

1. Základní astronomické pojmy

Poloha a pohyb objektů

- obloha - cokoli nad horizontem: hvězdy, planety, letadla...
 - mění se neustále: rotace Země, vl. pohyb objektů
- hvězdná obloha - Sféra na kt. se promítají hvězdy
 - mění se velmi pomalu: planety, Slunce, Měsíc

- Hvězdy - vl. pohyb velmi malý - ve výjimečných případech v řádu let
- u skupují se do souhvězdí - 88 (při pozorování ze Země viděn vždy zhruba 1/2)
 - záleží na zeměpisné šířce => cirkumpolární, necirk., zvrátelné
 - Hvězdný (siderický) den - doba mezi následujícími přechody j. bodu místním poledním

$$1 \text{ hvězdný den} = \frac{365,244}{366,244} \approx 23^h 56^m 4^s, \quad S = 1,002738 \cdot T + S_1$$

Slunce - vl. pohyb přibližně 0 1° za den

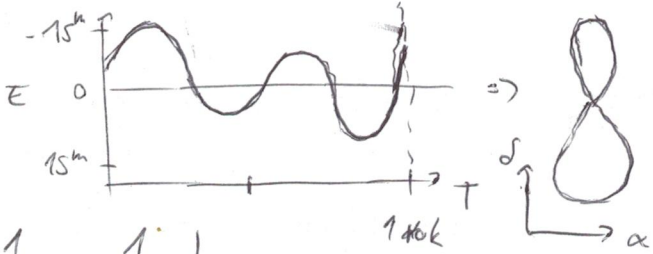
$$S_1 = S_0 + \frac{\text{z.d.}}{15} \quad \begin{matrix} \text{Greenwich} \\ \text{hvězdný čas} \\ \text{o půlnoci} \end{matrix}$$

- Sluneční (synodický) den - doba mezi následujícími horními kulminacemi = pravý sluneční den
- Země obíhá po eliptické dráze a rozdělna ekliptiky je skloněna vůči zemské rovině (23,5°) => pohyb Slunce v rektascenzi i po ekliptice je nerovnoměrný
- zavádí se tzv. střední sluneční čas (může se lišit od pravého až o 15m) => časová rovnice

$$E = T_{PS} - T_{SS} = t_{\odot} \pm 12^h - T_{SS} = \ominus - \alpha_0 \pm 12^h - T_{SS}$$

hodnoty úhel tohoto bodu

- rozvojem geometrických tvarů



- Planety - některé výrazný vl. pohyb
- poblíž ekliptiky, vnitřní blízko Slunce - elongace
 - synodická oběžná doba $\frac{1}{S} = \left| \frac{1}{P_Z} - \frac{1}{P_P} \right|$
 - u vnějších planet se objevuje retrográdny pohyb - kvadratury, opozice

Kometry - výrazná elipticita i sklon dráhy vůči ekliptice => nepravidelný pohyb ve všech souř. systémech

- Měsíc - na ~~obloze~~ ^{hvězdné} obloze pohyb proti směru otáčení oblohy
- úhel vůči ekliptice asi 6°
 - vázaná rotace - rotace = siderický měsíc = 27,3 dne
 - synodický měsíc (vůči slunci) = 29,5 dne
 - drakonický měsíc = 27,2 dne - střech vzdušné stíny

Problém dvou těles

- pohyb dvou interagujících částic lze zjednodušit na vzájemný pohyb a pohyb těžiště

$$L(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dot{\vec{r}}_1, \dot{\vec{r}}_2) = \frac{1}{2} m_1 \dot{\vec{r}}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{\vec{r}}_2^2 - V(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$$

za předpokladu, že pot. energie závisí pouze na vzdálenosti $V(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = V(|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|) = V(r)$

a $R = \frac{\sum m_i \vec{r}_i}{\sum m_i}$, $r = |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|$, $\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ ^{redukovaná hmotnost}

poloha těžiště

$$\Rightarrow L(r, R) = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) \dot{R}^2 + \frac{1}{2} \mu \dot{r}^2 - V(r)$$

$$\frac{\partial L}{\partial R} = 0 \Rightarrow \text{těžiště se pohybuje bez zrychlení}$$

- Aberace - souvisí s konečnou rychlostí šíření světla - hvězdy se nemíívají v bodech, kde byly o něco dříve
- roční aberace - pohyb země kolem Slunce
 - závisí na rychlosti a ekliptikální šířce $\varphi \Rightarrow \Delta \varphi = \frac{v}{c} \sin \varphi$
 - denní aberace - rotace země
 - pohyb v deklinaci i rektascenzi

- Precese - na setrvačnické působení ^{pro $\delta = 90^\circ$} ~~úhlového~~ momenta
- osa se sklopí roviny rotace do roviny ekliptiky
 - unisolární - měřící a slunce se sází [↑]
 - \Rightarrow pohyb jarního bodu po ekliptice
 - planetární - vlivem planet - stáčí oběžnou rovinu země
 - \Rightarrow posun jarního bodu po rovině
 - perioda = Platónský rok

1. Základní astronomické pojmy

2/2

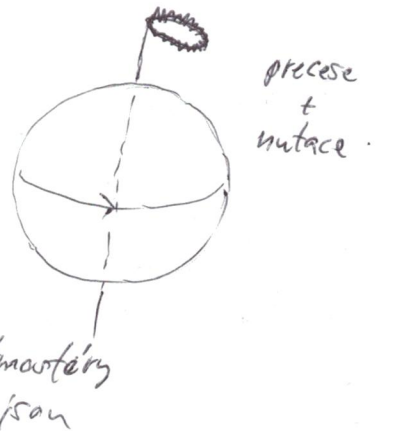
- Nutace - způsobeno precesí Měsíce (způsobeno vlivem Slunce)
- kolísání polohy zemské osy vůči rovníkové poloze dané zemskou precesí
- perioda asi 18,5 roku

- Refrakce - změna směru světelných paprsků při průchodu opticky hustším / řídkším prostředím

atmosférická refrakce

- níže nad obzorem světlo prochází delší vlnou atmosféry
⇒ objekty se nám jeví výše než ve skutečnosti jsou

- důsledek: eliptický tvar slunce při západu $R = 58'' \cdot \tan z$
vidíme objekty jež jsou fyzicky pod obzorem



~~Speciální~~

Speciální astronomické jednotky

- astronomická jednotka $1 \text{ au} \approx 150 \text{ milionů kilometrů}$ vzdálenost Země - Slunce
- světelný rok $1 \text{ ly} \approx 10^{16} \text{ m}$
- parsek = 1 au pozorován pod úhlem $1''$ $1 \text{ pc} = 3,262 \text{ ly} \approx 3 \cdot 10^{16} \text{ m}$
- hmotnost Slunce $1 M_{\odot} \approx 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
- zářivý výkon Slunce $1 L_{\odot} \approx 3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}$
- poloměr Slunce $1 R_{\odot} \approx 7 \cdot 10^8 \text{ m}$
- poloměr Země $1 R_{\oplus} \approx 6371 \text{ km} \approx 7 \cdot 10^6 \text{ m}$
- magnituda $1 \text{ mag} \approx \log \frac{I_{\star}}{I_0}$, kde $\frac{I_{\star}}{I_0} = 10$, kde I_0 ... jasnost Věgy

Popis objektů pozorovatelných okem - oko vidí do nejisté 6. magnitudy

- hvězdy (i slunce) - svítí vlastním světlem
- planety, Měsíc, planety - svítí světlem odraženým od Slunce
- Galaxie - světlo z hvězd, případně jiné zdroje - AGN
- mlhoviny - ~~světlo~~ - vlastním světlem
emisií
- difúzní - světlem rozptýleným od hvězd (a) v centru

Souřadnicové soustavy → sférické souřadnice

- Zeměpisná soustava - zeměpisná délka λ a šířka φ

- λ od Greenwiche směrem na východ
- φ od zemského rovníku

$$\lambda \in (-180^\circ, 180^\circ), \varphi \in (-90^\circ, 90^\circ)$$

- Obzorníková soustava - spojená s pozorovatelem a místním horizontem

- výška nad obzorem $h \in (0^\circ, 90^\circ)$ od ↗
- ~~hodinový úhel $t \in (0^h, 24^h)$ od místního poledního (meridiánu)~~
- azimut $A \in (0^\circ, 360^\circ)$ od místního poledního - levotočivá (meridiánu)

- nehybná vůči pozorovateli

- Rovňková 1. druhu - hlavní rovina Zemský rovník, hl. směr místní poledník

- nehybná vůči pozorovateli
- deklinace $\delta \in (-90^\circ, 90^\circ)$ od světového rovníku
- hodinový úhel $t \in (0^h, 24^h)$ od místního poledníku na západ

- Rovňková 2. druhu - hl. rovina světový rovník, hl. směr je jarní bod

- vůči pozorovateli se soustava otáčí
- deklinace $\delta \in (-90^\circ, 90^\circ)$ od sv. rovníku
- rektascenze $\alpha \in (0^h, 24^h)$ od jarního bodu na východ

- Ekliptikální soustava - hl. rovina rovina oběhu Země, hl. směr jarní bod

- ekliptikální šířka $\beta \in (-90^\circ, 90^\circ)$ $\beta_0 = 0^\circ$
- ekliptikální délka $\lambda \in (0^\circ, 360^\circ)$ λ_0 se mění nerovnoměrně kvůli ekliptice

- Galaktická soustava - hl. rovina rovina oběhu Slunce kolem středu Galaxie
hl. směr galaktický střed (Štířec)

- galaktická šířka $b \in (-90^\circ, 90^\circ)$ od zál. roviny
- galaktická délka $l \in (0^\circ, 360^\circ)$ od zál. směru na východ

Obzorníkové ↔ Rovňkové 1. druhu

Rovňkové 1. a 2. druhu

Ekliptikální ↔ rovňkové

- hl. roviny skloněny o úhel $\theta = 90^\circ - \varphi$

⇒ matice otočení kolem osy y

$$\begin{pmatrix} \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos \varphi & 0 & \sin \varphi \end{pmatrix}$$

$$\alpha = S - t$$

hvězdný čas

- stupeň zál. roviny

$$S = 1,0027 \cdot T + S_n$$

hl. čas
a přičítací
střední sluneční čas

- hl. roviny skloněny o úhel $\varepsilon = 23,5^\circ$

⇒ matice otočení kolem osy x

- společný hl. směr

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon & \sin \varepsilon \\ 0 & -\sin \varepsilon & \cos \varepsilon \end{pmatrix}$$

2. Přístroje optické i neoptické

1/2

a srážekost $F = \frac{f}{D}$

Optické dalekohledy

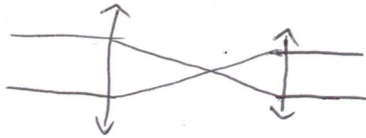
další char. je úhlová rozlišovací schopnost $\theta = \frac{1,22 \lambda [A]}{D [m]}$

- zařízení sloužící pro pozorování vzdálených objektů - optický zvětský pozorovací poměr soustav čoček nebo zrcadel vytráť ~~světelný~~ rovnoběžný svazek paprsků, kt. je následně pozorován okem či jiným detektorem

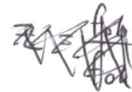
$$z = \frac{f_{ob}}{f_{ok}}$$

čočkové (refraktory)

- Keplerův - dvě spojné čočky



$$d = f_{ob} + f_{ok}$$



- Galileův - objektiv spojka okulár rozptylka

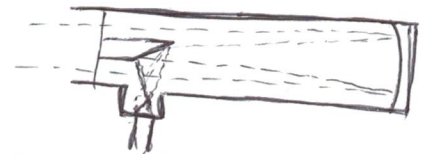


$$d = f_{ob} - f_{ok}$$

- barevná vada - $n(\lambda)$, sférická vada

Zrcadlové (reflektory) nebo kombinované

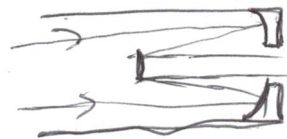
- Newtonův - para objektiv parabolické zrcadlo okulár spojná čočka



ravinné zrcátko pro vyvedení paprsků mimo tubus

- Cassegrain - parabolické zrcadlo s dírou na vývod paprsků

→ sekundární zrcátko je ~~parabolické~~ vypuklé hyperbolické (ravinné)



- hl. vady: koma

⇒ ke spoustě provedeních: Schmidt-Cassegrain ~~Newton~~

Maksutov-Cassegrain - jednoduchý (kulový)

Schmidt-Newton

- systém Condé - způsob vedení paprsků

⇒ zavede ho do oku

↙ ose montáže ⇒ obrovské okružkové vzdálenosti - spektroskopie

Montáže

- umožňují ~~pozorování~~ ~~stabilní~~ ustálený obraz dalekohledu na daný objekt

- azimutální - obrovské souř. , je potřeba hýbat v obou osách, dobrá - dalekohled se vyváží sám

- paraleltická (equatorální) - osa sklopená k pólarce, stačí pohyb v jedné ose pro sledování objektů

• německá

• anglická

• vzhledová



- je potřeba závažít ⇒ meridian flip

Radioteleskopy, radiolokace

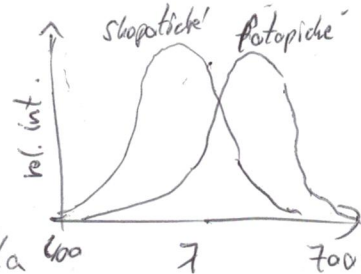
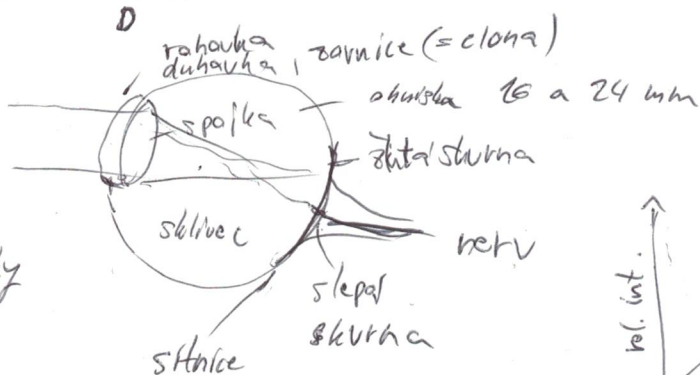
- srmají exist. elmag. spektra na kratších vlnajich délkách než optická část
- kolem 30 cm
- mohou být nelesklé a detrované - záření neprojde vlnovodem (eš má rozměry menší než polovina vlnové délky \Rightarrow odrazí se)
- často se používá interferometrie - spojené více radioteleskopů \Rightarrow vyšší efektivní průměr
- nezávislé na počasí - atmosféra i oblačnost mají velmi dobrou propustnost vobari
- výsledek je třeba vizualizovat - nezískáme přímý svrnek radiujících vln
- paralunv - pouze analyzuje signály - objekty SS, kvídy, mlhaviny, galaxie
- aktrunv (= radar) - vysílá signál ke zblumnému objektu a analyzuje přichozí signál \Rightarrow objekt musí být poměrně velký a dobře odrazet rad. vlny

\Rightarrow radiolokace \leftarrow blízké objekty - Země, Měsíc, max kosaše

- rozlišovací schopnost $\sin \delta = \frac{1,22 \cdot \lambda}{D}$

Lidské oko

- orgán kulového tvaru
- dva typy buněk: tyčinky a črpkv
- třetí typ - řídí brvrytny

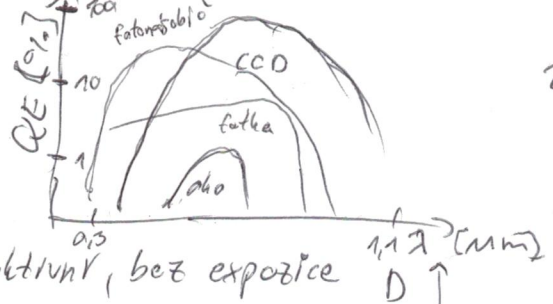


- črpkv - barevné vidění (=fotopické) - v oblasti viditelného světla
- asi 6 milionů, soustředěny v okolí optické osy
- tyčinky - "černobílé" vidění (intenzita světla) (=skotopické)

- 120 milionů, rozmístěny dále od osy - asi $20^\circ \Rightarrow$ šividrní do dalekohledu
- adaptace na tmu: nejdříve se zvyšuje citlivost črpkv (30-100x do 10 minut) poté se stanou dominantní tyčinky (200-1000x do 20 minut)
- logaritmické vidění - rozlišení 0,1 mag, rozsah až 30 mag
- lepší dñ. rozsah než jakýkoliv detektor s danou přesností
- úhlové rozlišení $1'$

2. Přístroje optické i neoptické

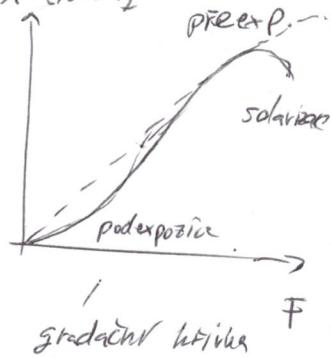
2/2



Detektory záření - oko - velmi subjektivní, bez expozice

⇒ objektivní detektory = "lineární"
 - bodové - fotokatoda
 - plošné - emulze, CCD, oko

- detektory se liší: rozlišením, dynamickým ^{rozsahem} ~~rozsahem~~, kvantovanou účinností, uchováním obrazu



• fotografická emulze - krystalky halogenidu stříbra - citlivé nasvětlo

- výhody: vysoké rozlišení, možnost expozice "trvalý" zářením $D = \log_{10} \left(\frac{E_0}{E_2} \right)$
- nevýhody: nízká kvantová účinnost (3-10%), linearity jen v části křivky, náročná postřeh + vyvolání + uchování obrazu
- černobílé i barevné

• fotokatoda - záhl. kamnem fotometrie

- založen na fotoelektrickém jevu ⇒ mnohem větší linearity
- ⇒ zesiluje původní signál až milionkrát

- fotokatoda → urychlovací elektrada → dynody → anoda

- měření jasnosti objektu (osvětlení)

- i při zakrytém fotokatodě

naměřené proud = temný proud (tepelný pohyb)



• CCD čip

- na bázi křemíku (Charge Coupled Device) - potenciálové dráhy oddělené bariérami do nichž se chytají vyražené elektrony
- na rozdíl od fotokatodice získáme 2D obrazek - elektrony skládané do sousedních jamek
- lze si to představit jako analogii s vědry vody - může došlá k přeběhnutí vědra = blooming
- na konci expozice se vědra postupně vyprázdňují
- krajní strana čipu - na rozdíl od CMOS čipů = registry - převádí el. v pixelech na ADU jednotky (analog-to-digital unit)

- výhody: lineární gradacní křivka, vysoká kvant. účinnost (až 90%)

- nevýhody: nižší rozlišení, tepelný proud, údržba čipu

3. Astronomická fotometrie a spektroskopie

Fotometrie - "měření" (počítání) fotonů

- první fotometrické pozorování už ve starověku
- zkoumání hustoty toku záření urč. objektu (hvězdy, planety)
a případně potvrdit jasnost objektu (z geometrické řady dělné aritmetické)
- naše oko vidí logaritmicky a dokáže rozeznat poměrně velké změny

← jasnost = hustota toku záření ($\frac{\text{watt}}{\text{lumen na m}^2} = \text{lx}$)

~~XXXXXXXXXX~~
$$F = \frac{L}{4\pi d^2}$$
 , d... vzdálenost

- hvězdná velikost - vyjadřuje poměr jasností vůči nějaké referenční hodnotě
či jinému objektu - blíže náměmu valná hvězda
- Pogsonova rovnice: $m_1 - m_2 = -2,5 \log \frac{F_1}{F_2}$ [m] = mag
- absolutní hvězdná velikost: $m - M = 5 \log r - 5$ [r] = pc
- bolometrická = z celého spektra M... hv. velikost ze vzdálenosti 10 pc

- fotometrické veličiny:

zářivý tok - L [W], výkon zářiček přenesený danou plochou

hustota zářivého toku - $F = \frac{L}{4\pi d^2}$ [W/m²] - výkon na 1 metr čtvereční v urč. vzdálenosti od zdroje

zářivost - $\frac{L}{1 \text{ srad}}$ [W/srad] - zářivý tok do urč. prostorového úhlu 1 srad

- u světlosti místo wattu kandela (1 cd) nebo lumen (1 lm)

- barevné indexy a fot. systémy - rozdíl jasnosti hvězdy ve dvou rozdílných filtrech
- slouží jako odhad teploty (spekt. typ)
- používají se fotometrické systémy - sada filtrů s podobnou propustností řeš. dohromady pokrývají téměř celé viditelné spektrum

• Johnsonův systém (UBVR) - stavky nm, překrývají se

• Strömgrenův systém (ubvy + H_B, OIII, H_α ...) - desítky nm a méně (střední úzkopásmové)
- na rozdíl od Johnsonova umožňuje určit vyšší balmerova stádu

~~CP~~

- častěji se používá ~~Star~~ Johnsonův systém

=> barevný index $(B-V) = m_B - m_V = M_B - M_V$

- je ovlivněn mezihvězdnou extinkcí - je závislý na vlnové délce

- v optické části spektra $\sim \frac{1}{\lambda} \Rightarrow$ zčervení

=> barevný exces: $E_{B-V} = (B-V)_{obs} - (B-V)_{real}$

=> bolometrická barevnice: $BC = m_{bol} - m_{vis} = M_{bol} - M_{vis}$ (kulová prař. 6800K)

Spektroskopie - zkušební spektrum světla (energie zastoupená fotony)

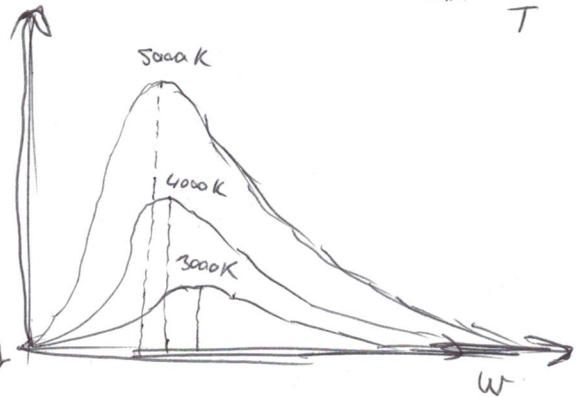
- veliký stupeň jasu u fotometrie je vztahováno na vlnovou délku (krat^{-1})

- ze spektroskopie můžeme určit vzhled spektra hvězdy - teplota, přítomnost drů

- Planckův ~~výpočet~~ vyzařovací zákon, Wienův posuvovací zákon $\lambda_{max} = \frac{b}{T}$

$$dI = \frac{h}{4\pi^2 c^2} \frac{\omega^3}{e^{h\omega/kT} - 1} d\omega$$

$$\frac{dI}{d\omega}$$



=> spektra hvězd

- Harvardská spektrální klasifikace:

helium	vodík				kovy				
spektrální	spektrální	spektrální	spektrální	spektrální	spektrální	spektrální	spektrální	spektrální	spektrální
W	O	B	A	F	G	K	M	L	T
50	30	11	7,5	6	5	3,5	3	2,5	$\cdot 10^3 K$

- mají svoje specifické drů a teplotu

Slnce = G2V

4. Astrofyzikální charakteristiky kosmických těles

Základní metody určování:

- překrývají se

• vzdálenosti - $\frac{1}{2}$ neexistuje jednotná metoda - záleží na vzdálenosti objektů

- v rámci těles sluneční soustavy buď laser ☺ nebo dehár paralaxa

- pro relativně blízké objekty ~~laser~~ roční paralaxa

— změna úhlové vzdálenosti od "nehybných objektů" způsobená pohybem / rotací země

- pro hvězdy u nichž známe spekt. typ lze použít

tzv. Pogsonova rovnice $m_a - M = 5 \log r - 5$
modul vzdálenosti

$$d = \frac{1 \text{ au}}{p["]} [\text{pc}]$$

- u cefeid (pulsujících proměnných hvězd) je znám vztah mezi M a periodou

$$M_V = -2,766 \log P - 1,44$$

- standardní svíčky = supernovy typu Ia

- blíží trpaslík karota nad $1,4 M_{\odot}$ = Chandrasekara mez

- kosmologický rudý posuv - $v_r = H \cdot r$

nobo spektra

• hmotnosti = v případě, že se jedná o hvězdu HP lze hmotnost odhadnout z teploty (B-V)

- pro případ dvojhvězd lze určit poměr hmotností z fotometrie - $a^3 = P^2 (M_1 + M_2)$
- u zakrytých

a celkovou hmotnost soustavy ze spektroskopie (křivky rad. rychlostí) - z 3. Keplerova zákona

- u černých děr se hmotnost odhaduje pomocí objektů, jež jí obíhají

- u galaxií se dá hmotnost odhadnout z měření rad. rychlostí hvězd

$$v^2 = \frac{M \cdot G}{r}$$

- u kup galaxií se dá hmotnost odhadnout ze spektroskopie

z radiálních rychlostí galaxií

$$v_r = H \cdot d - 0,8 v_{vir} \left(\frac{r_{vir}}{d} \right)^{n_{vir}}$$

z teplot ICM

• rozměry - z transítů (hvězdy, planety)

- ze vzdálenosti a úhlové velikosti (galaxie, kupy gal.)

- ze spektroskopie + fotometrie $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ (L, d, T)

• teplota, chemické složení - ze spektroskopie, AČT, zastoupení žar

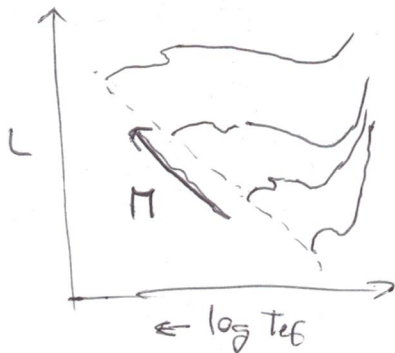
Důležité vztahy mezi veličinami

• H-R diagram (Hertzsprung - Russell)

- dára do poměru jasnost hvězd a jejich spektrální typ P (teplotu na povrchu)
- rozdělen podle Morganovi-Keenanovi klas.
- není to vývojový diagram

⇒ vývojový diagram i

- závisí na počáteční M (příp. spect. typ)

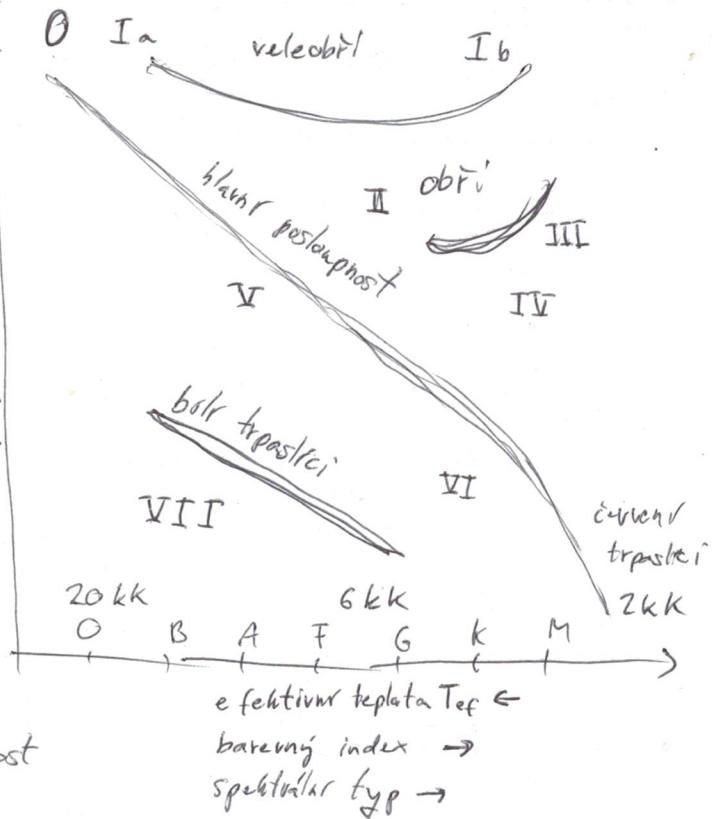


- schodek: zapalení Helia

⇒ při sestavení barevného diagramu

hvězdokupy lze určit její stáří a vzdálenost

- podle polohy tzv. bodu obrátu

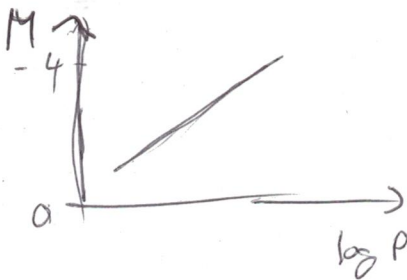


• zářivý výkon - perioda (Cefeidy)

$$M_v = \alpha \log P + \beta \quad [P] = \text{dny}$$

$$M_v = -2,766 \log P - 1,44$$

$$\Rightarrow r = 10^{\frac{1}{5}(M_v - \alpha \log P - \beta + 5 + A(V))}$$



$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3}{160} \frac{\kappa_3}{T^3} \frac{L}{4\pi r^2} \quad (T \sim \frac{M}{R}, \rho \sim \frac{M}{R^3} \Rightarrow L \sim \frac{T^4 R}{\rho})$$

• hmotnost - zářivý výkon - závisí na fázi života hvězdy

- z rovnice závisí rovnouměrně $\Rightarrow L \sim M^3$ - závisí na zdrojích energie

- fotoionizace $\Rightarrow L \sim M^{5,5} R^{-0,5}$

- u hmotných hvězd \Rightarrow Eddingtonův mezní zářivý výkon

$$L_{Ed} = \frac{4\pi R^2 c}{G} M$$

$\kappa = \text{opacita}$

$$\kappa \sim \rho T$$

5. Stavba a vývoj hvězd

Struktura hvězdy podobné Slunci

častěji je červený trpaslík

- Slunce je nejvíce prozkoumané \Rightarrow bere se jako etalon - nikdy je co do kmitnosti
- přímo můžeme pozorovat pouze fotosféru lehce nadprůměrnou hvězdou
- = povrch Slunce a tloušťka zhruba 100-200 km - většina fotonů, z nitra zářný
- z modelů či seismologie Slunce lze odhadovat vnitřní složení:

- jádro - extrémní hustota 150 g/cm^3 , extrémní teplota $15 \cdot 10^6 \text{ K}$
 - probíhají zde termojaderné reakce \Rightarrow převážně materiál obohacen o lehké prvky
 - $0,2 R_{\odot}$

- vrstva v zářivé rovnováze - energie se přenáší zářením, u bícha velké množství E
 - vysoká teplota $2 \cdot 10^6 \text{ K}$ hustota \Rightarrow přenos velmi pomalý
 - asi $0,6 R_{\odot}$

- konvektivní vrstva - zvyšuje opacitu \Rightarrow energie se přenáší zejména konvekce (ionty C, O, N)
 - stále vyšší teplota asi $2 \cdot 10^6 \text{ K} \Rightarrow$ plazma
 - sahá až po fotosféru
 - jedná z hlavních principů lokálních magnetických polí

- fotosféra - tenká vrstva (100-200 km) na povrchu Slunce
 - = většina fotonů, teplota 5800 K
 - okrajové ztemnění, skvrny, protuberance, erupce

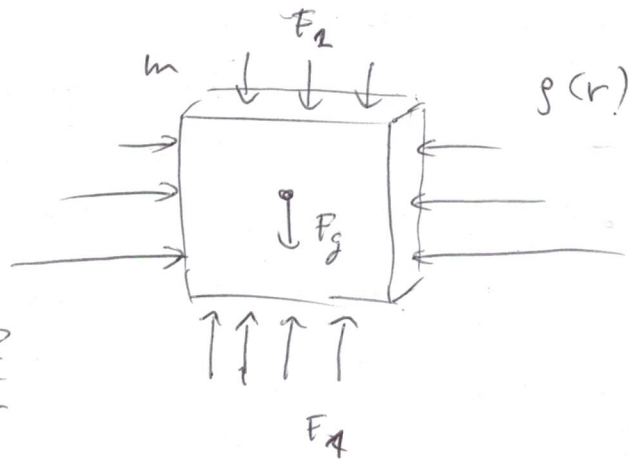
- chromosféra - tenká vrstva nad povrchem Slunce
 - velký hustotní skok \Rightarrow zvyšuje se teplota - hevr se přesně prací

- koróna - poslední vrstva, rozprostírá se na velké vzdálenosti od Slunce 10^4-10^5 K (asi obřesy plus úroveň hustoty)
 - vzhled souvisí s magnetickou aktivitou
 - pozorovatelná při zatmění
 - teplota až 10^6 K

Hydrostatická rovnice

- pokud by ve hvězdě působila jen gravitace zhrubila by se do sebe - hvězdy jsou dlouhodobě stabilní
- proti ~~gravitaci~~ gravitaci působí gradient tlaku plynu a záření = vztlaková síla
- kerotajker hvězda je sféricky symetrická

- element objemu $S \cdot \Delta r$



$$\vec{F}_g = m \cdot \vec{g}(r) = \rho(r) \cdot S \cdot \Delta r \cdot \vec{g}(r)$$

$$= -\rho(r) \cdot S \cdot \Delta r \cdot \vec{g}(r) \cdot \frac{\vec{r}}{r}$$

$$\vec{F}_{vz} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = S \left[P\left(r - \frac{\Delta r}{2}\right) - P\left(r + \frac{\Delta r}{2}\right) \right] \frac{\vec{r}}{r}$$

$$\Rightarrow \text{rozvoj} \quad \vec{F}_{vz} = -S \frac{dP}{dr} \Delta r \frac{\vec{r}}{r}$$

- aby byl element v klidu: $\vec{F}_g + \vec{F}_{vz} = \vec{0} \Rightarrow \left[\frac{dP}{dr} = -\rho(r) g(r) \right]$

$$\Rightarrow \rho_c \approx G \frac{M^2}{R^4} \quad \left(g \approx G \frac{M}{\left(\frac{R}{2}\right)^2} \right)$$

Tepelná výměna

- hvězdy svítí až miliardy let \Rightarrow musí být v tepelné rovnováze (to co vysvítí musí vyrobit)
- energie uvolněná v centru se musí nějak odvést na povrch
- velmi malý gradient teploty - zářivý výkon není ani tak určen rychlostí reakcí v centru, ale spíše schopností teplo odvést
- způsob je více - závisí na hustotě, teplotě a opacitě
- samoregulace - moc energie \rightarrow expanze částic / obalů \rightarrow ochlazení

zářivou difuzí

- velmi pomalé - střední volná dráha velmi krátká
- vysoká-energetické γ fotony se postupně "tráší" na fotony s menší energií

konvekce

- kvalitní narušení hydrostatické rovnováhy - teplejší materiál stoupá, chladnější klesá
- Schwarzschildova podmínka $\frac{d(\ln P)}{d(\ln t)} > \frac{2}{2-1}$

vedením

- u klasických hvězd prakticky všude - ideálně dobře izoluje
- u blízkých trpaslíků, neutronové hvězdy a jádra velmi hmotných hvězd

neutřina

5. Stavba a vývoj hvězd

Zdroj energie ve hvězdách

- gravitační smršťování - rychlá fáze kontrakce - protohvězdy
- pomalá fáze - hvězdy typu τ Tauri = Kelvinova - Helmholtzova číselná škála

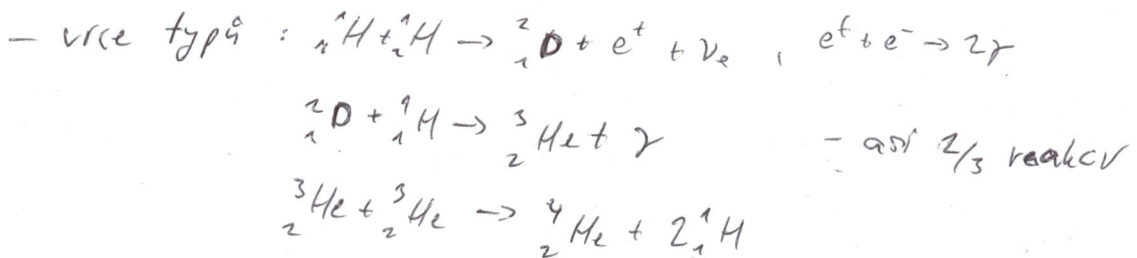
- viriálová věta : $2 \langle E_k \rangle + \langle E_p \rangle \approx 0$ $\Rightarrow E_{rad} = - \frac{\langle E_p \rangle}{2}$

$\langle E_k \rangle + \langle E_p \rangle + E_{rad} = 0$ $E_{rad} \approx - \frac{\alpha}{2} G \frac{M^2}{R}$

$\Rightarrow T_S = 8 \cdot 10^6 K \frac{M [M_\odot]}{R [R_\odot]}$

- syntéza prvků - když je teplota dostatečně vysoká dají se zapálit nejprve lehkých prvků (Li, Bór, deuterium), které rychle vyhoří
- při teplotě nad $8 \cdot 10^6 K$ začne efektivně docházet k syntézi jader vodíku \Rightarrow 3 typy cyklů:

- proton-protonový řetězec - dominantní u hvězd do $1,7 M_\odot$



a nebo přes 7_4Be , 7_3Li , 8_4Be - asi 1/3 reakcí

- výtěžnost: $E \sim \rho T^4$, někdy až na 5 nebo na 6 - závisí na teplotě

- CNO - cyklus - u hmotných hvězd nad $1,7 M_\odot$ u prvních hmotnějších hvězd nejvíce 3α
- je zapotřebí katalyzátorů uhlíku, dusíku a kyslíku
- potřebná teplota $15 \cdot 10^6 K$, efektivní od $17 \cdot 10^6 K$

$E \sim \rho T^{18}$

- 3α proces - po dokončení vodíkových reakcí zapálí vodík ve slupce \Rightarrow následně zvýší teploty a zapálí heliových reakcí, rozpadá se

$E \sim \rho T^{40}$

Vznik hvězd - vznikly z molekulového oblačka - hmotného a chladného (Jeansův kritérium)

$$M_J = \left(\frac{kT}{G \rho} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{1}{\sqrt{G}}$$

- impuls v podobě výbuchu supernovy
- nenulový moment hybnosti s) vznik disku a zrychlení rotace centrálních částí

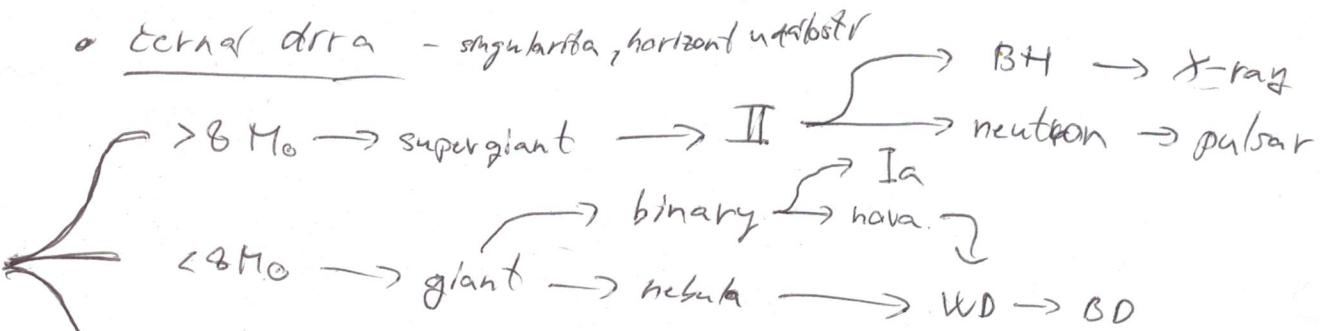
- musí být odveden aby hvězda vznikla
- nejdříve rychlý kolaps téměř volným pádem
- poté pomalá fáze kontrahce - Kelvinova-Helmholtzova časová škála $\Rightarrow T$ -taur
- ustavit se do ~~dočasné~~ hydrostatické rovnováhy - viriálová věta
- energie se přeměňuje konvekce, magnetní sluneční vítr
- po desítkách až stovkách milionů let dochází k začátku jaderných reakcí a hvězda se dostává na hlavní posloupnost

- na HP se hvězda mění minimálně - T, R, L, M
- mění se však materiál v jejím nitru - v důsledku syntézy prvků
- v závislosti na konvektivitě a rychlosti spalování

- závěrečná stadia: - závisí na celkové hmotnosti hvězdy

~~černá díra, bílý trpaslík, červený trpaslík, žlutý trpaslík, oranžový trpaslík, červený obr, bílý obr, modrý obr, žlutý obr, oranžový obr, červený obr~~

- rudý obr - hvězdy s hmotností menší než $8 M_{\odot}$
- bílý trpaslík - po odhození vnějších vrstev vznikne eldég. jádro s $M < 1,4 M_{\odot}$
- černý trpaslík - hypotetické závěrečné stadium WD nebo Brown dwarf
- supernova Ia - pokud jsou hvězdy s $M < 8 M_{\odot}$ ve dvojhvězdě a hmotnost WD překročí nad $1,4 M_{\odot}$
- rudý superobr
- supernova typu II
- neutronová hvězda - neutronová degenerace



BD

6. Planetární soustavy

1/2

Sluneční soustava

- soustava těles obíhajících kolem hl. tělesa - Slunce (hvězda HP typ G \Rightarrow 8000K)
- terestrické planety: Merkur, Venuše, Země, Mars
 - blízko Slunce, pomalá nebo vázaná rotace (Venuše zpětná rotace), malý počet měsíců
 - vysoká hustota, malý rozměr \Rightarrow pevný povrch
 - mohou mít tekuté železné jádro \Rightarrow magnetosféra (Venuše slabá - pomalá rotace? - Merkur má)
 - mohou mít drabotnou atmosféru - hmotnost + magnetosféra (+ dopadní)
 těžké prvky, silikáty
 - diferenciace prvků: jádro, plášť, kůra
 oceánická kontinentální
 - mohou obsahovat vodu, či jiné prvky v kapalné formě (~~hydrogen~~ ~~oxid~~ ~~hydrogen~~ ~~oxid~~)
 \Rightarrow podst (např. oblačnost, NLC na Marsu) (kyselina sírová na Venuši)
 - vznikly z původních planetesimalů (desítky de vzdálenosti Jupitera)
 - Merkur a Mars jsou spíše planetesimaly, Venuše a Země jsou "přehodnotně" planety
 - vulkanická činnost - slapové, ~~jevy~~
 - mají ~~obřízky~~ ~~prstence~~ ~~destičky~~ tektoniku a vulkanismus (Venuše už moc ne)
- plynné planety: Jupiter, Saturn, Uran, Neptun - valí se (osa rotace kolmá na rovinu oběhu)
 - vnější část Sluneční soustavy, velký počet měsíců - často zachycených - mají i prstence
 - malá hustota, velká hmotnost
 - malé pevné jádro obklopené plynnou obálkou, rychle rotují \Rightarrow silné magnetosféry
 - primární atmosféry
 - migrovaly ze svých původních drah: Jupiter dovnitř, Saturn vně a U a N si vyměnily dráhy
- ledová tělesa: komety, prstence, některé měsíce
 - vodní led, CO₂, CH₄ - pod povrchem mohou být i tekuté formy
 \Rightarrow může se dokonce objevit vodní kryovulkanismus

Historie geolog. vývoje terestrických planet

- vznik z prvotních planetesimál - srážkami — kataklizmičeské impakty
- impakty - v období velkého bombardování / \Rightarrow prvotní diferenciace
 - zahřívání planety, komety přinášejí zvrstvenou vodu a těžké kovy (těžké)
 - způsobují ztrátu primárních atmosfér
 - vznik solárně přeměněných hornin
- vulkanismus - způsobem slápnutí pevy (měsíc byl blíž)
 - vznik vnitřní schránky \Rightarrow vznik kůry
 - tepla se z ~~těla~~ ^{jádra} přenášejí konvekčními proudy
 - \Rightarrow diferenciace materiálu
 - podílí se na vzniku sekundární atmosféry (CO_2 , H_2)
 - \Rightarrow skleníkový jev \Rightarrow oteplení planety

Atmosféry planet

- vliv hmotnosti planety (grav. zrychlení na povrchu) a přítomnost magnetosféry (případně dobováň)
- terestrické planety - primární atmosféra (z protoplanetární mlhoviny)
 - ztráta ~~primární~~ ^{primární} atmosféry v důsledku mocných impaktů (teplota)
 - ~~na ~~terestrické~~ ~~planety~~ ~~ztráta~~ ~~primární~~ ~~atmosféry~~ ~~v~~ ~~důsledku~~ ~~mocných~~ ~~impaktů~~ ~~(teplota)~~~~
 - postupný vznik sekundární atmosféry (u terestrických)
 - v důsledku geol. ~~procesů~~ a chem. procesů (vulkanismus)
 - u Země i přítomnost organismů (dobováň O_2 , O_3)
 - ochuzena o vodu a vzácné plyny
- plynné planety - prvotní primární atmosféra (dostatečná hmotnost, nízká T)
 - poměrně rychle rotují, často rychleji než jádro (měřeno vůči rotaci magnetosféry)
 - mohutné bouře a úrvy

6. Planetární soustavy

2/2

Magnetosféry Země a Jupiteru

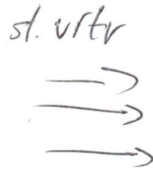
dynamický efekt

- proč mají magnetosféru: pohybují se el. náboj indukuje mag. pole
(váže nosiče náboje)
- těžké rotující jádro zabíráte na vysokou teplotu vytváří mag. pole velmi podobné klasickému dipólu

- výsledné mag. pole je ovlivněno i interakcí se slunečním větrem - pohybující se plazma také indukuje mag. pole

$$M = B_{eq} \cdot R^3$$

- ⇒ vznik radičních pásů a polárních ~~kapas~~ kapes
- vznik polárních záře - aurora borealis



• Země

- téměř dipolové mag. pole
- osa pole neodpovídá ose rotace (na ~~pol~~ neprochází středem země)
(Van-Allenovi radiční pásy)
- poloha pólů je časově proměnlivá, ~~změna~~ za 10^4 let dochází k přepólování (měna polarity)
- způsobeno impakty, vlt. činností
- vznik sečteno dynamickým efektem - rotace vnějšího železného jádra
- ohon do vzdálenosti $100 R_{\oplus}$

• Jupiter

- také téměř dipolové mag. pole, osa pole vůči ose rotace asi o 10°
- generováno tekutinovým dynamem - přispívá i tzv. kovový vodík až do $3/4 R_J$
- velmi rychlá rotace ~~at~~
- na denní straně do 90 -tisídek R_J a na noční straně až k Saturnu (Sat)
- vliv má i existence velkých měsíců ~~at~~

Cír planet. soustavy

- předpokládá se, že budou poměrně podobné těm našim
- spíše u blízkých hvězd (osamocelých) - u dvou hvězd se moment hybnosti odvedlo do vzájemného pohybu složek
- paradoxní první objevená u pulsaru ~~ke kterému se přičítá~~
 - nejspíš zachycená
- velmi často horší Jupitery - výběrový efekt
- způsoby detekce:
 - rad. rychlost hvězdy - způsobeno oběhem planety a hvězdy kolem spol. těžiště
 - případně posun spekt. čar \Rightarrow objevuje hlavně blízké hmotné planety
 - planeta typu Země by ani objevit neměla
 - přímé transity - i planety zemského typu
 - mikročočkováání - grav. "obyč" světla
 - grav. vliv na ostatní členy - hledání dalších členů
- v současnosti i pozorování atmosfér

Vznik a vývoj sl. soustavy

chemické složení odpovídalo převážněm složek vesmíru

- vznik v obřím molekulovém mráčku o hmotnostech $10^4 - 10^6 M_{\odot}$ (soustava otevřené hvězdné skupiny)
- část mráčka o hmotnostech jednotek M_{\odot} začal grav. kolabovat - Jeansovo kritérium
 - asi před 5 mil. lety
 - impulz dodala tvorba okolních hvězd či výbuch supernovy
 - vysvětlavala by to zvýšený výskyt izotopu ^{60}Fe
- původní oblak měl nenulový moment hybnosti
 - \Rightarrow zrychlení rotace při smrštění \Rightarrow vytvoření disku (protoplanetárního)
- při smrštění dochází k ohřevu centrálních oblastí \Rightarrow vznik protahvězdy
 - přibližně po dobu valného kolapsu
 - část energie přeměněna na teplo, část vyzařena
- jádro se blíží hydrostat. rovnováze - ~~stále přitahuje~~ stále přitahuje plyn z okolí
 - hlavní mechanismus přenosu tepla je konvekce \Rightarrow hvězdy typu T Tauri
 - mohutný ~~sluneční~~ sluneční vítr odnáší část M_{\odot}
 - nepravidelné změny jasnosti
 - i lehčí prvky z okolí protažence \Rightarrow diferenciaci protop. disku
- po dobu desítek milionů let klesá zář. výkon a roste teplota v centru Slunce
 - \Rightarrow za ~~100~~⁵⁰ mil. let dochází k začátku term. reakcí
 - za dalších 50 mil. let se Slunce dostává do hydrostat. rovnováhy \Rightarrow hvězda HP
- v tomto už existují zárodky planet. systému - vznik planetesimál z ledových a prachových částic

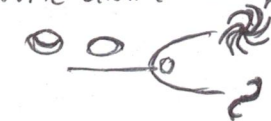
7. Galaxie a větší struktury ve vesmíru

1/2

Stavba Galaxie

- spirální galaxie s přičkou
 - centrální výdut⁺ - koule o 5 kpc
 - disk - mladé hmotné hvězdy, spirální ramena, 30 kpc
 - halo - ~~staré~~ koule o 50 kpc, staré hvězdy, temná hmota
- v jádru galaxie supermasivní černá díra Sagittarius A*
 - v souhvězdí Střelce, zastíněno - rádiově, IR
- Slunce spolu s dalšími hvězdami populace I asi 7-8 kpc od středu (250 km/s)
 - a asi 15 pc od gal. roviny
 - doba oběhu asi 200 mil. let - původně součásti otevřené hvězdokupy - možná M67 (má podobné chemické složení)
 - místní standard klidu - kruhová dráha v rovni disku - reálné slunce: k centrum 9 km/s
předním 12 km/s
stoupá 7 km/s

Typy galaxií

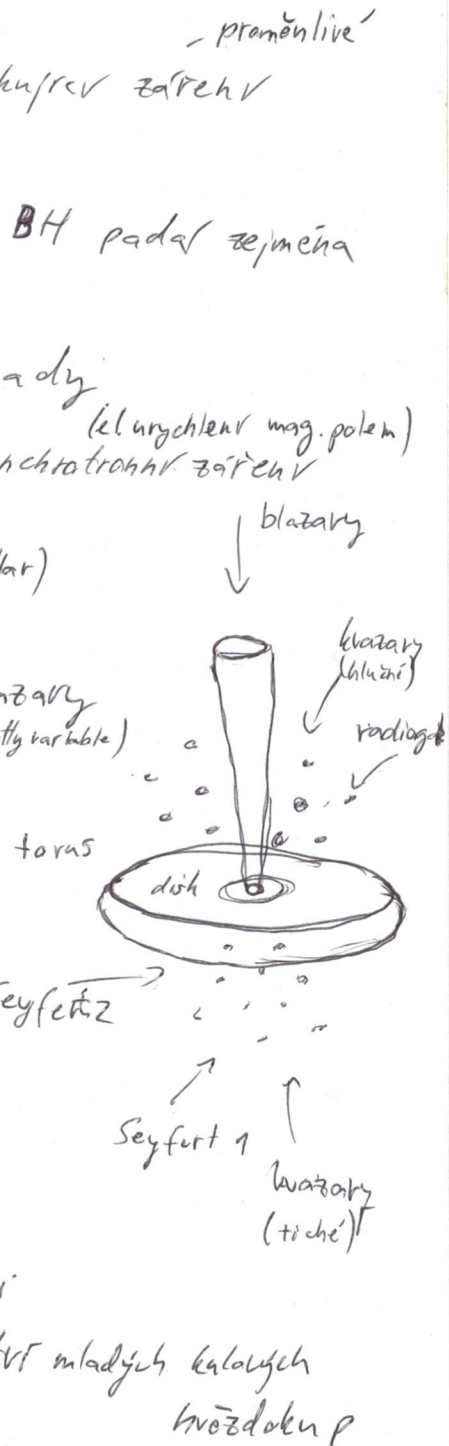
- Hubbleova vidlička 

- spirální galaxie - S + a až d - podle poměru jádra a ramena
 - S přičkou označeno SB
 - hvězdy soustředěny v disku $\ln r = a - br$
 - obsahuje spirální ramena - logaritmické spirály
 - 1-20% mezihvězdné hmoty
 - celk. hmotnost $10^9 - 10^{12} M_{\odot}$
- eliptické galaxie - E + x, kde $x = 10 \left(\frac{a-b}{a} \right)$, 0-7
 - tvar rotačního elipsoidu.
 - staré malé hvězdy \Rightarrow malý zářivý výkon
 - 20,2% mezihvězdné hmoty
 - hmotnosti $10^6 M_{\odot}$ až $10^{13} M_{\odot}$
 - sloupkové galaxie - nejspíš vznik po srážce s menším
 - odhad 17-44% je sloupkových tělesem

- čočkovité galaxie - S0 = přechodný typ mezi S a E
 - výrazné jádro, někdy náznaky ramén
 - téměř bez mezihvězdné látky
- nepravidelné galaxie - Irr (= irregular)
 - méně hmotné: $10^8 - 10^9 M_{\odot}$
 - mladá \Rightarrow 30-40% mezihvězdné látky
 - prstencové galaxie (Hoagův objekt)
 - např.: Magellanova mráčka

Aktivní galaxie

- supermasivní černé díry s akrečím hmotu a produkce záření a nabití částice - výtrysky ionizovaného plynu
- akrečím disk vytváří mag. pole - hmoty na BH padá zejména na pólech \Rightarrow vznik jetů
- energie záření větší než zbytek galaxie dohromady
 - energie získána při spádu hmoty do BH = synchrotronní záření (z.urychlen. mag. polem)
- asi 10% galaxií je ~~aktivních~~ aktivních
 - radiově tiché - Seyfertovy gal., kvazary QSO (quasi-stellar)
 - radiově hluché - radiové gal., blazary, QV kvazary (optically violently variable)
- kvazary = nejzářivější objekty ve vesmíru
 - velmi staré



Vzájemné ovlivňování galaxií

- galaxie se v rámci skupiny či kupy vzájemně přitahují
 - nejprve se stáhnou s galaxií v Andromedě
- při stážce spíše dochází ke splynutí a změně trajektorií
 - k přímým stážkám hvězd dochází velmi zřídka
- \Rightarrow častý kanibalismus u galaxií - menší počtu větší galaxií
 - \Rightarrow tvorba nových hvězd, kolem velkých kanibalů množství mladých kulových hvězdných p
- doba stážky $10^8 - 10^9$ let

7. Galaxie a větš struktur ve vesmíru

2/2

Místní skupina galaxií

- nejbližší okolí Galaxie
- největšími členy: M31, Galaxie, M33, Magellanova mráčka + trpasličí satelitní či osamocené galaxie (desítky až sto členů)
- odhadovaná hmotnost $10^{12} M_{\odot}$
- spolu s kupou galaxií v Panně tvoří Nadkupu v Panně ~~skupinu galaxií~~

Kupy a nadkupy galaxií

- řádově tisíce galaxií - jen stovky dost jasných, zbytek trpasličích galaxií
- největší gravitačně vázané objekty - hmotnost $10^{14} - 10^{15} M_{\odot}$, průměr \sim Mpc
- viriálová hmotnost ~~hmotnost~~
- hustotní profil - NFW profil

$$M_{vir} = \frac{4\pi}{3} v_{vir}^3 \rho_{crit} \cdot \Delta_c, \quad \Delta_c \approx 200$$

- Hernquist, Dehnen

- Beta profil a plyn

- slabí grav. začarování

- v centru často obír eliptické galaxie s masivním jádrem temné hmoty (M87)

$$\rho_{dm}(r) = \frac{\rho_{crit} \cdot \Delta_c}{\frac{r}{r_s} \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2} \quad \left| \quad r_s = r_{200} / c \right. \\ \left. \rho_{crit} = \frac{200}{3} \frac{c^3}{\ln(1+\Delta_c) - \frac{c}{1+\Delta_c}} \right.$$

$$\Delta_c = 18\pi^2 + \dots$$

- na rozdíl od galaxií velmi malé množství bar. hmoty je uloženo v hvězdách (6-24%)
- zbytek ve formě ionizovaného plynu (plazma) vyplňuje prostředí kupy = Intracluster medium (ICM) - teploty $10^7 - 10^8$ K \Rightarrow X-ray

- nadkupy již nejsou gravitačně vázané a časem se rozpadají
- desítky až stovky ~~stovky~~ Mpc

- z nadkup jsou tvořeny filameny a z filamentů tzv. zdi a prázdna místa (voids)
- na těchto škálách vesmír připomíná kosmickou "pěnu" a je homogenní a izotropní ($> 10^2$ Mpc)

8. Základy kosmologie

Kosmologický princip

$$H_0 \approx 70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$$

- vesmír je homogenní, izotropní a rozplácá se
 \Rightarrow pozorovatel uvidí stejné rozložení rychlostí nezávisle na poloze
- expanze je z pohledu pozorovatele popsána Hubbleovým zákonem
 \Rightarrow kosmologický řád posuv vzdálených objektů
- hodnota Hubbleovy konstanty se s časem měnila
 \Leftrightarrow měnila se rychlost expanze vesmíru
- v současnosti je rychlost konstantní (plochý)

$$v = H_0 r$$

$$z \approx \frac{v}{c} = \frac{r - r_0}{r_0}$$

přesněji: ~~...~~

Charakteristiky vesmíru

$$z + 1 = \frac{a(t_0)}{a(t)}$$

- Hubbleova konstanta $H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$ $\vec{r} = a(t) \vec{x}$ - comoving distance
- střední hustota látky - velmi blízko tzv. kritické hustotě
- lze odvodit z Friedmannových rovnic

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_m - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

k ... zakřivení
 Λ ... cosm. konstanta
 plochý $\Rightarrow k=0$
 předpoklad: $\Lambda=0$

$$\Rightarrow \rho_{crit} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 2.77 \cdot 10^{-27} h^2 \text{ Mpc}^{-3}$$

- decelerační parameter $q = -\frac{\ddot{a}a}{\dot{a}^2} = -\left(1 + \frac{\dot{H}}{H^2}\right)$ $\Omega_m = 1, \Omega_\Lambda = 0$
 $q_0 = 0,5$

$$q = \frac{1}{2} \sum \Omega_i (1 + 3w_i) = \frac{1}{2} \Omega_m - \Omega_\Lambda$$

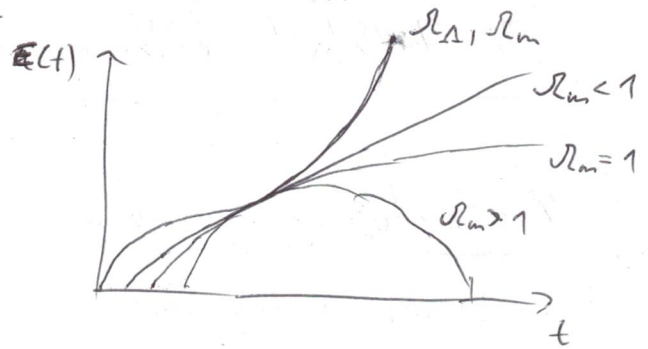
- měření $\Rightarrow q_0 \approx -0,6 \pm 0,2$ ne-relativistické bar. ~~...~~ $w=0$
 fotony $w = \frac{1}{3}$ (zanedbáme)
 temná energie $w \approx -1$

~~...~~
 $\Omega_m = 0,3, \Omega_\Lambda = 0,7$
 $q_0 = -0,55$

- zakřivení vesmíru ~~...~~

$$E(t) = \frac{H(t)}{H(t_0)} = \sqrt{\Omega_m a^3 + \Omega_\Lambda + \Omega_k a^{-2}} \Rightarrow \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1 - \Omega_k$$

\Rightarrow v závislosti na hodnotě Ω_m a Ω_Λ určíme zakřivení V



Ω	k	geometrie	vesmír	úhly v trojúhelníku
< 1	> 0	sférická	uzavřený	$> 180^\circ$
$= 1$	$= 0$	plochá	plochý	$= 180^\circ$
> 1	< 0	hyperbolická	otevřený	$< 180^\circ$

- způsob smrti vesmíru:

- uzavřený vesmír ($\Omega_m > 1$) - znovu zkolabuje \Rightarrow velký krach
- velmi otevřený vesmír - expanze zrychlí natolik, že překoná gravitaci a další interakce \Rightarrow velké roztržení
- plochý či slabě otevřený vesmír - po 10^{14} let bude ve stavu velmi vysoké entropie \Rightarrow tepelná smrt

Po Velkém třesku

- většina cosmologických modelů vychází z velkého třesku - nic nikam netěchalo - původně homogenní prostředí
- Vesmír "začal" z jednoho velmi hustého a horkého bodu - ne lze zjistit nic dřív než je Planckův čas 10^{-43} s
- při inflační fázi ($10^{-36} - 10^{-32}$ s) se nafoukl do extrémních rozměrů
- postupně docházelo k oddělení interakcí (10^{-32} s) - tvorba velkého sjednocení ~~KBO~~
- potom baryogeneze \Rightarrow quark-gluonová plazma - hmoty x antimoty
- hadronová éra - 1 ms - 1 s - 75% H, 25% He + Li, Be, B
- leptonová éra - 1 s - 10 s - nepřehledný: rozptýl na elektronech
- fotonová éra - většina energie ve fotonech ale stále \curvearrowright teď 27K
- rekombinace - 370 tisíc let po VT (3000 K \Rightarrow reliktový záření)