

# Astrofyzika

„Člověk se liší od vepřů mimo jiné tím, že občas zvedá hlavu a dívá se na hvězdy“

Viktor Ambarcumjan – arménský astrofyzik

## 1) Informace o Vesmíru

- elektromagnetické záření

Naše atmosféra většinu pohlcuje.

Nepohlcuje viditelné světlo a rádiové vlny.

Oběžné družice – mikrovlnná, infračervená, ultrafialová, rentgenová, gama astronomie.

- Kosmické záření – proud vysokoenergetických částic (zejména protonů).

- meteority

- kosmonautika

## 2) Historie názorů na Vesmír

Starověké názory – Zemská deska nesena 4 slony.

Pythagoras – 10 nebeských sfér kolem centrálního ohně, sféry se otáčejí a vydávají hudbu sfér.

Geocentrický názor – (Řek Ptolemaios 2. století n.l.) Země je středem vesmíru, vše obíhá kolem ní .

Heliocentrický názor – (Polák M. Koperník - 16. století) Středem je Slunce a kolem obíhají po kružnicích planety.

Pohyby planet kolem Slunce popsal (kinematicky Němec Johannes Kepler na základě pozorování Tycha Braha (Praha 1609 Astronomia Nova).

Z hlediska dynamiky vysvětlil pohyby planet Newton gravitačním zákonem a později upřesnil Einstein OTR.

## 3. Keplerovy zákony:

1. Planety se pohybují kolem Slunce po elipsách málo odlišných od kružnic, v jejichž společném ohnisku je Slunce.

2. Obsahy ploch opsaných průvodičem planety za jednotku času jsou konstantní.

3. Poměr druhých mocnin oběžných dob dvou planet se rovná poměru třetích mocnin hlavních poloos

jejich trajektorií:  $\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$ .

perihélium, afélium, nerovnoměrný pohyb – nejrychleji v P (leden), nejpomaleji v A (červenec => zimní půlrok 179 dní, letní půlrok 186 dní)

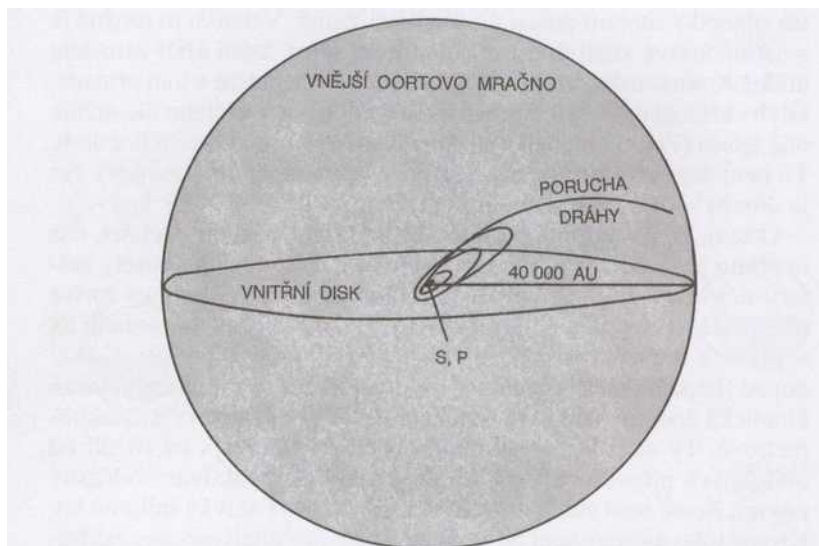
Sluneční soustava (4,7 miliardy let)

Země (4,5 miliardy let)

Planety podobné Zemi - Merkur, Venuše, Země, Mars

Obří planety – Jupiter, Saturn, Uran, Neptun

+ Pluto, Planetky – pás mezi Marsem a Jupiterem – ten narušoval vznik planet, Měsíce, Komety

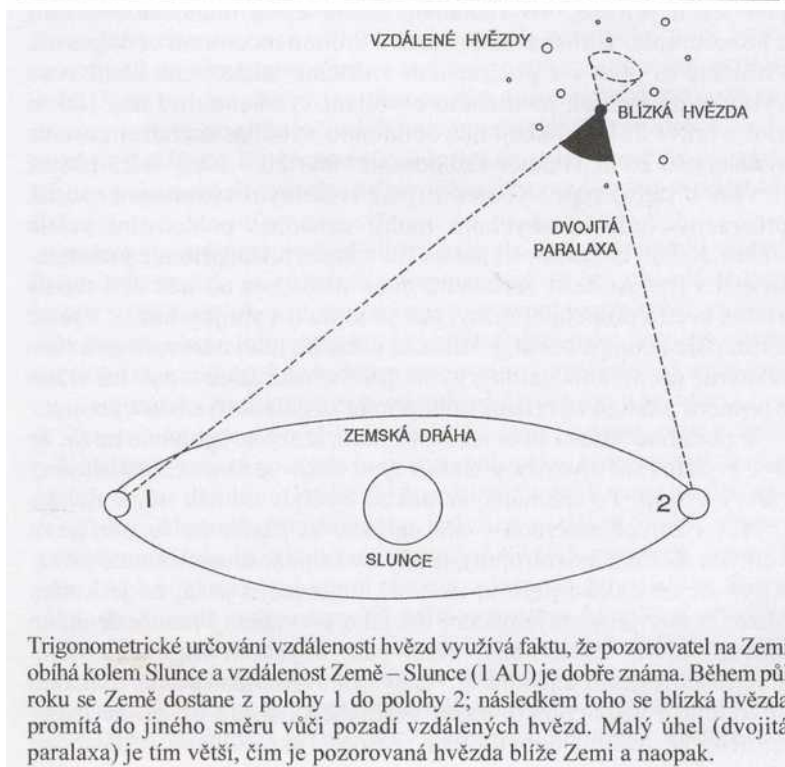


Rozložení hmoty ve sféře přitažlivosti Slunce je překvapivě složité. Na schématu je poloha Slunce  $S$  a planet  $P$  vyznačena nepatrným bodem uprostřed. Kolem Slunce se pak do velké vzdálenosti přes 0,5 světelného roku nacházejí kometární jádra ve zploštělém vnitřním disku – jeho existence připomíná zárodečný disk, z něhož naše soustava vznikla. Disk je obklopen vnějším (Oortovým) mračnem komet, v němž se nalézá snad až 100 bilionů kometárních jader. Vlivem gravitačních poruch se čas od času některé z jader dostane na protáhlou dráhu směrem ke Slunci a rozměry jeho eliptické dráhy se poměrně rychle zmenšují – astronomové na Zemi pozorují typickou periodickou kometu, která však nejpozději za několik desítek tisíc let zaniká. Oortovo mračno je tedy jakousi mrazivou zásobárnou komet. Jelikož jádra jsou velmi malá (typický rozměr je 10 km) a chladná ( $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), nespátříme je v Oortově mračnu ze Země ani těmi největšími přístroji.

### 3) Měření vzdálenosti

- **Trigonometrická metoda** (1672 - Cassini , Paříž – Francouzská Guayana (Již. Amerika) – vzdálenost k Marsu) – předtím jen poměry
  - o denní paralaxa – základnou je poloměr Země (Měsíc –  $57'$  - Hiparchos – planety až dalekohledem)
  - roční paralaxa  $\pi$  – základnou je vzdálenost Země Slunce – hvězdy do 100 pc - (proxima Centauri  $0,77''$  )

Období	Co se dalo změřit	Přibližné hodnoty vzdálenosti	Poměr v porovnání s předešlým údajem
3. stol. př. n. l.	obvod Země	$10^4$ km	
15. stol. n. l.	vzdálenost Měsíce	$10^5$ km	10 : 1
16. stol. n. l.	vzdálenost Slunce	$10^8$ km	$10^3$ : 1
1840	vzdálenost blízkých hvězd	$10^{14}$ km = = 10 světelných let	$10^6$ : 1
1920	rozměry Galaxie	$10^5$ světelných let	$10^4$ : 1
1930	vzdálenosti blízkých galaxií	$10^7$ světelných let	$10^2$ : 1
1950	vzdálenosti slabých galaxií	$10^9$ světelných let	$10^2$ : 1
1970	vzdálenosti kvasarů	$10^{10}$ světelných let	10 : 1



- Pomocí 3. Keplerova zákona
- radarem - planety (přesnost na několik km)
- Jasnost hvězd – (etalony – periodické proměnné hvězdy – zářivost souvisí s periodou, supernovy 1a) (Velký Magellanův oblak – pomocí dvojhvězd)

### Jednotky:

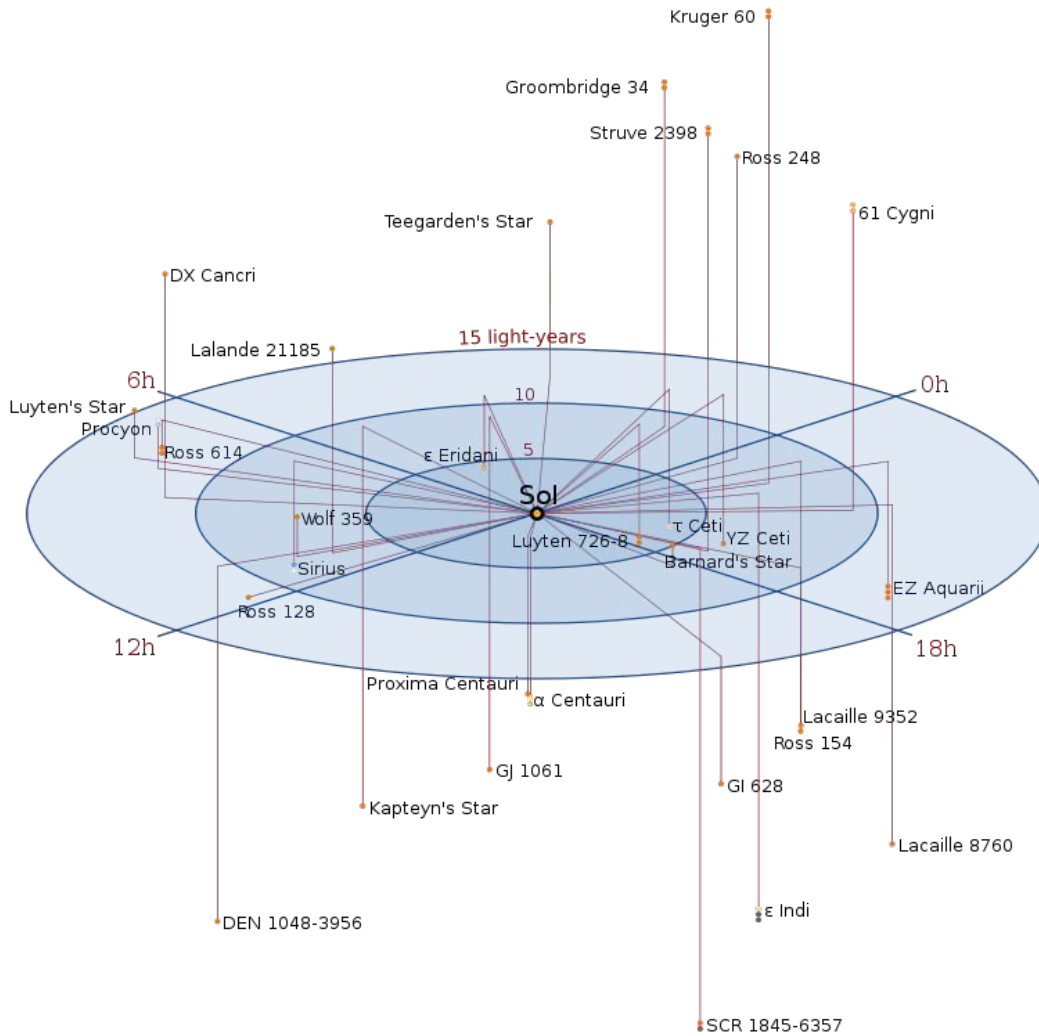
Astronomická jednotka ...  $1 \text{ AU} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$  ( $1 \text{ au} = 149\,597\,870\,700 \text{ m} \dots 318. 2012$ )

parsek ...  $1 \text{ pc} = 3,09 \cdot 10^{13} \text{ km} = 2,06 \cdot 10^5 \text{ AU}$  ... vzdálenost z níž vidíme 1AU pod úhlem 1 obloukové

vteřiny (Proxima Centauri  $\frac{1}{0,77} = 1,3 \text{ pc}$ )

Světelný rok ...  $1 \text{ ly} = 9,46 \cdot 10^{12} \text{ km}$ ,  $1 \text{ pc} = 3,26 \text{ ly}$  (Proxima Centauri  $3,26 \cdot 1,3 = 4,23 \text{ ly}$ )

## 32 nejbližších hvězd



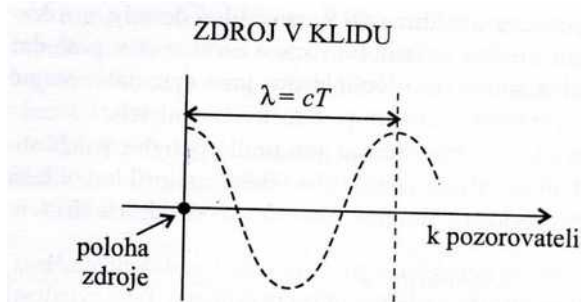
### Dopplerův jev

dochází – li k vzájemnému pohybu zdroje vlnění a pozorovatele, mění se vlnová délka a frekvence vlnění.

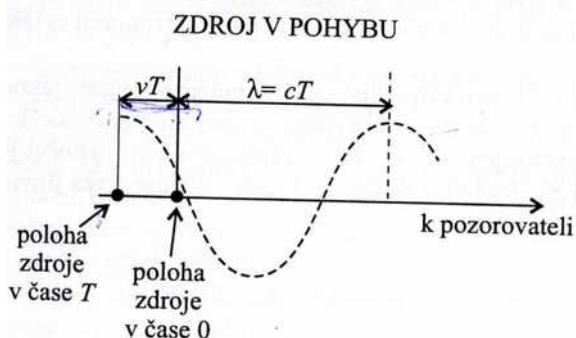
1) v klidu:  $\lambda = cT$

2) Zdroj se vzdaluje rychlostí  $v$ , za  $T$  urazí dráhu:  $\Delta\lambda = vT$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = v/c$$



Obr. 2-26. Představme si zdroj vlnění, který kmitá s periodou  $T$ . Je-li zdroj v klidu (vzhledem k pozorovateli), je vzdálenost mezi sousedními vrcholy vln  $\lambda = cT$ , kde  $c$  je rychlost vlnění.



Jestliže se však zdroj vzdaluje od pozorovatele rychlostí  $v$ , pak za čas  $T$  se vzdálí o  $\Delta\lambda = vT$  a o tuto vzdálenost se prodlouží vzdálenost mezi sousedními vrcholy. Jestliže druhou rovnici vydělíme první, dostaneme  $\Delta\lambda/\lambda = v/c$ .

Měříme

- radiální rychlosti hvězd:

hvězdy se vzdalují => spektra prvků jdou k větším  $\lambda$  – červený posuv  
přibližují – li se, pak opačně

- rychlost rotace (posuvy na okrajích hvězdy)
- ze šířky spektra poznáme teplotu -  $\uparrow T \Rightarrow$  širší spektrální čára (větší náhodné rychlosti částic)

## Hvězdy

- jednoduché
- dvojhvězdy (obíhají kolem společného těžiště)
- proměnné – periodicky nebo nepravidelně mění svou jasnost (hvězda mění svůj  $r$  a  $T$ )
- Novy – jasně zazáří a pak zas pohasne, může se i opakovat (10 let)
- supernovy – mnohem víc zvýší svou jasnost – výroba těžkých prvků

### Charakteristiky hvězd

Hvězdná velikost (Ptolemaios), (jasnost) ... [m] = mag (magnituda)

nejjasnější – 1. velikost

nejslabší – 6. velikost

$m = 6$  mag ... hvězdná velikost hvězdy je 6 magnitud

$m$  ... pozorovaná (ze Země, závisí na vzdálenosti), ... absolutní (nezávislá na vzdálenosti)

Absolutní hvězdná velikost – ve vzdálenosti 10 pc od Země

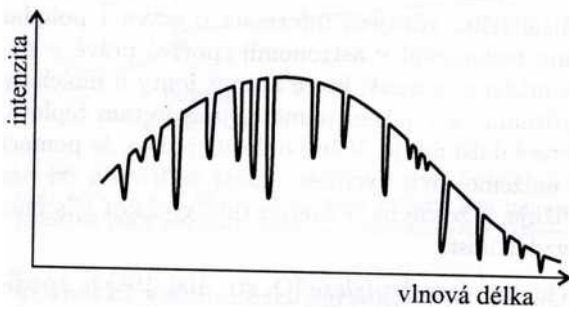
Zářivý výkon  $L$ ... celková energie, kterou hvězda vyzáří za sekundu ( $L$  slunce =  $3,83 \cdot 10^{26}$  W)

Jasnost  $j$ ... zářivý výkon hvězdy prošlý  $1\text{m}^2$   $j = L/(4\pi r^2)$

Pogsonova rovnice:  $m_A - m_B = -2,5 \log \frac{j_A}{j_B}$  (Hvězda  $m_1$  je 100x jasnější než  $m_6$ )

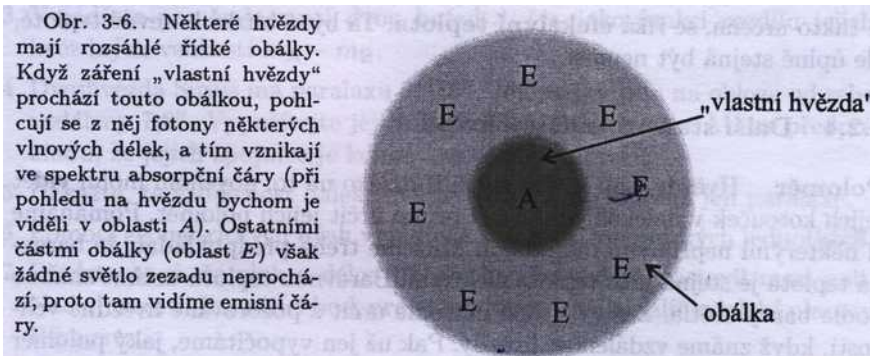
Spektrum – spojité + absorpční či emisní spektrální čáry

- spojité – teplota  $\uparrow T \Rightarrow \uparrow f, \downarrow \lambda$
- absorpční – chladnější vrstvy atmosféry



Obr. 3-5. Spektrum znázorníme grafem, který ukazuje závislost intenzity světla na vlnové délce. Absorpční čáry jsou vidět jako „zářezy“ na grafu. Čistě spojitě spektrum by bylo hladké, bez „zářežů“.

- **emisní** – v obálkách hvězd



Obr. 3-6. Některé hvězdy mají rozsáhlé řídké obálky. Když záření „vlastní hvězdy“ prochází touto obálkou, pohlcují se z něj fotony některých vlnových délek, a tím vznikají ve spektru absorpční čáry (při pohledu na hvězdu bychom je viděli v oblasti A). Ostatními částmi obálky (oblast E) však žádné světlo zezadu neprochází, proto tam vidíme emisní čáry.

## Vznik a vývoj hvězd

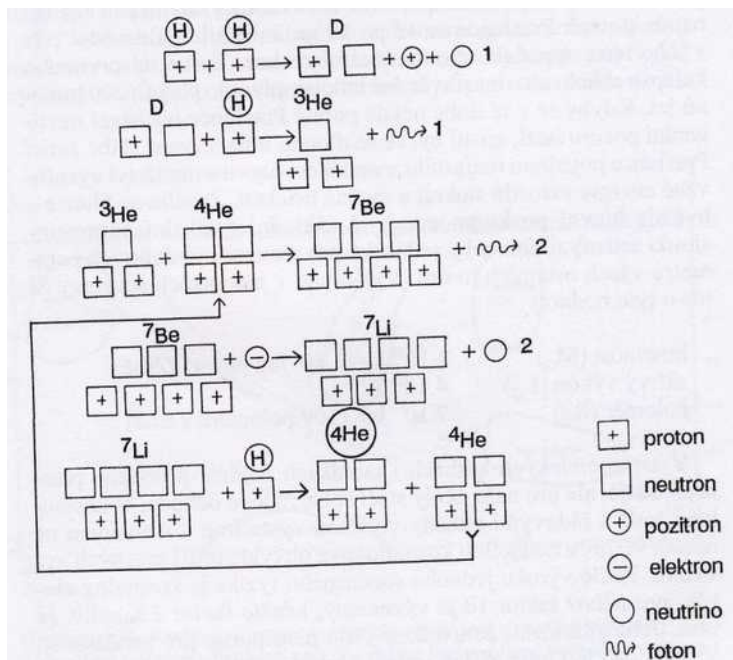
Gravitací se smršťuje mračno **mezihvězdného plynu** (vodík, helium), roste teplota ( $10^{6-7}$  K) až se zapálí termojaderné reakce vodíku (**proton – protonový řetězec**).

Během smršťování silně září a dorazí na hlavní posloupnost **stavového diagramu**. Pak po dobu hoření vodíku na ní zůstává (slunce 10 miliard roků). Hmotnější hvězdy hoří rychleji.

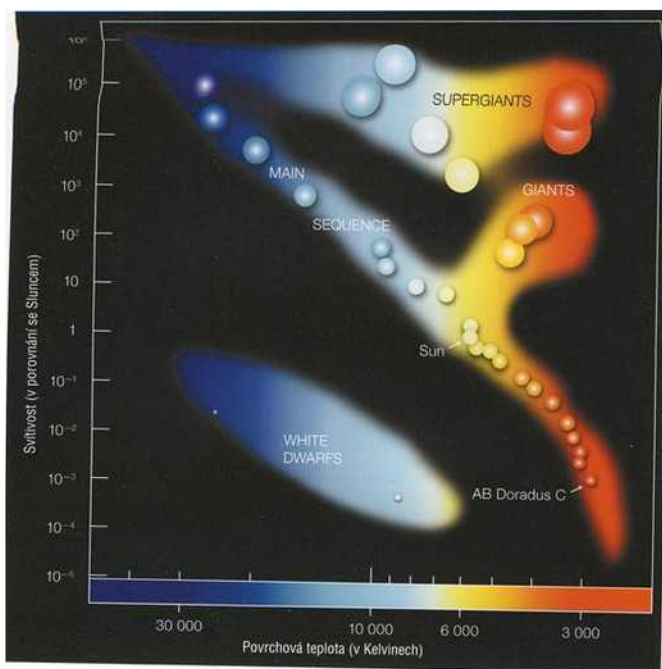
Když se vypálí vodík, gravitačně se hvězda dále smršťuje a mohou se zapálit **další reakce**. Konec hvězdy závisí na její hmotnosti: 0,1 – 60  $M_{\odot}$



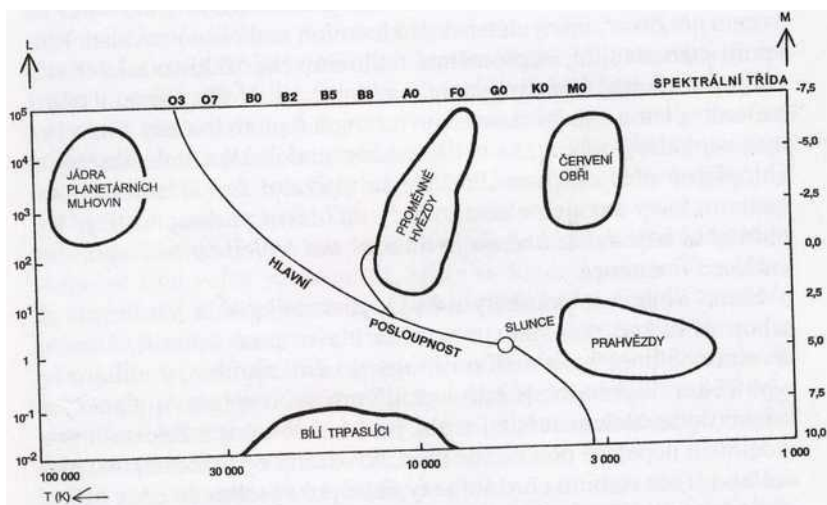
M16; Orlí mlhovina s hustými stoupy molekulárního plynného vodíku a prachu, v nichž se tvoří hvězdy.



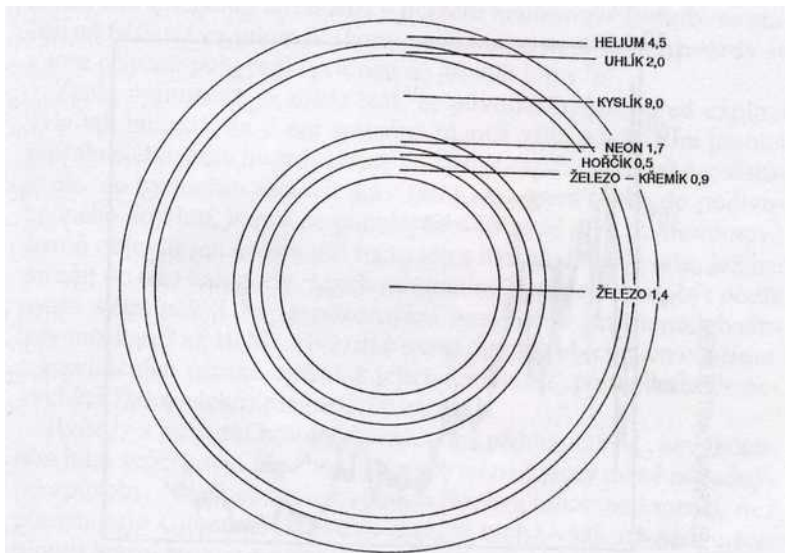
Schematický průběh termonukleární reakce, k níž dochází v nitru Slunce při teplotě asi 15 MK. Vpravo jsou vysvětleny symboly použité pro různé částice. U elektricky nabitých částic je označeno znaménko náboje. Číslo v exponentu u značek chemických prvků udávají celkový počet nukleonů (protonů a neutronů) v příslušném jádře. Jádra nově vstupující do reakce (a výsledné jádro) jsou zakroužkována. Energie se odnáší, jak patmo, neutriny (1, 2) a fotony (1, 2). Energie pozitronu se uvolní teprve anihilací s volným elektronem v podobě dalších dvou fotonů záření gama. Pro jednoduchost je uvedena jen jedna alternativa tzv. protonově-protonového řetězce.



Moderní Hertzsprungův-Russellův diagram ukazuje hvězdné populace z hlediska jejich svítivosti a teplot (v kelvinech).



Hertzsprungův-Russellův diagram znázorňuje vztah mezi spektrální třídou ( $O - M$ ) a absolutní hvězdnou velikostí ( $M$ ). Fyzikálně lze absolutní hvězdnou velikost vyjádřit zářivým výkonem ( $L$ ), přičemž jednotkou je zářivý výkon Slunce ( $4 \cdot 10^{26}$  W), a místo spektrálních tříd lze uvést povrchovou teplotu hvězd  $T$ . Z diagramu je vidět, že se hvězdy kupí jednak kolem tzv. hlavní posloupnosti, na níž leží také Slunce, a jednak kolem poměrně ohraničených oblastí diagramu. Ukázalo se, že toto rozdělení souvisí s hvězdným vývojem. Každá hvězda se nejprve „vynoří“ v pásmu prahvězd, pak se přesune na hlavní posloupnost; tam také setrvává relativně nejdéle. Po vyčerpání zásob vodíku v jádře procesy termonukleární reakce přejde hvězda do pásma proměnných hvězd a posléze mezi červené obry. Obnažením nitra červených obrů se z těchto zestárých hvězd stanou žhavá jádra planetárních mlhovin a nakonec kompaktní bílí trpaslíci.



Průřez hvězdou o hmotnosti  $20 M_{\odot}$  v období těsně před gravitačním zhroutením a následnou explozí supernovy. V důsledku celé posloupnosti termonukleárních reakcí se hvězda skládá ze slupek rozdílného chemického složení. U každé slupky je uvedena její celková hmotnost v násobcích hmotnosti Slunce. Vývoj hmotné hvězdy probíhá nesrovnatelně rychleji než vývoj Slunce a z chemického hlediska je charakterizován naprostým vyčerpáním vodíku, normálně nejhojnějšího prvku ve hvězdách. Jakmile v takto masivní hvězdě ustanou termonukleární reakce, hvězda se prudce zhroutí vlastní vahou a následná rázová vlna ji z větší části rozmetá do mezihvězdného prostoru – na Zemi pak pozorujeme výbuch supernovy. Takto se mezihvězdný prostor obohacuje o prvky těžší než vodík a helium.

### 1) Hnědý trpaslík $m < 0.1 M_{\odot}$

– ani se nezapálí vodík, V centru PL, která dál tuhne a hvězda chladne. Zářív v infračervené oblasti. Až vychladne, stane se černým trpaslíkem.

### 2) Červení obři $m < 1.4 M_{\odot}$

– spálí se i helium na uhlík. Záření nafoukne hvězdu, nízká teplota povrchových vrstev. Za 5 miliard let Slunce.

### 3) Bílý trpaslík $m < 1,4 M_{\odot}$

– Po vyhoření hélia se opět smršťuje a elektrony vytvoří degenerovaný plyn. Hustota milionkrát větší než hustota vody. Velikost Země, malý L. Postupně chladnou. Až vychladnou, stanou se černými trpaslíky.

### 4) Supernova $m > 1.4 M_{\odot}$

- degenerovaný e plyn nezastaví stlačování, zažehnou se další reakce až po  $Fe_{56}$ , zůstane železné jádro – další fúze už neprobíhá, neuvolňuje se při ní E.

Vnější části hvězdy padají na jádro – vysoké T, velké záření, rázová vlna – výbuch supernovy.

- vznikají i prvky těžší než železo

- většina látky (i s nově vzniklými prvky) se vymrští do mezihvězdného prostoru

- jádro se tlakem přemění na neutrony (elektrony se spojí s protony) =>

### 5) Neutronové hvězdy $m < 2 M_{\odot}$

po supernově, hustota jako v jádře atomu –  $10^{17} \text{ kg m}^{-3}$ ,  $r = 10 \text{ km}$ ,

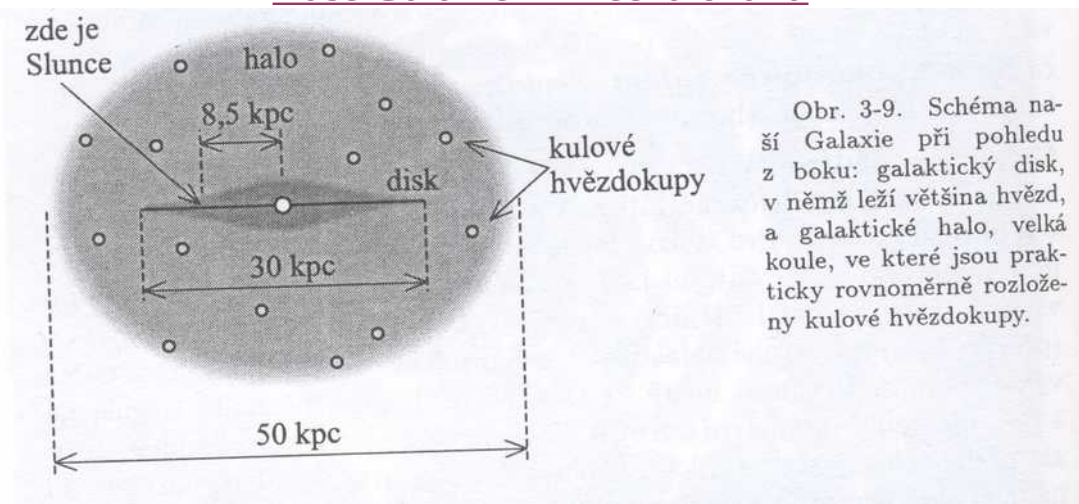
rychle rotuje ( $f = 640 \text{ s}^{-1}$ ) a vysílá přitom EM záření - pulzary

### 6) Černé díry $m > 2 M_{\odot}$

- gravitační kolaps, singularita prostoru a času, poloměr událostí – neunikne ani světlo => nevidíme jí, usuzujeme na ní jen z jejího gravitačního působení – dvojhvězdy, z nichž vidíme jen jednu a přichází od nich rentgenové záření, středy galaxií



## Naše Galaxie – Mléčná dráha



Obr. 3-9. Schéma naší Galaxie při pohledu z boku: galaktický disk, v němž leží většina hvězd, a galaktické halo, velká koule, ve které jsou prakticky rovnoměrně rozloženy kulové hvězdokupy.

100 miliard hvězd, typická průměrná vzdálenost hvězd 2pc

- **galaktický disk** (30 kpc) - spirální ramena, Slunce 8,5 kpc od středu  $v = 220 \text{ km/s}$

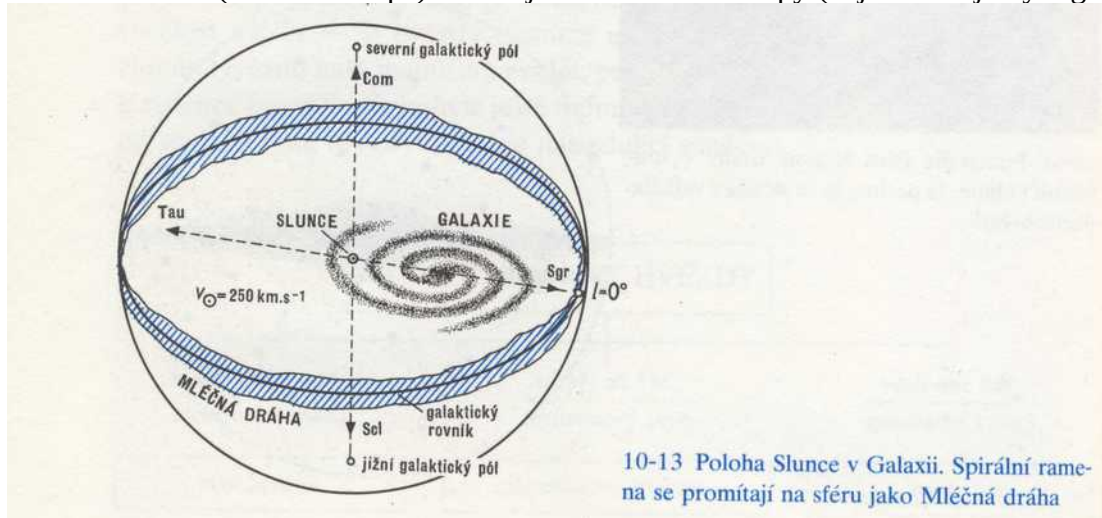
**mezihvězdná látka** ( $1 \text{ atom} / \text{cm}^3$ )

**mezihvězdná oblaka** (mlhoviny- osvětlená blízkou hvězdou, tmavý prostor), milionkrát větší hustota, rodiště nových hvězd

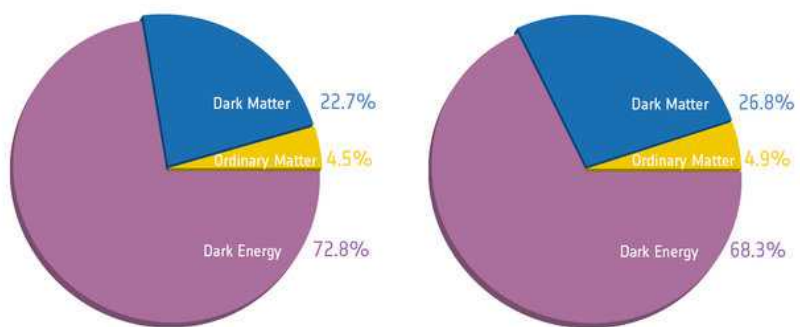
**kosmické záření** – sluneční vítr ( $E = 1000\text{eV}$ , zachytí Zemské MP) + kosmické záření - protony a jádra helia ( $E = 10^8 - 10^{22} \text{ eV}$ ) některé dopadnou až na i pod zem, zdroj neznámý

**Galaktické jádro** – ve středu disku, velká hustota hvězd i mezihvězdné látky, velký zářivý výkon - infračervený, silný zdroj rádiových vln – patrně černá díra  $m = 5 \cdot 10^6 M_\odot$

**Galaktické halo** (koule – 50 kpc) obsahuje kulové hvězdokupy (nejstarší objekty v galaxii)



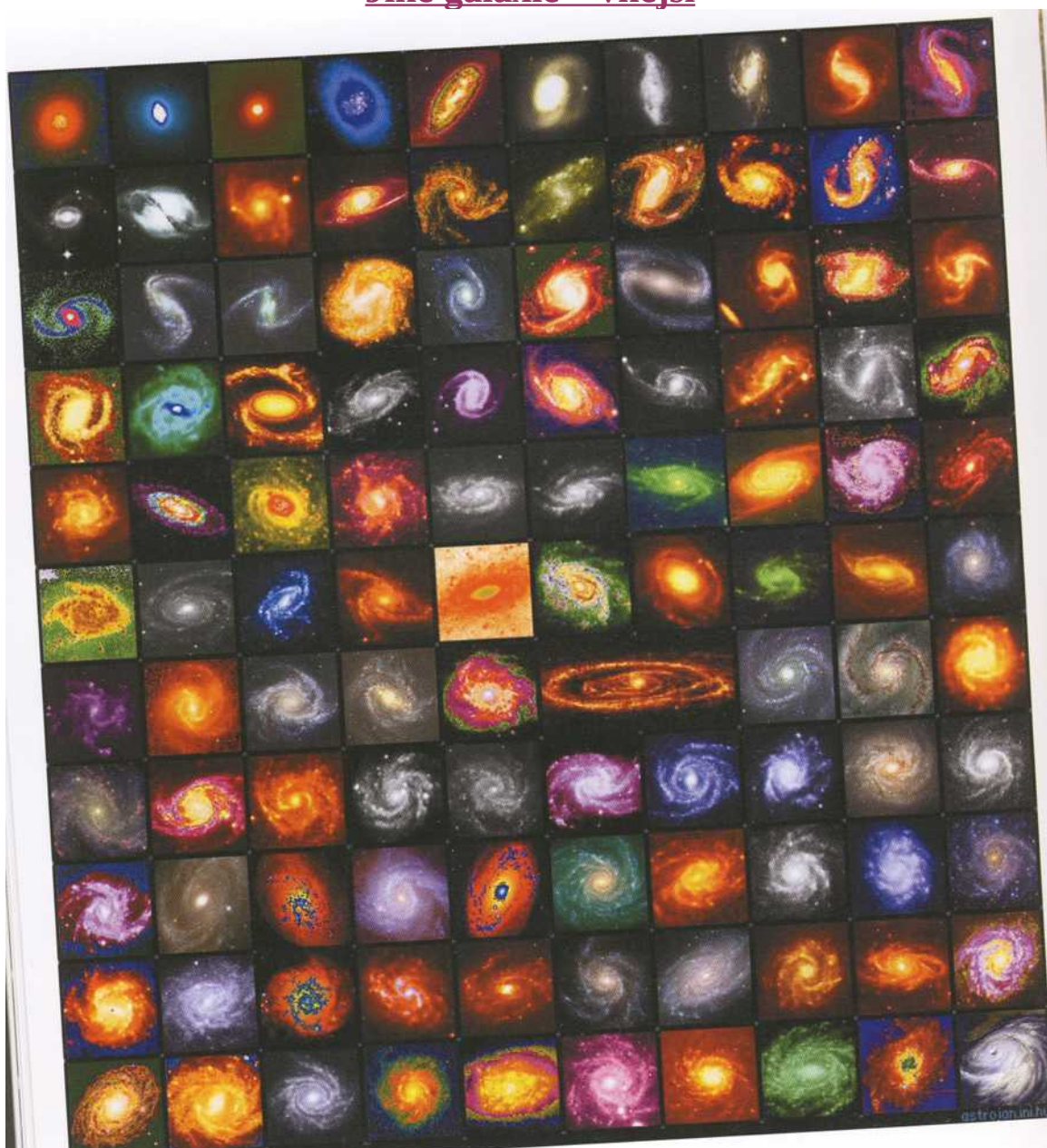
**Skrytá hmota** – z rychlosti oběhu nejvzdálenějších hvězd lze určit hmotnost galaxie. Ale ta je mnohem větší než hmotnost látky, kterou vidíme. Musí tu být nějaká skrytá (černá, temná) hmota. Co to je? – velké planety, vyhaslé hvězdy, neutronové hvězdy, černé díry, dosud neznámé částice (neutrina) – nevíme.



Before Planck

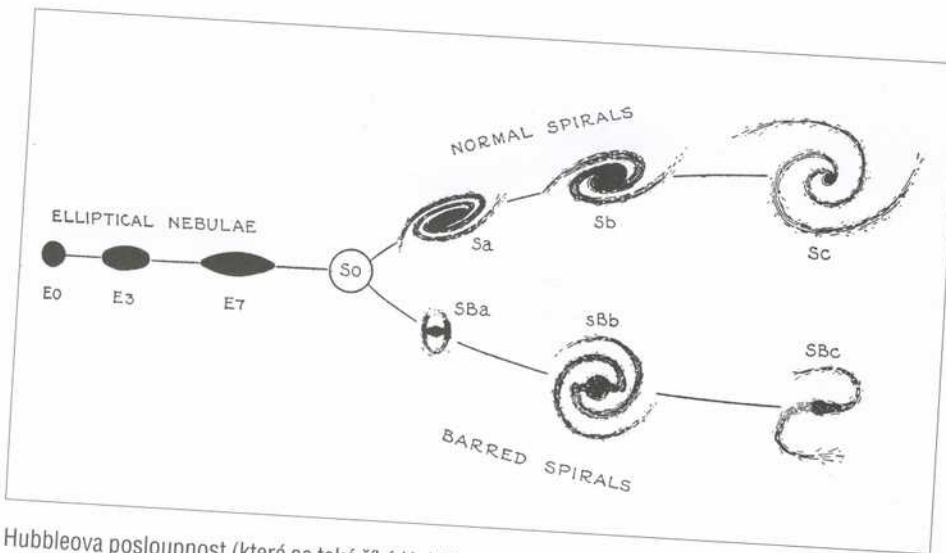
After Planck

## Jiné galaxie – vnější



vidíme je jako obláčky (podobně jako mlhoviny v naší Galaxii)  
 1755 – I. Kant předpokládal jejich existenci

1924 Edwin Hubble – cefeida (proměnná hvězda) v Andromedě je vzdálená několik 100 kpc



Hubbleova posloupnost (které se také říká Hubbleova ladička). Tento diagram publikoval roku 1936 americký astronom Edwin Hubble. Podává klasifikaci galaxií (zde se jim říká mlhoviny) do různých typů. Tento systém je široce používán dodnes. Číslo u eliptických galaxií nalevo označuje rostoucí eliptičnost. Zde jsou uvedeny jen typy E0, E3 a E7. Spirální galaxie jsou napravo a jsou rozděleny na normální spirály (nahore napravo) Sa, Sb a Sc a na spirály s příčkou (nahore nalevo) Sba, SBb a SBc. Spirály s příčkou mají v jádře „příčkovitý“ útvar na rozdíl od normálních spirál se sférickým jádrem. Jejich spirální ramena začínají na koncích příčky. Indexy a, b a c označují rostoucí rozevřenost spirálních zákrutů. Přechodný typ „čočkové“ galaxie, označený jako So, připomíná diskové spirální galaxie bez spirálních ramen.

**Kupy a nadkupy galaxií**

naše Galaxie patří do **místní skupiny** (30 galaxií, 1,5 Mpc)

Sousedí- Velký a Malý Magellanův oblak (vzdálenost 50 kpc, průměry 9 a 7 kpc), skupiny – desítky galaxií

**kupy** - tisíce galaxií, typický průměr 3 Mpc, typická vzdálenost galaxií 700 kpc

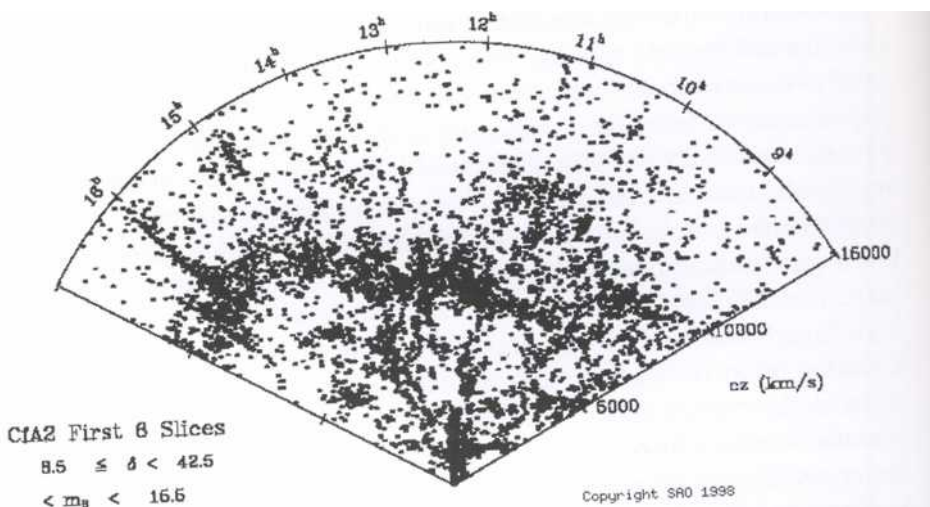
**nadkupy** - statisíce hvězd, 30 Mpc

Nadkupy – 10% objemu vesmíru

V rozměrech 10 Mpc – vesmír nehomogenní

100 Mpc - homogenní

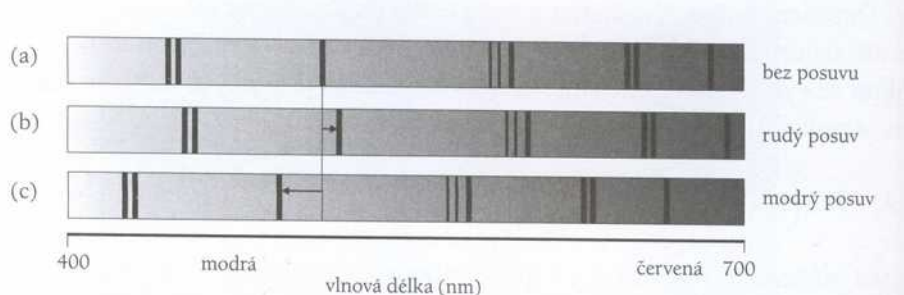
**Kosmologický princip** – vesmír je homogenní a izotropní – v okolí každého místa má stejné vlastnosti a jeho struktura nezávisí na směru.



CfA přehlídka z roku 1989 ukazuje mnohem více galaxií než její předchůdce a odhaluje „velkou stěnu“ galaxií táhnoucí se nebesy.

## Hubbleův zákon (Edwin Powell Hubble – USA)

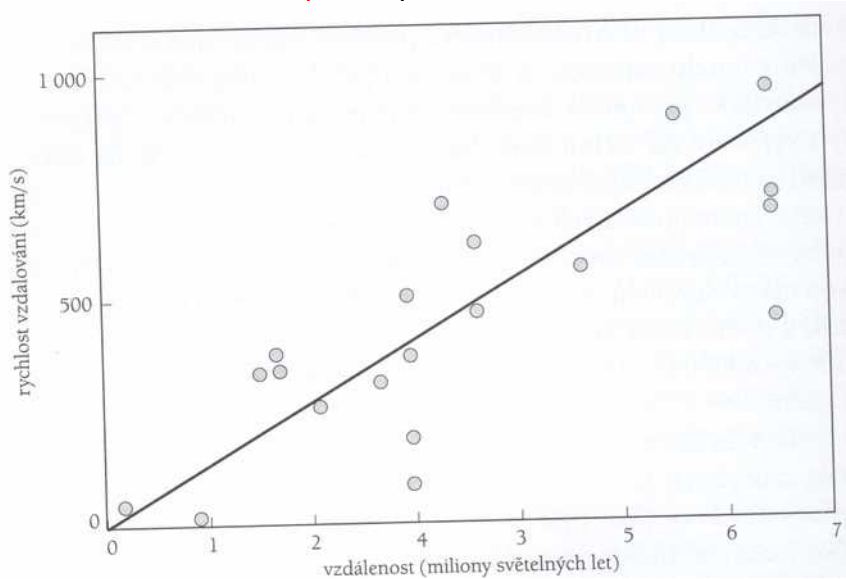
1929 – určil (pomocí relativní magnitudy) vzdálenosti 18 galaxií a objevil v jejich spektrech červený posuv.



Čím dál je galaxie, tím rychleji se od nás vzdaluje:

$$v = H r \quad H = 75 \pm 25 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \quad H. \text{ konstanta}$$

( $H = 67,15 \pm 1,2 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  ... poslední měření – družice Planck, 21. 3. 2013)



## Kvasary

1960 – malé, zářivé objekty s velkým červeným posuvem:  $v = 0,15 c \Rightarrow$  velká vzdálenost.

Patně – obrovská černá díra ( $10^{8-9} M_{\odot}$ ), září do ní padající hmota

## Kosmologie

- vývoj vesmíru jako celku
- OTR + standardní model

Převažující názor (i Einstein) – Vesmír je statický, neměnný

1915 - OTR

1916 Schwarzschild – sféricky symetrické řešení – hvězda, pohyb planet kolem Slunce, černé díry- s. poloměr, horizont událostí, singularita

1922 A. Fridman – řešení pro celý vesmír

nemá statické řešení – vesmír se musí rozpínat, nebo smršťovat (velký třesk)

1929 Hubble – červený posuv

50. léta Big bang – velký třesk – nekonečně malá, nekonečně hustá singularita – a ta se rozpíná.

Vesmír 10 – 20 (13,7) miliard let: Hubbleův zákon  
stáří radioaktivních prvků  
stáří hvězd

**Př.** vypočítejte stáří Vesmíru

$$v = H r$$

$$H = 75 \pm 25 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} = 75 \cdot 10^3 / 3,09 \cdot 10^{20} = 2,43 \cdot 10^{-16} \text{ s}^{-1}$$

Galaxie vzdálená od nás  $r$  se vzdaluje rychlostí  $v$ . Jak dlouho jí to trvá?

$$t = \frac{r}{v} = \frac{r}{Hr} = \frac{1}{H} = \frac{1}{2,53 \cdot 10^{-16}} = 4,1 \cdot 10^{15} \text{ s} = 13 \text{ miliard let}$$

### Reliktní záření

1965 – (A Penzias, R. Wilson – USA)

objevili záření o teplotě  $T = 2,7 \text{ K}$  – reliktní záření, pozůstatek po Velkém třesku. Předpověděl G. Gamov.

### Dějiny vesmíru

Vesmír se rozpíná, klesá  $E$ ,  $T$

Těsně po VT: hustá polévka z kvarků, leptonů a částic zprostředkujících síly

$10^{-4}$  s tvoření baryonů

protony  $\leftrightarrow$  neutrony

1s neutrony  $\rightarrow$  protony

vznikají jádra H, He - nukleosyntéza (4 min)

0,5 milionů roků ionty se spojují s e, vznikají atomy, vesmír se stává průhledný pro EM záření, to se odděluje od hmoty a dále chladne, dnes 2,7 K

Začínají se tvořit galaxie a první hvězdy (H, He).

V nich vznikají těžší prvky až po Fe a při výbuších supernov ještě těžší prvky.

### Budoucnost vesmíru

#### Kritická hustota $\rho_{\text{krit}}$ ve vesmíru

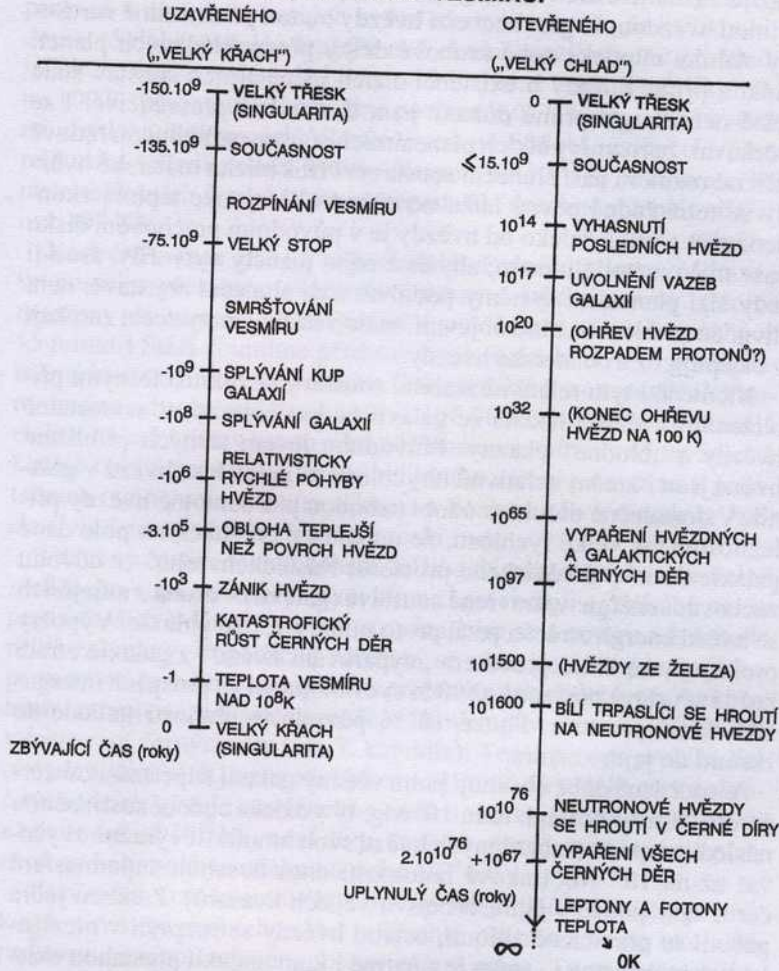
$\rho > \rho_{\text{krit}}$  uzavřený vesmír

$\rho < \rho_{\text{krit}}$  otevřený vesmír

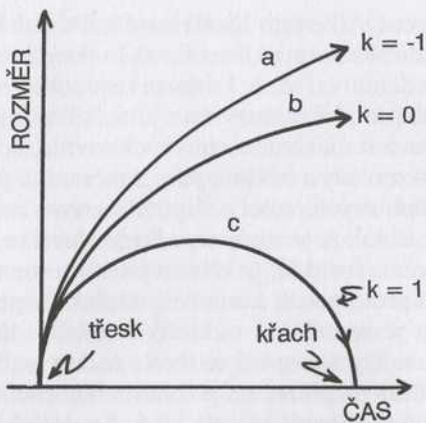
$\rho_{\text{krit}}$  závisí na  $H$ ,  $H = 50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \Rightarrow \rho_{\text{krit}} = 5 \cdot 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$

Znamé hmoty je 10 x méně.

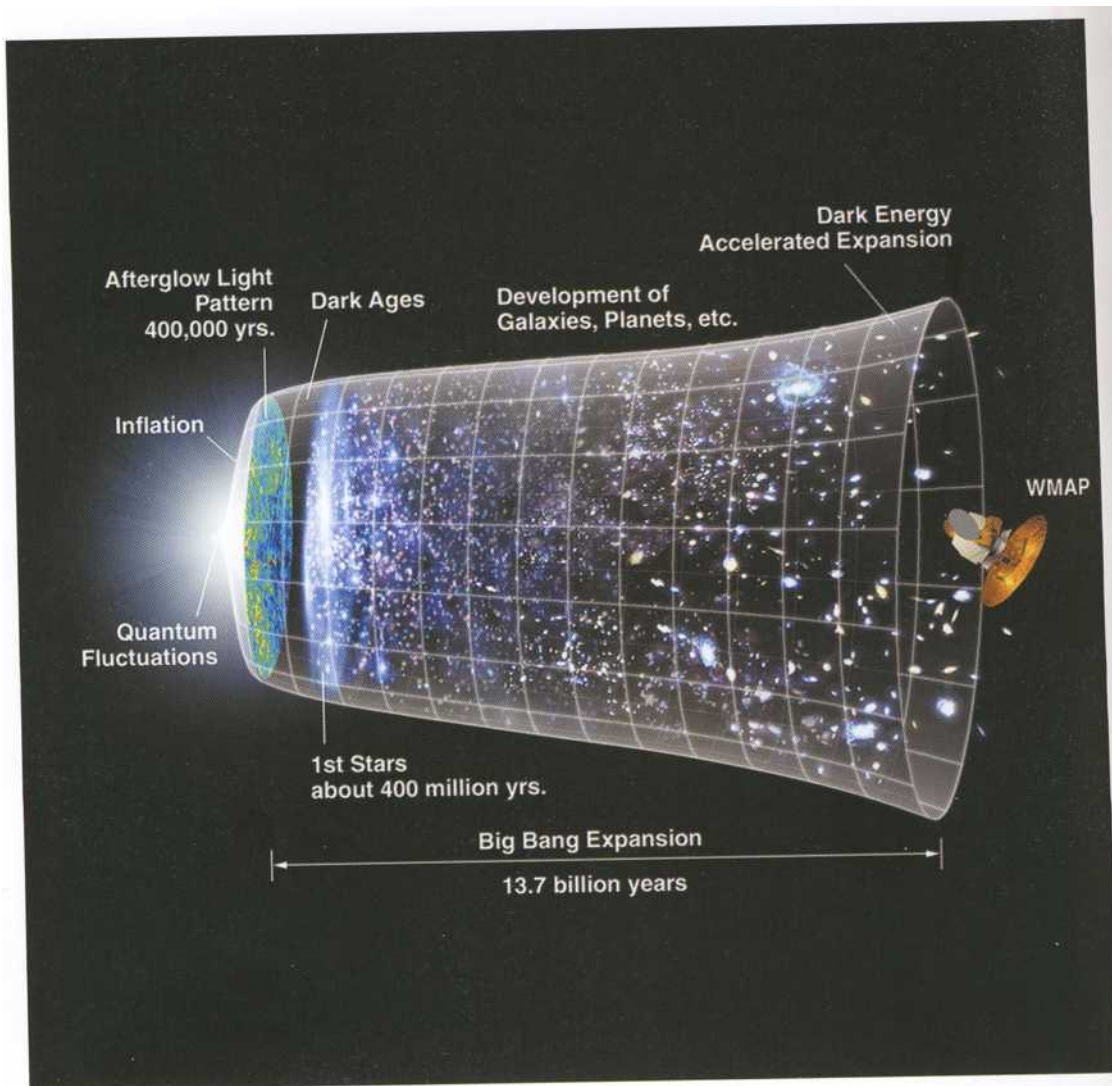
## BUDOUCNOST VESMÍRU:



Důležité fyzikální události v budoucnosti uzavřeného, nebo otevřeného vesmíru. Časová stupnice je pro uzavřený vesmír udána pozpátku (od velkého křachu), kdežto pro otevřený vesmír v obvyklém smyslu (od velkého třesku). Obě stupnice jsou však zcela nerovnoměrné s ohledem na obrovské časové intervaly, které je třeba překlenout. Údaje v závorce platí jen tehdy, jsou-li protony nestabilní, což se zatím experimentálně neprokázalo. Oba scénáře vycházejí z předpokladu trvalé platnosti dnes známých fyzikálních zákonů ve vesmíru a také z toho, že dosud neznámé zákony fyziky tento scénář dramaticky neovlivní.



Tři hlavní typy Fridmanových modelů rozpínajícího se vesmíru se liší typem geometrie: a) otevřený vesmír s časovým počátkem, ale bez konce, s hyperbolickou geometrií (křivost prostoru  $k = -1$ ), b) otevřený vesmír s časovým počátkem, ale bez konce, s plochou (euklidovskou) geometrií ( $k = 0$ ), c) uzavřený vesmír s časovým počátkem i koncem a sférickou geometrií ( $k = 1$ ). Modely typu a) a c) se mohou vyskytovat v různých variantách (s různou rychlostí expanze), model b) je jedinečný. Tento vlastně nejjednodušší model vesmíru byl poprvé navržen Albertem Einsteinem a Willemem de Sitterem roku 1932 – proto bývá také nazýván vesmírem Einsteinovým-de Sitterovým.



Moderní obraz historie vesmíru od hypotetického počátku přes období inflačního rozpínání, období dominance zářivého plazmatu a poté období forem temné hmoty, v němž se tvoří galaxie a hvězdy. Dnes žijeme v zatím poslední éře, která začala asi před 4,5 miliardami let, kdy se rozpínání vesmíru začalo zrychlovat díky záhadné formě temné energie, jež tvoří 70 procent vesmíru.