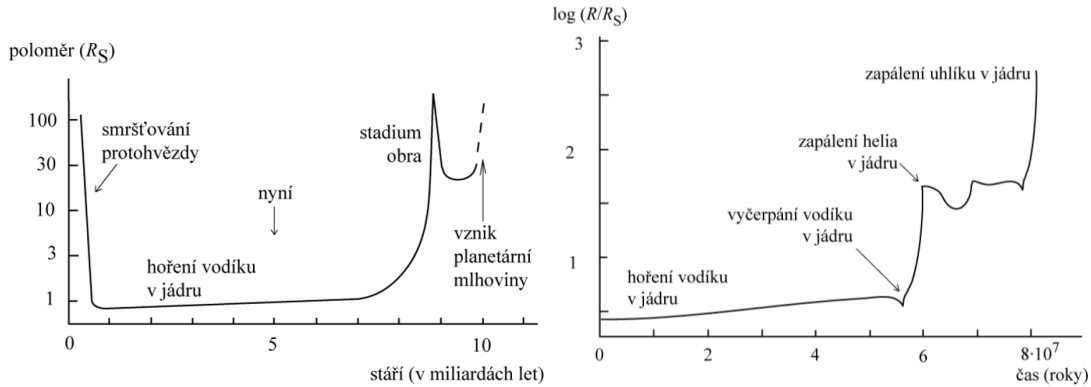
v centru jen cca 5 % H – > výrazné snížení výroby energie

=> smrštění jádra

=> místa s více H poklesnou hlouběji do teplejších míst

=> může se zapálit H ve slupce kolem jádra - *slupkové hoření vodíku*

Důsledky:



Obrázek 18.20: Změny velikosti Slunce a hvězdy o hmotnosti $5 M_{\odot}$ v průběhu vývoje. Převzato z Pokorný (2006).

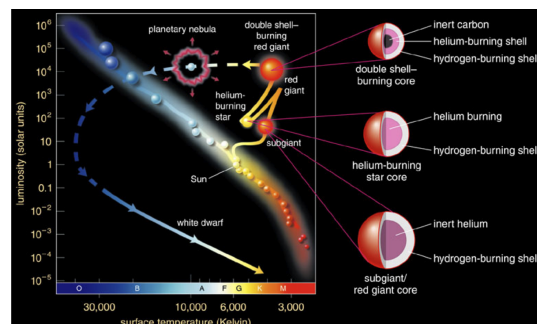
- jádro hvězdy - nadále se smršťuje a zahřívá – > vyšší produkce energie ve slupce
- obálka hvězdy – zvýšený tok energie zdola => rozpíná se a chladne => červený obr nebo veleobr (stěhování v HRD)

18.6 Závěrečná stadia vývoje hvězd

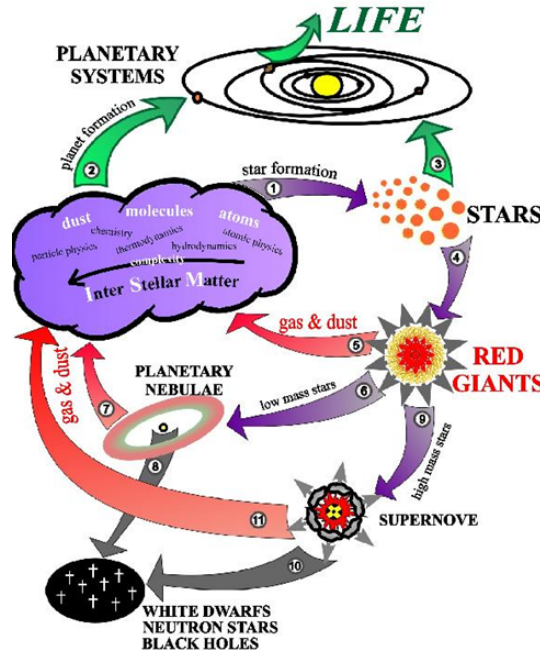
Hvězdní obři a veleobři

Senior zrychlí!

- ve fázi obra nebo veleobra - vývoj prudce zrychlí
- výrazné změny parametrů
- smršťování nitra hvězdy x rozpínání obálky
- při centrální teplotě $\sim 100 \cdot 10^6$ K – He – > C (3α proces)
- v obálce silná konvekce – silný hvězdný vítr – hvězda nestabilní (ztráty 30 - 85 % hmoty)



Obrázek 18.21: Vývojová stopa Slunce v HR diagramu po opuštění hlavní posloupnosti.



Obrázek 18.22: Schéma vývoje hvězdy.

18.7 Konečný osud hvězd

Osud – je dán hvězdě „do vlnku“ – počáteční hmotnost

Závěrečná stadia:

- stabilní (rovnovážná) – černý trpaslík (ČT), bílý trpaslík (BT), (neutronová hvězda NH, kvarková hvězda KH)
- nestabilní (nerovnovážná) – novy, super- a hyper-

18.7.1 Stabilní řešení - chladnoucí trpaslíci

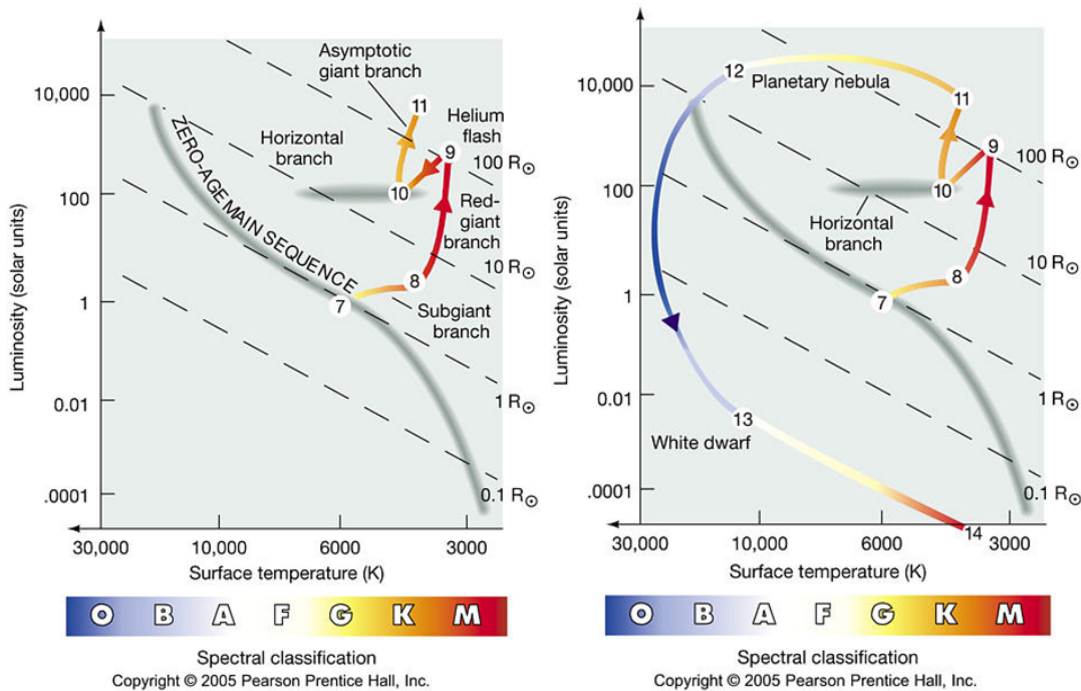
$M_{\text{poc}} < 0.075 M_{\odot}$ – hnědý trpaslík – \rightarrow vodíkový černý trpaslík

$0.075 < M_{\text{poc}} < 0.5 M_{\odot}$ – po vyhoření H v jádře – \rightarrow heliový černý trpaslík
máme důkazy?

$0.5 < M_{\text{poc}} < 11 M_{\odot}$ – zapálí se H a později i He

- hvězdný vítr odnese obal, zůstává žhavé hutné CO jádro, $M_j < 1.4 M_{\odot}$
- obálka – rozpínání - řádově $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$
- za 10 000 až 50 000 let - planetární mlhovina
- jádro – BT chladne – \rightarrow černý CO trpaslík

$M_{\text{poc}} > 11 M_{\odot}$ – postupně hoří v nitru i další prvky – až po Fe jádro
NH, ČD – vznik dramatický \Rightarrow nestabilní řešení



Obrázek 18.23: HRD - vývojové stopy hvězd po opuštění HP.

Subrahmanyan Chandrasekhar

obrázky - Planetární mlhoviny mají často velice zvláštní tvary, M27, M57

V naší Galaxii – jen asi 1500 planetárních mlhovin

Proč tak málo?

je to velmi krátké vývojové období

krátké období, jako když se línne kuře ze skořápky

18.7.2 Nestabilní řešení - supernovy, hypernovy

$M_{\text{poc}} > 11 M_{\odot}$ (ve stadiu obra $M > 8 M_{\odot}$)

- v jádru se postupně zapalují jaderné reakce až po Fe ($1.4 M_{\odot}; M_j < 3 M_{\odot}$)
- centrální oblasti zhroucení – > neutronová hvězda (řádově 10 km, M_{\odot})
- uvolněná energie – výbuch supernovy – většina energie v neutronech
- sup Ia – dvojhvězdný scénář – BT rozmetán – standardní svíčky
- pulsar – nesouhlas rotační osy a osy mg. pole - rádiové pulsy, přísně periodické

$M_{\text{poc}} > \text{cca } 50 M_{\odot}$ – Fe jádro $M_j > 3 M_{\odot} \Rightarrow$ kolaps se nezastaví – vzniká černá díra -
 uvolněná energie – výbuch *hypernovy* - SN1998bw

Neutronová hvězda (pulsar) v Krabí mlhovině, která je pozůstatkem po výbuchu supernovy v roce 1054.



Obrázek 18.24: Vlevo nahoře: The Cat's Eye Nebula, one of the first planetary nebulae discovered, also has one of the most complex forms known to this kind of nebula. Eleven rings, or shells, of gas make up the Cat's Eye. Credit: NASA, ESA, HEIC, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) Acknowledgment: R. Corradi (Isaac Newton Group of Telescopes, Spain) and Z. Tsvetanov (NASA). Vpravo nahoře: M27. Uprostřed vlevo: NGC2392 Eskymak. Uprostřed vpravo: NGC 6751. Dole vlevo: M57. Dole vpravo: Dying Star HD 44179, the "Red Rectangle,"Sculpts Rungs of Gas and Dust

Zbytek po výbuchu supernovy v souhvězdí Labutě před asi 15 000 lety.

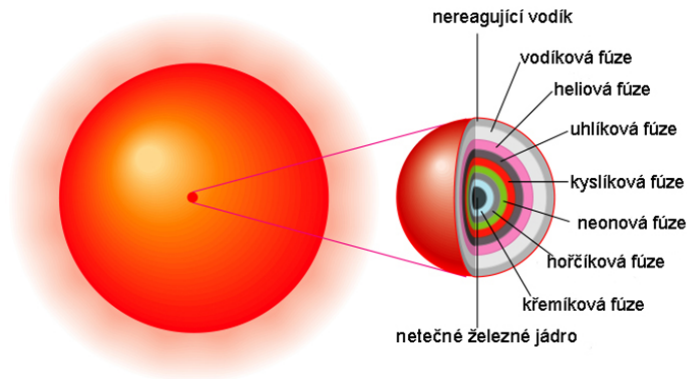
Historické supernovy

supernovy viditelné pouhýma očima - jen šest během n.l.

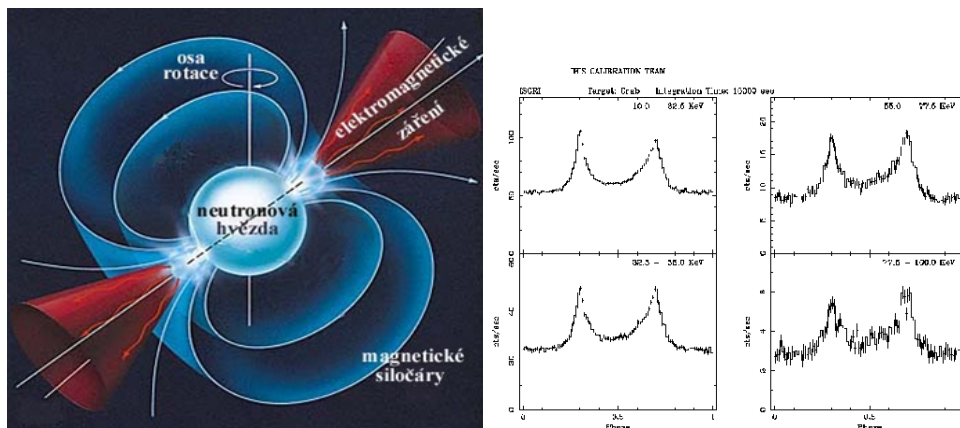
383 Sco

1006 Lup - nejjasnější

1054 Tau – nejslavnější - Krabí mlhovina s pulsarem



Obrázek 18.25: Slupky hoření.



Obrázek 18.26: Pulsar.

1572 Cas - Tychonova supernova

1604 Oph - Keplerova supernova

24. II. 1987 – Dor – LMC - v maximu 4 mag

kdy vybuchne další supernova, kterou uvidíme pouhýma očima?

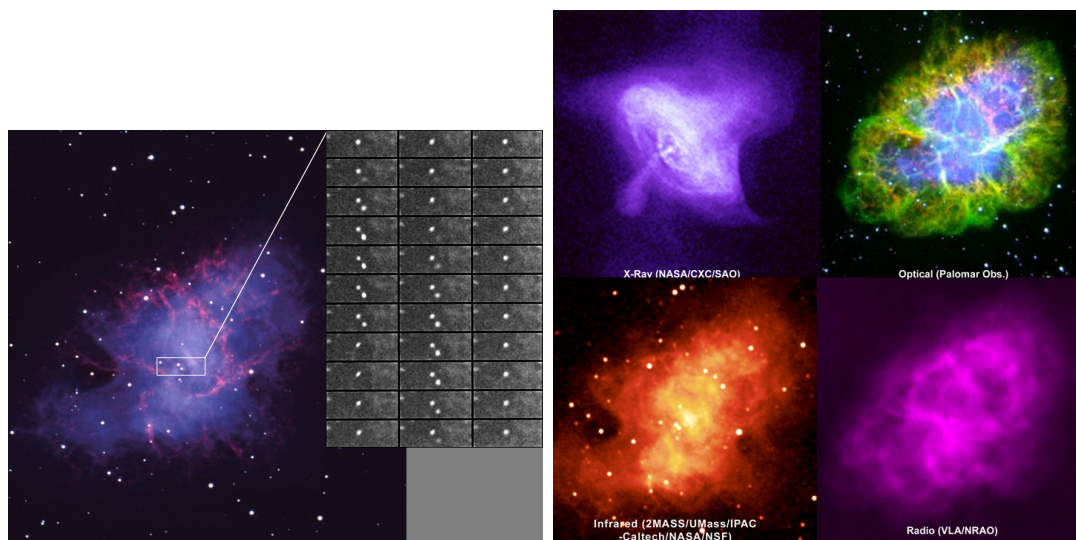
obrázky - detaily srdce M1, řasy v Labuti....

Kandidáti na supernovy

Betelgeuse

18.8 Zvláštnosti vývoje těsných dvojhvězd

O dvojhvězdách už bylo řečeno mnohé i v těchto skriptech, ale proč by měly mít dvojhvězdy nějaké zvláštnosti ve svém vývoji? Je třeba říci, že ke zvláštnostem ve vývoji dochází u těsných dvojhvězd, tedy takových, kde jsou složky dostatečně blízko, aby si lidově řečeno "ležli do zělí". Kolem každé hvězdy můžeme spočítat plochy se stejným gravitačním



Obrázek 18.27: Krabí mlhovina M1.

potenciálem. U kulové hvězdy je taková plocha také kulová. Přítomnost blízkého souputníka ale tuto plochu deformuje do podoby tzv. Rocheova laloku. Problém pak nastane v případě, že jedna složka dvojhvězdy během svého vývoje vyplní svůj Rocheovský lalok.

Podle vztahu složek dvojhvězdy ke svým Rocheovským lalokům dělíme dvojhvězdy na:

- oddělené/detached
- polodotkové/semi-detached
- kontaktní/contact (overcontact)
- double-contact (Wilson)

podle konfigurace systému (Kuiper, Kopal)

Rozdělení dvojhvězd - podle konfigurace a složek

těsná dvojhvězda – blízké složky, gravitací deformovaný tvar (výměna látky)

zákrytová dvojhvězda - vzájemné zákryty jednotlivých složek

typický představitel – např. β Per, β Lyr
vývojový paradox Algolu

Algol - těsná zákrytová dvojhvězda => známe rozměry a hmotnosti složek dvojhvězdy

1. složka - žhavá hvězda hlavní posloupnosti ($5 M_{\odot}$),
2. složka - chladný obr ($1 M_{\odot}$) (!)

v čem je paradox?

dvojhvězda => současný vznik obou hvězd => více hmotná by měla být dál ve vývoji

ALE NENÍ !

Vysvětlení - pes požívá psa! (John Crawford & Fred Hoyle) – vývojový scénář

- společný vznik => obě hvězdy v páru se vyvíjejí jako osamocené hvězdy
- hmotnější hvězda – rychlejší vývoj => začne se rozpínat – > vzniká obr, ale prostor omezen!
- Rocheův lalok („šaty, které začínají být obroví těsné“) - ekvipotenciální hladina deformována – vliv druhé složky a rotace => zploštělá kapka
- hmotnější složka vyplní Rocheův lalok – přetok hmoty k vývojově opožděné složce; na druhou složku přeteče až 80 % hmoty! => 2. složka nyní hmotnější (ale vývojově je opožděná – hvězda na HP)= stadium Algola
- nyní hmotnější hvězda zrychlí vývoj – > i ona se začne rozpínat – > vyplní svůj Rocheův lalok – přetok opačným směrem

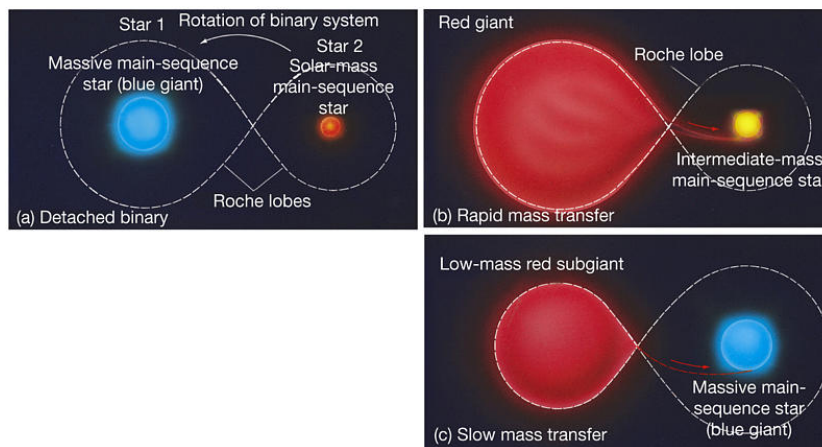
=> pes požívá psa

Zdeněk Kopal

KP Aql - oddělená soustava

AD Her - polodotyková soustava (algolida)

BX And - dotyková soustava



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

Obrázek 18.28: Dvojhvězdy.

Přetok hmoty

hypotéza nebo prokázaný poznatek?

teorie výměny hmoty mezi složkami těsných dvojhvězd – prvotní nedůvěra

Mirek Plavec – jeden z prvních zastánců (v 60. letech 20. st.)

Příčiny – hvězdný vývoj, rozpínání hvězd (složek dvojhvězdy)

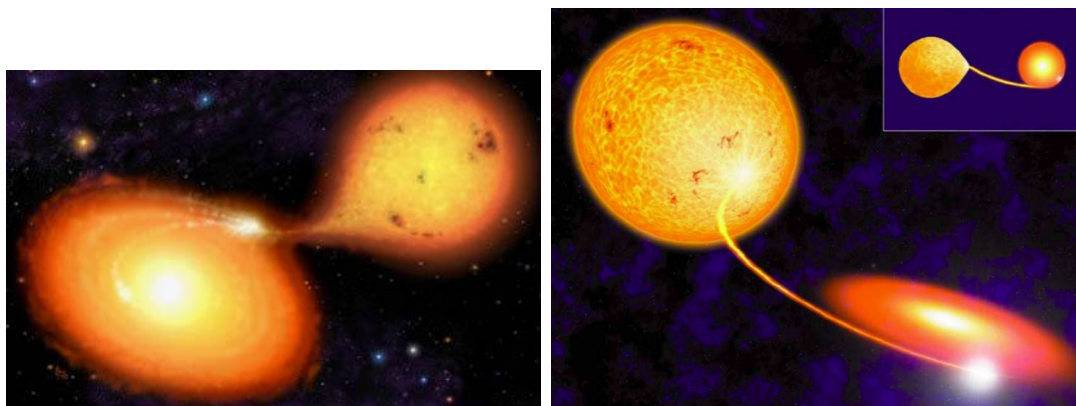
Průběh – i velmi rychlý, masivní

- dopad – přímo na souputníka

- do okolí – vznik akrečního disku, z něj hmota vypadává na souputníka, horká skvrna

Důsledky (projevy) – změna periody oběhu,

- změny jasnosti, projevy ve spektru



Obrázek 18.29: Přetok hmoty.

možnosti pozorování - sledování vývojových změn, změny period (O-C)

18.8.1 Novy

změna jasnosti - během několika dní se zjasní o 10 mag i více, a pak pozvolna (typicky během 40 dní) pokles na počáteční úroveň

1963 - Robert Kraft - novy = zvláštní typ těsných dvojhvězd

1 složka = bílý trpaslík - přetok hmoty na BT - pomalé (řád. 10^4 let) ukládání do povrchové vrstvy – > tlustá slupka na BT – > roste T, p – > zapálení termionukleární reakce – > výbuch – slupka zničena, BT zůstává - vše se může opakovat
jiný scénář – *symbiotické proměnné hvězdy* - není třeba přetok přes L_1 – stačí hvězdný vítr z červeného obra – > BT „vychytává“ hvězdný vítr – > spad na BT



Obrázek 18.30: Výbuch novy.

možnosti pozorování

Rekapitulace

vývoj hvězd = nevratný děj

protohvězda	počátek jad. hoření - hl. posloupnost	červený obr / veleobr	bílý trpaslík/černá díra
plod	od plenek k dospělosti	střední věk	stáří - smrt

Obrázek 18.31: Srovnání vývoje člověka a hvězdy.

recyklace – opětovné použití látky - hvězdný vítr, supernovy... myslící prach supernov

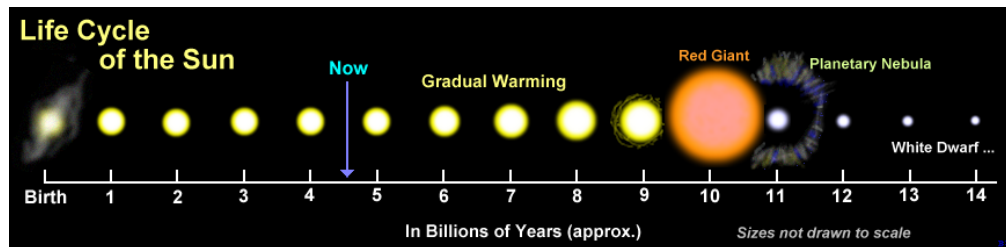
vývoj (osamocených) hvězd - určen změnami jejich chemického složení

jaderné reakce – příčina změn chemického složení = ζ příčina vývoje hvězd - hlavní zdroj energie hvězdy POZOR – probíhají v nitru = ζ = ζ stav jádra určuje zářivý výkon, celkovou stavbu a vývoj!

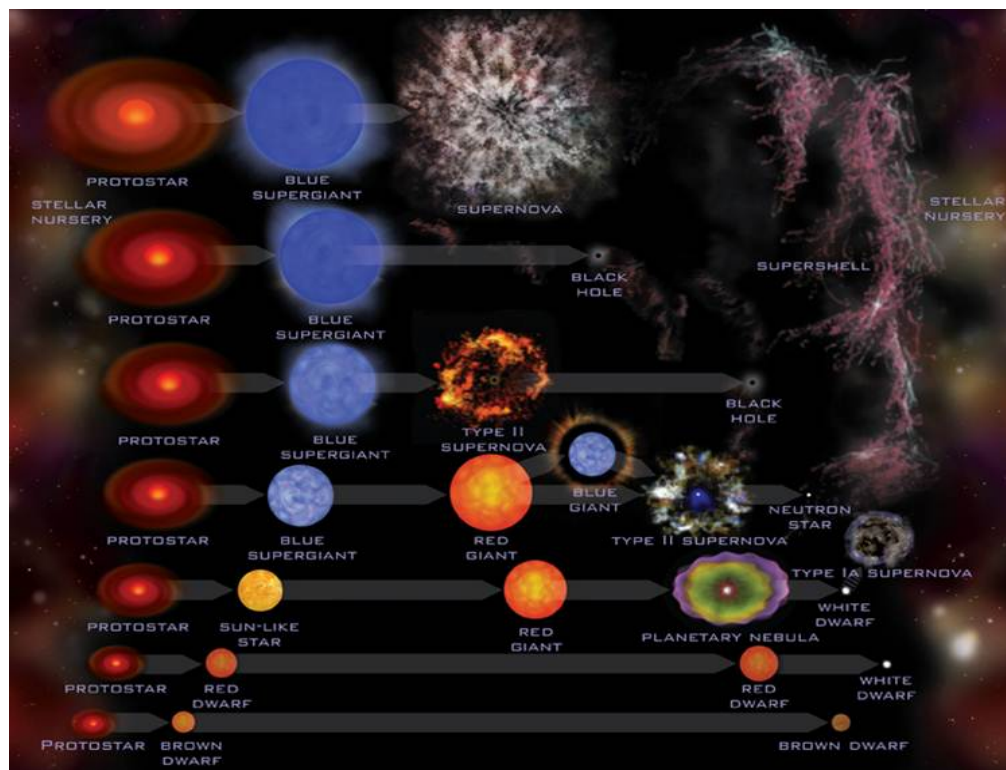
Použitá a doplňující literatura

Crowther, P. A., Schnurr, O., Hirschi, R., et al. 2010, MNRAS 408, 731

Greene, T., 2001, American Scientist, 89, 316



Obrázek 18.32: Vývoj Slunce.



Obrázek 18.33: Vývoj hvězd.

Chaisson, E., & McMillan, S. 2010, *Astronomy Today*, 7th Edition, by E. Chaisson and S. McMillan. Prentice Hall, 2010. e-book, ISBN 978-0-321-73441-9, 0-321-73441-6, 850 str.

Chen, X., Arce, H. G., Zhang, Q., et al. 2010, *ApJ* 715, 1344

Kleczek, J., 2002, *Velká encyklopedie vesmíru*. Academia, 584 str.

Nakajima, T., Oppenheimer, B. R., Kulkarni, S. R., et al. 1995, *Nature* 378, 463

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

Rebolo, R., Zapatero Osorio, M. R., & Martín, E. L. 1995, *Nature* 377, 129

19 Hvězdná uskupení

Hvězdy jsou základní stavební kameny ve vesmíru. Nejsou ve vesmíru rozmístěny rovnoměrně a nevyskytují se jen jednotlivě. Sdružují se a seskupují. Jejich uskupení čítají od dvou či několika členů až stovky miliard hvězd. Nejmenší jsou málopočetné skupiny hvězd, vlastně jakési vícehvězdy (dvojhvězdy, trojhvězdy,...) do deseti členů. Větší soustavu hvězd už nazveme hvězdokupou. Menší počet členů (běžně stovky až tisíce) mají zpravidla otevřené hvězdokupy nepravidelného tvaru. Naopak větší, hmotnější a většinou starší jsou kulové hvězdokupy. Ještě větší soustavy hvězd pak vytváří galaxie, ale o nich si povíme až v následující kapitole.



Obrázek 19.1: Představa vícenásobné hvězdné soustavy.

19.1 Málopočetné skupiny hvězd – hvězdné soustavy (multiple stars)

Výskyt hvězd ve vícenásobných soustavách velmi úzce souvisí s mechanismem jejich vzniku, zejména s procesem dělení původního zárodečného materiálu, molekulového mračka (viz kapitola 18). O dvojhvězdách se se již zmiňovali dříve. Připomeňme si alespoň několik nejznámějších dvojhvězdných soustav. U Síria a následně Prokyonu byl v 19. století poprvé jako souputník přímo pozorován bílý trpaslík. Mira Ceti je sice typickou představitelkou dlouhoperiodických pulzujících proměnných hvězd a zřejmě první periodicky proměnnou hvězdou známou v novodobé historii, ale kromě toho všeho se jedná i o dvojhvězdu. A doplníme ještě ϵ Aurigae, zákrytová dvojhvězda s dosud nejdelší známou oběžnou periodou xxxx dní.

Mezi trojhvězdami nás zaujme Polárka a pak také nejbližší hvězdný soused Slunce, soustava α Cen, která je složena z hlavní dvojhvězda, páru žlutých trpaslíci (složky A+B) a červeného trpaslík Proxima Centauri, který je momentálně vůbec nejbližší hvězdou ke Slunci. Vzdálenost mezi složkami trojhvězdy A a B je 11 au a mezi tímto párem a Proximou 15 000 au.

HD 188753 – trojhvězda (3 trpaslíci) 149 ly od Země- zjistit konfiguraci???????

čtyřhvězda (quadruple) - 4 Cen

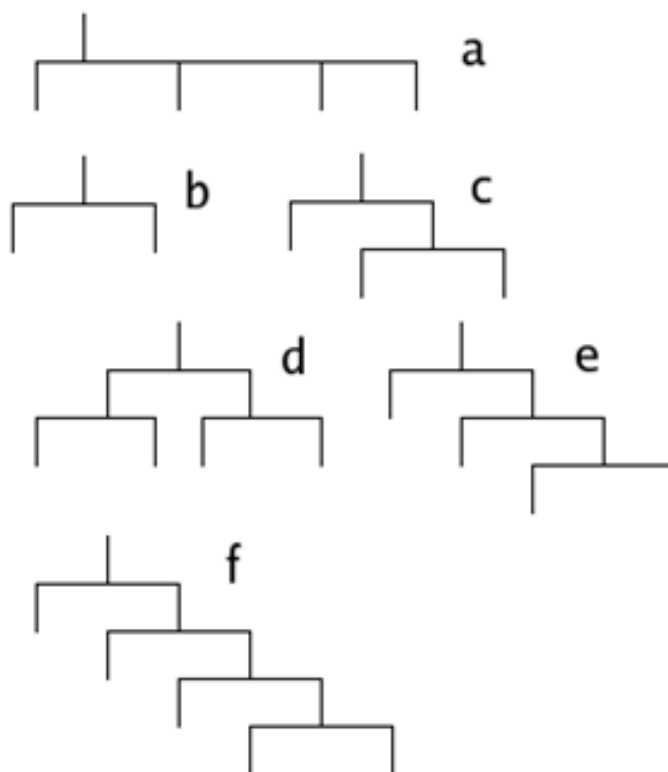
Mizar - Castelli a Galileo, později spektroskopie Mizaru A a B => obě dvojhvězdy
HD 98800, ϵ Lyr, V994 Her

pětihvězda (quintuple) - 91 Aqr, δ Ori, σ Ori

šestihvězda (sextuple)

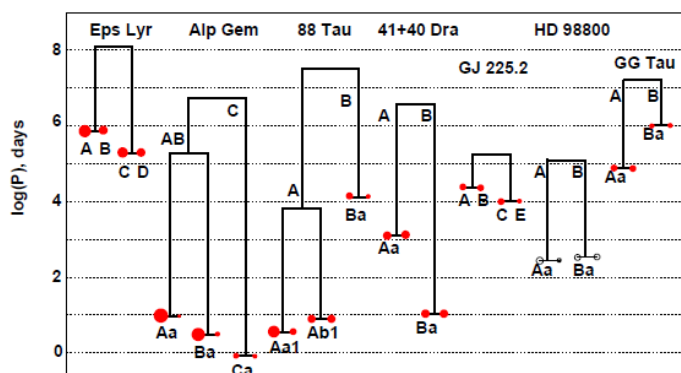
- Castor (+YY Gem)
- HD 139691
- Alcor – je-li součástí systému Mizaru

sedmihvězda (septuple) ν Sco, AR Cas



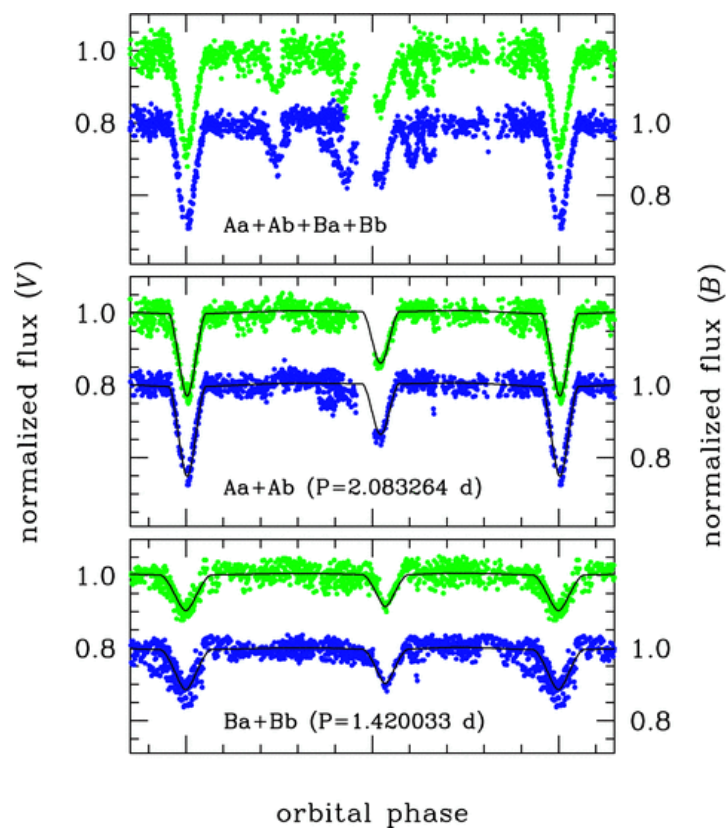
Obrázek 19.2: Hierarchie.

katalog vícenásobných soustav: Tokovinin
neúplný - výběrové efekty
výzkum pokračuje



Obrázek 19.3: Hierarchie soustav

V994 Her (Chung-Uk Lee et al.)



Obrázek 19.4: V994 Her

19.1.1 Dvojhvězdy

Úvod, výskyt dvojhvězd, těsné dvojhvězdy

odkaz na předchozí kapitoly 15, 18

většina, více než 50 %, ... - úvod v knihách a člancích
 o dvojhvězdách, např. J. Schombert - Univ. of Oregon - 85 % !
 1983 – Abt – v okolí Slunce; 60-70 % hvězd – dvojhvězdy nebo vícenásobné systémy
 2006 – Lada – většina hvězdných soustav (až 2/3) vytvořených v Galaxii jsou samotné hvězdy!
 typická hvězda v Galaxii – červený trpaslík (RD)
 jen u 43 ze 171 RD jako primárních složek dvojhvězd do 10 pc (32.6 ly) od Slunce je RD nebo hnědý trpaslík

2010 – Richichi et al. – zákryty hvězd Měsícem s VLT – ze 191 hvězd 16 dvojhvězd a 2 trojhvězdy

Rozmanitost světa dvojhvězd

doba oběhu: 321 s - soustava s 2 degenerovanými hvězdami (HM Cnc, 21 mag), 9,5 min (V407 Vul), 18 min (AM CVn), 46 min (GP Com), 4.7 h (UX UMa) -j, 27.2 roku (e Aur)

poloosa trajektorie: $a \lesssim 0.05 R_o \sim 28 \text{ au}$ a více

složky dvojhvězdy: jakýkoli typ hvězd, mrtvé nebo „živé“, mladé nebo staré, PMS, neutronové hvězdy, černé díry, planety a hnědí trpaslíci

zvláštnosti: akreční disky, plynné proudy, společné obálky

19.2 Hvězdokupy

hvězdná uskupení desítek až milionů hvězd
 společný původ
 gravitačně vázané
 ale

méně početná uskupení (otevřené hvězdokupy, pohybové hvězdokupy, asociace) – dlouhodobě nestabilní, rozpadají se

Typy:

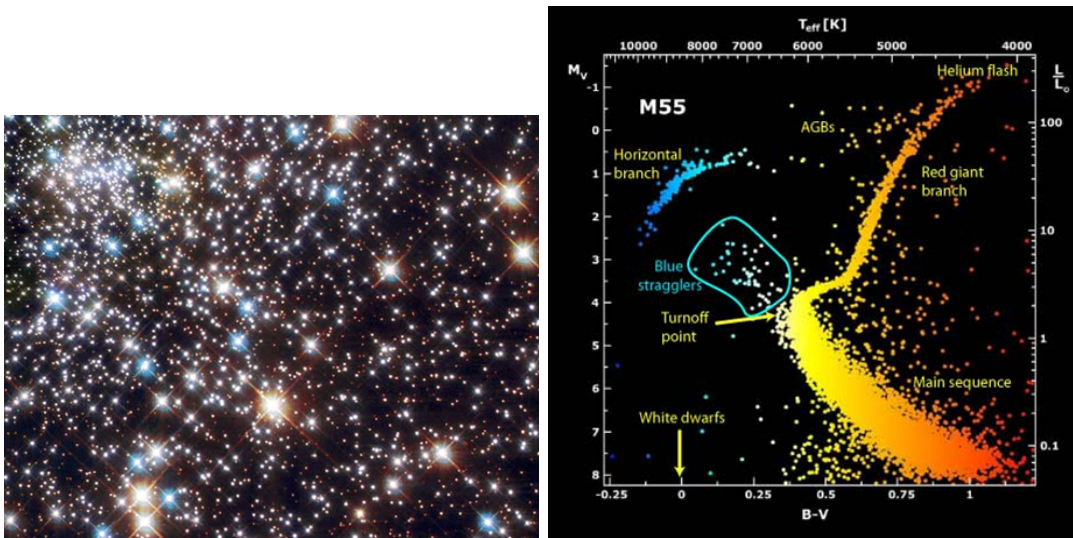
- kulové
- otevřené
- hybridní?

otevřené, kulové, pohybové - vývojové zvláštnosti, popis

19.2.1 Kulové hvězdokupy

- přibližně kulového tvaru
- počet hvězd – řádově $10^4 - 10^6$
- průměr – 10 - 400 ly => malé vzdálenosti mezi členy => noční obloha na planetě v kulové hvězdokupě?
- stáří – 10 až 13 mld let
- členové: hvězdy s vyšším Z => staré hvězdy červené a žluté hvězdy o hmotnostech $< 2 M_{\odot}$ => populace II
výjimky – modří obři (blue stragglers, modří opozdilci) – různé teorie vzniku: splynutí hvězd, hvězdy zachycené hvězdokupou ...

gravitačně velmi silně vázané soustavy; 10^4 až 10^6 hvězd; výrazně kulovitý tvar a silná koncentraci ke středu; střední průměr cca 50 ly; asi 150 známých, v Galaxii odhadem 500 až 1000; např. 47 Tucanae, M 13 v Herkulovi, Omega Cen



Obrázek 19.5: Modří opozdilci v NGC 6397 a v HRD.

počet KH v Galaxii: 135, odhad cca 200
distribuce KH v Galaxii: symetricky kolem středu v kouli o $r = 70000$ ly, více směrem ke středu

KH v Galaxii, M31 vznik krátce po vzniku vesmíru x v LMC, SMC mnohem mladší

19.2.2 Otevřené hvězdokupy

- tvar nepravidelný
- počet hvězd – řádově desítky až stovky, výjimečně více
- průměr – 5 - 50 ly (většinou do 20 ly)



Obrázek 19.6: Credit: RUSSELL CROMAN/SCIENCE PHOTO LIBRARY Caption: Hercules globular cluster (M13), optical image. A globular cluster is a huge spherical grouping of old stars that orbits a galaxy, in this case our Milky Way. M13 is around 168 light years in diameter and lies 25,100 light years from Earth in the constellation Hercules. <http://www.sciencephoto.com/media/330923/enlarge> .



Obrázek 19.7: 47 Tuc.

- slabě gravitačně vázané => rozpadají se
- členové: mladé modré (zářivé) hvězdy – žijí krátce, ale OH se dříve rozpadne hvězdy populace I

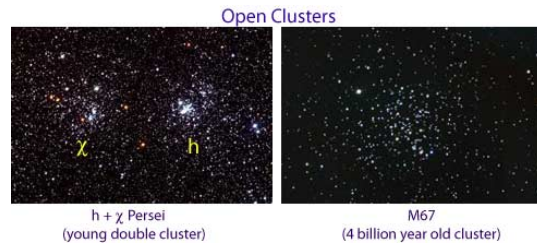
- obvykle desítky až stovky hvězd; průměr až 10 ly; 15 - 250 M_{\odot} ; známých více než tisíc, ale odhadem v naší Galaxii až 100000;

nestabilní útvary, postupně se rozpadají; např. Plejády, Praesepe, dvojitá hvězdokupa χ a h Per;

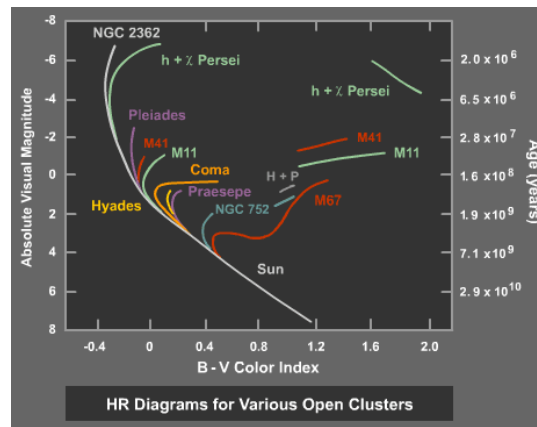
DAML02

počet OH v Galaxii: cca 2100, ale jen několik set prozkoumaných! - WEBDA umístění v Galaxii: galaktický disk

- třídy: 1. všechny hvězdy na HP (Plejády)
 2. většina hvězd na HP, ale malá část už na větví obrů (Jesličky)
 3. starší žlutí a červení obři (M67)



Obrázek 19.8: OC



Obrázek 19.9: Barevný diagram otevřených hvězdokup.

Vznik a vývoj otevřených hvězdokup

vznik – v oblastech tvorby hvězd (GMCs), probíhá neustále, např. v HII oblasti mlhoviny v Orionu

věk – většinou řádově miliony let, jen výjimečně delší než 1 mld let (hybridy?)

zánik – rozpadem – vlastní pohyby, působení okolí (slapy, srážky s mračky...)

- vypařováním

19.2.3 Hybridní? - zvláštní?

NGC 6791 - jedna z nejstarších a největších známých otevřených hvězdokup

ale !

počet hvězd – tisíce, jenže starých 8 miliard let!
 navíc s vysokým obsahem těžších prvků!

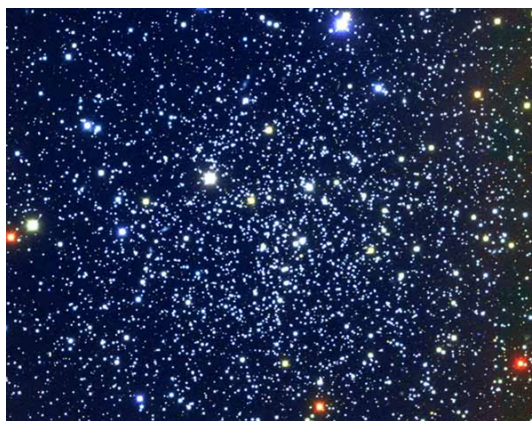


Obrázek 19.10: Credit: N.A.Sharp/NOAO/AURA/NSF (left), Nigel Sharp, Mark Hanna/NOAO/AURA/NSF (right) Hyady a Plejady: Alson Wong.

ale staré hvězdy by mít Z malé (v Galaxii se kovy hromadí jen pomalu)!

NGC 6791 jedna z nejstudovanějších hvězdokup

možné vysvětlení: pochází ze středu Galaxie. . .



Obrázek 19.11: NGC 6791. <http://apod.nasa.gov/apod/ap000112.html> .

19.2.4 Hvězdné asociace

dvě možnosti

- hvězdokupy přestávají být gravitačně vázané a rozpadají se
- nově vznikající hvězdokupy – hvězdy mají podobné trajektorie v prostoru

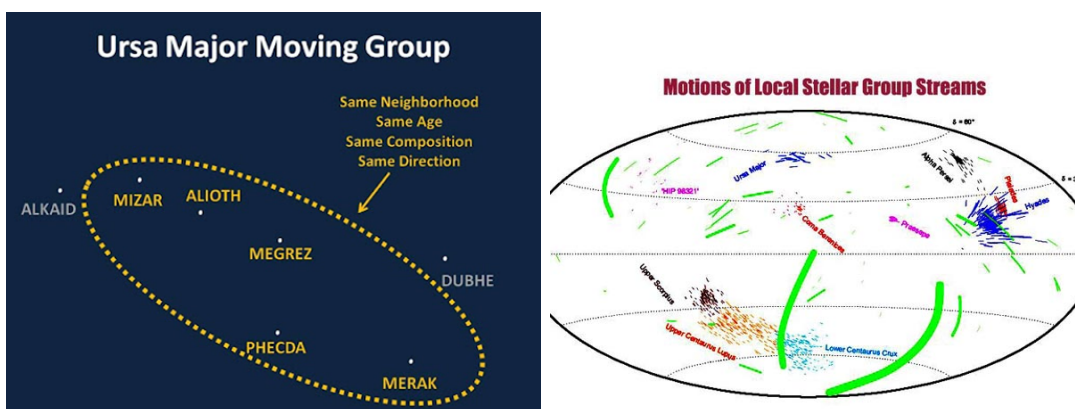
=> hvězdné asociace nebo pohybové hvězdokupy

pohybové hvězdokupy:

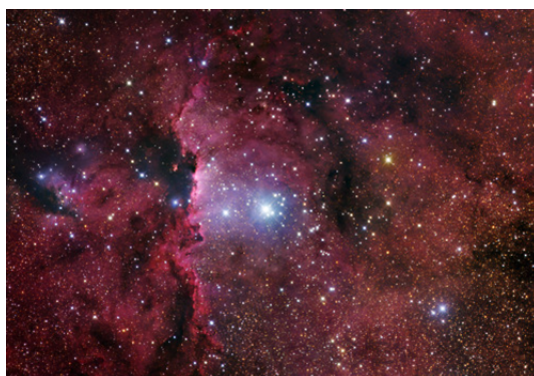
- Ursa Maior (Collinder 285) – hvězdy od Velkého Vozu, Cep až po TrA! Slunce uvnitř, ale není členem (jiná trajektorie, věk, chem. složení);
- Hyády;
- Jesličky a další

hvězdné asociace:

- O asociace – masivní hvězdy, např. v Orionu, středem Trapez
- OB asociace – nejbližší Sco-Cen asociace
- R asociace – hvězdy střední hmotnosti se zbytky původní látky (reflexní mlhoviny, např. Mon R2
- T asociace – hvězdy s malou hmotností v původní mlhovině (T Tauri)



Obrázek 19.12: Pohybové hvězdokupy



Obrázek 19.13: OB asociace Ara OB1.

20 Galaxie a galaxie

Galaxie představuje obrovský gravitačně vázaný, zpravidla vnitřně strukturovaný a organizovaný útvar tvořený hvězdami, mezihvězdným plynem a prachem a nezářivou látkou, skrytou hmotou. Počet takových útvarů ve viditelném vesmíru se odhaduje na řádově jeden bilión. Jak galaxie ke svému označení přišly jsme si prozradili už v kapitole 5.3. Nás ale bude v první řadě zajímat ta soustava, ve které se nachází naše Slunce.

20.1 Naše Galaxie se představuje

Připomeňme, že galaxii, ve které se nachází Slunce, označujeme jako naše Galaxie. Naproti tomu Mléčná dráha je jen nádherný stříbrný pás na temné noční obloze, který je tvořen hvězdami naší Galaxie. Je to jen boční pohled na naši Galaxii.



Obrázek 20.1: Mléčná dráha nad Atacamskou pouští v Chile. Zdroj: ESO/Y. Beletsky.

Výklady, co je vlastně Mléčná dráha najdeme ale různé. Pomineme nyní krásnou řeckou báji o vzniku Mléčné dráhy (viz kapitola 5.3). Aristoteles ve čtvrtém století před naším letopočtem ve svém díle „Meteorologica“ psal, že před desítkami let Anaxagoras a Démokritos vyslovili názor, že Mléčná dráha je tvořena mnoha hvězdami. Aristoteles sám však považoval Mléčnou dráhu za meteorologický jev, za důsledek hoření hvězdných výparů v horní části zemské atmosféry, v oblasti spojené se sférou hvězd. V 6. století našeho letopočtu tento výklad kritizoval Olympiodorus mladší a tvrdil, že pokud by Mléčná dráha ležela pod sférou Měsíce, měla by zřejmou paralaxu. Tuto paralaxu ale nikdo nenašel, takže podle něj Mléčná dráha není sublunární objekt. Myšlenky Olympiodora mladšího ale ovlivnily zejména arabské astronomy v následujících stoletích, kteří se snažili o nalezení, změření paralaxy Mléčné dráhy. I mezi arabskými astronomy se ale objevují i názory, že by mohlo jít o velké uskupení hvězd. „Záhadu“ Mléčné dráhy definitivně vyřešilo až použití prvních dalekohledů. Galileo Galilei v roce 1610 popsal v knize

Hvězdný posel Mléčnou dráhu jako uskupení obrovského množství slabých hvězd, které viděl ve svém dalekohledu.

Galileo ale vyřešil jednu otázku týkající se Mléčné dráhy. Na řadu přišla další: Proč vlastně máme Mléčnou dráhu?, tedy proč nejsou hvězdy na hvězdné obloze rozmístěny více rovnoměrně?. První řešení nabídli filozofové v 18. století. Swedenborg (1734), Wright (1750) i Kant (1755) ve svých úvahách shodně prezentovali Mléčnou dráhu jako hvězdný ostrov diskového tvaru. Nicméně jejich hypotézu bylo třeba ověřit a podpořit pozorovacími daty.

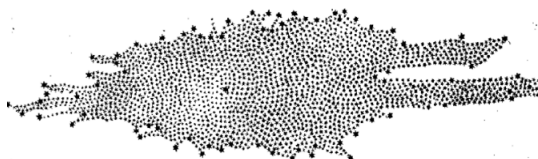
20.1.1 Historie výzkumu

1. model Galaxie z pozorování - William Herschel
v 80. letech 18. st. - počty hvězd v několika stech oblastí nebe

chybné předpoklady:

- všechny hvězdy mají stejný zářivý výkon,
- prostorová hustota hvězd je stálá,
- neexistuje zeslabování světla hvězd (mezihvězdná extinkce), nevěděl o ní
- dohlédne dalekohledem na hranici Galaxie.

výsledek – model Galaxie o průměru 3 kpc, uprostřed je Slunce



Obrázek 20.2: Herschelův model Galaxie se Sluncem téměř uprostřed soustavy. Herschelův model: Figure 4 from *On the Construction of the Heavens* by William Herschel, published in *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 75 (1785), pp. 213-266

Kapteynův model Galaxie (Kapteynův vesmír)

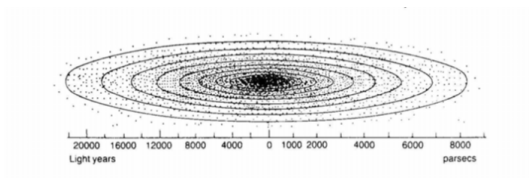
1922 - Jacobus Kapteyn (1851–1922) – opět počítáním hvězd (ve vybraných částech hvězdné oblohy) zkoumal strukturu Galaxie

- + znal absolutní hvězdné velikosti pro různé typy hvězd;
- nevěděl o mezihvězdné extinkci

výsledek - tvar zploštělého elipsoidu 8500 pc x 1700 pc, Slunce 650 pc od středu
model platí pro vysoké galaktické šířky, v rovině Galaxie selhává

důvod – mezihvězdná extinkce! => Galaxie je větší a Slunce není poblíž středu

dnešní rozměry – průměr disku 28 kpc, Slunce 8 kpc od středu



Obrázek 20.3: Kapteynův model Galaxie.

20.1.2 Velká debata

1918 Shapley - vzdálenosti 93 kulových hvězdokup pomocí pulzujících proměnných hvězd typu RR Lyr a W Vir;

„troufalý a ukvapený předpoklad“ - systém kulových hvězdokup = kostra Galaxie (střed kostry souhlasí s centrem Galaxie) => centrum Galaxie leží ve směru Střelce ve vzdálenosti 15 kpc ;=> průměr Galaxie cca 100 kpc, Slunce v 1/3 mezi centrem a okrajem systému

1920 Velká debata - o rozměrech Galaxie a povaze spirálních mlhovin

Harlow Shapley x Heber Curtis

Curtis - odborník na spirální mlhoviny = vzdálené soustavy z milionů hvězd;

- obhajoval Kapteynův model Galaxie (průměr cca 8,5 kpc);
- přednost kratší škále vzdáleností, (mj. pro vzdálenost M 31 z jasnosti pozorovaných „nov“ (150 kpc) => velikost srovnatelná s rozměrem Kapteynovy Galaxie;
- velké rychlosti vzdalování spirálních mlhovin (příliš velké na to, aby byly gravitačně spjaty s Galaxií)

Shapley - Galaxie je nejméně o řád větší a představuje celý vesmír.

hmotnost (zářící látky): $2 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ (celková hmotnost je až o řád větší, většina látky Galaxie je uložena v temném halu, jehož rozměry mnohonásobně převyšují velikost viditelné části Galaxie)

Základní čísla o naší Galaxii

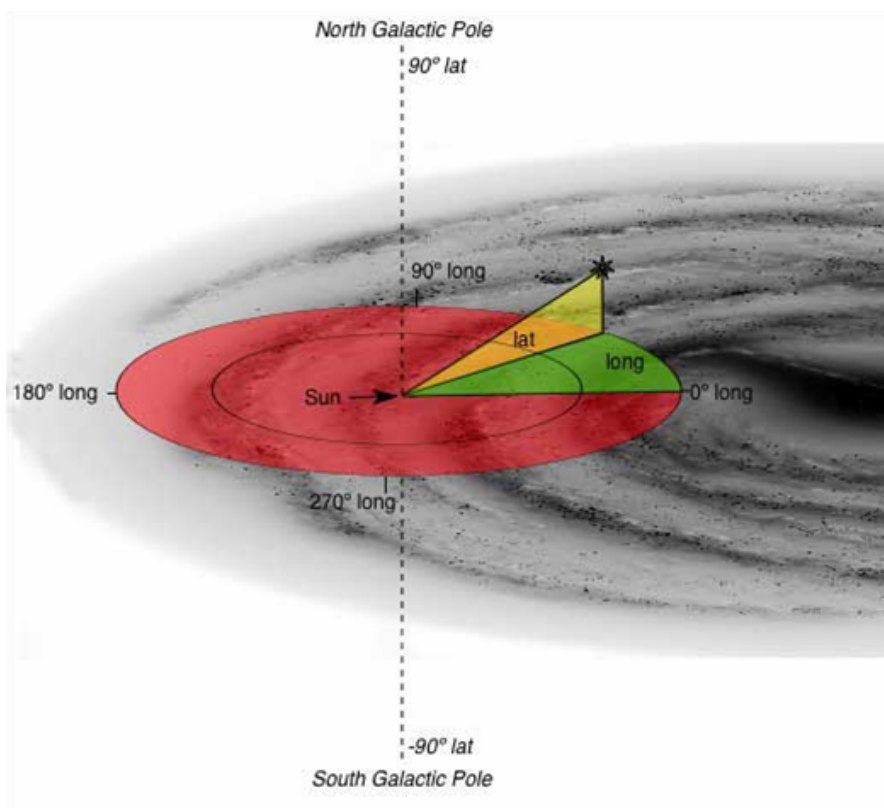
zářivý výkon: $2 \cdot 10^{10} L_{\odot}$ (tj. $7,7 \cdot 10^{36} \text{ W}$)

počet hvězd, tvořících Galaxii: 400 miliard (odhad)

podíl mezihvězdné látky na hmotnosti Galaxie: asi 10 % hmotnosti zářící látky

hmotnost (zářící látky): $5,8 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ (celková hmotnost je až o řád větší, většina látky Galaxie je uložena v temném halu, jehož rozměry mnohonásobně převyšují velikost viditelné části Galaxie)

průměr: $100\,000\text{ ly} = 30\text{ kpc} = 9 \cdot 10^{17}\text{ km}$



Obrázek 20.4: Galaktické souřadnice.

20.1.3 Galaktická souřadnicová soustava

Základní rovina - rovina největší koncentrace hvězd v Galaxii (na hvězdné obloze - přibližně Mléčná dráha)

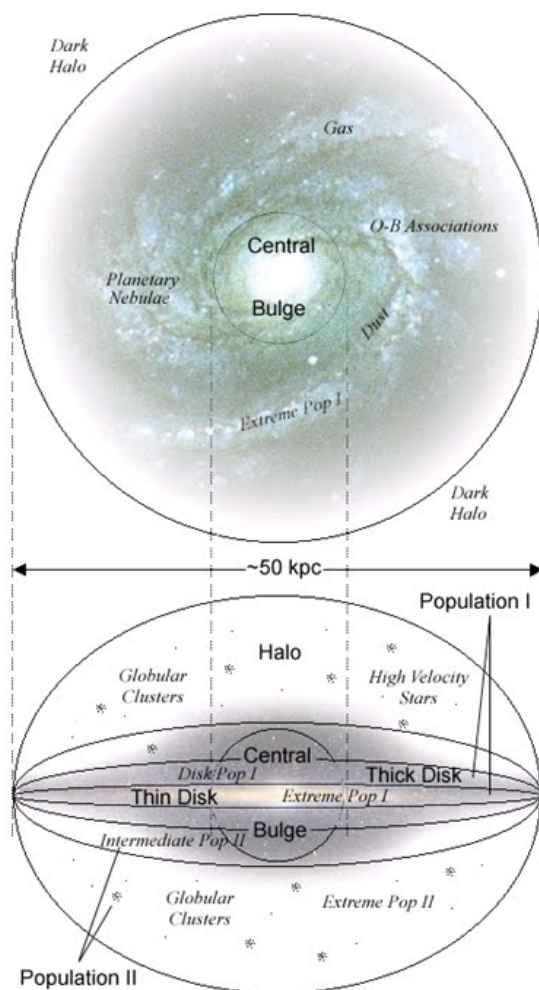
Základní rovina (galaktický rovník) - sklon galakt. a světového rovníku $62^{\circ}36,0'$.
základní směr (ke středu Galaxie) - $\alpha = 17^{\text{h}} 42^{\text{m}} 29,3^{\text{s}}$, $\delta = -28^{\circ}59' 18''$ (1950.0) - 1959
rezoluce IAU

galaktická délka l (0° až 360°),
galaktická šířka b (0° až $\pm 90^{\circ}$).

(pravotočivá souřadná soustava)

20.1.4 Anatomie naší Galaxie

Složení Galaxie – hvězdy, mezihvězdná látka, skrytá hmota



Obrázek 20.5: Anatomie Galaxie.

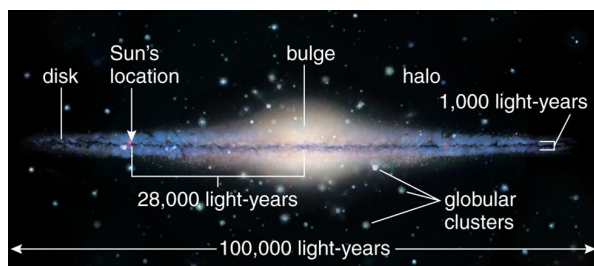
Kulová složka (halo) - mírně zploštělá koule o průměru asi 50 kpc; nejstarší hvězdy v Galaxii (stáří až 12 miliard let), kulové hvězdokupy; nepatrné množství těžších prvků (do 0,1 %)

Disková složka - průměr 30 kpc, disk mimo střed jen 1 kpc tlustý, uprostřed galaktická výduť – koule o průměru 4-5 kpc;
 Slunce – 15 pc od galaktické roviny, 8,0 kpc od středu; patří sem většina hvězd - populace I; účastní se galaktické rotace; stáří hvězd - cca 5 miliard let, od roviny Galaxie - střední vzdál. 300 pc

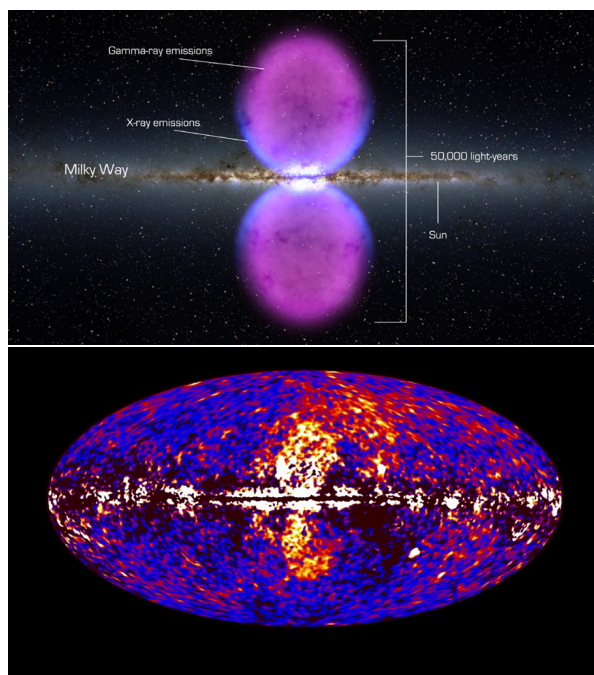
Plochá složka - nejmladší hvězdy (stáří milion až několik mld. let, těžších prvků až 5 %) a mezihvězdná látka; udává polohu galaktického rovníku. Hmotné hvězdy s největším zářivým výkonem.

Jádro Galaxie – od nás vzdáleno 30 000 ly, zastíněno, v centru obří černá díra

Bubliny - objev r. 2010 družice Fermi, původ neznámý



Obrázek 20.6: Anatomie Galaxie.



Obrázek 20.7: Galaktické bubliny.

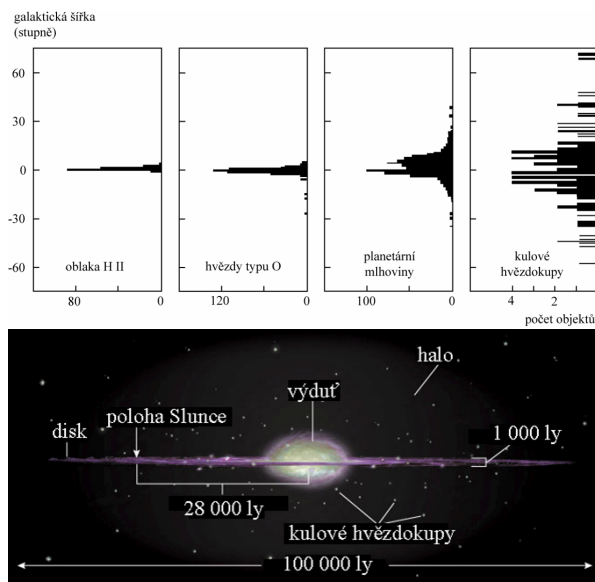
20.1.4.1 Disková a plochá složka

Spirály

- spirální ramena - nahuštění hvězd a mezihvězdné látky
- stabilní hustotní vlna
 - ve spirálních ramenech - zvýšená hustota mezihvězdné látky => vznik nových hvězd; žhavé hmotné hvězdy a mladé otevřené hvězdokupy
- spirální struktura Galaxie - podoba s blízkými galaxiemi (např. M 31)
- důkazy - radioastronomie

Naše Galaxie

- disková a zejména plochá složka Galaxie - vytvářejí ramena, vybíhající z galaktického jádra
- dříve 4 stejná spirální ramena,



Obrázek 20.8: Rozložení některých druhů objektů v Galaxii. První dva jsou v ploché složce, další v diskové, poslední v kulové složce Galaxie.

- nyní 2 hlavní spirální ramena (Scutum-Centaurus a Perseus) a 2 vedlejší, malá ramena (Norma a Sagittarius)

1852 – Stephen Alexander – první předpokládal spirální strukturu

2008 – R. Benjamin 2 hlavní spirální ramena: Scutum-Centaurus, Perseus 2 vedlejší, malá ramena Norma Sagittarius

2012 – stále diskuse např. nový vnější prstenec (Monoceros Ring)

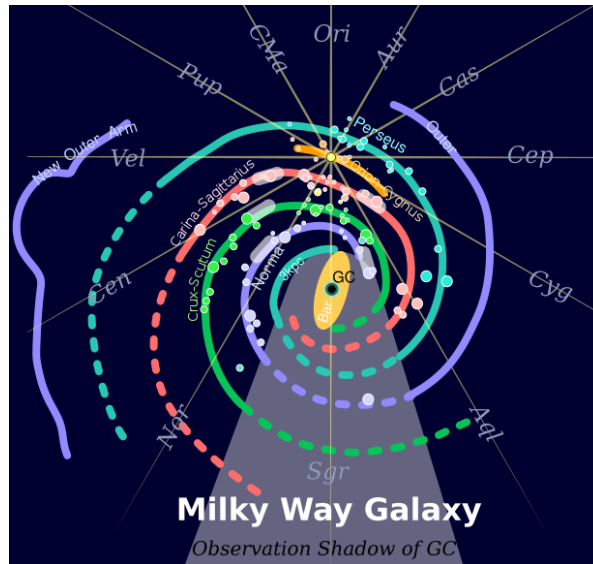
20.1.4.2 Jádru Galaxie

centrum Galaxie – hvězdná obloha mezi γ Střelce a θ Hadonoše

- extinkce ve viditelném oboru spektra - 30 magnitud!
- infračervená, rádiová pozorování

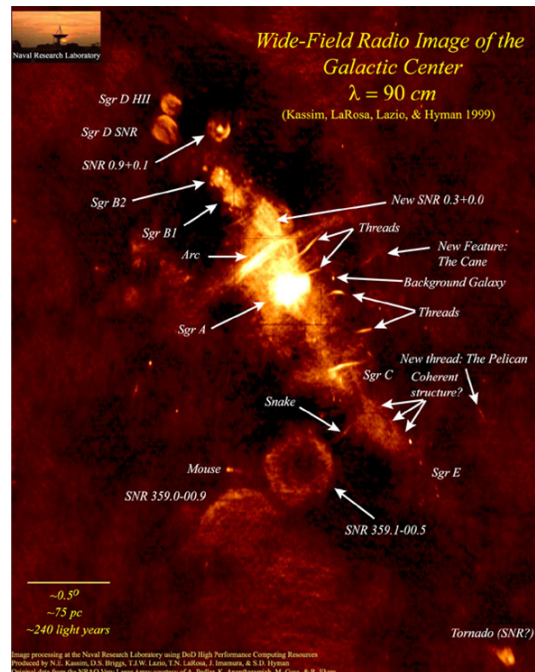
Skryté jádro

- jádro Galaxie
 - patrně obrovská, mírně zploštělá kulová hvězdokupa o rozměrech 4 x 5 kpc
 - nejčtetnější slabí červení trpaslíci
 - obklopeno hustým prstencem mezihvězdné látky => nelze zkoumat jádro ve vizuálním oboru spektra
 - koncentrace hvězd směrem ke středu prudce roste => vyšší pravděpodobnost blízkých setkání hvězd.



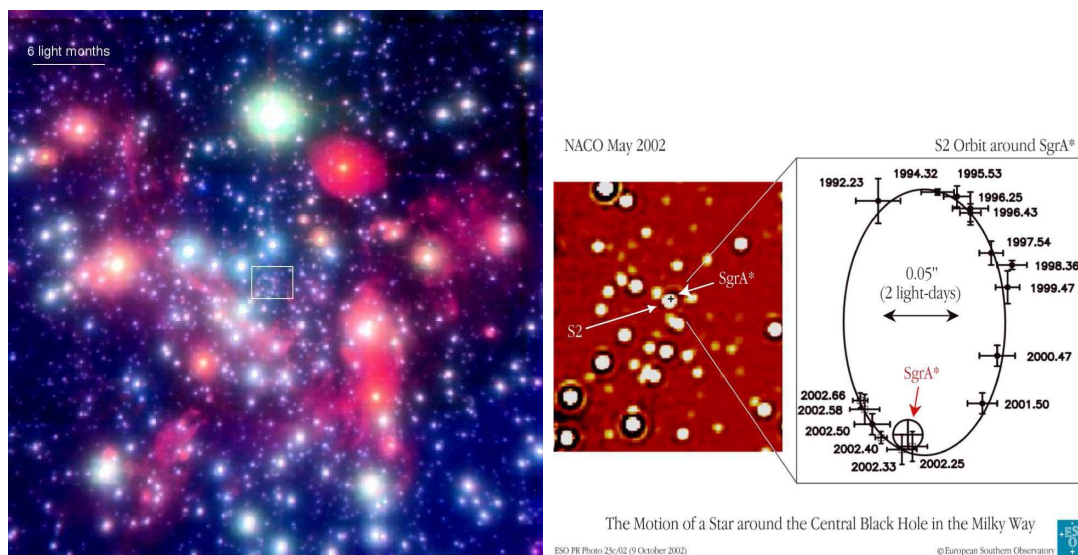
Obrázek 20.9: Spirální ramena Galaxie.

- galaktické jádro – cca 1 pc, výrony plynu a netepelného rádiového záření - výsledek interakce jedné či dvou velmi hmotných černých děr s hvězdami a mezihvězdnou látkou – Sgr A ($3,6 \cdot 10^6 M_{\odot}$)



Obrázek 20.10: Jádro Galaxie.

Objev hmoty pohybující se kolem středu Galaxie - část spadne do centrální černé díry!!!



Obrázek 20.11: Jádru Galaxie.

20.1.5 Rotace Galaxie

prokázána 1927 Jan Oort, 1932 – první poukázal na temnou hmotu
 hvězdy – rychlost oběhu kolem středu Galaxie – závisí na vzdálenosti od středu (z měření radiálních rychlostí a vlastních pohybů hvězd)

model Galaxie: pevná deska s rovnoměrným rozložením hmoty $\Rightarrow v \sim r$ oběžná rychlost hvězd \sim vzdálenosti od středu otáčení

hvězdy – rychlost oběhu kolem středu Galaxie – závisí na vzdálenosti od středu (z měření radiálních rychlostí a vlastních pohybů hvězd)

Galaxie = pevná deska s rovnoměrným rozložením hmoty - oběžná rychlost hvězd \sim vzdálenosti od středu otáčení;

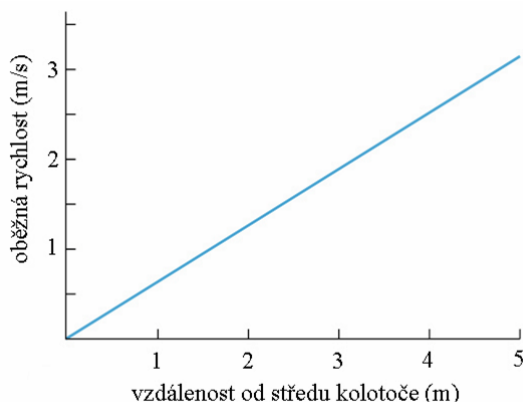
Rotace Galaxie – model s koncentrací hmoty v centrální oblasti (blízké modelu spirálních galaxií)

hmotnost jádra \gg hmotnost hvězdy \Rightarrow podobné jako u Sluneční soustavy \Rightarrow problém dvou těles (Keplerovými zákony)

oběžná rychlost závisí na vzdálenosti nepřímo úměrně

Rotační vlastnosti Galaxie – složité, *diferenciální rotace* nevyhovuje - model pevné desky ani koncentrace látky k centru

Závislost oběžné rychlosti na vzdálenosti od středu hvězdné soustavy - složitá funkce (různá u různých galaxií)



Obrázek 20.12: Rotační model galaxie s rovnoměrným rozložením hmoty - předpokládáme, že prostorová hustota rozložení hvězd ρ je konstantní v celém galaktickém prostoru. Nejvíce se tomuto modelu přibližuje situace v blízkosti galaktického jádra. Za předpokladu kruhových drah hvězd: závislosti rotační rychlosti v na vzdálenosti r od osy rotace - Na libovolný bod A uvnitř galaxie působí odstředivá síla $F_1 = mv^2/r$, kde m je hmotnost hvězdy, r její vzdálenost od osy rotace, v její rotační rychlost. Vedle síly F_1 na bod A působí také přitažlivá síla F_2 , jejímž zdrojem je hmotnost vnitřního elipsoidu. $F_2 = G(\rho r^3 m)/r^2 = krm$, kde k je koeficient úměrnosti, objem elipsoidu závisí na r^3 . Z rovnosti $F_1 = F_2$ vyplývá, že $v = \sqrt{(k)r}$, tedy rotuje jako tuhé těleso. Převzato: Vademecum

Obr: z průběhu rotačních křivek – hmotnost galaxií

20.2 V říši galaxií

velké množství galaxií => každý má aspoň jednu viz např. (ultra)hluboký pohled do vesmíru

galaxie – rozdíly – velikost, stavba => klasifikace - Edwin Hubble (1926, 1936)

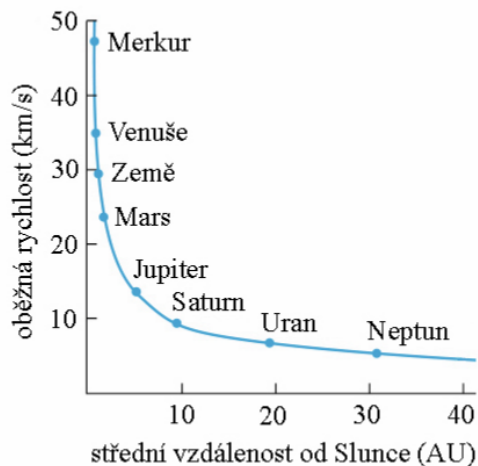
Hubbleova klasifikace galaxií

de Vaucouleursův systém klasifikace galaxií - 3D rošíření Hubblovy klasifikace (1959)

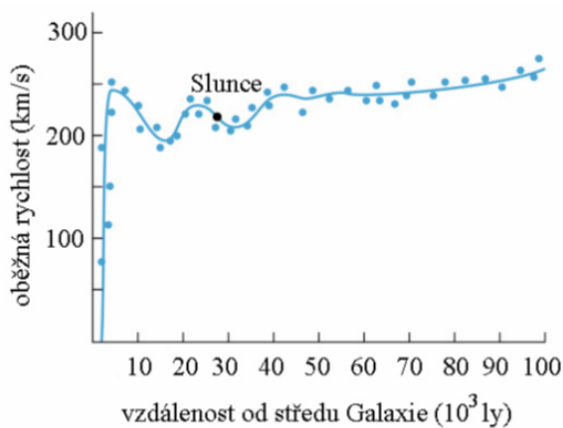
Falešná představa?

Je Hubbleova sekvence vývojová?

- 1930 - 1950: ANO,
ale kterým směrem? E- > S nebo S -j E?
Hubble sám: eliptické nemluvně - > čočková dorostenec - > dospělá spirální nemluvně = „early type galaxy“, ale „raná galaxie“ je nesmysl jiní: nejmladší Irr - > Sd - Sc - Sb - Sa a čočkovité - > E nejstarší
- 1950 - 1980: NE
důvod: galaxie se rodí s počátečním úhlovým momentem



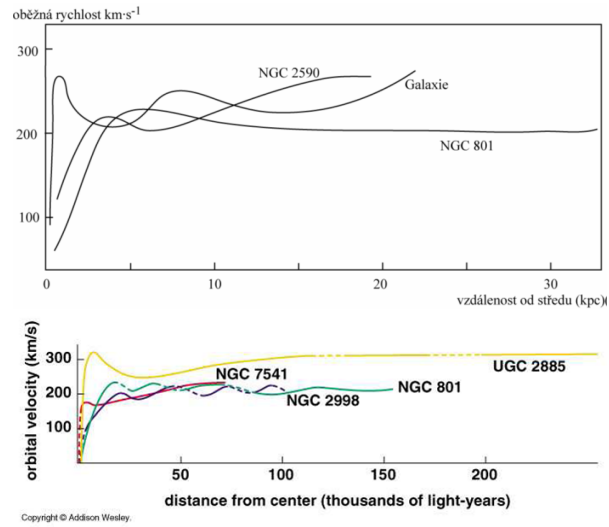
Obrázek 20.13: Rotační model galaxie s koncentrací hmoty v centrální oblasti - hmotnost jádra galaxie je velká ve srovnání s hmotností všech hvězd. Tomuto modelu se nejvíce přibližuje rotace ve spirálních galaxiích - analogie se sluneční soustavou, ve které je hmotnost planet zanedbatelná ve srovnání s hmotností Slunce. Pohyb planet vyjadřuje III. Keplerův zákon $r^3/T^2 = konst.$ Za zjednodušujícího předpokladu, že hvězdy se pohybují v galaxii po kruhové dráze, platí tento zákon pro pohyb hvězd v tomto modelu. Úpravou vztahu pro III. Keplerův zákon dostáváme $v^2/r = konst.$, $v = konst./\sqrt{r}$. Rotační rychlost je tedy nepřímo úměrná \sqrt{r} . Převzato: Vademecum



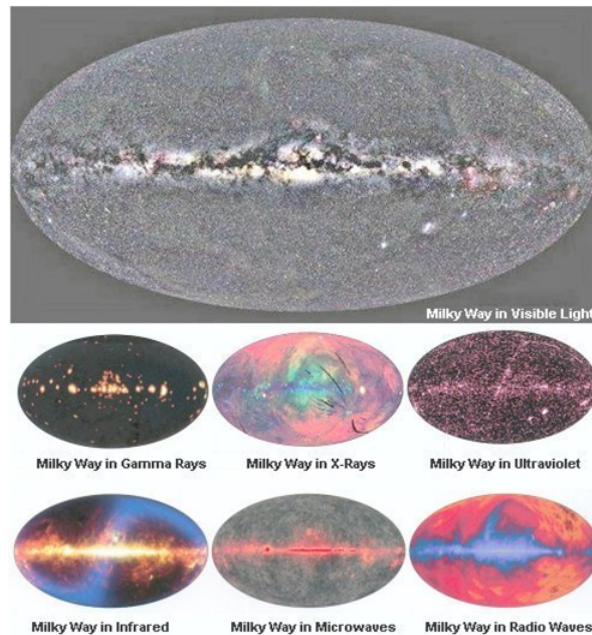
Obrázek 20.14: Rotační křivka.

- 1980 – nyní: ANO!
S – > E: pravděpodobnější – eliptické a čočkové jsou starší galaxie, které se pravděpodobně vyvinuly z stárnoucích spirálních systémů

návrh na lepší dělení: 2006 - Atlas3D (2006) - projekt mapuje 260 eliptických a čočkových galaxií raných galaxií ve 3D použití; „rané galaxie“ – bez plynu pro tvorbu hvězd, červené a mrtvé = fosilní záznamy evoluce galaxií



Obrázek 20.15: Rotační křivky.



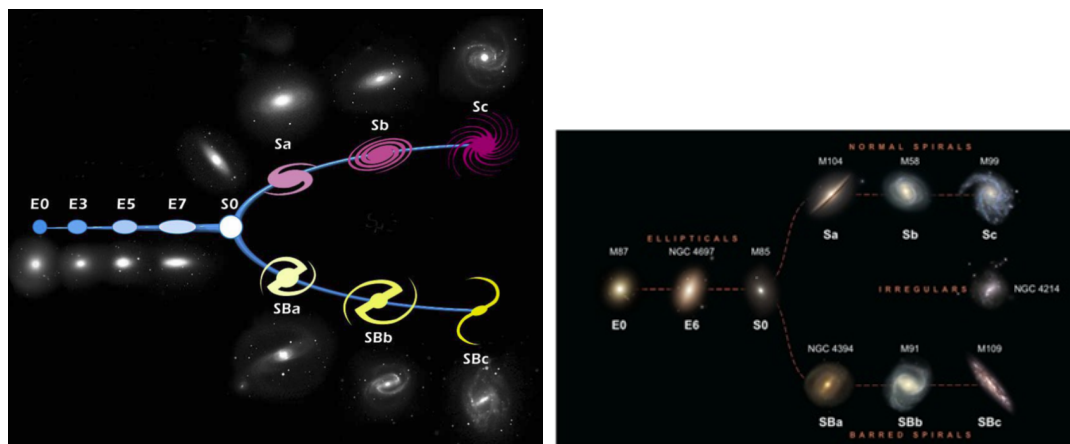
Obrázek 20.16: Galaxie v různých oborech.

rané galaxie – hladké, ploché, hvězdy obíhají samostatně
 spirální – rameno, plyn, prach pro tvorbu hvězd, obíhají v rovině stejným směrem po-
 spolu
 rané – do dvou skupin – rychlé a pomalé rotátory

nové dělení - lépe popisuje vlastnosti



Obrázek 20.17: This high-resolution image of the HUDF includes galaxies of various ages, sizes, shapes, and colors. The smallest, reddest galaxies, of which there are approximately 10000, are some of the most distant galaxies to have been taken by an optical telescope, existing at the time shortly after the big bang.



Obrázek 20.18: Hubbleova klasifikace galaxií - vidlička.

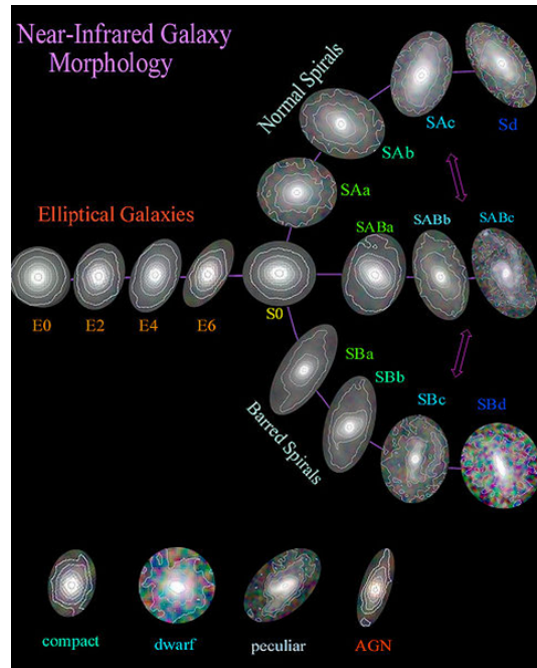
20.2.0.1 Spirální galaxie

Spirální galaxie – označování - S - spirální, případně SB - spirální s přičkou + písmena *a* až *d* - podle poměru velikosti jádra a ramen;

Sa - relativně velké jádro malá ramena – > Sd malé jádro, velká ramena; obdobně SBa – > SBd

Naše Galaxie je typu SBc.

- různorodé tvary
- nejméně dvě spirální ramena připojená přímo nebo přes přičku



Obrázek 20.19: de Vaucouleursův systém klasifikace galaxií - with stage (spiralness) on the x-axis, family (barredness) on the y-axis, and variety (ringedness) on the z-axis .

- v ramenech - hodně žhavých hmotných hvězd,
 - rozsáhlá oblaka mezihvězdné látky (oblasti HII)
- 1 do 20 % (hmotnostně) mezihvězdné látky
- celkové hmotnosti - 10^9 - $10^{12} M_{\odot}$

20.2.0.2 Eliptické galaxie

Eliptické galaxie – označení: E+x, kde $x = 10[(a-b)/a]$, a, b - poloosy galaxie; fakticky E0 (kruhové) – > E7 (ploché)

- tvar koule nebo rotačního elipsoidu
- většinou staré trpasličí hvězdy – $M < 2 M_{\odot}$, malý výkon
- mezihvězdná látka do 0,2 % celkové hmotnosti
- velké rozdíly velikostí a hmotností (obří $10^{13} M_{\odot}$ x trpasličí $10^6 M_{\odot}$)

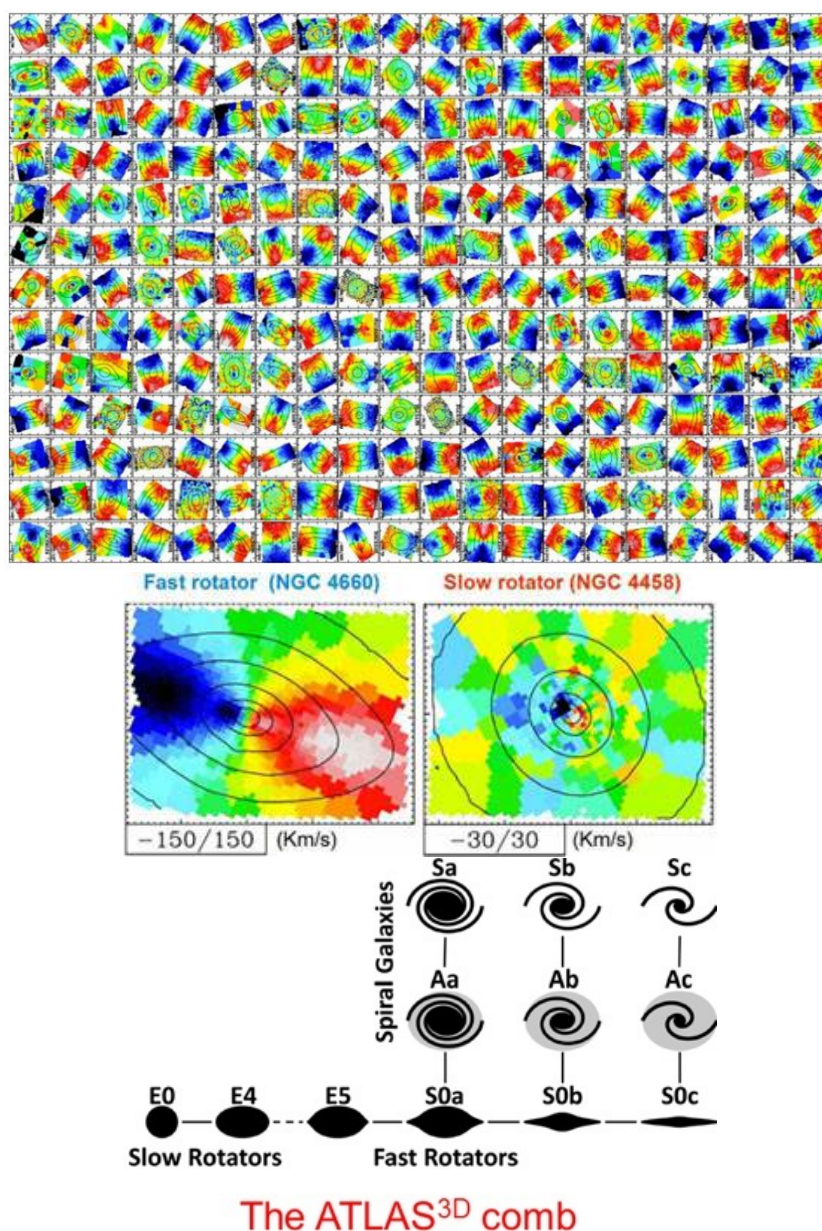
Slupkové galaxie

eliptické galaxie s oblouky, slupkami kolem celé galaxie odhad – 17-44 % E je slupkových

20.2.0.3 Čočkovité galaxie

spirální galaxie bez ramen

Čočkovité galaxie S0 – nelze jednoznačně přiřadit - přechodný typ mezi S a E galaxiemi

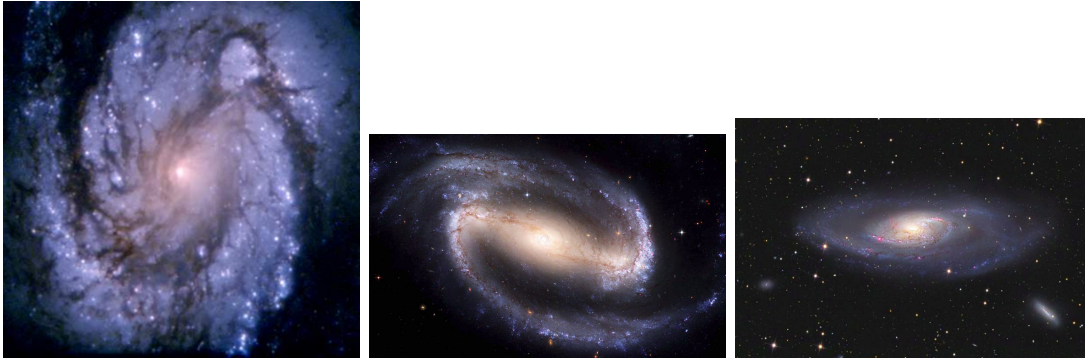


Obrázek 20.20: Maps of the observed velocity of the stars in the volume-limited sample of 260 early-type galaxies of the ATLAS3D survey. Red/blue colours indicate stars moving away/towards us respectively. Fast rotating and disk-like galaxies are characterized by two large and symmetric red/blue peaks at the two sides of the centre. This figure shows that this class of objects constitutes the vast majority of the sample. Credit: ATLAS3D Project.

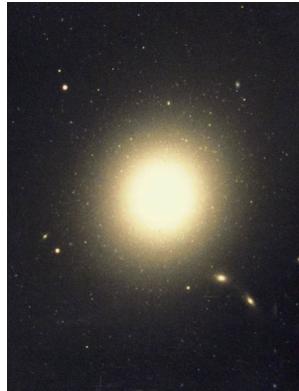
- výrazné jádro (pokles jasu od středu k okrajům stupňovitě),
- někdy sledujeme náznaky spirálních ramen, příčky a vnějšího prstence
- téměř žádná mezihvězdná látka

20.2.0.4 Nepravidelné galaxie

Nepravidelné galaxie – označení Irr (z anglického irregular = nepravidelný);



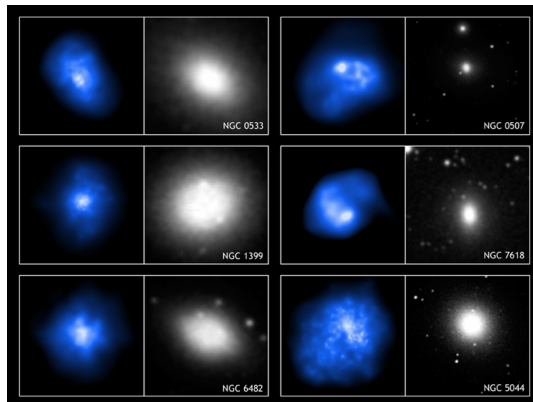
Obrázek 20.21: Spirální galaxie M100, uprostřed NGC1300, vpravo M106 .



Obrázek 20.22: Eliptická galaxie M87.

- několik procent galaxií
- méně hmotné soustavy, $10^8 - 10^9 M_{\odot}$
- 30 - 40 % celkové hmotnosti – mezihvězdná látka => tvorba nových hvězd.

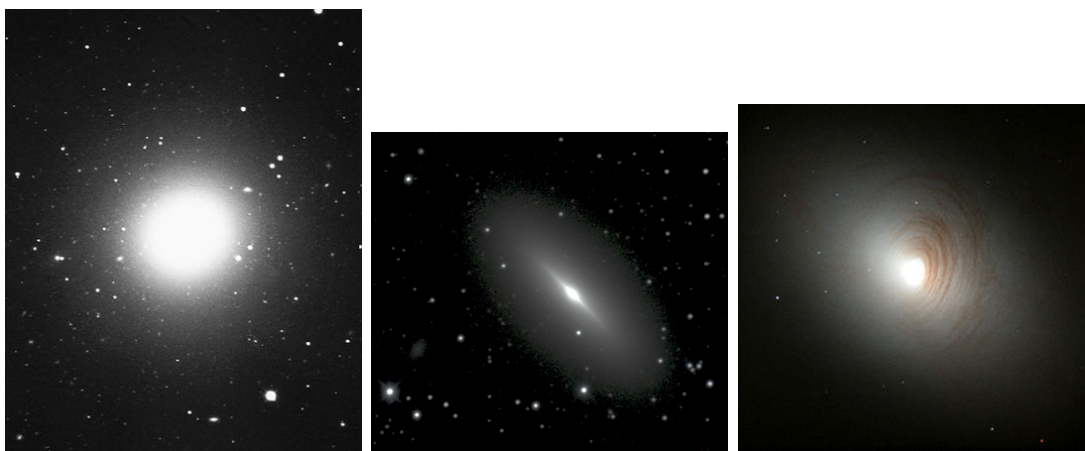
Prstencová galaxie – Hoagův objekt - vzdálena přibližně 600 milionů světelných let.



Obrázek 20.23: Eliptické galaxie ve vizuálním a rtg. oboru. Credit: X-ray: NASA/CXC/U. Ohio/T.Statler & S.Diehl; Optical: DSS.



Obrázek 20.24: Slupková galaxie NGC474.



Obrázek 20.25: Čočkové galaxie.

Statistika typů galaxií - přehled

jen roztríděné galaxie! – celkové odhady krajně nejisté!

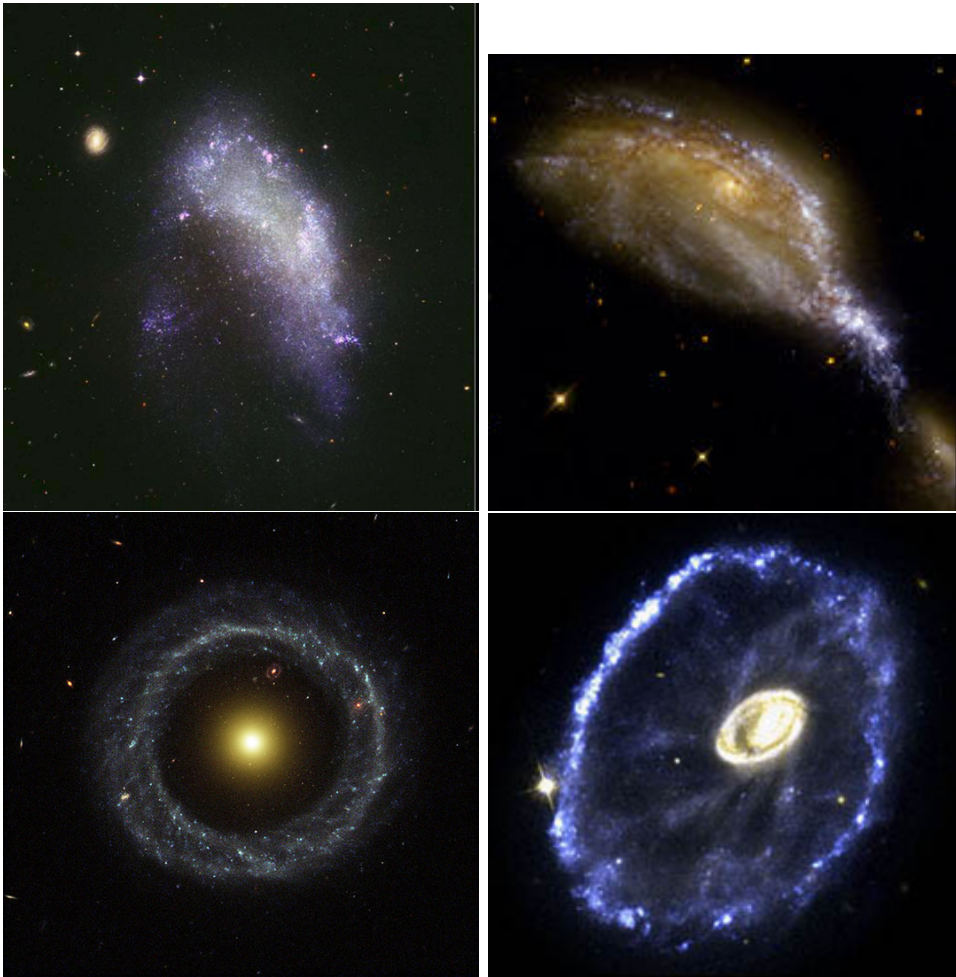
Typ galaxie	Relativní počet (%)
spirální	50
eliptické	25
čočkovité	20
nepravidelné	5

20.3 Aktivní galaxie - AGN

jádra cca 10 % galaxií - anomálie:

- vyšší a proměnlivý tok záření v části spektra
- výrony materiálu, výtrysky ionizovaného plynu až $10^6 M_{\odot}$

1908 – Edward A. Fath – emisní čáry ve spektru NGC 1068



Obrázek 20.26: Nepravidelné galaxie. Dole: Hoagovy objekty.

1926 – Edwin Hubble – emisní čáry u třech galaxií

1943 – Carl K. Seyfert – 12 galaxií s velmi jasným jádrem, odlišným spektrem

studium aktivních galaxií - jedna z priorit galaktické astronomie

Energie aktivních galaxií

Zářivý výkon - o 1-3 řády větší než zářivý výkon všech hvězd v galaxii
 vyzařován z malé oblasti – jádro galaxie => jaderné reakce nestačí !

efektivnější uvolňování energie – > spad hmoty do černé díry => model galaxie s
 masivní ČD uprostřed

kde se bere krmení?

- mezihvězdná hmota
- hvězdy, jejich zbytky (slapové síly)
- materiál z mezigalaktického prostoru
- pohlčené galaxie (kanibalismus)



Obrázek 20.27: Aktivní galaxie.

20.3.1 Typy aktivních galaxií

- rádiově tiché (linery, Seyfertovy galaxie, kvazary QSO)
- rádiově hlučné (rádiové galaxie, blazary, OVV kvazary)

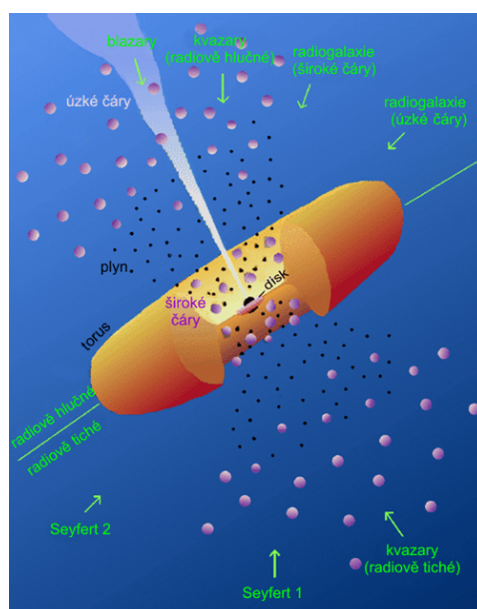
LINERs = Low-ionization nuclear emission-line regions

QSO = quasi-stellar object

OVV = Optically Violently Variable (OVV) quasars

blazar = objekt typu BL Lac

stejná fyzikální podstata x různé úhly pohledu!



Obrázek 20.28: Typy aktivních galaxií.

20.3.1.1 Seyfertovy galaxie

objev – 1943 – Carl K. Seyfert – 12 galaxií – jasné jádro, odlišné spektrum

dnes – cca 200 galaxií (cca 10 % velkých spirálních galaxií)

akreční disky - pod úhlem nebo z boku; z naměřených rudých posuvů => mnohem blíže než kvasary a blazary

spektrum jádra není hvězdné – zakázané, emisní čáry; podle čar – 2 typy

zářivý výkon 10^9 - 10^{12} L_{\odot} – změny v průběhu měsíců => rozměry řádově 0.1 ly



Obrázek 20.29: Seyfertovy galaxie. obr. vlevo – NGC7742 - má napříč asi 3000 světelných let. NGC 7742 je vzdálená asi 72 miliónů ly v Pegasovi vpravo - Co se děje ve středu spirální galaxie M106? Vzhledu disku vířících hvězd a plynu - galaxie M106 dominují dvě jasná spirální ramena a tmavé prachové pásy poblíž jádra. Jasně nověji formované hvězdy blízko jejich vnějších konců zvyrazňují na fotografii nahoře spirální ramena. Jádro M106, ve kterém byl objeven dvojitý výtrysk (jet) o délce galaxie, jasně září na rádiových vlnách a v rentgenových paprscích. Neobvyklá záře ve středu činí M106 jedním z nejbližších příkladů třídy Seyfertových galaxií, o nichž se předpokládá, že velké množství zářícího plynu padá do centrální hmotné černé díry. M106, též s označením NGC 4258, je poměrně blízko ve vzdálenosti 25 miliónů světelných let a zabírá napříč 30 tisíc světelných let a může být viditelná i malým dalekohledem v souhvězdí Honících psů (Canes Venatici)

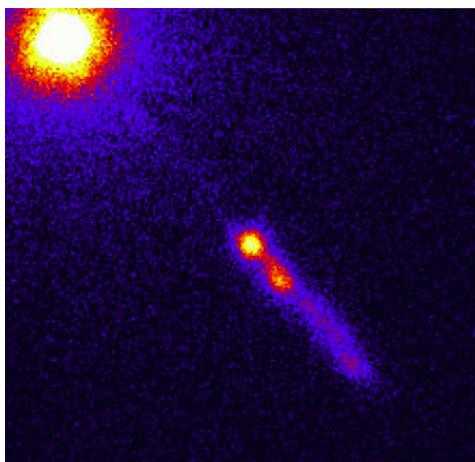
20.3.1.2 Kvasary

kvasary (quasistellar radio source) - nejmohutnější aktivita

- objev 1963 – optický protějšek rádiových zdrojů
- velmi staré, nejvzdálenější objekty ve vesmíru
- nejbližší kvasar 3C 273 – vzdálenost 749 Mpc, rychlost vzdalování $50\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$; 12,8 mag
- nejzářivější objekty ve vesmíru – 10^{15} L_{\odot} (10^4 x více než L_{Galaxie}).

- zářivá oblast – o 20 řádů menší než objem normální galaxie!
- změny zářivého výkonu ve škále dnů => rozměr zdroje < světelné dny

50 000 kvasarů, většina radiově klidná = tzv. tiché kvasary

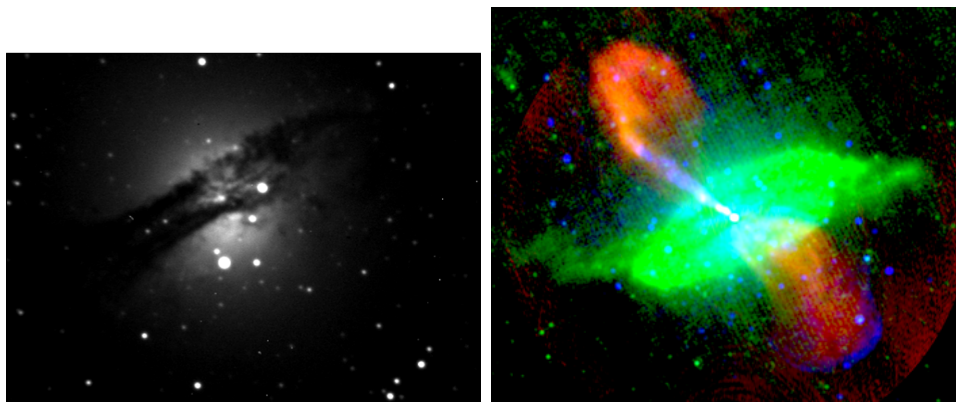


Obrázek 20.30: Kvasar.

20.3.1.3 Rádiové galaxie (radiogalaxie)

z boku pozorovaná eliptická galaxie

emise rádiových vln - synchrotronové záření (elektrony urychlené magnetickým polem)

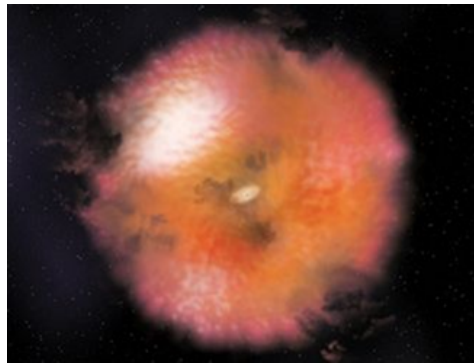


Obrázek 20.31: Rádiová galaxie Cen A. Snímek: MZ, vpravo: False-colour image of the nearby radio galaxy Centaurus A, showing radio (red), 24-micrometre infrared (green) and 0.5-5 keV X-ray emission (blue). The jet can be seen to emit synchrotron emission in all three wavebands. The lobes only emit in the radio frequency range, and so appear red. Gas and dust in the galaxy emits thermal radiation in the infrared. Thermal X-ray radiation from hot gas can be seen in the blue 'shells' around the lobes, particularly to the south (bottom)

20.3.1.4 Nový typ AGN

Ueda et al. – ApJ 664, L79 (2007)

- výsledky družic: Suzaku a Swift BAT (Burst Alert Telescope)
- stovky nových AGN, dříve neodhalených – detekce v rtg. oblasti
- okolo hustý oblak prachu a plynu - viditelné a ultrafialové světlo pohlcuje
- možná odpověď - proč některé supermasivní ČD září a jiné ne



Obrázek 20.32: Nový typ AGN.

20.4 Kanibalismus galaxií

nepřavidelné galaxie – některé „deformované“ spirální galaxie vysvětlení - těsná vzájemná přiblížení a srážky

velmi pomalé setkání galaxií – > menší pohlcena => kanibalismus galaxií



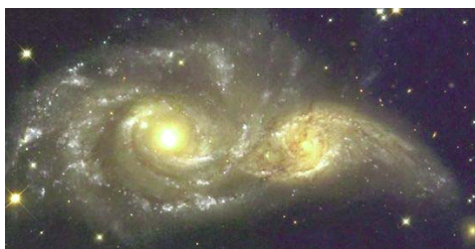
Obrázek 20.33: Kanibalismus galaxií.

Průběh setkání:

- trajektorie hvězd v galaxiích silně změněny, přímá srážka však nehrozí
- mezihvězdný materiál – promíchán a zahuštěn =, překotná tvorba nových hvězd (řádově desítky až stovky tisíc)
- „kanibal ztloustne“
- časté v centrech velkých kup galaxií
- doba setkání – 10^8 - 10^9 let
- kolem velkých kanibalů - tisíce kulových hvězdokup (relativně mladých!)



Obrázek 20.34: Dvě propletené galaxie, označené NGC 3314, se nacházejí v souhvězdí Hydry, ale neinteragují, jen projekce.



Obrázek 20.35: Interagující galaxie NGC 2207 (vlevo) a IC 2163 v souhvězdí Velkého psa.

Aktivní galaxie

Většina záření způsobena rozžhaveným plynem
 Intenzita záření maximální v rádiové oblasti
 Supermasívní černé díry v jejich středech - velmi aktivní.
 Nejvíce záření vychází z jejich jader.

Běžné galaxie

Většina světla pochází z hvězd.
 Emitované záření - nejintenzivnější ve viditelné oblasti
 Obří černé díry v jejich centrech jsou neaktivní.
 Světlo je rozloženo po celé galaxii.

Použitá a doplňující literatura

21 Velkorozměrové struktury ve vesmíru

21.1 Vesmír velkých měřítek

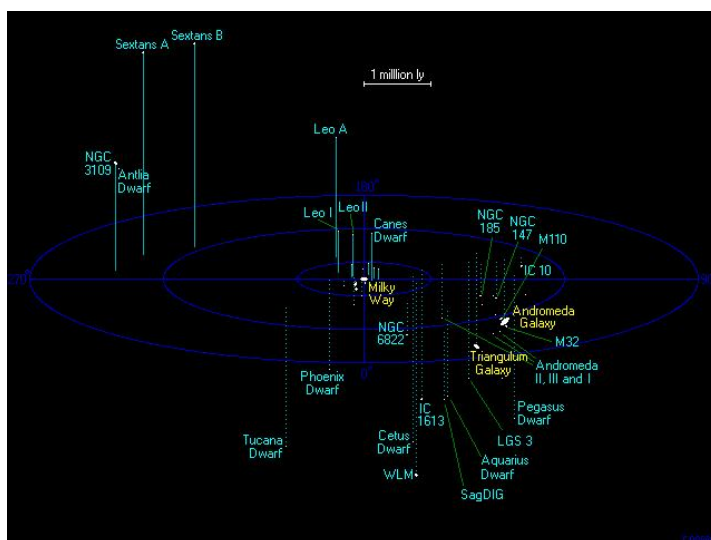
galaxie – většinou v párech, skupinách

Galaxie – ve skupině 50 galaxií (místní skupina galaxií)

známí sousedé: LMC, SMC, M 31 , M 33

nejhmotnější – naše Galaxie a M 31

galaxie místní skupiny - v oblasti o průměru asi 800 kpc



Obrázek 21.1: Místní skupina galaxií.

21.2 Kupy galaxií

největší gravitačně vázané struktury ve vesmíru

- z pozorování - Com, Her, Vir (nejbližší 17 Mpc)
- téměř pravidelné útvary, ale zploštělé, průměr řádově Mpc
- řádově tisíce až desetitisíce gravitačně vázaných galaxií
- neuspořádaný pohyb členů
- kupa jako celek nerotuje
- v centru kupy - obvykle obří eliptické galaxie

„typická“ kupa galaxií - v Panně

- 2500 galaxií (7 obřích E, 10 obřích S),
- průměr 3 Mpc,

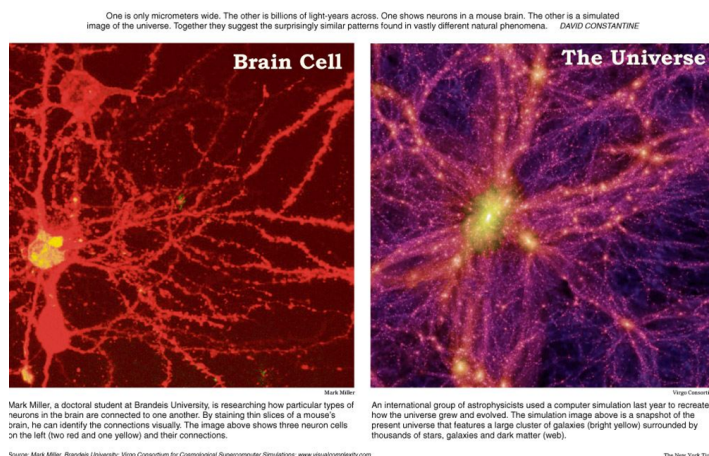


Obrázek 21.2: Kupa galaxií Abell 1689.

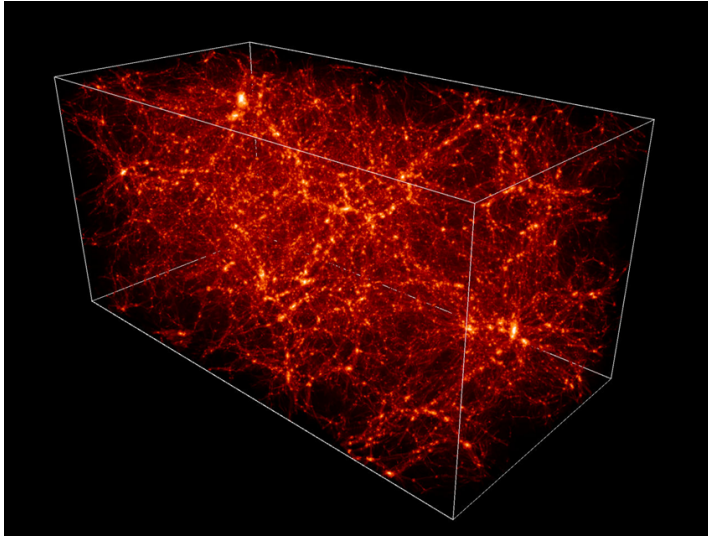
- vzdálenost 17 Mpc,
- střední vzdálenost sousedních galaxií 100 kpc.

„obří“ kupa - v Com

- 25000 galaxií,
- vzdálenost 105 Mpc,
- průměr 8 Mpc.



Obrázek 21.3: Struktury.



Obrázek 21.4: Struktury.

21.3 Velké struktury

Kupy galaxií - největší gravitačně vázané struktury ve vesmíru - v prostoru ve shlucích = nadkupy galaxií

Nadkupa není gravitačně vázána, časem se rozpadá.

Buněčná struktura – galaxie podél stěn nepravidelných „buněk“ - rozměry „buněk“ - 50 - 150 Mpc.

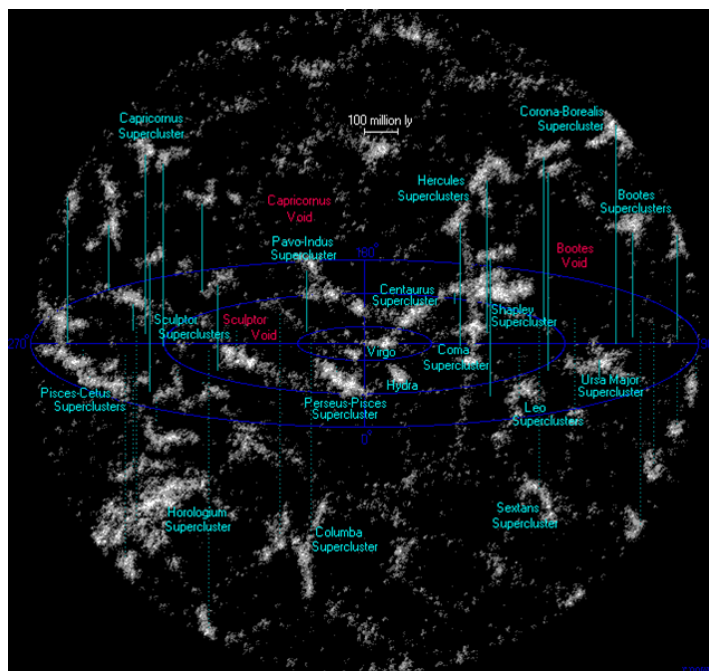
nad několik set megaparseků - žádné struktury, ale ...

21.3.1 Větší než nadkupy

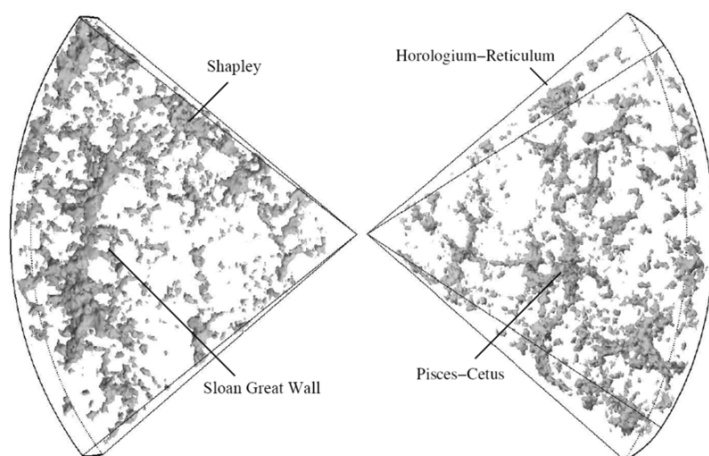
- dlouhá vlákna (filamenty) galaxií - délka přes 250? Mpc,
- galaktická stěna - nakupení galaxií, velikost cca $0,5 \cdot 10^9$? Mpc
- kostra obřích prapůvodních struktur z raných stadií vesmíru

Uspokojivé vysvětlení pro tyto úkazy dosud nemáme.

Použitá a doplňující literatura



Obrázek 21.5: The universe within 1 billion light years of Earth, showing local superclusters. Approximately 63 million galaxies are shown.



Obrázek 21.6: Three-dimensional DTFE reconstruction of the inner parts of the 2dF Galaxy Redshift Survey. The figure reveals an impressive view on the cosmic structures in the nearby universe. Several superclusters stand out, such as the Sloan Great Wall, the largest structure in the universe known to date. "Great Wall," a sheet of galaxies more than 500 million light-years long and 200 million wide, but only 15 million light-years thick. – objev 1989

22 Kosmologie

V našich základech astronomie jsme dospěli takřka k samému závěru. Zabývali jsme se jednotlivými částmi vesmíru od jeho základních stavebních jednotek (hvězd) až největším dosud zaznamenaným strukturám v pozorovatelném vesmíru. Do mozaiky našich znalostí nyní přidáme pohled na vesmír jako celek, jako jeden objekt studia odvětví zvaného kosmologie. Pojem "kosmologie" vychází z řeckého "κοσμολογια", což značí nauka o světě. Tím světem rozumíme v nejširším slova smyslu právě vesmír. Samotné české slovo "vesmír" vychází z ruského slova *весь мир* (ves mir, v překladu „celý svět“) a začalo se používat v době národního obrození, kdy nahradilo staročeské "vesvět". Setkáme se i termínem "kosmos" vycházejícím z řeckého *κόσμος* (ozdoba, šperk), ale později značícího také vše uspořádané, řádné. To byla ovšem jen etymologie několika zásadních slov, jaký je však jejich obsah?

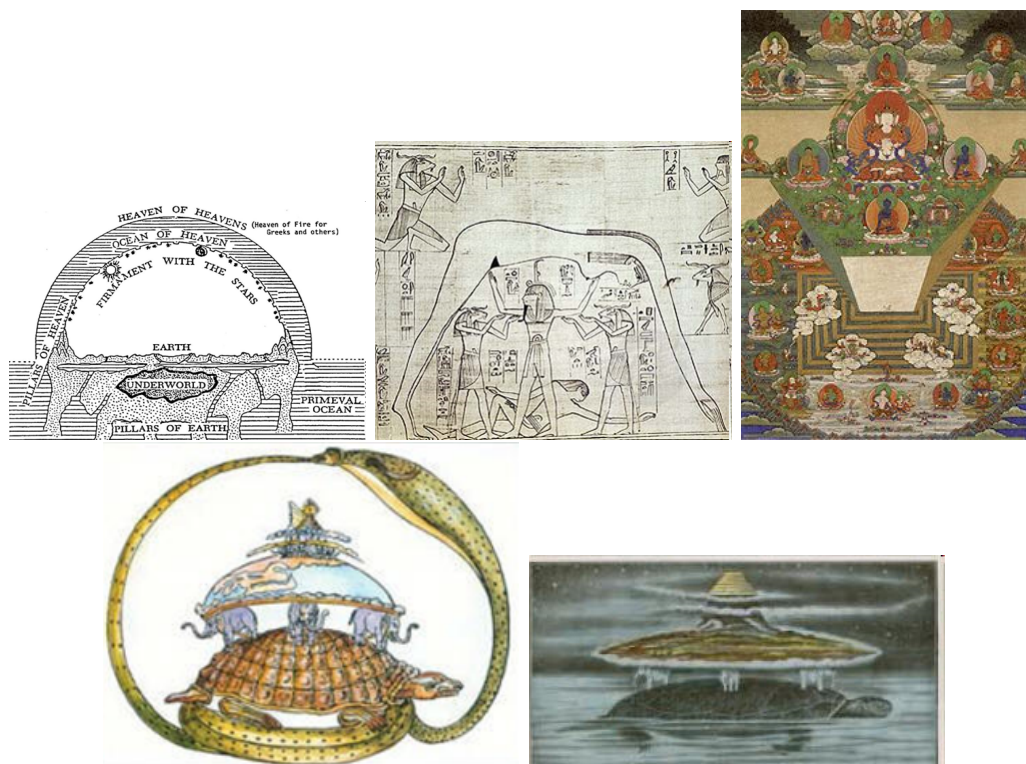
Vesmír či chcete-li kosmos lze definovat jako celek (časo-)prostoru a v něm obsažené hmoty a energie. V užším slova smyslu lze jako vesmír definovat jednoduše prostor mimo naši Zemi a její atmosféru. A kosmologie je pak nauka, která zkoumá vesmír jako celek. Zabývá se jeho vznikem vývojem i budoucím vývojem. Přestože termín kosmologie použil poprvé zřejmě roku 1730 německý filozof Christian Wolff (v knize *Cosmologia generalis*), nejstarší dochované představy lidí o vzniku a vývoji světa kolem nás jsou staré řadu tisíciletí. Připomeňme staré čínské, hinduistické nebo babylonské texty. První představy byly do značné míry mýtické (viz obr. 22.28). Každá kultura řešila otázku původu světa, kde žijeme, po svém. Zpočátku tak byla kosmologie naplňována jen krásnými mýty a pověstmi, později se dostala na pomezí filozofie a náboženství a teprve nakonec se zapojila i věda. Nejednoznačnou roli vědy v kosmologii jí řada lidí přisuzuje i dnes. Kosmologie je však dnes moderní velmi rychle se rozvíjející věda založená na pozorováních! Doufejme, že k takové poznání přispějí i následující řádky.

Předmětem kosmologie je tedy celý náš vesmír, a o i přesto, že vlastně z našeho vesmíru pozorujeme jen kus, vlastně docela malý kousek - a znalosti tohoto kousku vesmíru extrapolujeme na celý vesmír. Při tom aplikujeme jeden zásadní předpoklad - a totiž, že fyzikální zákony platí vždy a všude v celém vesmíru stejně. Problémem ovšem je, že ve vesmíru máme co dočinění i se skrytou hmotou a energií, o nichž toho zatím mnoho nevíme.

Základní metodou kosmologie tak zůstává srovnávání modelových představ s výsledky pozorování. Při popisu vesmíru samozřejmě nemůže kosmolog popisovat okolní svět do nejmenších detailů, pro sestavení modelu okolního světa použije určitá zjednodušení. Například bude model budovat v určité škále velikostí. Vše menší než jistá vzdálenost, a buďte si jisti, že docela velká, pro něj bude z hlediska modelu nezajímavé. Pozorováním poté své představy o vesmíru vložené do vytvořeného modelu potvrdí, verifikuje nebo naopak vyvrátí a pak nezbude nic jiného, než pustit se do tvorby nového modelu.

22.1 První představy a první paradoxy

Na cestě od těchto mýtů až po moderní modely vesmíru je několik mylníků, které další vývoj významně ovlivnily. Nejstarší kosmologické představy o vzniku světa se v podstatě omezovaly jen na naši Zemi, respektive na území té které kultury a její okolí a oblohu



Obrázek 22.1: Mytologie - modely světa.

nad ním. Země měla v těchto mýtech povětšinou tvar kruhové placky, kterou spolu s nebeskou klenbou nesla například obří želva (a trojice slonů na ní), plující v nekonečném vodním chaosu.

O řadu století později - přesněji ve starém Řecku v 5. století před naším letopočtem se tzv. atomisté (například Anaxagorás (500 př.n.l. -428 př.n.l.) nebo Démokritos (460 př.n.l. - 370 př.n.l.)) domnívali, že nekonečně mnoho malých zrněk hmoty (atomů) je rozseto v nekonečné prázdnotě věčného vesmíru. Platón (427 př.n.l.-347 př.n.l.) později protestoval proti myšlence věčného vesmíru. Tvrdil, že vesmír musel být nejprve vytvořen a teprve od svého stvoření může existovat věčně. Nezdála se mu ani úloha atomů. Ze srážek nějakých malých částecek podle něj nikdy nemůže vzejít krása a nemůže být vytvořen náš svět. Inspirován prací Empedokléa (490 př.n.l. - 430 př.n.l.), který jako základní látky všeho bytí definoval čtyři substance: oheň, vodu, vzduch a zemi, vytvořil Platón koncept čtyř jednoduchých základních těles - ohně, země, vody a vzduchu. V jeho představě to nebyly nejmenší částičky hmoty, ale byly to nejjednodušší částice, které bylo možné popsat základním a neměnných jazykem - matematikou. Částici ohně chápal jako čtyřstěn, země jako krychli, vzduchu jako osmistěn a vody jako dvacetistěn. Kolem roku 330 před naším letopočtem rozpracoval ideu základních esencí hmoty Aristoteles. Odmítl atomistický náhled Platóna a jako čtyři prvky tvořící pozemskou materii chápal takto:

- země - chladná a suchá, v moderním pojetí je to pevná látka;
- voda - chladná a mokrá, odpovídá kapalině;
- vzduch - horký a vlhký, odpovídá v moderním pojetí plynu;

oheň - horký a suchý, odpovídá teplu.

K nim ale Aristoteles přidal ještě matérii nebeskou, božskou substanci, která tvoří nebeskou sféru a nebeská tělesa (hvězdy a planety).¹ Aristoteles popsal i chování čtyř pozemských substancí a jejich tzv. přirozené místo. Všechny se pohybují ke středu vesmíru, to je ke středu Země. Voda se pohybuje ke sféře obklopující střed, který je tvořen zemskou substancí. Vzduch se snaží zaujmout místo ve sféře obklopující vodní sféru a oheň směřuje k měsíční sféře, kde se pohybuje Měsíc. Když jsou tyto substance odsunuty ze své přirozené polohy, snaží se vrátit zpět. A tak, například pevná tělesa se ve vodě potápí ke dnu, zatímco bublinky vzduchu stoupají vodou vzhůru nebo kapky deště padají ve vzduchu dolů, ale plameny ohně míří vzhůru. V nebeské sféře je ale vše jinak. Tam se éterická tělesa pohybují na ideálních, perfektních kruhových trajektoriích. Tyto Aristotelovy představy byly bez větších výhrad většinově přijímány až do konce 16. století a ovlivnily tak učence na téměř dvě tisíciletí!

Aristotelův vesmír byl tedy geocentrický, omezený v prostoru, ale nekonečný v čase. Nicméně i ve starověkém Řecku se objevily konkurenční představy o podobě vesmíru. Důležitý mezník představuje zejména zpochybnění ústředního postavení Země v modelu vesmíru. Prvním, kdo "vystrnadil Zemi z centra vesmíru" byl pythagorovec Filoláos (470 př.n.l. - 399 př.n.l.). Do středu vesmíru umístil centrální oheň, kolem něhož obíhají Země, Slunce, Měsíc a planety. Slunce oběhne kolem centrálního ohně za jeden rok. Hvězdy jsou naproti tomu nehybné. Zajímavé je, že Filoláos uvažoval i tom, že Země rotuje kolem své osy. Kolem roku 280 před naším letopočtem přišel Aristarchos ze Sámu (320 př.n.l. - 250 př.n.l.) s heliocentrickým modelem. Do středu vesmíru umístil Slunce a kolem něj nechal obíhat Země i ostatní planety. Aristarchos odvodil tvar Země, snažil se o určení vzdáleností Země, Slunce a Měsíce. Ve svých úvahách se pustil i dál. Prohlásil, že vesmír je nekonečný a hvězdy jsou jiná Slunce. Jenže to už byly na tehdejší dobu příliš kacířské myšlenky a Aristarchos byl obžalován z bezbožnosti. Jeho model byl zamítnut a posléze na dlouho zapomenut. Renesance se dočkal až v 16. století. Mikuláš Koperník (1473-1543) tehdy v podstatě ukončil debatu o postavení Země jako středu vesmíru. Historicky byl střed vesmíru ztotožňován se Zemí. Koperník (1543) s pomocí svého heliocentrického modelu Sluneční soustavy ukázal, že Země je jen jednou ze součástí systému, jednou z planet, které obíhají kolem Slunce. Až ve 20. století se tento poznatek začal označovat jako Koperníkovský princip. Nicméně Koperník řešil lokální postavení Země a Slunce, ale nikoli otázku středu vesmíru. Roli ústředního tělesa převzalo Slunce, ale ani tomu pozice středu vesmíru nepřísluší. I když už Aristarchos a po něm třeba Giordano Bruno mluvili o tom, že Slunce je jen jednou z mnoha hvězd ve vesmíru, bylo třeba přinést nějaký důkaz. Teprve v 18. století se začalo s proměřováním vlastních pohybů hvězd, měřením paralax a určováním jejich vzdáleností nejbližších hvězd. Slunce se tak postupně "začleňovalo" do prostoru mezi ostatní hvězdy. V Herschelově modelu naší Galaxie je Slunce umístěno mírně mimo střed. Dnes víme, že se Slunce nachází skoro na periferii Galaxie, která je jednou hvězdných soustav místní skupiny a ta je součástí ... a tak bychom mohli pokračovat dále. Země a potažmo ani Slunce tedy nemají ve vesmíru žádné privilegované postavení.

Z dob Aristotelových ale do novověku přetrvávalo rozdělení vesmíru na dvě části - pozemskou, tvořenou čtyřmi pozemskými elementy a hvězdnou éterickou sféru. Každá

¹Později byla tato pátá substance označována za tzv. kvintesenci.

byla utvořena jinak a v každé platily jiné přírodní zákonitosti. První pozorovatelské důkazy, které začaly tyto představy nabourávat pochází z konce 16. století. Tycho Brahe, Tadeáš Hájek z Hájku a další pozorovali roku 1572 supernovu v souhvězdí Kasiopeji a důkladným rozborem pozorování určili, že leží dále než Měsíc. Patří tedy do sféry stálic, která měla být podle Aristotela zcela neměnná. Počátkem 17. století se Galileo Galilei (1564-1642) věnoval mimo jiné mechanice a popisoval pohyby těles. Proslavené jsou jeho měření volného pádu těles pouštěných z šikmé věže v Pise. Na jeho práci navázal Isaac Newton (1642-1727), který formuloval zákony pohybu a konečně i gravitační zákon. Gravitace má být univerzální vlastností látky a gravitační zákon by tak měl platit stejně na Zemi i ve vesmíru, podobně jako další pohybové zákony. Po dvou tisíciletích od Aristotela tedy fyzika pozemská a nebeská splynuly! Tím se ovšem vyřešila jen část problému. Pozemská i nebeská tělesa se řídí stejnými fyzikálními zákony, ale mají také stejné složení? Na odpověď bylo nutné počkat až do poloviny 19. století a nástupu spektrální analýzy. Ta prokázala, že hvězdy a obecně vesmírné objekty jsou složeny ze stejných prvků jako Země a předměty na ní. Teprve od té doby bylo možné beze zbytku aplikovat jednu fyziku na celý vesmír.

Základní paradigma kosmologie:

Žádný bod v prostoru nemá privilegované postavení!

=>

Vesmír musí být homogenní a izotropní!

Edward Milne (1896-1950) - kosmologický princip

22.2 Newtonův model vesmíru

vesmír je nekonečný, rovnoměrně vyplněný hvězdami, které nekonají žádný systematický pohyb => homogenní, izotropní - v prostoru i čase

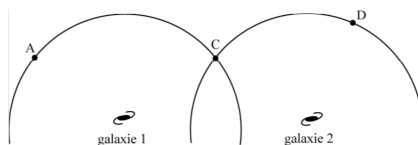
hezké ale!!!

vady Newtonova modelu = kosmologické paradoxy:

- gravitační paradox - výsledné gravitační pole nekonečného počtu kosmických objektů => gravitační síly se vykompenzují, ale potenciály jdou k nekonečnu řešení: prázdny vesmír
- fotometrický paradox – Olbersův, Keplerův . . . když je hvězd nekonečně mnoho, proč nevyplní oblohu? řešení: - hvězdy „nežijí“, nezáří nekonečně dlouho
 - vesmír nekonečný v prostoru i čase, ale světlo ze stejně vzdálených míst na slupce k nám „putuje“ určitou dobu; vesmír vznikl => ze vzdálenějších slupek světlo nedolétlo, vesmír ještě neexistoval => počet slupek není nekonečný
 - vesmír se rozpíná => kosmologický červený posuv záření a snížení intenzity záření

Nejjednodušším důkazem vývoje a časových změn vesmíru je tma v noci.

Izotropie a homogenita.



Obrázek 22.2: Izotropie a homogenita. Převzato z knihy Stevena Weinberga První tři minuty (Mladá fronta, Praha 1983, překlad Michal Horák, 25-26).

komentář k obrázku: Je-li vesmír izotropní kolem galaxie 1 i kolem galaxie 2, pak je homogenní. Abychom ukázali, že podmínky v libovolných dvou bodech A a B jsou stejné, nakreslíme kružnici se středem v galaxii 1, procházející bodem A, a jinou kružnici se středem v galaxii 2, procházející bodem B. Izotropie kolem galaxie 1 vyžaduje, aby podmínky byly stejné v bodě A a v bodě C, kde se obě kružnice protínají. Podobně izotropie kolem galaxie 2 vyžaduje, aby byly stejné podmínky v B a C. Jsou tedy stejné podmínky i v A a B.

okolní prostor nehomogenní – záleží na měřítkách – od 108 pc výše vesmír homogenní; reprezentativní vzorek vesmíru – krychle o hraně 200 milionů sv. l. – v našem dohledu jich je milión!

22.3 Standardní model

do poč. 20. st. – vesmír statický a věčný

1916 Albert Einstein: OTR - rovnice obecné relativity

$$G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

- matematický popis faktu, že hmota kolem sebe zakřivuje prostor a čas - $\kappa = 8\pi G/c^4$
 pro slabá pole Einsteinovy rovnice - \rightarrow Newtonův gravitační zákon - vesmír statický
 \Rightarrow 1917 kosmologická konstanta $G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$

1922 Alexandr Fridman - řešení rovnic OTR popisujících vývoj vesmíru v čase \Rightarrow vesmír není statický, ale dynamický!

1927 Georges Lemaître - nezávislé potvrzení Fridmanových výpočtů

1929 Edwin Hubble – objev vzdalování se galaxií, rozpínání vesmíru

1931 Albert Einstein – kosmologická konstanta = největší omyl života

1998 renesance kosmologické konstanty (akcelerace rozpínání vesmíru)

duben 2012 potvrzena oprávněnost kosmol. konstanty (10m dalekohled SPT)

22.3.1 Geometrie vesmíru

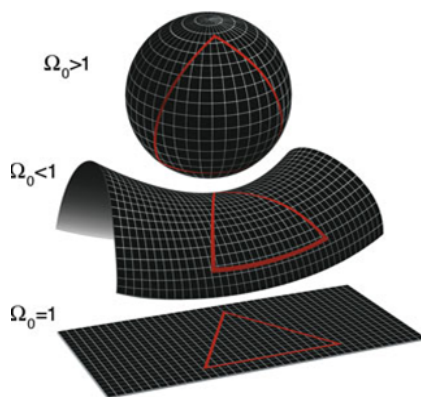
Dominující síla – gravitace – dalekého dosahu, nepřímo úměrná čtverci vzdálenosti, nelze ničím odstínit => kosmologické modely vesmíru založené na teorii gravitace – zejména OTR - tělesa se pohybují po nejprímější možné dráze v prostoročasu zakřiveném působením hmotných těles

platí kosmologický princip => geometrii vesmíru lze popsat pomocí křivosti prostoru.

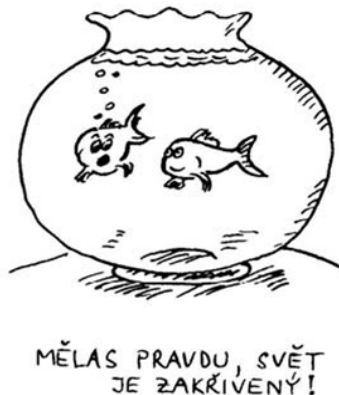
$\Omega_0 > 1$ => 3D prostor má vlastnosti obdobné vlastnostem povrchu koule: (konečný objem, bez hranic, součet vnitřních úhlů v trojúhelníku $\geq 180^\circ$)

$\Omega_0 = 1$ nekonečný a nezakřivený prostor, platí euklidovská geometrie

$\Omega_0 < 1$ 2D analogie v sedlové ploše (prostor nekonečný, součet úhlů v trojúhelníku $< 180^\circ$)



Obrázek 22.3: Modely vesmíru. (Ω – poměr celkové střední hustoty vesmíru ke kritické hustotě)

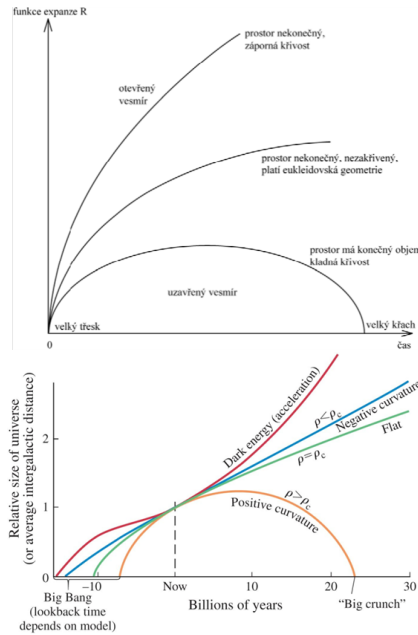


Obrázek 22.4: Vtip - zakřivený vesmír.

v počátečních fázích se vesmír rozpíná, expanze vesmíru probíhá buď stále nebo se může změnit ve smršťování

Funkce expanze (škálovací faktor) R : bezrozměrné číslo, (udává, jak se s časem mění vzdálenosti ve vesmíru)

v čase t_0 vzdálenost dvou kup galaxií l_0 , v čase t $l_t = R(t)l_0$ (z definice: $R(t_0) = 1$)



Obrázek 22.5: Modely vesmíru. Zdroj - dolní obr. <http://www.nat.vu.nl/wimu/FundConst-Notes.html>

22.4 Rozpínání vesmíru a Hubbleův vztah

do poč. 20. st. – vesmír statický a věčný

proč ne?

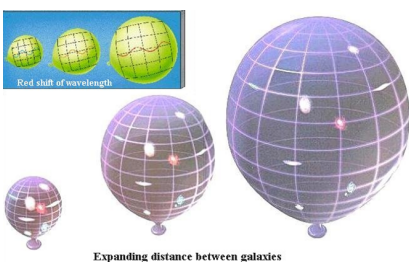
homogenní vesmír => všude stejný tlak => nevzniká rozdíl tlaků - uplatňuje se pouze gravitace, kterou nelze nijak odstínit => vesmír musí být dynamický

model rozpínání:

2D - velká gumová blána (balónek) s tečkami (tečky=kupy galaxií) a sítí – při rozpínání se roztahuje síť, ale tečky neputují napříč sítí - matematicky – Hubbleův vztah

3D – bublanina s rozinkami

o kolik za rok? - v 1 m³ objemu o 0,23 mm³/rok



Obrázek 22.6: Modely vesmíru. Rozpínání

Hubbleův vztah a kosmologický princip

kosmologický princip => pozorovatel by měl vidět stejné rozložení rychlostí ostatních galaxií nezávisle na místě, kde se nachází

matematickým důsledkem kosmologického principu - Hubbleův vztah (1929):

Relativní rychlost libovolných dvou galaxií je úměrná vzdálenosti mezi nimi.

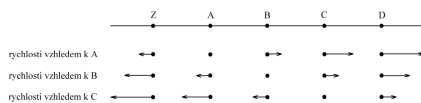
$v = Hr$ – potvrzením správnosti kosmologického principu

dvojí směr:

Hubble - zjištění $v=H.r$ => nepřímé potvrzení správnosti kosmologického principu => různé části vesmíru se neliší => platí kosmologický princip

a obráceně

kosmologický princip správný => vztah úměrnosti mezi vzdáleností a rychlostí galaxií => z měření Dopplerova posuvu určíme vzdálenost dalekých objektů



Obrázek 22.7: Rozpínání - galaxie

Hubble - zjištění $v = H.r$ - > nepřímé potvrzení správnosti kosmologického principu => různé části vesmíru se neliší => platí kosmologický princip

a obráceně

kosmologický princip správný => vztah úměrnosti mezi vzdáleností a rychlostí galaxií => z měření Dopplerova posuvu určíme vzdálenost dalekých objektů

Nejdůležitější kosmologická konstanta = Hubbleova konstanta, $[\text{km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc})]$ $[\text{s}^{-1}]$

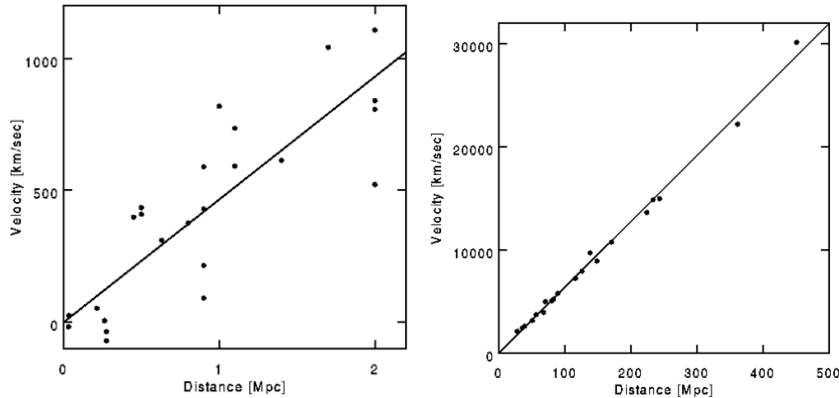
- udává o kolik se zvětší rychlost vzdalování (v $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$), při přechodu k objektům vzdálenějším o jednotku vzdálenosti (1 Mpc).

Hubbleova konstanta není konstantní! mění se s časem
protože se s časem mění rychlost rozpínání

Hubbleova konstanta
 $\text{km}/(\text{s Mpc}) [\text{s}^{-1}]$

- udává o kolik se zvětší rychlost vzdalování (v $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$), při přechodu k objektům vzdálenějším o jednotku vzdálenosti (1 Mpc).

Hubbleova konstanta není konstantní!
mění se s časem
proč?
protože se s časem mění rychlost rozpínání



Obrázek 22.8: Měření - data. grafy z http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmo_01.htm

Hubbleova konstanta - v současnosti $H_0 = 74.2 \pm 3.6 (\text{km}\cdot\text{s}^{-1})/\text{Mpc}$ (HST, 2009)
kombinací všech dostupných dat: $70.8 \pm 1.6 (\text{km}\cdot\text{s}^{-1})/\text{Mpc}$ pro plochý vesmír, jinak
 $70.8 \pm 4.0 (\text{km}\cdot\text{s}^{-1})/\text{Mpc}$ (NASA, 2010); 21.3.2011 $73.8 \pm 2,2 (\text{km}\cdot\text{s}^{-1})/\text{Mpc}$

22.5 Rozpínání vesmíru

Vesto Slipher – cca 1920 – spektra 36 tzv. „spirálních mlhovin“ z 41 – červený posuv spektrálních čar

červený posuv

$z + 1 = \lambda/\lambda_0$, λ_0 - původní vlnová délka, λ - současná vlnová délka

Interpretace červeného posunu spektrálních čar:

u blízkých galaxií - pomocí Dopplerova jevu - důsledek vzdalování objektů

vzdálené galaxie – jde o kosmologický rudý posuv v důsledku rozpínání vesmíru velkých měřítek (popsáno Hubbleovým vztahem) Kosmologický červený posuv, který foton vy-

kazuje, poskytuje informaci, kolikrát se zvětšil vesmír za dobu jeho putování prostorem.

rozpínání vesmíru nemá vliv na vzdálenosti gravitačně vázaných objektů => v důsledku rozpínání vesmíru se nemění velikosti atomů či molekul, vzdálenost Země – Slunce nebo vzdálenosti hvězd v Galaxii

vzdálené galaxie – nelze použít - kosmologický rudý posuv, protože vesmír velkých měřítek se rozpíná

Kosmologický červený posuv, který foton vykazuje, poskytuje informaci, kolikrát se zvětšil vesmír za dobu jeho putování prostorem. rozpínání vesmíru nemá vliv na vzdálenosti gravitačně vázaných objektů => v důsledku rozpínání vesmíru se nemění velikosti atomů či molekul, vzdálenost Země – Slunce nebo vzdálenosti hvězd v Galaxii

22.5.1 Rozpínání vesmíru - tam a zpět

1922 – Fridman - modely

1924 – Hubble – vzdálenost galaxií

1927 – Lemaitre – modely

1929 – Hubbleův vztah

1931 – Lemaitre – expanze vesmíru => obrácením toku času – > nulové rozměry vesmíru, „prapůvodní atom“

1948 - George Gamow & asistent Ralph Alpher & „do počtu“ Hans Bethe (α, β, γ)

Alpher, R.A.; Bethe, H.; Gamow, G. (1948). "The Origin of Chemical Elements, - vyšel 1.4.

1948 – Fred Hoyle et al. – teorie kvazistacionárního vesmíru (Steady State Theory)

1949 – Hoyle - termín velký třesk - teorii VT nepodporoval, termín posměšný

počátek rozpínání vesmíru – okamžik velkého třesku = singularita, rozběhl se čas; => vesmír v minulosti - menší, hustší a teplejší.

velký třesk neznamená výbuch! - vesmír se nikam nerozpíná, nese si svůj prostor s sebou; začal se rozpínat sám prostor, v tu chvíli začal plynout čas

Problém – neexistovaly důkazy, nebylo bráno vážně

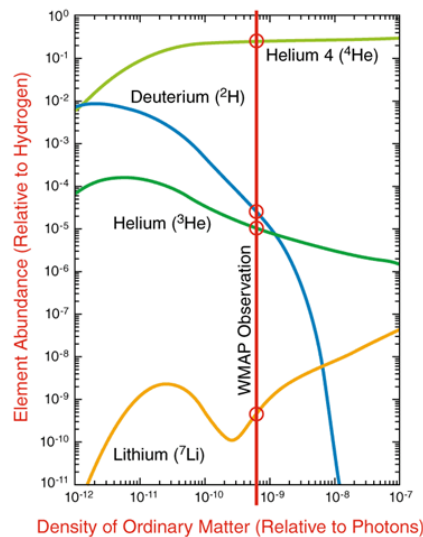
22.5.2 Důkazy teorie velkého třesku

- rozpínání vesmíru - 1929 - Edwin Hubble - pozorování vzdalování galaxií, Hubbleův zákon
- zastoupení lehkých prvků H, He, Li ve vesmíru - teorie velkého třesku předpovídá, že tyto prvky vznikly z protonů a neutronů v prvních minutách po VT



Obrázek 22.9: Vtipy

- mikrovlnné kosmické záření na pozadí (CMBR Cosmic microwave background radiation) raný vesmír byl velmi horký, CMBR je pozůstatek žáru po VT 1965 - objev reliktního záření
- vývoj a rozložení galaxií vzdálenější galaxie, kvasary a uskupení mají jiné vlastnosti než blízké (jsou starší)



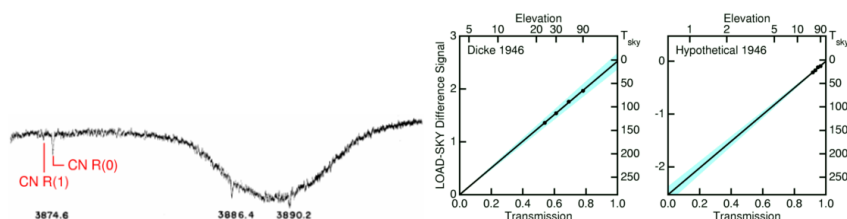
Obrázek 22.10: prvky

22.5.2.1 Reliktní záření

1937 T. Dunham a W. Adams – neuvědomělé pozorování reliktního záření

1941 A. McKellar – studium mezihvězdných molekul

1946 R. Dicke – měření jasové teploty oblohy v závislosti na úhlové výšce (elevačním úhlu)



Obrázek 22.11: Předchůdci CMB

1948 - G. Gamow, R. Alpher, R. Herman - v rámci svého horkého modelu vesmíru předpověď existence všesměrového mikrovlnného záření (odhady teplot různé $T=5-50$ K)

žádný pokus o pozorovací důkaz

1957 - Tigran A. Šmaonov – změřil efektivní teplotu rádiového pozadí 4 ± 3 K, intenzita signálu byla nezávislou na čase a směru

poč. 60. let - nezávislé teoretické předpovědi - Zeldovič, Dicke, Doroškevič, Novikov...

1965 A. Penzias, R. W. Wilson – objev reliktního záření teoretické zdůvodnění – Dicke, Roll, Wilkinson, Peebles v témže čísle ApJ 142

Relikt ní záření – obsahuje v sobě 30x více energie než bylo kdy vyzářeno z hvězd

Vlastnosti reliktního záření v současnosti: záření AČT o $T = 2,725$ K

Koncentrace fotonů reliktního záření: $n_\gamma = 4,11 \cdot 10^8$ fotonů/ m^3 . Počet nukleonů: $n_n = 0,22$ nukleonu/ m^3 – \rightarrow poměr je 1:1 900 000 000!

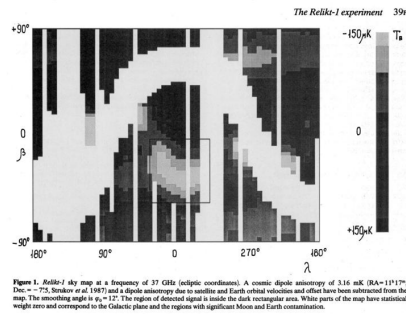


Obrázek 22.12: Penzias a Wilson

Relikt ní záření z kosmu

1983 sovětská družice – projekt RELIKT -1, výsledky 1992

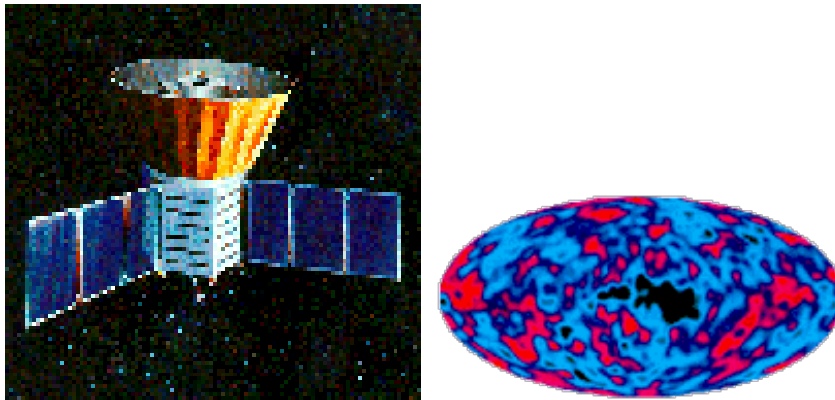
1989 - COBE (Cosmic Background Explorer) – za 8 min 1. výsledek: relikt ní záření = záření AČT o teplotě 2,73 K s přesností 10^{-3} objevy: anisotropie reliktního záření + fluktuace teploty záření odchylky od průměru 10^{-5}



Obrázek 22.13: Výsledky z projektu RELIKT-1

rozlišovací schopnost: 7°

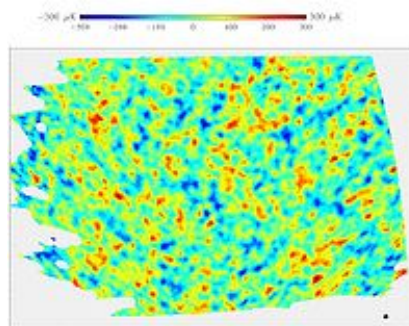
Smoot & Mather - Nobelova cena (2006)



Obrázek 22.14: COBE

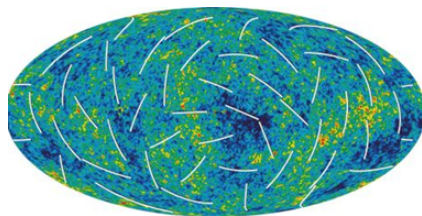
1998 – 2000 - balónová měření (BOOMERang, MAXIMA a další)

rozlišovací schopnost: cca 1/6°.

zpřesnění teploty reliktního záření a hodnoty fluktuací (70 μK) => podpora inflační teorie a plochosti našeho vesmíru

Obrázek 22.15: BOOMERang

2001-2010 - WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)
 studium anisotropie, fluktuací a polarizace reliktního záření;
 úhlové rozlišení: $0,3^\circ$; teplotní citlivost $20 \mu\text{K}$
 rozbor spektra fluktuací reliktního záření => dosud nejpřesnější určení parametrů našeho vesmíru

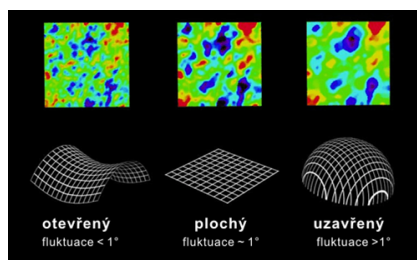


Obrázek 22.16: WMAP

2009 - Planck – evropský projekt
 úhlové rozlišení: $0,17^\circ$; teplotní citlivost $2 \mu\text{K}$

souhrn všech projektů zkoumajících CMB <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/expt/>

Ověření geometrie vesmíru



Obrázek 22.17: Geometrie vesmíru - ověření z měření

22.5.3 Problémy standardního modelu

problém počáteční singularity – nekonečná teplota singularity; řešení inflací problém plochosti vesmíru – geometrie vesmíru závisí na jeho hustotě
 současná \approx kritická => plochý vesmír nastavení v minulosti mimořádně přesné – je to možné?

problém horizontu – vesmír o velikosti R se rozpínal – $R \propto t^{1/2}$, ale horizont informace $R_H \propto t$ řeší inflace

Zvídavé otázky tvůrcům standardního modelu

problém baryonové asymetrie (proč ve vesmíru nepozorujeme antihmotu?)
 problém magnetických monopolů (kde jsou?)

kde se vzaly počáteční fluktuace nutné k tvorbě galaxií?
 proč je dimenze vesmíru právě 4 (tři prostorové dimenze a jedna časová)?

***** konec kosmologie 1/2

22.6 Modely vesmíru

standardní model – model Λ CDM, Lambda-CDM (Lambda-Cold Dark Matter), Big Bang theory – většina astronomů

model kvazistacionárního vesmíru (Steady State theory) – Bondi, Gold, Hoyle (1948)
 - vesmír plochý, nekonečně velký, nekonečně starý, homogenní a izotropní v čase i prostoru; pro udržení hustoty při rozpínání povoluje tvorbu hmoty

22.7 Jak starý je vesmír?

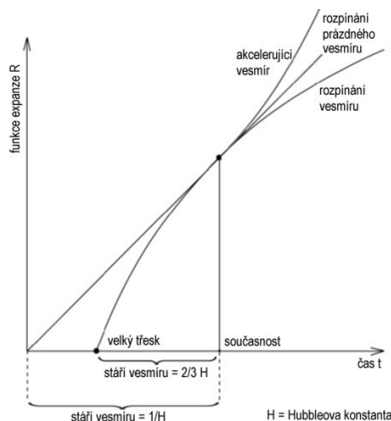
odhad pomocí Hubbleovy konstanty

úvaha: rozpínající se vesmír => rychlost rozpínání ovlivněna jedinou silou: gravitační
 => prázdný vesmír se rozpíná konstantní rychlostí => odhad stáří vesmíru: $1/H$

reálný vesmír: stáří menší v důsledku brzdění rozpínání gravitační silou pro standardní kosmologický model - doba existence vesmíru = $2/3 \cdot 1/H$

$13.75 (\pm 0.11) \cdot 10^9$ let

ověření – dle stáří nejstarších hvězdných objektů - kulové hvězdokupy, někteří bílí trpaslíci – stáří alespoň 12 mld let



Obrázek 22.18: Stáří vesmíru

22.8 Vývoj vesmíru

22.8.1 Velmi raný vesmír

do 10^{-43} s – Planckova epocha není jednotný popis, více teorií; všechny fyzikální interakce jsou spojeny v jediné univerzální

10^{-43} – 10^{-36} s – epocha velkého sjednocení vesmír chladne a rozpíná se; oddělení gravitační interakce

10^{-36} – 10^{-12} s – elektroslabá epocha začíná oddělením elektroslabé a silné interakce, měly by vzniknout mg. monopóly – nepozorují se – > vyřešeno zavedením inflace v inflačním modelu konec epochy v čase 10^{-32} s

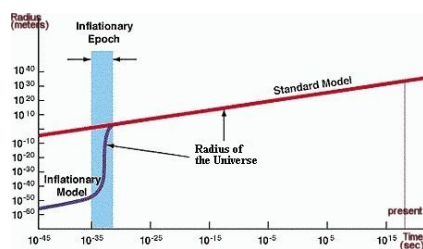
cca 10^{-36} – 10^{-32} – inflační epocha překotné rozepnutí/nafouknutí vesmíru (inflace vesmíru) – zvětšení objemu vesmíru o nejméně 78 řádů! (1980 Alan Guth, 1981 Katsuhiko Sato)

příčina? - odpudivé gravitační síly vyvolané působením záporného tlaku vakua. Souběžně s nafukováním vznikala ve vesmíru i nová hmota

na konci: ve vesmíru kvark-gluonové plazma

řeší nedostatky standardního modelu

baryogeneze - tvorba baryonů: nevysvětlená nerovnováha hmota - anti-hmota



Obrázek 22.19: Vývoj vesmíru - inflace

22.8.2 Raný vesmír

méně spekulací, více fyzikálního zdůvodnění; supersymetrie vlastností vesmíru => pak porušení při energii $\gtrsim 1$ TeV

10^{-12} – 10^{-6} s - kvarková éra
všechny interakce odděleny; částice získávají hmotu ale teplota příliš vysoká, aby se kvarky spojily v hadrony

10^{-6} - 1 s - hadronová éra
tvorí se hadrony (protony, neutrony) ; oddělily se neutrony – volně putují vesmírem =>

kosmické neutrinové pozadí (obdoba mikrovlnného pozadí, reliktního záření – uvolněno později) na konci – většina hadronů a antihadronů anihilovala

hadrony - baryony (poločíslný spin, 3 kvarky nebo 3 antikvarky) a mezony (celočíslný spin = bosony - kvark+antikvark)

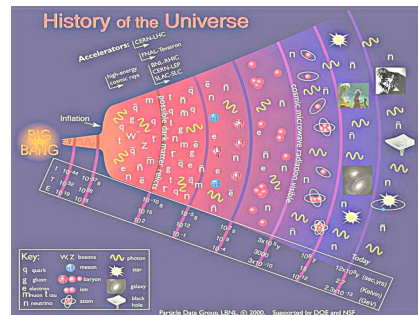
1 – 10 s – leptonová éra

ve vesmíru dominovaly leptony a anti-leptony; na konci – konec tvorby nových párů lepton-antilepton, většina stávajících anihilovala, zůstal jen malý zbytek leptonů; vesmír byl neprůhledný (rozptyl na volných elektronech);

leptony - nepůsobí na ně silná jaderná síla (silná interakce); nabité (elektron, mion, tauon) + neutrina

10 s – 380 000 let – fotonová éra

většina energie vesmíru ve fotonech, které interagovaly s protony, elektrony a event. jádry, na konci - oddělení záření od látky – vznik reliktního záření; před tím vesmír zcela neprůhledný, hustota $2 \cdot 10^9$ větší, teplota 3 000 K; ve vesmíru zárodky kup galaxií a buněčné struktury



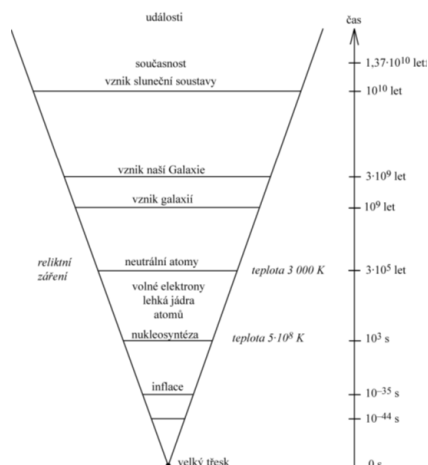
Obrázek 22.20: Vývoj vesmíru

Nukleosyntéza (3 min - 20 min) během fotonové éry tvorba atomových jader až po He^4 , kde skončila většina neutronů hmotnostně 3x více H než He, ostatní – jen stopové množství konec jaderného vývoje: chladnutí a řídnutí velmi rychlé (jaderné reakce nemohou probíhat)

Převaha hmoty (70 000 let) hustota nerelativistické hmoty (atomová jádra) = hustotě relativistického záření (fotony); vytvářejí se malé struktury hmoty, dominuje chladná temná hmota – její chování a vývoj není jednoznačně popsán

Rekombinace: cca 377 000 let na počátku H, He ionizovány, bez elektronů; vesmír se rozpínal => řídl a chladnul => elektrony zachytávány ionty => hustota vesmíru klesá, tvorba neutrálních atomů H a He (rekombinace) při 3000 K => fotony se naposledy rozptýlili na elektronech => nesou informaci o tehdejší rozdělení látky ve vesmíru; fotony mohou volně cestovat => vesmír zprůhledněl! = oddělení záření od látky reliktní

záření = otisk tehdejšího vesmíru!



Obrázek 22.21: Vývoj vesmíru - klin

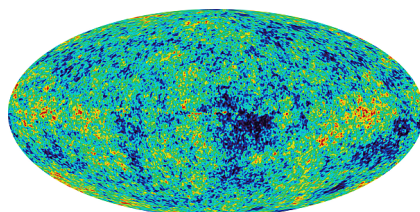
Konec fotonové éry

stav: volně se pohybující elektrony zachyceny atomovými jádry => vesmír průhledný pro záření (neutrální atomy pohlcují a rozptylují záření podstatně méně než volné elektrony) => oddělení fotonů a látky => počátek samostatné existence reliktního záření

reliktní záření - ze všech směrů téměř rovnoměrně, ale... COBE, WMAP - odchylky od izotropie => už v raném vesmíru zárodečné chuchvalce látky => z nich houbovitá struktura (vlákna a stěny galaxií); překotný vznik protogalaxií - v nich hvězdy první generace - začátek jejich relativně pomalého vývoje

na konci fotonové éry: vesmír průhledný ale prázdný - nejsou zdroje záření!

elektrony se dostaly do atomů, už nebyly volné a fotony se tak neměly na čem rozptylovat!



Obrázek 22.22: Reliktní záření - WMAP

22.8.3 Temný věk

= doba mezi vznikem reliktního záření a zrodem prvních hvězd, které začnou epochu reionizace atomů doba trvání: odhadem 150 milionů až 800 milionů let po VT;

teplota vesmíru – cca 1000 K

Baryonická hmota ve vesmíru je tvořena ionizovaným plazmatem => neutrální jen získáním volných elektronů během „rekombinace“ => uvolní se fotony vytvářející reliktní záření => uvolnění fotonů => vesmír zprůhledněl; v té chvíli jediné uvolněné záření - záření neutrálního vodíku na vlnové délce 21 cm

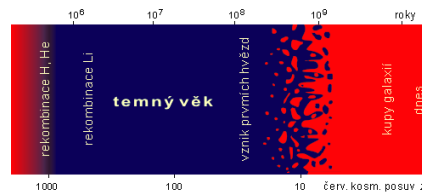
důkaz konce: výskyt ionizovaného vodíku, který vesmír zneprůhlednil; k ionizaci vodíku mohly přispět pouze hvězdy, které se po období temnoty začaly houfně objevovat.

pozorování:

první hvězdy - teoreticky pozorovatelné, ale zčervenalé a velmi slabé

říjen 2010 – objev galaxie UDFy-38135539 – první galaxie, která musela existovat během následující reionizační éry => okno do této doby

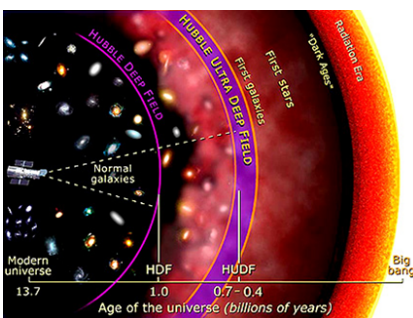
leden 2011 – jiná galaxie, která existovala 480 milionů let po VT



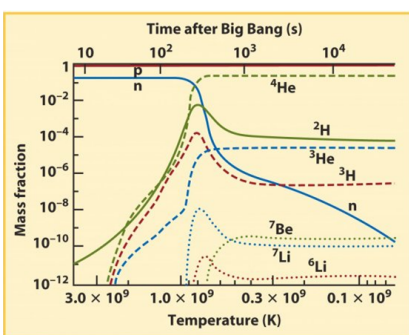
Obrázek 22.23: Temný věk



Obrázek 22.24: Jedna z nejstarších galaxií, které pozorujeme.



Obrázek 22.25: Dosah HST



Obrázek 22.26: Hmotnostní zastoupení prvků na počátku vesmíru

22.8.4 Vytváření struktur

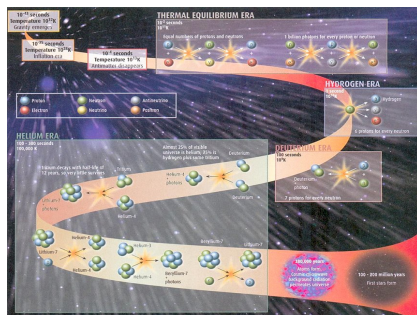
tvorba hierarchická – od malých k větším první struktury – kvasary = jasné aktivní galaxie a hvězdy populace III

Reionizace: 150 milionů - 1 miliarda let
první hvězdy a kvasary, jejich intenzivní záření reionizuje okolní vesmír od té doby je většina vesmíru tvořena plazmatem

Tvorba hvězd
první hvězdy (populace III) – začátek procesu lehkých prvků na těžší zatím jen modely tvorby a vývoje, žádné pozorované

Tvorba galaxií
velké objemy hmoty kolabovaly => vznik galaxií vznik hvězd populace II a později hvězd populace I
kvasar CFHQS 1641+3755 ve vzdálenosti 12.7 Gly (7% současného stáří vesmíru)
2007 - Keck II – 6 galaxií cca 13.2 Gly daleko (vesmír jen 500 milionů let starý)
Hubble Ultra Deep Field – malé galaxie, které se spojují ve větší (13 Gly, jen 5% současného stáří vesmíru); tenký disk Galaxie zformován před 8.8 ± 1.7 mld let

Vytvoření skupin, kup a nadkup
gravitační interakce – galaxie se shlukují do skupin, kup, nadkup



Obrázek 22.27: Schématický vývoj první prvků ve vesmíru

utváření Sluneční soustavy: před 8 mld let, naše Slunce před 4.56 mld let

Dnes: 13.7 mld let

(nejlepší odhad stáří vesmíru: 13.75 ± 0.11 mld let od velkého třesku) rozpínání vesmíru se zrychluje => největší struktura ve vesmíru je „cosmic web“ – pěnová struktura; zrychlující se expanze =>

- žádné další inflační struktury nepřekročí horizont událostí
- nevytvoří se žádné takové gravitačně vázané struktury

22.9 Výhled do budoucnosti

korektní předpovědi za hranicemi současné fyziky => ve hře různé scénáře

Velké zamrznutí (Big freeze): 10^{14} let a dále
nejpravděpodobnější, vyplývá ze současné expanze za cca 10^{14} let – existující hvězdy vyhoří, tvorba nových hvězd ustane, vesmír potemní
za mnohem delší dobu - galaxie a černé díry se vypaří;
podle některých - za 10^{34} let – rozpad protonů => zbylý mezihvězdný materiál a zbytky hvězd – > leptony (pozitrony a elektrony) a fotony, pozitrony a elektrony – > fotony
=> vesmír ve stavu vysoké entropie; neví se zda dosáhne termodynamické rovnováhy

Velký křach (Big Crunch): 100+ mld let od současnosti
hustota energie skryté energie záporná nebo vesmír uzavřený => rozpínání vesmíru se obrátí a vesmír se bude smršťovat do horkého, hustého stavu; možná část oscilujícího, cyklického vesmíru podle současných pozorování nepravděpodobný scénář

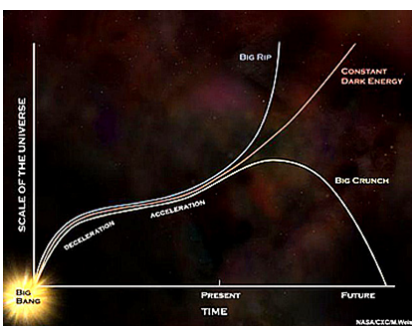
Velké rozervání (Big Rip): 20+ mld let od současnosti
2003 – Robert Caldwell hustota skryté energie roste s časem bez omezení (tzv. phantom energy - nepodobá se žádné známé formě energie) => rychlost rozpínání vesmíru se zvětšuje => gravitačně vázané systémy (kupy galaxií, galaxie a nakonec i Sluneční soustava) budou rozděleny; nakonec rozpínání tak rychlé, že budou roztrhány i atomy a molekuly => vesmír skončí jako nezvyklý druh gravitační singularity, když dosáhne

rychlost rozpínání nekonečné velikosti

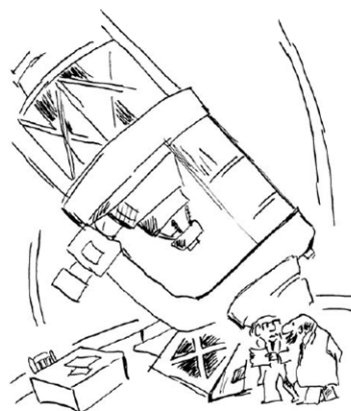
Metastabilita vakua

náš vesmír v dlouhotrvajícím falešném vakuu => malá oblast vesmíru může protunelovat do stavu s nižší energií => okamžitě se zničí všechny struktury v této malé oblasti a oblast expanduje takřka rychlostí světla

Tepelná smrt (Heat death): $10^{150}+$ let od současnosti
možný závěrečný stav vesmíru za cca 10^{150} let – vesmír nemá žádnou volnou termodynamickou energii, aby umožnil pohyb nebo život \equiv dosáhne maximální entropie
hypotéza tepelné smrti vesmíru pochází z 50. let 19. st. - myšlenky William Thomson (Lord Kelvin)



Obrázek 22.28: Modely - http://scienceblogs.com/startswithabang/2011/05/the_fate_of_the_universe.php



JEDINÉ, CO VE VESMÍRU NEEXPANBUJE,
JE MŮJ PLAT!

(Podle *Mercury* May-June 1981, 88.)

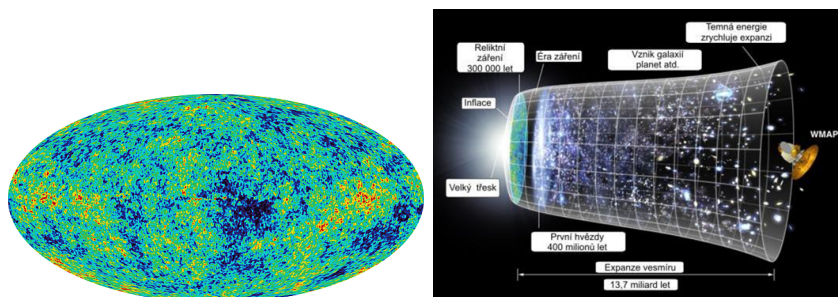
Obrázek 22.29: Vtip

22.10 V jakém vesmíru žijeme?

Lze to zjistit?

V principu ano.

1. dle vzdáleností kup galaxií
ale je tu problém určování přesných vzdáleností kup galaxií
2. podle křivosti vesmíru – lze měřit z fluktuací teploty reliktního záření
3. podle hustoty vesmíru
uzavřený vesmír => střední hustota látky > *kritická* (odpovídá 1 atomu vodíku asi v jednom dm^3 prostoru), jenže ve vesmíru registrujeme našimi přístroji jen několik procent hmoty (paradox skryté hmoty - znám už od 30. let 20. století)



Obrázek 22.30: WMAPvesmir

22.11 Pozorovací kosmologie

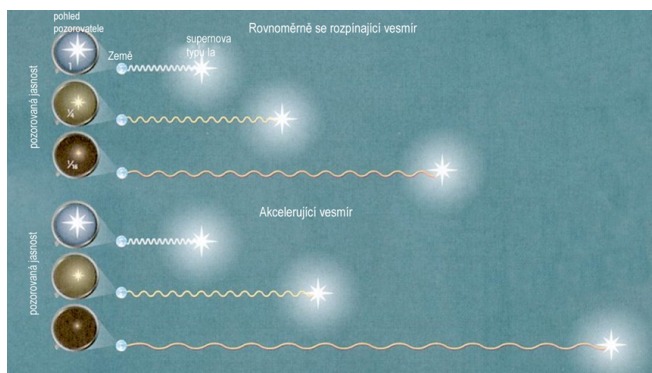
Pozorování, experimenty:

dřívější – Hubble, kosmický žebřík vzdáleností, spektroskopie, objev reliktního záření
současné
plánované

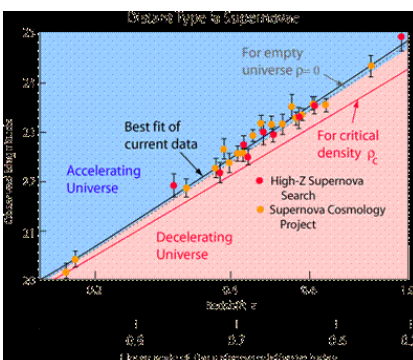
22.11.1 Současná pozorovací kosmologie

22.11.1.1 Akcelerující vesmír

1998 - dva týmy – ze studia supernov typu Ia rozpínání vesmíru zrychluje
Nobelova cena za fyziku 2011



Obrázek 22.31: V roce 1998 dva týmy objevily, že rozpínání vesmíru zrychluje na základě studia supernov typu Ia. Hvězdná velikost supernovy indikuje její vzdálenost a barva její červený posun kvůli rozpínání vesmíru. Nahoře: V rovnoměrně expandujícím vesmíru vzdálenost roste (jasnost se zmenšuje), stejně jako se zvětšuje červený posun, jak je ukázáno. Dole: Vztah mezi vzdáleností a červeným posunem se mění v akcelerujícím vesmíru. Supernova s vysokým červeným posunem se jeví mnohem vzdálenější (a tím i slabší) než v případě rovnoměrného rozpínání.



Obrázek 22.32: Supernovy

22.11.1.2 Červený posun - přehlídkové projekty

1977 – 1982 CfA Redshift Survey

1997-2002 - výsledky 2dF Galaxy Redshift Survey – určení velkých struktur v jedné části vesmíru, horní mez pro hmotnost neutrin, hodnota hustotního parametru Ω nerelativ. hmoty

od r. 2000 - Sloan Digital Sky Survey (SDSS) - 100 milionů objektů, pro galaxie z až 0.4, detekce kvasarů až za $z = 6$; mnoho projektů volná data

2001-2004 DEEP2 Redshift Survey – Keckovy dalekohledy, doplňující k SDSS a 2dF

22.11.1.3 Reliktní záření

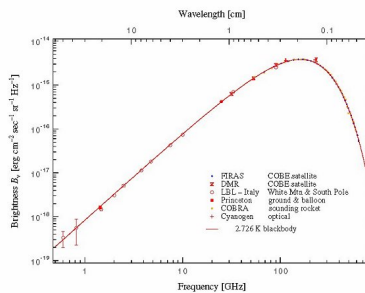
1989 - COBE (Cosmic Background Explorer) zjištění: reliktní záření = záření AČT $T = 2,73$ K

objevy: anisotropie reliktního záření

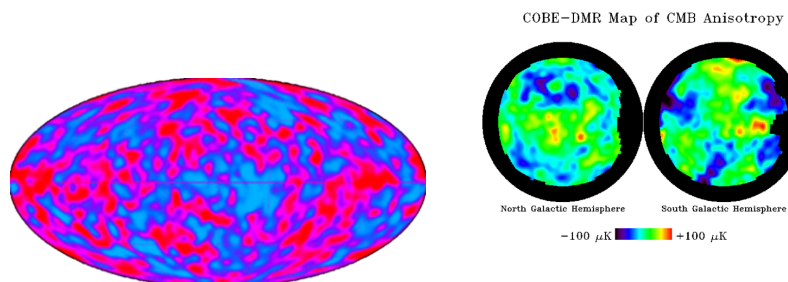


Obrázek 22.33: sloan

fluktuace teploty záření
Smoot & Mather - Nobelova cena (2006)



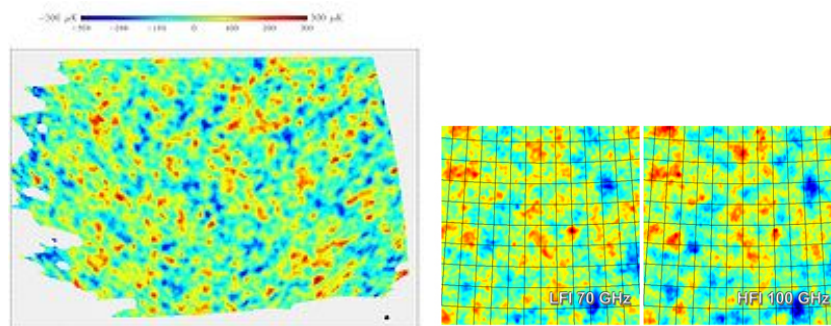
Obrázek 22.34: Křivka záření AČT o teplotě 2.73 K.



Obrázek 22.35: Výsledky z COBE

1998 – 2000 – balónová měření (BOOMERang, MAXIMA a další)
zpřesnění teploty reliktního záření a hodnoty fluktuací ($70 \mu\text{K}$) => podpora inflační

teorie a plochosti našeho vesmíru



Obrázek 22.36: Výsledky z balónových měření, a z družice Planck - viz <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=45533>

2001-2010 - WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)

- zmapování CMB s největší přesností
- určení stáří vesmíru 13.73 mld let s 1% přesností (0.12 mld let)
- rozložení látky ve vesmíru: baryonová hmota - 4.6 ± 0.1 %, temná hmota 23.3 ± 1.3 %, skrytá energie 72.1 ± 1.5 %
- přímá detekce předhvězdného hélia, zastoupení lehkých prvků
- detekce klíčových znaků inflace
- limity pro vlastnosti skryté energie a geometrii vesmíru
- limity pro počty neutrinových částic v raném vesmíru
- průzkum velkých struktur, polarizace záření kosmického pozadí
- dosud nejpresnější určení parametrů našeho vesmíru

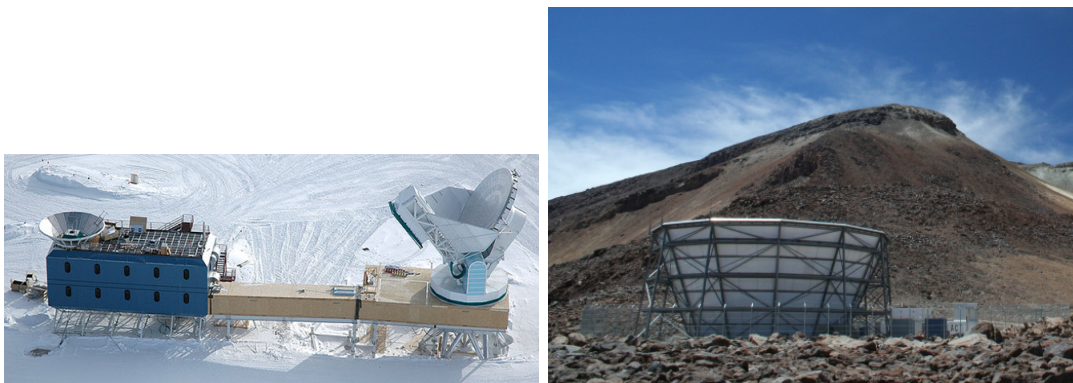
2009 - Planck – evropský projekt

souhrn všech projektů zkoumajících CMB <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/expt/>

Pozemská měření

Pozemská měření South Pole Telescope (SPT) – 10m dalekohled na Amundsen-Scott South Pole Station, Antarktida; pozorování v oborech mikro-, mm- sub-mm- vln elmag. spektra

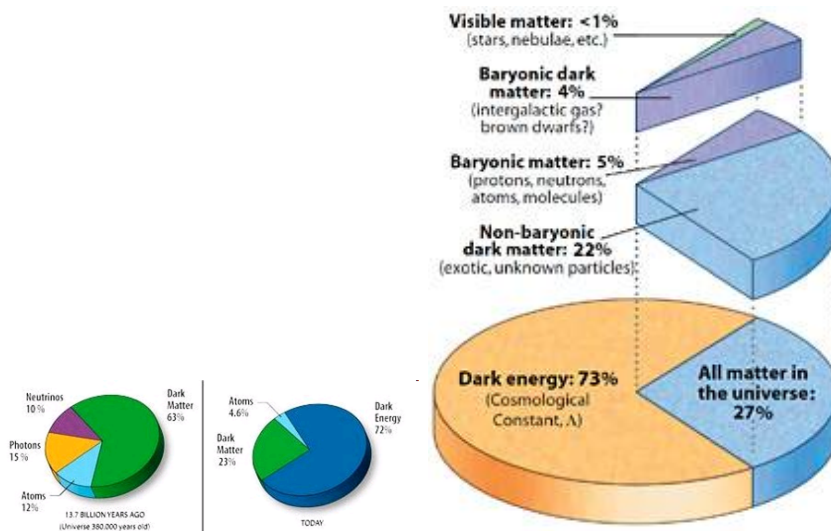
Atacama Cosmology Telescope (ACT) - 6m dalekohled na Cerro Toco v poušti Atacama (sever Chile) mikrovlny



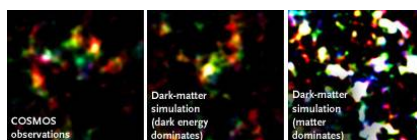
Obrázek 22.37: Pozemní dalekohledu na CMB

22.11.1.4 Současný vesmír

Temná hmota, temná energie

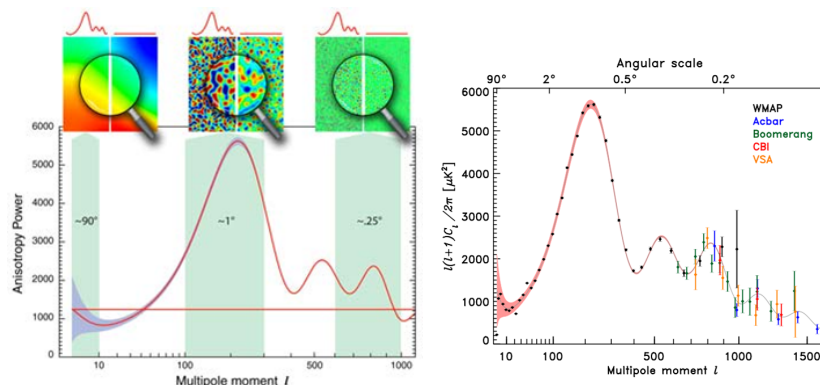


Obrázek 22.38: Složení vesmíru



Obrázek 22.39: A comparison of the mass map obtained from Hubble's COSMOS (left) survey with two simulated model maps. The statistical properties (the overall number of mass peaks and how they cluster) of the model dominated by dark energy is the best match for the Hubble observations. NASA / ESA / J. Hartlap / P. Simon / T. Schrabbach

22.11.1.5 Velikost fluktuací



Obrázek 22.40: Fluktuace

22.11.1.6 Baryonové akustické oscilace

Baryonové akustické oscilace BAO (Baryonic Acoustic Oscillations)

= pravidelné periodické fluktuace v hustotě viditelné baryonické hmoty (způsobeno akustickými vlnami v raném vesmíru) původní fluktuace v reliktním záření => velko-rozměrové struktury vesmíru

BAO slouží jako "standardní pravítko" pro délkovou škálu v kosmologii (délka 490 Mly v dnešním vesmíru)

měření BAO – pomoc při pochopení podstaty skryté energie (akcelerace vesmíru) stanovením mezí kosmologických parametrů

22.11.2 Plánovaná pozorování

Temná hmota

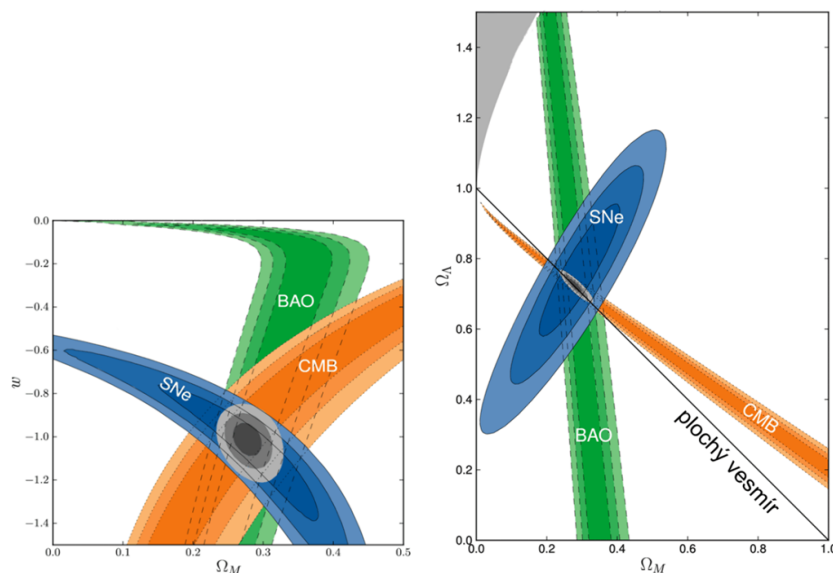
řada experimentů už probíhá – Kanada, Itálie, Španělsko, USA; detekce – skrytá hmota v Galaxii tvořena WIMPy (Weakly Interacting Massive Particles) => tisíce WIMPů musí procházet každým cm^2 Země za 1s

Kosmická neutrina

snaha o detekci neutrinového záření kosmického pozadí (podobné reliktnímu mikrovlnnému záření, ale z doby 2 s po VT) => okno do velmi raného vesmíru problém: taková neutrina nyní velmi chladná (1.95 K) => přímo prakticky nepozorovatelná

Gravitační vlny

kosmické gravitační vlny pozadí – pozůstatek kosmické inflace možnosti měření – přímo



Obrázek 22.41: BAO

i nepřímo zkoumáním polarizace CMB

22.12 Jiné pohledy na vývoj vesmíru

Ekpyrotický model

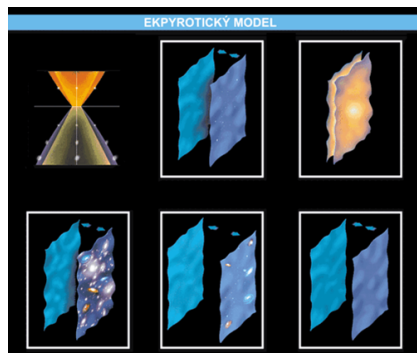
Název znamená „z ohně pocházející“. Základní přírodní konstanty (gravitační, Planckova, rychlost světla) mohou být v různých bránách různé.

2001 Neil Turok, Paul Steinhardt, Burt Ovrut a Justin Khoury - alternativa k inflačnímu modelu;

ze strunové teorie => částice = lineární útvary v mnohorozměrném světě vesmír = méněrozměrný objekt ve vícerozměrném světě (tzv. brána)

počátek vesmíru = setkání dvou bran v místě největší kvantové fluktuace - $\dot{\rho}$ prudká expanze a následná tvorba galaxií - $\dot{\rho}$ rozpínání pokračuje => zředění látky v bráně a gravitační síla přitáhne opět druhou bránu => další dotyk => jednoduchý model dvou oscilujících bran

důkaz: při doteku bran vzniknou gravitační vlny - detekce



Obrázek 22.42: Ekpyrotický model

22.13 Mnohovesmír

multivesmír, multiversum, ang. multiverse

1895 – poprvé - americký filozof a psycholog William James

teorie o existenci mnoha paralelních vesmírů; důsledek některých kosmologických teorií, event. interpretace kvantové teorie ("mnohosvětová" interpretace).

paralelní vesmíry = známý vesmír je jen jedním z mnoha; mezi paralelními vesmíry lze cestovat (červí díry); případně by mohly mít i odlišné přírodní zákony, než má vesmír náš

Použitá a doplňující literatura

Copernicus, N. 1543, De revolutionibus orbium coelestium, Norimbergae, apud Ioh. Petreium, 1543

23 Nebezpečí z kosmu

Za zdmi svého domova se člověk většinou cítí bezpečně. Ale platí to také v kosmickém měřítku? Je náš kosmický domov, naše rodná planeta bezpečným místem pro život? Nehrozí nám z kosmu nějaké nebezpečí? Ještě před několika desítkami let by drtivá většina odpovědí vyjadřovala přesvědčení o tom, že na zemském povrchu jsme před kosmickými vlivy v naprostém bezpečí. Jenže pak se objevila teorie o vymizení dinosaurů před 65 milióny let v důsledku katastrofy způsobené dopadem vesmírného tělesa. Ale nezůstalo jen u teorie. Nejdříve byla objevena vrstva iridia, které bylo na Zemi dopraveno v kosmu a doslova v jediném okamžiku distribuováno po celé zemkouli. Nakonec byl nalezen i samotný dopadový kráter. Ale dnes už řada vědců věří, že i na dřívějších hromadných vymíráních živočichů a rostlin má silnou "zásluhu" okolní vesmír. Vesmír je tichým hráčem v naší ruletě o život. Je dobré o něm i jeho vlivu na nás vědět co nejvíce.

23.1 Střet Země s cizím tělesem

Téma srážky země s cizím tělesem zajímalo astronomy už dlouho. Do širšího povědomí veřejnosti se dostalo až s úspěšnými Hollywoodskými filmy jako Armageddon nebo Drtivý dopad. Nehledě na nepřesnosti a faktické chyby v těchto filmech, jisté je, že problém možné srážky Země s cizím tělesem a ochranu Země před takovými nevídanými návštěvníky zpopularizovala. A zřejmě nejen to. Právě v té době totiž americký Kongres schválil prostředky na projekt "Spaceguard". V poslední době se stále více hovoří nejen o "klasických" tělesech, které by se mohly srazit se Zemí jako kometách nebo planetkách, ale dokonce také o setkání Země s černou (mini)dírou potulující se vesmírem.



Obrázek 23.1: Srážka Země s cizím tělesem. Zdroj: wikipedia

23.1.1 Srážka s planetkou, kometou

Ve Sluneční soustavě se už z dob jejího formování nachází velké množství těles, které se mohou připlést Zemi do cesty. Taková, která se ke Slunci přiblíží na méně než 1.3 AU Označujeme jako blízkozemní objekty tzv. NEOs (z anglického Near Earth Objects). Mezi ně řadíme tzv. NEAs (Near Earth Asteroids), tedy různé planetky, komety, menší tělesa (meteoroidy nebo dokonce i družice obíhající kolem Slunce). Nicméně ne všechny blízkozemní objekty jsou pro nás nebezpečné. Pokud má vesmírný projektíl před vstupem do atmosféry rozměr do 20 centimetrů, pak se při průletu atmosférou zpravidla

odpaří. Při velikosti řádově metry se odpaří z větší části. Zbytek původního tělesa však dopadne na zemský povrch v podobě meteoritu. Větší škody ale nenapáchá. Pro objekty větší než řádově metry už naše atmosféra není překážkou. Po dopadu může takový meteorit způsobit lokální škody. Přitom dopad třicetimetrového tělesa, který způsobí totální zkázu zasaženého území nastává statisticky každých 500 let. Naposledy se takovou událost odehrála roku 1908. Skutečné nebezpečí pro celou Zemi ale hrozí od těles větších než 1 kilometr. Například desetikilometrové těleso by bylo schopno zcela sterilizovat Zemi. K takovému setkání má docházet jednou za 100 miliónů let. NASA proto na pokyn Kongresu začala s vyhledáváním a katalogizací všech objektů větších než 1 kilometr, které by mohly způsobit globální katastrofu. Podobných přehlídek, či projektů, které pátrají po NEOs je více, nejen amerických. Jmenujme alespoň Lincoln Near-Earth Asteroid Research (LINEAR), Spacewatch, Near-Earth Asteroid Tracking (NEAT), Lowell Observatory Near-Earth-Object Search (LONEOS), Catalina Sky Survey, Campo Imperatore Near-Earth Objects Survey (CINEOS), Japanese Spaceguard Association, italský Asiago-DLR Asteroid Survey nebo nejnovější americký projekt NEOWISE spuštěný roku 2011. V květnu 2012 bylo objeveno 843 blízkozemních objektů větších než jeden kilometr, ale jen 152 z nich je potenciálně nebezpečných. Celkově bylo ke stejnému datu známo 8 971 NEOs, z čehož 91 je blízkozemních komet¹. Krátkoperiodické středně periodické komety ve Sluneční soustavě jsou celkem dobře detekovány a katalogizovány. Nejnebezpečnější jsou ale komety s dlouhými oběžnými dobami, které se k nám dostávají z Oortova mračna na okraji Sluneční soustavy. Tito vesmírní tuláci jsou pozorovatelní teprve, když se začne vytvářet jejich typický ohon, přibližně ve vzdálenosti Marsu. To nám přece jen dává nějaký čas na přípravu případného setkání, i když čas velmi krátký.

V každém případě, pokud budeme mít před srážkou dostatek času, je dnes už technologicky možné se účinně bránit a nepříjemnému setkání se vyhnout. Jednou z možností je robotická sonda, která by asteroid řízeným nárazem vychýlila z dráhy. nemusí jít ale jen o sebevražednou misi ve stylu kamikadze. Odborníci z NASA spočítali, že by bylo možné pomocí 20tunová kosmické lodi odklonit asteroid o průměru 200 metrů jednoduše vznášením se v jeho blízkosti. Gravitační působení lodi na asteroid změni jeho trajektorii, a tak lze pomalým pohybem kosmické lodi odtáhnout asteroid z nebezpečné trajektorie. Výhodou takového gravitačním traktorů je nepochybně to, že by pracoval bez ohledu na strukturu asteroidu nebo na jeho povrchové vlastnosti. V úvahu připadá i „vojenské řešení“, vystřelení zneškodňující rakety, pravděpodobně s jadernými hlavicemi. A nesmíme zapomenout ani na jednoduchý princip sluneční plachetnice nebo tzv. zrcadlové včely, kdy by se natočila zrcadla celého roje družic tak, aby sluneční paprsky zahřívaly jedno místo povrchu nezvaného návštěvníka a odpařovaný materiál vytvořil raketový pohon asteroidu. Všechny metody ale mají jedno společné, potřebu dostatečně dopředu vědět o blížícím se nebezpečí. Ne vždy se to ale daří. V roce 2008 bylo těleso 2008 TC3 objeveno jen 19 hodin před vstupem do atmosféry. Naštěstí šlo o objekt „jen“ velikosti auta, který navíc dopadl do pustiny v Súdánu. Ale jsou tu i další problémy. Každé určení trajektorie NEOs je vždy s jistou nepřesností, a tak původní projektil přestane být časem nebezpečný a naopak. Má veřejnost vědět o všech potenciálních srážkách? Takový poplach by mohl znamenat zásadní narušení života všech lidí, možnou hysterii, rabování, kolaps států a civilizace. Naopak množství planých poplachů by mohlo

¹Nové údaje lze najít na stránkách <http://neo.jpl.nasa.gov/stats/>.

způsobit netečnost lidí při skutečném nebezpečí. Zarážející ale je, že dosud neexistuje jednotný plán, například v rámci OSN, co dělat, když se objeví asteroid v kolizním kurzu se Zemí. Vědecké konference na téma srážky Země s cizím tělesem probíhají, ale je zapotřebí součinnosti vědců, politiků, novinářů, psychologů, zákonodárců dalších významných profesí. V moderní době lidstvo globální katastrofě ještě nečelilo, ale setkání Země s kosmickými projektily se odehrály a jsou zdokumentovány.

V dávné minulosti země jsou přinejmenším dvě epochy, kdy došlo náhle k masivnímu vymírání živočichů a rostlin a život na naší planetě byl takřka zahuben. První kataklyzmická událost se datuje do doby před 250 milióny let. Jedna z vysvětlujících hypotéz mluví i o dopadu planetky. Podle posledních zjištění, ale byl na vině s největší pravděpodobností supervulkán v oblasti dnešní Sibíře². Nicméně další katastrofická epizoda v historii Země z doby před 65 milióny let je už jednoznačně připisována srážce Země s planetkou o průměru zhruba 10 km³. Při dopadu tělesa srovnatelného velikostí s marsovským měsícem Deimos byla uvolněna energie 100 teratun TNT⁴. Pro srovnání, bomba svržená na Hirošimu uvolnila při výbuchu energii "jen" 13 kilotun TNT, byla tedy několik miliardkrát slabší než onen dopad planetky, při němž vznikl kráter o velikosti přibližně 200 kilometrů, který se nachází u vesničky Puerto Chicxulub⁵ na Yucatánském poloostrově v Mexiku. Dopad planetky vyvolal obrovskou přílivovou vlnu doprovázenou zemětřeseními a požáry. Při impaktu bylo vysoko do ovzduší vymrštno obrovské množství prachu, který se rozptýlil a zahalil planetu na několik let. V důsledku toho poklesla teplota a přísun slunečního záření. Fotosyntéza rostlin se takřka zastavila. Hladina kyslíku v atmosféře se rapidně snížila, podle některých modelů až na 10 procent úrovně před srážkou. Bezprostředně při srážce došlo ke zničení většiny druhohorních živočišných a rostlinných druhů. Potravní řetězce byly přerušeny. V nastalém období zimy vymíraly přeživší druhy hladem nebo v důsledku velmi nízké hladiny kyslíku. Dopad planetky ukončil éru dinosaurů.

Meteorické krátery, frekvence srážek v porovnání s Měsícem

V novodobé historii je zřejmě nejznámější případ Tunguzského meteoritu z roku 1908. 30. června toho roku explodoval nad opuštěnou oblastí Sibíře, v oblasti říčky Podkamennaja Tunguzka (epicentrum 60.886°S, 101.894°V) ve výšce 8,5 kilometru kamenný asteroid o průměru přibližně 45-70 metrů. Exploze o síle 10 megatun TNT zdevastovala území zhruba 2150 kilometrů čtverečních (viz obrázek 23.2).

Z období po druhé světové válce můžeme jmenovat hned několik setkání Země s tělesy o rozměrech řádově metry až desítky metrů. 12. února 1947 pozorovali lidé poblíže

²Odhaduje se, že tenkrát během 5 milionů let vyvrhly sopky na Sibíři tolik čedičové lávy, že by pokryla území Spojených států amerických vrstvou jeden a půl kilometru silnou. Při těchto erupcích bylo ale uvolněno zejména obrovské množství oxidu uhličitého a oxidu siřičitého, který se v atmosféře měnil na kyselinu sírovou. Kyselá dešť a zejména následné období zimy zničilo přes 90 procent života na zemi.

³Původcem myšlenky o náhlém zániku většiny pozemské flory a fauny způsobeném dopadem kosmického tělesa je tým v čele s nositelem Nobelovy ceny za fyziku Luisem Alvarezem a jeho synem, geologem Waltrem Alvarezem (Alvarez et al., 1980).

⁴Energie uvolněná při výbuchu se vyjadřuje pomocí ekvivalentní hmotnosti vysoce výbušného trinitrotoluenu TNT, přičemž platí, že 1 tuna TNT uvolní při výbuchu energii $4,18 \cdot 10^9$ J.

⁵Čti [čiksulub].



Obrázek 23.2: První expedice pod vedením Leonida Kulika se dostala na místo katastrofy až roku 1921. I po 13 letech od události Kulikův snímek vypovídá o mohutnosti události.

v Sichote-Alinské oblasti u Vladivostoku (Rusko) bolid jasnější než Slunce. Těleso o původní hmotnosti až 100 tun se rozpadlo na velké množství úlomků, které zasáhly oblast 1,5 km². 8. března 1976 byla meteorickým deštěm zasažena oblast 500 km² v Jilinu (Čína)⁶

3. srpna 1963 dopadlo do oceánu mezi Afrikou a Antarktidou těleso, které při dopadu uvolnilo energii odpovídající 25 Hirošimským pumám. 6. 6. 2002 explodovalo při průletu atmosférou těleso o velikosti přibližně 10 metrů. Výbuch nad Středozezemním mořem mezi Řeckem a Libyí uvolnil energii 26 kilotun TNT. Zhruba dvakrát větší energie byla uvolněna při podobné události, která se odehrála 8. října 2009 nad Indonésií.

V některých publikacích se můžeme setkat i s událostí datovanou na 22. září 1979. Blízko rozhraní jižního Atlantiku a Indického oceánu zaznamenaly americké vojenské družice Vela výbuch. Ani po letech výzkumu není jasné, zda šlo o utajený test nukleární zbraně nebo o zaznamenaný zánik kosmického tělesa.

Zatím jsme se věnovali tělesům, která mohou způsobit obrovské škody, dokonce i zkázu života na Zemi. Ale pokud hovoříme o nebezpečí z kosmu, máme se obávat zásahu malého meteoritu? Dokumentovaných dopadů meteoritů je více než tisíc a nalézáných meteoritů v poušti nebo na ledových pláních Antarktidy ještě mnohem více. Byl ale někdy zasažen nějaký člověk? A přežil?

První známý případ v moderní historii, kdy byl člověk zraněn dopadem meteoritu, je zaznamenán 30. listopadu 1954 v malém městečku Sylacauga v Alabamě (USA). Čtyřkilogramový chondrit proletěl střechou domku až do obývacího pokoje, kde těžce zranil Ann Hodgesovou. 12. června 2009 zasáhl meteorit o velikost ořechu čtrnáctiletého chlapce z německého Essenu cestou do školy. Do ruda rozžhavený kus vesmírné horniny jej lehce trefil do ruky a poté vytvořil asi třiceticentimetrový kráter v zemi.

⁶Připomeňme, že podobná událost mnohem menšího rozsahu, meteorický deštěk, zasáhl oblast obce Stonařov na Jihlavsku 22. května 1808.



Obrázek 23.3: Sedadlo a tlumič výfuku auta Edwarda McCaina zasažené meteoritem 29. 9. 1938 v městečku Benld, Illinois (USA).



Obrázek 23.4: Autor: Ladislav Šmelcer.

23.1.2 Kolize Země s černou dírou

V roce 1973 navrhli fyzici Texaské univerzity Albert A. Jackson a Michael P. Ryan, že možným vysvětlením pro Tunguzskou událost roku 1908 by byl průlet malé černé díry o hmotnosti přibližně 10^{17} až 10^{19} kg skrz Zemi (Jackson & Ryan, 1973). Jejich hypotéza však byla odmítnuta. Podobný průlet by byl doprovázen dvěma událostmi - při vstupu černé díry do Země a při výstupu na opačné straně. Jenže seismické stanice, které byly mnohem blíže odhadnuté oblasti výstupu v severním Atlantiku než k Tunguzce, žádnou druhou událost nezaznamenaly. Navíc by se tím nijak nevysvětlil původ mimozemského materiálu, prachové stopy v ovzduší a výskyt magnetických kuliček s vysokým obsahem niklu v dopadové oblasti (Beasley & Tinsley, 1974).

Ale, co když budeme uvažovat mnohem menší projektily, například tak zvané primordiální černé díry, které měly vznikat v raných fázích vývoje vesmíru? Jejich hmota je srovnatelná s hmotností asteroidů, ale jejich průměr je odpovídá velikosti atomového jádra. Průlet takové černé díry Zemí by vyvolal seismickou vlnu, která by zasáhla současně všechna místa na povrchu naší planety a mohla by způsobit zemětřesení až o síle 4. stupně Richterovy škály. Nicméně studie (Luo et al., 2012) uvádí, že k podobnému střetu dochází jednou za 10 miliónů let. Do blízkosti Země se ale tyto černé

díry měly dostávat v průměru jednou za 100 tisíc let. Existují ale i studie, jaký vliv by mělo setkání prvotní černé díry se Sluncem. Projevy bychom měli být schopni současnou technikou bez problémů zachytit.

Jenže, než se primordiální černá díra dostane k zemi nebo ke Slunci, projde Kuiperovým pásem. Shatskii (2008) ukázal, že v důsledku toho dojde k podstatným změnám trajektorie některých asteroidů v pásu a tato tělesa se pak mohou vydat do vnitřních částí Sluneční soustavy, kde se mohou i setkat se Zemí. A kdoví, zda Tunguzskou událost nezpůsobilo právě takové těleso. I s černými děrami je tedy třeba ve výčtu kosmických nebezpečí počítat.

23.2 Slunce

krátkodobé změny zářivého toku - sluneční aktivita

Sluneční bouře představují hrozbu pro nás, pro naši technologii. Dostatečně silná sluneční bouře by mohla vyřadit vyřadit z provozu naši moderní infrastrukturu a uvrhnout nás zpět do pre-industriální doby. Následná panika a chaos by zničily lidstvo.

v období zvýšené aktivity – narušení zemské magnetosféry (např. 10. 1. 1997)

- > přepětí indukovaná v elektrických rozvodných sítích,
- > ohrožení posádek vysoko létajících letounů nebo kosmonautů,
- > poruchy či zničení elektroniky na družicích,
- > výpadek telekomunikačních sítí (nefunkční telefony, banky, navigace)

23.3 Přemíra záření

23.3.1 Výbuch blízké supernovy

Jestliže nějaká velká hvězda vybuchne nedaleko naší Sluneční soustavy, výsledný výbuch by doslova serval ze Země svrchní vrstvy do hloubky několika kilometrů. Žádný život by v tomto koutu vesmíru nezůstal, oblast Sluneční soustavy by byla zcela sežehnutá.

Důsledky a stopy exploze supernovy blízko naší Sluneční soustavy nebo obecně nějakého planetárního systému zkoumali vědci od poloviny padesátých let minulého století (Schindewolf 1954; Krasovskii & Shklovskii 1957; Terry & Tucker 1968; Laster et al. 1968; Benítez et al. 2002). Řešení otázek souvisejících s vlivem supernovy na Zemi je poměrně rozsáhlé a přispívají k němu oblasti astrofyziky, geologie a astrobiologie. Ruderman (1974) poukázal na primární efekt, který způsobí totální zničení ozónové vrstvy (např. Ruderman 1974; Crutzen & Brühl 1996; Gehrels et al. 2003), ale byly potvrzeny i další efekty (např. Fields & Ellis 1999). Výbuch supernovy ve vhodné vzdálenosti by například mohl vést k podstatnému ovlivnění biosféry a případně i prospěšné genetické modifikaci organismů (Karam 2002a, 2002b). Ze zhodnocení všech vlivů vyplývá, že minimální bezpečná vzdálenost od supernovy je přibližně 8 pc (Ellis & Schramm 1995; Gehrels et al. 2003).Fields et al. (2008)

1962 Otto Schindewolf – velké vymírání před 250 mil. roky dílem supernovy

1999 – objev „spadu ze supernovy“ na dně oceánu (jižní Pacifik)

- supernova ve vzdálenosti 10 sv. r.
 - zničení ozónové vrstvy na stovky let,
 - proud nabitých částic a neutronů – > dokonalá sterilizace planety,
 - UV záření – > omezení fotosyntézy => přebytek CO₂ => mohutný skleníkový jev
- supernova 100 sv.r daleko – tok záření dvojnásobný oproti normálu

seznamy nejbližších hvězd – > žádná není natolik hmotná, aby vybuchla jako supernova, ale nemusí jít jen o supernovu! – 27. 8. 1998 – γ záření z magnetaru v Orlu (ochromení družic)

pozitivní role supernov:

- nastartování vývoje života
- Geminga (před 340 000 lety) – vyfoukla zbytky => výhled do okolního vesmíru

23.3.2 Záblesky γ záření

nemusí jít jen o supernovu!



Obrázek 23.5: Záblesk γ záření. Zdroj:<http://cow-flipper.hubpages.com/hub/Dangers-From-Space>

K zábleskům γ záření dochází, když se velká hvězda dostává do fáze supernovy. Výsledný výbuch vyvolá rázovou vlnu γ záření. Jestliže se taková událost odehraje v naší Galaxii, sterilizuje náš svět. Záblesk zbaví naši zemi ochranné ozónové vrstvy a vše živé by zemřelo následkem mohutné dávky rentgenovského záření. V podstatě bychom byli doslova upečení zaživa.

Podobné účinky by měl také záblesk pocházející z tzv. magnetaru, neutronové hvězdy s extrémně silným magnetickým polem. Jejich existenci předpověděli Duncan & Thompson (1992). V současnosti jich známe 23⁷ Zatímco Země má magnetické pole 30-60 mikrotěslů, magnetar může mít magnetické pole o síle až 10 GT, tedy $10^{15} \times$ silnější! Tak silné magnetické pole (zhruba tisíckrát silnější než magnetické pole běžné neutronové hvězdy) je schopno smazat data z kreditní karty z poloviční vzdálenosti Měsíce od Země. Pokud bychom byli do vzdálenosti 1000 kilometrů od magnetaru, je náš osud zpečetěn. Všechny atomy v našem těle by se působící silou zdeformovaly. Naštěstí nejbližší známý magnetar 1E 1048.1-5937 v souhvězdí Lodního kýlu je od nás zhruba 9 000 ly daleko. Ale znamená to, že jsme v bezpečí? Bohužel ne. Magnetar občas v důsledku hvězdotřesení a rekonexe magnetického pole vysílá do prostoru intenzivní pulsy, záblesky. Poslední takový záblesk byl zaznamenán 27. 12. 2004 z magnetaru SGR 1806–20. Absolutní hvězdná velikost záblesku v oblasti γ záření byla -29 mag. Předpokládá se, že šlo o největší explozi pozorovanou lidmi od Keplerovy supernovy v roce 1604. Magnetar uvolnil v jedné desetíně sekundy energii $1.3 \cdot 10^{39}$ J, tedy více energie než naše Slunce za 100 000 let. I když je od nás vzdálen 50 000 ly, dokázal ionizovat svrchní vrstvy atmosféry. problémy měly i některé družice. Podobný výbuch ve vzdálenosti zhruba 10 světelných let od Země by zničil ozónovou vrstvu. Měl by stejný efekt, jako kdybychom odpálili jadernou hlavici o síle 12 kilotun TNT (50 TJ) ve výšce 7.5 kilometru.

23.4 Černá díra za humny

Hvězdná černá díra je výsledkem vývoje velmi hmotné hvězdy. Většinou se soudilo, že jsou více méně nehybné, ale bylo zjištěno že se pohybují napříč Galaxií a dokonce byly odhaleny i takové, které byly vymrštěny ven z Galaxie a to nejen ty hvězdné. O supermasívní černé díře, která byla vyvržena ze svého místa v Galaxii, píše například Civano et al. (2012). Kdyby taková černá díra vstoupila do Sluneční soustavy, zaznamenali bychom její působení okamžitě a záhy bychom byli vtaženi pod její horizont událostí.

23.5 Kontakt s mimozemským životem

Mimozemský život, jeho existence a případné setkání člověka s ním škádlí lidskou mysl už velmi dlouho. Autoři vědecko-fantastické literatury probrali nejrůznější varianty - od těch, kdy jsou hodní návštěvníci lidstvu pomohou až katastrofické scénáře, kdy je lidská rasa zahubena predátory z vesmíru.

Nebezpečí mohou ale představovat i jen zavlečené bakterie, viry (možnost epidemie) a to nejen z kosmu, ale naše pozemské organismy z horních vrstev atmosféry, které mohou vlivem záření z kosmu zmutovat.

Častá je představa vesmírných predátorů, kteří útočí na Zemi a lidstvo z různých pohnutek. Vesmírní dobyvatelé budou jistě zástupci rozvinutější civilizace než je ta naše. Mohou nám přinést zkázu. Má se tedy lidstvo pokoušet o kontakt s cizími civilizacemi? Řada osobností světové vědy včetně například Stewena Hawkinga si myslí, že nikoli.

⁷Aktuální stav lze nalézt v online katalogu McGill Pulsar Group <http://www.physics.mcgill.ca/~pulsar/magnetar/main.html>.



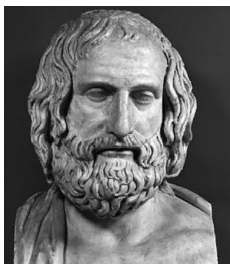
Obrázek 23.6: Černá díra. Zdroj:<http://cow-flipper.hubpages.com/hub/Dangers-From-Space>

Je ovšem otázka, zda by i dobře míněná pomoc od těch "hodných" nezralému lidstvu nakonec nezlomila vaz.

Použitá a doplňující literatura

- Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F., & Michel, H. V. 1980, *Science*, 208, 1095
Athanasiadou, T., & Fields, B. D. 2011, *New Astronomy*, 16, 229
Beasley, W. H., & Tinsley, B. A. 1974, *Nature*, 250, 555
Beech, M. 2011, *Astrophysics and Space Science*, 336, 287
Civano, F., Elvis, M., Lanzuisi, G., et al. 2012, *ApJ*, 752, 49
Duncan, R. C., & Thompson, C. 1992, *ApJ Letters*, 392, L9
Fields, B. D., Athanasiadou, T., & Johnson, S. R. 2008, *ApJ*, 678, 549
Jackson, A. A., & Ryan, M. P. 1973, *Nature*, 245, 88
Luo, Y., Hanasoge, S., Tromp, J., & Pretorius, F. 2012, *Apj*, 751, 16
Shatskii, A. A. 2008, *Moscow University Physics Bulletin*, 63, 276

24 Rejstřík osob



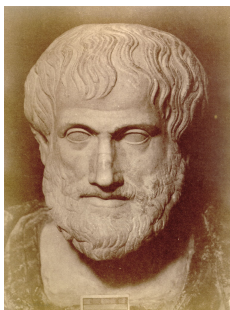
Anaxagorás (*asi 500 nebo 510 př.n.l. Klazomenai (dnešní Urla, Turecko) – †428 př.n.l. Lampsakos (dnešní Lapseki, Turecko) – řecký filozof. Pokusil se založit filozofickou školu v Aténách. Nebeské úkazy se pokoušel vysvětlit racionální cestou, což nakonec vedlo k jeho obvinění z bezbožnosti a nutnému odchodu do exilu do Lampsaku (u dnešní obce Lapseki, Turecko).



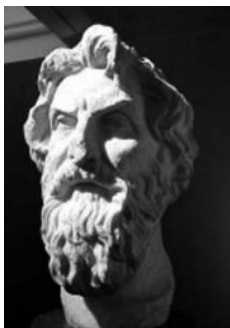
Argelander, Friedrich Wilhelm August (*22.3.1799 Memel, Prusko (dnes Klaipėda, Litva) - †17.2.1875 Bonn, Německo) – pruský astronom (otec Fin, matka Němka), Besselův žák. Vypracoval (spolu s Krügerem a Schönfeldem) rozsáhlý katalog hvězd Bonner Durchmusterung, studoval pohyby hvězd a určil pohyb Slunce mezi nimi. Systematicky studoval proměnné hvězdy, vypracoval metodu na jejich pozorování a navrhl systém jejich označování.



Albertus Magnus; též Svatý Albert Veliký, Albert z Böllstadtu (*1193 nebo 1206/1207 Lauingen, Německo – †15.11.1280 Kolín nad Rýnem, Německo) – jeden z nejvýznamnějších středověkých učenců a německých představitelů vrcholné scholastiky, zabýval se studiem filozofie, teologie i přírodních věd. Pro svoji všestrannost byl nazýván „doktor universalis“. Patří mezi učitele církve a je patronem vědců a studentů přírodních věd.



Aristotelés ze Stageiry (*384 př.n.l. Stageira, poloostrov Chalkidiki, Řecko - †322 př.n.l. Chalkida na ostrově Euboia, Řecko) – filozof vrcholného období řecké filozofie, nejvýznamnější žák Platonův a vychovatel Alexandra Makedonského. Jeho rozsáhlé encyklopedické dílo položilo základy mnoha věd.



Aristarchos ze Samu (*asi 320 př.n.l. ostrov Samos, Řecko – †250 př.n.l. Alexandria, Řecko) – řecký matematik a astronom, tvůrce heliocentrického modelu vesmíru. Z velikosti zemského stínu na Měsíci při zatmění vyvodil, že Slunce musí být mnohem větší než Země. Poprvé se také pokusil měřením zjistit, jaký doopravdy je vzájemný poměr velikostí Země, Měsíce a Slunce. Tvrdil, že vesmír je nekonečný a hvězdy jsou jiná Slunce. Aristarchos byl obžalován z bezbožnosti. Jeho model byl zamítnut a posléze na dlouho zapomenut.



Biermann, Ludwig Franz Benedikt (*13.3.1907 Hamm, Německo - †12.1.1986 Mnichov, Německo) – významně přispěl k teorii konvekce ve hvězdných nitrech před tím, než byl znám zdroj energie hvězd. Modeloval sluneční chromosféru a korónu. Jeho studie kometárních ohonů vedla k úspěšné predikci slunečního větru a vodíkových hal kolem komet. Fyziku plazmatu a studium magnetického pole ve Sluneční soustavě a v Galaxii.



Boltzmann, Ludwig Eduard (*20.2.1844 Vídeň, Rakousko - †5.9.1906 Tybein u Triestu, Rakousko-Uhersko (dnes Duino, Itálie); sebevražda) – rakouský fyzik, zakladatel statistické fyziky. Průkopník termodynamiky, popsal entropii jako mikroskopickou veličinu. Byl také zastáncem atomistické představy. Zformuloval tzv. Maxwellovo-Boltzmannovo rozdělení. Roku 1877 připojil Boltzmannovu konstantu k . Jeho slavná rovnice popisuje mj. schopnost každého plynu zaujmout během doby stav rovnoměrně rozdělené energie. Jako první použil statistickou metodu pro popis tepelného záření. Roku 1884 odvodil tzv. Stefanův-Boltzmannův zákon (speciální případ Planckova zákona) popisující část tepelného spektra těles.



Bouguer [čti bugér], Pierre (*16. 2. 1698 Le Croisic, Francie – †15.8. 1758 Paříž, Francie) – francouzský matematik a astronom. Byl také hydrograf, astronom a architekt. Je znám také jako "otec námořní architektury". Vynalezl fotometr, heliometr a objevil metacentrum (průsečík vztlakové síly plovoucího tělesa osou plování).



Bouillaud [čti buljó], Ismaël nebo Boulliau, případně v latině Bullialdus (*28.9.1605 Loudun, Francie - †25.11.1694 Paříž, Francie) – francouzský knihovník, astronom a kněz, amatérský matematik. Navrhl před Newtonem pro gravitační zákon vyjádření velikosti přitažlivé síly nepřímo úměrné na čtverci vzdálenosti.



Boyle, Willard Sterling (*19.8.1924 Amherst, Kanada - †7.5.2011 Wallace, Kanada) - kanadský fyzik a spoluvynálezce CCD. Byl oceněn čtvrtinovým podílem Nobelovy ceny za fyziku za „vynález zobrazovacího polovodičového obvodu - senzoru CCD“ v roce 2009.



Brahe, Tycho; původním jménem Tyge Ottesen Brahe, nesprávně též Tycho de Brahe (*14.12.1546, Knudstrup, Dánsko – †24.10.1601, Praha) – význačný dánský astronom, astrolog a alchymista. Je považován za nejlepšího a nejpřesnějšího pozorovatele hvězdné oblohy, jenž byl překonán až šedesát let po vynalezení dalekohledu. Část života strávil v Praze a je zde také v Týnském chrámu pochován.



Brewster, Sir David (*11.12.1781 Jedburgh, Skotsko – †10.2.1868 Gattonside, Skotsko) – skotský vědec, vynálezce a spisovatel. Byl i farmaceut a právník. Zajímal se o polarizaci světla. Vynalezl kaleidoskop. Vylepšil stereoskop.



Bruno Giordano, původně Fillipo Bruno, též Nolan nebo Nolanus (*1548, Nola u Neapole, Itálie – †17. února 1600, Řím, Itálie) – byl nejen filozofem, ale též spisovatelem (básníkem a komediografem), astronomem a zabýval se také mnemotechnikou.



Bunsen, Robert Wilhelm Eberhard (*31.3.1811 Göttingen, Německo – †16.8. 1899 Heidelberg, Německo) – německý chemik. Vynalezl či zlepšil mnoho laboratorních přístrojů, například fotometr, spektroskop. Stal se zakladatelem analýzy plynů a německé fyzikální chemie. V roce 1841 objevil elektrochemickou baterii. Později založil jodometrii, vyvinul Bunsenův kahan (1855), výzkumem třaskavého chlorového plynu založil vědeckou fotochemii. Společně s Gustavem Kirchhoffem rozvinul spektrální analýzu. Pomocí spektrální analýzy v letech 1860 – 1861 objevili dva nové chemické prvky (cesium a rubidium).



Cannonová, Annie Jump (*11.12.1863 Dover, Delaware, USA – †13.4.1941 Cambridge, Massachusetts, USA) – americká astronomka. V roce 1896 začala pracovat u Pickeringa na Harvard-College-Observatorium. Sama klasifikovala ručně zhruba 350 000 spekter hvězd, což pravděpodobně nikdo jiný nedokázal. S využitím výsledků Nettie Farrarové, Williaminy Flemingové, Antonie Mauryové, se jí podařilo uspořádat spektra hvězd do tříd O, B, A, F, G, K, M. Vymyslela údajně i mnemotechnickou pomůcku „Oh, Be A Fine Girl - Kiss Me!“. Objevila 300 proměnných hvězd, 5 nov a jednu spektroskopickou dvojhvězdu. Vydala také katalog proměnných hvězd.

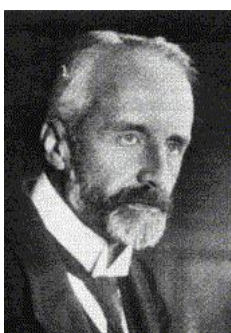
Ču Kong, také Chou Kung (11. st. př.n.l.) – čínský vědec, určil poměrně přesně úhel sklonu ekliptiky k rovníku.



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



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



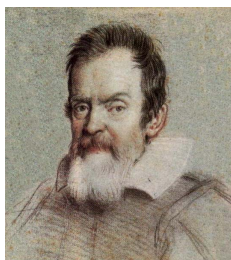
Eberhard, Gustav; Julius, Paul Alexander (*10.8.1867 Gotha, Německo - †3.1.1940 Postupim, Německo) – německý astronom na observatoři v Postupimi. Zabýval se astrofyzikou, spektroskopii a fotografickou fotogrammetrií. Objevil přítomnost čár K a H ve slunečním spektru, známku aktivity na povrchu hvězdy.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



Fabricius, David nebo David Faber, David Goldschmidt (*9.3.1564, Esens, Německo - †7.5.1617, Osteel, Německo) – německý teolog, dva velké objevy udělal se svým synem, Johannem (1587-1615). Objevil první periodickou proměnnou hvězdu Miru Ceti v srpnu 1596. Pozoroval sluneční skvrny a předpokládali, že se Slunce otáčí kolem své osy. Jeho smrt je do jisté míry kuriózní. Při kázání prohlásil, že zná identitu zloděje drubeže, ale neprozradil ji. Ve vlastnoručně sestaveném horoskopu předpověděl nehodu na 7. 5. 1617, zůstal proto celý den ve svém domě. Večer si myslel, že nebezpečí pominulo a šel se projít. Místní rolník Frerik Hoyer jej napadl rýčem a zabil.



Fraunhofer, Joseph von - (*6.3.1787 Straubing, Německo - †7.6.1826 Mnichov, Německo) – německý optik, fyzik a astronom; 11. dítě chudého skláře, do 14 let negramotný! Zakladatel spektrální analýzy. Uskutečnil mnoho důležitých objevů v optice. Jeden z nejlepších odborníků na výrobu skla pro optické přístroje. Konstruoval optické přístroje. Objevil ve spektrech vesmírných objektů tmavé čáry, které se dnes nazývají jeho jménem.



Galilei, Galileo; plným jménem Galileo di Vincenzo Bonaiuti de'Galilei (*15.2.1564, Pisa, Itálie – †8.1.1642, Arcetri, Itálie) – toskánský astronom, filosof a fyzik těsně spjatý s vědeckou revolucí. Mezi jeho úspěchy řadíme vylepšení dalekohledu, rozmanitá astronomická pozorování, první z Newtonových zákonů pohybu a účinnou podporu Koperníka. Často je uváděn jako „otec moderní astronomie“, „otec moderní fyziky“ a dokonce „otec vědy“. Jeho experimentální činnost je obecně považována za důležitý doplněk spisů 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.



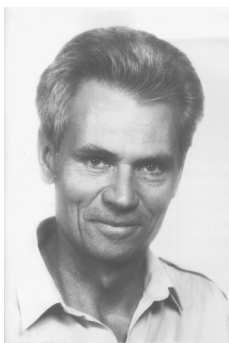
Goodricke, John (*17.9.1764 Groningen, Nizozemsko - †20.4.1786 York, hrabství Yorkshire, Anglie) – holandsko-anglický amatérský astronom. V r. 1782 pozoroval proměnnou hvězdu Algol (β Persei) a vysvětlil správně její proměnnost jako důsledek zakrývání složek dvojhvězdy. Objevil i další proměnné hvězdy, např. v roce 1784 proměnnost δ Cephei. Goodricke byl od 5 let zcela hluchý. Astronomických úspěchů dosáhl s učitelem a přítelem Edwardem Pigottem.



Hájek z Hájku, Tadeáš, latinským jménem Thaddaeus Hagecius ab Hayek či Thaddeus Nemicus (*1.12.1525 Praha – †1.9.1600 Praha) – český astronom, matematik, renesanční přírodovědec a osobní lékař císaře Rudolfa II. Hájek jako první uveřejnil v tisku způsob, jak určit polohu hvězd stanovením přesné doby jejich průchodu poledníkem. Roku 1572 uveřejnil svá pozorování supernovy SN1572, které spolu s Brahem správně interpretoval jako pozorování objektu ve sféře hvězd, čímž pomohl rozbít dosud platné Aristotelovské teze o neměnnosti sféry hvězd.



Halley, čti [hæli] Edmond (*8.11.1656 Haggerston, Shoreditch, Anglie - †14.1.1742 Greenwich, Anglie) – anglický astronom, geofyzik, matematik, meteorolog a fyzik. Královský astronom. Věnoval se mj. gravitaci, magnetismu, pozorování Měsíce. Analyzoval historické záznamy o kometách a zjistil, že ve čtyřech případech šlo o totéž těleso. Předpověděl návrat komety, dnes označované jako Halleyova. Halley se nezávisle na Newtonovi zabýval teorií gravitace. Když zjistil, že Newton už řešení v podobě gravitačního zákona zformuloval, ale výsledky nepublikoval, přesvědčil ho, aby sepsal knihu *Principia mathematica philosophiae naturalis*, kterou v r. 1687 na své náklady vydal.



Harmanec, Petr (*18.9.1942 Kolín) – významný český stelární astronom, odborník na dvojhvězdy, fotometrická a spektroskopická pozorování a jejich zpracování. Zabývá se horkými hvězdami a hvězdami se závojem. Svou první práci publikoval pod jménem Kratochvíl.



Haro, Guillermo (*21.3.1913 Mexico City - †26.4.1988 Mexico City, Mexiko) – mexický učenec, vystudovaný právník a filozof, „astronom srdcem“. Pracoval na Observatorio Astrofísico de Tonantzintla, kde se věnoval zejména pozorování. Objevil řadu planetárních mlhovin, hvězd typu T Tauri, supernovu, 10 nov a nezávisle pak objekty dnes nazývané Herbigovy-Harovy.



Hayashi, Chushiro (*25.7.1920 Kjóto - †28.2.2010 Kjóto, Japonsko) – japonský astrofyzik. Spočítal modely vznikajících hvězd. Je po něm pojmenována vývojová dráha hvězdy v HR diagramu a mez, pro velikost stabilní hvězdy o dané hmotnosti. Věnoval se i nukleosyntezě po velkém třesku nebo studiu hnědých trpaslíků.



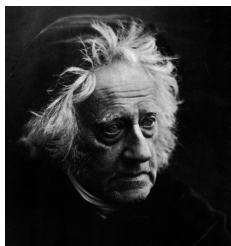
Helvecius, Heweliusz Jan (*28.1.1611 Gdaňsk - †28.1.1687 Gdaňsk, Polsko) – polský astronom, pivovarník a po mnohá léta člen tamější městské rady. Je znám také jako Johannes Hevelius, Johann Hewelke, Johannes Hewel. Je považován za zakladatele lunární topografie. Objevil libraci Měsíce.



Herbig, George Howard (*2.1.1920 Wheeling, USA - †12.10.2013 Honolulu, USA) – americký astrofyzik. Věnoval se studiu mladých hvězd, tvorby hvězd a mezihvězdné látky. Objevil a studoval mnoho objektů s H_{α} emisí, hvězd typu T Tauri a pekulárních hvězd. Nezávisle na Harovi objevil plynné proudy spojené s mladými hvězdami, které se dnes označují jako Herbigovy-Harovy objekty. Herbig také ukázal, že abundance lithia je spojena s věkem mladých hvězd a studoval rychlosti rotace hvězd různých spektrálních typů.



Herschel, Sir Frederick William, někdy též v původní podobě Friedrich Wilhelm (*15.11.1738 Hannover (dnes Německo) - †25.8.1822 Slough, tehdy hrabství Buckinghamshire, dnes Berkshire, 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 α 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 název „fotografie“, „negativ“ a „pozitiv“, „snímek“.



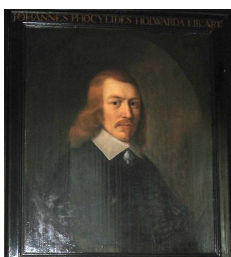
Hertzsprung, Ejnar (*8.10.1873 Frederiksberg, Kodaň, Dánsko - †21.10.1967 Roskilde, Dánsko) – chemik a astronom. Zjistil, že ze změny šířek spektrálních čar lze usuzovat na typ hvězdy (trpaslík, obr, hvězda hlavní posloupnosti), které vedly k vytvoření známého diagramu. Jako první kalibroval závislost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



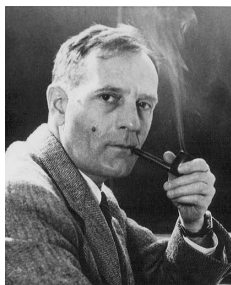
Hess, Victor Franz (*24.6.1883 Deutschfeistritz, dnes Rakousko – †17.12.1964 Mount Vernon, USA) – rakouský fyzik, od r. 1938 v USA. V r. 1912 při balonovém výstupu v Ústí nad Labem objevil kosmické záření, které nazval Höhenstrahlung – výškové záření, neboť intenzita tohoto ionizujícího záření rostla s výškou. V r. 1936 mu byla za tento objev udělena (spolu s C. D. Andersonem) Nobelova cena za fyziku.



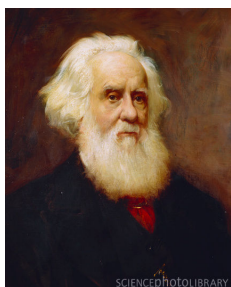
Hipparchos (*asi 190 př.n.l. Nikaia (Nikáj, Nicaea), dnešní Turecko – †asi 120 př.n.l. Rhodos, Řecko) – jeden z největších antických astronomů. Zvýšil přesnost pozorování, vynalezl přístroje pro měření výšky hvězd, určil sklon zemské osy k rovině ekliptiky, přesně délku slunečního roku, precesi, vzdálenost Měsíce od Země. Sestavil katalog 1 080 hvězd začleněných do 49 souhvězdí a rozdělil hvězdy podle jasnosti do 6 velikostí. K určování jasnosti hvězd zavedl stupnici hvězdných velikostí používanou dodnes.



Holwarda, John Phocylides, též Jan Fokkens, Johannes Fokkes Holwarda, Jan Fokkes van Holwerd, Johann Phocylides (*19.2.1618 Holwerd, Nizozemí - †22.1.1651 Franeker, Nizozemí) – fríský astronom, fyzik a filosof. Známý 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.



Jeans, Sir James Hopwood (*11.9.1877 Ormskirk, Lancashire, Anglie - †16.9.1946 Dorking, Surrey, Anglie) – britský fyzik, astronom a matematik. Měl široké pole zájmů, publikoval knihy o dynamické teorii plynů (1904), teoretické mechanice (1906) a o matematické teorii elektřiny a magnetismu (1908). Zabýval se kvantovou fyzikou, teorií záření (Rayleighův-Jeansův zákon), teorií vývoje hvězd, vývoje vesmíru. Vypracoval hypotézu vzniku Sluneční soustavy.



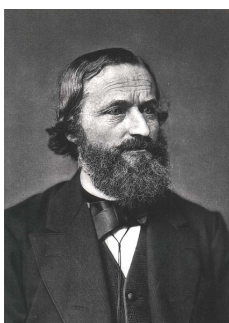
Johnson, Harold Lester (*17.4.1921 Denver, Colorado, USA - †2.4.1980 Mexico City, Mexiko) – americký astronom. Jeho jméno je spojeno se zavedením širokopásmového systému fotometrických filtrů *UBV* (někdy označovaného jako Johnsonův nebo Johnsonův-Morganův systém) v roce 1953. Později systém rozšířil do infračervené oblasti. Stal se jedním ze zakladatelů IR astronomie. Provedl velmi mnoho přesných fotometrických měření. Zemřel na infarkt.



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

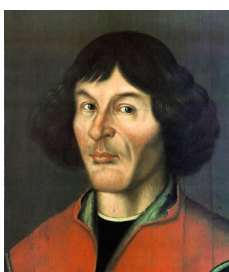


Kepler, Johannes, někdy počestěné Jan (*27.12.1571 Weil der Stadt, Německo – †15.11.1630 Řezno, Německo) – německý astronom, astrolog a matematik. Sestavil čočkový dalekohled. Během působení v Praze na dvoře císaře Rudolfa II. formuloval dva ze tří zákonů popisujících pohyb planet. Jeho matka byla obviněna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

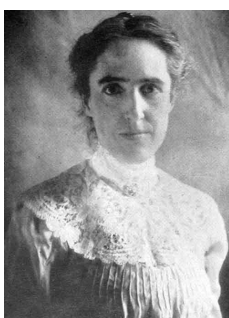


Kirchhoff, Gustav Robert (*12.3.1824 Königsberg, Prusko, nyní Kaliningrad, Rusko - †17.10.1887 Berlín, Německo) – německý fyzik, který se zabýval především elektřinou, spektroskopií a zářením zahřátých objektů. Jako první použil termín záření „černého tělesa“. Formulací zákonů spektroskopie (s Bunsem) položil základy astrofyziky. Mezi jeho studenty patřili např. Max Planck nebo Dmitrij Ivanovič Mendělejev.

Kidinnu také Kidinnu, Cidenas, Kidynas (2. pol. 6. st.př.n.l.) – chaldejský učenec, který se zabýval pohybem planet a Měsíce. Mimo jiné tvrdil, že rychlost pohybu planet je nerovnoměrná, ale během roku postupně roste a pak zase klesá. Určil délku měsíce na (přepočteno) 29.530594 d.



Koperník, Mikuláš (19.2.1473 Toruň, Polsko – 24. května 1543, Frombork, Polsko) – byl vystudoval právo a medicínu, ale znám je spíše jako astronom. Působil jako římskokatolický duchovní a novodobý autor heliocentrické teorie. Jeho kniha o pohybu planet *De Revolutionibus* byla na seznamu zakázaných knih katolické církve v letech 1616 až 1835. Vedou se spory, zda byl polské nebo německé národnosti.



Leavittová, Henrietta Swan, čti *levitová* (*4.7.1868 Lancaster, Massachusetts – †12.12.1921 Cambridge, Massachusetts, USA) – americká astronomka. Na observatoři Harvard College Observatory v Massachusetts objevila na deskách Malého Magellanova mračna přes dva a půl tisíce proměnných hvězd. Z nich 16 později označila jako cefeidy a stanovila vztahu mezi periodou jejich světelných změn a průměrnou svítivostí.



Lemaître, Georges Henri Joseph Édouard, čti [žorž lemétr] (*17.7.1894 Charleroi, Belgie – †20.6.1966 Lovaň (Leuven), Belgie) – belgický římskokatolický kněz, astronom, kosmolog a profesor fyziky na univerzitě v Leuvenu. Nezávisle na A. Fridmanovi odvodil v roce 1927 relativistické nestacionární modely vesmíru s velkým třeskem a dal je jako první do přímé souvislosti s expanzí vesmíru, kterou objevil E. Hubble v roce 1929. Lemaître počáteční stav označoval jako „prior-dial atom“ nebo „kosmické vejce“. Často je označován za otce teorie velkého třesku.



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



Maunder, Edward Walter (*12.4.1851 Londýn, Anglie – †21.3.1928 Londýn, Velká Británie) – anglický astronom známý studii slunečních skvrn a slunečního magnetického cyklu, které mj. vedly ke zjištění, že v období let 1645 – 1715 bylo Slunce v období dlouhého minima činnosti (Maunderovo minimum). Jeho graf rozmístění slunečních skvrn v závislosti na fázi sluneční činnosti je známý jako *motýlkový diagram*. S bratrem se významně zasloužil o založení British Astronomical Association.



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



Morgan, William Wilson (*3.1.1906 Bethesda, Tennessee, USA - †21.6.1994 Williams Bay, Wisconsin, USA) – americký astronom. Studoval klasifikace hvězd a galaxií. Spolu P. Keenanem vyvinul systém pro spektrální klasifikaci hvězd. Vyvinul i několik morfologických systémů klasifikace galaxií. Podílel se zavedení širokopásmového fotometrického systému *UBV*.



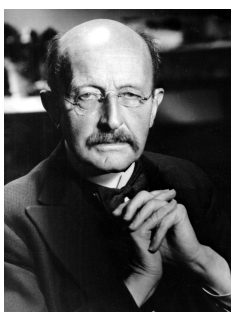
O'Sullivan, John (*31.1.1947) – australský elektroinženýr, jehož práce o Fourierových transformacích v radioastronomii se stala základem pro dnešní standardy bezdrátového připojení Wi-Fi. Spolu s kolegy a organizací CSIRO vlastní příslušné patenty. V r. 2017 byl tváří kampaně automobilky Škoda v Austrálii.



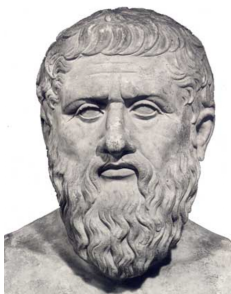
Paczynski, Bohdan (*8.2.1940 Wilno, Polsko (nyní Vilnius, Litva) - †19.4.2007 Princeton, USA) – polský astronom. Zabýval se polarizací a absorpcí v Galaxii, vývojem hvězd a akrečními disky v těsných dvojhvězdách. Zdroje γ záblesků „odsunul“ do kosmologických vzdáleností. Vypracoval teorii hypernov. Navrhl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



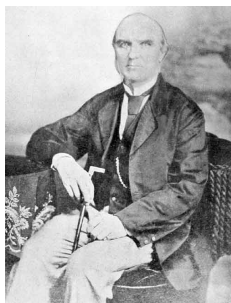
Pigott, Edward (*27.3.1753 asi Whitton, Middlesex, Anglie - †27.6.1825 Bath, Anglie) – anglický astronom. Objevil proměnnost η Aql, mlhovinu M64 a velkou kometu 1783. Později pracoval se sousedem a přítelem J. Goodrickem. Seřadil první „katalog“ 12 tehdy známých proměnných hvězd.



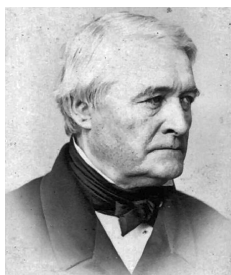
Planck, Max Karl Ernst Ludwig (*23.4.1858 Kiel, Německo - †4.10.1947 Göttingen, Německo) – německý teoretický fyzik. Byl také výborným hudebníkem a v mládí se rozhodoval, zda se věnovat hudbě nebo fyzice. Přes odpor profesora fyziky Filipa von Jolly, který mu tvrdil, že vše už bylo objeveno se dal na fyziku. Planck prý nechtěl 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 něž dostal v r. 1918 Nobelovu cenu.



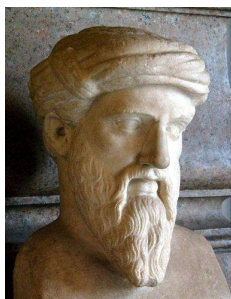
Platón, (*428/427 př.n.l. Atény nebo Aigina, Řecko - †348/347 př.n.l. Atény, Řecko) – antický myslitel a filosof. Platón (v latinské verzi Plato) je všeobecně používaný pseudonym, původně přezdívka, jeho jméno však bylo Aristoklés. V Aténách založil Akademii, která byla později vzorem evropským univerzitám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



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.



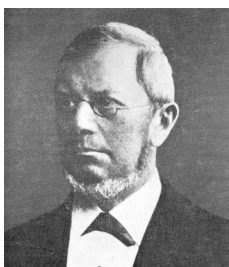
Russell, Henry Norris (*25.10.1877 Oyster Bay, New York, USA - †18.2.1957 Princeton, New Jersey, USA) – americký astronom. S E. Hertzsprungem nezávisle vytvořili graf závislosti zářivého výkonu na povrchové teplotě hvězd (dnes Hertzsprungův–Russellův diagram). V r. 1923 společně s F. Saundersem popsal spin-orbitální vazbu. Věnoval se vývoji hvězd, studoval dvojhvězdy a zejména zákrytové dvojhvězdy.



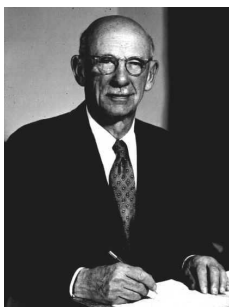
Secchi, čti [sekki] Pietro Angelo (*29.6.1818 Reggio nell'Emilia, Itálie – †26.2.1878 Řím, Itálie) – italský jezuitský kněz a astronom. Byl průkopníkem astronomické spektroskopie, sestavil klasifikace hvězd podle jejich spekter. Jako jeden z prvních vědců považoval Slunce za hvězdu.



Shapley, Harlow (*2.11.1885 Nashville, USA - † 20.10.1972 Colorado, USA) – americký astronom. V r. 1918 použil k určení velikosti naší Galaxie pulsující proměnné hvězdy typu RR Lyr a určil i pozici Slunce v Galaxii. V r. 1953 navrhl teorii „pásu tekuté vody“, nyní známých jako zóny života. Věnoval se i studiu dvojhvězd. Astronomii se začal věnovat náhodou. Chtěl studovat žurnalistiku, ale otevření oboru na univerzitě bylo o rok odloženo, tak si vybíral náhradní obor podle abecedy. Zamítl archeologii (měl potíže to vyslovit) a další v pořadí byla astronomie.



Spörer, Friederich Wilhelm Gustav (*23.10.1822 Berlín – †7.7.1895 Gießen, Německo) – německý astronom. Zabýval se slunečními skvrnami a cykly sluneční aktivity. Spörer jako první zmiňuje delší období slunečního minima v letech 1645 - 1715 (tzv. Maunderovo minimum). Jako Spörerovo se označuje minimum aktivity Slunce 1420-1570.



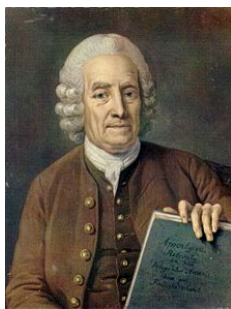
Stebbins, Joel (*30.7.1878 Omaha, Nebraska, USA - †16.3.1966 Palo Alto, Kalifornie, USA) – americký astronom. Jeden z průkopníků fotoelektrické fotometrie. Spolu s kolegy, zejména s Albertem Whitfordem použil novou techniku k výzkumu zejména zákrytových dvojhvězd. Studoval zčervenání světla hvězd mezihvězdným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



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

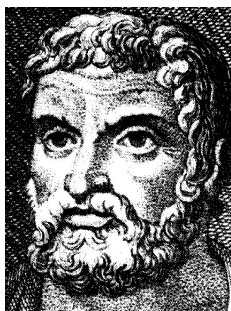


Strömberg, Bengt Georg Daniel (*21.1.1908 Gothenburg, Švédsko – †4.7.1987 Kodaň, Dánsko) – dánský astronom a astrofyzik. Zjistil, že chemické složení hvězd je mnohem rozdílnější, než se dříve myslelo. Na konci 30. let minulého století zjistil, že hvězdy jsou zhruba ze 70 % z vodíku a 27 % z hélia. Před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

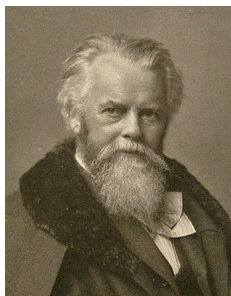


Swedenborg, Emanuel (*29.1.1688 Stockholm, Švédsko - †29.3.1772 Londýn, Anglie) – švédský vědec, vynálezce, teolog a mystik, autor mnoha latinských spisů. Oblast jeho zájmů je velmi široká, zajímal se o praktickou mechaniku, učil se sestavovat hodiny, vázat knihy, rytectví i konstrukci dechových nástrojů. Jeho studia zahrnují kosmologii, matematiku, anatomii, fyziologii, politiku, ekonomii, metalurgii, mineralogii, geologii, důlní inženýrství a chemii.

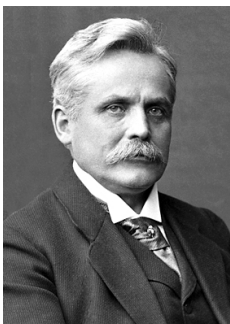
Ši Šen angl. Shih Shen, také Shi Shenfu (*4. st. př.n.l. stát Wei, dnešní Čína) – čínský astronom. Vytvořil (možná s kolektivem spolupracovníků) první známý hvězdný katalog obsahující polohy 809 hvězd. Připisuje se mu i první záznam pozorování slunečních skvrn z r. 364 př.n.l., které považoval za úkazy na Slunci.



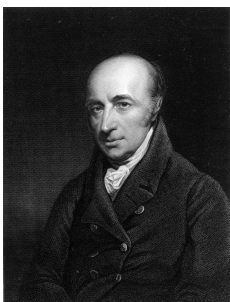
Thalés, z Milétu; (*okolo 624 př.n.l. Milétos – †okolo 548 př.n.l. Milétos, dnešní Turecko) – řecký filozof, geometr a astronom. Byl pokládán za zakladatele řecké filozofie (zahrnovala také matematiku a vědy). Z jeho díla se zachovaly pouze zlomky. Připisuje se mu řada objevů v geometrii (například Thaletova věta), v astronomii a v kosmologii.



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



Wien, Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz (*13.1.1864 Fischhausen, východní Prusko, dnes Primorsk, Kalinin-gradská oblast, Rusko - †30.8.1928 Mnichov, Německo) – německý fyzik. V r. 1893 odvodil z existujících teorií tepla a elektromagnetismu tzv. Wienův posunovací zákon. Za práci o tepelném záření dostal v roce 1911 Nobelovu cenu za fyziku.



Wollaston, William Hyde; *6.8.1766, East Dereham, Velká Británie – †22.12.1828 Chislehurst, Velká Británie – anglický astronom, chemik a fyzik. Objevil palladium a rhodium. Vynul postup získávání platiny z rudy. Ve slunečním spektru objevil tmavé čáry, později pojmenované po Fraunhoferovi. Vynalezl optické zařízení zvané *camera lucida*, které umožňuje přesné kreslení tvarů předmětů.



Zejda, Miloslav; *14.11.1965, Třebíč – astronom, učitel astronomie. Dlouholetý pozorovatel proměnných hvězd. Zabývá se zejména zákrytovými dvojhvězdami, otevřenými hvězdokupami a okrajově i chemicky pekuliárními hvězdami.

A Appendix: Vývoj astronomie

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

DATAČE	OBJEV, VYNÁLEZ	AUTOR (event. lokalita)
cca 5000 př.n.l.	gnomon	homo sapiens sapiens
4226 př.n.l.	zaveden první kalendář na světě	Egypt
cca 3300 př.n.l.	zpráva o zatmění Měsíce ve Střední Americe	Mayové
cca 3000 př.n.l.	první knihovny s astronomickými, matematickými a lékařskými spisy	Egypt
cca 3000 př.n.l.	používání slunečních (den) a vodních (noc) hodin	Egypt
(?)2782 př.n.l.	sluneční kalendář	Egypt
2700-2400 př.n.l.	budování pyramid (obnášelo znalosti z astronomie (přesné zaměření podle světových stran) a geometrie)	Egypt
2461 př.n.l.	zaznamenána 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 kompéndia "Libros de saber de astronomia", psané španělsky, které shrnovalo kompilaci z mnohých astronomických rozprav; populárními se staly především tzv. Alfonzinské tabulky, které byly sestaveny na základě tabulek astronoma al-Zarkálího (též Azrachel)	král Alfons X.
1310	spis "Lucidator astronomiae"- nebeská tělesa nejsou upevněna na sférách, ale pohybují se volně v prostoru	Pietro d'Abano
1344-1351 po 1400	astronomický orloj (Padova) katalog hvězd a tabulka pohybu planet, která se vyznačuje velkou přesností	Jacopo Dondi Ulugh-beg
15.stol. po 1450	změřena vzdálenost Měsíce upřesnění tzv. Alfonzinských astronomických tabulek (pol. 13. stol.) a trigonometrických tabulek Almagestu	Georg Peurbach
1500 - 2006		
16.stol.	změřena vzdálenost Slunce	
1542	heliocentrický model pohybu planet, mezi které je počítána také Země	M.Kopernik
1543	vyšly knihy "Šest knih o oběžných pohybech v drahách nebeských těles"	M.Kopernik
1572	pozorování nové hvězdy v souhvězdí Kasiopeji	Tadeáš Hájek z Hájku
1576	počátek budování hvězdárny na ostrově Hven, zvaná Uraniborg	T. de Brahe
1581	začala se měřit inklinace	R. Norman
1582	přijat nový kalendář, který opravil starý juliánský - po 4. říjnu následoval 15. říjen; byl přijat katolickou církví za papeže Gregora XIII. - proto "gregoriánský kalendář"	Evropa
1584	teorie nekonečnosti vesmíru a světů; uznání heliocentrismu	G.Bruno
1588	kompromisní systém planet - okolo Země obíhá Slunce o kolem Slunce planety	T. de Brahe
1572, 11.11.	supernova v souhv. Kasiopeja - tzv. 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 zavrhnutí 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	měření paralaxy hvězdy ? Centauri zjištěna vzdálenost čtyř světelných let - nejbližší známá hvězda	T.Henderson, T. Mac Lear
1842	použití fotografie ke studiu slunečního spektra - objev Fraunhoferových 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 $v = 18,5 \text{ km/s}$ (dnes se udává hodnota $19,5 \text{ km/s}$)	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. 19.01.	vypuštěna družice New Horizons	více zde

B Appendix: Fotometrické pojmy

B.1 Slovníček pojmů z fotometrie

steradián (srad) – prostorový úhel, který s vrcholem ve středu koule vytíná na povrchu této koule plochu s obsahem rovným druhé mocnině poloměru koule.

zářivý tok – výkon přenášený zářením, které prochází v určitém místě prostoru danou plochou [1 W]

hustota zářivého toku – zářivý tok plochou/průmět té plochy do směru kolmého na směr šíření záření [W/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 [lm/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 m^2 dopadá rovnoměrně rozložený svět. tok 1 lm

Tabulka C.1: Speciální označení některých apsid

centrální těleso	bod V1	bod V3
Slunce	perihel	afel
Země	perigeum	apogeum
hvězda	periastron	apastron
obecně	předpona peri-	předpona ap- (apo-, apa-),

C Appendix: Kuželosečky

Elipsa = množina bodů M , které mají od dvou daných bodů $F1$ a $F2$ – tzv. ohnisek elipsy – konstantní součet vzdáleností rovný $2a$ (a je velká poloosa elipsy)

$$F1M + MF2 = 2a$$

O ... střed elipsy, $V1, V3$... hlavní vrcholy, $V2, V4$... vedlejší vrcholy
vrcholy elipsy = apsidy, spojnice vrcholů – přímka apsid

Velká osa elipsy = přímka, procházející oběma ohnisky = délka úsečky $V1V3$

velká poloosa elipsy = polovina $V1V3$.

Vzdálenost $OV1 = OV3 = a$... velká poloosa, $OV2 = OV4 = b$... malá poloosa,

$OF1 = OF2 = e$... výstřednost,

$OF1/OV1 = \varepsilon$... číselná výstřednost (numerická excentricita)

Mezní případ elipsy - kružnice, $F1 = F2 = O$, výstřednost elipsy $e = OF1 = OF2 = 0$

namísto výstřednosti e , definované výše, tzv. číselná výstřednost (numerická excentricita) $\varepsilon = OF1/OV1$.

D Apendix: Metody měření vzdáleností ve vesmíru

triangulační metoda - současné měření směrů ze 2 stanovišť => rozdíl směrů = paralaxa => paralaxa + vzdálenost stanovišť => vzdálenost stanoviště - místa na Zemi, Země v různých časech, objekty Sluneční soust.

radiolokace - ve Sluneční soustavě; měření doby mezi vysláním a příjmem rádiového impulsu (rychlost = c) => vzdálenost „terče“

cefeidy – objekty v Galaxii i cizích galaxiích

standardní svíčky – supernovy, zákrytové dvojhvězdy – vzdálenosti galaktické

Hubblův vztah – 1929 Edwin Hubble - rychlost vzdalování objektů v je úměrná vzdálenosti r Hubblův vztah $v = H \cdot r$, H = Hubbleova konstanta. Platí pouze ve světě galaxií!

E Appendix: Výslovnost latinských slov

Pracovním jazykem astronoma je dnes angličtina, v níž je publikována naprostá většina všech článků a moderních výsledků. Ale přesto se každý adept astronomie setká i se starobyloou latinou. Latinské názvy souhvězdí by měli správně vyslovovat prostě všichni. Pravidla latinské výslovnosti jsou rozsáhlá a pro hlubší seznámení doporučujeme učebnici latiny. Tady nám postačí jen rychlokurz. Souhláska *c* se před *e*, *ae*, *oe*, *i*, *y* vyslovuje jako české *c*, tedy Cygnus [cy-], Atlas Coeli [cé-]. Jinak se vyslovuje jako *k*: Carina [ka-], Crux [kr-]. Dvojhlasiku *ph* čteme jako *f*: Cepheus [-efe-]. *D*, *t*, *n* se vyslovují vždy tvrdě: Canis [-ny-], *s* čteme vždy jako *s*: Mensa, Perseus.

F Appendix: Řecká abeceda

V tabulce uvádíme znaky řecké abecedy, jejich český a anglický název a výslovnost v angličtině. Některé velké znaky se jako označení veličin nepoužívají.

α	<i>A</i>	alfa	alpha	[ˈælfə]
β	<i>B</i>	beta	beta	[ˈbi:tə]
γ	Γ	gama	gamma	[ˈgæmə]
δ	Δ	delta	delta	[ˈdeltə]
ϵ	<i>E</i>	epsilon	epsilon	[epˈsailən]
ζ	<i>Z</i>	dzéta	zeta	[ˈzi:tə]
η	<i>H</i>	éta	eta	[ˈi:tə]
ϑ	Θ	théta	theta	[ˈθ i:tə]
ι	<i>I</i>	iota	iota	[aiˈoutə]
κ	<i>K</i>	kapa	kappa	[ˈkæpə]
λ	Λ	lambda	lambda	[ˈlæmdə]
μ	<i>M</i>	mí	mu	[mju:,mu:]
ν	<i>N</i>	ný	nu	[nju:,nu:]
ξ	Ξ	xí	xi	[gzai, zai]
o	<i>O</i>	omikron	omicron	[ouˈmaikrən]
ϖ	Π	pí	pi	[pai]
ϱ	<i>P</i>	ró	rho	[rou]
σ	Σ	sigma	sigma	[ˈsigmə]
τ	<i>T</i>	tau	tau	[tau,to:]
υ	<i>Y</i>	ypsilon	upsilon	[ju:pˈsailən]
φ	Φ	fí	phi	[fai]
χ	<i>X</i>	chí	chi	[kai]
ψ	Ψ	psí	psi	[psai,sai]
ω	Ω	omega	omega	[ˈoumigə]