

Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity  
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Miloslav Zejda

## Základy astronomie

Skripta – verze 0.15  
11. února 2013

Brno 2013



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

# Obsah

## Základy astronomie 2 13

<b>1 Hvězdy zpozvdáli</b>	<b>13</b>
1.1 Fotometrie . . . . .	13
1.1.1 Vizuální fotometrie . . . . .	13
1.1.2 Fotografická fotometrie . . . . .	15
1.1.3 Fotoelektrická fotometrie . . . . .	16
1.1.4 CCD fotometrie . . . . .	17
1.2 Astronomická interferometrie . . . . .	19
1.3 Spektroskopie . . . . .	22
1.4 Dvojhvězdné studnice informací . . . . .	23
1.4.1 Vizuální dvojhvězdy . . . . .	24
1.4.2 Astrometrické dvojhvězdy . . . . .	24
1.4.3 Spektroskopické dvojhvězdy . . . . .	25
1.4.4 Zákrytové dvojhvězdy . . . . .	26
1.5 Hvězdný diagram . . . . .	30
1.5.1 Historie . . . . .	30
1.5.2 Podoby HRD . . . . .	32
1.5.3 Barevný diagram . . . . .	37
Shrnutí . . . . .	40

## Základy astronomie 2 10

<b>2 Hvězdy zblízka</b>	<b>41</b>
2.1 Svítící koule . . . . .	41
2.2 Modely hvězd . . . . .	42
2.3 Anatomie hvězdy . . . . .	45
2.3.1 Nitro hvězdy . . . . .	45
2.3.2 Atmosféra hvězdy . . . . .	47
2.4 Proč hvězdy září? . . . . .	48
2.5 Jaderné reakce v nitru hvězd . . . . .	50
2.5.1 Proton-protonový řetězec (p-p řetězec) . . . . .	50
2.5.2 CNO (uhlíkový) cyklus . . . . .	51
2.5.3 $3\alpha$ proces . . . . .	53
2.6 Přenos tepla . . . . .	54
2.6.1 Přenos energie zářením (zářivou difúzí) . . . . .	55
2.6.2 Konvekce . . . . .	55
2.6.3 Přenos tepla vedením . . . . .	56
2.6.4 Proud neutrin . . . . .	57
Shrnutí . . . . .	59

<b>3</b>	<b>Slunce jako vzorová hvězda</b>	<b>60</b>
3.1	Chemické složení Slunce . . . . .	60
3.2	Model Slunce . . . . .	61
3.3	Projevy aktivity Slunce . . . . .	61
3.3.1	Sluneční skvrny . . . . .	64
3.3.2	Okrajové ztemnění . . . . .	65
3.3.3	Granulace (zrnitost) . . . . .	66
3.3.4	Fakule (pochodně) . . . . .	67
3.3.5	Erupce . . . . .	67
3.3.6	Sluncetřesení . . . . .	67
3.3.7	Flokule a spikule . . . . .	68
3.3.8	Protuberance . . . . .	68
3.3.9	Koróna . . . . .	68
3.3.10	Sluneční vítr . . . . .	69
3.4	Heliosféra . . . . .	71
	Shrnutí . . . . .	73
<b>4</b>	<b>Zrození, život a skon hvězd</b>	<b>74</b>
4.1	Akt zrození aneb 7 kroků ke vzniku hvězdy . . . . .	75
4.1.1	Dělení GMC . . . . .	75
4.1.2	Samostatný kolaps jednoho fragmentu . . . . .	76
4.1.3	Protohvězda . . . . .	77
4.1.4	Kelvinova-Helmholtzova kontrakční fáze . . . . .	79
4.1.5	Hayashiho vývojová cesta . . . . .	80
4.1.6	Zrození nové hvězdy . . . . .	81
4.1.7	Hvězda dosedá na hlavní posloupnost . . . . .	81
4.2	Protohvězdy rozdílné hmotnosti . . . . .	82
4.2.1	Protohvězdy s nadváhou . . . . .	82
4.2.2	Subtilní protohvězdy . . . . .	82
4.2.3	Objekty pod míru . . . . .	83
4.3	Hvězdy na hlavní posloupnosti . . . . .	83
4.4	Hvězdy v nejlepších letech . . . . .	85
4.5	Vývoj hvězd po opuštění hlavní posloupnosti . . . . .	87
4.6	Závěrečná stadia vývoje hvězd . . . . .	88
4.7	Konečný osud hvězd . . . . .	88
4.7.1	Stabilní řešení - chladnoucí trpaslíci . . . . .	89
4.7.2	Nestabilní řešení - supernovy, hypernovy . . . . .	90
4.8	Zvláštnosti vývoje těsných dvojhvězd . . . . .	92
4.8.1	Novy . . . . .	95
	Shrnutí . . . . .	96
<b>5</b>	<b>Hvězdná uskupení</b>	<b>98</b>
5.1	Málopočetné skupiny hvězd – hvězdné soustavy (multiple stars) . . . . .	98
5.1.1	Dvojhvězdy . . . . .	99
5.2	Hvězdotupy . . . . .	101
5.2.1	Kulové hvězdotupy . . . . .	101

5.2.2	Otevřené hvězdokupy . . . . .	103
5.2.3	Hybridní? - zvláštní? . . . . .	105
5.2.4	Hvězdné asociace . . . . .	105
	Shrnutí . . . . .	106
<b>6</b>	<b>Galaxie a galaxie</b>	<b>107</b>
6.1	Naše Galaxie se představuje . . . . .	107
6.1.1	Historie poznávání . . . . .	108
6.1.2	Velká debata . . . . .	109
6.1.3	Kde se ztrácí světlo aneb Mezhvězdný plyn a prach . . . . .	110
6.1.4	Galaktická souřadnicová soustava . . . . .	110
6.1.5	Anatomie naší Galaxie . . . . .	111
6.1.5.1	Disková a plochá složka . . . . .	112
6.1.5.2	Jádro Galaxie . . . . .	115
6.1.6	Rotace Galaxie . . . . .	116
6.2	V říši galaxií . . . . .	118
6.2.0.1	Spirální galaxie . . . . .	121
6.2.0.2	Eliptické galaxie . . . . .	122
6.2.0.3	Čočkovité galaxie . . . . .	124
6.2.0.4	Nepravidelné galaxie . . . . .	125
6.3	Aktivní galaxie - AGN . . . . .	126
6.3.1	Typy aktivních galaxií . . . . .	127
6.3.1.1	Seyfertovy galaxie . . . . .	127
6.3.1.2	Kvasary . . . . .	128
6.3.1.3	Rádiové galaxie (radiogalaxie) . . . . .	128
6.3.1.4	Nový typ AGN . . . . .	128
6.4	Kanibalismus galaxií . . . . .	129
	Shrnutí . . . . .	130
<b>7</b>	<b>Velkorozměrové struktury ve vesmíru</b>	<b>132</b>
7.1	Vesmír velkých měřítek . . . . .	132
7.2	Kupy galaxií . . . . .	132
7.3	Velké struktury . . . . .	134
7.3.1	Větší než nadkupy . . . . .	134
	Shrnutí . . . . .	134
<b>8</b>	<b>Kosmologie</b>	<b>136</b>
8.1	První představy a první paradoxy . . . . .	136
8.2	Newtonův model vesmíru . . . . .	139
8.3	Standardní model . . . . .	140
8.3.1	Geometrie vesmíru . . . . .	141
8.4	Rozpínání vesmíru a Hubblův vztah . . . . .	142
8.5	Rozpínání vesmíru . . . . .	144
8.5.1	Rozpínání vesmíru - tam a zpět . . . . .	145
8.5.2	Důkazy teorie velkého třesku . . . . .	145
8.5.2.1	Reliktní záření . . . . .	146

---

8.5.3	Problémy standardního modelu . . . . .	149
8.6	Modely vesmíru . . . . .	150
8.7	Jak starý je vesmír? . . . . .	150
8.8	Vývoj vesmíru . . . . .	151
8.8.1	Velmi raný vesmír . . . . .	151
8.8.2	Raný vesmír . . . . .	151
8.8.3	Temný věk . . . . .	154
8.8.4	Vytváření struktur . . . . .	155
8.9	Výhled do budoucnosti . . . . .	156
8.10	V jakém vesmíru žijeme? . . . . .	158
8.11	Pozorovací kosmologie . . . . .	158
8.11.1	Současná pozorovací kosmologie . . . . .	158
8.11.1.1	Akcelerující vesmír . . . . .	158
8.11.1.2	Červený posun - přehlídkové projekty . . . . .	159
8.11.1.3	Reliktní záření . . . . .	159
8.11.1.4	Současný vesmír . . . . .	162
8.11.1.5	Velikost fluktuací . . . . .	163
8.11.1.6	Baryonové akustické oscilace . . . . .	163
8.11.2	Plánovaná pozorování . . . . .	163
8.12	Jiné pohledy na vývoj vesmíru . . . . .	164
8.13	Mnohovesmír . . . . .	165
	Shrnutí . . . . .	165
<b>9</b>	<b>Nebezpečí z kosmu</b> . . . . .	<b>166</b>
9.1	Střet Země s cizím tělesem . . . . .	166
9.1.1	Srážka s planetkou, kometou . . . . .	166
9.1.2	Kolize Země s černou dírou . . . . .	170
9.2	Slunce . . . . .	171
9.3	Přemíra záření . . . . .	171
9.3.1	Výbuch blízké supernovy . . . . .	171
9.3.2	Záblesky $\gamma$ záření . . . . .	172
9.4	Černá díra za humny . . . . .	173
9.5	Kontakt s mimozemským životem . . . . .	173
	Shrnutí . . . . .	174



# Základy astronomie 2





# 1 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 svými očima. Při představě nebeské sféry, na níž jsou všechny hvězdy ve stejné vzdálenosti, nutně musel dojít k názoru, že čím je hvězda jasnější, tím je větší. Tak vznikl fotometrický pojem "hvězdných velikostí", který však, jak víme, se skutečnou velikostí nemá nic společného a slouží k potrápení studentů a zájemců o astronomii. S nástupem záznamové techniky – fotografie a později elektronických čipů jsme měření jasností a určování hvězdných velikostí zpřesňovali, prováděli v různých oblastech spektra, v různých barvách, a zejména jsme měření zaznamenávali a ukládali do archivů.

Zásadní zvrat v dálkovém průzkumu hvězd přinesla spektroskopie. Studium rozloženého světla nebo obecně spektra elektromagnetického záření bylo najednou možné zjistit složení povrchových vrstev hvězd, zjistit jejich teplotu, tlak, přítomnost magnetického pole, ale také jak se hvězda pohybuje, zda se od nás vzdaluje nebo se k nám přibližuje, jak rychle se otáčí. Pokud je hvězda navíc součástí dvojhvězdy nebo vícenásobného systému, lze kombinací spektroskopických a fotometrických dat zjistit hmotnosti složek dvojhvězdy, jejich vzájemnou vzdálenost i vzdálenost od nás, jejich poloměry a další parametry. Dnes už nemusí jít o soustavu hvězda–hvězda, může jít o planety obíhající kolem mateřské hvězdy, které lze pomocí spektroskopie detekovat a studovat. Ještě na konci 20. století se zdálo, že exoplanety budeme schopni maximálně detekovat. Na počátku druhé dekády 21. století však už pomocí spektroskopie studujeme složení jejich atmosfér.

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

## 1.1 Fotometrie

### 1.1.1 Vizuální fotometrie

Nejstarší vizuální pozorování proměnných hvězd byla prováděna různými metodami. Například William Herschel zaznamenával výsledky srovnání jasnosti proměnné hvězdy s jinou hvězdou v okolí slovně. První kvantitativní metodu pozorování proměnných

hvězd publikoval až Argelander (1844). Při srovnání dvou hvězd - proměnné a srovnávací zavedl hodnocení rozdílu jejich jasností pomocí škály jasně definovaných odhadních stupňů 0 až 4. Velikost stupně je přitom individuální a závisí na zkušenosti a aktivitě pozorovatele. U začátečníka odpovídá jeden odhadní stupeň 0,1 až 0,2 mag, zatímco zkušený pozorovatel dosahuje až 0,05 mag, zcela výjimečně i 0,02 mag.<sup>1</sup> Argelander hrál velmi významnou roli při výzkumu proměnných hvězd. Jeho metoda nabídla snadnou a rychlou možnost sledování proměnných hvězd, což vedlo ke zpopularizování stelární astronomie. Dnes se používá jak původní metoda, tak i různé modifikace. Nejvíce se využívá místo jedné srovnávací hvězdy dvojice hvězd a určuje se rozdíl jasností mezi slabší srovnávací hvězdou, proměnnou hvězdou a jasnější srovnávací hvězdou - místo odhadu se tedy provádí najednou dvojodhad. Je ale možné využít i více srovnávacích hvězd nebo jemnější škálu s více odhadními stupni.

Spolu s Argelanderovou metodou se v bývalém Československu od 60. let minulého století velmi využívala také Nijlandova-Blažkova metoda. Princip odhadů zůstává v této metodě stejný jako u Argelanderovy metody. Pozorovatel využívá odhadních stupňů ke srovnání jasnosti proměnné hvězdy s dvojicí srovnávacích hvězd. Odhady ale určují nejen rozdíly jasností v odhadních stupních, ale jsou odhadní stupně jsou také v poměru podle pozorovaných jasností.

Svou metodu pozorování proměnných hvězd zavedl i Edward Pickering. Jeho metoda spočívala ve srovnávání jasnosti proměnné hvězdy s dvojicí srovnávacích hvězd, jejichž rozdíl v odhadních stupních byl vždy deset. Odhadní stupeň pak byl vlastně při každém (dvoj)odhadu různě veliký, což byla značná nevýhoda metody.

Ještě uveďme jednu Pogsonovu metodu. Je založena na tom, že znám hvězdné velikosti srovnávacích hvězd ve vizuálním oboru a při dvojodhadu interpoluji mezi jejich hvězdnými velikostmi. Výsledkem je pak přímo hvězdná velikost proměnné ve vizuálním oboru. Tato metoda má ale úskalí v tom, že jednak musím znát hvězdné velikosti srovnávacích hvězd, ale navíc musím mít jistotu, že jsou to hvězdy neproměnné. Při této metodě se totiž jako jediný výsledek dvojodhadu uchovává jen hvězdná velikost proměnné hvězdy v čase pozorování, pokud se však jedna srovnávací hvězda také mění, jsou všechna taková pozorování znehodnocena. Příkladem je pozorování supernovy SN1993J vyhlášené v rámci kampaně americkou společností pozorovatelů proměnných hvězd AAVSO<sup>2</sup>. Dva čeští pozorovatelé si všimli, že jedna z doporučených srovnávacích hvězd se je ve skutečnosti proměnná (dnes označená jako ES UMa). Bohužel to znamenalo, že všechna pozorování provedená Pogsonovou metodou, která tuto hvězdu použila jako srovnávací, se musela vyhodit.

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

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

<sup>2</sup><http://www.aavso.org>

## 1.1.2 Fotografická fotometrie

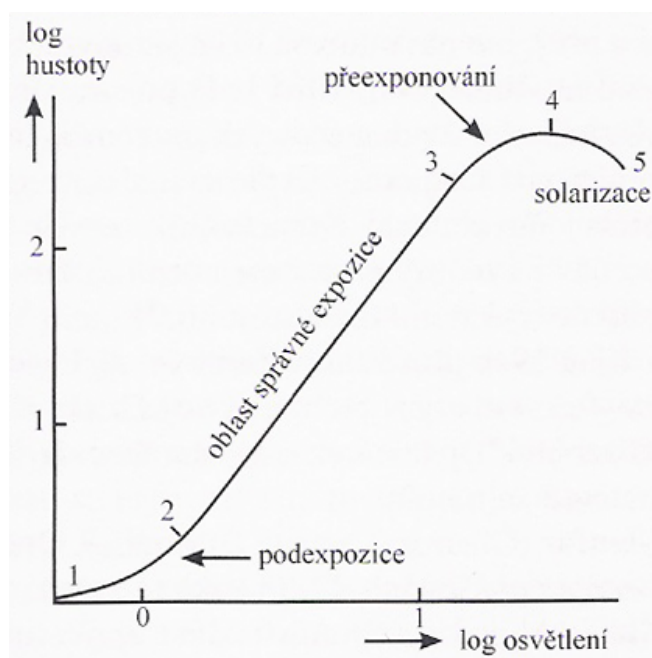
První snahou o nahrazení subjektivního vizuálního pozorování bylo využití fotografie a její následné proměrování. K jejímu širokému uplatnění vedla ale dlouhá cesta. První astrofotografii (snímek Měsíce) pořídil 23. března 1840 J. Draper a zanedlouho bylo zachyceno i sluneční spektrum. 17. července 1850 pak J. A. Whipple a G. Bond pořídili první snímek hvězdy. Na jejich daguerotypii byla zachycena Vega. G. Bond pořídil i první koloidní snímek hvězd (Alkora a Mízara) 27. dubna 1857. Pořád však šlo o snímky poměrně jasných objektů. Teprve v roce 1881 zaznamenal H. Draper na snímku mlhoviny v Orionu hvězdy až do 14,7 mag. V té době už dva roky A. Common experimentoval se suchými deskami. Na řadě snímků mlhoviny (nejlepším z roku 1883) ukázal, že dlouhými expozicemi na suchých fotografických deskách je možné získat obrazy hvězd, které nejsou stejným dalekohledem vizuálně pozorovatelné (podrobnosti viz Hearnshaw, 1996). Taková fotografie už představovala značný pokrok a přinášela oproti vizuálnímu pozorování řadu výhod. Záznam na fotografii je trvalý, lze se k němu po čase vrátit a znovu proměřit. Na fotografii jsou objektivně zachyceny polohy i hvězdné velikosti všech objektů. A především - mohou světlo z hvězd zaznamenávat a integrovat po dlouhou dobu. V astronomii se uplatňovaly hlavně skleněné fotografické desky, na nichž byla nanášena vrstvička světlocitlivé emulze. Folie s citlivou vrstvou nebo běžné filmy nejsou příliš vhodné. Snadno se deformují, takže znemožňují přesnou astrometrii.

Fotometrické informace získávané z fotografických desek jsou založeny na velikosti odezvy fotografické emulze na světlo. Mírou této odezvy je tzv. denzita<sup>3</sup>, někdy též hustota zčernání nebo opacita. Její závislost na délce expozice a tedy množství osvětlení není lineární (viz obrázek 1.1). 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 ještě zpravidla po procesu hypersenzibilace.

Získávání a proměrování fotografií bylo nejrozšířenější fotometrickou metodou zhruba do poloviny minulého století. Po druhé světové válce se začala více uplatňovat fotoelektrická fotometrie. Fotografie zůstala ale doména amatérské astronomie. Od 90. let 20. století se začaly používat CCD kamery, které původní fotografické přístroje prakticky úplně vytlačily. Oproti prvním CCD čipům měly fotografické desky řadu výhod - plocha detektoru byla velká, bylo možné zachytit velkou část hvězdného nebe s větším rozlišením (zrna emulze jsou menší než pixely CCD čipu) a mezi expozicemi nevznikaly dlouhé mezery jako při vyčítání velkých CCD čipů. Situace se ale mění, nevýhody fotografie převažují (malá kvantová účinnost, nelinearita, špatné skladování skleněných desek). Znalost fotografie i tak patří k základní výbavě astronoma. Z dob minulých máme k dispozici rozsáhlé archivy desítek tisíc fotografických desek, z nichž můžete získat unikátní informace o chování například proměnných hvězd, v době, kdy se ještě nevědělo, že jsou proměnné a že by bylo vhodné je sledovat.

---

<sup>3</sup>V minulosti se velikost zčernání desky určovala tak, že se snímek prosvětloval tenkým svazkem světla a měřil se světelný tok na opačné straně desky.

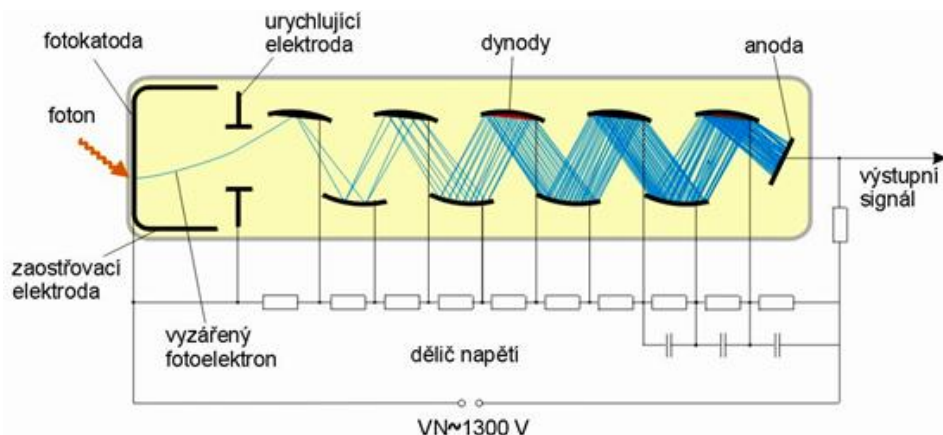


Obrázek 1.1: Charakteristická gradační křivka fotografické emulze. Je charakterizována sklonem (gradací) lineární části. Převzato z Kleczek (2002).

### 1.1.3 Fotoelektrická fotometrie

Na konci 19. století, v době, kdy fotografie přesvědčila o svých kvalitách a možnostech, začínají také první pokusy o přímé měření světla hvězd. První elektrickou detekci světla hvězd provedl pomocí fotonky v Dublinu roku 1892 William Monck. Roku 1907 vyzkoušel Američan Joel Stebbins seleniový odporový fotočlánek a následovaly další pokusy. Hlavními průkopníky fotoelektrické fotometrie byli Paul Guthnick a Richard Prager v Berlíně a Joel Stebbins a jeho kolegové v USA, kteří původní fyzikálně technické pokusy povýšili na metodu, která přinášela vědecké výsledky (podrobnosti viz Hearnshaw, 1996). Přesto byla fotoelektrická fotometrie v první polovině 20. století do značné míry uměním. Jednotlivá jakkoli přesná měření většinou nebyla příliš reprodukovatelná a nebylo možné je opakovat na jiné observatoři. Počátkem 50. let minulého století přišli Johnson & Morgan (1953) s jasně definovanými spektrálními filtry *UBV*, které umožnily měřit jasnosti hvězd ve třech oblastech spektra a po řádném zpracování tato měření porovnávat s jinými, provedenými na jiné observatoři. Teprve tehdy se fotoelektrická fotometrie začala prosazovat pro přesná měření jasností hvězd na profesionálních observatořích.

Základem fotoelektrického fotometru je fotonásobič (z anglického "photomultiplier", ale užívá se "electron multiplier tube" nebo "PMT") schematicky zobrazený na obrázku 1.2. 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, která jsou urychlovány na cestě



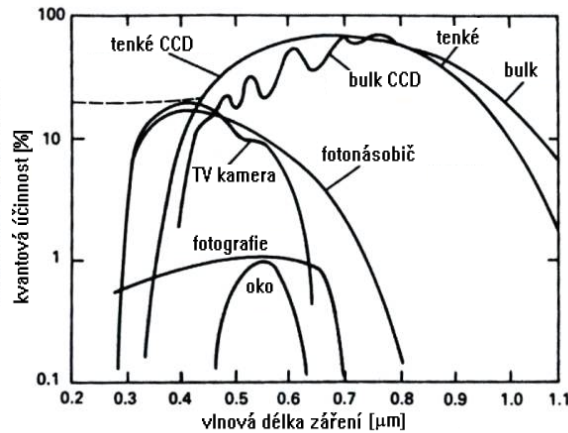
Obrázek 1.2: Schéma fotonásobiče. Převzato z <http://fyzika.jreichl.com>.

k další dynodě a tak dále. Než dorazí na anodu na 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), ale také proměřovat řadu srovnávacích a kontrolních hvězd. Při zpracování je třeba brát v úvahu polohu hvězdy na obloze, její spektrální typ a vliv extinkce a jejich změn (podrobnosti viz Harmanec et al., 1994; Janík & Mikulášek, 2012; Mikulášek & Zejda, 2012).

Výhodou fotoelektrické fotometrie je velká přesnost (až 0,001 mag v časovém rozlišení milisekundy) a zejména velký dynamický rozsah. Fotometry pracují v rozsahu vlnových délek 200-650 nm (zejména v modrém světle). Úpravami chemického složení fotokatody lze ale rozšířit použitelnost až na interval od 150 nm do 1700 nm, tedy od ultrafialového až po infračervené záření. Na druhou stranu ale vysoká cena, malá kvantová účinnost (méně než 20 procent podle typu a spektrální oblasti) a náročné pozorování i zpracování mluví proti dalšímu využívání fotoelektrické fotometrie. Náhradou jsou CCD kamery, ale je třeba si uvědomit, že jejich masivním nasazením místo původních fotoelektrických fotometrů přestala být většina observatoří schopna měřit jasné hvězdy. Pro velké dalekohledy s citlivými kamerami jsou příliš jasné.

#### 1.1.4 CCD fotometrie

Moderními detektory světla, které způsobily doslova revoluci v astronomickém pozorování, jsou elektronické kamery vybavené křemíkovými CCD čipy (z angl. Charge Coupled Device, v překladu nábojově vázané prvky). První CCD čip vytvořili v roce 1969 Willard Boyle a George E. Smith, pozdější nositelé Nobelovy ceny za fyziku v roce 2009. Byl jednorozměrný a měl sloužit jako elektronická paměť. Záhy si ale uvědomili zobrazovací potenciál těchto prvků a tak první CCD kameru sestrojili už o rok později a první komerční CCD zobrazovací prvky o rozměru 100 x 100 zobrazovacích elementů (pixelů) se začaly vyrábět v roce 1974. V astronomii byl CCD prvek (chlazený čip RCA 320x512 LN<sub>2</sub>) poprvé použit v roce 1979 na metrovém dalekohledu na Kitt Peak National Ob-



Obrázek 1.3: Srovnání kvantové účinnosti detektorů. Převzato z Howell (2000).



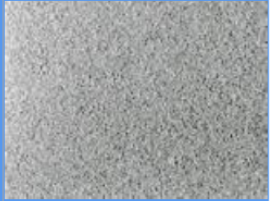

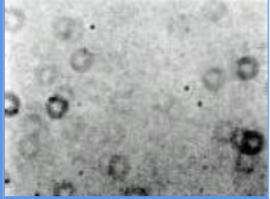

servatory.

Podobně jako fotonásobič využívají CCD čipy při své činnosti fotoelektrický jev, ale vzhledem k tomu, že detektor je dvourozměrný, je výsledkem matice hodnot, kterou mohou převést na obrázek. I ty nejjednodušší čipy dosahují dnes při pečlivém zpracování přesnosti větší než 0,01 mag. Profesionální přístroje i o několik řádů větší. Spektrální citlivost se pohybuje přibližně od 400 do 1200 nm s maximem pro červenou oblast spektra kolem 700 nm. U prvních kamer byla kvantová účinnost čipů srovnatelná s fotografickou deskou, dnes může pro vhodnou vlnovou délku přesáhnout i 90%. Srovnání s ostatními detektory je zobrazeno na obr. 1.3).

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

$$\text{redukovaný snímek} = \frac{(\text{surový snímek} - \text{master bias} - \text{master dark})}{\text{master flat}}, \quad (1.1)$$

kde master flat je zpravidla normovaný medián flat field korekčních snímků opravených o

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

Obrázek 1.4: Ukázka vlivu použití kalibračních snímků na snímek pole proměnné hvězdy RX And. Převzato ze CCD Manual 2010, <http://www.aavso.org>.

temné snímky. 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 1.4.

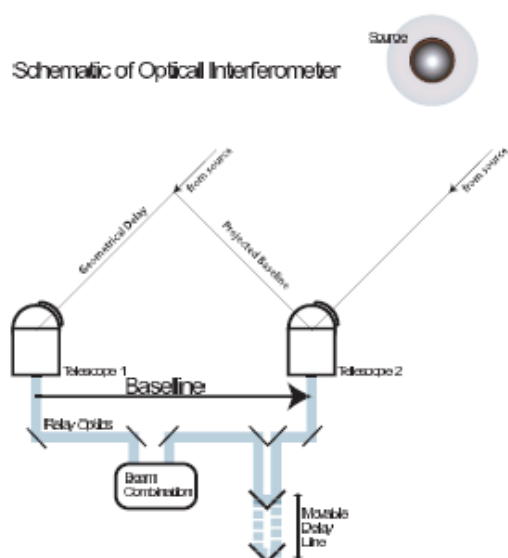
CCD kamery našly v astronomii obrovské uplatnění. S jejich masovým rozšířením začali i amatérští pozorovatelé získávat fotometrická a astrometrická data i pro slabší objekty a to s přesností vyhrazenou dříve jen profesionálním observatořím s velkými dalekohledy. Navíc je snímky možné velmi snadno archivovat, sdílet, lze je automaticky zpracovávat. V případě potřeby je možné zpracování kdykoli zopakovat. Přitom všem získáváme údaje nejen o sledovaném objektu, ale o všech objektech na snímku. Nevýhodou je pro nejmasověji rozšířené kamery menší přesnost než u profesionálních kamer nebo fotoelektrických fotometrů a zejména to, že po záměně fotometrů za CCD kamery nelze pozorovat jasné hvězdy, což vede k přerušení dlouhodobých pozorovacích řad. Ještě před několika lety byla za nevýhodu ozančována i malá plocha CCD čipů, ale vývoj elektronické fotografie jde kupředu opravdu velmi rychle a tak dnes startují projekty, které využívají čipy o souhrnné velikosti 1,4 gigapixelu. Čeká nás tak opravdová záplava dat.

## 1.2 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 jedno gigantického dalekohledu se využívá řady menších, levnějších dalekohledů. Signály z jednotlivých dalekohledů jsou pak složeny do výsledného obrazce. Tím vzniká efektivně dalekohled o velkém průměru s vysokým úhlovým rozlišením.

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

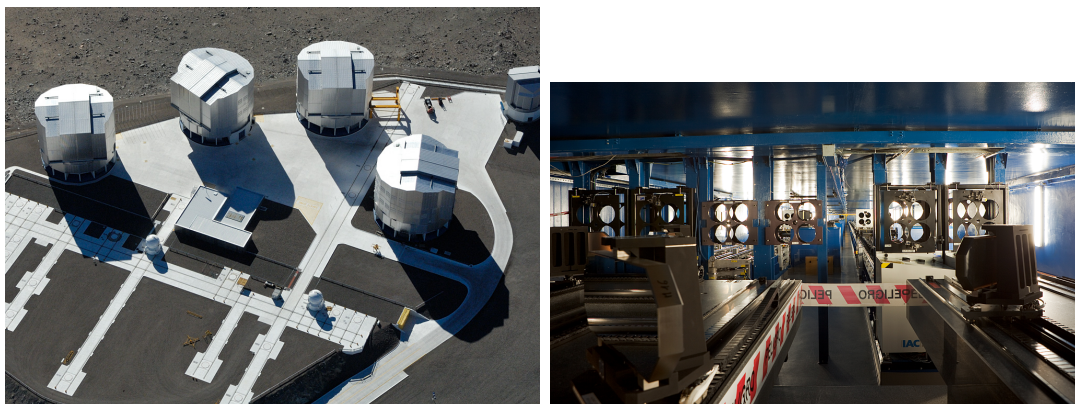


Obrázek 1.5: Schéma moderního optického interferometru: dalekohled, the relay optics, the delay lines and the beam combination. Zdroj: J. D. Monnier, Rep. Prog. Phys. 66, 789 (2003).

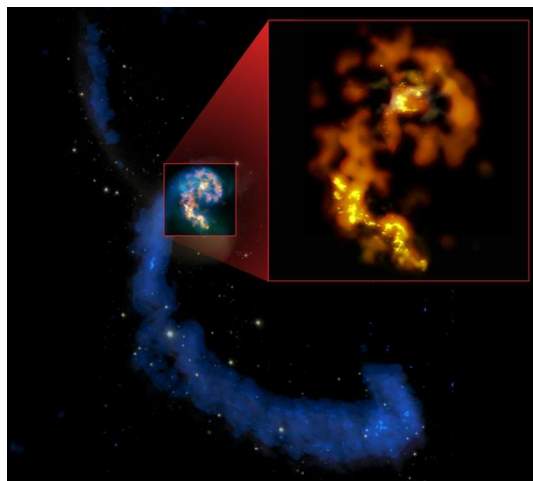
Základní jednotkou pro astronomickou interferometrii je dvojice dalekohledů. Nyní už se ale používá i více dalekohledů spojených do celé sítě. Interferometrické systémy pracují na povrchu Země, ale i ve vesmíru. Nejde v žádném případě jen o optickou část spektra. Spíše naopak. Je třeba si uvědomit, že čím delší je vlnová délka přicházejícího záření, tím snazší je měření jeho fázové informace. První interferometrické systémy byly takřka výhradně tvořeny radioteleskopy pro příjem dlouhovlnného rádiového záření (například VLA (Very Large Array) nebo MERLIN). Nicméně, jak se zlepšovaly technologie a zpřesňovala měření, bylo možné měřit i v oblasti kratších vlnových délek. V optické oblasti pracuje řada interferometrů, například CHARA, VLTI<sup>4</sup>. Od roku 2012 má být plně funkční interferometrický systém v pásmu vlnových délek 0,3 až 9,6 mm ALMA (Atacama Large Millimeter Array). Na projektu se aktivně podílí i vědci z České republiky.

<sup>4</sup>viz [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_astronomical\\_interferometers\\_at\\_visible\\_and\\_infrared\\_wavelengths](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_astronomical_interferometers_at_visible_and_infrared_wavelengths)





Obrázek 1.6: 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.



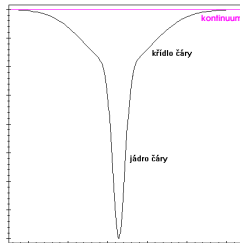
Obrázek 1.7: Složený pohled na interagující galaxie NGC 4038/4039 Tykadla, který ukazuje slapový ohon v rádiové oblasti (modrá), rodící se hvězdy v optické části (bílá a růžová) a ve vybraném čtverci současné oblasti tvorby nových hvězd v milimetrové a submilimetrové části spektra (oranžová a žlutá). Vložený obrázek je první mm/submm testovací pohled ALMA ve třech oblastech spektra zachycující mimořádné detaily. Zdroj: <http://www.almaobservatory.org>.

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 hvězdy a podobně, ale také pomocí interferometrie sledujeme rychlost rotace země vůči velmi vzdáleným objektům a tak zpřesňujeme náš časový rámeček.

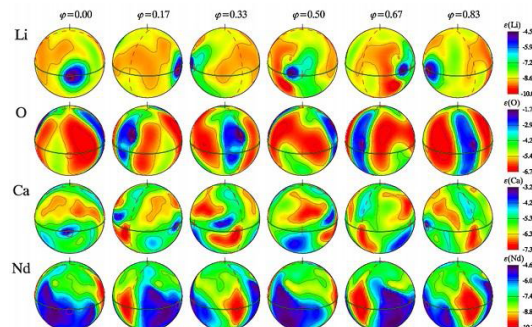
## 1.3 Spektroskopie

V kapitole 7 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 detekovat nyní mimo jiné velmi malé změny v radiálních rychlostech nebo drobné změny chemického složení studovaného objektu nebo jeho části. 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.

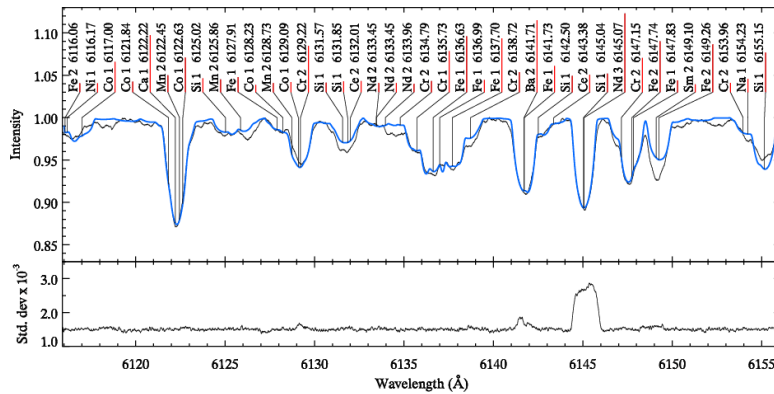


Obrázek 1.8: Spektrální čára. Zdroj: <http://pleione.asu.cas.cz/šlechta>.



Obrázek 1.9: 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. U spektrální čáry rozlišujeme jádro a křídla (viz obrázek 1.9. Podoba, tzv. 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 čar vypovídají o teplotě a zastoupení chemických prvků v místě vzniku záření. Z polohy čar, respektive jejich posunu vůči laboratornímu srovnávacímu spektru, pak určíme zda se objekt od nás vzdaluje nebo se k nám blíží a jakou rychlostí. Při analýze spekter ale nepoužíváme jen napozorovaná spektra objektů nebo srovnávací laboratorní spektra, ale zpravidla také napozorované spektrum porovnáváme s teoretickým, vypočítaným, tzv. syntetickým spektrem (viz obr. 1.10).



Obrázek 1.10: Srovnání napozorovaného spektra hvězdy HR 3831 (tenká čára) se syntetickým spektrem v oblasti 611.6-615.6 nm. Nejsilnější spektrální čáry jsou identifikovány. Zdroj: Kochukhov O., A&A 446, 1051-1070 (2006).

## 1.4 Dvojhvězdné studnice informací

V přehlídce objektů pozorovatelných na obloze jsme v kapitole ?? 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 v žijící v páru toho prostě na sebe prozradí více.

Podle metod, nebo chcete-li způsobu pozorování, je můžeme rozdělit do několika skupin.

- vizuální
- astrometrické
- spektroskopické
- zákrytové

### 1.4.1 Vizualní dvojhvězdy

Na rozdíl od optické dvojhvězdy, kdy se dvě spolu nijak nesouvisející hvězdy náhodně vyskytnou takřka ve stejném směru a pozorovatel pak má dojem hvězdného páru, vizualní dvojhvězda je tvořena skutečným, fyzickým párem dvou hvězd obíhajících kolem společného těžiště. Přívlastek "vizualní" 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 vizualních dvojhvězd je Mizar a jeho průvodce Alkor v oji Velkého vozu.

První záznamy o pozorování vizualních dvojhvězd najdeme v korespondenci Benedetta Castelliho a jeho učitele Galilea Galileiho z let 1616-1617<sup>5</sup>. V 17. i 18. století si astronomové mysleli, že takové dvojice hvězd vznikají jen náhodou a navíc že všechny hvězdy jsou stejně zářivé a jejich rozdílná pozorovaná hvězdná velikost je jen důsledkem jejich odlišné vzdálenosti. Proto se William Herschel rozhodl využít dvojhvězd ke změření paralaxy hvězd a začal je roku 1779 soustavně sledovat. Vydal celkem 3 katalogy s několika stovkami dvojhvězd. Jeho současník, anglický přírodovědec John Michell (1724-1793) ale jednoduchou úvahou a jedním z prvních statistických výpočtů prokázal, že pozorujeme mnohem více dvojhvězd než by odpovídalo náhodnému rozložení hvězd a tedy, že dvojhvězdy, které pozorujeme, musí být zčásti skutečnými fyzickými páry (Michell, 1767). V roce 1797 Herschel znovu proměřil katalogizované dvojhvězdy a zjistil, že vzájemná poloha hvězd ve dvojhvězdách se změnila. V katalogu různých objektů Herschel (1802) vyslovil domněnku, že tato změna není důsledkem pohybu Země, ale že pozorujeme skutečné "dvojitě hvězdné systémy", kde dvě hvězdy obíhají kolem hmotného středu. O čtvrt století později vypočítal Francouz Félix Savary (1827) poprvé na základě pozorování trajektorii složek dvojhvězdy, konkrétně se jednalo o  $\xi$  UMa.

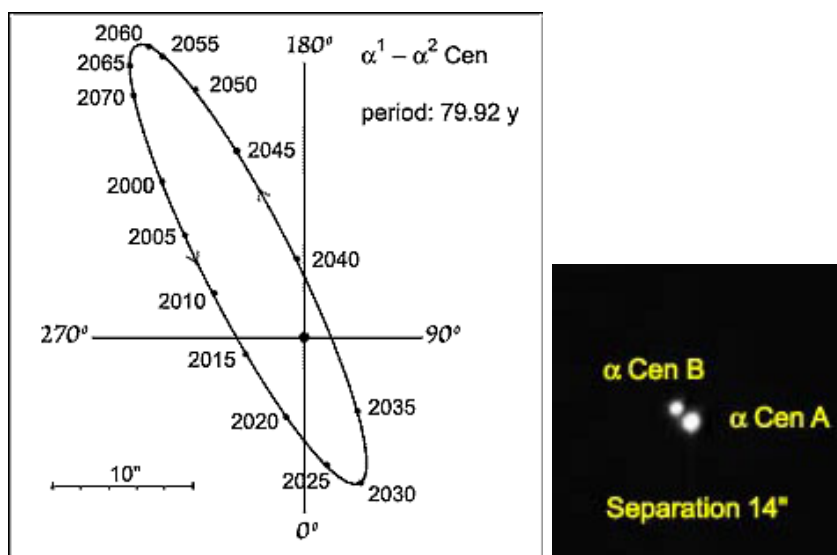
Pokud známe u vizualní dvojhvězdy periodu oběhu  $P$  jejích složek kolem těžiště soustavy a velkou poloosu  $a$  jejích trajektorie, lze poměrně jednoduše zjistit vzdálenost soustavy tzv. *dynamickou paralaxu dvojhvězdy* i hmotnosti obou složek (viz praktická úloha Dynamická paralaxa hvězd).

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

### 1.4.2 Astrometrické dvojhvězdy

Německý matematik a astronom Fridrich Bessel se věnoval mimo jiné astrometrickým pozorováním hvězd. Soutěžil s jinými astronomy své doby o to, kdo první změří paralaxu hvězdy a Bessel tento pomyslný závod v roce 1838 vyhrál určením paralaxy hvězdy 61 Cygni. Nabyté zkušenosti - kritický pohled na starší měření poloh hvězd a vlastní přesná měření ho v roce 1843 přivedly ke zjištění, že v měřeních rektascenze Síría a deklinace Prokyonu jsou větší odchylky, než by vyplývalo z pouhých chyb pozorování. Po důkladné analýze všech dat dospěl k závěru, že tyto odchylky jsou způsobeny přítomností neviditelných průvodců u těchto hvězd Bessel (1844). Důkazu své hypotézy se bohužel

<sup>5</sup>Podrobněji si o pátrání po prvních pozorování vizualních dvojhvězd můžete přečíst na webu Leoše Ondry <http://www.leosondra.cz/mizar/>.



Obrázek 1.11: Relativní trajektorie složek dvojhvězdy  $\alpha$  Cen A a B. Jasnější složka  $\alpha$  Cen A je v počátku a kolem ní je vykreslena trajektorie slabší složky  $\alpha$  Cen B. Ve skutečnosti obě složky obíhají kolem hmotného středu soustavy. Předpovězené polohy slabší hvězdy jsou vykresleny v pětiletých intervalech. Vpravo CCD snímek dvojhvězdy. Převzato z <http://outreach.atnf.csiro.au>.

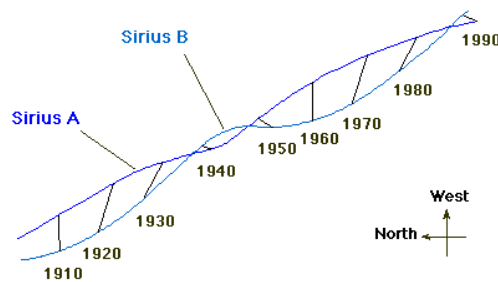
nedočkal, to se podařilo až o dvacet let později. Americký výrobce dalekohledů a astronom Alvan Graham Clark pozoroval Síriova průvodce (nyní Sírius B) 31. ledna 1862 během testování tehdy největšího refraktoru o průměru 0,47 m. Na pozorování souputníka Prokyona museli astronomové čekat od do roku 1896, 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 obíhajících 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. "Skrutá" složka způsobuje zvlnění vlastního pohybu jasnější složky (viz obrázek 1.12). Stejným způsobem by v principu bylo možné pátrat i po exoplanetách, ale tyto výchylky by byly příliš malé. Například, všechny planety Sluneční soustavy vychýlí Slunce maximálně až o dva jeho poloměry, což při pozorování z dostatečného odstupů je velmi malá výchylka.

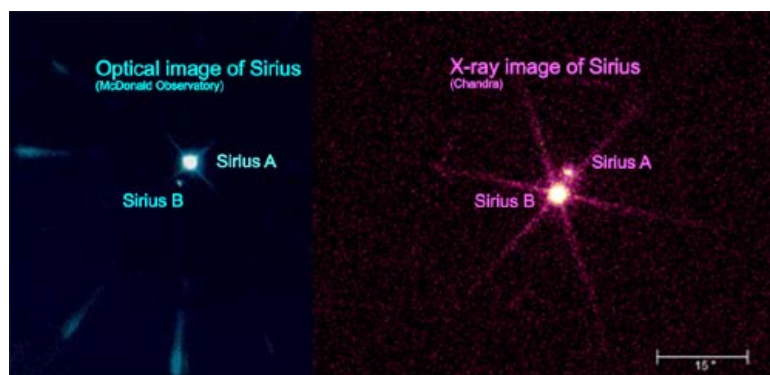
Katalog astrometrických dvojhvězd lze najít na <http://ad.usno.navy.mil/wds/> (Mason et al., 2001).

### 1.4.3 Spektroskopické dvojhvězdy

Někdy hvězdy svůj dvojhvězdný charakter prozradí změnami ve spektru. Jak dvojice hvězd obíhá kolem těžiště soustavy, jednotlivé složky se k nám střídavě přibližují a vzdalují, což se v důsledku Dopplerova jevu projeví periodickým posunem spektrálních čar k červenému a modrému konci spektra. Ideální je, pokud vidíme ve spektru čáry



Obrázek 1.12: 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>.

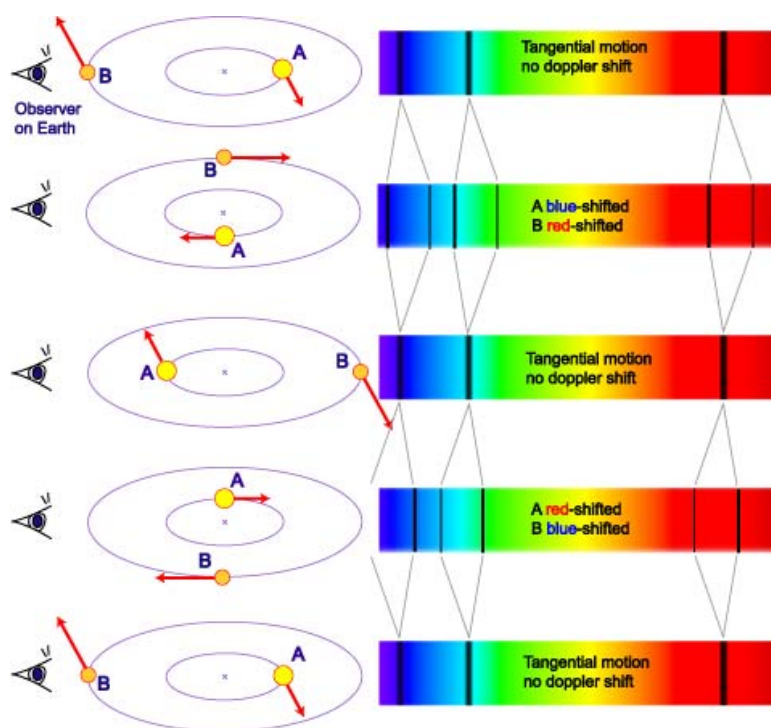


Obrázek 1.13: Zajímavé srovnání pohledů na soustavu Síria pozemským dalekohledem a přístroji rentgenovské družice Chandra. Zatímco v optické oblasti spektra je Sírius A ( $T_{\text{eff}}=10\,000\text{ K}$ ) 100 000× jasnější než Sírius B, v rentgenovské oblasti je mnohem jasnější Sírius B, protože je velmi žhavý (25 000 K) a produkuje i nízkoenergetické rentgenovské záření. Převzato z <http://outreach.atnf.csiro.au>.

obou složek a detekujeme jejich pohyb. Takovým soustavám se říká dvousložkové spektroskopické dvojhvězdy (v ang. double-lined spectroscopic binary, SB2). Často se ale stává, že slabší složka dvojhvězdy je natolik slabá, že není ve spektru detekovatelná a pozorujeme pouze pohyb jedné skupiny spektrálních čar. Takové dvojhvězdy, resp. jejich spektrum pak označujeme jako jednosložkové (single-line spectroscopic binary, SB1). Prvním, kdo si povšiml těchto periodických změn poloh čar ve spektru byl Edward Pickering. Tím vlastně v roce 1887 objevil první spektroskopickou dvojhvězdu –  $\zeta$  UMa (Mizar). Poté, co se Antonia Mauryová stala členkou tzv. Pickeringova harému (skupiny asistentek), dostala za úkol spočítat trajektorii Mizara ( $\zeta$  UMa). Mauryová nezávisle objevila druhou spektroskopickou dvojhvězdu  $\beta$  Aurigae a pro obě hvězdy poprvé spočítala trajektorii (Pickering, 1890).

#### 1.4.4 Zákrytové dvojhvězdy

Jak již bylo několikrát řečeno, jsou dvojhvězdy opravdu nenahraditelným zdrojem informací ze světa hvězd. Nejvýznamnější studnicí jsou z tohoto pohledu zákrytové dvojhvězdy, tedy soustavy, kde se nám při pohledu ze Země jejich složky při oběhu kolem



#### A Spectroscopic Binary System

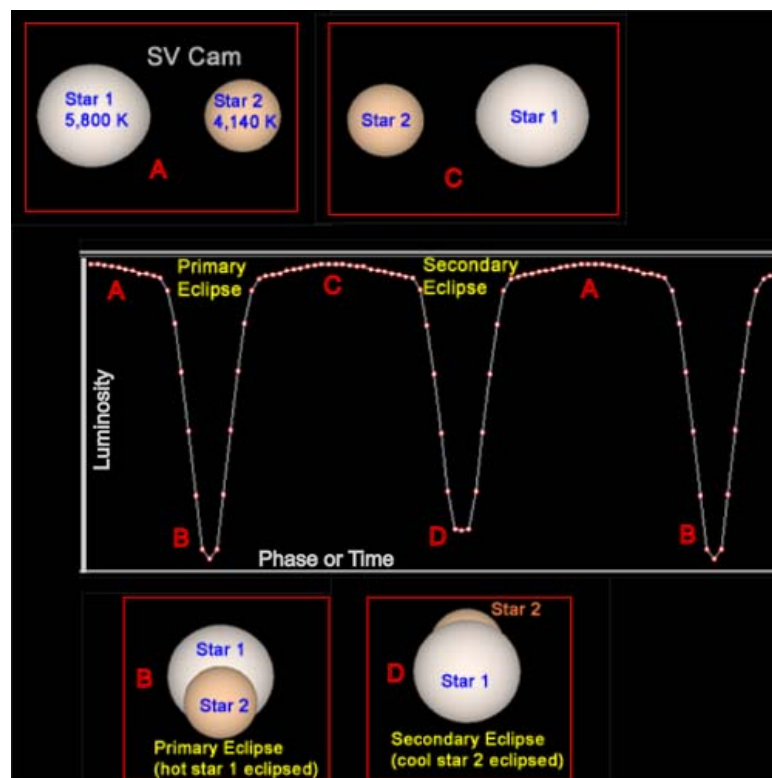
High-mass star A and lower-mass B orbit around a common centre of mass. The observed combined spectrum shows periodic splitting and shifting of spectral lines. The amount of shift is a function of the alignment of the system relative to us and the orbital speed of the stars.

Obrázek 1.14: Spektroskopická dvojhvězda. Převzato z <http://outreach.atnf.csiro.au>.

těžiště soustavy vzájemně zakrývají. Zpravidla jsou tak daleko, že složky dvojhvězdy nerozlišíme jako jednotlivé hvězdy, ale pozorujeme jen společné světlo obou hvězd.

První pozorování zákrytové dvojhvězdy (Algolu) zaznamenal roku 1667 italský astronom Geminiano Montanarimu. Nicméně se má za to, že nebyl prvním, kdo změny jasnosti Algolu pozoroval. Znalost jeho proměnnosti je často připisována arabským astronomům z přelomu 1. a 2. tisíciletí n. l. Změny  $\beta$  Persei znovu objevil John Goodricke (1764-1786) a v letech 1782-3 hvězdu systematicky pozoroval. Určil periodu změn na necelé tři dny a dokonce správně vysvětlil příčinu světelných změn. Bohužel nenašly tyto výsledky větší odezvu. Teprve v roce 1880 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 (1834-1898), 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).

Z prostého fotometrického sledování změn celkové jasnosti zákrytové soustavy můžeme určit zejména poměry hmotností, rozměrů, zářivých výkonů složek a sklon trajektorie. Pokud přidáme i výsledky spektroskopických pozorování, zejména křivku radiálních rychlostí, můžeme určit zásadní parametry jako hmotnosti a poloměry v absolutních



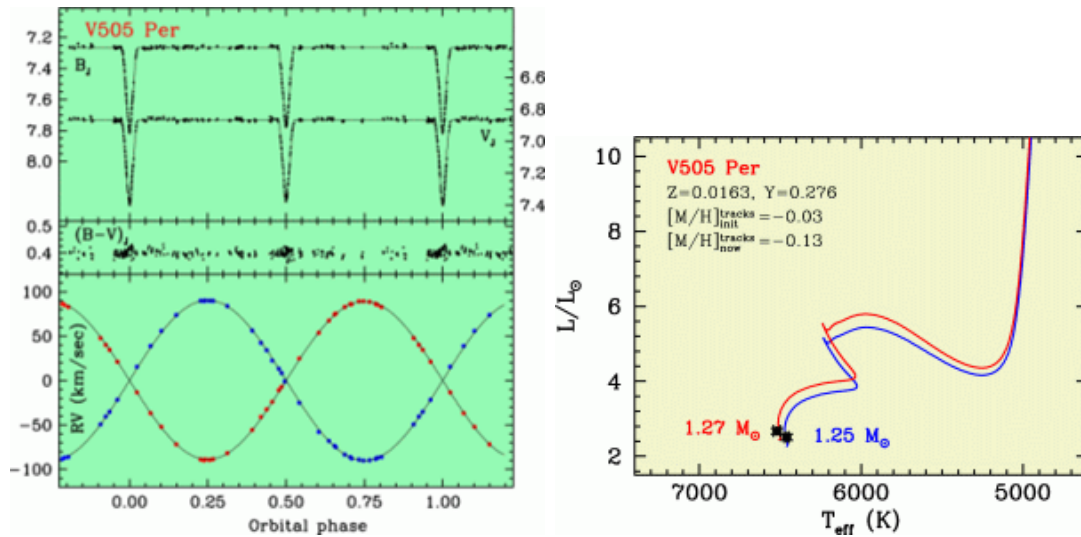
Obrázek 1.15: Počítačová simulace světelné křivky zákrytové dvojhvězdy SV Cam. Povšimněte si deformace primární složky dvojhvězdy. Převzato z <http://outreach.atnf.csiro.au>.

hodnotách, tedy přímo v kilogramech a metrech. Pro tzv. řešení světelné křivky i křivky radiálních rychlostí existuje celá řada programů (PHOEBE, Nightfall, WD, FOTEL a další), které jsou až na výjimku volně k dispozici a zájemce se může do modelování dvojhvězdných soustav hned pustit. V některých případech umožňují tyto programy použít i další typy pozorování (astrometrická, interferometrická, případně okamžiky 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.

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 světelné křivek a křivky radiální rychlosti 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





Obrázek 1.16: Světelné křivky v  $B$ ,  $V$ ,  $(B-V)$ , křivky radiálních rychlostí zákrytové dvojhvězdy V505 Persei Srovnání vývojových stop modelu BaSTI s pozorovanými parametry V505 Per. Zdroj: <http://www.pd.astro.it/oapd>.

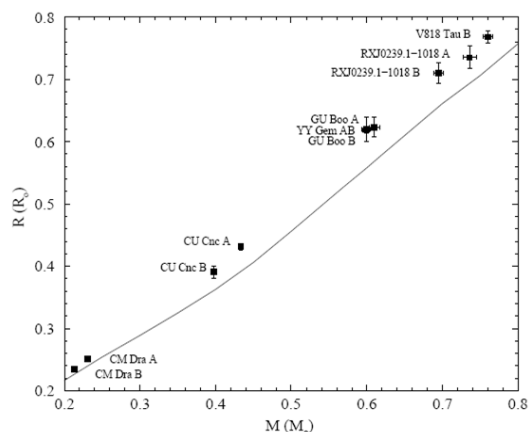
neodpovídají pozorováním. Modelové poloměry hvězd jsou podhodnocené o zhruba 10%, zatímco modelové teploty teploty jsou o přibližně 5 % nadhodnocené (viz obrázek 1.17). Graf závislosti hmotnosti na svítivosti pak ale na první pohled vypadá v pořádku. Nejčastěji zmiňovaným vysvětlením je hvězdná aktivita složek dvojhvězdy nízké hmotnosti, která velmi ztěžuje přesné určení fyzických vlastností těchto hvězd. Navíc jich bylo dosud detailně prozkoumáno jen málo, přestože řada z nich je i v dosahu menších přístrojů, jako například YY Gem, CM Dra, CU Cnc nebo GU Boo.

3. Dvojhvězdy typu W UMa - Jsou velmi snadno pozorovatelné, mají poměrně krátké periody, ale přesto jsou záhadné. Doposud se přesně neví, jak tyto dotykové nebo přesahující<sup>6</sup> soustavy vznikají a jak se dále vyvíjejí.

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:

- základní parametry složek dvojhvězdy - viz výše,
- o hvězdných atmosférách (okrajové ztemnění, gravitační zjasnění, studium atmosférických zákrytů),
- o hvězdných nitrech, struktuře a konvektivní vrstvě (over-shooting) (pomocí apsidálního pohybu, dvojhvězd s excentrickou trajektorií, modely),
- pro hvězdné magnetické dynamo a o magnetických aktivitách (z rtg., UV, optické a radiová pozorování – mapování zákrytů, hvězdné korony a chromosféry, střídavé změny periody),
- pro fyziku plazmatu (dvojhvězdy s akrečním diskem, plynné proudy),

<sup>6</sup>Přívlastky vycházejí z anglických označení "contact" a "overcontact".



Obrázek 1.17: 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).

- pro relativistickou fyziku, kosmologii (černé díry ve dvojhvězdách – potvrzení existence, získání informací o jejich hmotnostech, věku a vlastnostech; stáčení periastra)
- o vzdálenostech ve vesmíru – nezávislé určení vzdáleností - „standardní svíčky“;

## 1.5 Hvězdný diagram

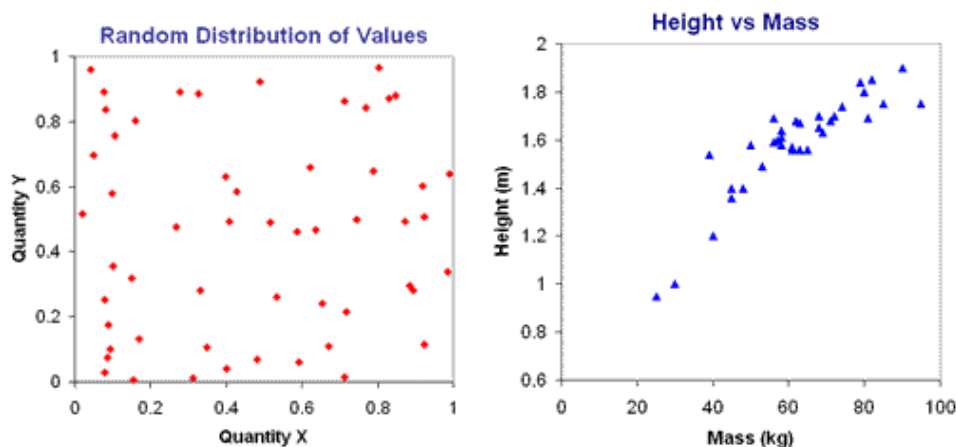
Vykreslení získaných dat do grafu, moderně řečeno - jejich vizualizace, je jedním ze základních nástrojů vědecké práce. Konec konců se říká, že jeden obrázek vydá za tisíce slov. V astronomii, kde často pracujeme s nezvykle velkými čísly a jejich relacemi to platí dvojnásob.

Začněme ale dvěma jednoduchými příklady. Mějme například dvě veličiny -  $X$  a  $Y$ , o kterých nevíme, zda je mezi nimi nějaká závislost. Po zakreslení do grafu (viz obrázek 1.18 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 1.18 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 existuje jisté fyzické limity, a tak nelze očekávat třímetrového obra s hmotností 20 kilogramů nebo malého trpaslíka, kterému váha ukazuje 350 kilogramů.

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.

### 1.5.1 Historie

Nejznámější hvězdný diagram je zpravidla spojován se dvěma jmény - Ejnar Hertzprung a Henry Norris Russell. Historie však byla, jak už to bývá, trochu složitější. Prvním,



Obrázek 1.18: Vlevo: Náhodná rozložení. Vpravo: Závislost mezi dvěma veličinami. Převzato z <http://outreach.atnf.csiro.au>.

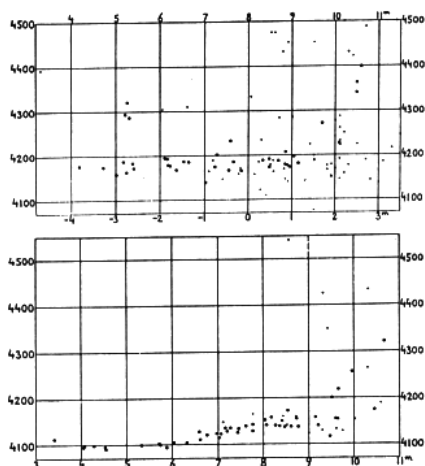
kdo se všímal odlišných vlastností hvězd na základě fotografií hvězdných polí a měření hvězdných velikostí, a jejich souvislosti se zářivým výkonem hvězd, byl C. V. L. Charlier, který se výsledky shrnul do tabulek v roce 1889. Bohužel práce Charlier (1889) nezbudila větší pozornost.

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 hvězdy.
- 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 jsou členy stejného uskupení a jsou od nás všechny přibližně stejně daleko, je možné zkoumat vztah mezi jejich pozorovanou hvězdnou velikostí a barvou. Poslal článek Karlu Schwarzschildovi a ten jej roku 1909 pozval do Göttingenu ke spolupráci. Tam také Schwarzschildovi ukázal svůj diagram. Pro Plejády a Hyády jej ale publikoval až o dva roky později (Hertzsprung,

1911). Nicméně Schwarzschildovou zásluhou, na jeho přímé doporučení, se problémem začal zabývat také Hans Rosenberg, který publikoval svůj diagram závislosti pozorované hvězdné velikosti na spektrálním typu pro hvězdy v Plejádách o rok dříve (Rosenberg, 1910) (viz obrázek 1.20). Za oceánem se podobným otázkám věnoval Henry Norris Russell a nezávisle došel ke stejným výsledkům jako Hertzsprung nebo Rosenberg<sup>7</sup>. Svůj diagram Russell poprvé prezentoval v červnu 1913 na zasedání Královské astronomické společnosti. Záznam přednášky byl publikován v Russell (1913). Malé hvězdy označuje podle Hertzsprunga "trpaslíky" a velké jako "obry". V textu Russell jasně navíc uvádí, že 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*.

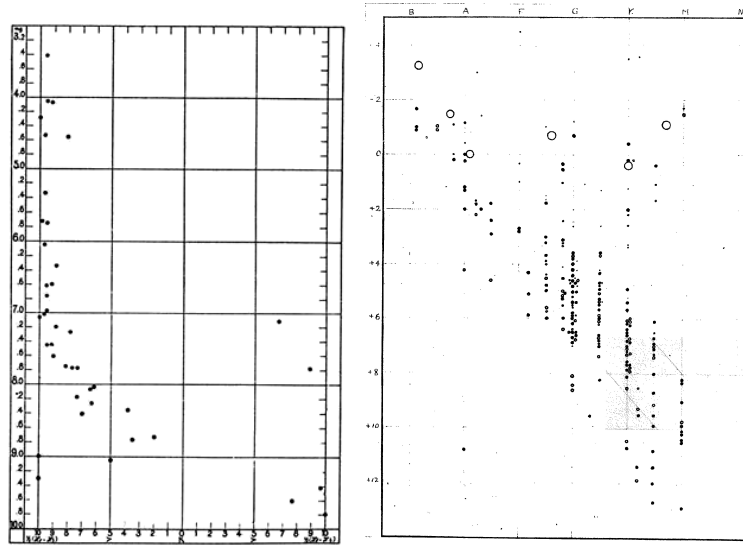


Obrázek 1.19: Podoba HR diagramu pro Plejády a Hyády v práci Hertzsprung (1911). Na vodorovné ose je pozorovaná hvězdná velikost a na ose  $y$  efektivní vlnová délka v angströmech.

## 1.5.2 Podoby HRD

Historická kapitola o vzniku HR diagramu nám ukázala mimo jiné, že první podoby diagramu byly trochu odlišné. Vědci si teprve uvědomovali vzájemné souvislosti a význam HR diagramu. Dnes je zřejmé, že HR diagram představuje nejdůležitější astrofyzikální diagram a to i přesto, že podává tak trochu klamný obraz o světě hvězd, ale o tom až za chvíli. Nyní si povšimněme různorodosti s jakou je HR diagram prezentován. Jeho podoby se liší. Začneme u os diagramu (viz obrázek 1.21). Na vodorovné ose se zpravidla setkáme s popisem pomocí spektrálních tříd, která 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 ??). Každou třídu můžeme v intencích zavedeného dělení ještě zjemnit na desetiny. Spektrální třídy poskytují informaci o teplotě místa

<sup>7</sup>Zajímavé je, že se v roce 1910 setkal se Schwarzschildem během jeho cesty po USA.



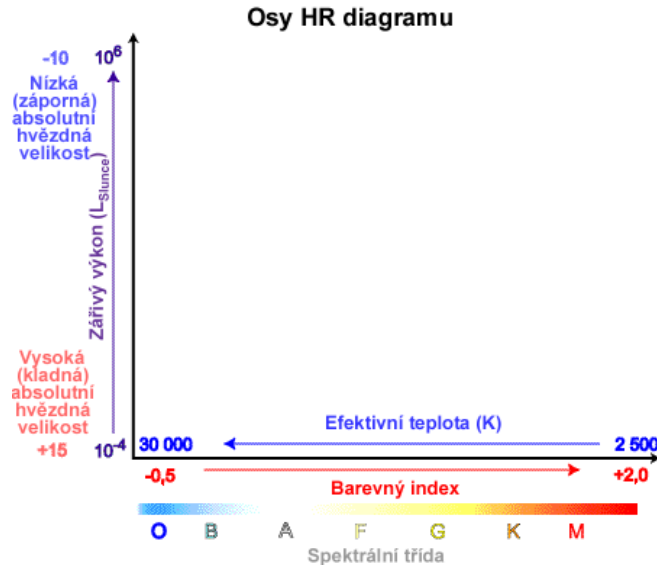
Obrázek 1.20: Vlevo: Nejstarší podoba HR diagramu pro Plejády v práci Rosenberg (1910). Na vodorovné ose jsou spektrální třídy a na ose  $y$  pozorovaná hvězdná velikost v magnitudách. Vpravo: Russellova podoba HR diagramu Russell (1914a).

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 1.21). Teplotu hvězd lze ale vyjádřit i pomocí tzv. barevného indexu, což je vlastně rozdíl naměřených hvězdných velikostí ve dvou různých částech spektra. A hodnota barevného indexu už se chová dle očekávání a směrem zleva doprava roste. Na osu  $y$  zpravidla vynášíme zářivý výkon hvězdy  $L$  vyjádřený buď v absolutní jednotkách (ve wattech) nebo v jednotkách zářivého výkonu nominálního Slunce  $L_{\odot}$ . V obou případech hodnoty směrem vzhůru rostou. Ekvivalentním vyjádřením zářivého výkonu je ale absolutní hvězdná velikost v magnitudách. Čím má potom hvězda větší zářivý výkon, tím je číselná hodnota hvězdné velikosti menší a hodnoty na ose tak směrem vzhůru klesají (viz obrázek 1.21). Absolutní hvězdná velikost poměřuje hvězdy v nominální vzdálenosti deseti parseků, ale v principu je může být jakákoli vzdálenost. Jen musíme zaručit, že pro všechny zakreslované objekty bude stejná. Takový předpoklad je splněn v případě hvězdokup. Jejich rozměry jsou zpravidla vzhledem k jejich vzdálenosti od nás zanedbatelné. Pak můžeme na svislou osu dokonce vynášet pozorované hvězdné velikosti, ale i zde bude směrem vzhůru číselná hodnota klesat. Variantě HR diagramu, kde jsou vynášeny na ose vodorovné barevné indexy a na ose svislé pozorované hvězdné velikosti, říkáme *barevný diagram*.

HR diagram má tedy rozmanité podoby, možnosti zápisu veličin, ale všechny tyto varianty mají jedno společné - vyjadřují závislost zářivého výkonu hvězd na jejich povrchové teplotě. Hvězdy se v HR diagramu seskupují na několika místech, naopak některé části HR diagramu doslova zejí prázdnotou. Podíváme-li se na HR diagram (obrázek 1.22) najdeme v něm zejména čtyři seskupení hvězd:

**hlavní posloupnost** - soustřeďuje přes 90 % hvězd v pásu, který probíhá od horkých a zářivých hvězd k chladným hvězdám s malým výkonem

**obří (červení obří) a veleobří** - obří hvězdy s vysokými zářivými výkony a většinou



Obrázek 1.21: Různé podoby os HR diagramu. Převzato z <http://outreach.atnf.csiro.au> a upraveno

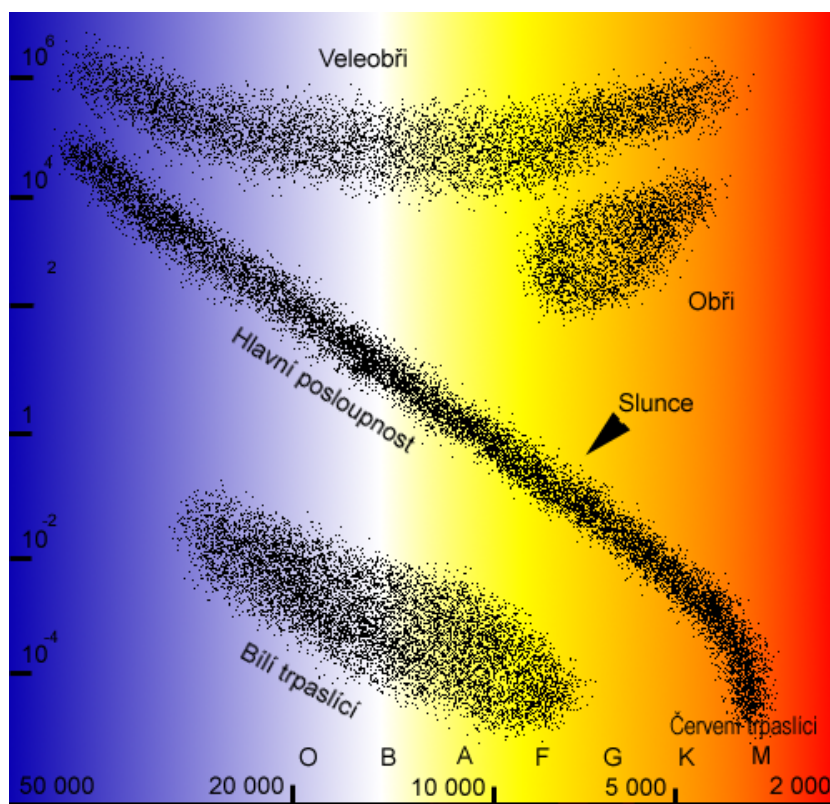
relativně nízkými povrchovými teplotami,

**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

Potíž s HR diagramem je ale v tom, že nám ukazuje obraz světa hvězd značně zkreslený. Stačí si jej vykreslit pro nejjasnější hvězdy naší hvězdné oblohy a pak pro hvězdy k Slunci nejbližší. Rázem dostanete dvě odlišné podoby HR diagramu (viz obrázek 1.26). 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 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.

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 1.24). Tato klasifikace zjemňuje spektrální typologii hvězd. Označení jednotlivých tříd (viz tabulka 1.1) se přidává za spektrální typ, případně podtyp v podobě římské číslice a případně ještě písmena, například K2III, G2V. Takové rozdělení ale není samoúčelné. Určuje se podle profilu spektrálních čar ionizovaných prvků, citlivých na tlak v atmosféře hvězdy, takže zatímco spektrální typ přináší informaci o povrchové teplotě hvězdy, luminositní třída poukazuje na tlaku v atmosféře hvězdy. Dohromady pak spektrální typ a luminositní třída poskytují rámcovou informaci o velikosti hvězdy.



Obrázek 1.22: HR diagram. Zdroj: wikipedia. Upraveno.

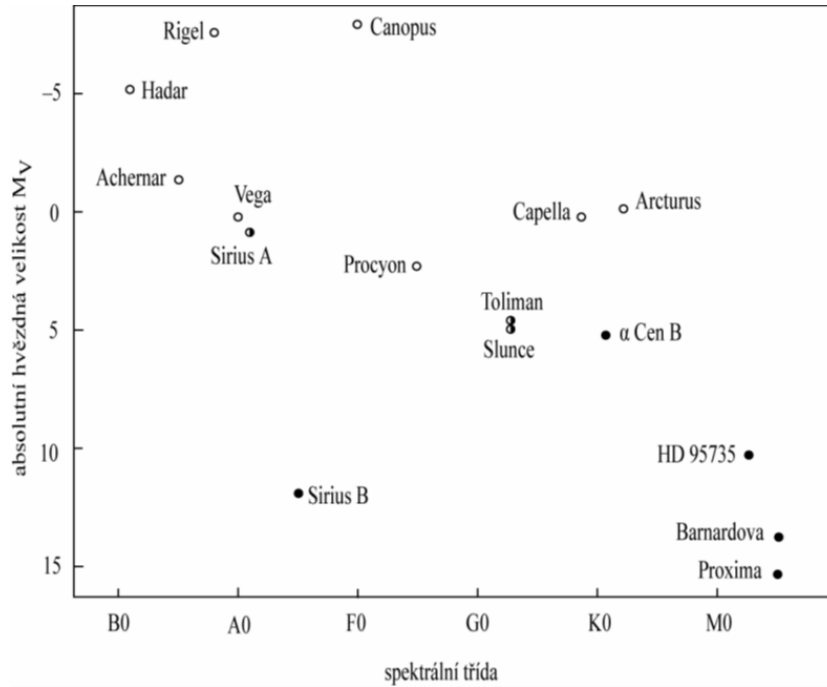
## HRD = nejdůležitější astrofyzikální diagram

Příklady užití HRD:

- odhad vzdálenosti hvězdy – z pozorované hvězdné velikosti a spektra (spektr. třídy a typu (umístění v HRD – hlavní posloupnost, obří, trpaslíci...)); z HRD odečtená absolutní hvězdná velikost a pozorovaná hvězdná velikost => vzdálenost
- výzkum hvězdokup – např. určení vzdálenosti hvězdokupy od Země; srovnává se pozorovaná hv. velikost hvězd s absolutní pro hvězdy známé vzdálenosti (nebo modelové hvězdy), pozorovaná skupina – > vertikální posun v HRD dokud hl.posloupnosti nesplynou → velikost posunu = modul vzdálenosti => přímé určení vzdálenosti (fitování hlavní posloupnosti; spektroskopická paralaxa)
- test platnosti teorií stavby a vývoje hvězd

Stopy hvězdného vývoje v HRD

[http://sunshine.chpc.utah.edu/labs/star\\_life/support/HR\\_animated.swf](http://sunshine.chpc.utah.edu/labs/star_life/support/HR_animated.swf)  
<http://www.astro.ubc.ca/~scharein/a311/Sim/hr/HRdiagram.html>  
<http://leo.astronomy.cz/sclock/sclock.html>



Obrázek 1.23: Hertzsprungův-Russellův diagram pro nejjasnější hvězdy (prázdné kotoučky) a nejbližší hvězdy (plné kotoučky).

Tabulka 1.1: Luminositní třídy klasifikace, kterou zavedli Morgan, Keenan & Kellman (1943); Morgan & Keenan (1973). V dnešní době se většinou k původním třídám I až VII přidává ještě další dosud neoznačená, která zahrnuje hnědé trpaslíky a malé červené trpaslíky.

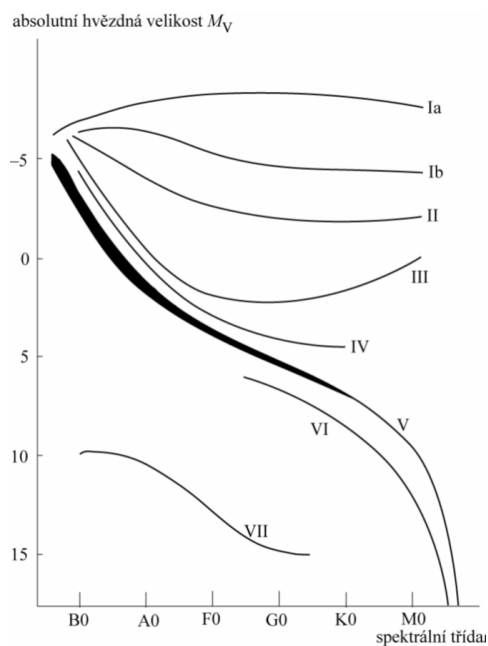
Lum. třída	Hvězda	Příklad
0	extrémně zářiví veleobři (hyperobři)	$\eta$ Carinae
Ia	jasní veleobři	Betelgeuze
Ib	(normální) veleobři	Antares
II	jasní obři (někdy označení jako nadobři)	Canopus
III	(normální) obři	Aldebaran
IV	podobři	Procyon
V	hvězdy hlavní posloupnosti (a červení trpaslíci)	Slunce
VI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

Testy hvězdné struktury a vývoje

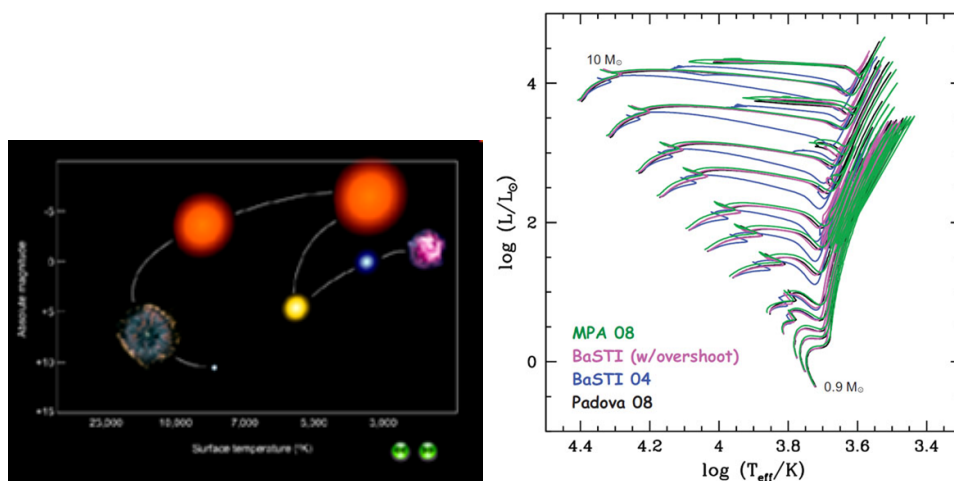
Osamocené hvězdy => oddělené dvojhvězdy:

- velmi hmotné hvězdy





Obrázek 1.24: Luminozitivní třídy - Morganova-Keenanova (MK) klasifikace



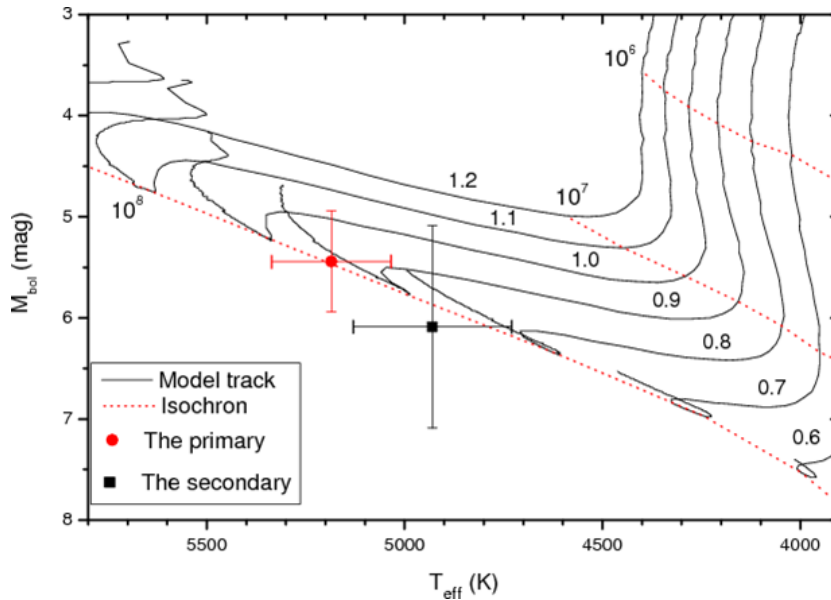
Obrázek 1.25: Vývojové cesty hvězd v HR diagramu.

- hvězdy s nízkou hmotností
- planetární systémy, exoplanety

Dvojhvězdy a vícenásobné hvězdné soustavy

### 1.5.3 Barevný diagram

= obdoba (náhražka HRD) pro hvězdy cca stejně daleko (hvězdokupy, galaxie)



Obrázek 1.26: Vývojové cesty hvězd v HR diagramu pro složky dvojhvězdy HD 146875: a newly identified ZAMS active double-lined spectroscopic binary, A&A 500, Number 3, June IV 2009, H. J. Wang<sup>1, 2</sup>, J. Y. Wei<sup>1</sup>, J. R. Shi<sup>1</sup>, and J. K. Zhao<sup>1</sup>

- místo spektrální třídy barevný index,
- místo absolutní hvězdné velikosti pozorovaná hvězdná velikost,

Důvod

- nelze pořádit spektra hvězd s rozlišením pro spektrální klasifikaci
- měření barevného indexu (míry povrchové teploty hvězd) z fotometrie

využití – určení vzdálenosti hvězdokup; stáří hvězdokupy

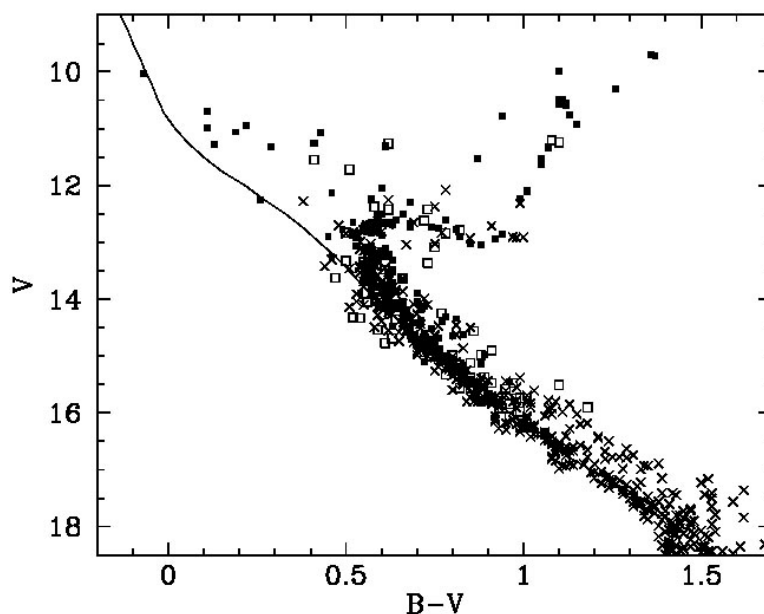
postup

- sestrojíme barevný diagram pro hvězdokupy se známou vzdáleností => na svislé ose přímo absolutní hvězdné velikosti
- sestrojíme ve stejném měřítku „normální“ barevný diagram s pozorovanými hvězdnými velikostmi na svislé ose pro jinou hvězdokupu
- ztotožníme-li hlavní posloupnosti hvězdokup => rozdíl stupnic pozorovaných a absolutních hvězdných velikostí hvězdokup (posun ve svislém směru) = modul vzdálenosti druhé hvězdokupy => její vzdálenost

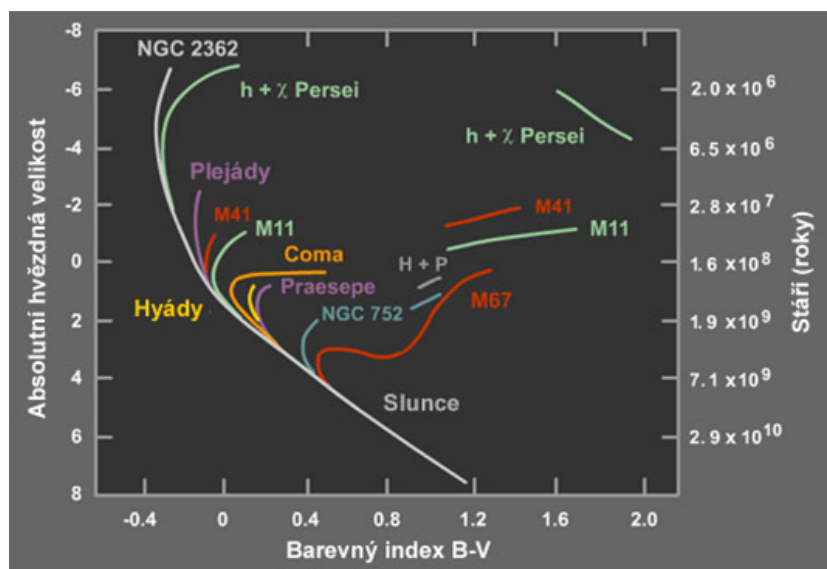
..

## Doplňující literatura

Argelander F. W. A., 1844, "Aufforderung an Freunde der Astronomie", Schumacher's Jahrbuch 1844, 123-254



Obrázek 1.27: Barevný diagram otevřené hvězdokupy M67 (NGC 2682).



Obrázek 1.28: HRD pro různé otevřené hvězdokupy.

Bessell, F. 1844, MNRAS 6, 136

Csizmadia, S., Borkovits, T., Paragi, Z., et al. 2009, ApJ 705, 436

Harmanec P., Horn J., Juza K. 1994, Astron. Astrophys. Suppl. **104**, 121

Hearnshaw, J. B. 1996, Cambridge University Press

Herschel, W. 1802, Royal Society of London Philosophical Transactions Series I, 92, 477

Hertzsprung, E. 1905, Zeitschrift für Wissenschaftliche Photographie, Photophysik und Photochemie, (článek "Zur Strahlung der Sterne"), Vol. 3, No. 2, 429-442

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

## Shrnutí

## 2 Hvězdy zblízka

### 2.1 Svítící koule

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

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

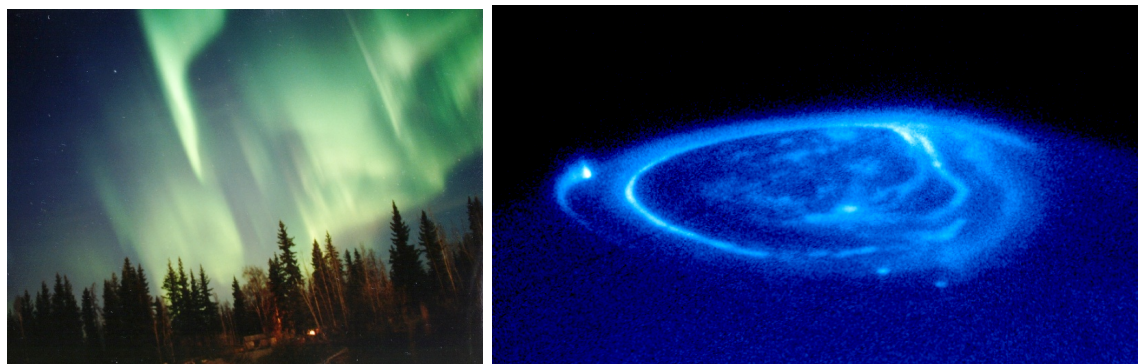
Nám nejbližší hvězdou je Slunce, které se také stará o to, abychom ve dne žádnou jinou hvězdu na obloze neviděli. Teprve v noci můžeme pozorovat ostatní hvězdy. Ale všechny pozorovatelné pouhýma očima patří mezi hvězdy naší Galaxie.

Nejstarší generace řeckých filozofů, například Anaximandros z Miletu, (okolo 610 př. n. l. – okolo 546 př. n. l.) považovali hvězdy za útvary stlačeného vzduchu vyplněného ohněm. Motiv centrálního ohně se pak objevuje po řadu století, i když například Anaxagoras z Klazomen (asi 500 - 428 před n. l.) považoval Slunce za rozžhavenou kamennou kouli. Ještě na konci 18. století anglický filozof Thomas Wright z Durhamu, že hvězdy jsou obří vulkány soptící v temnotách. V té době už ale vznikaly první fyzikální představy o vzniku Slunce a planet. Na počátku 19. století začali astronomové měřit vzdálenosti hvězd, přemýšleli o zdroji energie uvnitř hvězd. Hvězdy byly stále více chápány jako fyzická tělesa, která je třeba měřit a studovat. Konečně v polovině 19. století dostali astronomové do rukou i nástroj, jak zkoumat hvězdy na dálku – spektroskopii. Bylo odhalováno složení povrchových vrstev hvězd, zkoumány rychlosti jejich pohybu vůči Zemi, ale teprve v roce 1925 přišla Cecilia Payne-Gaposhkinová 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 základní jaderné procesy v nitru hvězd. Poznávání hvězd samozřejmě pokračovalo a pokračuje neustále, ale základy byly položeny.

Můžeme tedy konstatovat, že hvězdy objekty zpravidla kulového tvaru<sup>1</sup> o hmotnostech přibližně  $0,03 M_{\odot}$  až řádově  $100 M_{\odot}$ . Jsou tvořeny plazmatem<sup>2</sup>, ionizovaným plynem složeným z iontů, elektronů (a případně neutrálních částic, atomů a molekul), který je kvazineutrální a navíc vykazuje kolektivní chování. V plazmatu se nachází

<sup>1</sup>Nekulový tvar hvězd můžeme najít u složek těsných dvojhvězd a v případě velmi rychle rotujících hvězd.

<sup>2</sup>Slovo plazma pochází z řečtiny, znamená "dávající tvar" nebo "dávající formu". V biologickém významu jej pro označení tekutiny vzniklé po odstranění všech částic z krve v polovině 19. století použil Jan Evangelista Purkyně (1787–1869). Pak se skloňuje podle rodu ženského. Ve fyzikálním významu použil termín plazma poprvé Irving Langmuir (1881–1957) v roce 1922. Jde o formu látky, o plazmatu se mluví často jako o čtvrtém skupenství hmoty. V tomto případě se používá v češtině rodu středního.



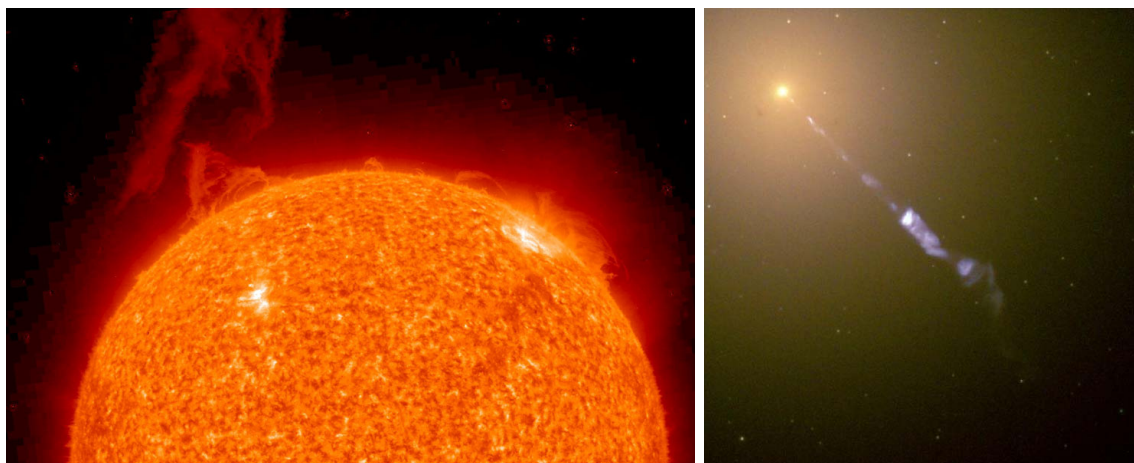
Obrázek 2.1: Vlevo: Polární záře z okolí Fairbanks. Foto: Jan Curtis <http://www.geo.mtu.edu/weather/aurora/images/aurora/jan.curtis/index.html>. Vpravo: Polární záře na Jupiteru z kosmického dalekohledu Hubble Space Telescope v ultrafialovém světle. Bližší popis <http://apod.gsfc.nasa.gov/apod/ap001219.html> Foto: John T. Clarke (U. Michigan), ESA, NASA

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

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

## 2.2 Modely hvězd

Hvězd ve vesmíru je obrovské množství. Jen v naší Galaxii jich najdeme asi 100 miliard. Jak už jsme prozradili v minulé kapitole, jde o velmi rozmanitý svět. Pohádkové označení trpaslíků a obrů je zde zcela na místě. Nejmenší hvězdy mají v průměru zhruba 10 kilometrů, ale ty největší nabobtnají až do rozměrů řádově tisíckrát větších než je naše Slunce (tedy až 1,5 miliardy kilometrů). O rozmezí hmotností jsme už mluvili. Je vůbec za těchto podmínek možné jednotným způsobem popsat, co se děje v nitru všech hvězd, vytvořit nějaký konzistentní model hvězdy? Odpověď na takovou otázku je velmi složitá, samozřejmě popsat komplexně děje v nitru všech hvězd není docela dobře možné, jinak jsou zařízeny útroby trpaslíka, jinak obra či normální hvězdy. Ve většině případů se

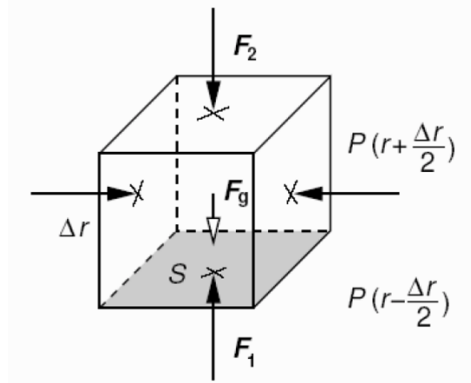


Obrázek 2.2: Vlevo: Sluneční protuberance 26.–27. září 2009. Foto: STEREO Project, NASA. Vpravo: Radiová galaxie M 87 ve viditelném světle a relativistický výtrysk plazmatu. Foto: Hubble Space Telescope (HST)

bere jako etalon naše Slunce, které je sice mírně nadprůměrnou hvězdou, ale na druhou stranu nejlépe prostudovanou hvězdou.

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

Modelové výpočty pro hvězdy jsou založeny na rovnicích hvězdné stavby, což jsou stavová rovnice, zákon zachování hmoty, rovnice hydrostatické rovnováhy, rovnice tepelné rovnováhy a rovnice přenosu energie. Řešením této soustavy rovnic se budeme zabývat v následujících kurzech, tady se blíže podívejme jen na to, co vlastně udržuje hvězdy takové, jaké jsou. Jinak řečeno zkusme na následujících řádcích odpovědět na otázku: „Proč se hvězdy nezhroutí?“. Z našich představ (samozřejmě podpořených modelovými výpočty) vyplývá, že u hvězd se látka směrem ke středu silně koncentruje. To znamená, že můžeme hvězdy považovat za „hmotné body“. Zejména to platí u obrů



Obrázek 2.3: Objemový element. Převzato z Mikulášek & Krtička (2005).

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

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

$$F_g = mg(r) = \rho(r) S \Delta r g(r) = -\rho(r) S \Delta r g(r) \frac{r}{r}. \quad (2.1)$$

V posledním kroku úpravy se objevilo znaménko minus, protože gravitační síla je opačně orientovaná než polohový vektor  $\mathbf{r}$ . Proti gravitační síle působí vztlaková síla  $\mathbf{F}_t$ , která je výslednicí tlakových sil působících na dolní a horní podstavu kvádrů

$$F_t = F_1 + F_2 = S \left[ P \left( r - \frac{\Delta r}{2} \right) - P \left( r + \frac{\Delta r}{2} \right) \right] \frac{r}{r} \cong S \left[ P(r) - \frac{dP}{dr} \frac{\Delta r}{2} - P(r) - \frac{dP}{dr} \frac{\Delta r}{2} \right] \frac{r}{r}. \quad (2.2)$$



Po úpravách

$$F_t = -S \frac{dP}{dr} \Delta r \frac{r}{r}. \quad (2.3)$$

Aby byl zvolený objemový element v klidu, musí být výslednice sil, které na něj působí nulová  $F_t + F_g = 0$ , takže

$$F_t + F_g = \left( -\frac{dP}{dr} - \rho(r) g(r) \right) S \Delta r \frac{r}{r} = 0. \quad (2.4)$$

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

$$\frac{dP}{dr} = -\rho(r) g(r). \quad (2.5)$$

Výsledný vztah platí zcela obecně, tedy pro libovolná statická tělesa nacházející se v obecném gravitačním poli. S dalšími rovnicemi hvězdné stavby se seznámíte v navazujících kurzech. V každém případě ale představují tyto matematické vztahy a vlastně celé modelování podobně účinný nástroj jako astronomů jako dalekohled.

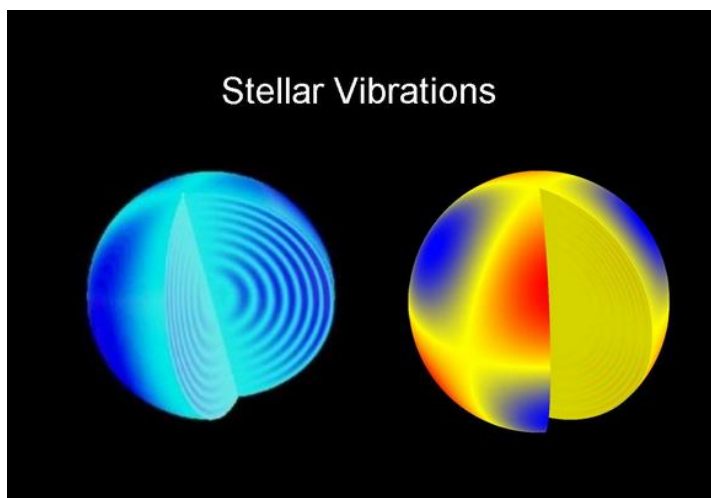
## 2.3 Anatomie hvězdy

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.

### 2.3.1 Nitro hvězdy

Hvězdným nitrem budeme rozumět části hvězdy, které nikdy nemůžeme přímo pozorovat. V roce 1926 Arthur Eddington v publikaci „The Internal Constitution of the Stars“ napsal: „Už na první pohled se zdá, že vnitřek Slunce a hvězd je méně dostupný vědeckému zkoumání než jakákoli jiná oblast vesmíru. Naše dalekohledy mohou zkoumat vzdálenější a vzdálenější hlubiny vesmíru, ale jak lze vůbec získat nějakou povědomost o tom co je skryto pod tak důkladnými překážkami? Jaký přístroj je schopen proniknout svrchními vrstvami hvězdy a zjistit jaké podmínky panují uvnitř?“<sup>3</sup> Je pravda, že nitra Slunce k nám nepronikne jediný foton. Hmotou hvězdy projdou jen těžko polapitelná neutrina. Nicméně kromě nich a už představeného modelování máme pro studium hvězd ještě přinejmenším jeden nástroj a tím je helioseismologie. Vnitřek Slunce a hvězd můžeme alespoň částečně "vidět" pomocí zvukových vln. Ty proniknou hmotou hvězdy a tak díky nim můžeme zkoumat vnitřní strukturu a dynamiku Slunce. Poprvé zaznamenali zvukové kmity Slunce s charakteristickou periodou 5 minut Leighton et al.

<sup>3</sup>Převzato z kongresových novin Valného shromáždění IAU v Praze 2006 Nuncius Sidereus III. Překlad Michal Varady.

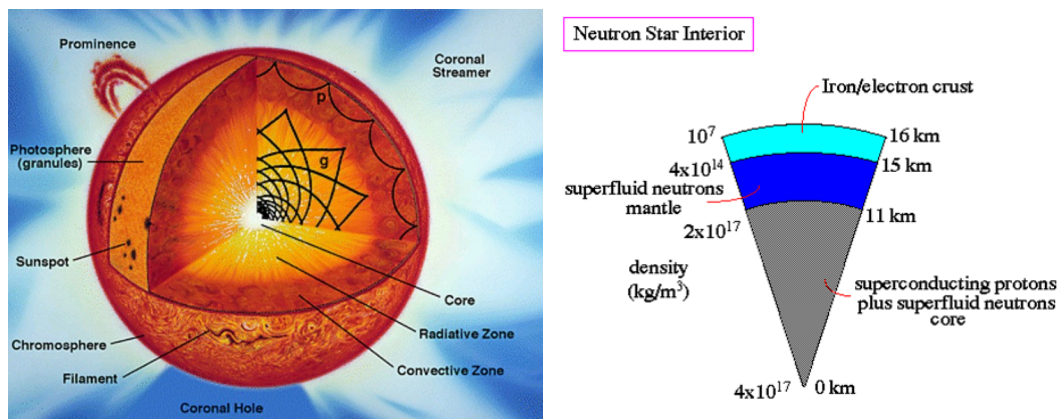


Obrázek 2.4: Změny jasnosti hvězd je možné interpretovat jako vibrace nebo oscilace v jejich nitru užitím techniky zvané asteroseismologie. Oscilace odhalují informace o vnitřní struktuře hvězd, víceméně stejným způsobem jako seismologové používají zemětřesení k poznávání nitra Země. Zdroj: Astroseismologický tým družice Kepler

(1962). Později se ukázalo, že frekvence pozorovaných oscilací závisí na různých vlastnostech slunečního nitra, na rychlosti zvuku, hustotě materiálu, úhlové rychlosti rotace a dalších. Se stále se zpřesňujícími přístroji pro pozorování hvězd zejména na družicích jako KEPLER, Corot, můžeme nyní tyto drobné oscilace registrovat nejen u Slunce, ale i u dalších hvězd. Obor studia má také širší název asteroseismologie.

Současné výsledky modelových výpočtů a našich pozorování ukazují, že hvězdné nitro vypadá rozdílně pro různé typy hvězd. Na obrázku 3.3 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 je nalezneme ve středu každé hvězdy jádro. Pro většinu hvězd, se právě v něm vyrábí energie, která je posléze vyzářena hvězdným povrchem. Teplota v jádru hvězdy dosahuje milionů až miliard kelvinů, což znamená, že je vodík a helium jsou zcela ionizovány, a u těžších prvků je ionizace velmi silná. Spolu s vysokou hustotou (řádově  $10^4$  až  $10^9$   $\text{kg}/\text{m}^3$ ) to vede k tomu, že dochází k častým srážkám částic a hvězdná látka se pak chová jako ideální plyn. V některých fázích hvězdného vývoje se hustota látky ještě zvětší, elektronové skořápky atomů jsou narušeny, částice spolu začnou interagovat i v době mezi vzájemnými srážkami a začnou se uplatňovat efekty kvantové fyziky, látka degeneruje<sup>4</sup>. Nejvýznamnější interakcí se stanou kvantově mechanické efekty působící mezi nejllehčími fermiony – volnými elektrony. Uplatňuje se Pauliho vylučovací princip, který dvěma různými fermionům v soustavě zakazuje zaujmout stejný kvantový stav. Taková látka svými mechanickými, tepelnými a elektrickými vlastnostmi připomíná pozemské kovy, má vysokou hustotu, je obtížně stlačitelná, a je to dokonalý vodič elektřiny a tepla. Označujeme ji jako *elektronově degenerovaný plyn*. Setkáme se s ním celkem běžně v jádrech hvězd, která mají už svá nejlepší léta na hlavní posloupnosti za sebou, v nitrech

<sup>4</sup>Latinsky *degenerare* znamená upadat, zvrtnout se, pozbývat dobrých vlastností.



Obrázek 2.5: Vlevo: Nitro hvězdy hlavní posloupnosti. Vpravo: Nitro neutronové hvězdy

trpaslíků, bílých, červených i hnědých trpaslíků a ve svrchních vrstvách neutronových hvězd.<sup>5</sup>

### 2.3.2 Atmosféra hvězdy

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

Obecně rozlišujeme v atmosférách hvězd tři vrstvy. Nejnižší je uložena **fotosféra**, v níž vznikají fotony, které pozorujeme. Tam vzniká optické spektrum hvězdy a tam pokládáme povrch hvězdy. Fotosféry různých typů hvězd mají různou tloušťku i různou teplotu. Zatímco naše Slunce má fotosféru 135-200 km silnou, u obrů a veleobrů dosahuje až řádově 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

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

3000 kelvinů na zhruba 200 km. Důkazem takového průběhu teploty je i pozorované okrajové ztemnění disku hvězd. Celá fotosféra hvězdy je ve stavu energetické rovnováhy. V ustáleném stavu musí projít touto vrstvou v každém okamžiku právě tolik tepla, kolik ho uvnitř koule pod fotosférou vznikne.

Fotosféra přechází v chromosféru, která je několikrát silnější. Teplotní spád se zde otáčí a teplota se vzrůstající vzdáleností od povrchu mírně roste. U Slunce jde o nárůst zhruba 20 000 kelvinů na 2000 km tloušťky vrstvy. Z toho ale vyplývá, že zde vznikají zejména emisní čáry spektra, zejména nejsilnějších Fraunhoferových čar (u hvězd spektrální třídy M).

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

## 2.4 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." Ted' už je zcela na místě zabývat se otázkou, co vlastně zahřívá hvězdy a zejména jejich nitro. Zdroj energie musí být tak vydatný, že hvězdu nejen vyhřeje na vysokou teplotu, ale tuto teplotu také udržuje po poměrnou dlouhou dobu navzdory tomu, že fotosférou odchází z hvězdy obrovské množství energie. Kdyby fotosféra nebyla tajně "sponzorována" zevnitř hvězdy, brzy by se na ní výdej energie projevil, ale nic takového u hvězd nepozorujeme. Takže skrytý dárce energie musí být dost "bohatý".

V minulosti byla předložena řada teorií vysvětlující zdroj energie hvězd. V antice se například Anaximandros domníval, že naše Slunce je dobřela rozhavený železný kotouč. To ale odpovídalo jen na otázku, co Slunce je, ale ne, kde vzalo svou energii. Až v polovině 19. století navrhli nezávisle přírodovědec Helmholtz (1854) s astronomem J. Herschelem jako zdroj energie hvězd chemické hoření. Astronom amatér J. Mayer (1846) se domníval, že Slunce je dotováno dopady meteoritů. A objevila se i hypotéza, že spotřeba energie hvězd je kryta jejich smršťováním, tedy na úkor potenciální energie. S touto myšlenkou přišli Helmholtz s lordem Kelvinem. Dá se velmi rychle ukázat, že bohužel ani jedna z představ není správná. Žádná z nich neposkytuje dostatek energie po dostatečně dlouhou dobu. Posledně uvedené teorii gravitačního smršťování ale alespoň částečně můžeme omilostnit, protože v určitých fázích vývoje hvězdy se o přísun energie skutečně stará. Pátrání po zdroji energie tedy pokračovalo. Na počátku 20. století se objevil názor, že ve hvězdách dochází k rozpadu uranu  $^{235}\text{U}$ . Jenže v roce 1925 Paynová-Gaposhkinová 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-

Gaposhkinová 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 nejllehčích, tedy zejména vodíku. Jenže až Paynová-Gaposhkinová prokázala, že jaderného paliva – vodíku je ve hvězdách dostatek. Ve 30. letech minulého století už byla hypotéza jaderné syntézy v jádru hvězd všeobecně akceptována. Jak ale takový proces u hvězd jako Slunce a hmotnějších funguje popsali v letech 1937-9 Hans Bethe a Carl von Weizsäcker. K reakcím dochází jen v místě s opravdu vysokou teplotou, tedy v bezprostředním okolí středu hvězdy, v samém jádru. Pro Slunce tvoří oblast jaderného hoření jen zhruba jedno procento objemu.

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

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

Dobrá, jak vypadají reakce v nitru hvězd snad víme. V čem je tedy problém? Proč není možné tyto reakce prostě napodobit? Odpověď je ale zřejmá. Podmínkou pro průběh jaderné syntézy je vysoká teplota a velký tlak, to znamená, že jádra prvků se pohybují velkými rychlostmi a protože je jich tam velké množství, prudce do sebe narážejí. Vysoká kinetická energie částic je nezbytná pro překonání elektrostatických sil, které jádra odpuzují. A vytvoření takových podmínek po delší dobu v nějakém zařízení na Zemi představuje opravdu problém. Zatím se daří na srovnatelné rychlosti urychlit jednotlivé částice nebo svazky částic, ale nikoli uzavřít tak horké plazma v malém objemu na dobu delší než zlomky sekundy. Pokud bychom i podobných jaderných 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, který bude obsahovat nejvýkonnější laser světa ELI (Extreme Light Infrastructure) v Říčanech u Prahy.<sup>6</sup> Výsledky ELI se budou doplňovat s výsledky výzkumného laserového zařízení projektu HiPER (High Power Energy Research Facility) ve Velké Británii. Oba projekty mají zkoumat zcela novou technologii, která by měla být v budoucnu použita pro výrobu elektrické energie, tzv. termojadernou fúzi zažehovanou lasery. Laserové pulsy při tom stlačí palivo (deuterium a tritium) na extrémní hustotu a laser je pak ohřeje až na teplotu fúze zhruba 100 miliónů kelvinů. Jenže takové podmínky vydrží zatím jen po několik tisíc nanosekund.

## 2.5 Jaderné reakce v nitru hvězd

Jaderné hoření v samém srdci hvězdy má spíše charakter doutnání, jak jsme již uvedli. Navíc, kdybychom vzali, že například Slunce jako celek o hmotnosti  $2 \cdot 10^{30}$  kg produkuje zářivý výkon  $4 \cdot 10^{26}$  W, snadno zjistíme, že na jeden kilogram sluneční hmoty připadá výkon jen 0.0002 W! Přitom spálením jednoho kilogramu dřeva lze uvolnit přes 10 MJ energie. Teoreticky bychom tedy reakce v nitru Slunce mohli nahradit spalováním dostatečného množství nějakých věcí. Jenže tak jednoduché to zase není. Je tu ale přece jen zásadní rozdíl. Hvězdy umí své palivo spalovat po miliardy let! Každý kilogram Slunce tak vyprodukuje za dobu existence naší mateřské hvězdy odhadem 60 terajoulů energie. Zatím známe jen jediný proces, který je schopen produkovat energii tím nepřiliš výkonným a pomalým, ale stabilním a dlouhodobým způsobem. V nitru hvězd tak zřejmě probíhá jaderná fúze.

### 2.5.1 Proton-protonový řetězec (p-p řetězec)

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

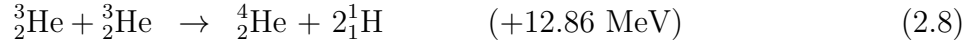
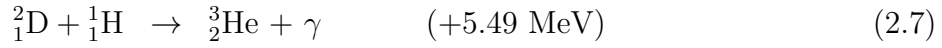
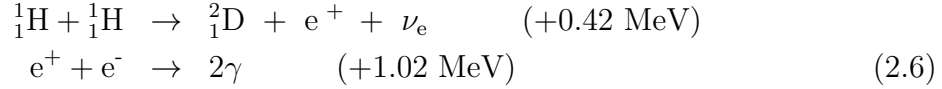
Pro hvězdy s hmotností do přibližně  $1.3 M_{\odot}$  až  $1.7 M_{\odot}$ <sup>7</sup> probíhá jaderná fúze v jejich nitru v podobě proton-protonové řetězce<sup>8</sup>, kdy se 4 protony (jádra vodíku) sloučí na

<sup>6</sup>Projekt ELI má být spuštěn v roce 2014. Detaily na <http://www.eli-beams.eu/cs/>.

<sup>7</sup>Neurčitost vyplývá z odlišných výpočtu modelů popisujících nitro hvězd.

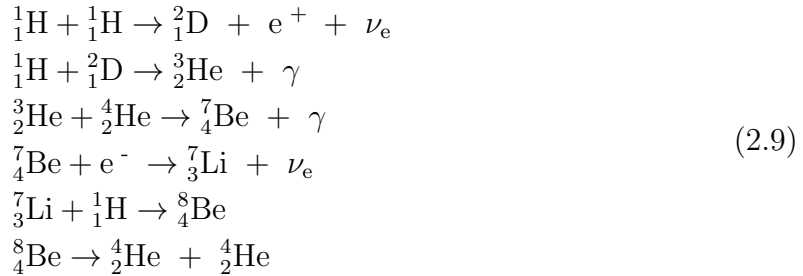
<sup>8</sup>Poprvé se myšlenka jaderné syntézy v nejjednodušší podobě objevila v pracích Eddingtona (1920, 1926). Jeho odpůrci namítali, že hvězdy nejsou dost horké na to, aby částice překonaly Coulombovské bariéry a mohlo k syntéze dojít. Teprve po rozvinutí kvantové fyziky se ukázalo, že díky tunelovému jevu je podobná námitka neopodstatněná. Přesný průběh reakcí popsali Atkinson s Houtermansem

2 protony a 2 neutrony a vytvoří jedno jádro hélia a uvolní přitom energii v podobě fotonu, pozitronu a neutrína. Reakce ale probíhá ve třech krocích:



Pozitron vzešlý z první reakce ale okamžitě anihiluje s elektronem (viz 2.6) 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 možností jak z izotopu hélia  ${}^3\text{He}$  získat hélium  ${}^4\text{He}$  je více. V každém případě tato reakce musí pro vznik jednoho héliového jádra proběhnout dvakrát.

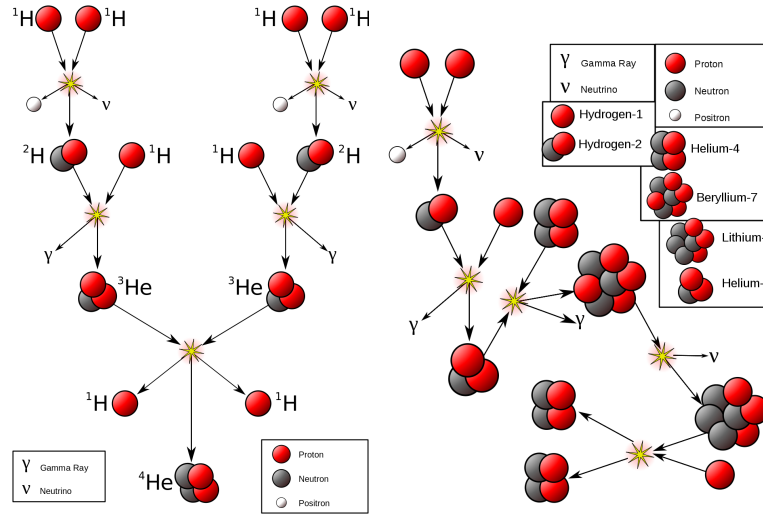
V centru našeho Slunce takto probíhají přibližně dvě třetiny reakcí, další třetina probíhá trochu složitějším způsobem.



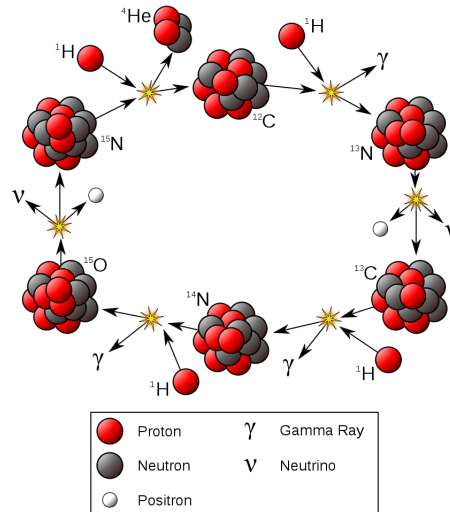
Celková energie uvolněná při proton-protonovém řetězci je závislá na hustotě materiálu a jeho teplotě, přesněji mocnině teploty. Zpravidla se udává  $E \sim \rho T^4$ , ale exponent někdy může dosáhnout až 5 nebo 6. Jeho skutečná hodnota závisí na teplotě. Podle modelových výpočtů je účinnost proton-protonového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

### 2.5.2 CNO (uhlíkový) cyklus

Nadprůměrné hvězdy, větší než naše Slunce, mají k dispozici nejen proton-protonový řetězec. Od vodíku k héliu vede i jiná cesta, tentokrát s pomocí katalyzátorů uhlíku, dusíku a kyslíku, tzv. uhlíkový nebo také CNO cyklus. Jeho průběh popsali von Weizsäcker (1937, 1938) a Bethe (1939), jen několik let po objevu neutronu. Zatímco pro rozběhnutí proton-protonového řetězce stačí teplota zhruba čtyř miliónů kelvinů, CNO cyklus se může spustit 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



Obrázek 2.6: Proton-protonový řetězec. Základní varianta je zobrazena vlevo. Zdroj: wikipedia.



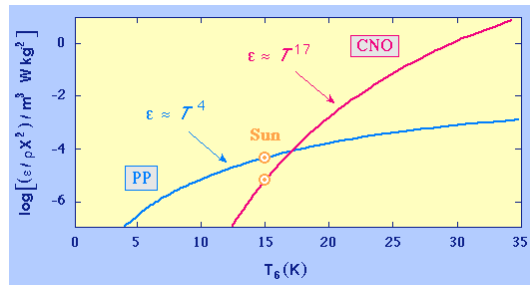
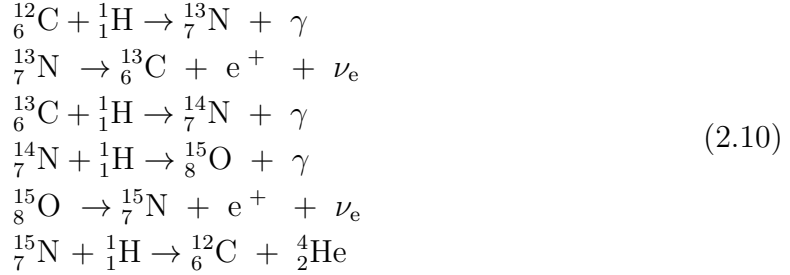
Obrázek 2.7: CNO cyklus. Zdroj: wikipedia.

u teploty může měnit dle teploty a použitého modelu od 15 do 18. Z toho vyplývá, že už při teplotě  $17 \cdot 10^6$  K se CNO cyklus stává majoritním zdrojem energie hvězdy. Naše Slunce má teplotu jádra něco málo přes 15 milionů kelvinů. CNO cyklus v něm tedy může probíhat, ale dle modelů jen necelá dvě procenta slunečních jader hélia je výsledkem CNO cyklu. V průběhu pobytu hvězdy na hlavní posloupnosti se její centrální teplota zvolna zvyšuje a s tím roste i podíl CNO cyklu na produkci energie hvězdy. U hvězd spektrální třídy *F* se například proton-protonový řetězec a CNO cyklus podílejí na celkové produkci energie hvězdy zhruba stejným dílem.

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



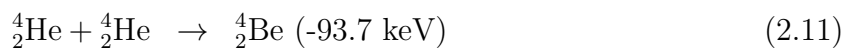
jedno jádro hélia.

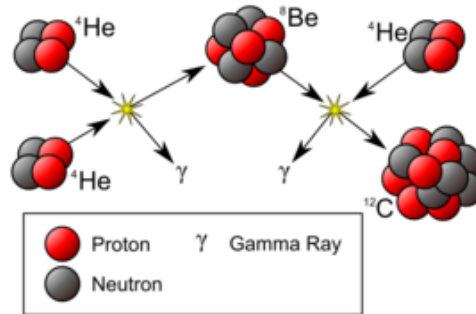


Obrázek 2.8: PP řetězec a CNO cyklus. Míra produkce energie pro PP řetězec a CNO cyklus jako funkce teploty v jednotkách miliónů kelvinů. Zdroj: Dept. Physics & Astronomy, University of Tennessee

### 2.5.3 $3\alpha$ proces

Hvězdy během svého pobytu na hlavní posloupnosti spalují vodík a vzniká hélium. Pokud jsou dostatečně hmotné, dosáhne za jistých okolností centrální teplota po opuštění hlavní posloupnosti řádově až 100 miliónů kelvinů. Pak je možné zapálení dalšího typu jaderných reakcí v nitru. Spustí se  $3\alpha$  reakce, někdy také označovaná Salpeterův proces. Při něm se vzniká ze tří héliových jader,  $\alpha$  částic atom uhlíku a gama záření. Za teploty  $10^8$  K mají héliová jádra dostatečnou energii, aby překonala Coulombovskou bariéru. Dvě  $\alpha$  částice se spojí a s přispěním malého množství energie utvoří jádro berylia. Jde tedy o endogenní reakci, kterou je třeba energeticky dotovat. Nicméně jádro berylia je nestabilní a během zlomku sekundy se opět rozpadá. Reakce, která ale vede ke vzniku beryliových jader je dostatečně rychlá, aby v nitru hvězdy bylo vždy dostatek berylia a Salpeterův proces mohl pokračovat spojením jádra berylia s dalším jádrem hélia. Vzniká stabilní atom uhlíku a uvolní se i kvantum  $\gamma$  záření. Jako vedlejší efekt může docházet i další reakci, při níž z atomů uhlíku a hélia vzniká stabilní izotop kyslíku a uvolní se  $\gamma$  záření. Pokud jsou v nitru hvězdy příhodné podmínky, tedy zejména, pokud je hvězda na počátku dostatečně hmotná, pokračuje řetězec jaderných  $\alpha$  reakcí dále až po nikl a železo.





Obrázek 2.9:  $3\alpha$  cyklus. Zdroj: wikipedia.

$3\alpha$  proces je velice nepravděpodobný. Ale uhlík ve vesmíru je, je tu život na bázi uhlíku a víme, že uhlík nemohl vzniknout při Velkém třesku. Jenže situace není tak beznadějná. Základní stav berylia má skoro přesně stejnou energii jako dvě héliová jádra a podobně i součet energie energie berylia a třetí alfa částice se takřka shoduje s energií uhlíku. A právě tato rezonance významně zvyšuje pravděpodobnost Salpeterova procesu. Celková energie uvolněná při  $3\alpha$  reakcích (2.11,2.12) je 7.275 MeV. Spalování hélia ale neprobíhá tak poklidně jako předcházející syntéza vodíku. Pro hvězdy o hmotnosti přibližně  $2.25 M_{\odot}$  dojde po spálení vodíku v jádru k elektronové degeneraci materiálu jádra. Zapálení Salpeterova procesu pak vede k okamžitému sejmutí degenerace a spálení většiny (60 až 80 %) hélia během několika sekund. U hvězdy dojde k tak zvanému héliovému záblesku. Obecně se tedy Salpeterovy reakce spouští při teplotách řádově stovky miliónů kelvinů a vyprodukované množství energie je úměrné  $\sim 10^{30}$  J.

Historie objevu  $3\alpha$  reakcí odpovídá tak trochu překotnosti jejich průběhu. Syntézu uhlíku ze tří jader hélia popsali Öpik (1951) a Salpeter (1952, 2002). Teprve Hoyle (1954) ale našel způsob, jak mohou takové reakce probíhat za dostatečně krátkou dobu. Objevil přitom zvláštní excitovaný stav jádra uhlíku, který Fowler<sup>9</sup> s kolegy experimentálně prokázal (Cook et al., 1957). Pak už se podařilo kolektivu z Kellogg Radiation Laboratory (Kalifornský technologický institut) poměrně rychle odhalit celou síť jaderných reakcí, kterými se v nitru hvězd syntetizují všechny prvky až po železo (Burbidgeovi, Fowler a Hoyle, 1957). Jedna nejasnost v procesech jaderné syntézy ale přetrvala až do 21. století. Teprve nedávno se podařilo skupině německých fyziků Epelbaum et al. (2011) Hoyleův stav jádra atomu uhlíku popsat matematicky. Výpočet na superpočítači trval týden, ale výsledky výpočtu jsou ve skvělé shodě s experimenty.

## 2.6 Přenos tepla

V předchozí kapitole jsme popsali reakce probíhající v samém nitru hvězd. Tyto reakce jaderné syntézy jsou hlavním zdrojem energie hvězdy. Rozhodujícím parametrem pro jejich „nasazení“ je teplota. Ta také výrazně ovlivňuje energetickou výtěžnost spuštěných

<sup>9</sup>Jedná se amerického astrofyzika Williama Alfreda "Willy" Fowlera, nositele Nobelovy ceny za fyziku v roce 1983. Nezaměňovat s britským astronomem Alfredem Fowlerem.

reakcí, což znamená, že se tyto reakce budou spouštět a odehrávat jen v místech s nejvyšší teplotou a tedy zejména v centrálních oblastech. Vyrobenou energii je ale nutné přenést z nitra hvězdy na povrch a odeslat do kosmického prostoru, což nutně vede ke vzniku teplotního spádu uvnitř hvězdy. Přenos energie ve hvězdě je realizován v podstatě čtyřmi způsoby.

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

### 2.6.1 Přenos energie zářením (zářivou difúzí)

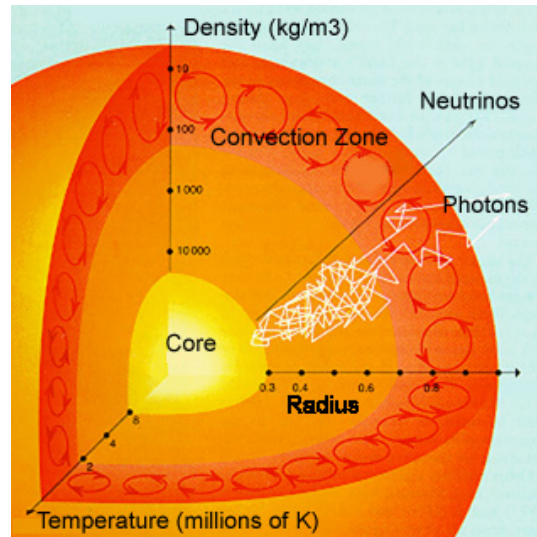
Při jaderných reakcích v nitru hvězd vznikají fotony  $\gamma$  záření. Ty odnášejí energii z centra hvězdy. Přenos energie probíhá zářením neboli zářivou difúzí. Jenže, kdo by očekával, že takový foton prostě nabere správný směr a při rychlosti světla zanedlouho opustí hvězdu a vydá se do kosmického prostoru, ten by se šeredně spálil. Zářivá difúze takto funguje se stoprocentní účinností jen v 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, ale vzápětí opět vyzářen, ale už nikoli v původním směru. Fotony tak vykonávají značně neuspořádaný pohyb (viz obr. 2.10). Přesto ale směr ven z hvězdy převládá, například v polovině vzdálenosti od středu Slunce k povrchu připadá na  $4 \cdot 10^{10}$  částic pohybujících se směrem k centru  $4 \cdot 10^{10} + 1$  částic směřujících ven z hvězdy (viz obr. 2.11). Přitom na vzdálenosti odpovídající střední volné dráze fotonu v této vzdálenosti od středu Slunce je teplotní gradient 0.000 03 K. Blíže k centru, v teplejších oblastech je vždy fotonů více a mají vyšší energii. Na povrch hvězdy nebo do oblastí, kde se začne uplatňovat přenos energie konvekcí se tak dostává méně fotonů a ty už navíc nejsou vysokoenergetické. Maximum vyzařované energie se přesunulo z oblasti  $\gamma$  záření do vizuální oblasti spektra. Celý proces přenosu energie zářivou difúzí je ale velmi pomalý.

### 2.6.2 Konvekce

Ve většině běžných hvězd je energie z nitra přenášena zářivou difúzí. Někdy je ale produkce energie ve hvězdě příliš velká nebo probíhá ve velmi malém objemu, takže fotony nestačí vyrobenou energii odvádět pryč. Materiál hvězdy se pak nahřeje a začne "vřít", začne se chovat jako vroucí voda, v níž směrem vzhůru se pohybuje horký, ohřátý materiál, na hladině se ochladí a pak klesá směrem dolů. Konvekce<sup>10</sup> ve hvězdě vypadá obdobně. Konvekce je poměrně efektivní způsob přenosu energie, protože se děje v přímém směru. Proudý teplého plazmatu stoupají vzhůru k fotosféře hvězdy a po ochlazení vyzářením opět klesají dolů, směrem ke středu hvězdy.

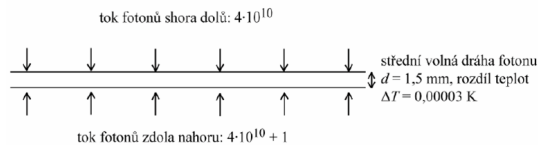
Ke vzniku konvekce v nitru hvězdy je zapotřebí splnění určitých podmínek. Prouděním se bude přenášet energie z nitra hvězdy na povrch, pokud je materiál hvězdy příliš

<sup>10</sup>Slovo "konvekce" je odvozeno z latinského *convehere*, což znamená dovážet, svážet, *convectio* pak znamená přívod.



Obrázek 2.10: Přenos energie zářením.

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

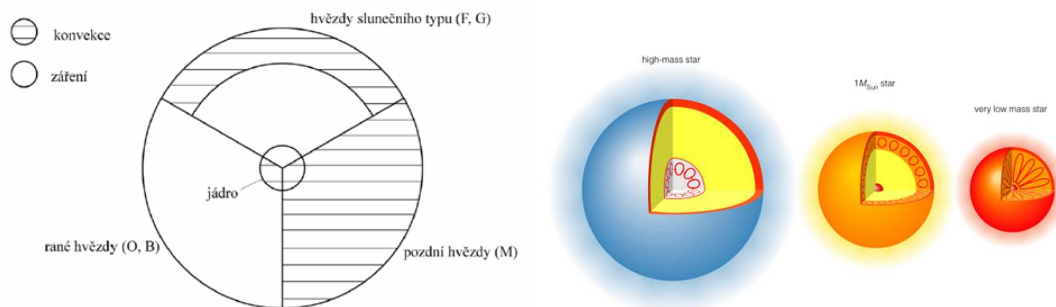


Obrázek 2.11: Přenos energie zářením.

neprůhledný, má vysokou opacitu. To platí vesměs pro hvězdy s hmotností pod  $1,5 M_{\odot}$ . Díky konvekci je u těchto menších hvězd zajištěna i dodávka čerstvého materiálu do místa jaderného hoření. Konvekce důkladně promíchává celou hvězdu. Je-li ve větší hvězdě zdroj energie ve velmi malém objemu, nestačí malý povrch odvádět vyrobené teplo, směrem od toho energetického centra vzniká prudký teplotní spád, který vede ke spuštění konvekce. Hloubka konvektivní vrstvy pod fotosférou přitom závisí na hmotnosti hvězdy. Čím je hvězda méně hmotná, tím je konvektivní vrstva silnější (viz obrázek 2.12). U Slunce je konvektivní vrstva silná asi 200 000 kilometrů, takže je konvekci ovlivněno asi 70 % hmoty. Vrcholky výstupných konvektivních proudů můžeme dokonce pozorovat ve sluneční fotosféře v podobě granule.

### 2.6.3 Přenos tepla vedením

Vedení neboli kondukcce je způsob, jakým se přenáší teplo zejména v kovech. U většiny hvězd se s kondukcí nesetkáme. Důvod je jednoduchý. Materiál běžných hvězd se chová přibližně jako ideální plyn a má dobré tepelně-izolační vlastnosti. Během vývoje hvězd ale dochází k situacím, že je materiál velmi silně stlačen a dochází k jeho degeneraci. Bílí trpaslíci, neutronové hvězdy nebo jádra velmi hmotných hvězd se pak chovají jako kovy s volnými elektrony, které pak mohou teplo přenášet. Materiál hvězd se tak stane velmi dobrým vodičem tepla. Jenže k takovým situacím dochází až na konci hvězdného



Obrázek 2.12: Přenos energie konvekcí.

vývoje, kdy hvězda nemá jaderný zdroj energie a nedochází ani k jejímu smršťování. Veškeré výdaje energie hvězdy jsou hrazeny ze zásob. Jinak řečeno, hvězda velmi zvolna chladne. U bílého trpaslíka může takový proces chladnutí trvat až desítky miliard let. Důvod je zřejmý - relativně velmi malý povrch.

#### 2.6.4 Proud neutrin

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

## 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

## Shrnutí

### Zdroje energie ve hvězdách

Přehled představ:

- doběla rozžhavený železný kotouč (antika, Anaximandros)
- chemické hoření (pol. 19. st. Helmholtz, J. Herschel)
- gravitační smršťování (Kelvinovo-Helmholtzovo, H. Helmholtz a W. Thomson (lord Kelvin))-nedostatečné ke krytí ztrát energie během celého vývoje Slunce!
- dopady meteoritů (J. Mayer 1846)
- jaderné štěpení - rozpad  $^{235}\text{U}$  (poč. 20. st.)
- termonukleární reakce – p-p řetězec, CNO cyklus (1939 Bethe); 30. léta 20. stol. - Eddington - jaderné reakce/ jaderná syntéza – jen za vysoké teploty => zpravidla pouze ve středu hvězdy (H. Bethe, von Weizsäcker – teorie)

hlavní vnitřní zdroj energie hvězd = jaderné hoření v centrálních oblastech => pro přenos tepla na povrch - *teplotní spád*

podmínky vzniku konvekce:

- příliš neprůhledný materiál hvězdy (vysoká opacita) - u hvězd  $M < 1,5 M_{\odot}$
- konvektivní vrstvy pod fotosférou - tím hlubší, čím je hvězda méně hmotná (u Slunce 200 000 km – granulace)
- zdroj energie ve velmi malém objemu => v centru hvězdy prudký spád teploty (povrch nestačí odvádět teplo); pro hvězdy  $M > 1,5 M_{\odot}$  konvekce v jádru - zajišťuje i dodávku čerstvého materiálu do centra

## 3 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, hmotnosti ve hmotnosti Slunce a podobně. 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! Už v kapitole ?? jsme uvedli, že Slunce je hvězdou neobyčejnou, vždyť jí vděčíme za naši existenci, a také nadprůměrnou, pokud ji srovnáváme s běžnou hvězdou naší Galaxie. Pojděme si nyní naše Slunce prohlédnout trochu důkladněji.

### 3.1 Chemické složení Slunce

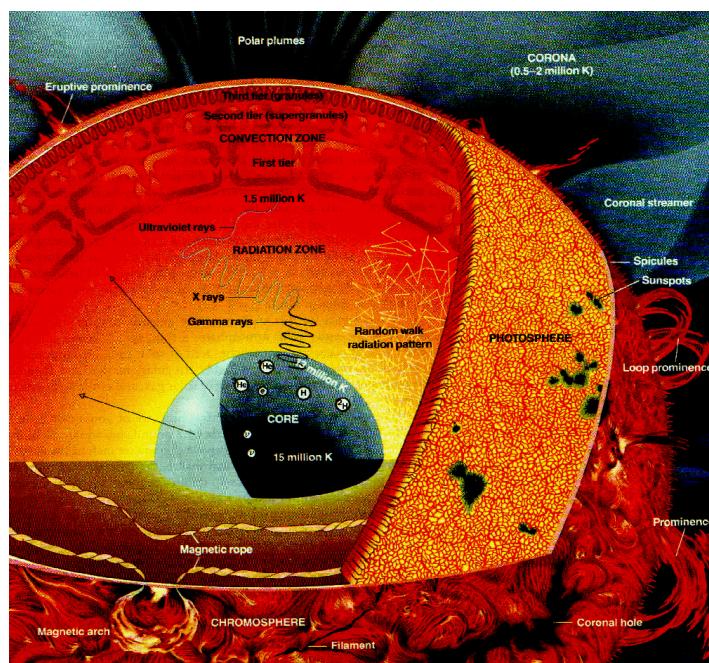
Slunce patří mezi hvězdy hlavní posloupnosti. Vypovídá nám o tom spektrální klasifikace G2V, z níž se ale také dozvíme, že povrchová teplota je přibližně 5000 až 6000 kelvinů a ve spektru jsou patrné slabé čáry vodíku, ale také velmi silné čáry H a K ionizovaného vápníku<sup>1</sup> CaII a kovů, zejména železa a neutrálních kovů. Jenže, jak víme z předchozího povídání o spektroskopii a dálkovém průzkumu hvězd, poskytuje nám spektrum informaci jen o složení povrchových vrstev hvězdy, přesněji tzv. fotosféry, odkud je z hvězdy uvolňováno záření. Skutečné složení hvězdy je ale jiné! Ukazuje se, že naprostá většina hvězd je namíchána ze dvou prvků – ze tří čtvrtin vodíku a jedné čtvrtiny hélia a to vše okořeněné špetkou těžších prvků. Konkrétně pro Slunce publikovali Grevesse et al. (2010) nové složení Slunce na základě 3D hydrodynamického modelu. Z něj vyplývá, že 73,8 % hmotnosti Slunce připadá na vodík, 24,85 % na hélium a jen 1,34 % na těžší prvky (zejména kyslík, uhlík, železo, neon, dusík, křemík a další). Poměrné zastoupení jednotlivých prvků ve hvězdách označujeme jako abundance. Může se uvádět jako početní zastoupení, tedy v logaritmech počtu atomů 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. Abundance těžších prvků se navíc označuje jako tzv. metalicita. Pro Slunce tedy máme  $X = 0,7380$ ,  $Y = 0,2485$  a metalicitu  $Z = 0,0134$ .<sup>2</sup>(Grevesse et al., 2010). Metalicita Slunce se běžně po léta udávala 2 %, jak ale vidíme dle posledních modelů je nižší,  $Z=0,0134$ .

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

<sup>1</sup>Pozor na záměnu. V tomto místě se jedná o čáry ionizovaného vápníku označené písmeny H a K. Nejde o označení prvků vodíku a draslíku!

<sup>2</sup>Samozřejmě vždy  $X + Y + Z = 1$ .





Obrázek 3.1: Sluneční nitro. Obr: Vik Dhillon

## 3.2 Model Slunce

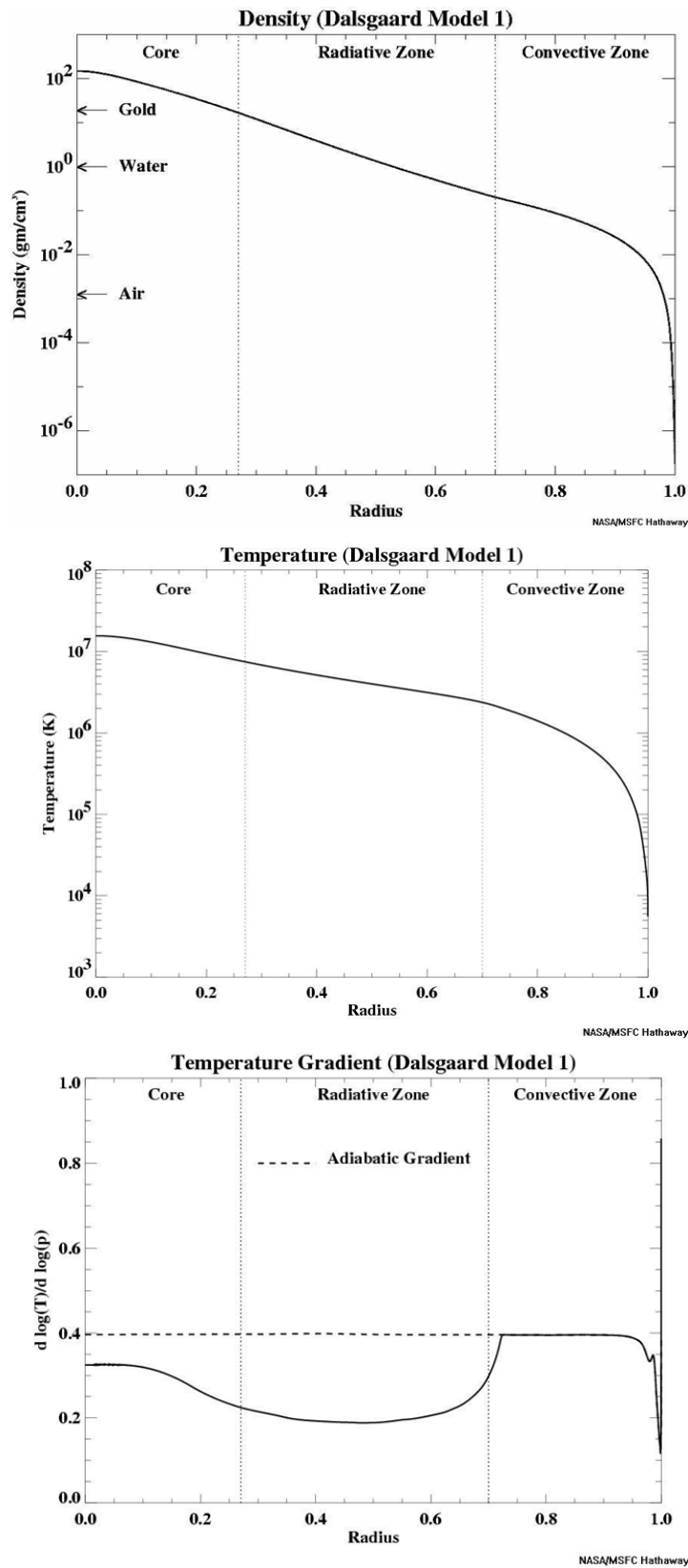
Už jsme se zmínili, že chemické složení celého Slunce vychází z vypočtených modelů. Modely umožňují nejen stanovit chemické složení, ale také stavbu Slunce a fyzikální podmínky v jeho nitru.

jednotlivé vrstvy: jádro ...

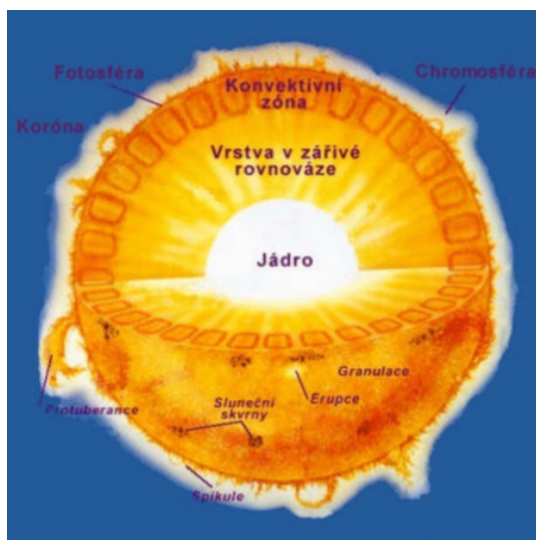
Nejlépe prostudovanou atmosférou je atmosféra Slunce! Fotosféra – jen 135 km, ze Země vidět pod úhlem 0.3“.

## 3.3 Projevy aktivity Slunce

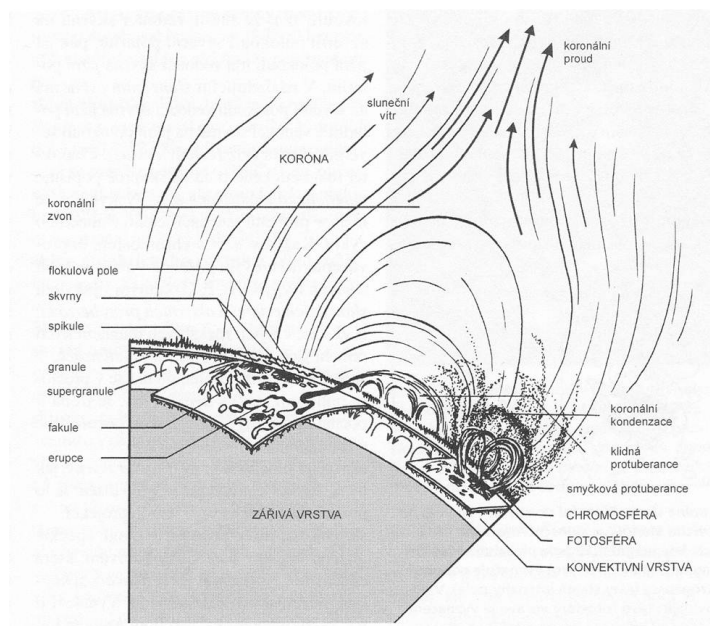
- Fotosféra
  - sluneční skvrny
  - granulace
  - fakule
- Chromosféra
  - erupce
  - spikule
  - flokule
  - sluncetřesení
- Koróna
  - protuberance (filamenty)



Obrázek 3.2: Nový model - Dalsgaard.



Obrázek 3.3: Nitro Slunce.



Obrázek 3.4: Aktivity Slunce.

- koronární transienty, kondenzace, výbuchy, díry
- Heliosféra
  - sluneční vítr
  - koronární proudy

### 3.3.1 Sluneční skvrny

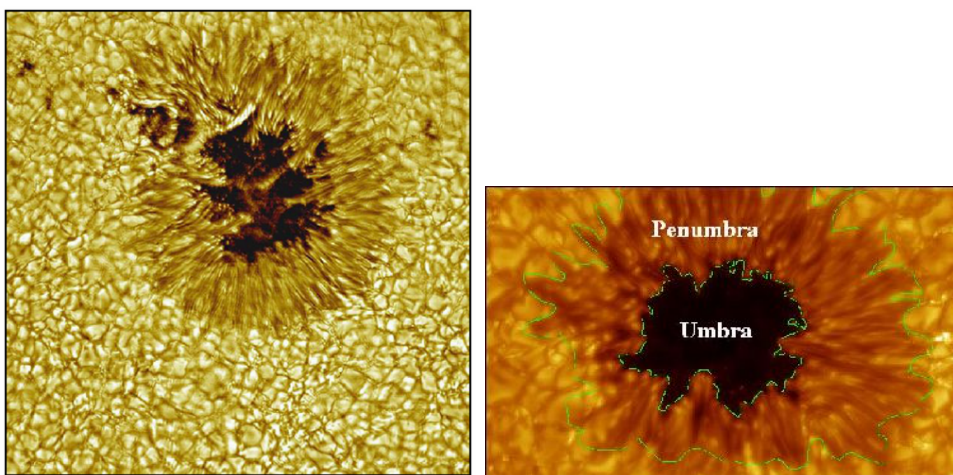
nejnápadnější projev sluneční činnosti

místo vzniku – fotosféra

části

- - umbra (neboli stín),
- - penumbra (polostín) – vlákna

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



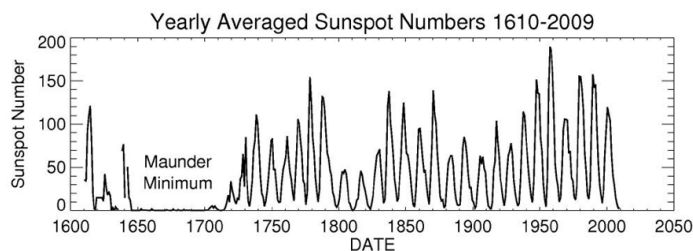
Obrázek 3.5: Sluneční skvrny.

Historie

- 1. pozorování Anaxagoras z Klazomen (roku 466 př. n. l.)
- 1. katalog 45 pozorování z let 301-1205, Číňan Ma Tuan-sien
- 807 n. l., Einhard, píše o přechodu Merkuru, ale šlo o sluneční skvrnu
- 1128 - 1. kresba skvrny - kronika Johna z Worcesteru
- objevitelé - David Fabricius a syn Johann (9. března 1611) – pozorovali a publikovali!
- (8. prosince 1610 anglický matematik a filozof Thomas Harriot, avšak bez publikace)

Co jsou zač?

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



Obrázek 3.6: Počty slunečních skvrn.

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

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:

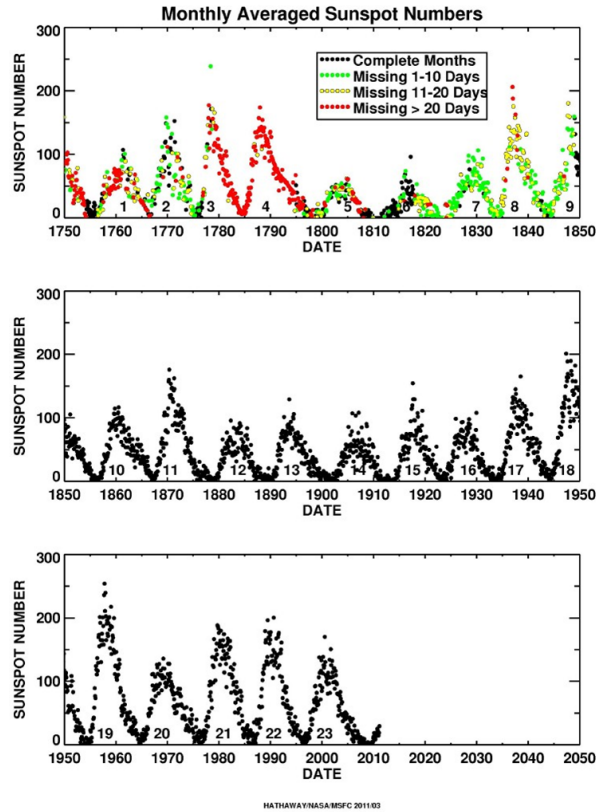
$$R = 10 * g + n, \quad (3.1)$$

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

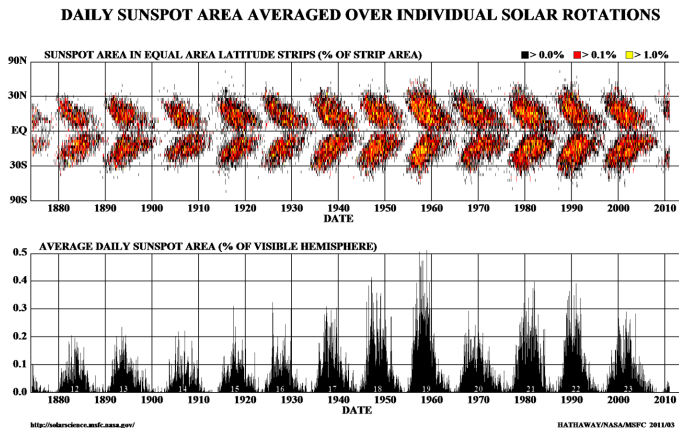
### 3.3.2 Okrajové ztemnění

na okrajích se díváme do menší hloubky než ve středu kotoučku

teplota s rostoucí hloubkou roste => roste množství vyzařované energie => střed slunečního kotoučku září více než okraje



Obrázek 3.7: Sluneční skvrny



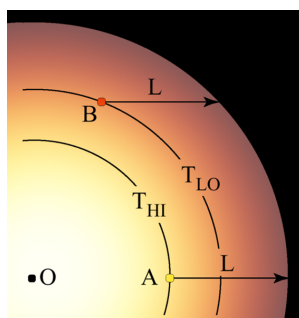
Obrázek 3.8: Motýlkový diagram.

### 3.3.3 Granulace (zrnitost)

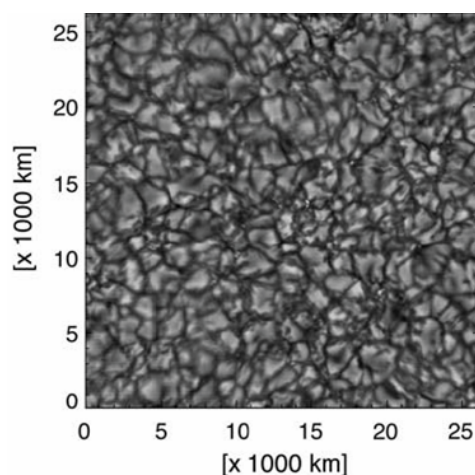
granule - zrna o velikosti cca 700-1000 km; vrcholky vzestupných proudů plazmatu

životnost - 6 až 8 minut;

Pozorování - dalekohledem



Obrázek 3.9: Okrajové ztemnění.  $T_{LO}$  nižší teplota,  $T_{HI}$  vyšší teplota.



Obrázek 3.10: Granulace.

### 3.3.4 Fakule (pochodně)

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

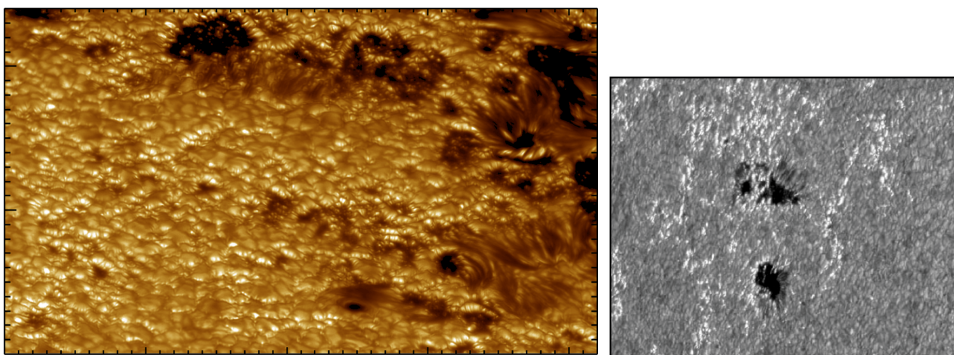
Pozorování - dalekohledem

### 3.3.5 Erupce

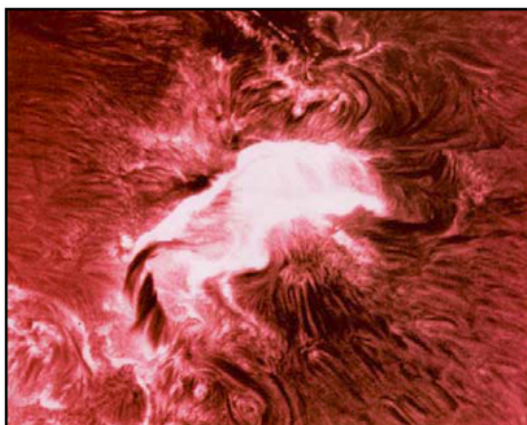
Místo vzniku - chromosféře Náhlá zjasnění chromosféry, doprovázená silným vyzařováním na různých frekvencích a výronem nabitých částic do meziplanetárního prostoru. Erupce vznikají v místech silných magnetických polí. Doba trvání - několik desítek minut

### 3.3.6 Sluncetřesení

video: 9 July 1996 - sluncetřesení  
sérii obrázků + vysvětlení



Obrázek 3.11: Fakule.



Obrázek 3.12: Erupce.

### 3.3.7 Flokule a spikule

Flokule jsou jasná místa ve chromosféře, tvoří chromosférickou síť.

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

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

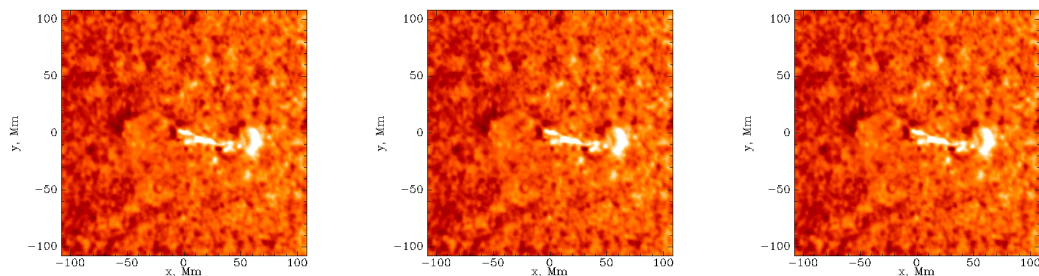
### 3.3.8 Protuberance

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

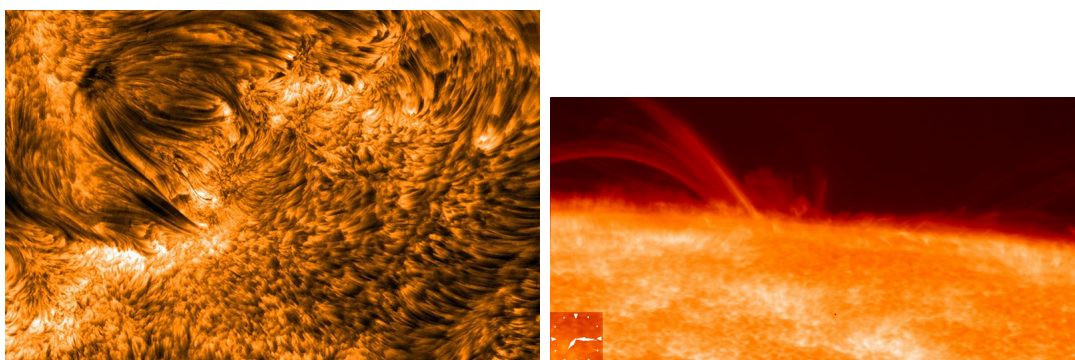
### 3.3.9 Koróna

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





Obrázek 3.13: Sluncetřesení.



Obrázek 3.14: Flokule a spikule

pozorování - při úplném zatmění Slunce, koronograf

- bez vnější hranice
- přechází do okolního prostoru
- sluneční vítr
- výtrysky částic (CME) – vliv na Zemi (20 - 3200km/s)

### 3.3.10 Sluneční vítr

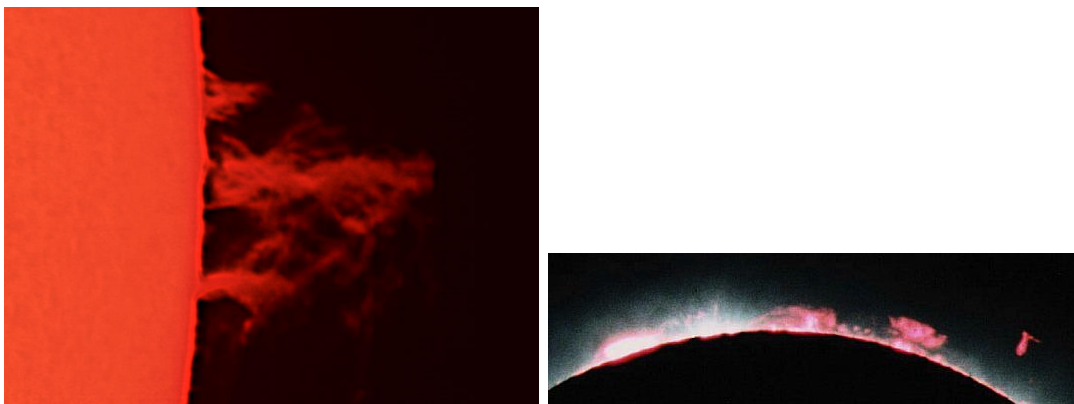
přesné chemické složení Slunce – přímým rozborem slunečního větru pomocí družic nebo kosmických sond.

pomalý (stacionární) – 300 km/s

rychlý (kvazistacionární) – nad koronárními děrami (700-800 km/s)

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

Slunečním větrem = stálý proud částic, unikající ze Slunce; v okolí Země - hustota několik částic/cm<sup>3</sup>, - rychlost - několik set km/s, sahá daleko za dráhu Země.



Obrázek 3.15: Protuberance.

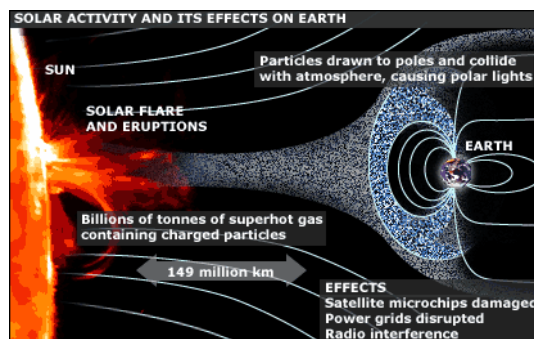


Obrázek 3.16: Sluneční korona během úplného zatmění Slunce. Autor. M. Druckmüller.

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

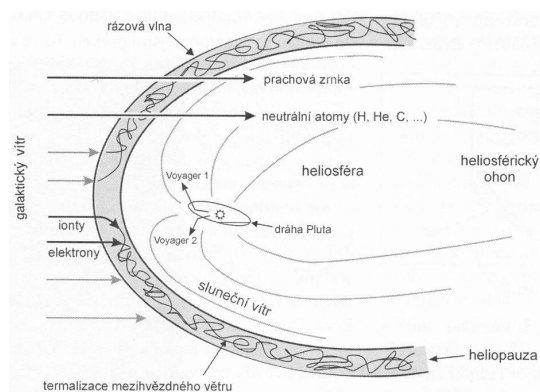
Tabulka 3.1: Složení slunečního větru

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 3.17: Aktivita Slunce a její vliv na Zemi.

### 3.4 Heliosféra



Obrázek 3.18: Heliosféra.

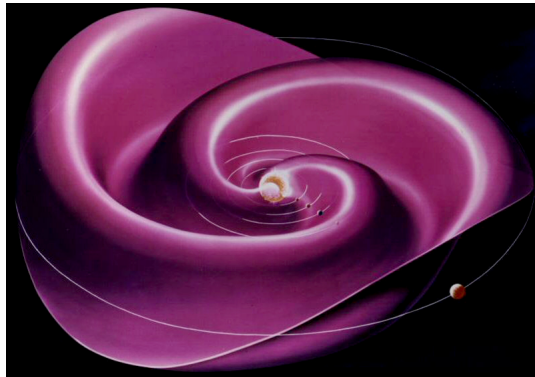
Heliospheric current sheet (HCS)

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

největší útvar ve Sluneční soustavě  
 vychází z rovinu slunečního rovníku  
 tvar – výsledek rotace mg. pole Slunce a působení slunečního větru  
 tloušťka vrstvy – cca 10 000 km  
 el. proudy s hustotou  $10^{-10}$  A/m<sup>2</sup>



Obrázek 3.19: [http://en.wikipedia.org/wiki/Coronal\\_mass\\_ejection](http://en.wikipedia.org/wiki/Coronal_mass_ejection) Original NASA description: The Hubble Space Telescope imaged this view in February 1995. The arcing, graceful structure is actually a bow shock about half a light-year across, created from the wind from the star L.L. Orionis colliding with the Orion Nebula flow.



Obrázek 3.20: Heliospheric current sheet.

## Doplňující literatura

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

Leighton, R. B., Noyes, R. W., & Simon, G. W. 1962, *ApJ*, 135, 474

## Shrnutí

### Zdroje energie ve hvězdách

Přehled představ:

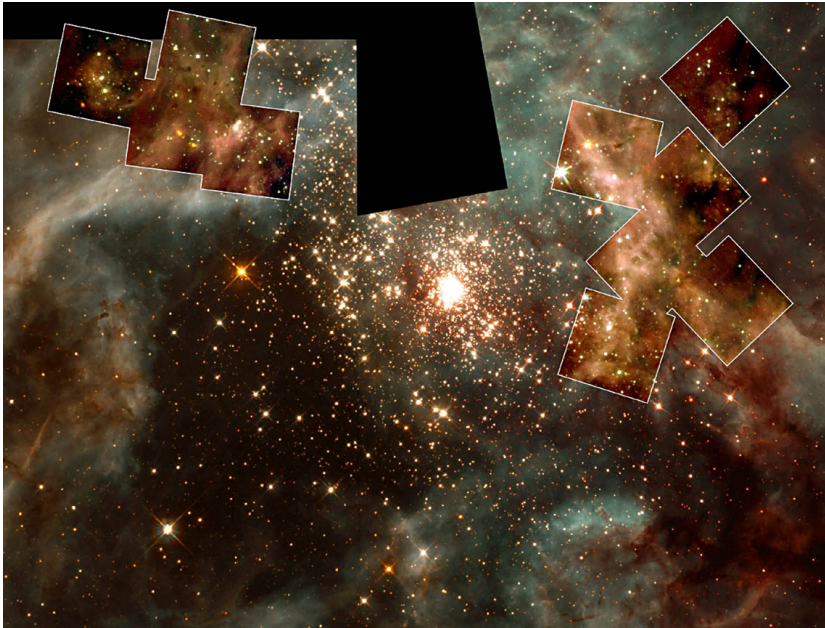
- doběla rozžhavený železný kotouč (antika, Anaximandros)
- chemické hoření (pol. 19. st. Helmholtz, J. Herschel)
- gravitační smršťování (Kelvinovo-Helmholtzovo, H. Helmholtz a W. Thomson (lord Kelvin))-nedostatečné ke krytí ztrát energie během celého vývoje Slunce!
- dopady meteoritů (J. Mayer 1846)
- jaderné štěpení - rozpad  $^{235}\text{U}$  (poč. 20. st.)
- termonukleární reakce – p-p řetězec, CNO cyklus (1939 Bethe); 30. léta 20. stol. - Eddington - jaderné reakce/ jaderná syntéza – jen za vysoké teploty => zpravidla pouze ve středu hvězdy (H. Bethe, von Weizsäcker – teorie)

hlavní vnitřní zdroj energie hvězd = jaderné hoření v centrálních oblastech => pro přenos tepla na povrch - *teplotní spád*

## 4 Zrození, život a skon hvězd

Vývoj hvězdy je srovnání s délkou lidského života ba i existencí člověka velmi dlouhý proces. Naše pozorování v délce maximálně stovek let představuje z celého vývoje určité hvězdy jen okamžik. 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, ale 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 poskládají 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 a navíc, jako četnější se budou jevit zářivější hvězdy. Nicméně i přes obtíže nastražené výběrovými efekty se astronomům skutečně podařil husarský kousek a vývojovou sekvenci pro různé hvězdy opravdu sestavili.

A proč je snaha o pochopení hvězdného vývoje důležitá? 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. Naskytá se otázka, co je vlastně motorem hvězdného vývoje, proč se vlastně hvězdy vyvíjejí.



Obrázek 4.1: Místo zrodu velmi hmotných hvězd, mlhovina 30 Doradus (HST, WFPC2 a NICMOS).

Důkladná odpověď je nad rámec tohoto kurzu, prozatím vystačíme s tvrzením, že

vývoj (osamocených) hvězd je určen změnami jejich chemického složení. K této změně dochází v důsledku jaderných reakcí probíhajících v nitru hvězdy. Tyto reakce jsou také hlavním zdrojem energie hvězdy. Budeme se jim 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 porodní hmotnosti hvězdy. Začněme tedy popis hvězdného vývoje jejich vznikem ve hvězdné porodnici.

## 4.1 Akt zrození aneb 7 kroků ke vzniku hvězdy

Vznik hvězdy

1. Mračno plynu a jeho fragmentace
2. Samostatný kolaps fragmentu
3. Protohvězda (konec fragmentace)
4. Kelvinova-Helmholtzova kontrakční fáze
5. Hayashiho stopa
6. Zážeh (zrození nové hvězdy)
7. Hvězda hlavní posloupnosti

### 4.1.1 Dělení GMC

Hvězdné porodnice

mezihvězdné prostředí

- vyplněno plynem a prachem (drobné částice), většina velmi řídký, horký, difúzní atomární vodík

- v něm vložena neforemná oblaka chladného, hustého molekulárního vodíku

hvězdné porodnice = GMCs (obří molekulární mračna) nebo části

rozměry – 10-50 pc

teploty – kolem 15 K

hmotnosti – řádově  $10^4$  Mo až  $10^5$  Mo (GMC až  $10^7$  Mo) hustoty –  $10^2$  –  $10^3$  částic/cm<sup>3</sup>, zhustky až  $10^6$  částic/cm<sup>3</sup> složení – až 99 % H<sub>2</sub>, 1-10 % prach

=> z jednoho oblaku desítky až tisíce nových hvězd

na počátku GMC v hydrostatické rovnováze - proti gravitaci působí gradient tlaku (tlak plynu, teplota materiálu, rotace, magnetické pole)

vnější působení => změna podmínek, gravitace vítězí => začíná kolaps

možné příčiny kolapsu:

- srážka s jiným mračnem

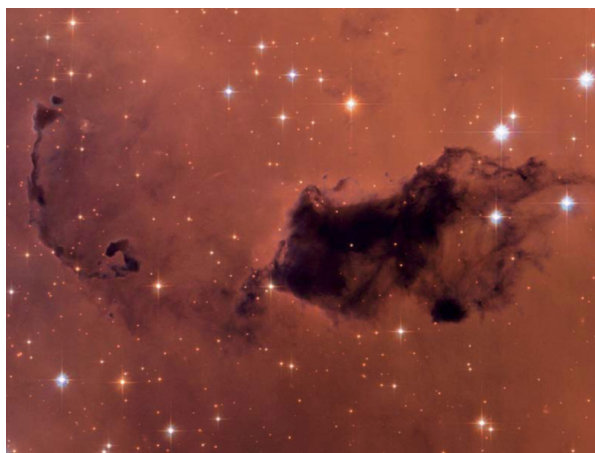
- výbuch blízké supernovy (rázová vlna)
- blízký vznik hmotné hvězdy typu O nebo B
- průchod mračna spirálními rameny Galaxie

GMC obsahují shluky (clumps) cca 0.1 pc, hmotnost řádově  $M_{\odot}$   
 hustší – méně stabilní => kolabují dříve a rychleji;  
 fragmentace mračna – > na shluky a ty dále na jádra => celé GMC se rozdělí na hustá  
 jádra o hmotnosti srovnatelné s hmotností hvězd

typický oblak – možnost vzniku:

- několika málo velmi hmotných hvězd ( $>20 M_{\odot}$ ),
- mnoho hvězd podobných Slunci
- mnohem více málo hmotných hvězd a hnědých trpaslíků

délka procesu – několik milionů let



Obrázek 4.2: 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.

### 4.1.2 Samostatný kolaps jednoho fragmentu

(dále úvahy pro budoucí hvězdu velikosti Slunce)

- fragment – chomáč, plynná koule, z něhož má vzniknout hvězda 1-2  $M_{\odot}$
- velikost fragmentu – 100x větší než Sluneční soustava
- hustota ve středu dosahuje cca  $10^{12}$  částic/ $m^3$
- centrální teplota vzrostla na 100 K



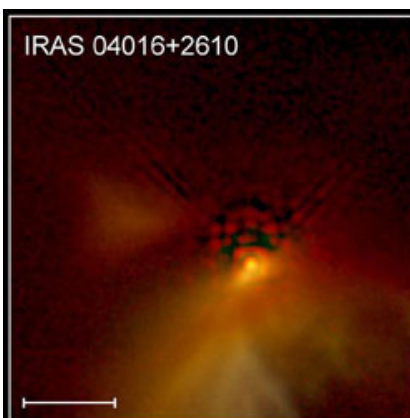
- teplota vnější částí stále nízká, materiál je tenký => energie získaná uvnitř chomáče snadno unikne do prostoru
- smršťování => zvyšuje se hustota => roste teplota a tlak => zastaví se fragmentace, ale smršťování pokračuje

### 4.1.3 Protohvězda

velmi rychlé smršťování – až je fragment velikostí srovnatelný s rozměry Sluneční soustavy - v centru se vytvoří hustá neprůhledná oblast => fragment se začíná podobat hvězdě

protohvězda

- centrální teplota  $\sim 10\,000\text{ K}$
- hustota ve středu  $\sim 10^{18}\text{ částic/m}^3$
- vnější části stále chladnější a tenčí
- hmotnost protohvězdy roste a objekt se dále smršťuje
- ukryta v zárodečném materiálu & velmi krátká etapa ( $10^4 - 10^5$  let) => velmi málo pozorovaných protohvězd



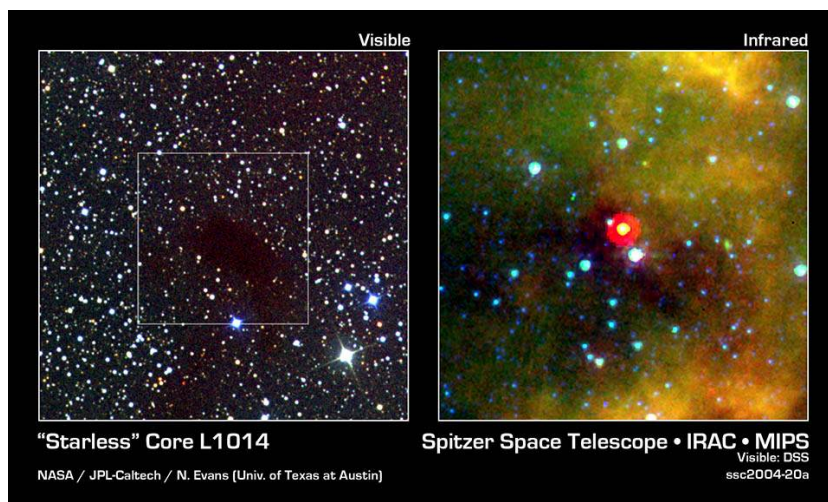
Obrázek 4.3: Protostar.

Protohvězdy s disky

původní chomáč plynu se smršťuje, ale také rotuje => v okolí pólů dopadá volným pádem, kolem rovníku je brzděn odstředivou silou => zplošťuje se – disk kolem rovníku protohvězdy

disky z prachu a „zbytků“ pozorujeme kolem mladých hvězd nízké hmotnosti

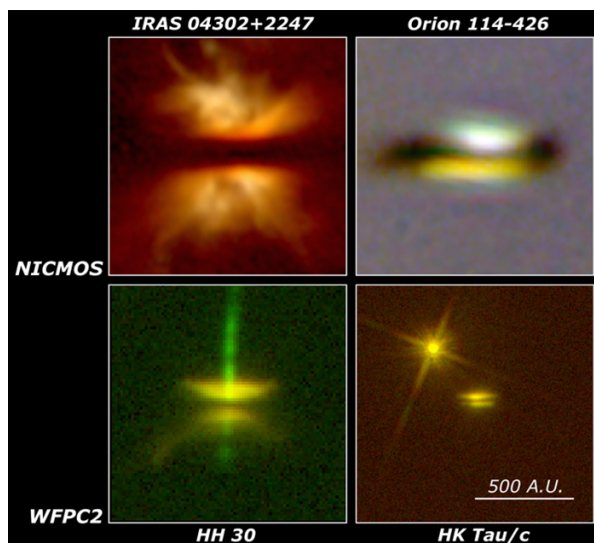
úklid disku po zformování protohvězdy (plyn „zmizne“ do 6 mil. let)  
část materiálu spadne na protohvězdu; část poslouží ke zformování planet (část je odvanuta z okolí hvězdy později po zapálení jaderných reakcí)



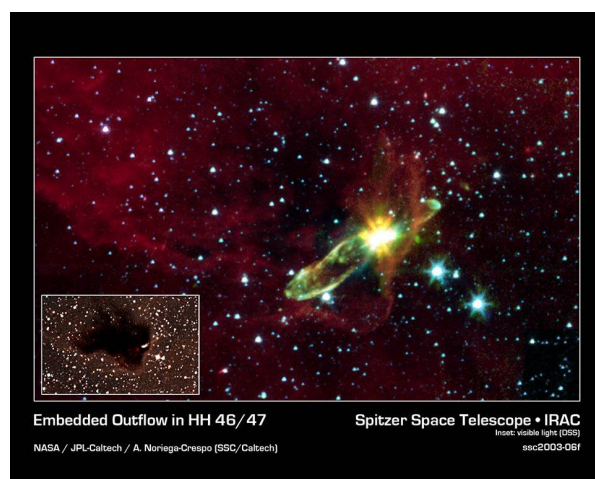
Obrázek 4.4: Comparison of visible (left) and Spitzer infrared (right) image of the protostellar core L1014. The bright yellow object at the center of the image is a forming star, detected via Spitzer's ability to penetrate the optically opaque dust contained in the protostellar core. The red ring surrounding the object is an artifact of the reduced spatial resolution of the telescope at 24 microns. .

### Výtrysky (jety)

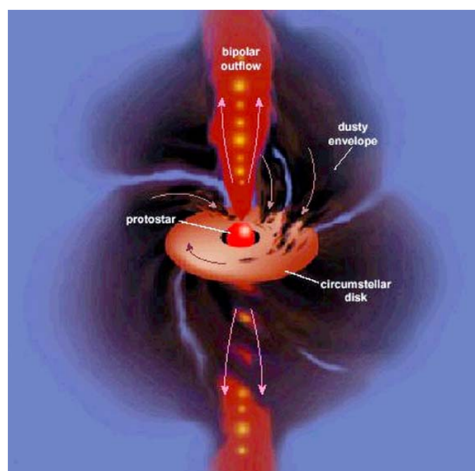
v polárních oblastech – odklizení přebytečné hmoty a energie



Obrázek 4.5: Images of nearby edge-on disks observed by the Hubble Space Telescope. All images are shown to the same linear scale, with each box being about 20 times the diameter of Neptune's orbit. .



Obrázek 4.6: HH 46/47, a YSO ejecting a jet and creating a bipolar outflow. The central protostar lies inside a "Bok globule," hidden from view in the visible-light image (inset).



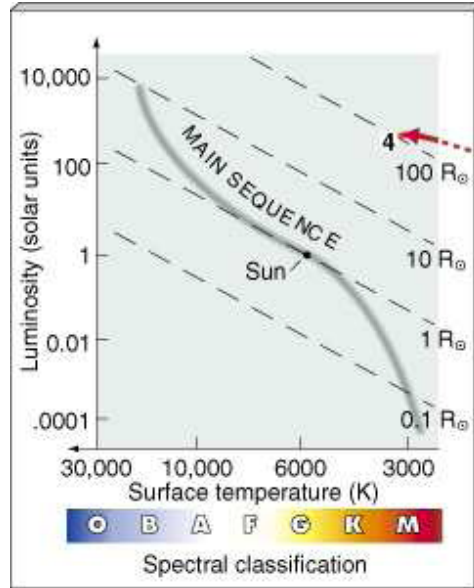
Obrázek 4.7: Model s diskem.

#### 4.1.4 Kelvinova-Helmholtzova kontrakční fáze

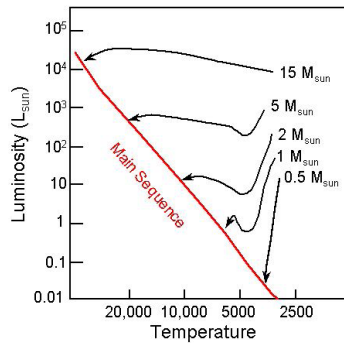
- rychlé smršťování – > růst hustoty
- růst teploty v jádru (až na  $10^6$  K) i na povrchu (na cca 3000 K)
- dosažení velké hustoty a teploty v centru vede ke zpomalení smršťování
- velikost protohvězdy > Slunce ( $\approx$  trajektorie Merkuru)
- zářivý výkon až  $1000 L_{\odot}$ , i když  $T_{\text{eff}} = 1/2 T_{\text{eff}} \text{ Slunce}$
- teplota v jádru nestačí na zapálení jaderných reakcí => zářivý výkon je krytý z potenciální energie
- získaná energie: 1/2 se vyzáří, 1/2 spotřebuje na ohřev
- délka K-H fáze – pro hvězdu typu Slunce cca  $3 \cdot 10^7$  let

$$\tau_{\text{KH}} \propto \frac{M^2}{RL} \quad (4.1)$$

- poprvé lze objekt zakreslit do HR diagramu => začátek vývojové dráhy hvězdy v HRD



Obrázek 4.8: HRD1.

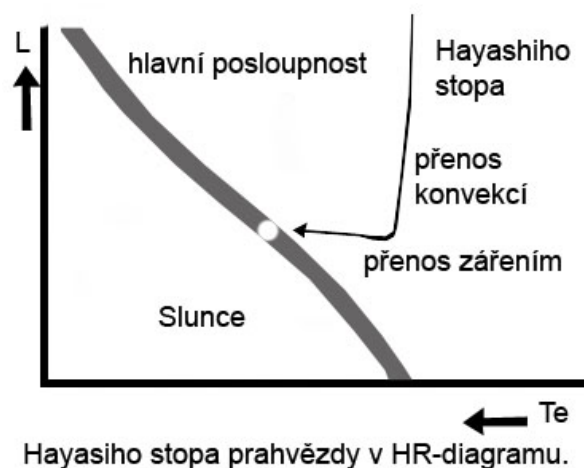


Obrázek 4.9: Kelvinova-Helmholtzova časová škála – čas, za který se hvězda v HR diagramu přesune až na hlavní posloupnost.

#### 4.1.5 Hayashiho vývojová cesta

- smršťování stále pokračuje => velikost protohvězdy 10 R<sub>o</sub>
- centrální teplota 5.10<sup>6</sup> K (žádné jaderné reakce)
- povrchová teplota 4000 K ale dále neroste!
- zářivý výkon 10 L<sub>o</sub> a klesá!  
proč?  
poloměr se zmenšuje, teplota zůstává
- stárí cca 1 milión let

- protohvězda plně konvektivní => hvězda je chemicky stejnorodá, dokonale promíchaná  
=> silná povrchová aktivita, silný hvězdný vítr (fáze T Tauri)



Obrázek 4.10: Vpravo od Hayashiho linie nemůže existovat stabilní objekt.

#### 4.1.6 Zrození nové hvězdy

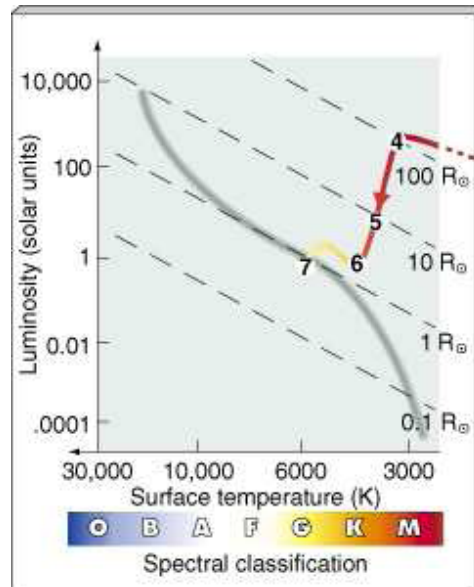
v nitru se zapalují jaderné reakce!

- hmotnost – cca sluneční
- teplota v jádře dosáhla mez pro zapálení jaderných reakcí
- povrchová teplota – menší než sluneční
- velikost – mírně větší než Slunce
- zářivý výkon – menší než Slunce (chladnější fotosféra)
- hvězda stále není v hydrostatické rovnováze
- vnitřní struktura není ještě v rovnováze

#### 4.1.7 Hvězda dosedá na hlavní posloupnost

- teplota v jádru – sluneční
- zářivý výkon - sluneční
- povrchová teplota – cca sluneční
- centrální hustota =  $10^{32}$  částic/m<sup>3</sup> hvězda v hydrostatické rovnováze

Vývojové etapy 1-7 trvají 40-50 miliónů let z celkové doby života Slunce (10m mld let méně než 1 %!



Obrázek 4.11: HRD4.

## 4.2 Protohvězdy rozdílné hmotnosti

### 4.2.1 Protohvězdy s nadváhou

- vysoká hmotnost => gravitační kolaps velmi rychlý
- pro protohvězdu 30 Mo kratší než 10 000 let
- kolaps způsobí nárůst centrální teploty až na  $10^7$  K a vyšší => spustí se jaderné reakce - p-p řetězec a pak i CNO cyklus
- hvězda se rozzárí, rychle ionizuje a odfoukne zbylý materiál ze svého okolí
- 
- maximální hmotnost 100-150 Mo (horní mez není dobře známa)
- nad 100-150 Mo, jádro příliš žhavé => tlak záření převyší gravitaci => hvězda nestabilní a sama se dělí
- velmi hmotné hvězdy velmi vzácné – jen několik v Galaxii

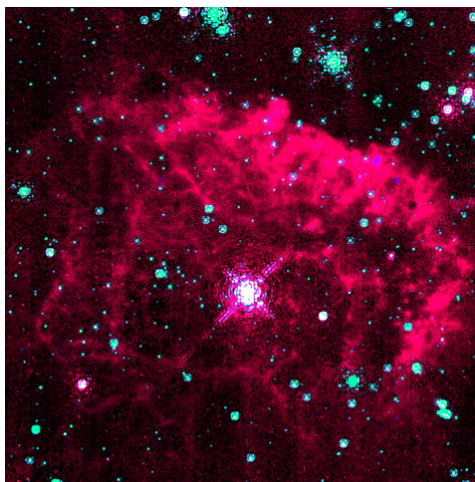
### 4.2.2 Subtilní protohvězdy

gravitační kolaps pomalejší než pro Slunce a hmotnější hvězdy (1 Mo asi 30 milionů let; 0.2 Mo až 1 miliarda let)

pokud teplota jádra přesáhne  $10^7$  K, spustí se jaderné reakce (p-p řetězec):

hvězdný vítr odvane zbytky zárodečného kokonu a disku

hvězda zvolna dosedá na hlavní posloupnost



Obrázek 4.12: The Pistol Star: A Brilliant Star in Milky Way's Core .



Obrázek 4.13: R136 is a cluster of roughly 100,000 young, massive stars in the Tarantula Nebula, located 165 000 light-years away in the Large Magellanic Cloud. ESO / P. Crowther / C. J. Evans R136a1 star 265 times more massive than the Sun, .

### 4.2.3 Objekty pod míru

minimální hmotnost cca 0.075 Mo

pod 0.075 Mo se v jádru nikdy nezapálí jaderné reakce => objekt se stane **hnědým trpaslíkem**

podobají se „superjupiterům,,“, podobné vlastnosti

energie z gravitačního kolapsu

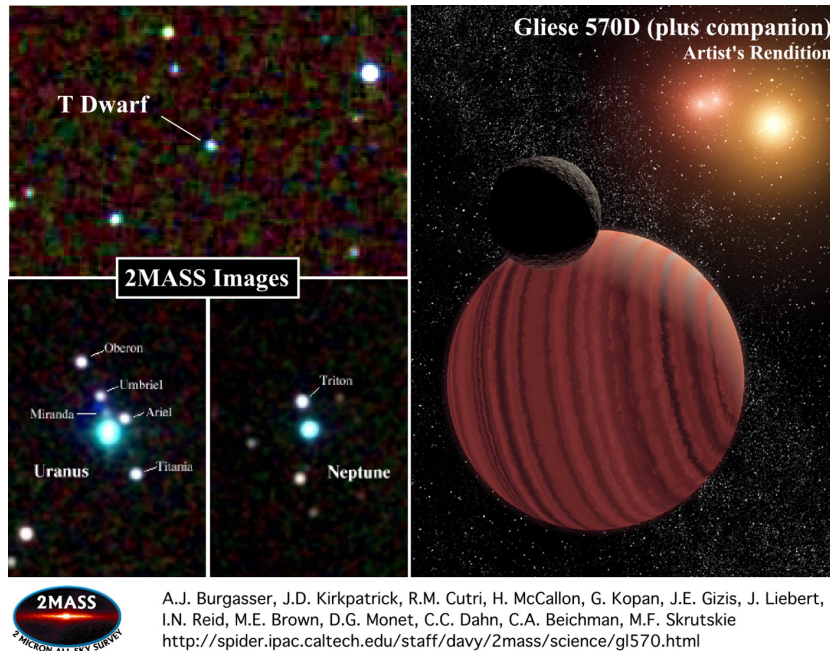
známo jen několik set (velmi slabé), detekce v IR tzv. T-trpaslíci

## 4.3 Hvězdy na hlavní posloupnosti

před HP - zdroj vyzářené energie - potenciální energie

konvekce => důkladně promísí celý objem hvězdného materiálu => *každá hvězda je na začátku svého vývoje chemicky stejnorodá*

smršťování – > růst tlaku a teploty pokračuje až do mezních hodnot – > zapálení



Obrázek 4.14: Hnědý trpaslík.

jaderných reakcí

Po zapálení jaderných reakcí

- smršťování skončí
- ustaví se rovnovážný stav
- hlavním zdrojem energie jaderné reakce (v centru!)
- počáteční chemické složení:

- 60 - 90 % vodík,
- 5 - 35 % helium,
- zbytek - těžší prvky

Hydrostatická rovnováha

rostoucí teplota jádra => jaderné fúze vodíku rychleji => roste teplota a tlak v jádru  
=> prvotní kolaps zpomaluje až se zcela zastaví (působení gravitace a gradientu tlaku v rovnováze) gradient tlaku je v rovnováze s gravitací => ani se nerozpíná ani nesmršťuje;

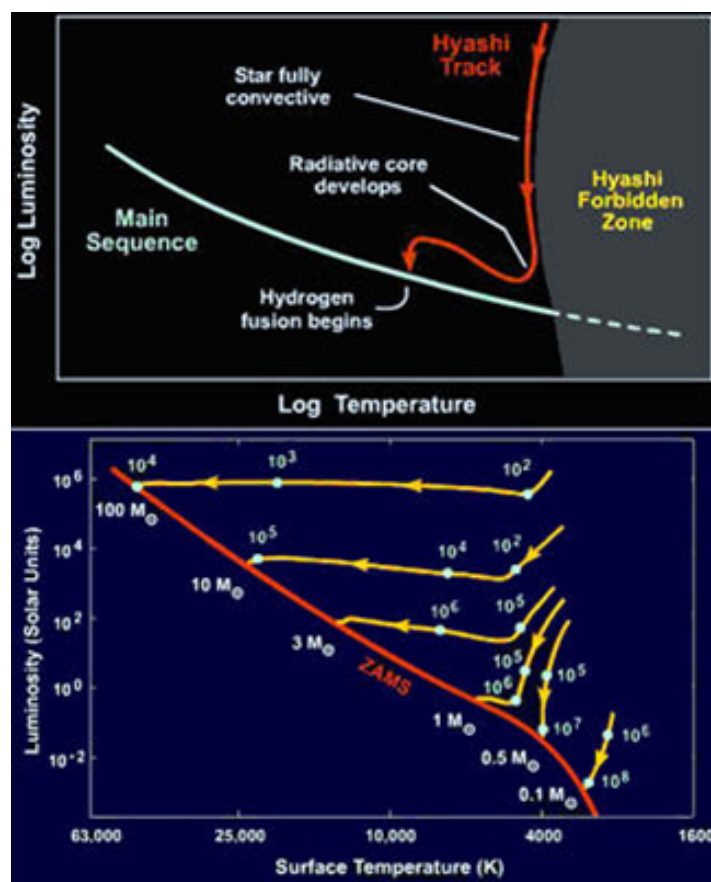
Energiová rovnováha

přenos energie je v rovnováze s produkcí energie (ztráty způsobené vyzařováním jsou plně hrazeny z tvorby energie v jádře hvězdy)

Ustavení rovnováh = mez pro 2 vývojové procesy:

1. Ustavení hydrostatické rovnováhy - konec fáze zrodu protohvězdy
2. Ustavení energiové rovnováhy - konec fáze před-HP (Pre-Main Sequence phase)





Obrázek 4.15: HRD5 - hvězdy na HP.

HR diagram - stopa vývoje hvězdy

Hvězda dosedne na hlavní posloupnost (HP), resp. ZAMS jako plně vyvinutá hvězda v hydrostatické i energiové rovnováze

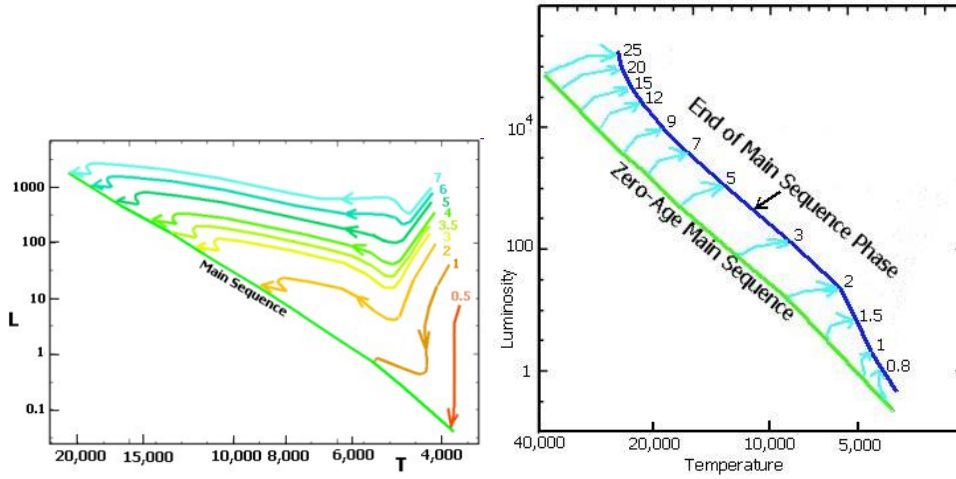
ZAMS = Zero-Age Main Sequence – hlavní posloupnost nulového stáří, počátek spalování vodíku v jádře

TAMS = Terminal-Age Main Sequence - HP konečného stáří, konec hoření vodíku v jádře

## 4.4 Hvězdy v nejlepších letech

= hvězdy na hlavní posloupnosti

Slunce – v polovině doby života, cca polovina vodíku v jádře spalena (staré, dobré Slunce v rovnovážném stavu)  
stáří 4.6 miliardy let



Obrázek 4.16: Dosednutí na HP.

během pobytu hvězdy na HP:

- průměr i zářivý výkon velmi zvolna roste
- mění se chemické složení – nejvíce v centru

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
$L$	E5	E4	E3	E2	10	1		E-1	$L_S$
$M$	30	20	10	5	3	2		0,6	$M_S$
$R$	15	10	5	3,5	2	1		0,8	$R_S$
$\rho$	0,02		0,1		0,3	0,5		2	$t \cdot m^{-3}$
$\tau$	E6	E7	E8		E9		E10		E11
$(B-V)$		-0,3		-0,2		0,0	0,2	0,5	1,0
									mag

Obrázek 4.17: Parametry hvězd na hlavní posloupnosti. Hvězdy hlavní posloupnosti.  $T_{ef}$  efektivní teplota hvězdy, spektrální třída,  $M_V$  absolutní vizuální hvězdná velikost,  $M_b$  absolutní bolometrická hv. velikost,  $L$  zářivý výkon,  $M$  hmotnost,  $R$  poloměr,  $\rho$  střední hustota,  $\tau$  doba setrvání na hlavní posloupnosti,  $(B-V)$  barevný index

hvězdné „období klidu“ - řádově  $10^6 - 10^{10}$  let

čas na HP

$$\tau_{HP} = 10^{10} \left( \frac{1}{M} \right)^{2.5} \text{ let} (M_V M_{\odot}) \quad (4.2)$$

čím má hvězda větší hmotnost, tím rychleji se vyvíjí!

Tabulka 4.1: Doba strávená na hlavní posloupnosti

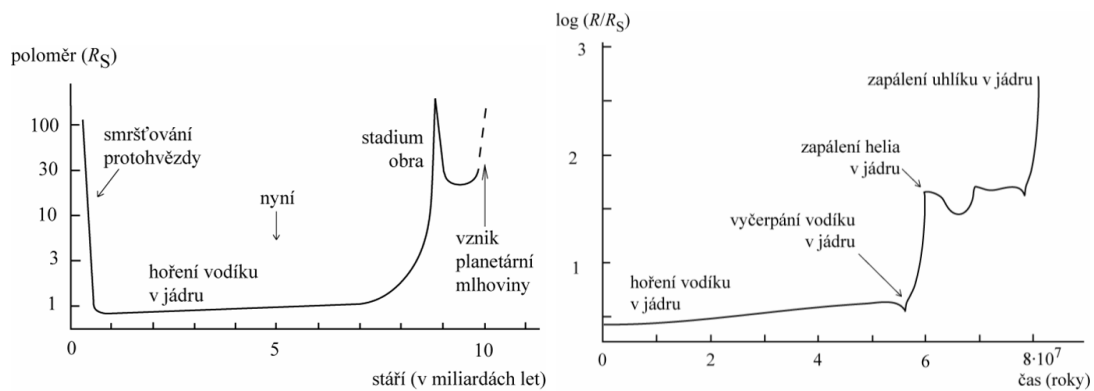
Hmotnost hvězdy [ $M_{\odot}$ ]	Doba hoření vodíku v jádru (roky)
25	$7 \cdot 10^6$
15	$1 \cdot 10^7$
9	$2 \cdot 10^7$
5	$6 \cdot 10^7$
3	$2 \cdot 10^8$
1	$1 \cdot 10^{10}$

proč?

hmotnost je určující pro centrální teplotu a tlak => rychlost jaderného hoření!

během pobytu hvězdy na HP:

- průměr i zářivý výkon velmi zvolna roste
- mění se chemické složení – nejvíce v centru

Obrázek 4.18: Změny velikosti Slunce a hvězdy  $5 M_{\odot}$  v průběhu vývoje.

## 4.5 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:

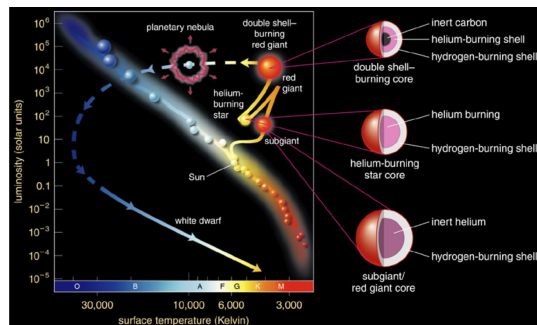
- jádro hvězdy - nadále se smršťuje a zahřívá – > vyšší produkce energie ve slupce
- obálka hvězdy – zvýšený tok energie zdola => rozpíná se a chladne => červený obr nebo veleobr (stěhování v HRD)

## 4.6 Závěrečná stadia vývoje hvězd

Hvězdní obři a veleobři

Senior zrychlí!

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



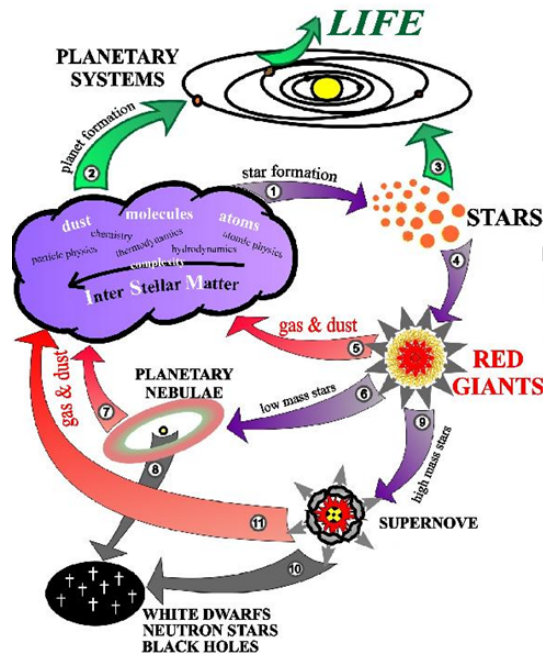
Obrázek 4.19: Vývojová stopa Slunce v HR diagramu po opuštění hlavní posloupnosti.

## 4.7 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-



Obrázek 4.20: Schéma vývoje hvězdy.

#### 4.7.1 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 km/s
- 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

Subrahmanyan Chandrasekhar

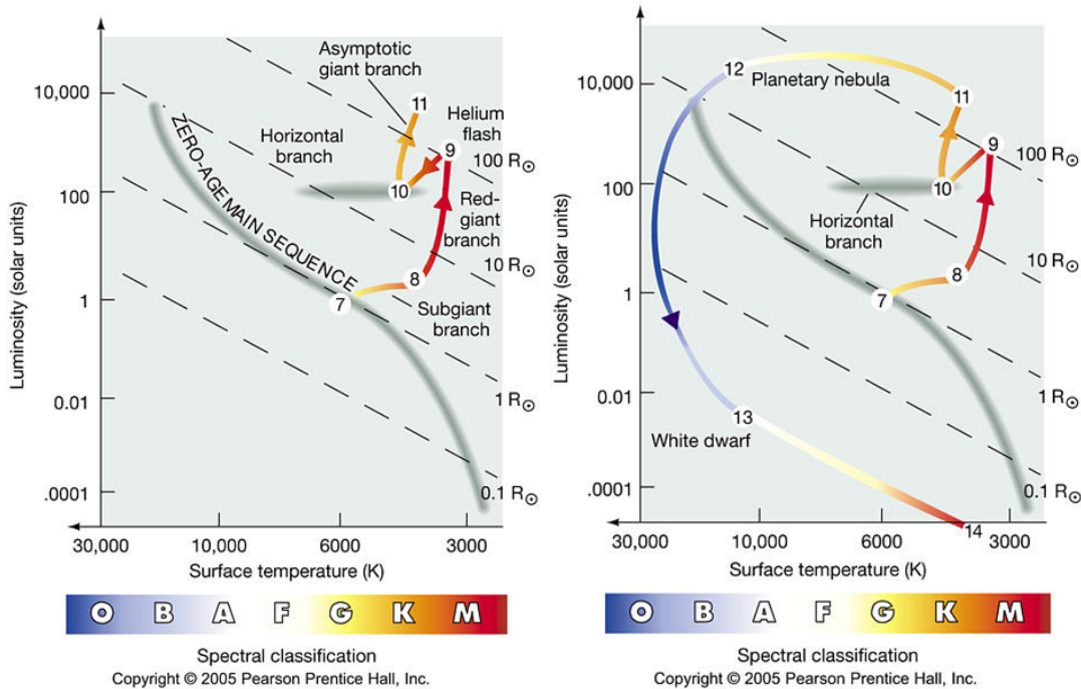
obrázky - Planetární mlhoviny mají často velice zvláštní tvary, M27, M57

V naší Galaxii – jen asi 1500 planetárních mlhovin

Proč tak málo?

je to velmi krátké vývojové období

krátké období, jako když se líhne kuře ze skořápky



Obrázek 4.21: HRD - vývojové stopy hvězd po opuštění HP.

#### 4.7.2 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  $\rightarrow$  neutronová hvězda (řádově 10 km,  $M_{\odot}$ )
- uvolněná energie – výbuch supernovy – většina energie v neutrinech
- 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.

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

1572 Cas - Tychoova supernova



Obrázek 4.22: 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 <http://hubblesite.org/gallery/album/nebula/planetary/>

1604 Oph - Keplerova supernova

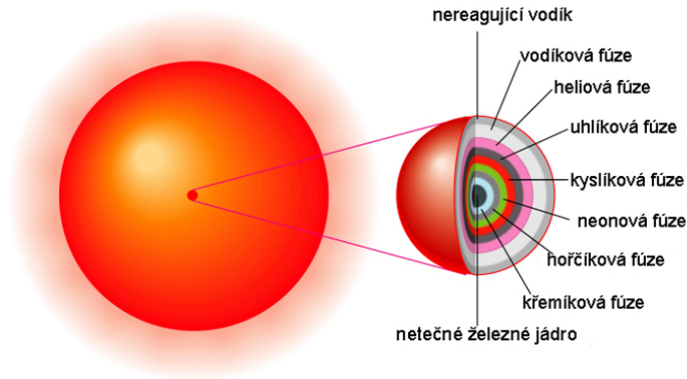
24. II. 1987 – Dor – LMC - v maximu 4 mag

kdy vybuchne další supernova, kterou uvidíme pouhýma očima?

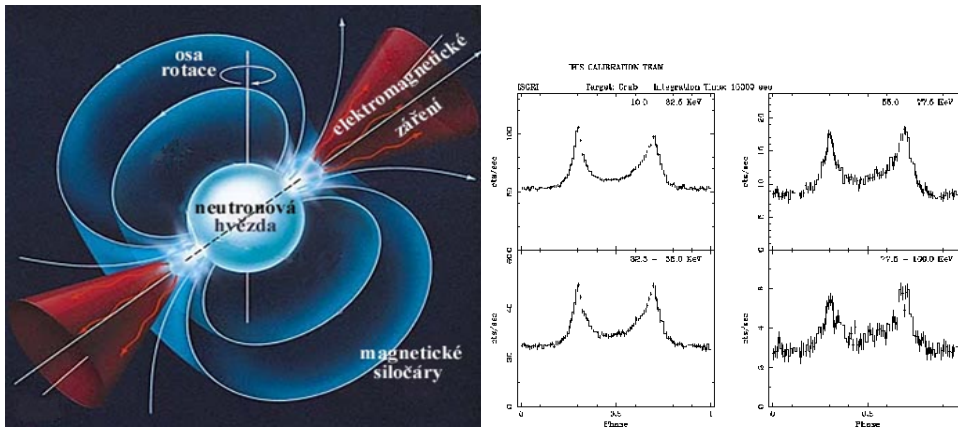
obrázky - detaily srdce M1, řasy v Labuti....

Kandidáti na supernovy

Betelgeuse



Obrázek 4.23: Slupky hoření.



Obrázek 4.24: Pulsar.

## 4.8 Zvláštnosti vývoje těsných dvojhvězd

Rozdělení dvojhvězd

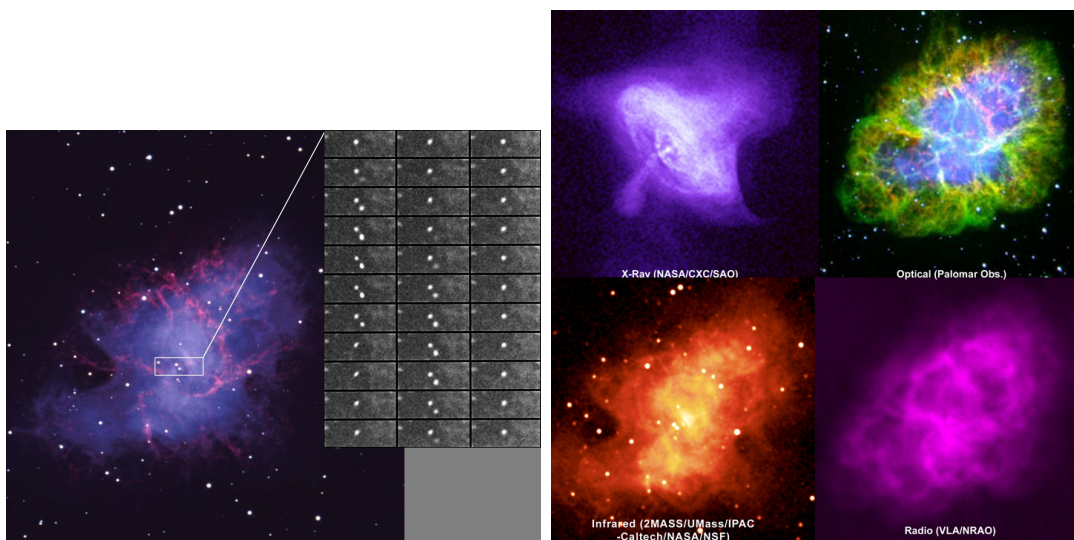
podle konfigurace systému (Kuiper, Kopal)

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

Rozdělení dvojhvězd - podle konfigurace a složek

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





Obrázek 4.25: Krabí mlhovina M1.

zákrytová dvojhvězda - vzájemné zákryty jednotlivých složek

typický představitel – např.  $\beta$  Per,  $\beta$  Lyr

vývojový paradox Algolu

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

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

v čem je paradox?

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

**ALE NENÍ !**

Vysvětlení - pes 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

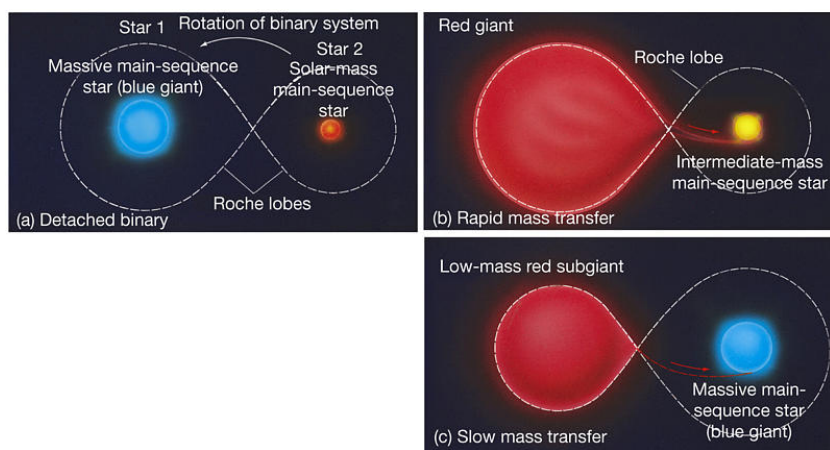
=> pes požívá psa

Zdeněk Kopal

KP Aql - oddělená soustava

AD Her - polodotyková soustava (algolida)

BX And - dotyková soustava



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

Obrázek 4.26: 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

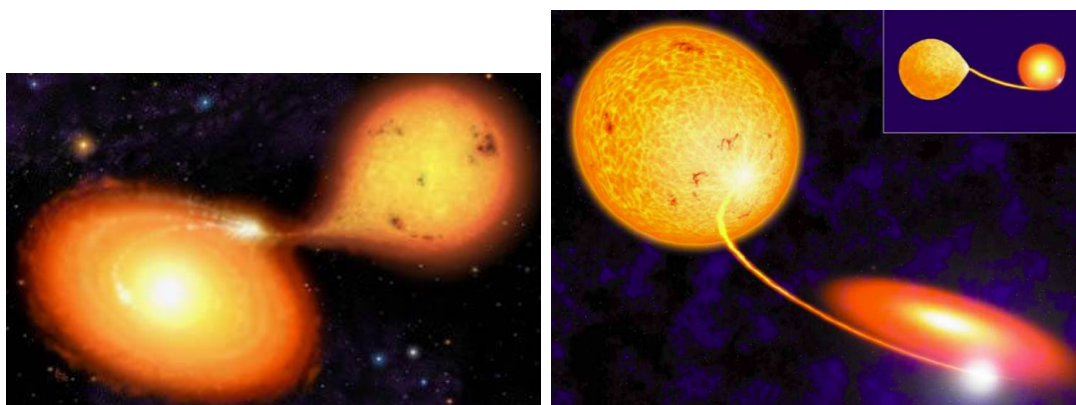
- dopad – přímo na souputníka

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

**Důsledky (projevy)** – změna periody oběhu,

- změny jasnosti, projevy ve spektru

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



Obrázek 4.27: Přetok hmoty.

### 4.8.1 Novy

změna jasnosti - během několika dní se zjasní o 10 mag i více, a pak pozvolna (typický 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 -  $\rightarrow$  tlustá slupka na BT -  $\rightarrow$  roste T, p -  $\rightarrow$  zapálení termonukleární reakce -  $\rightarrow$  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 -  $\rightarrow$  BT „vychytává“ hvězdný vítr -  $\rightarrow$  spad na BT



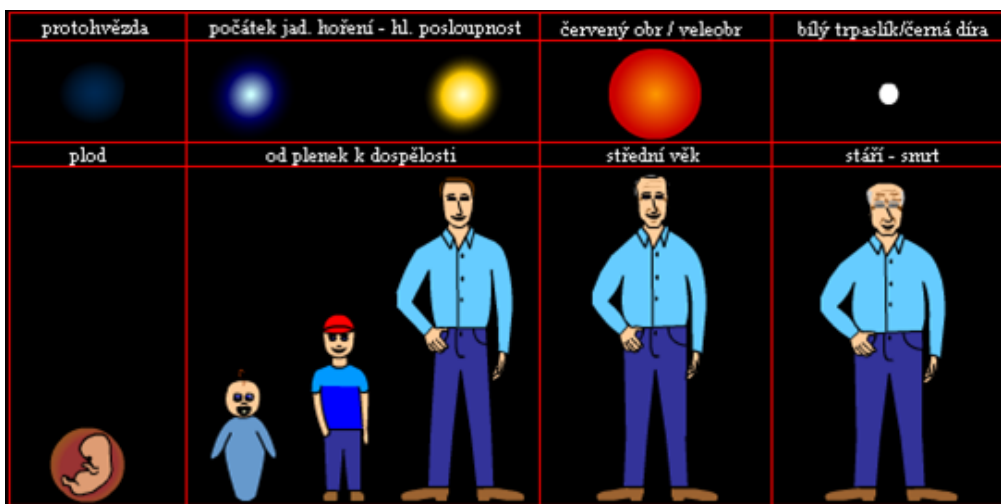
Obrázek 4.28: Výbuch novy.

možnosti pozorování

Rekapitulace

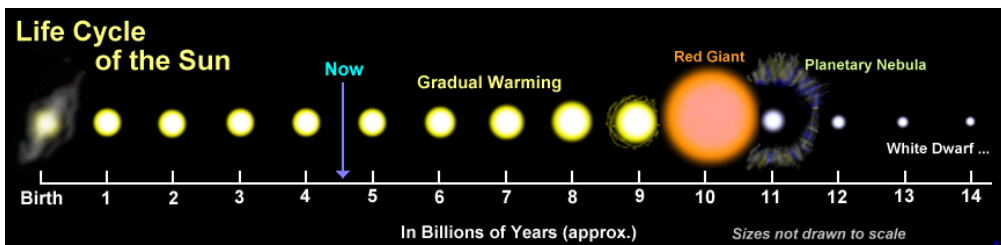
vývoj hvězd = nevratný děj

recyklace - opětovné použití látky - hvězdný vítr, supernovy... myslící prach supernov  
vývoj (osamocených) hvězd - určen změnami jejich chemického složení



Obrázek 4.29: Srovnání vývoje člověka a hvězdy.

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



Obrázek 4.30: Vývoj Slunce.

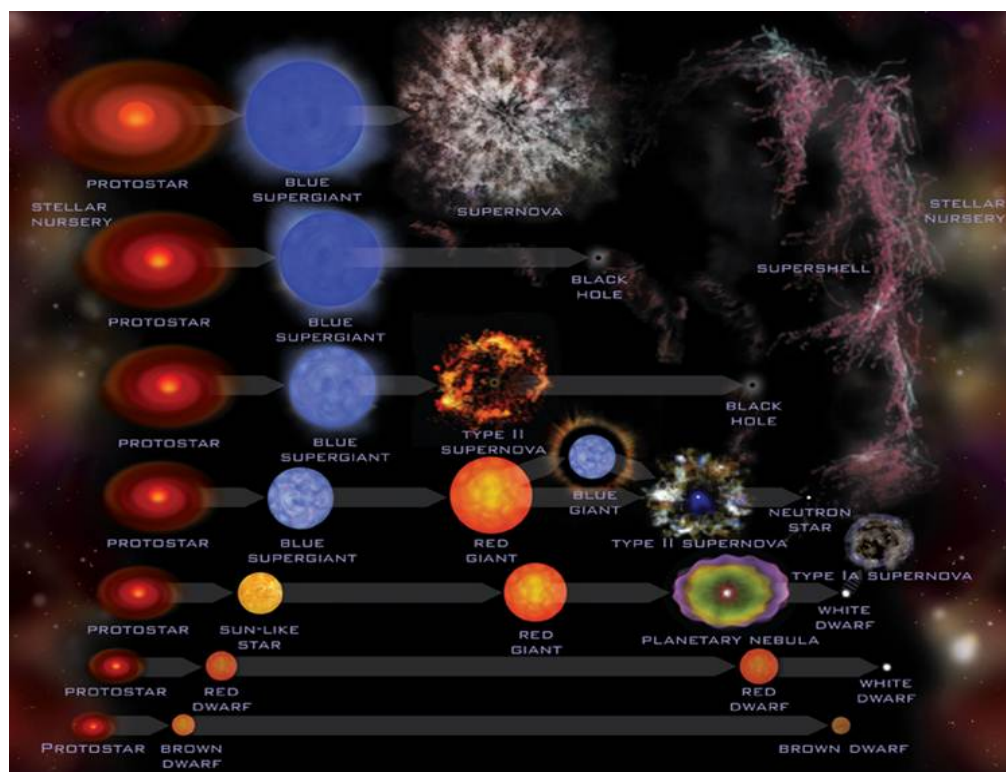
## Doplňující literatura

### Shrnutí

Před zapálením jaderných reakcí - gravitační smršťování protohvězd

2 fáze:

1. velmi rychlá – volný pád
2. pomalá – ustavení hydrostatická rovnováhy



Obrázek 4.31: Vývoj hvězd.

## 5 Hvězdná uskupení

málopočetné skupiny hvězd - dvojhvězdy, trojhvězdy, čtyřhvězdy...

hvězdokupy

kulové

otevřené

- pohybové

hybridní asociace



Obrázek 5.1: Představa vícehvězdy.

### 5.1 Málopočetné skupiny hvězd – hvězdné soustavy (multiple stars)

dvojhvězdy – Sirius, Prokyon – hvězda hl. posloupnosti + bílý trpaslík Mira Ceti – pulsující proměnná  $\delta$  Cep - cefeida  $\epsilon$  Aur - zákrytová dvojhvězda ...

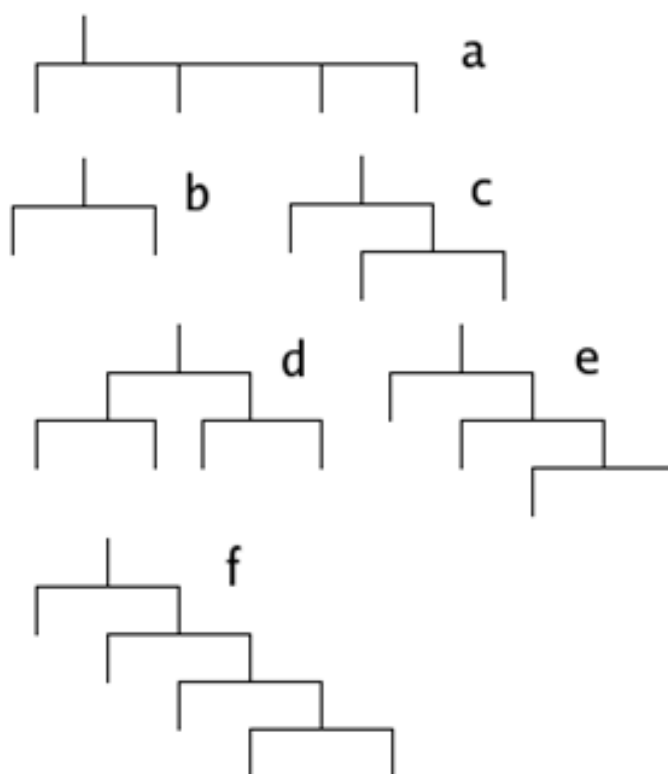
trojhvězda - Polárka – trojhvězda, jedna složka velmi blízká k hlavní složce  
 $\alpha$  Cen – hlavní dvojhvězda – žlutí trpaslíci (A+B) + červený trpaslík Proxima; vzdálenost  
 A-B = 11 AU, (A+B) - C  $\sim$ 15,000 AU  
 HD 188753 – trojhvězda (3 trpaslíci) 149 ly od Země

čtyřhvězda (quadruple) - 4 Cen  
 Mizar - Castelli a Galileo, později spektroskopie Mizaru A a B => obě dvojhvězdy  
 HD 98800,  $\epsilon$  Lyr, V994 Her

pětihvězda (quintuple) - 91 Aqr,  $\delta$  Ori,  $\sigma$  Ori

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

sedmihvězda (septuple)  $\nu$  Sco, AR Cas



Obrázek 5.2: Hierarchie.

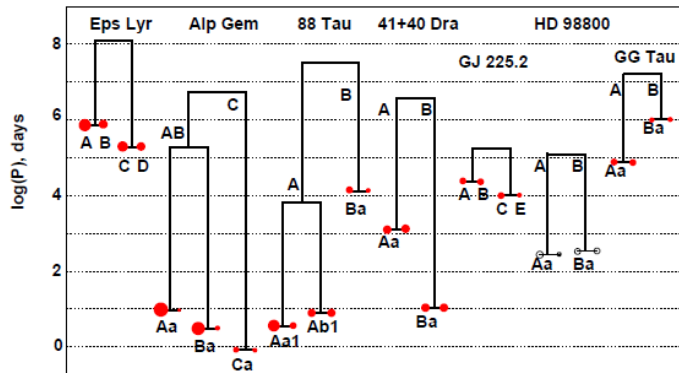
katalog vícenásobných soustav: Tokovinin  
 neúplný - výběrové efekty  
 výzkum pokračuje

V994 Her (Chung-Uk Lee et al.)

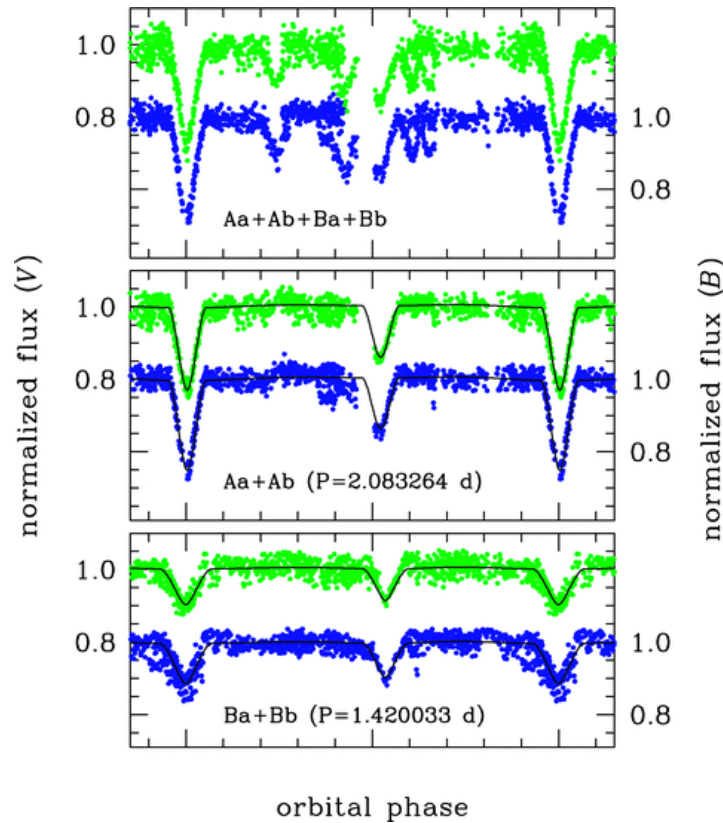
### 5.1.1 Dvojhvězdy

Úvod, výskyt dvojhvězd, těsné dvojhvězdy

odkaz na předchozí kapitoly 1, 4



Obrázek 5.3: Hierarchie soustav



Obrázek 5.4: V994 Her

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



RD nebo hnědý trpaslík

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

Rozmanitost světa dvojhvězd

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

poloosa trajektorie: a i 0.05 Ro  $\sim$  28 AU a více

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

zvláštnosti: akreční disky, plynné proudy, společné obálky

## 5.2 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?

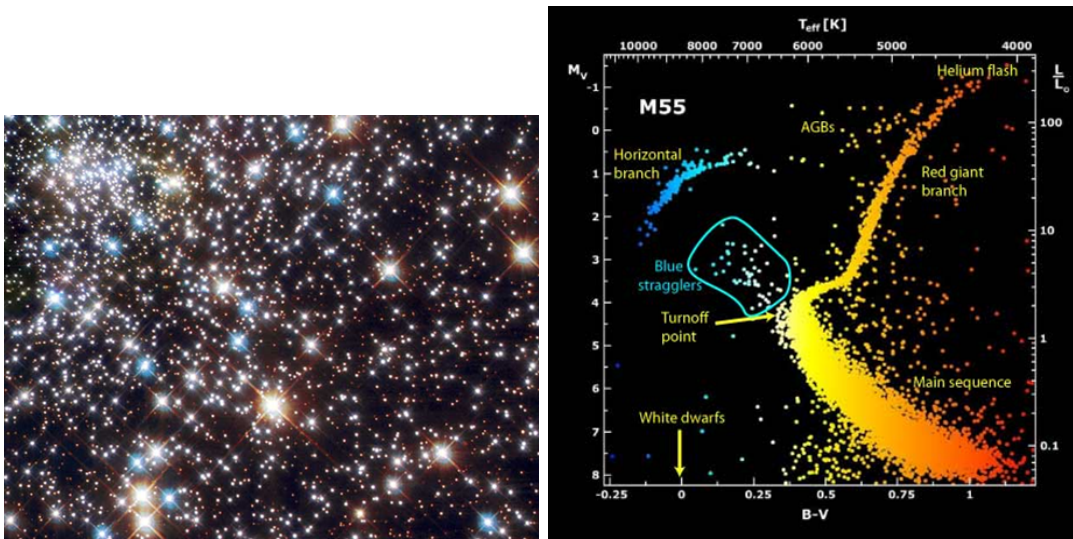
otevřené, kulové, pohybové - vývojové zvláštnosti, popis

### 5.2.1 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  $Z \Rightarrow$  staré hvězdy červené a žluté hvězdy o hmotnostech  $< 2 M_{\odot} \Rightarrow$  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 5.5: Modří opozdilci v NGC 6397 a v HRD.



Obrázek 5.6: 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> .

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



Obrázek 5.7: 47 Tuc.

### 5.2.2 Otevřené hvězdokupy

- tvar nepravidelný
- počet hvězd – řádově desítky až stovky, výjimečně více
- průměr – 5 - 50 ly (většinou do 20 ly)
- slabě gravitačně vázané => rozpadají se
- členové: mladé modré (zářivé) hvězdy – žijí krátce, ale OH se dříve rozpadne hvězdy populace I

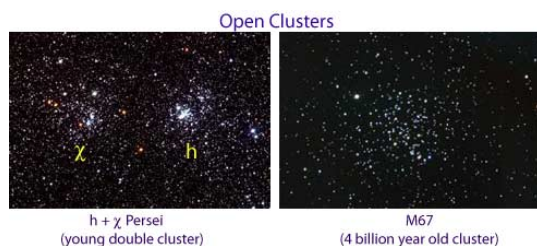
- obvykle desítky až stovky hvězd; průměr až 10 ly; 15 - 250  $M_{\odot}$ ; známých více než tisíc, ale odhadem v naší Galaxii až 100000;

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

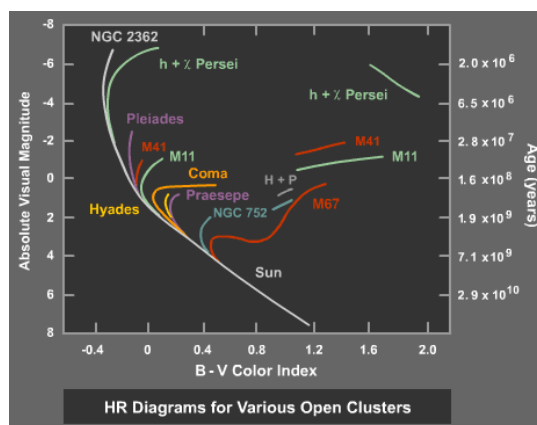
DAML02

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

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 5.8: OC



Obrázek 5.9: Barevný diagram otevřených hvězdokup.

### Vznik a vývoj otevřených hvězdokup

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

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

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

- vypařováním



Obrázek 5.10: Credit: N.A.Sharp/NOAO/AURA/NSF (left), Nigel Sharp, Mark Hanna/NOAO/AURA/NSF (right) Hyady a Plejady: Alson Wong.

### 5.2.3 Hybridní? - zvláštní?

NGC 6791 - jedna z nejstarších a největších známých otevřených hvězdokup

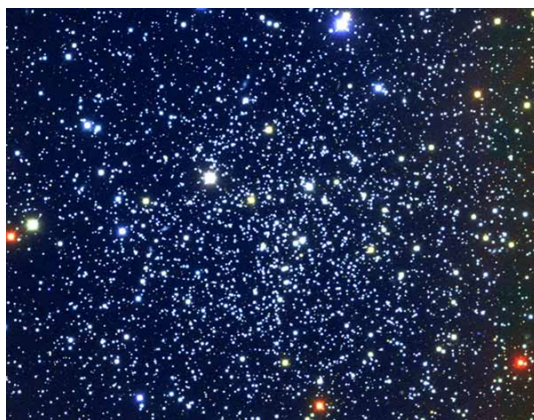
ale !

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

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

### 5.2.4 Hvězdné asociace

dvě možnosti

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

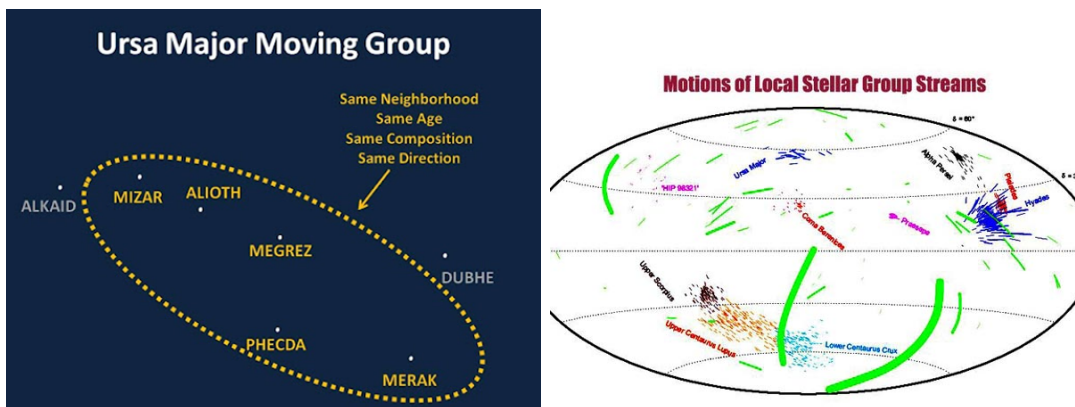
=> hvězdné asociace nebo pohybové hvězdokupy

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 5.12: Pohybové hvězdokupy



Obrázek 5.13: OB asociace Ara OB1.

Doplňující literatura  
Shrnutí

## 6 Galaxie a galaxie

xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx -použito v kapitole 4 - přepsat xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

Galaxie představuje obrovský gravitačně vázaný, vnitřně strukturovaný a organizovaný útvar tvořený hvězdami, mezihvězdným plynem a prachem a nezářivou látkou. Počet takových útvarů ve viditelném vesmíru se odhaduje na řádově jeden bilión. Nás ale bude v první řadě zajímat ta soustava, v které se nachází naše Slunce.

### 6.1 Naše Galaxie se představuje

z řeckého *γαλαξιασ*

Gallaxia hodos – Mléčná dráha Podle řeckých mýtů se Mléčná dráha na oblohu dostala takto:

V řeckých bájích často vystupuje záletný Zeus. V našem příběhu si vyhlédl královnu Alkménu a vzal na sebe podobu jejího manžela, krále Amfytrióna. Zálet byl úspěšný, po čase se narodil Hérakles, který byl ale jen smrtelným polobohem. Aby Zeus zajistil Héraklovi nesmrtelnost přiložil jej tajně k prsu své ženě Hére, aby se napil mléka nesmrtelnosti a stal se tak skutečným bohem. Héra se však při nechtěném krmení vzbudila a prudkým pohybem cizí dítě odhodila. Při tom se ale její mléko rozstříklo po temném nebi a vytvořila se mléčná dráha.

Galaxie (vlastní jméno) x Mléčná dráha („boční“ pohled na Galaxii)

xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx -použito v kapitole 4 - přepsat xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx



Obrázek 6.1: The Milky Way shines over the Atacama Desert of Chile. Credit: ESO/Y. Beletsky

**Mléčná dráha** – antika: Anaxagoras (cca 500–428 př.n.l.), Démokritos (460 - 370 př. n. l.), Aristoteles (384–322 př.n.l.) – tvořena mnoha hvězdami,

ale !

Aristoteles – Mléčná dráha = důsledek hoření hvězdných výparů v horní části zemské atmosféry

Olympiodorus mladší (495-570 n.l.) – sublunární M.d. by měla paralaxu

=> snaha o změření paralaxy arabskými astronomy 11.-13. st.

potvrzení charakteru M.d. - 1609 Galileo Galilei

*Proč vlastně máme Mléčnou dráhu? aneb proč nejsou hvězdy na hvězdné obloze rozmístěny více rovnoměrně?*

1. řešení – filozofové! - 18. století – Swedenborg (1734), Wright (1750), Kant (1755)  
– shodně: M.d. = hvězdný ostrov diskového tvaru

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.  $7,7 \cdot 10^{36}$  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 ly = 30 kpc =  $9 \cdot 10^{17}$  km

### 6.1.1 Historie poznávání

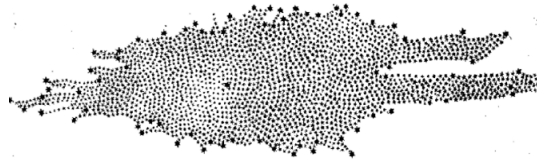
1. model Galaxie z pozorování - William Herschel  
v 80. letech 18. st. - počty hvězd v několika stech oblastí nebe

chybné předpoklady:

- všechny hvězdy nemají 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 6.2: 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

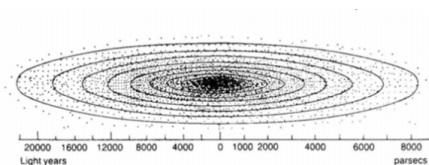
### Kapteynův model Galaxie (Kapteynův vesmír)

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



Obrázek 6.3: Kapteynův model Galaxie.

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

### 6.1.2 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.

### 6.1.3 Kde se ztrácí světlo aneb Mezihvězdný plyn a prach

Mezihvězdná látka - důležitá součást Galaxie - zkresluje náš pohled na okolní vesmír! vznikají z ní další hvězdy i planety!

Složky:

**plyn** – nehmotnější složka, zejména molekulární vodík (další prvky dle četnosti výskytu prvků ve vesmíru)  
 molekulová oblaka – cca 80 % hmotnosti mezihvězdné látky  
 oblaka neutrálního vodíku (oblasti H I) – mlhoviny s převládajícími atomy neutrálního vodíku - nezáří v optickém oboru spektra (21 cm),  
 typicky - rozměry 10 pc, vzdálenosti oblak 30 pc, teplota 40 - 120 K, hustota 1 - 10 atomů·cm<sup>-3</sup>. ionizovaný vodík (oblasti H II) – červeně svítící mlhoviny, kolem horkých hvězd, teplejší ale řidší než H I oblasti

**prach** – 1 % hmotnosti mezihv. látky;  
 křemičitanová, uhlíková (grafitová), kovová, ledová zrnka

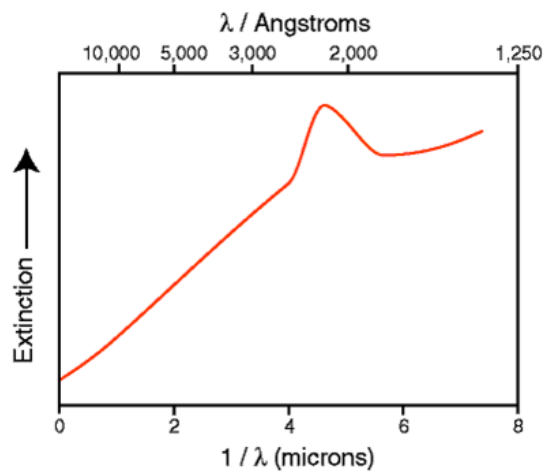
$$m_V - M_V = 5 \log r - 5 + A_V \quad (6.1)$$

### 6.1.4 Galaktická souřadnicová soustava

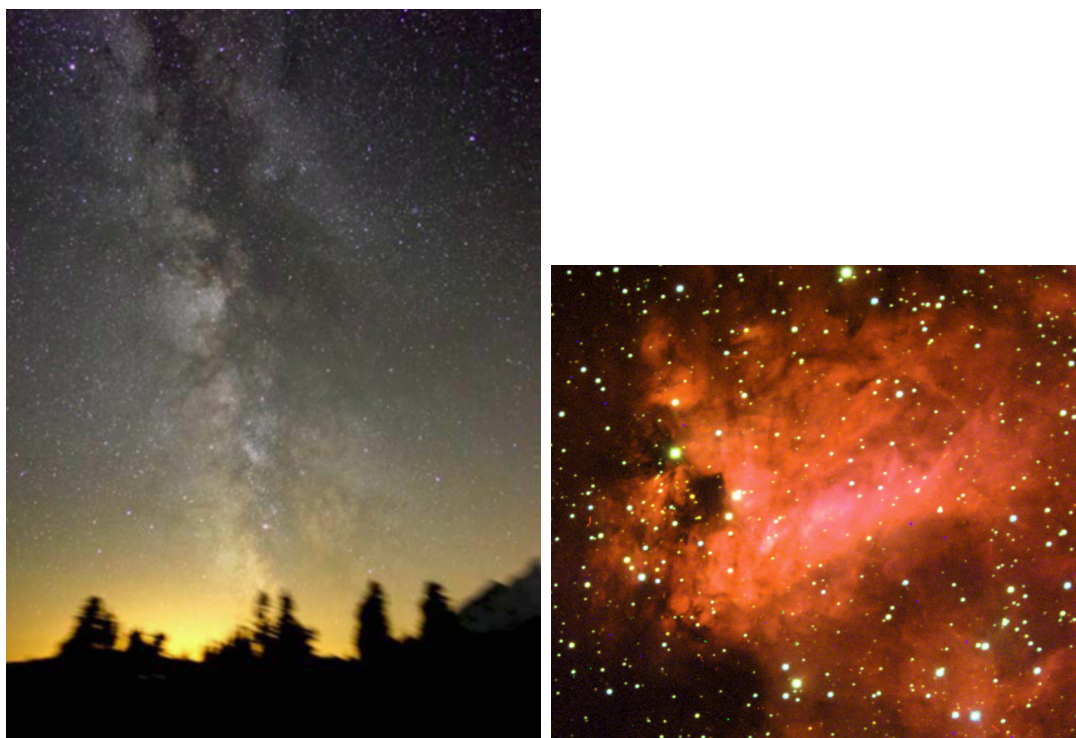
Základní rovina - rovina největší koncentrace hvězd v Galaxii (na hvězdné obloze - přibližně Mléčná dráha)

Základní rovina (galaktický rovník) - sklon galakt. a světového rovníku 62°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°),



Obrázek 6.4: Mezihvězdná extinkce - graf.



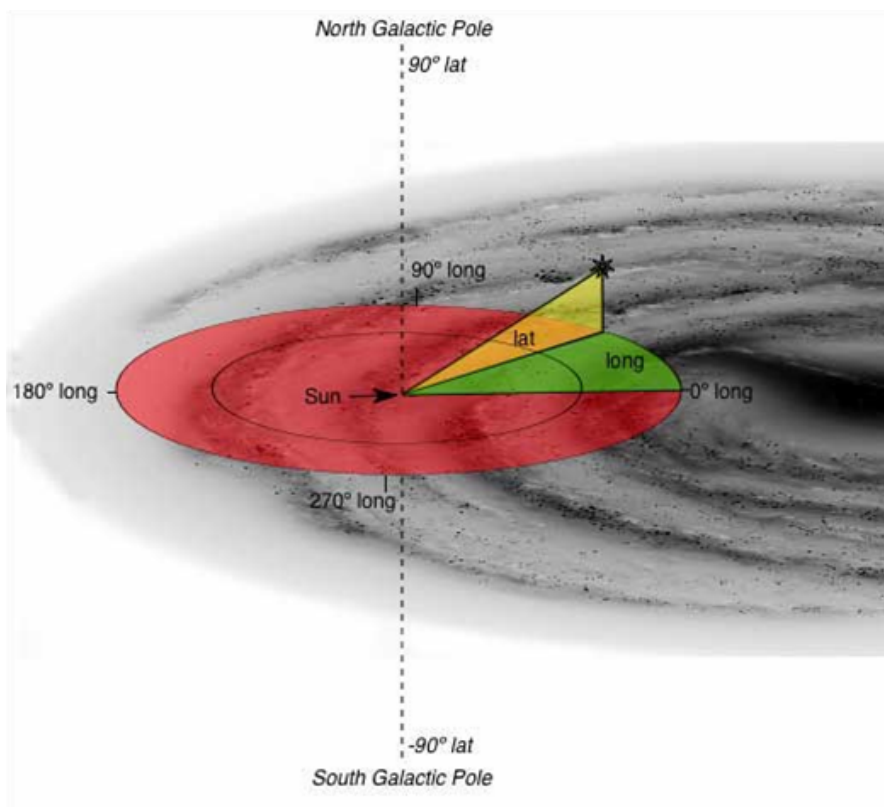
Obrázek 6.5: Mléčná dráha a oblast HII v mlhovině M17 Omega.

galaktická šířka  $b$  ( $0^\circ$  až  $\pm 90^\circ$ ).

(pravotočivá souřadná soustava)

### 6.1.5 Anatomie naší Galaxie

Složení Galaxie – hvězdy, mezihvězdná látka, skrytá hmota



Obrázek 6.6: Galaktické souřadnice.

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

**Disková složka** - průměr 30 kpc, disk mimo střed jen 1 kpc tlustý, uprostřed galaktická výduť – koule o průměru 4-5 kpc;

Slunce – 15 pc od galaktické roviny, 8,0 kpc od středu; patří sem většina hvězd - populace I; účastní se galaktické rotace; stáří hvězd - cca 5 miliard let, od roviny Galaxie - střední vzdál. 300 pc

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

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

Bublíny - objev r. 2010 družice Fermi, původ neznámý

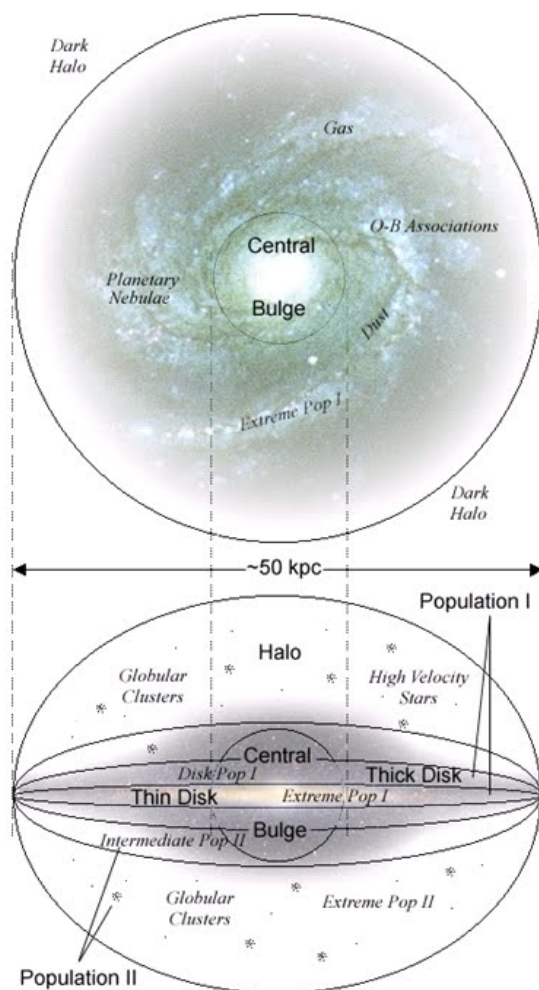
### 6.1.5.1 Disková a plochá složka

Spirály

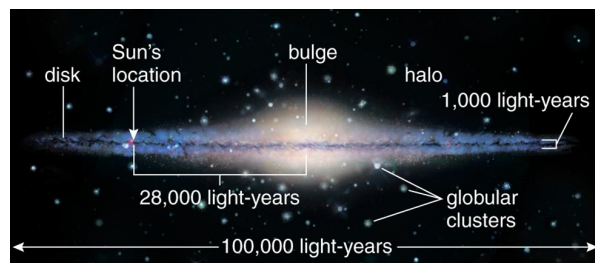
- spirální ramena - nahuštění hvězd a mezihvězdné látky

- stabilní hustotní vlna

- ve spirálních ramenech - zvýšená hustota mezihvězdné látky => vznik nových hvězd; žhavé hmotné hvězdy a mladé otevřené hvězdokupy



Obrázek 6.7: Anatomie Galaxie.

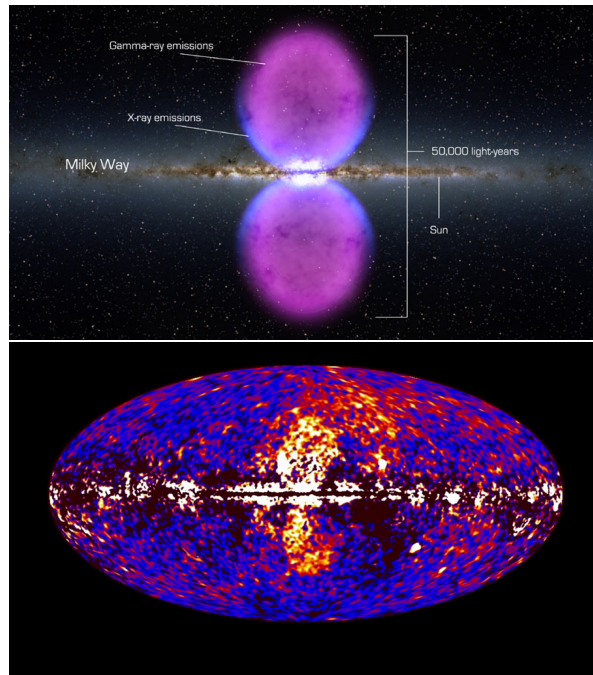


Obrázek 6.8: Anatomie Galaxie.

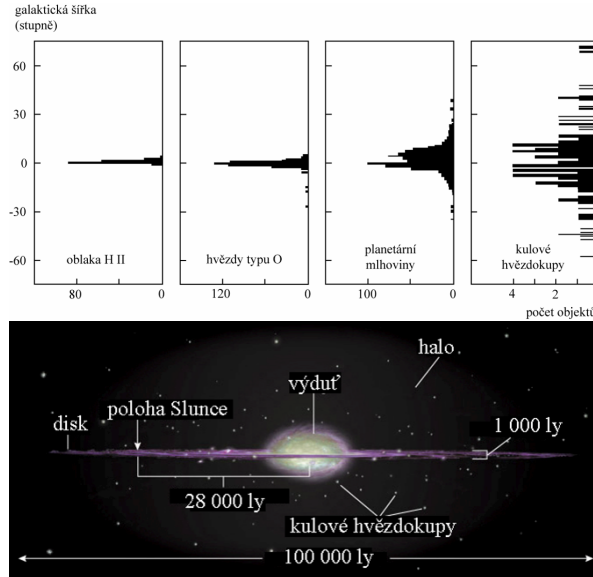
- spirální struktura Galaxie - podoba s blízkými galaxiemi (např. M 31)
- důkazy - radioastronomie

Naše Galaxie

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



Obrázek 6.9: Galaktické bubliny.



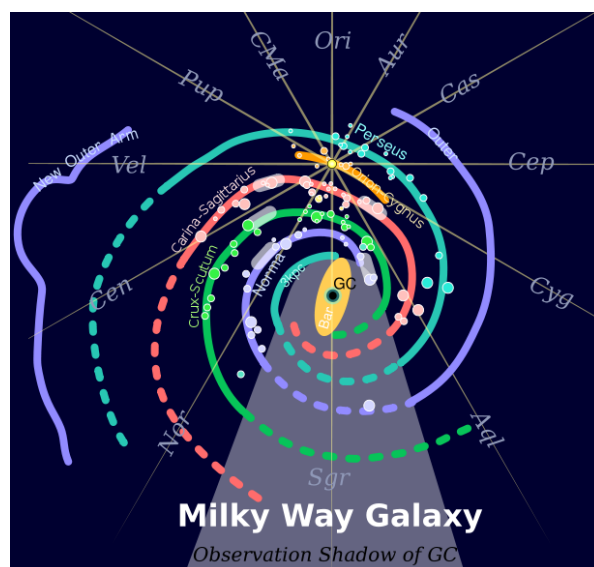
Obrázek 6.10: Rozložení některých druhů objektů v Galaxii. První dva jsou v ploché složce, další v diskové, poslední v kulové složce Galaxie.

- 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)



Obrázek 6.11: Spirální ramena Galaxie.

### 6.1.5.2 Jádru Galaxie

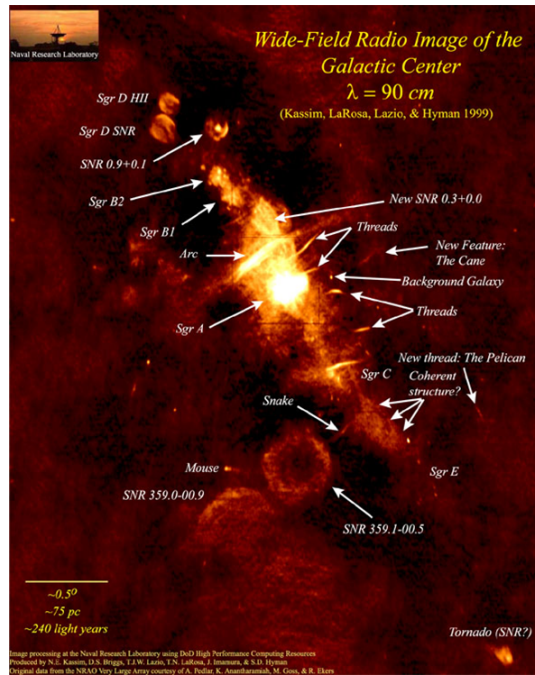
centrum Galaxie – hvězdná obloha mezi  $\gamma$  Střelce a  $\theta$  Hadonoše

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

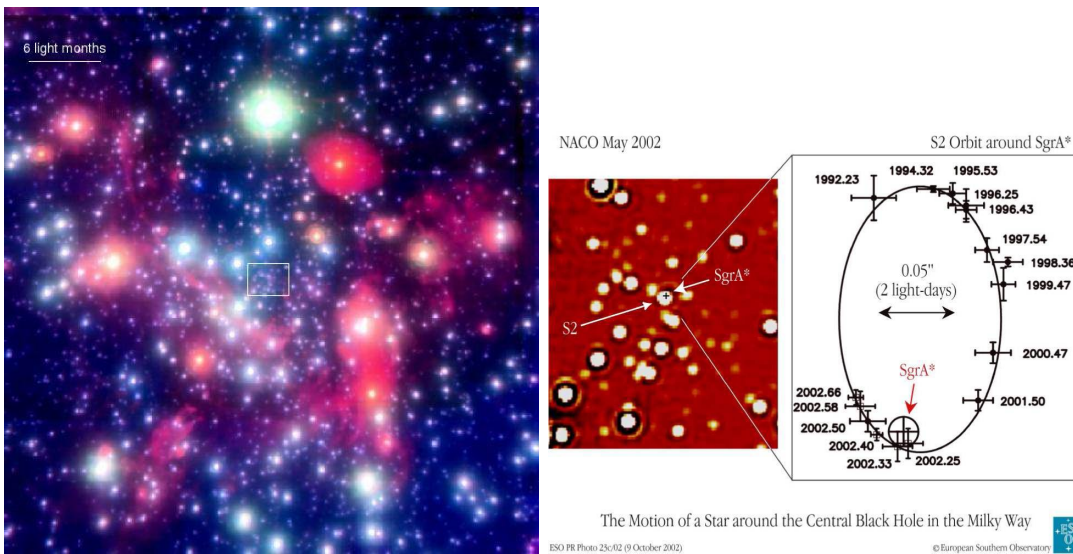
#### Skryté jádro

- jádro Galaxie
  - patrně obrovská, mírně zploštělá kulová hvězdokupa o rozměrech 4 x 5 kpc
  - nejčtenější slabí červení trpaslíci
  - obklopeno hustým prstencem mezihvězdné látky => nelze zkoumat jádro ve vizuálním oboru spektra
  - koncentrace hvězd směrem ke středu prudce roste => vyšší pravděpodobnost blízkých setkání hvězd.
- galaktické jádro – cca 1 pc, výrony plynu a netepelného radio- vého záření - výsledek interakce jedné či dvou velmi hmotných černých děr s hvězdami a mezihvězdnou látkou – Sgr A ( $3,6 \cdot 10^6 M_{\odot}$ )

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



Obrázek 6.12: Jádru Galaxie.



Obrázek 6.13: Jádru Galaxie.

### 6.1.6 Rotace Galaxie

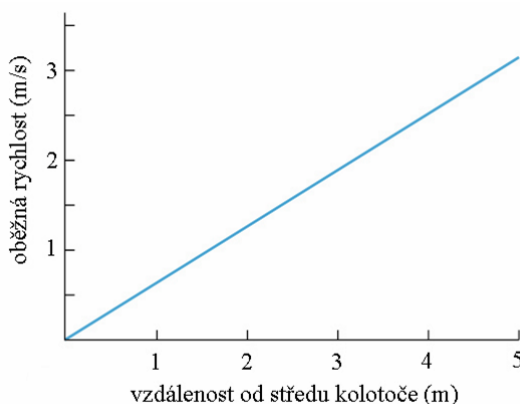
prokázána 1927 Jan Oort, 1932 – první poukázal na temnou hmotu  
 hvězdy – rychlost oběhu kolem středu Galaxie – závisí na vzdálenosti od středu (z měření radiálních rychlostí a vlastních pohybů hvězd)

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;



Obrázek 6.14: Rotační model galaxie s rovnoměrným rozložením hmoty - předpokládáme, že prostorová hustota rozložení hvězd  $\rho$  je konstantní v celém galaktickém prostoru. Nejvíce se tomuto modelu přibližuje situace v blízkosti galaktického jádra. Za předpokladu kruhových drah hvězd: závislosti rotační rychlosti  $v$  na vzdálenosti  $r$  od osy rotace - Na libovolný bod A uvnitř galaxie působí odstředivá síla  $F_1 = mv^2/r$ , kde  $m$  je hmotnost hvězdy,  $r$  její vzdálenost od osy rotace,  $v$  její rotační rychlost. Vedle síly  $F_1$  na bod A působí také přitažlivá síla  $F_2$ , jejímž zdrojem je hmotnost vnitřního elipsoidu.  $F_2 = G(\rho r^3 m)/r^2 = krm$ , kde  $k$  je koeficient úměrnosti, objem elipsoidu závisí na  $r^3$ . Z rovnosti  $F_1 = F_2$  vyplývá, že  $v = \sqrt{(k)r}$ , tedy rotuje jako tuhé těleso. Převzato: Vademecum

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

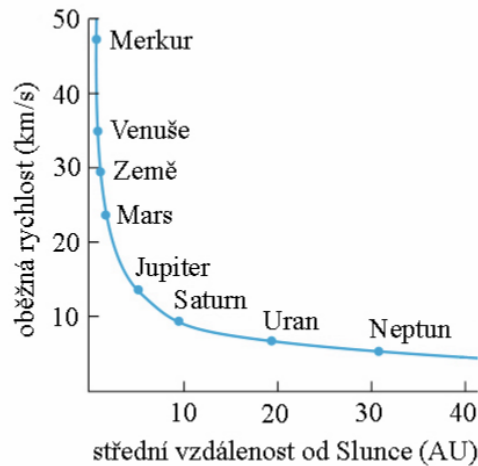
hmotnost jádra  $\gg$  hmotnost hvězdy  $\Rightarrow$  podobné jako u Sluneční soustavy  $\Rightarrow$  problém dvou těles (Keplerovými zákony)

oběžná rychlost závisí na vzdálenosti nepřímo úměrně

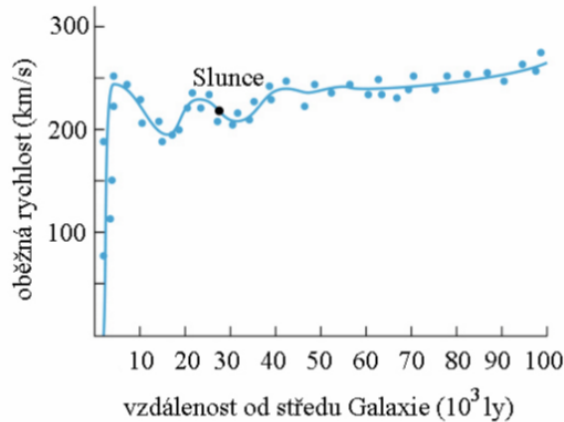
Rotační vlastnosti Galaxie – složité, *diferenciální rotace* nevyhovuje - model pevné desky ani koncentrace látky k centru

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

Obr: z průběhu rotačních křivek – hmotnost galaxií



Obrázek 6.15: 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

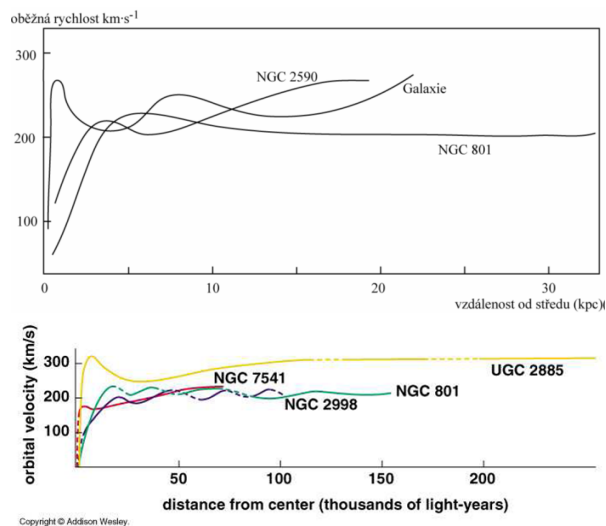


Obrázek 6.16: Rotační křivka.

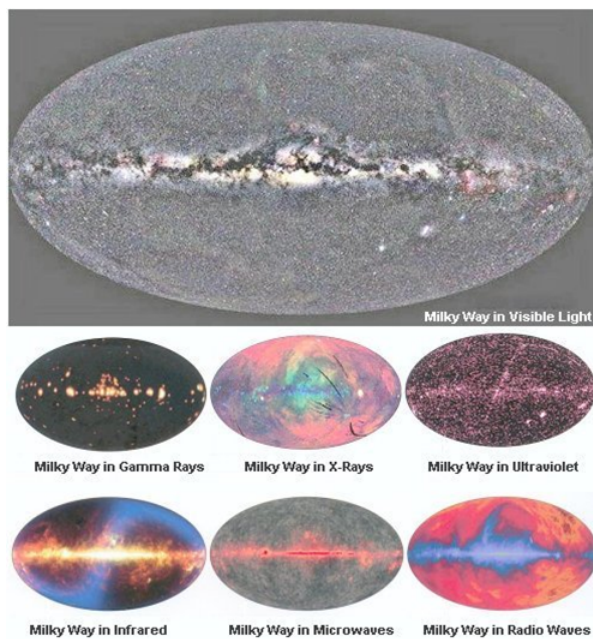
## 6.2 V říši galaxií

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

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



Obrázek 6.17: Rotační křivky.



Obrázek 6.18: Galaxie v různých oborech.

Hubbleova klasifikace galaxií

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

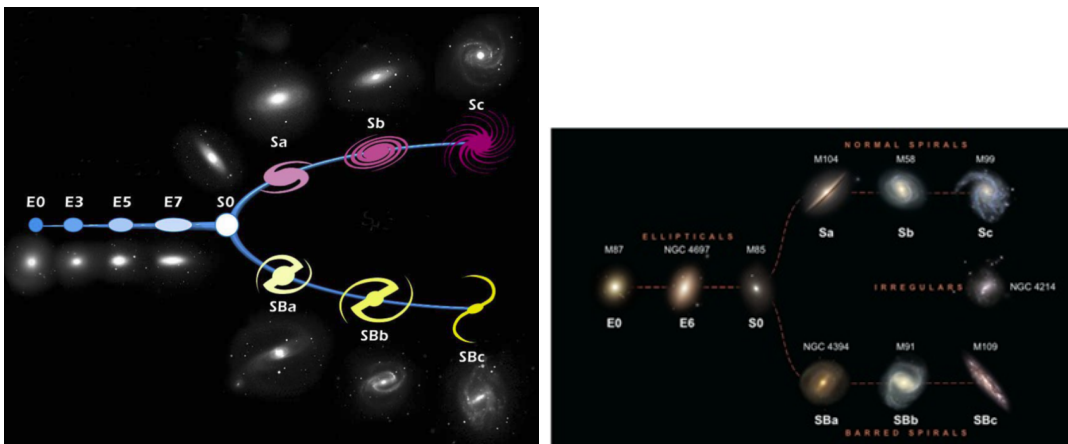
### Falešná představa?

Je Hubbleova sekvence vývojová?

- 1930 - 1950: ANO,  
ale kterým směrem? E-  $\rightarrow$  S nebo S -  $\rightarrow$  E?  
Hubble sám: eliptické nemluvně -  $\rightarrow$  čočková dorostenec -  $\rightarrow$  dospělá spirální



Obrázek 6.19: 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.

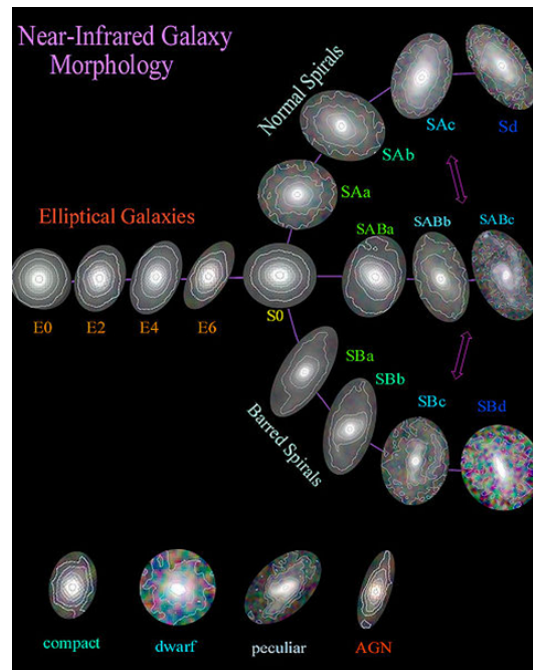


Obrázek 6.20: Hubbleova klasifikace galaxií - vidlička.

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
- 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,



Obrázek 6.21: 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 .

červené a mrtvé = fosilní záznamy evoluce galaxií  
 rané galaxie – hladké, ploché, hvězdy obíhají samostatně  
 spirální – rameno, plyn, prach pro tvorbu hvězd, obíhají v rovině stejným směrem  
 pospolu  
 rané – do dvou skupin – rychlé a pomalé rotátory

nové dělení - lépe popisuje vlastnosti

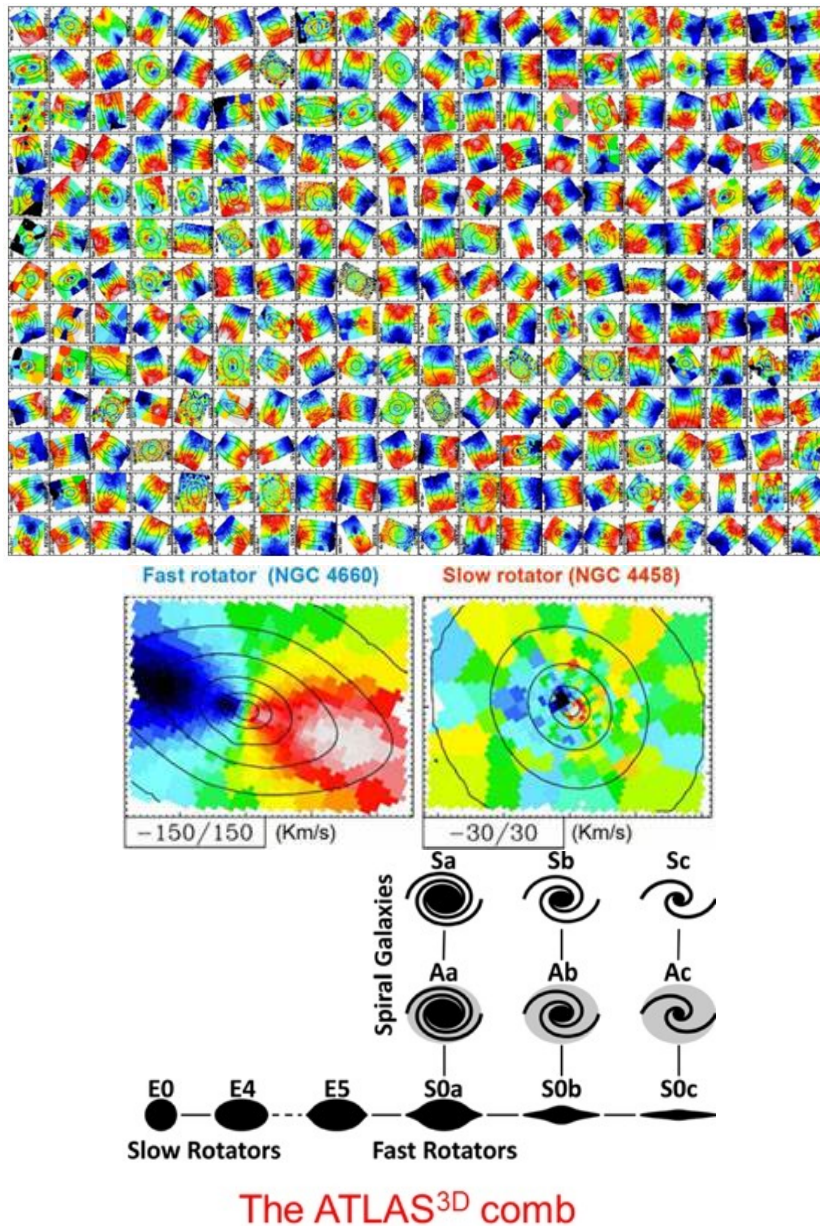
### 6.2.0.1 Spirální galaxie

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

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

Naše Galaxie je typu SBc.

- různorodé tvary
- nejméně dvě spirální ramena připojená přímo nebo přes příčku
- v ramenech - hodně žhavých hmotných hvězd,
  - rozsáhlá oblaka mezihvězdné látky (oblasti HII)
- 1 do 20 % (hmotnostně) mezihvězdné látky
- celkové hmotnosti -  $10^9 - 10^{12} M_{\odot}$

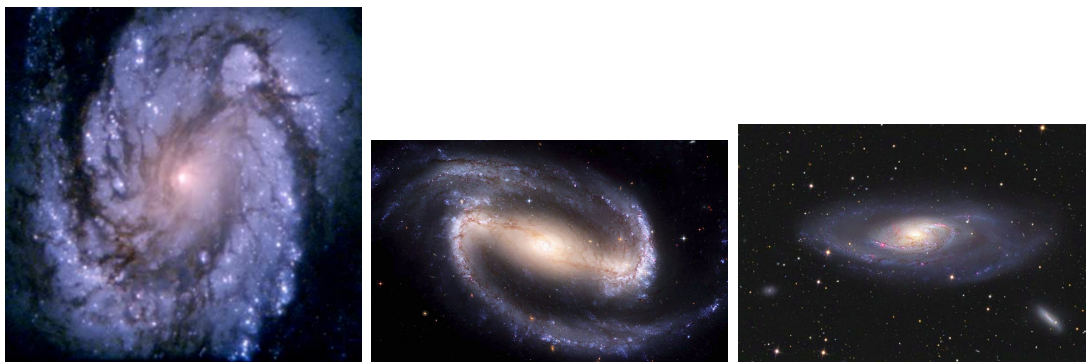


Obrázek 6.22: Maps of the observed velocity of the stars in the volume-limited sample of 260 early-type galaxies of the ATLAS3D survey. Red/blue colours indicate stars moving away/towards us respectively. Fast rotating and disk-like galaxies are characterized by two large and symmetric red/blue peaks 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.

### 6.2.0.2 Eliptické galaxie

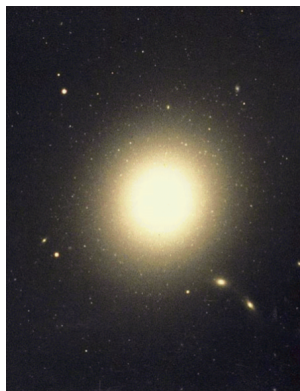
**Eliptické galaxie** – označení: E+x, kde  $x = 10[(a-b)/a]$ ,  $a, b$  - poloosy galaxie; fakticky E0 (kruhové) – > E7 (ploché)

- tvar koule nebo rotačního elipsoidu
- většinou staré trpasličí hvězdy –  $M < 2 M_{\odot}$ , malý výkon

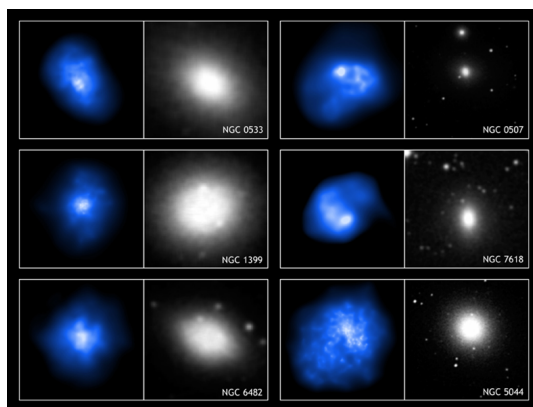


Obrázek 6.23: Spirální galaxie M100, uprostřed NGC1300, vpravo M106 .

- mezihvězdná látka do 0,2 % celkové hmotnosti
- velké rozdíly velikostí a hmotností (obří  $10^{13} M_{\odot}$  x trpasličí  $10^6 M_{\odot}$ )



Obrázek 6.24: Eliptická galaxie M87.



Obrázek 6.25: Eliptické galaxie ve vizuálním a rtg. oboru. Credit: X-ray: NASA/CXC/U. Ohio/T.Statler & S.Diehl; Optical: DSS.

### Slupkové galaxie

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



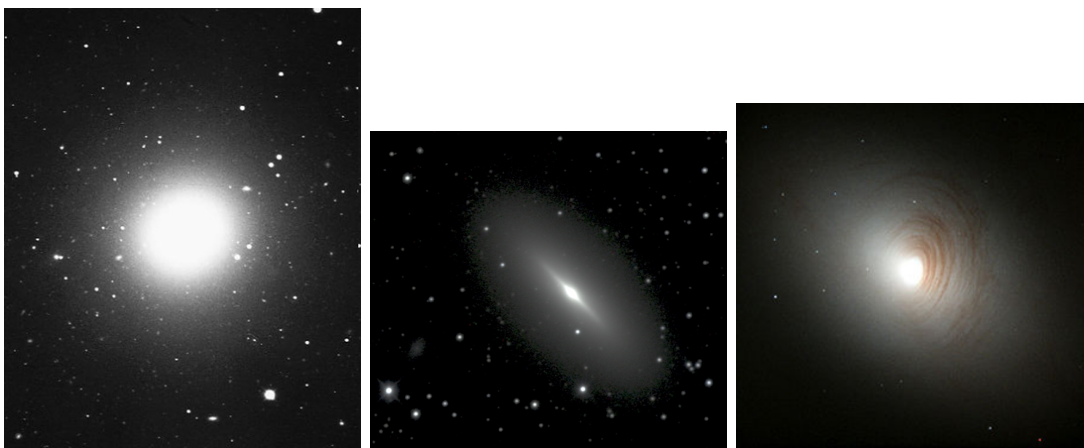
Obrázek 6.26: Slupková galaxie NGC474.

### 6.2.0.3 Čočkovité galaxie

spirální galaxie bez ramen

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

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



Obrázek 6.27: Čočkové galaxie.

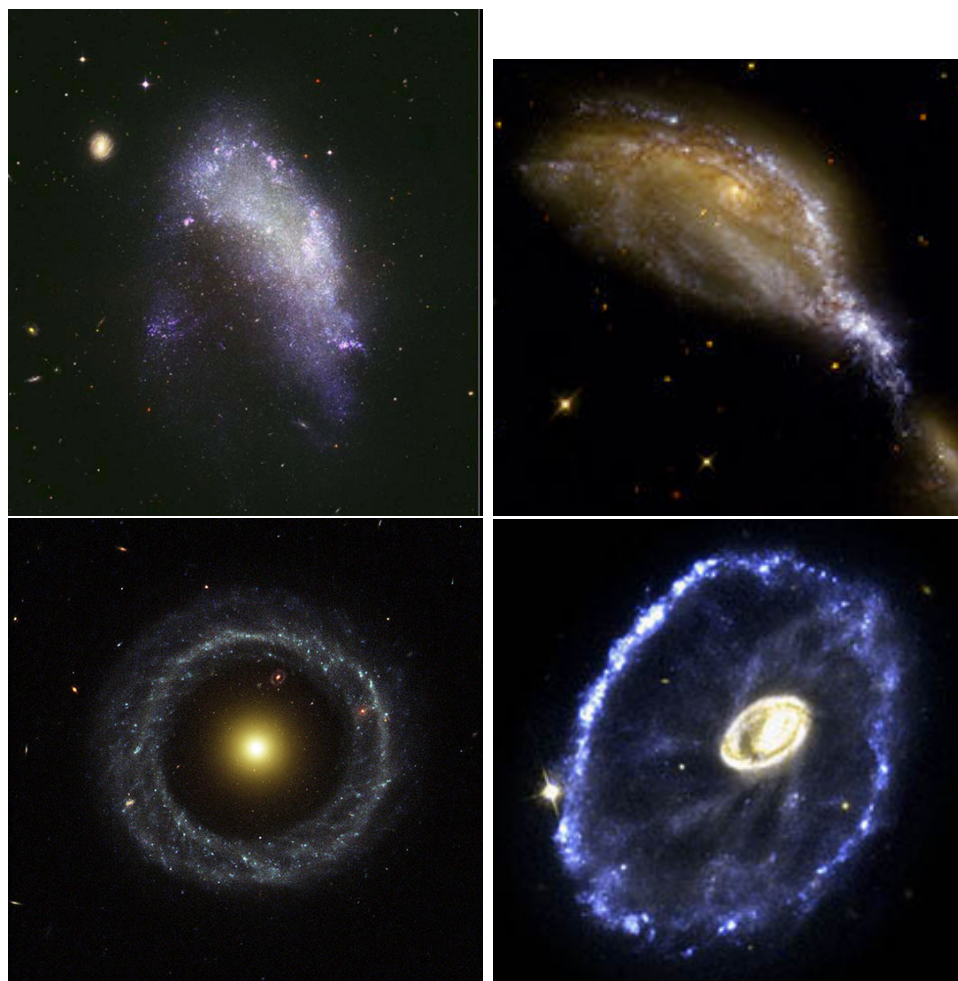


#### 6.2.0.4 Nepravidelné galaxie

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

- 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 6.28: Nepravidelné galaxie. Dole: Hoagovy objekty.

Statistika typů galaxií - přehled

jen roztríděné galaxie! – celkové odhady krajně nejisté!

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

## 6.3 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

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



Obrázek 6.29: Aktivní galaxie.

### 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
- pohlcené galaxie (kanibalismus)

### 6.3.1 Typy aktivních galaxií

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

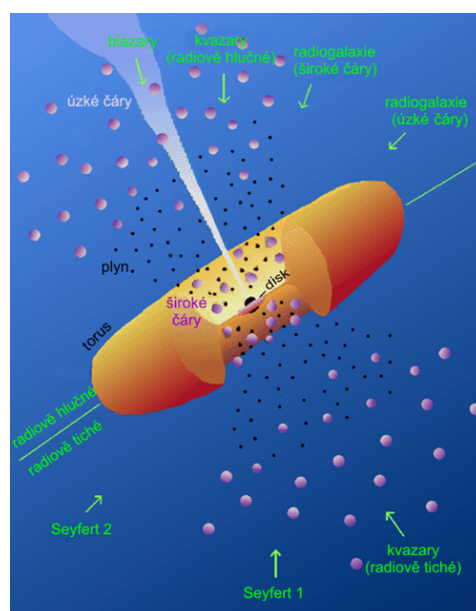
LINERs = Low-ionization nuclear emission-line regions

QSO = quasi-stellar object

OVV = Optically Violently Variable (OVV) quasars

blazar = objekt typu BL Lac

stejná fyzikální podstata x různé úhly pohledu!



Obrázek 6.30: Typy aktivních galaxií.

#### 6.3.1.1 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 6.31: 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)

### 6.3.1.2 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 km/s; 12,8 mag
- nejzářivější objekty ve vesmíru –  $10^{15} L_{\odot}$  ( $10^4$  x více než  $L_{\text{Galaxie}}$ ).
- zářivá oblast – o 20 řádů menší než objem normální galaxie!
- změny zářivého výkonu ve škále dnů => rozměr zdroje < světelné dny

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

### 6.3.1.3 Rádiové galaxie (radiogalaxie)

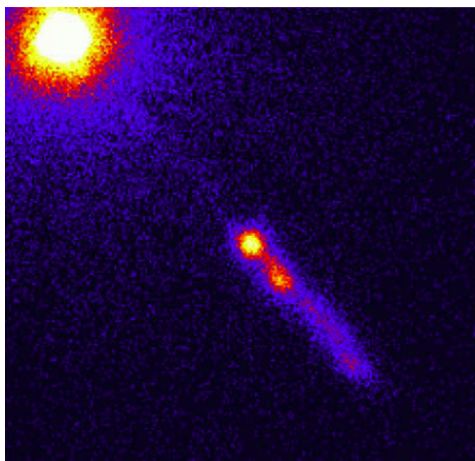
z boku pozorovaná eliptická galaxie

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

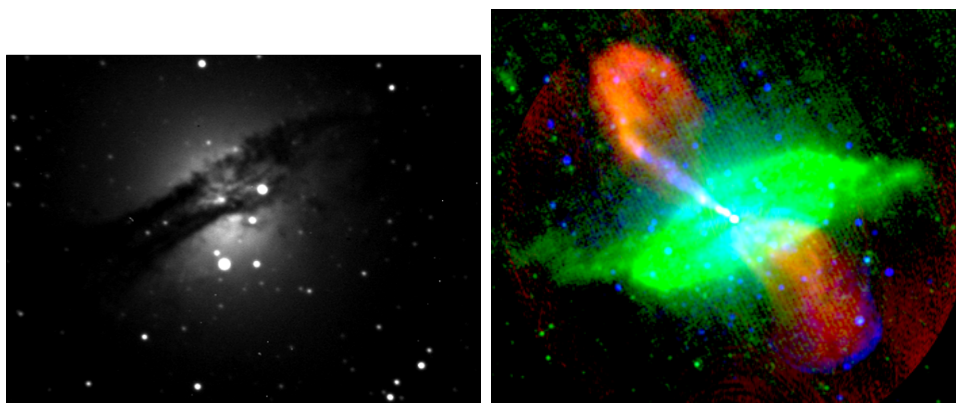
### 6.3.1.4 Nový typ AGN

Ueda et al. – ApJ 664, L79 (2007)

- výsledky družic: Suzaku a Swift BAT (Burst Alert Telescope)



Obrázek 6.32: Kvasar.



Obrázek 6.33: 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)

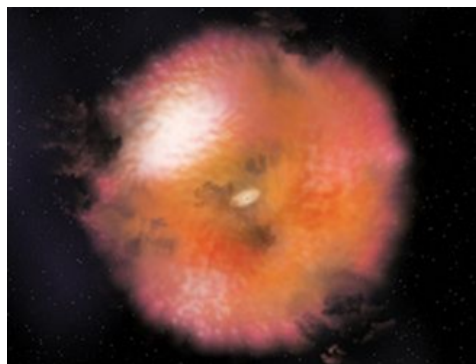
- stovky nových AGN, dříve neodhalených – detekce v rtg. oblasti
- okolo hustý oblak prachu a plynu - viditelné a ultrafialové světlo pohlcuje
- možná odpověď - proč některé supermasivní ČD září a jiné ne

## 6.4 Kanibalismus galaxií

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

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

Průběh setkání:



Obrázek 6.34: Nový typ AGN.



Obrázek 6.35: Kanibalismus galaxií.

- 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!)

#### Aktivní galaxie

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

#### Běžné galaxie

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

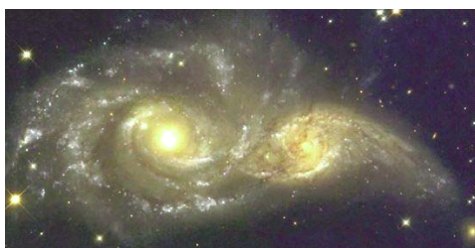
## Doplňující literatura

### Shrnutí

Jak se pozná, že je v centru Galaxie černá díra?



Obrázek 6.36: Dvě propletené galaxie, označené NGC 3314, se nacházejí v souhvězdí Hydry, ale neinteragují, jen projekce.



Obrázek 6.37: Interagující galaxie NGC 2207 (vlevo) a IC 2163 v souhvězdí Velkého psa.

## 7 Velkorozměrové struktury ve vesmíru

### 7.1 Vesmír velkých měřítek

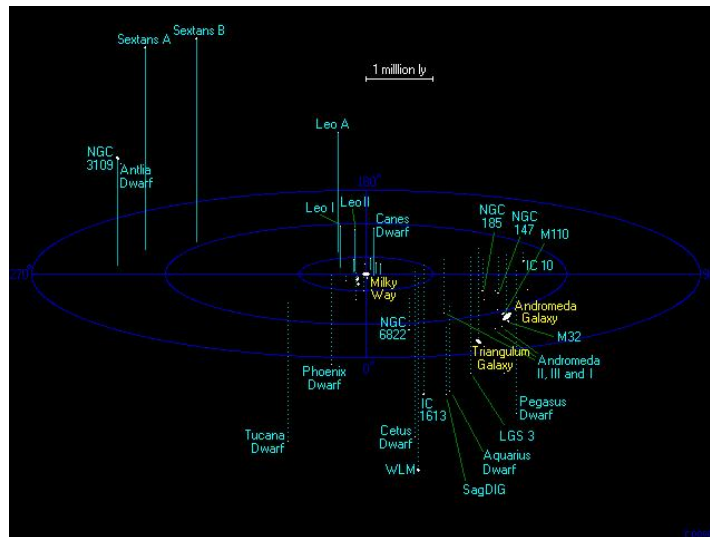
galaxie – většinou v párech, skupinách

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 7.1: Místní skupina galaxií.

### 7.2 Kupy galaxií

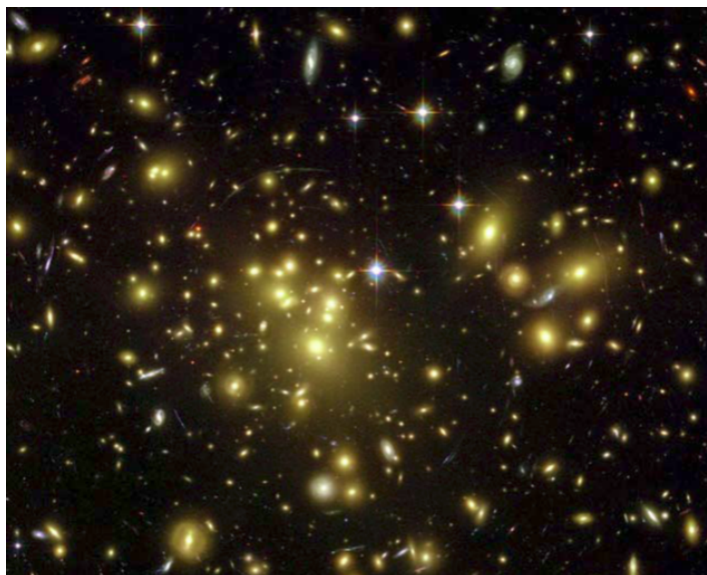
největší gravitačně vázané struktury ve vesmíru

- 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,



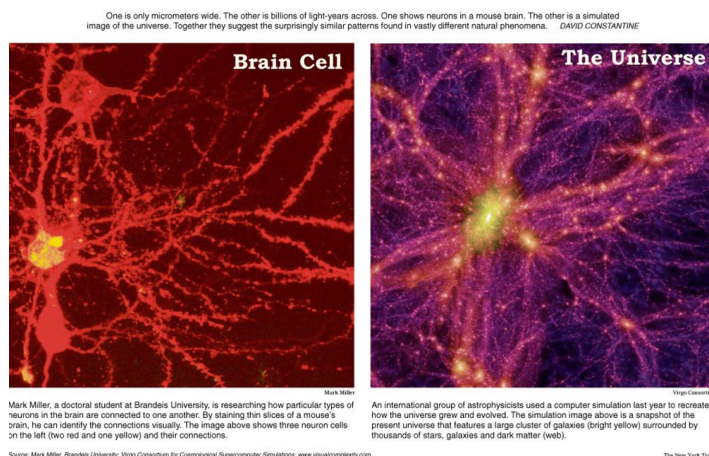


Obrázek 7.2: Kupa galaxií Abell 1689.

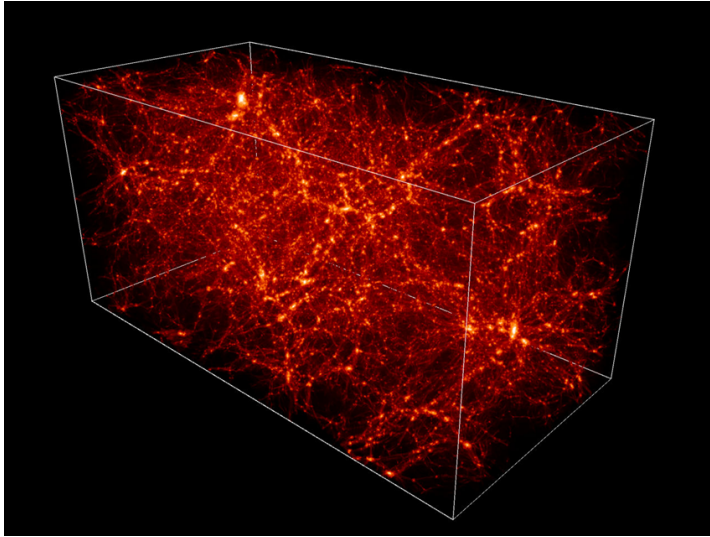
- vzdálenost 17 Mpc,
- střední vzdálenost sousedních galaxií 100 kpc.

„obří“ kupa - v Com

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



Obrázek 7.3: Struktury.



Obrázek 7.4: Struktury.

## 7.3 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 ...

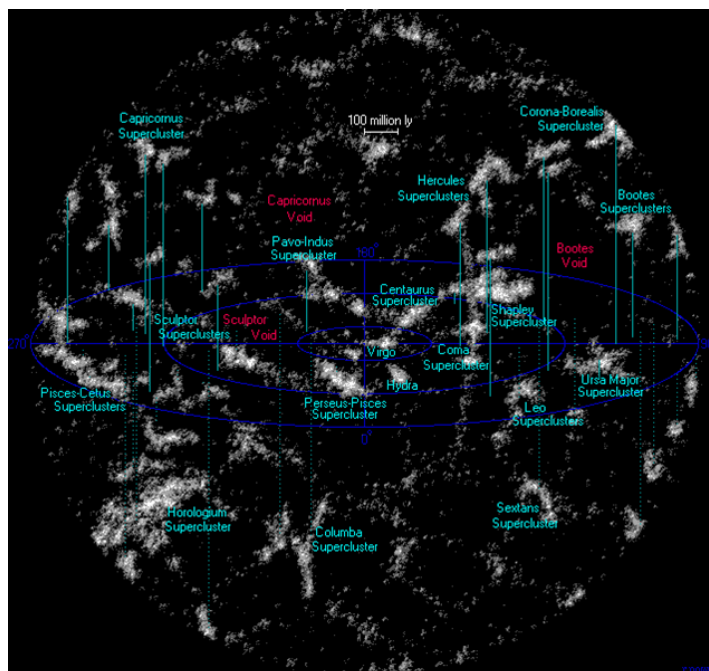
### 7.3.1 Větší než nadkupy

- 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

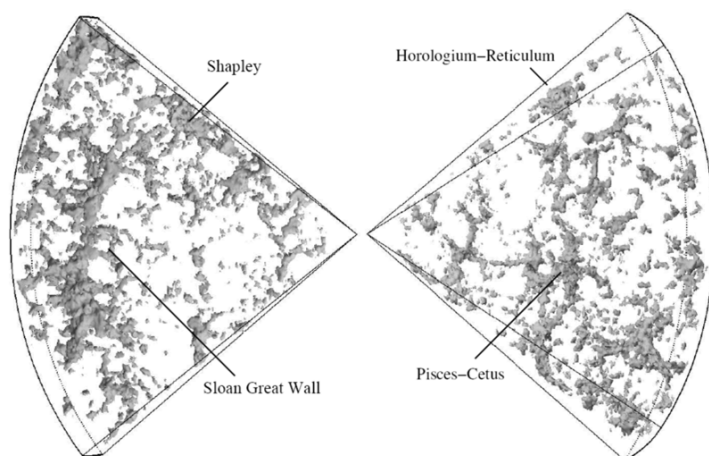
Uspokojivé vysvětlení pro tyto úkazy dosud nemáme.

## Doplňující literatura

### Shrnutí



Obrázek 7.5: The universe within 1 billion light years of Earth, showing local superclusters. Approximately 63 million galaxies are shown.



Obrázek 7.6: 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

## 8 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?

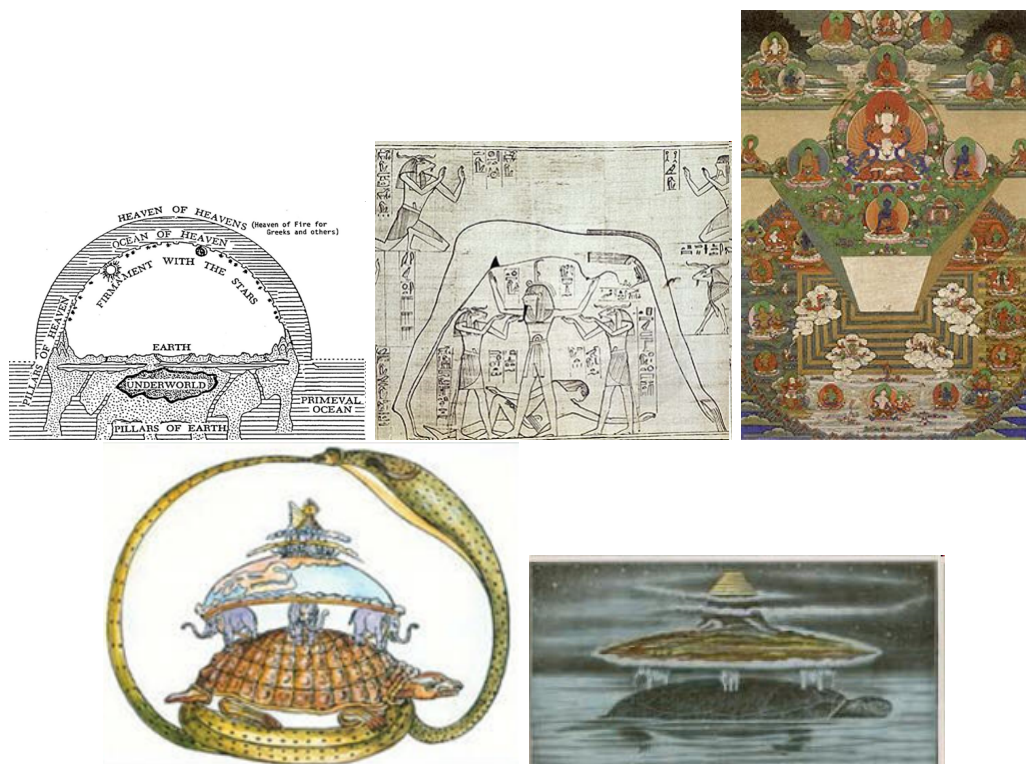
Vesmír či chcete-li kosmos lze definovat jako celek (časo-)prostoru a v něm obsažené hmoty a energie. V užším slova smyslu lze jako vesmír definovat jednoduše prostor mimo naši Zemi a její atmosféru. A kosmologie je pak nauka, která zkoumá vesmír jako celek. Zabývá se jeho vznikem vývojem i budoucím 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. 8.28). 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 filosofie a náboženství a teprve nakonec se zapojila i věda. Nejednoznačnou roli vědy v kosmologii přisuzuje 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.

### 8.1 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



Obrázek 8.1: Mytologie - modely světa.

omezovaly jen na naši Zemi, respektive na území té které kultury a její okolí a oblohu 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 částíček 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).<sup>1</sup> Aristoteles popsal i chování čtyř pozemských substancí a jejich tzv. přirozené místo. Všechny se pohybují ke středu vesmíru, to je ke středu Země. Voda se pohybuje ke sféře obklopující střed, který je tvořen zemskou substancí. Vzduch se snaží zaujmout místo ve sféře obklopující vodní sféru a oheň směřuje k měsíční sféře, kde se pohybuje Měsíc. Když jsou tyto substance odsunuty ze své přirozené polohy, snaží se vrátit zpět. A tak, například pevná tělesa se ve vodě potápí ke dnu, zatímco bublinky vzduchu stoupají vodou vzhůru nebo kapky deště padají ve vzduchu dolů, ale plameny ohně míří vzhůru. V nebeské sféře je ale vše jinak. Tam se éterická tělesa pohybují na ideálních, perfektních kruhových trajektoriích. Tyto Aristotelovy představy byly bez větších výhrad většinově přijímány až do konce 16. století a ovlivnily tak učence na téměř dvě tisíciletí!

Aristotelův vesmír byl tedy geocentrický, omezený v prostoru, ale nekonečný v čase. Nicméně i ve starověkém Řecku se objevily konkurenční představy o podobě vesmíru. Důležitý mezník představuje zejména zpochybnění ústředního postavení Země v modelu vesmíru. Prvním, kdo "vystrnadil Zemi z centra vesmíru" byl pythagorovec Filoláos (470 př.n.l. - 399 př.n.l.). Do středu vesmíru umístil centrální oheň, kolem něhož obíhají Země, Slunce, Měsíc a planety. Slunce oběhne kolem centrálního ohně za jeden rok. Hvězdy jsou naproti tomu nehybné. Zajímavé je, že Filoláos uvažoval i tom, že Země rotuje kolem své osy. Kolem roku 280 před naším letopočtem přišel Aristarchos ze Sámu (320 př.n.l. - 250 př.n.l.) s heliocentrickým modelem. Do středu vesmíru umístil Slunce a kolem něj nechal obíhat Země i ostatní planety. Aristarchos odvodil tvar Země, snažil se o určení vzdáleností Země, Slunce a Měsíce. Ve svých úvahách se pustil i dál. Prohlásil, že vesmír je nekonečný a hvězdy jsou jiná Slunce. Jenže to už byly na tehdejší dobu příliš kacírské myšlenky a Aristarchos byl obžalován z bezbožnosti. Jeho model byl zamítnut a posléze na dlouho zapomenut. Renesance se dočkal až v 16. století. Mikuláš Koperník (1473-1543) tehdy v podstatě ukončil debatu o postavení Země jako středu vesmíru. Historicky byl střed vesmíru ztotožňován se Zemí. Koperník (1543) s pomocí svého heliocentrického modelu Sluneční soustavy ukázal, že důležitějším je 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.

<sup>1</sup>Později byla tato pátá substance označována za tzv. kvintesenci.

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

## 8.2 Newtonův model vesmíru

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

hezké . . . . ale!!!

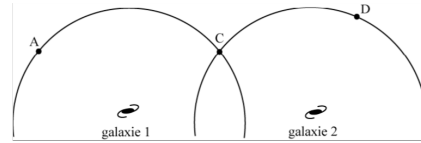
vady Newtonova modelu = kosmologické paradoxy:

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

záření

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

**Izotropie a homogenita.**



Obrázek 8.2: 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!

## 8.3 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)



### 8.3.1 Geometrie vesmíru

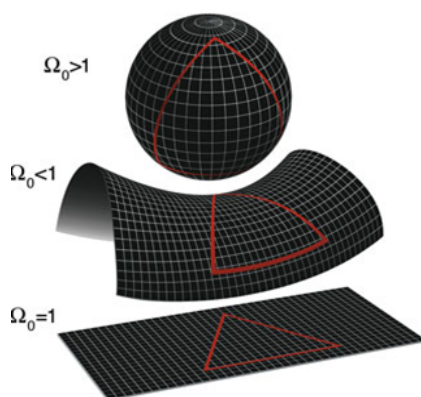
Dominující síla – gravitace – dalekého dosahu, nepřímo úměrná čtverci vzdálenosti, nelze ničím odstínit => kosmologické modely vesmíru založené na teorii gravitace – zejména OTR - tělesa se pohybují po nejprímější možné dráze v prostoročasu zakřiveném působením hmotných těles

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  $> 180^\circ$ )

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

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



Obrázek 8.3: Modely vesmíru. ( $\Omega$  – poměr celkové střední hustoty vesmíru ke kritické hustotě)

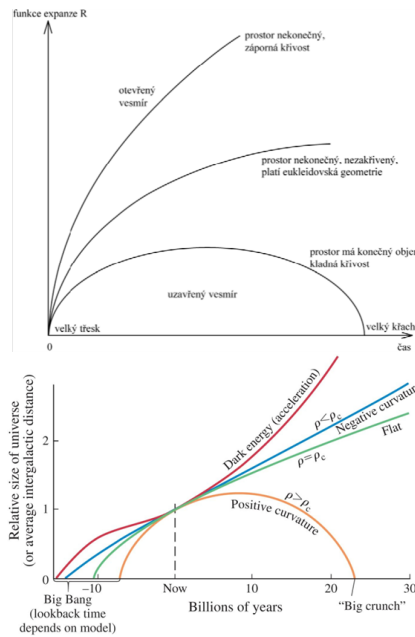


Obrázek 8.4: Vtip - zakřivený vesmír.

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

## 8.4 Rozpínání vesmíru a Hubbleův vztah

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

proč ne?

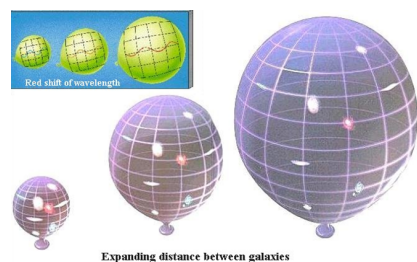
homogenní vesmír  $\Rightarrow$  všude stejný tlak  $\Rightarrow$  nevzniká rozdíl tlaků - uplatňuje se pouze gravitace, kterou nelze nijak odstínit  $\Rightarrow$  vesmír musí být dynamický

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 m<sup>3</sup> objemu o 0,23 mm<sup>3</sup>/rok



Obrázek 8.6: 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.

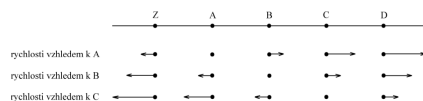
$v = Hr$  – potvrzením správnosti kosmologického principu

dvojí směr:

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

a obráceně

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



Obrázek 8.7: Rozpínání - galaxie

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

a obráceně

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

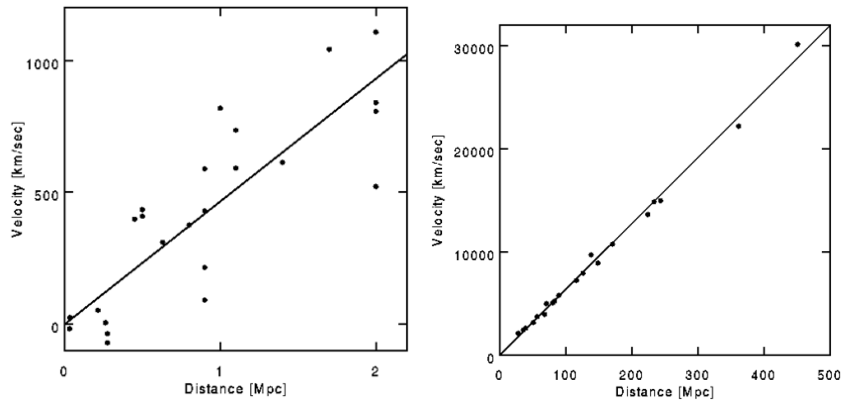
Nejdůležitější kosmologická konstanta = Hubbleova konstanta,  $[\text{km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc})]$   $[\text{s}^{-1}]$   
- udává o kolik se zvětší rychlost vzdalování (v km/s), při přechodu k objektům vzdálenějším o jednotku vzdálenosti (1 Mpc).

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  $\text{km}/\text{s}$ ), 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 8.8: Měření - data. grafy z [http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmo\\_01.htm](http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmo_01.htm)

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

## 8.5 Rozpínání vesmíru

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

červený posuv

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

Interpretace červeného posuvu 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 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

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

### 8.5.1 Rozpínání vesmíru - tam a zpět

1922 – Fridman - modely

1924 – Hubble – vzdálenost galaxií

1927 – Lemaitre – modely

1929 – Hubbleův vztah

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

1948 - George Gamow & asistent Ralph Alpher & „do počtu“ Hans Bethe ( $\alpha, \beta, \gamma$ )

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

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

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

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

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

Problém – neexistovaly důkazy, nebylo bráno vážně

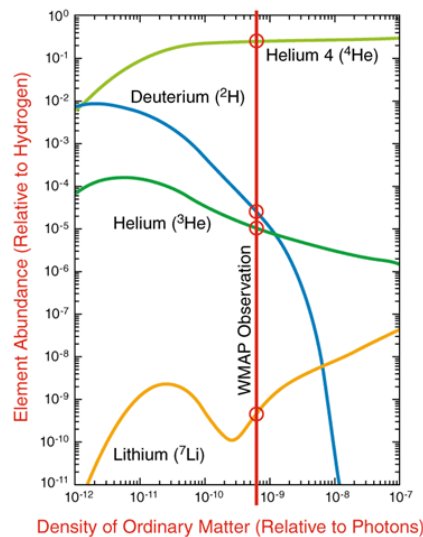
### 8.5.2 Důkazy teorie velkého třesku

- 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 8.9: 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)



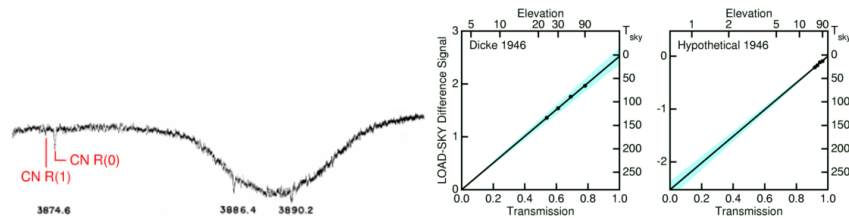
Obrázek 8.10: prvky

### 8.5.2.1 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 8.11: Předchůdci CMB

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

žádný pokus o pozorovací důkaz

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

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

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

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

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

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

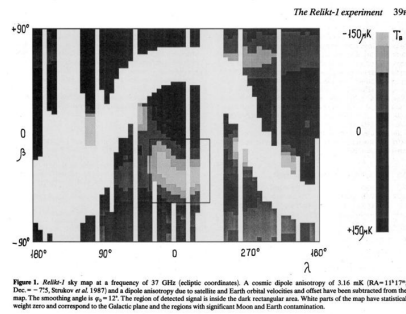


Obrázek 8.12: Penzias a Wilson

Reliktní záření z kosmu

1983 sovětská družice – projekt RELIKT -1, výsledky 1992

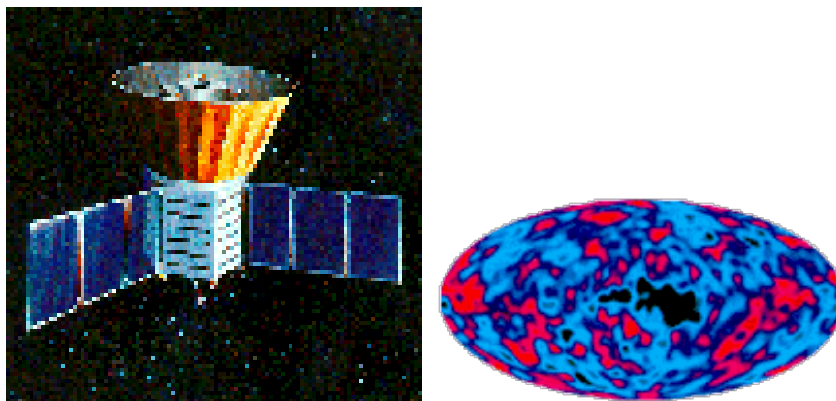
1989 - COBE (Cosmic Background Explorer) – za 8 min 1. výsledek: reliktní záření = záření AČT o teplotě 2,73 K s přesností  $10^{-3}$  objevy: anisotropie reliktního záření + fluktuační teploty záření odchylky od průměru  $10^{-5}$



Obrázek 8.13: Výsledky z projektu RELIKT-1

rozlišovací schopnost: 7°

Smoot & Mather - Nobelova cena (2006)

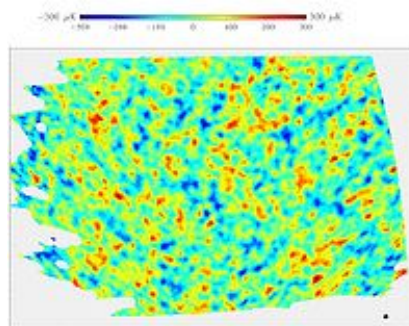


Obrázek 8.14: COBE

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

rozlišovací schopnost: cca 1/6°.

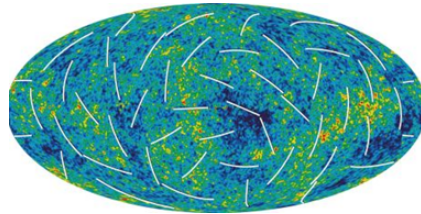
zpřesnění teploty reliktního záření a hodnoty fluktuací (70  $\mu\text{K}$ ) => podpora inflační teorie a plochosti našeho vesmíru



Obrázek 8.15: 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 nejpresnější určení parametrů našeho vesmíru

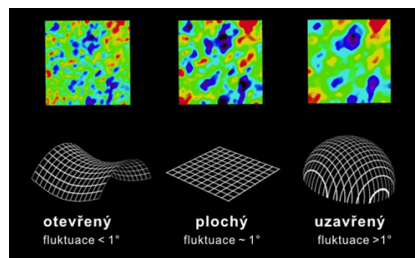


Obrázek 8.16: WMAP

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 8.17: Geometrie vesmíru - ověření z měření

### 8.5.3 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

## 8.6 Modely vesmíru

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

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

## 8.7 Jak starý je vesmír?

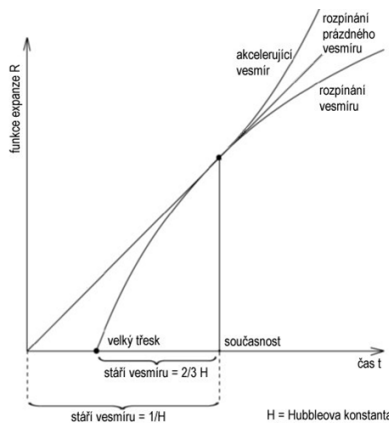
odhad pomocí Hubbleovy konstanty

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 8.18: Stáří vesmíru

## 8.8 Vývoj vesmíru

### 8.8.1 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

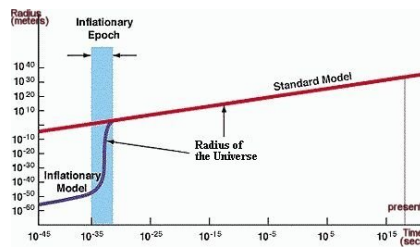
cca  $10^{-36}$  –  $10^{-32}$  – inflační epocha překotné rozepnutí/nafouknutí vesmíru (inflace vesmíru) – zvětšení objemu vesmíru o nejméně 78 řádů! (1980 Alan Guth, 1981 Kat-suhiko Sato)

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 8.19: Vývoj vesmíru - inflace

### 8.8.2 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)

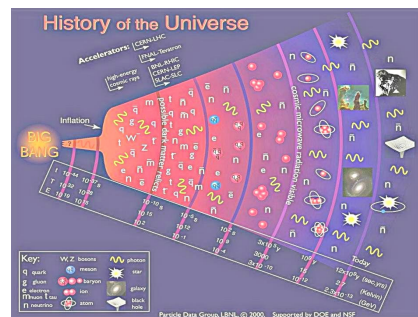
1 – 10 s – leptonová éra

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



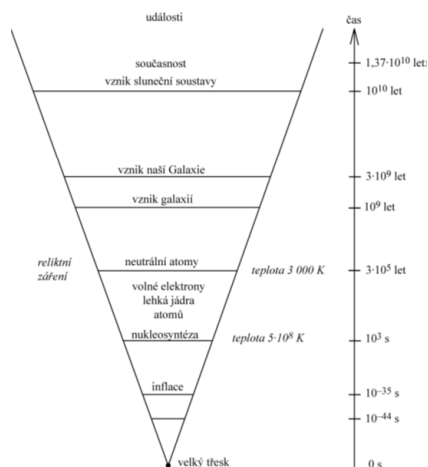
Obrázek 8.20: Vývoj vesmíru

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

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

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

záření = otisk tehdejšího vesmíru!



Obrázek 8.21: Vývoj vesmíru - klin

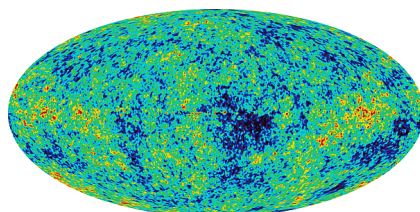
### Konec fotonové éry

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 8.22: Reliktní záření - WMAP

### 8.8.3 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

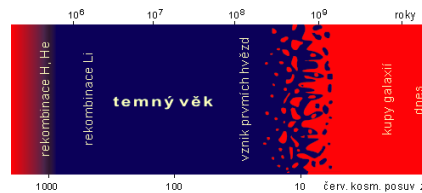
důkaz konce: výskyt ionizovaného vodíku, který vesmír zneprůhlednil; k ionizaci vodíku mohly přispět pouze hvězdy, které se po období temnoty začaly houfně objevovat.

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

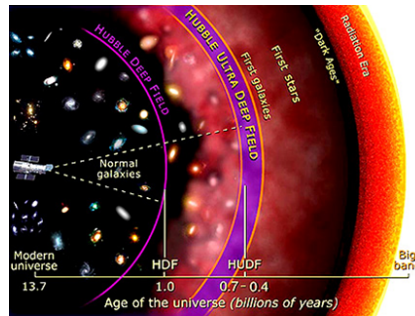
leden 2011 – jiná galaxie, která existovala 480 milionů let po VT



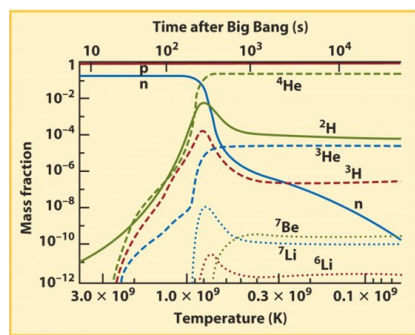
Obrázek 8.23: Temný věk



Obrázek 8.24: Jedna z nejstarších galaxií, které pozorujeme.



Obrázek 8.25: Dosah HST



Obrázek 8.26: Hmotnostní zastoupení prvků na počátku vesmíru

### 8.8.4 Vytváření struktur

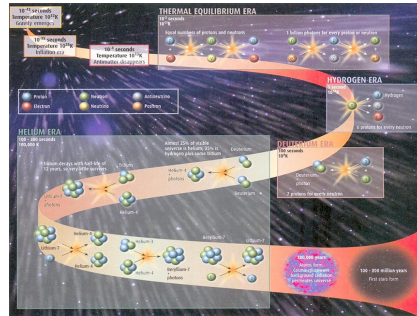
tvorba hierarchická – od malých k větším první struktury – kvasary = jasné aktivní galaxie a hvězdy populace III

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

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

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

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



Obrázek 8.27: Schématický vývoj první prvků ve vesmíru

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

Dnes: 13.7 mld let

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

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

## 8.9 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



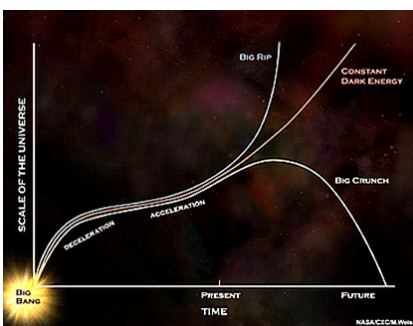
rychlost rozpínání nekonečné velikosti

Metastabilita vakua

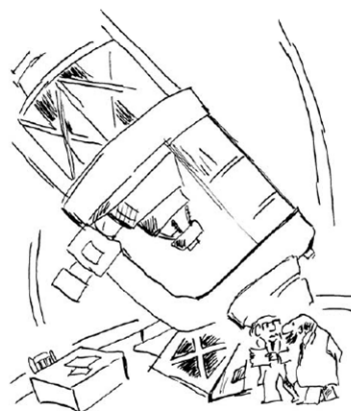
náš vesmír v dlouhotrvajícím falešném vakuu => malá oblast vesmíru může protunelovat do stavu s nižší energií => okamžitě se zničí všechny struktury v této malé oblasti a oblast expanduje takřka rychlostí světla

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 8.28: Modely - [http://scienceblogs.com/startswithabang/2011/05/the\\_fate\\_of\\_the\\_universe.php](http://scienceblogs.com/startswithabang/2011/05/the_fate_of_the_universe.php)



JEDINÉ, CO VE VESMÍRU NEEXPANBUJE,  
JE MŮJ PLAT!

(Podle Mercury May-June 1981, 88.)

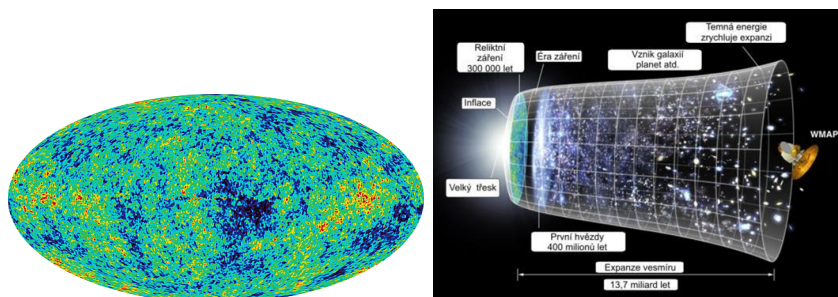
Obrázek 8.29: Vtip

## 8.10 V jakém vesmíru žijeme?

Lze to zjistit?

V principu ano.

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



Obrázek 8.30: WMAPvesmír

## 8.11 Pozorovací kosmologie

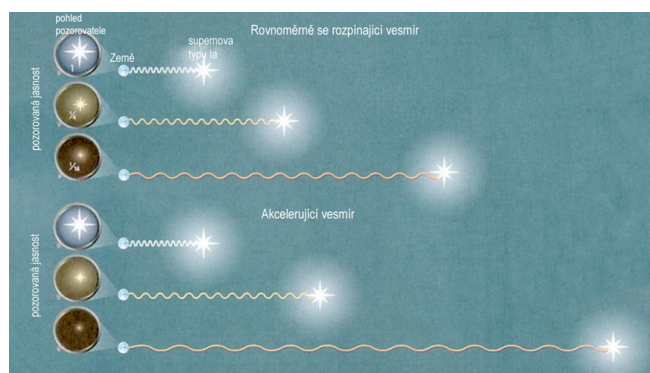
Pozorování, experimenty:

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

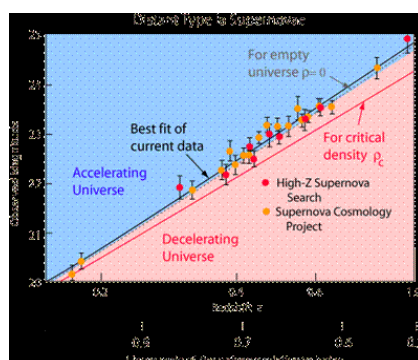
### 8.11.1 Současná pozorovací kosmologie

#### 8.11.1.1 Akcelerující vesmír

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



Obrázek 8.31: 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 8.32: Supernovy

### 8.11.1.2 Červený posun - přehlídkové projekty

1977 – 1982 CfA Redshift Survey

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

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

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

### 8.11.1.3 Reliktní záření

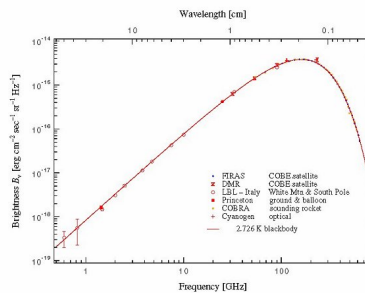
1989 - COBE (Cosmic Background Explorer) zjištění: reliktní záření = záření AČT  $T = 2,73$  K

objevy: anisotropie reliktního záření

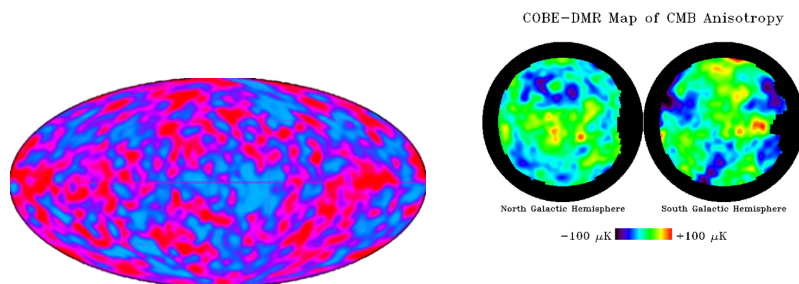


Obrázek 8.33: sloan

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



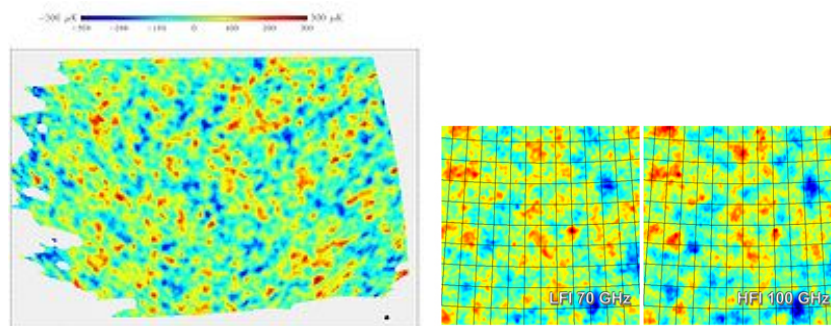
Obrázek 8.34: Křivka záření AČT o teplotě 2.73 K.



Obrázek 8.35: 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 8.36: Výsledky z balónových měření, a z družice Planck - viz <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=45533>

2001-2010 - WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)

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

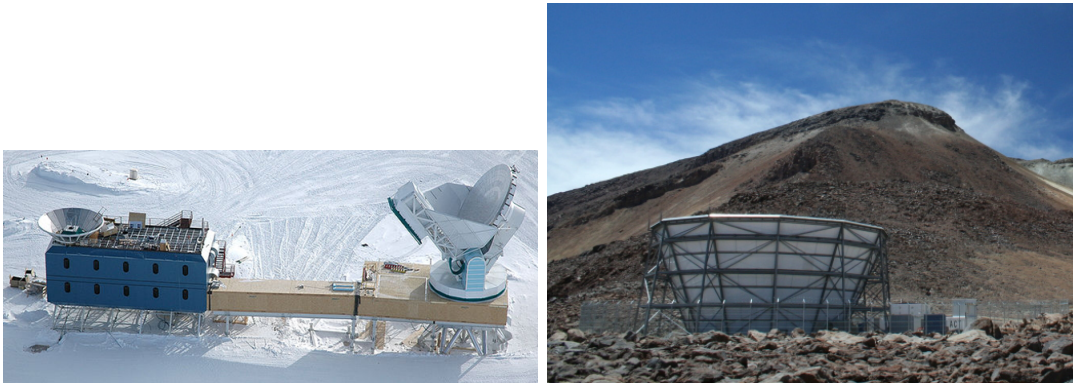
2009 - Planck – evropský projekt

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

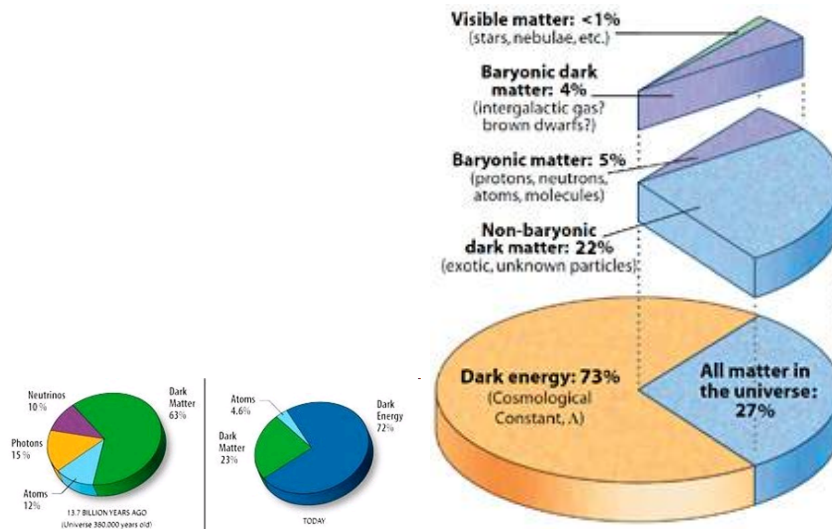
Atacama Cosmology Telescope (ACT) - 6m dalekohled na Cerro Toco v poušti Atacama (sever Chile) mikrovlny



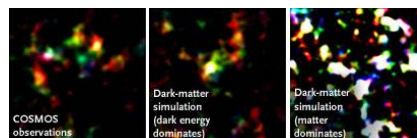
Obrázek 8.37: Pozemní dalekohledu na CMB

#### 8.11.1.4 Současný vesmír

Temná hmota, temná energie

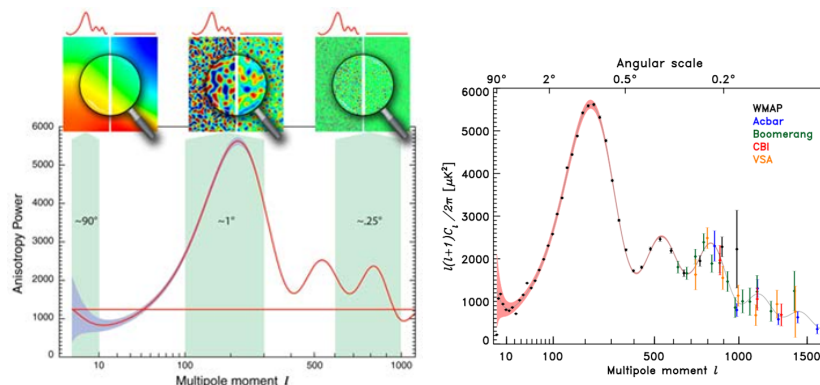


Obrázek 8.38: Složení vesmíru



Obrázek 8.39: 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

### 8.11.1.5 Velikost fluktuací



Obrázek 8.40: Fluktuace

### 8.11.1.6 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

## 8.11.2 Plánovaná pozorování

Temná hmota

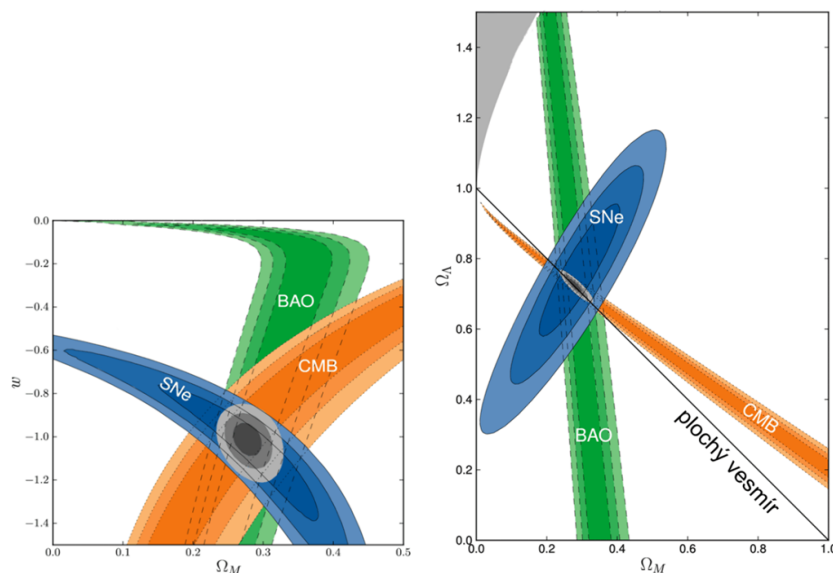
řada experimentů už probíhá – Kanada, Itálie, Španělsko, USA; detekce – skrytá hmota v Galaxii tvořena WIMPy (Weakly Interacting Massive Particles) => tisíce WIMPů musí procházet každým  $\text{cm}^2$  Země za 1s

Kosmická neutrina

snaha o detekci neutrinového záření kosmického pozadí (podobné reliktnímu 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 8.41: BAO

i nepřímo zkoumáním polarizace CMB

## 8.12 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.

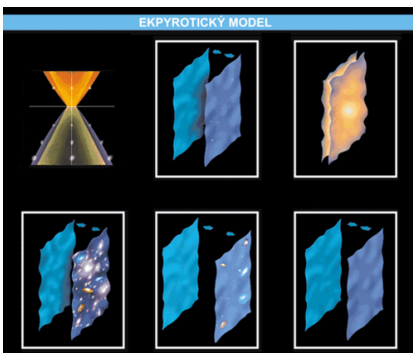
2001 Neil Turok, Paul Steinhardt, Burt Ovrut a Justin Khoury - alternativa k inflačnímu modelu;

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 -  $\dot{\epsilon}$  prudká expanze a následná tvorba galaxií -  $\dot{\epsilon}$  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 8.42: Ekpyrotický model

## 8.13 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

### Doplňující literatura

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

### Shrnutí

## 9 Nebezpečí z kosmu

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

### 9.1 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 9.1: Srážka Země s cizím tělesem. Zdroj: wikipedia

#### 9.1.1 Srážka s planetkou, kometou

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

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

V každém případě, pokud budeme mít před srážkou dostatek času, je dnes už technologicky možné se účinně bránit a nepříjemnému setkání se vyhnout. Jednou z možností je robotická sonda, která by asteroid řízeným nárazem vychýlila z dráhy. nemusí jít ale jen o sebevražednou misi ve stylu kamikadze. Odborníci z NASA spočítali, že by bylo možné pomocí 20tunová kosmické lodi odklonit asteroid o průměru 200 metrů jednoduše vznášením se v jeho blízkosti. Gravitační působení lodi na asteroid změni jeho trajektorii, a tak lze pomalým pohybem kosmické lodi odtáhnout asteroid z nebezpečné trajektorie. Výhodou takového gravitačním traktoru je nepochybně to, že by pracoval bez ohledu na strukturu asteroidu nebo na jeho povrchové vlastnosti. V úvahu připadá i "vojenské řešení", vystřelení zneškodňující rakety, pravděpodobně s jadernými hlavicemi. A nesmíme zapomenout ani na jednoduchý princip sluneční plachetnice nebo tzv. zrcadlové včely, kdy by se natočila zrcadla celého roje družic tak, aby sluneční paprsky zahřívaly jedno místo povrchu nezvaného návštěvníka a odpařovaný materiál vytvořil raketový pohon asteroidu. Všechny metody ale mají jedno společné, potřebu dostatečně dopředu vědět o blížícím se nebezpečí. Ne vždy se to ale daří. V roce 2008 bylo těleso 2008 TC<sub>3</sub> 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 hys-

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

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

V dávné minulosti země jsou přinejmenším dvě epochy, kdy došlo náhle k masivnímu vymírání živočichů a rostlin a život na naší planetě byl takřka zahuben. První kataklyzmická událost se datuje do doby před 250 milióny let. Jedna z vysvětlujících hypotéz mluví i o dopadu planetky. Podle posledních zjištění, ale byl na vině s největší pravděpodobností supervulkán v oblasti dnešní Sibíře<sup>2</sup>. Nicméně další katastrofická epizoda v historii Země z doby před 65 milióny let je už jednoznačně připisována srážce Země s planetkou o průměru zhruba 10 km<sup>3</sup>. Při dopadu tělesa srovnatelného velikostí s marsovským měsícem Deimos byla uvolněna energie 100 teratun TNT<sup>4</sup>. Pro srovnání, bomba svržená na Hirošimu uvolnila při výbuchu energii "jen" 13 kilotun TNT, byla tedy několik miliardkrát slabší než onen dopad planetky, při němž vznikl kráter o velikosti přibližně 200 kilometrů, který se nachází u vesničky Puerto Chicxulub<sup>5</sup> na Yucatánském poloostrově v Mexiku. Dopad planetky vyvolal obrovskou přílivovou vlnu doprovázenou zemětřeseními a požáry. Při impaktu bylo vysoko do ovzduší 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 9.2).

Z období po druhé světové válce můžeme jmenovat hned několik setkání Země s

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

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

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

<sup>5</sup>Čti [čiksulub].



Obrázek 9.2: 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.

tělesy o rozměrech řádově metry až desítky metrů. 12. února 1947 pozorovali lidé poblíže v Sichote-Alinské oblasti u Vladivostoku (Rusko) bolid jasnější než Slunce. Těleso o původní hmotnosti až 100 tun se rozpadlo na velké množství úlomků, které zasáhly oblast 1,5 km<sup>2</sup>. 8. března 1976 byla meteorickým deštěm zasažena oblast 500 km<sup>2</sup> v Jilinu (Čína)<sup>6</sup>

3. srpna 1963 dopadlo do oceánu mezi Afrikou a Antarktidou těleso, které při dopadu uvolnilo energii odpovídající 25 Hirošimským pumám. 6. 6. 2002 explodovalo při průletu atmosférou těleso o velikosti přibližně 10 metrů. Výbuch nad 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. Seznam zaznamenaných dopadů meteoritů lze nalézt na stránkách wikipedie [http://en.wikipedia.org/wiki/Meteorite\\_fall](http://en.wikipedia.org/wiki/Meteorite_fall). O potenciálně nebezpečných tělesech se lze dozvědět bližší informace na stránkách NASA <http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>.

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

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

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



Obrázek 9.3: Sedadlo a tlumič výfuku auta Edwarda McCaina zasažené meteoritem 29. 9. 1938 v městečku Benld, Illinois (USA).



Obrázek 9.4: Autor: Ladislav Šmelcer.

### 9.1.2 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.

## 9.2 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)

## 9.3 Přemíra záření

### 9.3.1 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 CO<sub>2</sub> => mohutný skleníkový jev
- supernova 100 sv.r daleko – tok záření dvojnásobný oproti normálu

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

pozitivní role supernov:

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

### 9.3.2 Záblesky $\gamma$ záření

nemusí jít jen o supernovu!



Obrázek 9.5: Záblesk  $\gamma$  záření. Zdroj:<http://cow-flipper.hubpages.com/hub/Dangers-From-Space>

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



Podobné účinky by měl také záblesk pocházející z tzv. magnetaru, neutronové hvězdy s extrémně silným magnetickým polem. Jejich existenci předpověděli Duncan & Thompson (1992). V současnosti jich známe 23 <sup>7</sup> Zatímco Země má magnetické pole 30-60 mikroteslů, magnetar může mít magnetické pole o síle až 10 GT, tedy  $10^{15} \times$  silnější! Tak silné magnetické pole (zhruba tisíckrát silnější než magnetické pole běžné neutronové hvězdy) je schopno smazat data z kreditní karty z poloviční vzdálenosti Měsíce od Země. Pokud bychom byli do vzdálenosti 1000 kilometrů od magnetaru, je náš osud zpečetěn. Všechny atomy v našem těle by se působící silou zdeformovaly. Naštěstí nejbližší známý magnetar 1E 1048.1-5937 v souhvězdí Lodního kýlu je od nás zhruba 9 000 ly daleko. Ale znamená to, že jsme v bezpečí? Bohužel ne. Magnetar občas v důsledku hvězdotřesení a rekonexe magnetického pole vysílá do prostoru intenzivní pulsy, záblesky. Poslední takový záblesk byl zaznamenán 27. 12. 2004 z magnetaru SGR 1806-20. Absolutní hvězdná velikost záblesku v oblasti  $\gamma$  záření byla -29 mag. Předpokládá se, že šlo o největší explozi pozorovanou lidmi od Keplerovy supernovy v roce 1604. Magnetar uvolnil v jedné desetině 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.

## 9.4 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.

## 9.5 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.

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



Obrázek 9.6: 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.

## Doplňující literatura

- Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F., & Michel, H. V. 1980, *Science*, 208, 1095  
Athanasiaidou, 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., Athanasiaidou, 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

## Shrnutí