

## 25 Základné poznatky astrofyziky

### 25.1 vzdialenosti vo vesmíre

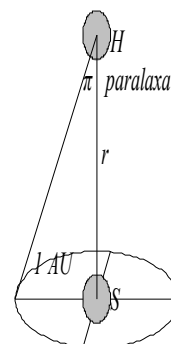
#### 25.1.1 vzdialenosti v slnečnej sústave

- pod pojmom slnečná sústava rozumieme Slnko a všetky telesá, ktoré sa pohybujú v jeho gravitačnom poli. Je to predovšetkým deväť planét, planétky, kométy, meteory a meteorické roje a napokon drobné plynné a prachové častice medziplanetárnej látky.
- na meranie vzdialenosti v slnečnej sústave sa používa **astronomická jednotka AU**, ktorá sa rovná strednej vzdialenosti Zeme od Slnka:
  - o  $1 AU = 1,496 \cdot 10^{11} m = 150 \cdot 10^6 km$
- prvú vzdialenosť v slnečnej sústave odmeral *Cassini* (v roku 1672 odmeral vzdialenosť Zeme od Marsu); *Cassini* na odmeranie použil **trigonometrickú metódu**:
  - o podstata trigonometrickej metódy merania vzdialenosti planéty je v tom, že sa odmerajú presné súradnice planéty (t.j. poloha stredu planéty vzhľadom na okolité hviezdy) na dvoch od seba dost' vzdialených miestach Zeme v rovnakom okamihu. Z takto odmeraných rozdielov možno určiť uhol, pod ktorým by pozorovateľ na Marse videl vzdialenosť oboch miest na Zemi. Zo známeho uhla a známej vzdialenosti oboch miest na Zemi možno určiť okamžitú vzdialenosť planéty od Zeme. Týmto trigonometrickým spôsobom možno určiť iba vzdialenosti pomerne blízkych telies (Mesiac, planéty).



#### 25.1.2 vzdialenosti hviezd

- na meranie vzdialenosti hviezd sa používa tiež **trigonometrická metóda**. Hviezdy sú od nás však tak ďaleko, že vzdialenosť dvoch miest na Zemi nemožno brať za základňu meraní – uhol, pod ktorým by z hviezdy bolo vidieť túto základňu, bol by nemerateľne malý. Preto sa ako základňa používa priemer trajektórie Zeme od Slnka. Pri meraní sa určuje poloha blízkej (jasnejšej) hviezdy vzhľadom na okolité veľmi slabé (vzdialené) hviezdy. Meranie sa opakuje po polroku.
- pri meraniach sa určuje uhol, pod ktorým by sme z hviezdy videli polomer trajektórie Zeme, umiestnený kolmo na smer lúčov. Tento uhol sa nazýva **ročná paralaxa** a označuje sa  $\pi$
- vzdialenosti hviezd vyjadrujeme pomocou jednotky nazvanej **parsek (pc)**. Je to vzdialenosť, z ktorej by sme videli úsečku s dĺžkou 1 AU, umiestnenú kolmo na smer lúčov, pod uhlom jednej oblúkovej sekundy
- keďže uhol  $\pi$  je veľmi malý, pre uhol  $\pi$  v radiánoch platí:
  - o  $\pi = \text{tg} \pi = \frac{1 AU}{1 pc}$ , odkiaľ
  - o  $1 pc = \frac{1 AU}{\text{tg} 1''} = \frac{4,496 \cdot 10^{11} m}{4,848 \cdot 10^{-6}} = 3,086 \cdot 10^{16} m$ , preto platí:
  - o  $1 pc = 3,09 \cdot 10^{13} km = 2,06 \cdot 10^5 AU$
- používa sa aj dĺžková jednotka nazvaná **svetelný rok**. Je to vzdialenosť, ktorú prejde svetlo vo vákuu za 1 rok, preto platí:
  - o  $1 \text{ svetelný rok} = 9,46 \cdot 10^{12} km$
- pre parsek platí:
  - o  $1 pc = 3,26 \text{ svetelného roka}$
- trigonometrickou metódou môžeme určovať vzdialenosti hviezd s paralaxami do 0,02", teda tie, ktoré sú k nám bližšie ako 50 pc
- najbližšou hviezdou je *Proxima Centauri* (1,3 pc = 4,2 svetelné roka)



## 25.2 hmotnosti hviezd

- hmotnosti kozmického telesa môžeme určiť, ak pozorujeme pohyb iného telesa v jeho gravitačnom poli
- pri pohybe telesa v gravitačnom poli platí rovnosť gravitačnej a odstredivej sily, teda platí:
  - $F_d = F_g \Rightarrow \frac{mv^2}{r} = \kappa \frac{Mm}{r^2}$ , kde  $M$  je neznáma hmotnosť kozmického telesa;  $r$  je vzdialenosť stredov oboch telies;  $\kappa$  je gravitačná konštanta
- keď obežná doba telesa je  $T$ , pre obežnú rýchlosť platí:
  - $v = \frac{2\pi r}{T}$
- keď dosadíme obežnú rýchlosť do rovnosti odstredivej a gravitačnej sily, dostaneme vzťah pre hmotnosť neznámeho kozmického telesa:
  - $F_d = F_g \Rightarrow \frac{mv^2}{r} = \kappa \frac{Mm}{r^2} \Rightarrow \frac{m}{r} \frac{4\pi^2 r^2}{T^2} = \kappa \frac{Mm}{r^2}$
  - $M = \frac{4\pi^2}{\kappa} \frac{r^3}{T^2}$
- planéty vzdialených hviezd nemôžeme pozorovať, preto túto metódu určovania hmotnosti hviezd nemôžeme použiť. Veľký počet hviezd sa vyskytuje ako združené v dvojhviezdach. Obidve zložky dvojhviezdy obiehajú okolo hmotného stredu (ťažiska) dvojhviezdy. Keď vzdialenosť medzi obidvoma hviezdami je  $r$  a ich hmotnosti sú  $M, m$ , potom platí:
  - $M + m = \frac{4\pi^2}{\kappa} \frac{r^3}{T^2}$
- keď sa obe zložky dvojhviezdy pri vzájomnom obehu periodicky zakrývajú (vzhľadom na pozorovateľa na Zemi), prezradí sa hviezda periodickým kolísaním jasnosti. Hovoríme o **zakrytových dvojhviezdach**.

## 25.3 Keplerove zákony

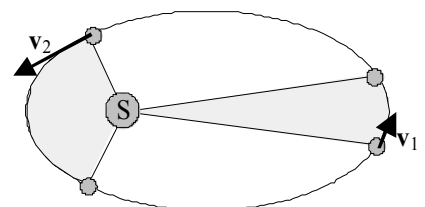
- popisujú pohyb planét
- Keplerove zákony všeobecne platia pre pohyb všetkých telies v radiálnom gravitačnom poli ústredného telesa s hmotnosťou mnohonásobne väčšou, ako je hmotnosť obiehajúceho telesa

### 25.3.1 prvý Keplerov zákon

- *1. Keplerov zákon:* Všetky planéty obiehajú okolo Slnka po eliptických dráhach, pričom Slnko sa nachádza v ich spoločnom ohnisku

### 25.3.2 druhý Keplerov zákon

- *2 Keplerov zákon:* Plochy opísané sprievodičom planéty za jednotku času sú konštantné
- sprievodič planéty je úsečka, ktorá spája stred planéty a Slnka; pri pohybe planéty po elipse sa dĺžka sprievodiča mení, najkratšia je v perihéliu (najväčšia rýchlosť planéty) a najdlhšia je v aféliu (najmenšia rýchlosť planéty)



### 25.3.3 tretí Keplerov zákon

- *3. Keplerov zákon:* Pomer druhých mocnín obežných dôb sa rovná pomeru tretích mocnín hlavných poloosí ich trajektórií

- $\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$

- zo vzťahu pre hmotnosť dvojhviezdy môžeme získať zovšeobecnený tvar tretieho Keplerovho zákona:

$$\circ \quad M + m = \frac{4\pi^2}{\kappa} \frac{r^3}{T^2} \Rightarrow \frac{(M + m)T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{\kappa}$$

- na pravej strane výrazu sú len konštanty, takže tento vzťah platí pre ľubovoľné dve telesá s hmotnosťami  $M$ ,  $m$  obiehajúce okolo seba vo vzdialenosti  $r$  s obežnou dobou  $T$ . Keď je jedna dvojica charakterizovaná veličinami s indexom 1 a druhá s indexom 2, platí:

$$\circ \quad \frac{r_1^3}{r_2^3} = \frac{T_1^2}{T_2^2} \frac{(M_1 + m_1)}{(M_2 + m_2)}$$

## 25.4 žiarivý výkon

- jednou zo základných charakteristík hviezd je **žiarivý výkon  $L$**
- je to celkový výkon žiarenia, vysielaný celým povrchom hviezd do celého priestoru
- žiarivý výkon hviezd je daný jej povrchovou teplotou a obsahom jej povrchu. Hviezda žiari približne ako čierne teleso, potom pri efektívnej teplote jej povrchu  $T_{ef}$  sa intenzita vyžarovania hviezd rovná  $\sigma T_{ef}^4$ , kde  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$  je Stefanova-Boltzmanova konštanta. Plošný obsah povrchu hviezd je  $4\pi R^2$ ; teda platí:
  - $\circ \quad L = 4\pi R^2 \sigma T_{ef}^4$ ,  $[L] = W$
- pre **žiarivý tok  $\Phi_e$** , dopadajúci kolmo na plochu s obsahom  $S$  vo vzdialenosti  $r$  od hviezd, platí:
  - $\circ \quad \Phi_e = L \frac{S}{4\pi r^2}$ ,  $[\Phi_e] = W$
- v astronómii sa používa pojem **hviezdna magnitúda**. Vyjadruje pozorovanú jasnosť hviezd. Historicky vzniklo rozdelenie hviezd podľa ich jasnosti do šiestich magnitúd. najjasnejšie boli hviezd prvej magnitúdy, najslabšie (okom viditeľné) hviezd boli šiestej magnitúdy.
- tieto zdanlivé hviezdne magnitúdy nepodávajú informáciu o skutočných žiarivých výkonoch hviezd, a preto bola definovaná **absolútna hviezdna magnitúda  $M$**  ako magnitúda prepočítaná na vzdialenosť 10 pc

## 25.5 spektrá hviezd

- informácie o hviezdach a vesmíre získavame predovšetkým štúdiom elektromagnetického žiarenia, ktoré dopadá na povrch Zeme
- **spektrá hviezd** sú jedným z hlavných zdrojov informácií o hviezdach. Spektrum hviezd a iných kozmických objektov sa zvyčajne skladá zo spojitého spektra a na jeho pozadí sú absorpčné (tmavé) a emisné(jasné) čiary.
  - $\circ$  zo spojitého spektra možno odhadnúť **efektívnu povrchovú teplotu**
  - $\circ$  z absorpčných a emisných spektier získavame **informácie o chemickom zložení** hviezd (Žiarenie, ktoré k nám prichádza, vnika vo fotosfére, ktorá tvorí viditeľný povrch hviezd a je najnižšou vrstvou hviezdnej atmosféry. Vo fotosfére vzniká žiarenie so spojitým spektrom. Vo vonkajších vrstvách fotosféry a v atmosfére nad ňou sa pohlcuje žiarenie s vlnovými dĺžkami zodpovedajúcimi prechodom medzi stacionárnymi stavmi atómov prvkov, z ktorých sa atmosféra skladá.)
  - $\circ$  zo spektrálnych čiar získavame informáciu o tom, akou **rýchlosťou** sa hviezda od nás vzdďaľuje, alebo sa k nám približuje (pomocou Dopplerovho javu):
    - keď sa hviezda od pozorovateľa vzdďaľuje rýchlosťou  $v$ , vlnové dĺžky spektrálnych čiar sa zväčšujú (posúvajú sa k červenému koncu spektra). Pre vlnovú dĺžku vysielaného žiarenia platí:

$$\bullet \quad \lambda' = cT + vT = (c + v)T = \left(1 + \frac{v}{c}\right)cT = \left(1 + \frac{v}{c}\right)\lambda$$

- keď sa hviezda k pozorovateľovi približuje rýchlosťou  $u$ , spektrálne čiary sa posúvajú k fialovému koncu spektra; platí:

$$\bullet \quad \lambda' = cT - uT = (c - u)T = \left(1 - \frac{u}{c}\right)cT = \left(1 - \frac{u}{c}\right)\lambda$$

## 25.6 základné údaje o hviezdach

- charakteristika Slnka:
  - **hmotnosť:**  $M_{\odot} = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
  - **polomer:**  $R_{\odot} = 6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$
  - **povrchová teplota:**  $T_{\odot} = 5\,770 \text{ K}$
  - **žiarivý výkon:**  $L_{\odot} = 3,83 \cdot 10^{26} \text{ W}$
- hmotnosti ostatných hviezd sa od hmotnosti Slnka veľmi neodlišujú. Najmenšie pozorované hmotnosti hviezd sú rádovo  $0,01 M_{\odot}$ , najhmotnejšie hviezdy dosahujú hmotnosť  $100 M_{\odot}$ .
- polomery hviezd sú v intervale od jednej stotiny  $R_{\odot}$  (tzv. **bieli trpaslíci**) až po takmer  $1\,000 R_{\odot}$  (**červení nadobri**)
- žiarivé výkony hviezd sú vo veľkom rozpätí, od  $10^{-4} L_{\odot}$  do  $10^5 L_{\odot}$ . Spektrum žiarenia vysielaného hviezdou závisí od veľkej miery od jej povrchovej teploty. Rozlišujeme spektrálne triedy, ktoré podľa klesajúcej teploty označujeme písmenami O, B (viac ako  $20\,000 \text{ K}$ ), A, F, G, K ( $4\,000 \text{ K}$ ), M ( $2\,000 \text{ K}$ ). Slnko patrí do triedy G.
- **chemické zloženie hviezd** nezávisí od ich veľkosti. Hlavnými zložkami sú vodík – 70 %, hélium – 25 % zvyšok pripadá na ostatné prvky

### 25.6.1 zdroj energie vo hviezdach

- hviezdy sú v podstate veľké plynné gule, ktoré tvorí čiastočne alebo celkom ionizovaný plyn – **plazma**. Stavové veličiny závisia od vzdialenosti  $r$  od stredu.
- v Slnku a vo hviezdach rovnakých alebo menších ako Slnko je v centrálnej oblasti teplota menšia ako  $2 \cdot 10^7 \text{ K}$ . Za týchto podmienok môžu prebiehať **termonukleárne reakcie**, pričom prevláda **protón-protónový reťazec**
  - začína sa zrážkou dvoch protónov, pri ktorej vzniká deuterón, pozitron a neutríno. Deuterón reaguje a ďalším protónom, vzniká jadro  ${}^3_2\text{He}$  a vyžiari vysokoenergetický fotón  $\gamma$ . Jadro  ${}^3_2\text{He}$  reaguje s ďalším jadrom  ${}^3_2\text{He}$ , pričom vznikne jadro  ${}^4_2\text{He}$  a dva protóny:
 
$${}^1_1\text{p} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^2_1\text{D} + e^+ + \nu$$
    - ${}^2_1\text{D} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^3_2\text{He} + \gamma$
    - ${}^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_1\text{p} + {}^1_1\text{p}$
  - do týchto reakcií vstupuje 6 protónov, vystupuje jadro  ${}^4_2\text{He}$  a dva protóny. Jadro  ${}^4_2\text{He}$  je veľmi silne viazané a jeho hmotnosť je o  $\Delta m$  menšia ako súčet hmotnosti štyroch protónov. Celková energia uvoľnená pri vzniku jadra  ${}^4_2\text{He}$  zo štyroch protónov je:
    - $\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 26,2 \text{ MeV}$

### 25.6.2 stavové diagramy hviezd

- na tomto diagrame je každá hviezda znázornená bodom so súradnicami  $\log \frac{T_{ef}}{K}$  na vodorovnej osi a  $\log \frac{L}{L_0}$  na zvislej osi ( $T_{ef}$  je efektívna povrchová teplota hviezd v kelvinoch,  $L$  je žiarivý výkon hviezd,  $L_0$  žiarivý výkon Slnka). Slnku zodpovedá bod so súradnicami  $\log \frac{T_{ef}}{K} = \log 5780 = 3,76$ ;  $\log \frac{L}{L_0} = \log 1 = 0$ . Na diagrame sú vyznačené aj priamky, ktoré

klesajú smerom doprava. Každá priamka zodpovedá istej hodnote  $\log \frac{R}{R_0}$ , kde  $R$  je polomer hviezdy,  $R_0$  polomer Slnka. Vyplýva to zo žiarivého výkonu:

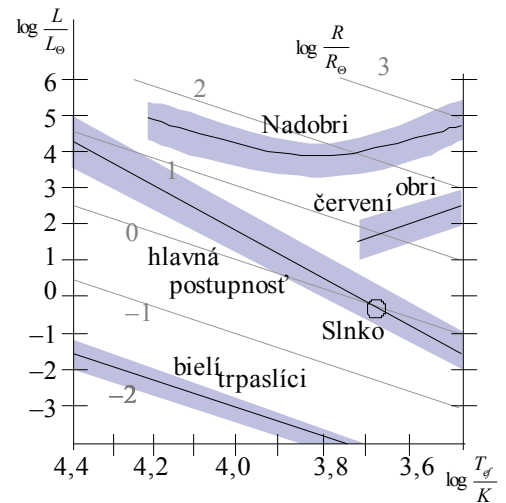
○  $L = 4\pi R^2 \sigma T_{ef}^4$ ; keď tento vzťah predelíme výrazom pre žiarivý výkon Slnka, dostaneme:

○  $\frac{L}{L_0} = \frac{R^2 T_{ef}^4}{R_0^2 T_0^4}$ ; odtiaľ logaritmovaním a úpravou dostaneme:

$$\bullet \log \frac{L}{L_0} = 4 \log \frac{T_{ef}}{K} + 2 \log \frac{R}{R_0} - 4 \log \frac{T_0}{K}$$

▪ z tejto závislosti dostaneme sústavu priamok; pričom každej hviezde zodpovedá jeden bod na stavovom diagrame

- väčšina hviezd sa nachádza na hlavnej postupnosti: Nad ňou sú vetvy obrov a nadobrov (polomery 10 až 100-krát väčšie ako Slnko); pod ňou je vetva bielych trpaslíkov (100-krát menšie polomery ako Slnko)



## 25.7 vývoj hviezd

- hviezdy vznikajú z medzihviezdneho plynu obsahujúceho prevažne vodík. Veľké mračno plynu sa postupne zmršťuje vplyvom gravitačných síl. Hmotnosť plynu, pri ktorej sa takéto zmršťovanie začína, je oveľa väčšia ako hmotnosť typickej hviezdy. Plyn sa zahrieva a vznikajú miestne nestability. Zahrievanie plynu je spôsobené zväčšovaním kinetickej energie jednotlivých molekúl. Vznikajú miestne zhustenia, z ktorých vznikajú hviezdy. Z celého mračna plynu vzniká **hviezdokopa**.
- po dostatočnom zmenšení objemu a zohriatí začína vnútri hviezdy prebiehať termojadrová syntéza protón-protónovým reťazcom. Hviezda začína žiariť. Tomuto štádiu zodpovedá vstup na hlavnú postupnosť. Miesto na hlavnej postupnosti závisí od jej hmotnosti. Obdobie, v ktorom je hviezda na hlavnej postupnosti, je pomerne stabilné.
- čím má hviezda väčšiu hmotnosť, tým rýchlejšie spotrebuje zásobu vodíka (Slnko spotrebuje 10 % svojej zásoby vodíka asi za  $10^{10}$  rokov). Po spotrebovaní 10 % až 12 % vodíka v centrálnej oblasti vznikne héliové jadro a hviezda zväčšuje svoj objem. Povrchové vrstvy chladnú a mení sa farba hviezdy – hviezda sa stáva **červeným obrom** a opúšťa hlavnú postupnosť, pričom vznikajú jadrá ťažších prvkov. Štádium červeného obra je oveľa menej stabilné.

## 25.8 záverečné štádia života hviezd

- keď sa hviezda dostane do štádia červeného obra, začne sa zmršťovať a jej ďalší osud závisí od jej hmotnosti
- **hviezdy s hmotnosťami menšími ako  $1,4 M_{\odot}$** 
  - zmršťovanie hviezdy sa zastaví tlakom elektrónového plynu, no to nastane až pri veľmi malom objeme hviezdy (hviezda s hmotnosťou Slnka má v tomto štádiu polomer rádovo rovnajúci sa polomeru Zeme)
  - tieto hviezdy sa stávajú **bielymi trpaslíkmi**; ich hustoty sú obrovské; energia, ktorú získali pri zmršťovaní, im stačí na to, aby si hviezda ešte dlho udržala vysokú teplotu
- **hviezdy s hmotnosťou  $1,4 M_{\odot}$  až  $5 M_{\odot}$** 
  - pri týchto hviezdach nestačí tlak elektrónového plynu zastaviť ich zmršťovanie. Vnútri hviezdy prebieha reakcia, ktorou z elektrónov a protónov vznikajú neutróny:
    - $e^{-} + p \rightarrow n + \nu$
  - z neutrónov v centrálnej oblasti vznikne **neutrónová hviezda**. Je to útvar pripomínajúci obrovské atómové jadro, ktoré sa skladá len z neutrónov. Objem centrálnej časti hviezdy sa

prudko zmenší. Pri dopade vonkajších vrstiev do jej centra vzniká rázová vlna, ktorá pri ceste späť (smerom k vonkajším vrstvám hviezdy) vymrští značnú časť materiálu do medzihviezdneho priestoru. Pri výbuchoch sa uvoľní veľká energia a hviezda krátku dobu žiari veľmi intenzívne. Hovoríme o **výbuchu supernovy**.

- **hviezdy s hmotnosťou väčšou ako približne  $5 M_{\odot}$** 
  - o polomer hviezdy sa ustavične znižuje a súčasne tým sa zväčšuje aj intenzita gravitačného poľa na jej povrchu. Po zmenšení polomeru hviezdy pod istú hranicu je gravitačné pole hviezdy také silné, že žiadne teleso (ani žiarenie) nemôže hviezdu opustiť. Hviezda, pri ktorej prebehol gravitačný kolaps, nazýva sa **čierna diera**. Čiernu diery nemožno vidieť, pretože nevysiela žiadne žiarenie.

## 25.9 vznik našej planetárnej sústavy

- **Kantova-Laplaceova hypotéza:**
  - o títo vedci predpokladali, že Slnko spolu s ostatnými telesami vznikli z jedného zhustenia medzihviezdnej hmoty. Vzhľadom na to, že všetky planéty obiehať okolo Slnka jedným smerom, muselo toto lokálne zhustenie od začiatku rotovať. Pod vplyvom gravitačných a zotrvačných síl sa rotujúce mračno medzihviezdneho plynu postupne menilo na plochý rotujúci disk. V jeho strede vznikalo zhustenie, z ktorého sa neskôr vyvinulo Slnko. V okrajových častiach rotujúceho disku vznikali menšie zhustenia, z ktorých sa utvorili zárodoky planét a okolo nich dosiaľ neskondenzovaný prach a plyn. V Slnku začali prebiehať termonukleárne reakcie, zo Slnka sa vymrštilo mnoho častíc, vznikol slnečný vietor, ktorý vytlačil zo slnečnej sústavy zvyšok neskondenzovaného plynu a prachu.

## 25.10 štruktúra a vývoj vesmíru

- slnečná sústava je súčasťou **Galaxie**:
  - o **hmotnosť Galaxie:**  $M_G = 1,4 \cdot 10^{11} M_{\odot}$
  - o **priemer disku:**  $30 \text{ kpc} = 10^{18} \text{ km}$
  - o **hrúbka disku:**  $2 \text{ kpc} = 10^{16} \text{ km}$
  - o **počet hviezd:**  $10^{11}$
- asi 30 galaxií tvorí **miestnu skupinu galaxií**. Priemer miestnej skupiny galaxií je asi 1,5 Mpc. Okrem malých skupín galaxií, ako je miestna skupina galaxií, sú vo vesmíre aj veľké zhľuky galaxií, nazvané **kopy galaxií**. Tieto obsahujú stovky až tisíce galaxií a ich priemery sú takmer 10 Mpc. Najväčšími známymi štruktúrami vo vesmíre sú **nadkopy galaxií**.
  - o **typická priemerná vzdialenosť hviezd v Galaxii:**  $2 \text{ pc}$
  - o **typický priemer galaxie:**  $30 \text{ kpc}$
  - o **typická vzájomná vzdialenosť galaxií v kope:**  $700 \text{ kpc}$
  - o **typický priemer kopy galaxií:**  $3 \text{ Mpc}$
  - o **typické rozmery nadkôp galaxií:**  $30 \text{ Mpc}$
- americký astronóm **Edwin Hubble** zistil, že galaxie sa od nás vzdľahujú, pričom rýchlosť, akou sa istá galaxia vzdľahuje, je priamo úmerná jej vzdialenosti  $r$ :
  - o  $v = Hr$ , kde  $H$  je **Hubbleova konštanta**:  $H = (75 \pm 25) \frac{\text{km.s}^{-1}}{\text{Mpc}}$
- súčasný stav vesmíru vznikol rozpínaním hustého a horúceho stavu látky pred  $10 \cdot 10^9$ – $20 \cdot 10^9$  rokmi – **veľký tresk** (z obdobia, keď bol vesmír teplejší a keď hustota látky v ňom bola väčšia ako dnes, pochádza **reliktové (zvyškové) žiarenie**, ktoré zodpovedá žiareniu čierneho telesa s teplotou asi 2,7 K)