

GALAKTICKÁ A MIMOGALAKTICKÁ ASTRONÓMIA

Krajská hvzdáreň a planetárium Prešov vydáva tento metodický materiál pre vedúcich astronomických krúžkov stredných a učňovských škôl a amatérov astronómov vo Východoslovenskom kraji s cieľom poskytnúť poznatky a stručný prehľad v galaktickej a mimogalaktickej astronómii.

Úvod

Pri dlhšom pozorovaní nočnej oblohy si všimneme svietači pás, tiahnúci sa nočnou oblohou - Mliečnu dráhu. Je to najbohatšia oblasť na hviezdy. Vytvára uzavretý prstenec, pričom v jeho zdanlivom strede je naša Zem. Všetky objekty na oblohe, t.j. všetky hviezdy, viacnásobné hviezdne sústavy, asociácie, otvorené a guľové hviezdokopy, rozsiahle oblasti medzihviezdnej hmoty, nám vykazujú súvislosť s Mliečnou dráhou - všetky spolu vytvárajú hviezdny systém - Galaxiu. Rozmery našej Galaxie sú kolosálne. Pri pohľade z boku má tvar splošteného disku o priemere 100 000 svetelných rokov a hrúbku približne 3 000 svetelných rokov. Tvorí ju asi 100 miliárd hviezd a jej štruktúra je dosť zložitá. Naše Slnko leží na pokraji jedného zo špirálových ramien Galaxie, v blízkosti galaktického rovníka, vo vzdialenosti asi 33 000 svetelných rokov od stredu Galaxie. Centrálna časť Galaxie je zahalená horúcimi mrakmi medzihviezdneho prachu a plynu. Galaktický rovník, v blízkosti ktorého sa teda naše Slnko nachádza, obsahuje tiež značné množstvo medzihviezdnej hmoty a preto zo Zeme môžeme pozorovať len malú časť našej hviezdnej sústavy (v blízkosti Slnka pozorujeme voľným okom najjasnejších trpaslíkov do vzdialenosti 5 svetelných rokov, hviezdy svietivosti nášho Slnka do vzdialenosti 52 svetelných rokov a najsvietivejšie hviezdy do vzdialenosti 5 000 svetelných rokov). Avšak výhodou toho, že Slnko leží v blízkosti galaktickej roviny je, že v jeho okolí môžeme pozorovať členov všetkých zložiek Galaxie. Pri študovaní štruktúry Galaxie nám okrem optických pozorovaní výdatne pomáhajú i pozorovania na rádiových vlnách, zvlášť na vlne 21 cm.

1. 1. Prvé názory na stavbu našej Galaxie.

Otázka stavby našej hviezdnej sústavy - Galaxie vošla do dejín pomerne nedávno. Bolo to spôsobené tým, že nebola známa medzihviezdna absorpcia, ktorá má veľký vplyv na zdanlivú jasnosť hviezd a preto nebolo možné presne určiť vzdialenosti hviezd. Takisto nebola jednotnosť v kritériách, podľa ktorých by sa mohli vybrať hviezdy vyznačujúce sa rovnakými vlastnosťami. Prvým, kto sa začal touto problematikou zaoberať bol W. Herschel. Jeho práca je založená na metóde takzv. "čiastočných súčtov". Pozoroval severnú oblohu, pričom sčítaval hviezdy určitých oddelených plôch v rôznych smeroch na nebeskej sfére. Obsiahol

okolo 117 600 hviezd do 14,5 magnitúdy. Neskôr v tejto práci pokračoval jeho syn pozorovaniami na južnej pologuli. Analýza týchto pozorovaní ukázala, že počet hviezd klesá so vzdáľovaním sa od galaktického rovníka, t.j. existuje galaktická koncentrácia hviezd. Ďalším zistením bolo, že južná pologuľa je omnoho bohatšia na hviezdy, t.j. rovina symetrie rozdelenia hviezd nezodpovedá galaktickej rovine, z čoho vyplýva, že Slnko neleží v galaktickej rovine, ale trochu nad ňou. Na základe predpokladov, že všetky hviezdy majú rovnakú svietivosť, neexistuje absorpcia svetla a hviezdy sú v priestore rozdelené rovnomerne, zostavil W.Herschel prvý schématický model Galaxie. /Obr.1/. Jeho rozmery sú 5 800 x 1100 svetelných rokov (oproti dnešným údajom sú asi 15-krát menšie) so Slnkom neďaleko od centra Galaxie. Ďalšie práce využívali pri metóde "čias-točných súčtov" nielen integrálnu funkciu jasnosti $N(m)$ - súčet hviezd jasnejších ako magnitúda m v uvažovanom jednotkovom priestorovom uhle, ale aj diferenciálnu funkciu jasnosti $A(m)$.

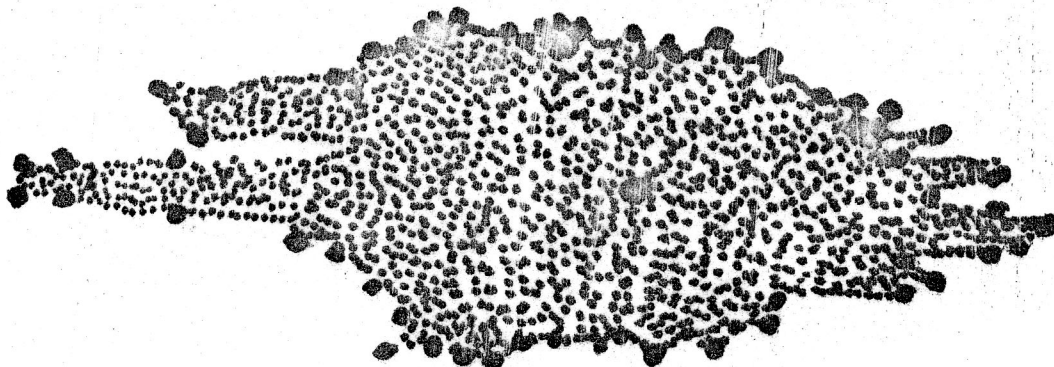
$A(m)$ určuje počet hviezd v jednotkovom priestorovom uhle, ktoré majú magnitúdu v intervale $(m - \frac{1}{2}, m + \frac{1}{2})$. Medzi $N(m)$ a $A(m)$ platí vzťah:

$$N(m) = \int_{-\infty}^m A(m) dm$$

Na základe predpokladu, že neexistuje medzihviezdna absorpcia a hviezdy sú v priestore rozložené rovnomerne, Seeliger ukázal, že počet hviezd sa s každou menšou magnitúdou štvornásobne zväčšuje.

$$\frac{N(m+1)}{N(m)} = 3,98$$

Opierajúc sa o súčty hviezd do 13,5 magnitúdy, Seeliger prišiel na to, že funkcia $N(m)$ vo všetkých smeroch rastie pomalšie ako to vyžaduje jeho teória.



Obr. 1. Schématický model Galaxie.

Počet slabých hviezd tiež rastie pomalšie, ako počet jasných hviezd. Na základe týchto faktov Seeliger postavil svoj model Galaxie - sféroid s rozmermi 14 400 x 3 300 pc so Slnkom v strede, pričom hustota hviezd pri hranici systému prudko klesne na nulu. Ďalším modelom bol model Kapteyna - model rotačného elipsoidu so sploštením 1:5, o priereze 16 000 pc, so Slnkom vo vzdialenosti 650 pc od stredu Galaxie. Prvým vážnym argumentom proti centrálnej polohe Slnka bola práca Shapleyho v r.1915-1918, ktorý pri vyšetovaní priestorového rozloženia guľových hviezdokôp prišiel na to, že toto rozloženie má sférickú formu a centrum tohto rozloženia leží v smere súhvezdia Strelca, približne 15 kpc vo vzdialenosti od Slnka. V r.1925 Seares a van Rhijn skúmali funkciu $N(m)$ v závislosti od galaktickej šírky, uvažovali hviezdy do 18. magnitúdy, pričom dospeli k empirickému vzťahu:

$$\log \frac{dN(m)}{dm} = \log A(m) = a + b m - c m^2$$

kde a , b , c , sú parametre, ktoré závisia od galaktickej šírky. Integráciou tohoto vzťahu im vyšiel počet hviezd, v našej Galaxii $3 \cdot 10^{10}$, čo je počet blízky dnešnej hodnote. (Ak uvažujeme medzihviezdnu absorpciu, dostávame počet hviezd v Galaxii, okolo $1,5 \cdot 10^{11}$). Výhodou tohto výpočtu bolo, že sa im podarilo určiť mediálnu magnitúdu, ktorá v danom smere rozdeľuje počet hviezd na polovicu. Keďže skúmali mediálnu magnitúdu v rôznych smeroch a táto hodnota sa menila v závislosti od galaktickej šírky, prišli k závažnému záveru, že Galaxia je smerom k pólom sploštená. Poukázali tiež na hromadnú koncentráciu hviezd v úzkom páse, tvoriacu galaktický rovník.

1. 2. Oblasti zvýšenej viditeľnej hustoty hviezd

Teraz sa pozrieme na rozdelenie hviezd v závislosti od galaktickej dĺžky. Jasné hviezdy (jasnejšie ako 4 magnitúdy), sú rozdelené dostatočne symetricky vzhľadom na kruh naklonený $15^{\circ} - 17^{\circ}$ ku galaktickému rovníku. Koncentráciu k tomuto kruhu vykazujú blízke hviezdy typu O,B, cefeidy i oblaky neutrálneho vodíka. Tieto objekty tvoria tzv. Miestny systém, ktorého rozmery sú 200 x 500 pc a centrum je vo vzdialenosti 100 - 150 pc od Slnka. Okrem toho existujú v Galaxii ďalšie oblasti zvýšenej alebo zníženej hviezdnej hustoty. Osobitne oblasť centra Galaxie, taktiež

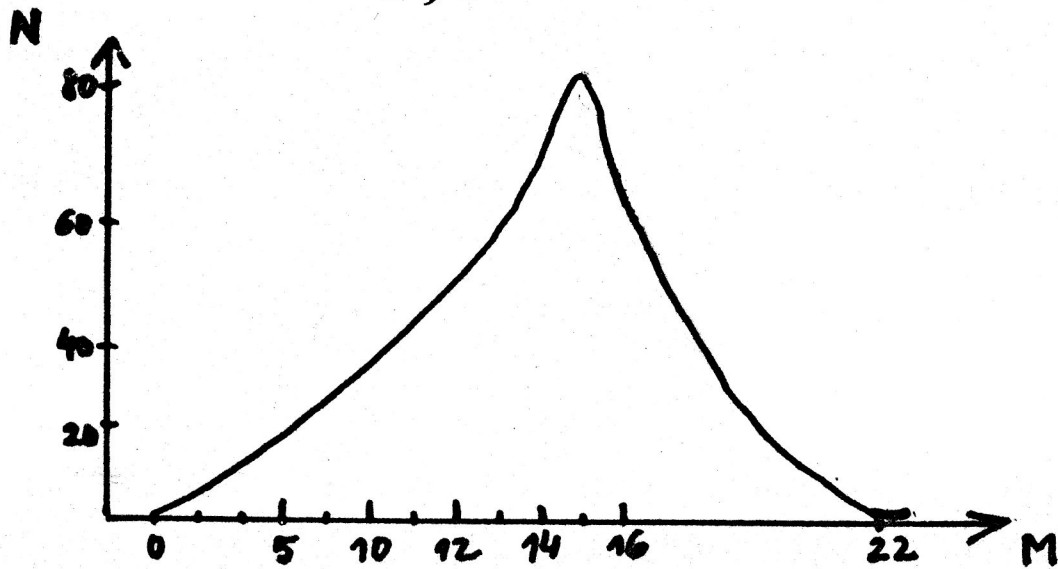
oblaky jasných hviezd v súhvezdí ... pozoruhodná je aj tmavá
oblasť v Mliečnej dráhe, ktorá sa osvetľuje množstvom absorbojúcich
oblakov.

1. 3. Funkcia svietivosti

Keďže predpoklad, že všetky hviezdy majú rovnakú svietivosť a rozdiely v zdanlivej magnitúde sú spôsobené iba rozličnou vzdialenosťou, nie je správny, a navyše zdanlivá magnitúda môže byť oslabená medzi hviezdou absorpciou až o niekoľko tried, pre lepšie určenie rozloženia jednotlivých typov hviezd bola zavedená funkcia svietivosti $\varphi(M)$ ktorá udáva, aká časť z celkového počtu hviezd má absolútnu hviezdnu veľkosť M . Jej význam ľahko pochopíme, pri nasledujúcej úvahe: Majme obru o $m = 6^m$ a $M = 0^m$. Takéto hviezdy vidíme do vzdialenosti asi 160 pc. Majme trpaslíka o $m = 6^m$ a $M = 11^m$, ktorého registrujeme vo vzdialenosti len 1 pc. Ak by sme zostrojili HR diagram pre všetky hviezdy viditeľné voľným okom, diagram by vôbec nevysvihoval početnosť hviezd v priestore. Ak by sme zostrojili tento diagram len pre hviezdy do vzdialenosti 10 pc, zastúpenie jednotlivých hviezd v HR diagrame by bolo úplne iné. /Prevažovali by trpaslíci typu G, K, M, a bolo by málo hviezd typu A, F/. Funkcia $\varphi(m)$ udáva teda rozloženie hviezd podľa absolútnych veľkostí.

1. 4. Funkcia hviezdnej hustoty

Empirický vzťah pre $A(m)$ nám dáva možnosť určiť celkové množstvo hviezd v Galaxii i určiť rad anomálnych miest, no nedáva nám informáciu o rozličných svietivostiach, ani o absorpcii svetla. Preto pre určenie tvaru a rozloženia hviezd v Galaxii hľadáme vzťah medzi 3 funkciami $A(m)$, $\varphi(m)$, $D(r)$ kde $D(r)$ je funkcia hustoty, ktorá nám udáva počet hviezd v jednotkovom objeme v danej vzdialenosti r , t.j. $\omega \cdot D(r) \cdot r^2 \cdot dr$. Pritom zo všetkých hviezd vojdú do funkcie jasnosti $A(m)$ len tie, pre ktoré M bude rovné $m + 5 - 5 \cdot \log r_{pc}$. Počet týchto hviezd v danom objeme závisí od funkcie svietivosti $\varphi(m)$.



Obr. 2. Priebeh funkcie svietivosti $\Psi(M)$ pre hviezdy do 10^3 pc.

1.5. Základné rovnice hviezdnej štatistiky

nám dávajú možnosť určiť vzťah medzi $A(m)$, $\Psi(M)$ a $D(r)$ a odvodiť tvar $\Psi(M)$ a $D(r)$. Pre diferenciálnu funkciu jasnosti platí:

$$A(m)dm = \omega \int_0^{\infty} D(r) \cdot \Psi(M) \cdot r^2 dr dm$$

Keďže pozorovacím materiálom je len $A(m)$, vidíme, že riešiť túto rovnicu je celkom nemožné. Preto sa zavádza stredná paralaxa $\bar{\pi}(m)$ hviezd čím dostávame druhú rovnicu pre diferenciálnu funkciu jasnosti:

$$\bar{\pi}(m) \cdot A(m) = \omega \int_0^{\infty} D(r) \cdot \Psi(M) \cdot r \cdot dr$$

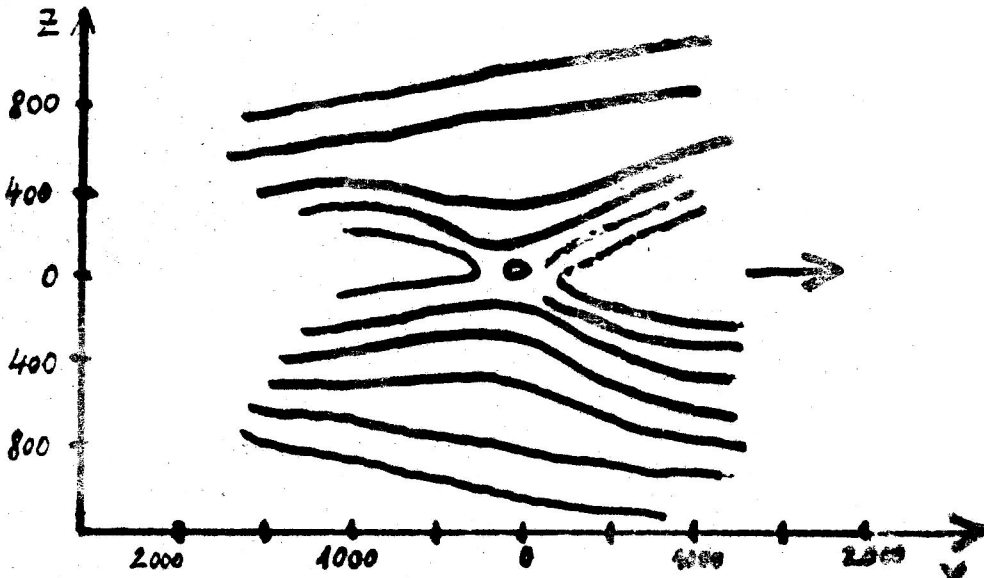
Riešenie týchto základných rovníc by malo viesť teda k odvodeniu tvaru funkcie svietivosti a určení priebehu funkcie hustoty hviezd, t.j. stanovenie tvaru hviezdnej sústavy a rozloženia hviezd v nej. Keďže pozorovaná je len funkcia, $A(m)$ a nevieme, či pozorovaný priebeh funkcie $N(m)$ je spôsobený klesajúcou hustotou hviezd, alebo rastúcim vplyvom medzihviezdnej absorpcie, riešenie týchto rovníc je obtiažne. Najznámejšie metódy riešenia týchto rovníc sú: Metóda Malquistova, Kaptejn-Bokova a Vašakidze-Oortova. Napr. posledná z nich je veľmi elegantná a spočíva v rozdelení Galaxie na vrstvy rovnobežné s galaktickou rovinou, ω predpokladá, že hustota hviezd klesá smerom od galaktického rovníka a znalosť funkcie $A(m)$ v oblasti galaktického pólu. Funkcia $A(m)$ pre iné galaktické šírky sa potom ľahko určí podľa vzťahu:

$$A(m_b) = A(m_{g_s}) \cdot \cos \epsilon \cdot b^3$$

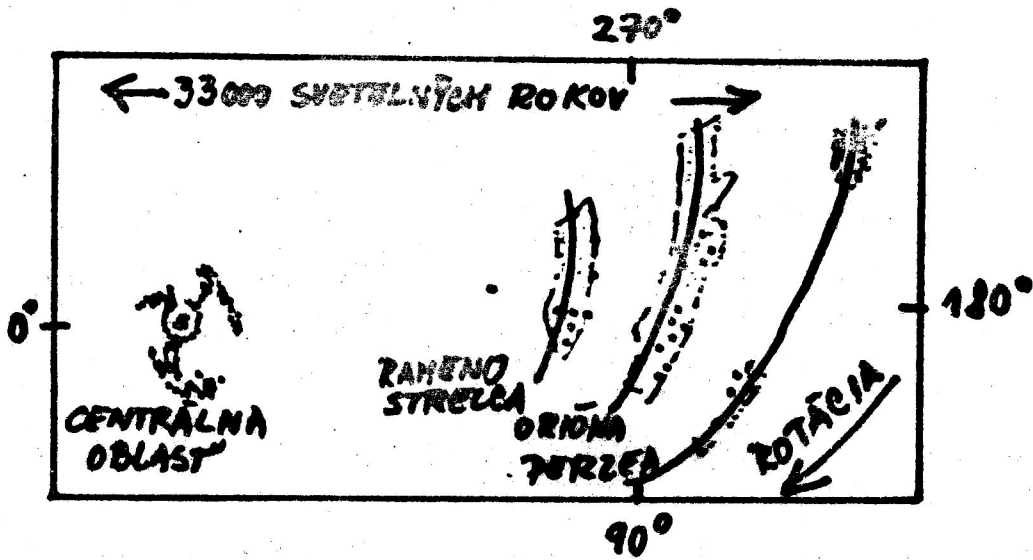
Na základe tejto metódy zostrojil Oort niekoľko obrázkov /obr. 3/., ktoré vlastne znázorňujú plochy rovnakej hustoty v uvažovanej oblasti Galaxie. Keby tieto plochy boli rovnobežné s galaktickým rovníkom, predpovedané počty hviezd by súhlasili so skutočnými počtami. Preto rozdiely medzi pozorovanými a vopred určenými počtami hviezd udávajú vlastne odchýlky od rovnobežnosti plôch rovnakej hustoty hviezd. Z Oortových obrázkov tiež vyplýva niekoľko ďalších závažných skutočností:

1. Slnko je pozložené medzi dvoma oblasťami zvýšenej hviezdnej hustoty, ktoré sa interpretujú ako špirálové ramená Galaxie.
2. Existuje nevelká asymetria medzi južnou a severnou galaktickou pologulou, t.j. Slnko sa nachádza v nevelkej vzdialenosti nad základnou rovinou symetrie Galaxie.
3. Vo vonkajších vrstvách (t.j. tam, kde sa už ukazuje špirálová štruktúra), existuje sklon okolo 10° so zvýšením k oblasti centra Galaxie.

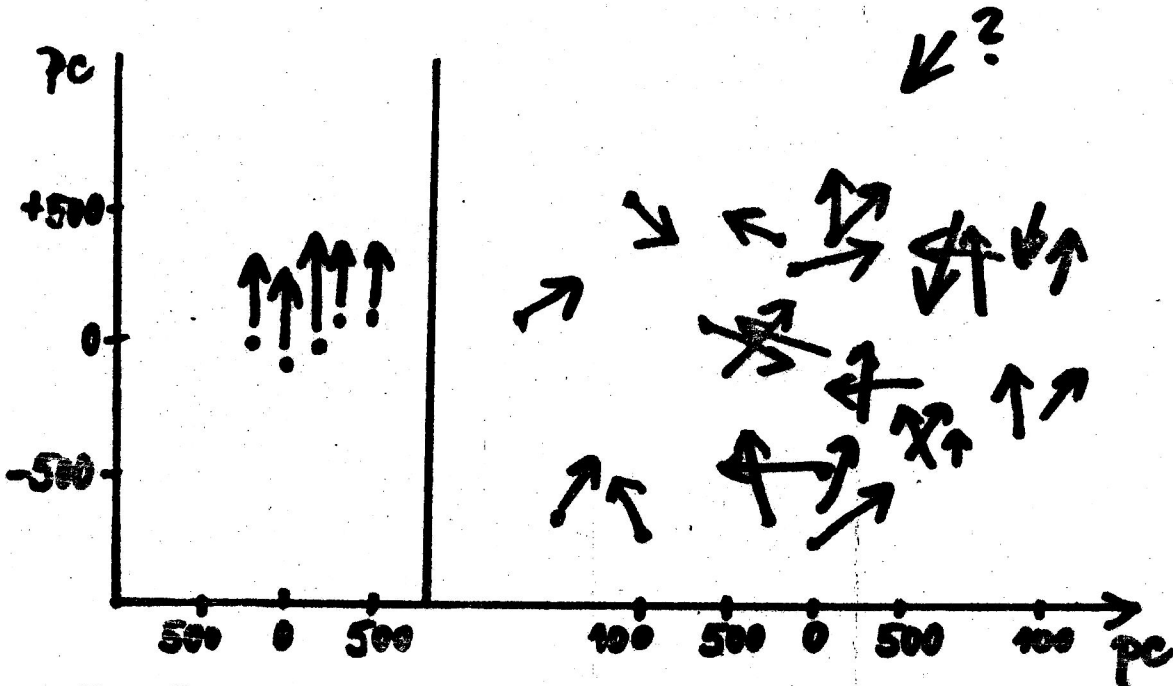
Podstatný prínos pri určovaní tvaru Galaxie má okrem optických pozorovaní rádiové pozorovanie na vlně 21 cm. Štúdiom tohoto žiarenia, ktoré vysielajú mraky medzihviezdneho vodíka a ktoré nie je pohlcované medzihviezdnym prachom ukázalo, že žijeme vlastne vo veľkej špirálovej hviezdnej sústave. Nie je celkom jasné, či v Galaxii existujú 2 alebo 3 ramená, pretože pozorovaných ramien je veľmi zložitý a ani detailná štruktúra týchto ramien nie je dostatočne preskúmaná. V blízkom okolí Slnka okrem rádiových pozorovaní môžeme i opticky pozorovať veľké časti špirálových ramien Galaxie. Naše Slnko so svojou sústavou leží na vnútornom okraji špirálového ramena Orióna. Vo vzdialenosti asi 6 000 svet. rokov od ramena Orióna sa nachádza rameno Perzea. Na opačnej strane od Slnka, t.j. smerom k stredu Galaxie sa nachádza rameno Strelca. (Obr.4) Podrobnejší výskum zloženia špirálových ramien prezvádza, že nie všetky hviezdy rešpektujú ich priebeh. Týka sa to objektov ako napr. premenné hviezdy typu RR - Lýry, guľové hviezdokopy, dlhoperiodické premenné hviezdy a pod. Nie je náhoda, že výlučne staré hviezdy a guľové hviezdokopy ignorujú existenciu špirálových ramien a naopak, veľmi mladé horúce hviezdy typu O, B, alebo veľmi mladé hviezdy typu T - Tauri, ako i oblaky medzihviezdnej hmoty tvoria špirálové ramená.



Obr. 3. Plochy rovnakej hustoty v uvažovanej oblasti galaxie



Obr. 4.



Obr. 5.

Radikálny rozdiel medzi priestorovým rozložením rozlične starých hviezd a hviezdnych skupín dal podnet na zavedenie pojmu hviezdne populácie. Tento pojem zaviedol W. Baade, ktorý pôvodne rozlišoval iba 2 populácie: plochú /označ. I/ a halovú /označ. II/.

V našej Galaxii k populácii I patria hviezdy špirálových ramien: hviezdy typu O, B, A, otvorené hviezdokopy, dlhoperiodické cefeidy a taktiež medzi hviezdny plyn a prach. K populácii II patria: bieli trpaslíci, pruhované hviezdy typu RR Lýry a guľové hviezdokopy.

Pre centrálnu oblasť Galaxie je charakteristická populácia II.

Delenie na populácie sa ukázalo zhodným s delením podľa kinematických vlastností a podľa priestorového rozloženia uvažovaných objektov.

Populácia I je charakterizovaná rotáciou okolo centra Galaxie s rýchlosťou asi 250 km/sek. (vo vzdialenosti Slnka od centra Galaxie) a s veľkou disperziou rýchlosti. Populácia II má oveľa menšiu účasť na rotácii Galaxie a príliš veľkú disperziu rýchlosti. /Obr. 5/

Na základe hviezdno dynamických výpočtov a na základe teórie hviezdnej evolúcie sa dá predpokladať, že populácia II je staršia ako populácia I, čo sa prejavuje takisto v chemickom zložení (populácia II má menší obsah ťažkých prvkov). Odhad času možného rozpadu otvorených hviezdokôp je približne 10^9 rokov a guľových hviezdokôp $10^{12} - 10^{13}$ rokov. Populácia II zrejme vznikala v prvopočiatočnej sférickej protogalaxii a vznik populácie I sa začal v disku Galaxie a pokračuje zrejme doteraz v špirálových ramenách.

Bohatá rozmanitosť hviezd a ich priestorového rozloženia v Galaxii si vyžiadala pôvodné rozdelenie na 2 populácie rozšíriť na 5 typických populácií:

extrémna populácia I: - Wolf-Rayetove hviezdy, hviezdy tried O-B5, B8-B9, otvorené hviezdokopy, hviezdne asociácie typu O a T, hviezdy typu T Tauri, klasické cefeidy, medzi hviezdna hmota (plyn a prach), neutrálny vodík.

Rozptyl rýchlosti 10 km/s, vek objektov 10^9 rokov, obsah ťažkých prvkov 4 %.

stredná populácia I: hviezdy spektrálnych tried A-F, červení nadobri, otvorené hviezdokopy (bez hviezd spektrálnych tried O-B). Rozptyl rýchlosti 20 km/s, vek objektov $1-3 \cdot 10^9$ rokov, obsah ťažkých prvkov asi 3%.

- populácia disku : obri spektrálnych tried G-K, podobri, hviezdy galaktického jadra, hviezdy hlavnej postupnosti, polopravidelné premenné hviezdy, premenné typu RR Lýry / $p < 0,4$ dňa/, novy. Rozptyl rýchlosti 30 km/s., vek objektov $3 - 5 \cdot 10^9$ rokov, obsah ťažkých prvkov asi 2%.
- stredná populácia II : bieli trpaslíci, cefeidy typu W Virginis, dlhoperiodické premenné spektrálnej triedy M5e / $p < 250$ dní/. Rozptyl rýchlosti 50 km/s, vek objektov $5-6 \cdot 10^9$ rokov a obsah ťažkých prvkov asi 1 %.
- extrémna populácia II: guľové hviezdokopy, premenné typu RR Lýry / $p > 0,4$ dňa/, hviezdy ktorých priestorová rýchlosť $v > 100$ km/s. Rozptyl rýchlosti 130 km/s, vek objektov väčší ako $6 \cdot 10^9$ rokov, obsah ťažkých prvkov asi 0,3 %.

1. 6. Základné parametre Galaxie.

V hviezdnej astronómii je výhodné vzťahovať polohy objektov v Galaxii k súradnicovej sústave, ktorej základná rovina je práve Mliečna dráha. V minulosti bola poloha základnej roviny častokrát menená, v závislosti na použítom materiále a metódach. Presnejšie bolo možné určiť polohu základnej roviny Galaxie a tým aj galaktického pólu až na základe pozorovaní na rádiových vlnách. To preto, lebo optickými pozorovaniami môžeme dovidieť asi do vzdialenosti 3 kpc, kým rádiovými pozorovaniami dovidíme do oveľa väčšej vzdialenosti. Zrejme najdôležitejšie sú pozorovania H - I oblastí na vlnovej dĺžke 21 cm, siahajúce do vzdialenosti 15 kpc vo všetkých smeroch od centra . Výsledkom pozorovacích snáh v rádiovnej oblasti bolo v roku 1958 zavedenie galaktickej súradnicovej sústavy, ktorej galaktický pól má rovníkové súradnice:

$$\alpha = 12^{\text{h}} 49^{\text{m}}$$

$$\delta = + 27^{\circ} 24'$$

pre ekvinokcium 1950,0.

Galaktická šírka b sa počíta obvyklým spôsobom od galaktickej roviny (kde $b = 0^{\circ}$) smerom ku galaktickým pólom ($b = \pm 90^{\circ}$) a uhlová galaktická

dĺžka 1 bola definovaná ku smeru silného rádiového zdroja Sagittarius A, ktorého rovníkové súradnice sú:

$$\alpha = 17^{\text{h}} 42^{\text{m}}$$

$$\delta = -28^{\circ} 55'$$

pre ekvinokcium 1950,0

pričom galaktická dĺžka rastie v smere rastúcej rektascenzie. Poloha Slnka nad galaktickou rovinou nie je uvádzaná priamo v parametroch súradnicovej sústavy, lebo definovaná základná rovina musí nutne prechádzať pozorovacím miestom t.j. Slnkom. Slnko sa nachádza asi 4 pc nad základnou rovinou.

1. 7. Smer k centru Galaxie a jeho vzdialenosť.

Smer k centru Galaxie možno určiť rôznymi optickými metódami, priestorovým rozložením guľových hviezdokôp i hviezd typu RR Lýry, priebehom izočiar rovnakej hviezdnej hustoty, pozorovaniami v infračervenej oblasti. Najspoľahlivejšie sú ale rádioastronomické merania poskytujúce systém izofot, v centre ktorých sa nachádza mohutný rádiový zdroj Sagittarius A.

Horšie je to s určením vzdialenosti Slnka od stredu Galaxie. Rôzni autori poskytujú rôzne údaje od 6,3 kpc - 12,5 kpc. V súčasnosti sa udáva vzdialenosť 10 kpc \pm 1 kpc.

Pretiahnutosť Galaxie v smere anticentra, ktorú naznačujú napríklad dlhoperiodické cefeidy, alebo guľové hviezdokopy, môže byť 5 - 6 kpc. Potom priemer Galaxie musí byť asi 30 kpc \sim 100 000 svetelných rokov. Samotné centrum Galaxie je zahalené množstvom absorbujúcich oblakov.

1. 8. Centrálna časť Galaxie.

Štúdium centrálnej oblasti Galaxie je veľmi ťažké, pretože smerom k centru Galaxie existuje veľmi veľká medzihviezdna absorbcia dosahujúca v niektorých smeroch až 25 magnitúd vo viditeľnom svetle. Aj napriek tomu napr. využitím techniky fotografovania v infračervenom svetle možno vidieť v centrálnej oblasti Galaxie 2 hviezdne oblaky. Rozmery tejto centrálnej oblasti sa odhadujú na 2,1 x 1,2 kpc.

V samom centre Galaxie môžeme pozorovať už spomínaný intenzívny rádiový zdroj Sagittarius A, ktorý sa skladá z piatich komponentov.

2 najintenzívnejšie z nich majú rozmery 10 pc a 40 pc a sú vo vzájomnej vzdialenosti 25 pc. Komponent o rozmere 10 pc má vo svojom vnútri jasné "jadierko" o priemere asi 1,5 pc. Toto jadierko je približne zhodné čo sa týka rozmerov, farby, svietivosti s analogickým "jadierkom" v galaxii M 31.

V jadre sa nachádza okolo 31 mil. hviezd väčšinou populácie II. a v jadierku 3 mil. hviezd, čo dáva hviezdnu hustotu 107 krát väčšiu, ako je hustota hviezd v okolí nášho Slnka.

1. 9. Pohyb hviezd v Galaxii.

Už v 17. storočí Halley pri pozorovaní hviezdnych polôh v starých kataľógoch ukázal, že je nutné rátať s vlastným pohybom hviezd. Vlastný pohyb hviezdy μ je uhlové premiestnenie na nebeskej sfére za rok, spôsobené pohybom hviezdy voči Slnku. Prejavuje sa časovými zmenami v α i δ a to zmenami stredných polôh i polôh vzhľadom na určité ekvinokcium.

Ak poznáme zložky vlastného pohybu hviezdy v α i δ , môžeme určiť celkovú hodnotu μ :

$$\mu = \sqrt{(15 \cdot \mu_{\alpha} \cdot \cos \delta)^2 + \mu_{\delta}^2}$$

Ak ďalej poznáme paralaxu hviezdy, môžeme určiť tangenciálnu rýchlosť v_t a ak určíme radiálnu rýchlosť v_r z Dopplerovho posunu spektrálnych čiar hviezdy, zistíme celkovú priestorovú rýchlosť hviezdy vzhľadom k Slnku:

$$v_t = 4,74 \frac{\mu}{\pi} \quad , \quad v_r = c \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \quad , \quad v = \sqrt{v_t^2 + v_r^2}$$

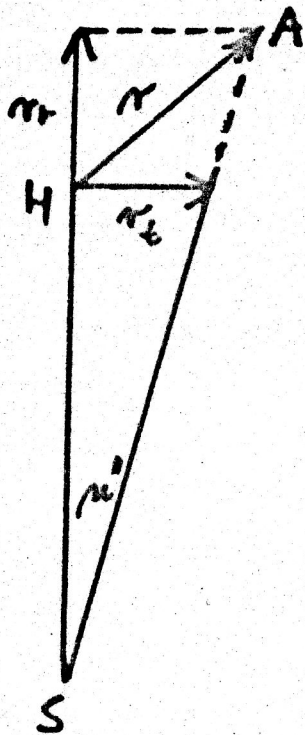
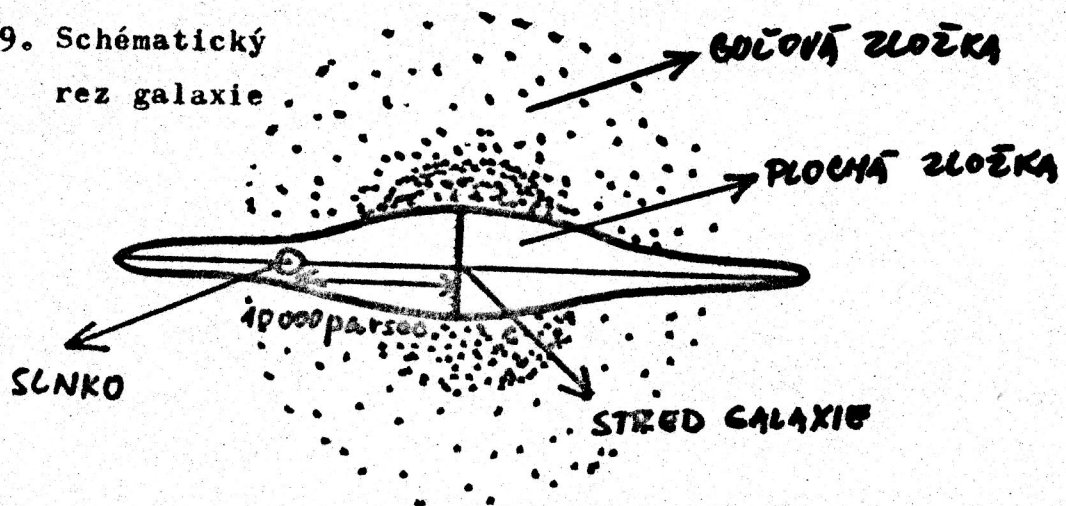
kde μ a π sú v oblúčovej miere

Pôvodne sa predpokladalo, že vlastné pohyby hviezd sú náhodné, čo do veľkosti a smeru. V 18. storočí Herschel ukázal, že niektoré hviezdy smerujú zdanlivo k určitému bodu na oblohe. A naozaj, ak smer vlastných pohybov hviezd blízkych Slnku zobrazíme na nebeskej sfére, vznikne dojem rozostupovania sa hviezd v určitom bode - apexe. Tento bod ukazuje smer relatívneho pohybu Slnka medzi hviezdami. V protipohľade bode

na nebeskej sfére vznikne dojem zoskupovania hviezd (obr.6). Ide o zdanlivý pohyb hviezd, ktorý je vyvolaný pohybom Slnka. Poloha apexu je $\alpha = 18^h$, $\delta = + 30^{\circ}$, a stredná rýchlosť hviezd v blízkosti apexu je asi 20 km/s. Je to rýchlosť, akou sa pohybuje Slnko vzhľadom na blízke hviezdy. Poloha apexu i rýchlosť pohybu Slnka vzhľadom na blízke hviezdy sú závislé na počte a spektrálnom type hviezd, ktoré boli pri určení jeho polohy uvažované, ako aj na určitých pohybových vlastnostiach použitých hviezd. Pozorované vlastné pohyby hviezd však neodrážajú v plnej miere ich skutočný pohyb v Galaxii. Ich pohyby totiž meriame vzhľadom na Slnko, ktoré sa v priestore tiež pohybuje. To, čo platí o vlastných pohyboch, platí i o priestorových rýchlostiach a tak priestorová rýchlosť Slnka dosahuje rôzne hodnoty, podľa toho, ku ktorým objektom ju vzťahujeme. Vzhľadom k hviezdám slnečného okolia je táto rýchlosť asi 20 km/s. Vzhľadom k centru Galaxie si pri určení priestorovej rýchlosti Slnka musíme zvolit' za vzťažnú sústavu objekty, ktoré sa pohybujú pomerne malou rýchlosťou vzhľadom k centru. Takýmto príkladom sú napríklad guľové hviezdokopy, pomocou ktorých sa zistilo, že Slnko sa pohybuje rýchlosťou asi 250 km/s vzhľadom na stred Galaxie. Tou istou rýchlosťou sa pohybujú i ostatné hviezdy v okolí Slnka.

Naviac, určovaním priestorových rýchlostí hviezd v okolí Slnka sa zistilo, že niektoré hviezdy majú napríklad príliš veľkú hodnotu priestorovej rýchlosti (v rozmedzí asi $65-100 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) t.j. vzhľadom na Slnko sa pohybujú veľkou rýchlosťou. Podobnou vlastnosťou sa vyznačujú i guľové hviezdokopy. Ďalšou zaujímavou vlastnosťou "rýchlych hviezd" je, že sa väčšinou pohybujú len vo vymedzených galaktických dĺžkach. Uvedené vlastnosti vysvetlil napr. Strömberg rotáciou Galaxie: rýchle hviezdy a guľ. hviezdokopy tvoria nepohyblivú kostru Galaxie a ich pohyb je vlastne obrazom pohybu normálnych hviezd (v okolí Slnka) pohybujúce sa rotáciou. A tak pohyb hviezd v Galaxii nám nielen dokresľuje náš obraz o vlastnostiach hviezd, ale poukazuje na ďalšiu vlastnosť Galaxie - rotáciu.

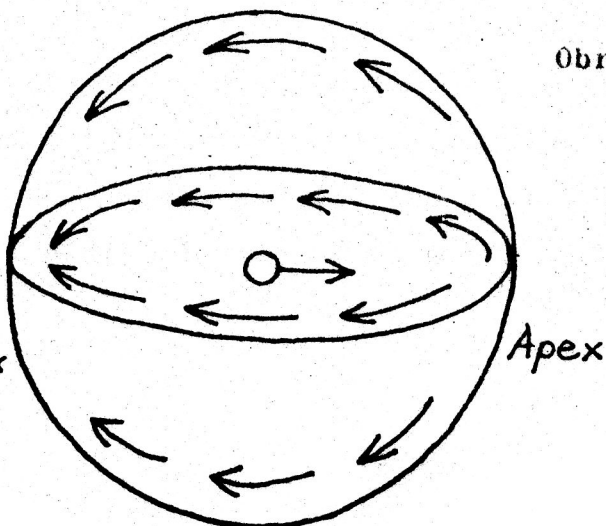
Obr. 9. Schématický
rez galaxie



Zo Slnka (vlastne zo Zeme) môžeme pozorovať len tú zložku, ktorá je kolmá na svetelný lúč SH. Druhou zložkou je rýchlosť v smere zorného lúča t.j. rýchlosť radiálna. Uhol μ , pod ktorým sa javí zo Zeme úsek HA sa nazýva vlastný pohyb hviezdy.

Obr. 7.

Obr. 6.



Zdanlivý pohyb hviezd vyvolaný pohybom Slnka.

1. 10. Rotácia Galaxie

Naša hviezdna sústava rotuje diferenciálne. Objekty rotujú okolo centra Galaxie rýchlosťami závislými na vzdialenosti od centra. Z pozorovaní vyplýva, že centrálné jadro Galaxie rotuje ako tuhé teleso, kým všetky vzdialenejšie hviezdy obiehajú okolo stredu Galaxie podobným spôsobom ako planéty okolo Slnka, t. j. čím sú od centra ďalej, tým dlhšie im trvá, kým vykonajú jeden celý obch.

Už sme spomínali rozdelenie objektov v Galaxii na jednotlivé populácie. Je zaujímavé si všimnúť, ako sa hviezdy rozličných populácií zúčastňujú na rotačnom pohybe sústavy. Objekty halovej populácie (guľové hviezdokopy), premenné typu RR Lýry, atď.) majú na rotácii Galaxie veľmi slabú účasť. To neznamena, že by okolo centra Galaxie neobiehali, ich pohyby sú neusporiadané, pretože sa pohybujú všetkými možnými smermi a vo všetkých možných rovinách. Naopak, rotácia Galaxií je dobre badaťelná najmä u plochej populácie I. Všetky hviezdy tejto populácie obiehajú okolo centra Galaxie takmer v jednej rovine a rovnakým smerom. Čo sa týka hviezd prechodných populácií, sú prechodnými prípadmi v účasti na rotácii v porovnaní s uvedenými extrémnymi populáciami. Zvyčajne majú účasť na rotácii, ale ich dráhy nie sú sústredené do základnej roviny. Ak sa pýtame na základné parametre pohybu Slnka okolo stredu Galaxie, nemôžeme nespomenúť Oortove konštanty, ktoré popisujú základné kinematické vlastnosti Galaxie v slnečnom okolí. (napr. uhlové a kruhové rýchlosti hviezd). Určujú sa zo štatistického spracovania radiálnych rýchlostí a priestorových rýchlostí (alebo vlastných pohybov) hviezd.

Ich hodnoty sú:

$$\begin{aligned} A &= + 15 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kpc}^{-1} \\ B &= 1 \quad - 10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kpc}^{-1} \end{aligned}$$

Ich rozdiel napr. určuje hodnotu uhlovej rýchlosti ω_0 v uvažovanej vzdialenosti R od stredu Galaxie. Pomocou nich si môžeme určiť základné parametre pohybu Slnka okolo stredu Galaxie. Ak predpokladáme, že Slnko je vo vzdialenosti 10 kpc od stredu Galaxie pre obvedovú kruhovú rýchlosť Slnka platí:

$$\omega_0 = A - B = 25 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kpc}^{-1}$$

$$v_0 = R_0 \cdot \omega_0 = 10 \text{ kpc} \cdot 25 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kpc}^{-1} = 250 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

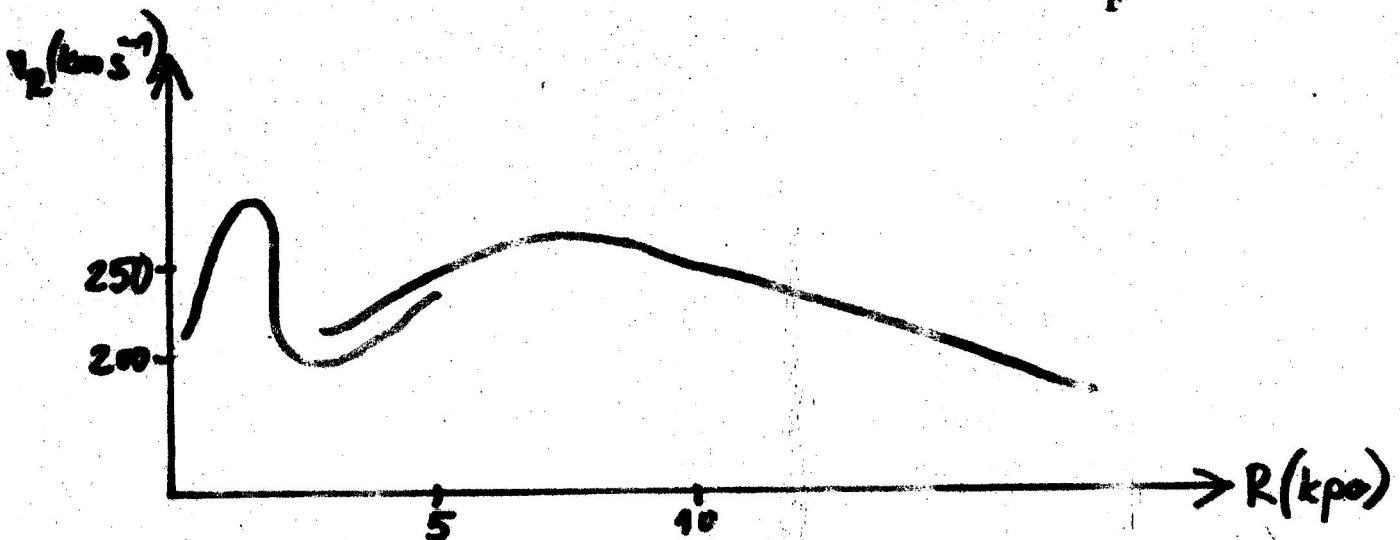
pre obežnú dobu:
$$P = \frac{2\pi R_0}{v_0} = \frac{2\pi \cdot 3,08 \cdot 10^{17}}{250} = 7,75 \cdot 10^5 = 2,45 \cdot 10^6 \text{ rokov}$$

$(10 \text{ kpc} = 3,08 \cdot 10^{17} \text{ km})$

Ak uvažujeme, že vek Slnka je asi 4,6 miliardy rokov, potom od svojho vzniku obehlo okolo centra Galaxie asi len 19-krát. Rotáciou sa dá do určitej miery vysvetliť aj priestorové rozloženie rozličných hviezdnych populácií. Ukazuje sa, že pôvodný tvar oblaku, z ktorého sa utvorila hviezdna sústava, by mal mať guľový tvar. Svedčí o tom najmä rozloženie guľových hviezdokôp a starých hviezd, typu RR Lýry, ktoré tvoria pravidelnú guľovú podsústavu Galaxie. Vplyvom rotácie sústavy sa gravitačnou kontrakciou plynno-prachová látka neskoncentrovala do centra Galaxie, ale do jej základnej roviny. Preto sa každá ďalšia hviezdna generácia tvorí vždy bližšie k tejto rovine.

1. 11. Hmotnosť Galaxie

Pri určovaní hmotnosti našej Galaxie sa zvyčajne vychádza z pomerne spoľahlivo určenej hustoty látky v slnečnom okolí. Ak zoberieme do úvahy len hviezdy, nachádzajúce sa v okolí Slnka, je priemerná hustota látky $4 \cdot 10^{-24} \text{ g/cm}^3$. Ak uvažujeme i medzihviezdnu hmotu, dostávame hodnotu asi $1 \cdot 10^{-23} \text{ g/cm}^3$. Ďalšou merateľnou veličinou v Galaxii je zmena orbitálnej rýchlosti (alebo aspoň radiálnej rýchlosti v_r) hviezd (obr.8)



Obr. 8. Závislosť kruhovej rýchlosti v galaktickej rovine na vzdialenosti od stredu Galaxie.

a oblakov HI v závislosti na vzdialenosti od centra Galaxie (rotačná krivka Galaxie). Táto závislosť nám naznačuje, ako je asi rozložená hmota (alebo jej hustota) v Galaxii na vzdialenosti od jej centra. Dostávame tak na základe rotačnej krivky model Galaxie s určitým rozložením hmoty. Sčítaním jednotlivých hustôt, na rôznych vzdialenostiach od stredu Galaxie, môžeme dostať jej celkovú hmotnosť. Z tvaru rotačných kriviek mnohých Galaxií sa ukazuje, že v ich hraničných oblastiach je podstatne viac hmoty, ako sa očakáva. (Problém skrytej hmoty). Túto hmotu snáď tvoria masívne halá galaxií, pozostávajúce z reliktných neutrín. Celková hmotnosť našej Galaxie vychádza touto metódou asi $100 \times 10^9 M$ (bez zarátania skrytej hmoty).

Ďalšou možnosťou určenia hmotnosti galaxií je prípad dvojitých galaxií obiehajúcich okolo spoločného ťažiska. V tomto prípade určíme hmotnosti oboch galaxií na základe tretieho Keplerovho zákona. Pomerne spoľahlivou metódou určenia hmotnosti hlavne eliptických galaxií je vzťah hmotnosť - svietivosť. Ak teda nejakým spôsobom určíme svietivosť ľubovoľnej eliptickej galaxie, určíme podľa tohoto vzťahu jej hmotnosť. Z určených hmotností galaxií rôznych typov vyplýva, že v nami pozorovanom vesmíre majú najväčšiu hmotnosť práve eliptické galaxie.

MIMOGALAKTICKÁ ASTRONÓMIA

V súhvezdí Andromédy môžeme za jasných nocí aj voľným okom pozorovať malý hmlistý obláčik. Prvá zmienka o tomto objekte je v "Knihe stálic" perzského astronóma Abdurahmán Al-Sufiho z roku 964.n.l.

Odvtedy, čo bol vynájdený ďalekohľad, pozorovalo sa na oblohe stále viac takýchto "plošných" svietiacich objektov a so zdokonaľovaním ďalekohľadu rýchlo rástol počet pozorovaných objektov tohoto typu. Lenže ani najlepšie ďalekohľady 18. a 19.storočia nestačili na to, aby sa mohla pozorovať ich detailná štruktúra, takže ich podstata zostávala naďalej neznáma.

Problém podstaty špirálových a eliptických hmlovín nebolo možné vyriešiť bez aspoň približného určenia ich vzdialeností. To sa prvýkrát podarilo roku 1923 americkému astronómovi E.Hubbleovi pomocou vtedy najväčšieho teleskopu s priemerom objektívu 2,5 metra. Hubble ako prvý rozlíšil v hmlovine Andromédy jednotlivé hviezdy. V špirálových ramenách pozoroval niekoľko jasných premenných hviezd typu Cepheid, ktoré boli známe aj v našej Galaxii a keďže na základe vzťahu perióda - svietivosť a zdanlivej magnitúdy mohol odhadnúť ich absolútne magnitúdy, dokázal tak určiť ich vzdialenosť. Výsledok bol 900 000 svetelných rokov, teda viac než desaťnásobok vzdialenosti tých najodľahlejších objektov našej Galaxie. Niekoľko neskorších kalibrácií vzťahu perióda - svietivosť posunulo hmlovinu v Androméde do vzdialenosti zhruba dvoch miliónov svetelných rokov, ale to najpodstatnejšie bolo známe už v roku 1923 - hmlovina v Androméde a tisíce ďalších podobných hmlovín sú galaxie podobné našej. Tieto objekty zapĺňajú vesmír vo všetkých smeroch a do veľkých vzdialeností - môžeme teda povedať, že určením vzdialenosti hmloviny v Androméde sa začína datovať mimogalaktická astronómia - veda, ktorá sa zaoberá stavbou, pohybom a vývojom mimogalaktických objektov.

2. 1. Morfológická klasifikácia galaxií

Galaxie, ktoré na oblohe pozorujeme sú tých najrozmanitejších tvarov. Dnešnými kvalitnými ďalekohľadmi ich môžeme zaznamenať obrovské množstvo - okolo miliardy.

Prvú klasifikáciu urobil v roku 1925 E.Hubble. Rozdelil ich podľa

optického zhl'adu do piatich základných skupín a táto klasifikácia je zaužívaná v hlavných rysoch dodnes: E - eliptické galaxie, S0 - šošovkovité galaxie, S - špirálové galaxie, SB - špirálové s priečkou a Ir - nepravidelné galaxie.



Eliptické galaxie - majú pri pohľade z boku tvar elipsoidov rôzneho sploštenia. Sú symetrické bez výraznejšej vnútornej štruktúry, jas pomaly ubúda od stredu elipsoidu.

Hmotnosti eliptických galaxií a priemerné priestorové hustoty sú omnoho väčšie ako u ostatných typov. Skladajú sa zo starých červených hviezd malej svietivosti a podiel hmotnosti medzihviezdnej látky ku celkovej hmotnosti galaxie je veľmi malý. Podľa typu sploštenia ich môžeme rozdeliť do 8 skupín. Stupeň sploštenia je daný vzťahom $E = 10 \cdot \frac{a - b}{a}$

kde a, b sú hlavné poloosi galaxie. Galaxie typu E0 majú sférický tvar, kým galaxie typu E7 majú tvar veľmi pretiahnutých elíps. Väčšie sploštenie sa spravidla nepozoruje, nakoľko z hľadiska dynamiky takáto sústava nemôže existovať t.j. priebeh hustoty nie je spojitý, vznikali by v nej špirálové ramená.



Šošovkovité galaxie - sú vlastne akýmisi prechodným typom medzi E a S. Majú pravidelný priebeh hustoty, nevyznačujú sa vnútornou štruktúrou a majú určité náznaky vývinu ramien, alebo priečky. Nachádza sa

v nich málo medzihviezdnej látky, vo väčšine z nich nie sú pozorované ani oblasti ionizovaného vodíka H - II. V závislosti od množstva prítomného neutrálneho vodíka boli zavedené podtypy S0a, S0b, S0c.



Špirálové galaxie - sa vyznačujú jasným jadrom a špirálovými ramenami, ktoré vychádzajú z jadra galaxie v smere dotyčníc. Špirálové ramená obsahujú veľa mladých horúcich hviezd typu O a B a oblasti ionizovaného vodíka, ktoré svojim žiarením ohraničujú

oblasť špirálových ramien. Podľa veľkosti jadra a vyspelosti ramien ich delíme do 3 skupín: Sa, Sb, Sc. Sa má veľké jadro a málo vyvinuté ramená, Sc nevýrazné jadro s výrazne vyvinutými ramenami, obsahujúce veľké množstvo medzihviezdnej hmoty a horúcich hviezd.



Špirálové galaxie s priečkou sú podobné špirálovým galaxiám, líšia sa len tvarom jadra. Špirálové galaxie majú jadro takmer sférické, okrúhle, kým u Sb je v jadre badateľná priečka.



Napravidelné galaxie majú nepravidelný tvar, často s chumáčikovými zhusteninami. Nejavia nijaké stopy rotačnej symetrie. Rozmermi patria medzi menšie galaxie.

Galaxie tohto typu obsahujú najviac medzihviezdnej hmoty, asi 30 - 40 %. Delíme ich na 2 podtypy: Ir I - majú vysokú povrchovú jasnosť, obsahujú veľa horúcich hviezd a hmlovín.

Ir II - majú úplne amorfný tvar a nevieme v nich rozlíšiť ani guľové hviezdokopy. Guľové hviezdokopy sú dobre rozlíšiteľné pri ostatných typoch. Obsahujú veľa medzihviezdného plynu a prachu.

Väčšinu galaxií vieme podľa tvaru zaradiť podľa Hubbleho klasifikácie. Asi 13 % galaxií nevieme spoľahlivo zatriediť a tvoria zvláštnu skupinu - pekulárne galaxie. Patria sem napríklad Seyfertové galaxie, N - galaxie, BCG - galaxie a iné. Keďže voči nám sa vyskytujú všetky možné náhodné priestorové orientácie galaxií, je niekedy ich klasifikácia dosť obtiažná a to aj napriek tomu, že Hubbleho klasické triedenie bolo rôzne menené a dopĺňované. Boli navrhnuté nové kritéria na rozdelenie galaxií. Napr. De Vancouleursom bola navrhnutá dvojrozmerná klasifikácia pripojením znakov, ktoré popisujú tvary a počty ramien. Klasifikácia Van den Bergha zohľadňuje absolútne jasnosti galaxií. Morganova klasifikácia zasa berie do úvahy vzhľad spektra jadra galaxie, zatiaľ čo Voroncov - Veľjaminov navrhujú takmer každú jednu galaxiu popísať osobitne. Ukazuje sa, že v nami doteraz pozorovanom vesmíre sa najčastejšie vyskytujú špirálové galaxie, čo dobre dokumentuje tabuľka zastúpenia všetkých galaxií vo vesmíre podľa Hoernera a Schaifersa:

E	14 %	SBO	4 %
SO	9 %	SBa	3 %
Sa	8 %	SBb	6 %
Sb	18 %	SbC	2 %
Sc	33 %		

2. 2. Zastúpenie medzihviezdnej hmoty a typov hviezd v galaxiách.

Pri študovaní hviezdneho zastúpenia v galaxiách sa ukázalo, že jednotlivé typy galaxií obsahujú rôzne typy hviezd a množstvo medzihviezdnej plynno-prachovej látky. V prípade, keď v uvažovanej galaxii sú dostupné pozorovaniam jednotlivé zložky galaxie, môžeme si urobiť predstavu o jednotlivom zastúpení pomocou farby a svietivosti jednotlivých objektov vzhľadom na ich integrálnu charakteristiku, v opačnom prípade sa riadime integrálnymi charakteristikami žiarenia študovaných galaxií alebo ich rozlíšiteľných častí. Pretože galaxie obsahujú hviezdy rôznych spektrálnych tried, ich integrálne žiarenie je veľmi zložitá. V krátkovlnnej oblasti je spektrum určované predovšetkým žiarením horúcejších hviezd, kým v infra oblasti je tvorené hlavne žiarením hviezd pozdného spektrálneho typu. Podľa výskytu množstva jednotlivých objektov hovoríme o prevládajúcom type populácie v galaxii.

Ako je známe, podľa veku, rýchlosti a chemického zloženia hviezd, hviezdy v galaxii delíme na dva základné typy. Do populácie I patria napr. horúci obri, hviezdy otvorených hviezdokôp, dlhoperiodické Cepheidy a supernovy typu II. K populácii II radíme červených obrov, červených trpaslíkov, guľové hviezdokopy, hviezdy typu RR Lyrae a supernovy typu I.

Zastúpenie jednotlivých populácií v rozličných typoch galaxií je veľmi rozmanité, no presne zodpovedá tomu čo vieme o priestorovej štruktúre populácií z našej hviezdnej sústavy.

Eliptické galaxie a jadrá ostatných galaxií sa skladajú zo starých červených hviezd malej svietivosti - populácia II. Keďže ich vklad žiarenia v optickej oblasti je relatívne malý, je možné, že z týchto hviezd sú zložené aj vonkajšie oblasti špirálových galaxií. Ďalším štruktúrnym prvkom sú guľové hviezdokopy, ktorých je tiež najviac v eliptických galaxiách. Avšak podiel hmotnosti medzihviezdnej látky (populácia I) na celkovej hmotnosti týchto galaxií je veľmi malý - tvorí len 0,2 %. Eliptické galaxie sú teda hviezdnymi sústavami, v ktorých sa proces vzniku hviezd už ukončil.

Na spektrá ramien špirálových galaxií majú vplyv horúce hviezdy typu O, B a taktiež veľké množstvo medzihviezdnej hmoty. Podiel hmotnostného zastúpenia medzihviezdnej hmoty je 1,3 - 20 %, takže tu môžeme

pozorovať proces vzniku nových hviezd. V obrích galaxiách typu Sb a Sc sa stretávame s útvarmi nazývanými "obrie komplexy" H II oblastí. Zastúpenie jednotlivých typov v špirálnych ramenách radíme k populácii I.

Najviac medzihviezdnej hmoty majú nepravidelné galaxie, kde podiel hmotnostného zastúpenia medzihviezdnej hmoty tvorí až 37 %. Vzniká v nich najviac nových hviezd.

Evolučný model, ktorý sa nám takto ponúka (podľa hmotnostného zastúpenia medzihviezdnej hmoty) Ir - Sc - Sb - Sa - S0 - E však nie je opodstatnený. Najstaršie zložky + guľové hviezdokopy môžeme totiž pozorovať aj v nepravidelných a špirálových galaxiách. Táto postupnosť odráža rôzne počiatočné podmienky pri samotnom vzniku galaxií. Je ale isté, že pozdĺž uvedenej postupnosti sa znižuje priemerný moment hybnosti na jednotku hmotnosti galaxie, ktorý má významnú úlohu pri tvorbe jednotlivých hviezd.

2. 3. Vzdialenosti galaxií.

Pri skúmaní rozloženia galaxií v priestore, ako aj pri určení ich absolútnych veličín (priemer, svietivosť...) musíme poznať ich vzdialenosť. Metódy určenia vzdialenosti sú však zatiaľ dosť nepresné. Môžu nám dať len prvé priblíženie riešenia problému vzdialenosti vo vesmíre.

Metódou trigonometrickej paralaxy, alebo určením vzdialenosti pomocou spektra hviezd (zostrojením HRD) môžeme určiť vzdialenosti len v našej hviezdnej sústave. Pre mimogalaktické objekty môžeme použiť len nepriame metódy (delíme ich na primárne, sekundárne...), ktoré sú založené na predpoklade, že fyzikálne vlastnosti hviezd našej Galaxie sú rovnaké aj pre ostatné hviezdy mimogalaktických objektov. Vychádzame pri tom z merania takých veličín, ktoré menia svoje hodnoty so vzdialenosťou t.j. m (zdanlivá magnitúda), d (zdanlivý priemer). Potom pre r v parsekoch platí: $\log r = 0,2 (m - M) + 1$

$$r = D / \log d'', \quad D = \frac{1}{206\,264,8}$$

Zdanlivú magnitúdu a zdanlivý priemer môžeme zmerať priamo. Hľadáme teda možnosť určenia absolútnej hviezdnej veľkosti objektu.

1. Primárne metódy sú založené na porovnávaní objektov našej Galaxie s objektami iných galaxií.
 - a/ Metóda RR Lyrae - hviezdy typu RR Lyrae patria do skupiny pulzujúcich premenných hviezd, pričom absolútna magnitúda týchto hviezd je nezávislá na periode a je rovná $M_V = 0,5 \pm 0,5$. Ich vzdialenosť môžeme teda určiť už zo zdanlivej magnitúdy. Pomocou týchto hviezd môžeme určiť vzdialenosti objektov ležiacich vo vzdialenosti do 326 000 svetelných rokov.
 - b/ Metóda Cepheid - absolútne magnitúdy týchto hviezd sú približne lineárne závislé na ich periode P, čo umožňuje určiť zo zmeny jasnosti ich absolútnu magnitúdu. Pomocou Cepheid môžeme určovať vzdialenosti do 13 mil. svetelných rokov, teda vzdialenosti objektov ležiacich v Miestnej skupine galaxií.
 - c/ Metóda najjasnejších hviezd - je založená na predpoklade, že najväčšie nadobrie hviezdy v galaxiách majú absolútnu magnitúdu $M = -9$ až -10 (je určená štatisticky podľa nadobrich hviezd našej Galaxie). Pomocou týchto hviezd môžeme určiť vzdialenosti až do $2 \cdot 10^8$ svetelných rokov.
 - d/ Metóda nov - využíva skutočnosť, že maximálna absolútna magnitúda jednoznačne súvisí s dobou, za ktorú jasnosť novy poklesne o 3 magnitúdy podľa vzťahu $M = 10,5 + 2,2 \cdot \log t_3$
Pre najjasnejšiu novu, ktorá doteraz bola pozorovaná, bola určená $M = -9,3$. Touto metódou môžeme teda mapovať objekty ležiace vo vzdialenosti 130 mil. svetelných rokov, t.j. napr. objekty ležiace v kope galaxií súhvezdia Panny.
Porovnateľné výsledky môžeme dosiahnuť pomocou metód, ktoré využívajú štatistické hodnoty absolútnych jasností guľových hviezdokôp, alebo uhlových rozmerov oblastí H II. Tieto metódy sú však menej presné, využívame ich ako doplnkové.
 - e/ Metóda supernov - absolútna jasnosť supernov závisí v maxime od typu supernovy. Pre typ SN I $M = -19^m$ a pre SN II $M = -17,5^m$. Zďaleka nie vždy sa nám podarí zaregistrovať supernovu v čase jej maxima a taktiež nie vždy vieme z pozorovania presne určiť typ supernovy. V poslednom čase sa vynorila otázka existencie viacerých typov supernov. Preto sa táto metóda používa len ako hrubý odhad vzdialeností. Pomocou supernov môžeme odhadnúť vzdialenosti do asi 6 miliárd svet. rokov.

2. Sekundárne metódy - sú omnoho menej presné, no pomáhajú nám určiť aspoň relatívne vzdialenosti veľmi ďalekých objektov. Sú založené na porovnávaní integrálnych vlastností galaxie, ktorej vzdialenosť poznáme a galaxie, ktorej vzdialenosť zisťujeme.

a/ Metóda jasností galaxií - pri tejto metóde využívame rôzne vlastnosti galaxií, ktoré sú zviazané s ich absolútnou veľkosťou - morfológická štruktúra, povrchová jasnosť. Pre rôzne typy galaxií je určená závislosť medzi typom a svietivosťou galaxií. Takto môžeme odhadnúť vzdialenosť až do miliardy svetelných rokov.

b/ Metóda najjasnejších galaxií v kopách - predpokladá, že najjasnejšie galaxie v kopách majú približne rovnakú absolútnu magnitúdu (absolútna magnitúda najjasnejšej galaxie v kope v súhvezdí Panny $M_V = -21,7$). Takto môžeme určiť vzdialenosti asi do 23 miliárd svetelných rokov.

c/ Metóda červeného posunu - spektrá vzdialených galaxií javia k červenému koncu spektra posun spektrálnych čiar a to tým väčší, čím sú od nás vzdialenejšie. Ide o Dopplerov efekt, galaxie sa od nás vzdialujú, zároveň čím ďalej je galaxia, tým rýchlejšie sa pohybuje. Túto skutočnosť vyjadruje Hubbleho vzťah:

$$v_r = c \cdot \Delta \lambda / \lambda = H \cdot r$$

kde H je Hubbleho konšt.

Radiálne rýchlosti galaxií môžeme určiť pomerne presne z červeného posunu čiar, no problémom zostáva presná hodnota Hubbleho konštanty, ktorá sa nachádza v intervale od $50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ do $100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$. Táto metóda je veľmi dôležitá a vlastne jediná pri takýchto vzdialenostiach, kde $r \geq 100 \text{ Mpc}$, no pri určovaní takýchto vzdialeností musíme brať do úvahy kozmologický typ vesmíru a tiež tu vzniká problém spojený so zakrivením priestoru. Touto metódou môžeme určiť relatívne vzdialenosti až do 8 miliárd svetelných rokov.

2. 4. Rotácia galaxií

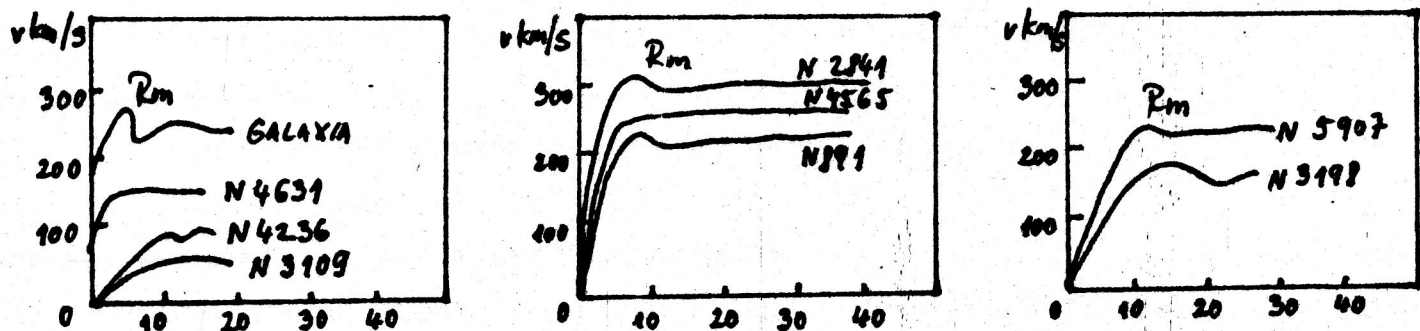
Rýchlosti pohybu jednotlivých hviezd v galaxiách nemôžeme pozorovať vzhľadom na ich veľkú vzdialenosť. O tom, že galaxie rotujú svedčia aj rozšírené profily absorpčných čiar spektra, ktoré sú dané prevládajúcimi typmi hviezd galaxie, navyše pri pozorovaní nejakej galaxie z boku sa v dôsledku rotácie jedna časť približuje a jedna vzdialuje. Jadro galaxie nám dáva spektrum s naklonenými čiarami t.j. radiálne rýchlosti

spôsobené rotáciou sú priamo úmerné vzdialenosti od centra a môžeme povedať, že jadro galaxie rotuje ako tuhé teleso.

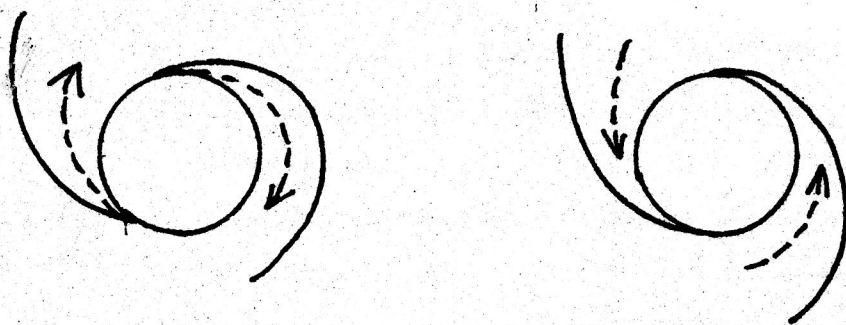
Pre diskové časti špirálových galaxií sa rotácia určuje pomocou spektrálnych čiar medzihviezdneho plynu (najväčší význam má čiara HI na vlnovej dĺžke 21 cm a emisné čiary H II). Môžeme pozorovať, že v týchto častiach galaxie sa lineárna a uhlová rýchlosť znižuje so vzdialenosťou a rýchlosti jednotlivých častí približne vyhovujú Keplerovským pohybom. Pozorovaním radiálnych rýchlostí v rôznych vzdialenostiach od centra galaxie môžeme určiť priebeh rotačnej rýchlosti v závislosti od vzdialenosti (obr.1). Na obrázku môžeme porovnať rotačné krivky jednotlivých galaxií a môžeme vidieť, že v_r vzrastá do určitej vzdialenosti od centra približne lineárne. Galaxia nám v tejto oblasti rotuje ako tuhé teleso t.j. uhlová rýchlosť je stála, obvodová rýchlosť so vzdialenosťou rastie. Po dosiahnutí v_{max} je priebeh krivky rotácie pre jednotlivé galaxie rôzny, no vo všetkých prípadoch sa $v(r)$ mení pomalšie ako pri $r \leq R_m$.

Periódou rotácie jadra je v rozpätí od 50 do 500 mil. rokov. Najrýchlejšie rotujú galaxie typu S0 a Sa a najpomalšie galaxie typu Sc a nepravidelné galaxie, čo je v rozpore s očakávaním, že väčšiu rýchlosť rotácie budú vykazovať ploché objekty.

Ďalšou zaujímavou otázkou je určenie (pri špirálových galaxiách) zmyslu otáčania jednotlivých ramien. Ani pri znalosti radiálnych rýchlostí jednotlivých častí galaxie nemôžeme určiť, či rotuje v zmysle zavíjania alebo rozvíjania ramien. V posledných rokoch však prevláda názor, že rotácia je v zmysle zavíjania ramien. Nasvedčujú tomu aj pokusy modelovania vývoja galaxií na počítačoch.



Obr. 1. Priebeh rotačnej rýchlosti v závislosti od vzdialenosti



Obr. 2. Zmysel pojmu zavíjania a rozvíjania špirálnych ramien

2. 5 Určenie hmotnosti a rozmerov galaxií.

Pri známych vzdialenostiach sú zo zdanlivých rozmerov galaxií známe aj skutočné rozmery. Popri trpasličích galaxiách s priemerom 1 až 5 kpc s hmotnosťou $10^6 M_{\odot}$ poznáme aj obrie a nadobrie galaxie s priemerom až 50 kpc a hmotnosťou až $10^{13} M_{\odot}$. Medzi najväčšie tzv. nadobrie galaxie patria eliptické galaxie, ktoré majú absolútnu veľkosť $M = -22^m$ a hmotnosť aspoň $10^{12} M_{\odot}$. Príkladom môže byť galaxia M 87 v súhvezdí Panny.

K najmenším trpasličím galaxiám patria Arpove galaxie; tieto eliptické kompaktné trpasličie galaxie tvarom pripomínajú guľové hviezdokopy, od ktorých sa však odlišujú väčšinou jasnosťou a zložením. Obsahujú množstvo horúcich hviezd a ionizovaný plyn. Majú priemer asi 130 svetelných rokov a absolútnu veľkosť $M = -12,7^m$. Pre eliptické galaxie vo všeobecnosti platí, že majú hmotnosti a priemerné priestorové hustoty hviezd vyššie ako u iných typov galaxií.

Hmotnosti špirálových galaxií sa pohybujú od $10^9 - 10^{11} M_{\odot}$, pričom ich priemer je v rozmedzí 20 000 - 150 000 svetelných rokov. Absolútna hviezdna veľkosť je $M = -15^m$ až -20^m .

Medzi nepravidelnými galaxiami sú zastúpené väčšinou trpasličie galaxie. Pri týchto galaxiách, ktoré nejavia nijaké stopy rotačnej symetrie, sa priemer pohybuje od 5 000 do 30 000 svetelných rokov a hmotnosť od $10^8 - 3 \cdot 10^{10} M_{\odot}$. Absolútna veľkosť dosahuje hodnôt $M = -10^m$.

Určovanie hmotnosti galaxií je veľmi dôležité, ale aj veľmi obtiažné. Určujeme ju z krivky rotácie za predpokladu určitého rozdelenia hustoty, pre viacnásobné galaktické systémy sa určuje za predpokladu, že dvojnásobok kinetickej energie sa rovná potenciálnej energii celého systému (veta o víriále). Takto určená hmotnosť galaxie môže byť v rozmedzí od $10^7 M_{\odot}$ do $10^{13} M_{\odot}$. Oproti tomu však z pozorovania určených

kinetickou a potenciálnou energiou jednotlivých kôp plynie, že úhrná hmotnosť galaxií v kope je menšia, než hmotnosť kopy určená pomocou vety o viriále. Snahou o vysvetlenie daného nesúhlasu je aj jedna z hypotéz, ktorá predpokladá, že kopy galaxií sú gravitačne viazané hmotou, ktorú sme zatiaľ neobjavili, tzv. "skrytá hmota". Táto hmota môže byť vo forme temných galaxií na konci svojho vývoja, alebo vo forme medzigalaktického plynu.

2. 6. Priestorové rozloženie galaxií

Galaxie, podobne ako hviezdy, utvárajú rôzne veľké skupiny, t.j. priestorovo ohraničené a gravitačne viazané sústavy. Tieto sústavy nie sú rozložené v priestore rovnomerne. Najčastejšie sa vyskytujú malé skupiny galaxií (dvojité, trojité...), kde počet členov napresahuje 10. Môžeme pozorovať aj málo početné kopy ($N \simeq 100$), ktorých členovia majú rovnaké radiálne rýchlosti, čo nasvedčuje o ich priestorovej príbuznosti. Početné kopy galaxií, kde $N \simeq 1000$ sú oddelené od seba oblasťami, v ktorých je koncentrácia 10 až 100 krát menšia, ako v kopách. Ojedinele sa vyskytujú aj kopy kôp, kde počet členov môže dosiahnuť až 10^5 členov. Kopy galaxií môžeme rozdeliť na pravidelné, kde dominuje pravidelná sférická štruktúra so silnou koncentráciou do stredu. V pravidelných kopách prevládajú zvyčajne eliptické galaxie. Príkladom môže byť kopa galaxií v súhvezdí Vlasov Bereniky nazývaná Coma. Napriek obrovskej vzdialenosti môžeme v nej pozorovať okolo 1 000 galaxií.

Nepravidelné kopy, ktoré majú neurčitú štruktúru a neostro vymedzené okraje, sú rozsiahlejšie a menej bohaté na kopy galaxií. Príkladom môže byť kopa galaxií v Panne.

Vieme, že galaxie tvoria skupiny a kopy galaxií a že napr. Miestna skupina galaxií, do ktorej patrí i naša Galaxia, je na okraji veľkej kopy galaxií Virgo zo súhvezdia Panny. Či táto hierarchická štruktúra pokračuje, keď uvažujeme stále väčšie a väčšie rozmery vo vesmíre, t.j. či existujú superkopy galaxií a aká je štruktúra vesmíru vo veľkých merítkach, je predmetom skúmania astronómov v posledných rokoch. Bežný pohľad na fotografické platne exponované veľkými ďalekohľadmi hovorí, že obloha je posiatá obrovským počtom galaxií. Detailná analýza takýchto fotografií obsahujúcich temer celú oblohu naznačuje, že galaxie nie sú na oblohe rozložené rovnomerne, ale vytvárajú akúsi

chumáčovitú, vláknitú štruktúru. Ak poznáme i vzdialenosti galaxií, môžeme si urobiť predstavu o ich priestorovom rozložení. Tak sa napr. ukázalo, že kopy galaxií Coma a A 1367 sú členmi väčšej sústavy - superkopy galaxií. Rovnako aj kopa Perzeus (A 426) tvorí spolu s niekoľkými ďalšími kopami a menšími skupinami galaxií jednu sústavu. Superkopy galaxií tvorí aj bohatá kopa galaxií v súhvezdí Herkula (A 2151) s ďalšou kopou (A 2199). Ukazuje sa, že kopy galaxií sú určitými zhusteninami v nepravidelnej štruktúre vesmíru. A tak, ak existujú zhusteniny, mali by existovať i miesta bez galaxií - prázdne oblasti v priestore. A skutočne, niekoľko takýchto prázdnych oblastí bolo objavených / o rozmere asi 100 Mpc a objeme $1 \cdot 10^6 \text{ Mpc}^3$ /. I keď sa v nich môžu nachádzať slabé trpasličie galaxie unikajúce nášmu pozorovaniu, zdá sa, že takéto priestorové rozloženie galaxií je všeobecnou vlastnosťou štruktúry vesmíru.

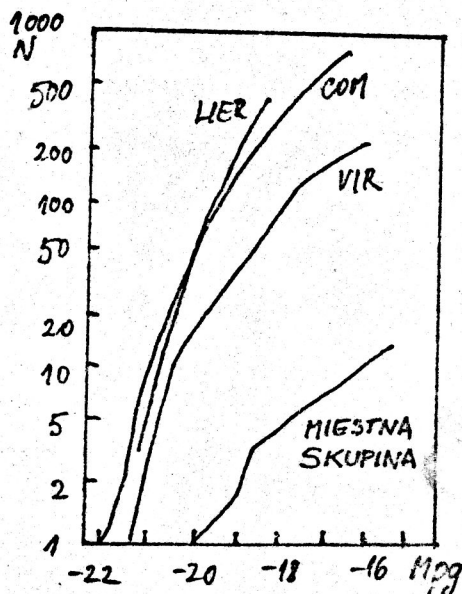
Z teoretického hľadiska sa galaxie koncentrujú v okolí stien obrovských celúl, kým vnútorné časti týchto celúl sú relatívne prázdne.

Celulárna štruktúra vesmíru je výsledkom slabých porúch hustoty hmoty v raných štádiách vývoja vesmíru. Konkrétne povedané, výsledkom porúch sú hustejšie, ploché plynné útvary (niekedy nazývané bliny), v ktorých sú vhodnejšie podmienky pre vznik galaxií a hviezd. Tieto útvary sa postupne zväčšovali a navzájom pretínali, čím sa vytvorila celulárna alebo pórovitá štruktúra vesmíru. V okolí stien týchto celúl je dnes vysoká koncentrácia galaxií, kým vnútorné oblasti sú buď prázdne, alebo vyplnené medzigalaktickým plynom bez galaxií. Steny celúl pozorujeme ako vlákna, v ktorých je veľké množstvo galaxií vzniknutých napr. podľa fragmentačnej /rozpadovej/ teórie vytvorením najprv spomínaných plynných útvarov, ktoré predchádzali vzniku superkôp a kôp galaxií, z ktorých práve rozpadom vznikali neskôr menšie útvary - guľové hviezdokopy a samotné galaxie.

Naša Galaxia patrí aj s približne 30 ďalšími blízkymi galaxiami do Miestnej skupiny. Tieto galaxie sú nepravidelne rozložené v oblasti s priemerom asi 6,5 mil. svetelných rokov. Výrazne sa grupujú okolo dvoch najväčších galaxií, našej Galaxie a galaxie M 31 v súhvezdí Andromédy. Všetky galaxie okrem troch špirálových galaxií sú trpasličie galaxie eliptického, alebo nepravidelného tvaru. Zdá sa, že všetky tieto galaxie sa pohybujú okolo spoločného ťažiska skupiny, ktoré sa

nachádza medzi našou Galaxiou a galaxiou M 31. Celkovú hmotnosť odhadujeme asi na 500 miliárd Sŕnc. Otázka, či sa Miestna skupina javí dynamicky zviazaným systémom je doteraz nevyjasnená.

Na obr. 3 môžeme porovnať funkciu svietivosti našej Miestnej skupiny s funkciami svietivosti pre bohaté kopy galaxií v Panne, Vlasoch Bereniky a Herkulovi. Môžeme vidieť, že najjasnejšie galaxie Miestnej skupiny ustupujú v svietivosti bohatým kopám jasných galaxií.



Obr. 3. Časť funkcie integrálnej svietivosti Miestnej skupiny a troch bohatých kôp galaxií. Krivky nám udávajú počet galaxií, ktoré sú jasnejšie ako M.

2, 7. Aktívne jadrá galaxií

Pozorovania ukazujú, že dynamické chovanie centrálnych oblastí /jadier galaxií/ sú obvykle dosť odlišné od ich okolia. Tieto oblasti väčšinou rýchle rotujú, obsahujú okrem hviezd a medzihviezdnej látky silné magnetické polia a značné množstvo relativistických častíc.

U normálnych bežných galaxií sú jadrá v relatívnom kludnom stave, avšak u niekoľkých percent galaxií sa pozoruje rôzne intenzívna aktivita ich centier. Väčšinou ide o vytekание medzihviezdnej látky z týchto oblastí, vyvrhovanie vo forme pretiahnutých útvarov alebo explózia doprevádzaná výronom relativistických častíc a netepelným žiarením. Oblasť prejavu aktivity jadier galaxií nie je ohraničená okolím jadra. Z existencie rozloženia počtu rádiových zdrojov v galaxiách usudzujeme, že dochádza k prenosu energie od aktívneho jadra za hranice galaxií na stovky kpc. Otázky o formách uvoľnenia energie v aktívnom jadre a konkrétnych spôsoboch jej prenosu zostávajú otvorené, no pozorovania uskutočnené koncom 70-tych a začiatkom 80-tych rokov ukázali prítomnosť kolimácie prúdu energie - prenáša sa pozdĺž úzkeho kanála, ktorý má často priamočiaru formu, nazývame ho "jetom".

Hrúbka jetu nie je obyčajne veľká v porovnaní s jeho dĺžkou, ktorá má desiatky a v niektorých prípadoch aj stovky kpc. Jety sa pozorujú prevažne u slabých rádiových zdrojov a menej u silných zdrojov. Pri silných rádiových zdrojoch so svietivosťou, ktorá prevyšuje 10^{44} erg./s, pozorujeme väčšinou jednostranné jety. Šírka jetu vzrastá priamo úmerne so vzdialenosťou od galaxie, jednako pozorujeme aj jety, ktorých šírka sa mení skokom. V množstve prípadov jety zostávajú priamočiare v značnej dĺžke, no často bývajú aj silne ohnuté. Žiarenie jetu sa mení v jeho dĺžke nemonotónne, existujú v ňom oblasti so zvýšenou intenzitou žiarenia tzv. horúce škvrny. Na popis a vysvetlenie jetov existuje niekoľko hypotéz. V ľubovoľnej z nich by sme mali nájsť vysvetlenie prenosu ohromného množstva energie (do 10^{48} erg./s) do vzdialenosti niekoľkých Mpc. ako aj kolimácie prenosu a vznik veľkého množstva relativistických elektrónov na veľkých vzdialenostiach.

2. 8. Zvláštne typy galaxií

Najviac rozšíreným typom galaxií s aktívnym jadrom sú Seyfertove galaxie. Vyznačujú sa malým, neobvykle jasným jadrom, ktorého spektrum má veľké množstvo emisných čiar, prejavuje sa mohutným žiarením (svietivosť jadra je v intervale 10^{43} - 10^{46} erg./s) nielen v optickej, ale aj v infračervenej a röntgenovej oblasti. Šírka a profily spektrálnych čiar svedčia o búrlivých pohyboch plynových oblakov v jadre s rýchlosťami až 5000 km/s.

Objekty BL Lac majú tvar hviezdy a v ich optickom spektre chýbajú spektrálne čiary. Sú mohutným zdrojom röntgenového žiarenia a žiarenia v rádiovkej oblasti. Tieto objekty sa väčšinou vyskytujú spolu s nadobrími eliptickými galaxiami.

Galaxie s horúcimi škvrnami sú charakteristické tým, že smerom do stredu sú modrejšie a nie červenejšie ako normálne galaxie. Príčinou anomálnej farby centrálnej oblasti sú horúce škvrny - gigantické oblasti H II, rozmeru 300 až 1000 svetelných rokov, ionizované desiatkami tisíc horúcich hviezd. Tieto zóny H II obiehajú okolo jadra rýchlosťou 30 až 50 km/s.

Rádiové galaxie sú galaxie, ktorých rádiové žiarenie je podstatne vyššie, než by zodpovedalo ich žiareniu v optickej oblasti (vyššie než 10^{34} W). Sú to veľmi rozsiahle objekty, obsahujú obvykle dva rádiové zdroje,

položené symetricky vzhľadom k jadrú materskej galaxie. Táto galaxia býva obvykle typu E. Rozbor meraní ukazuje, že mienené zdroje boli súčasne vyvrhnuté opačnými smermi z jadra galaxie rýchlosťami blízkyimi rýchlosti svetla. Vzdialenosť pozorovaných oblakov od jadra galaxie je obyčajne rovná niekoľko sto kpc. Netepelný charakter spektra rádiového žiarenia ukazuje, že vek zdroja nie je väčší ako $10^6 - 10^7$ rokov.

N - galaxie svojími optickými a rádiovými vlastnosťami tvoria prechodné vývojové štádium medzi kvazarmi a rádiovými galaxiami. Je veľmi pravdepodobné, že sú to bývalé kvazary, ktoré už vyčerpali veľkú časť svojej energie vo viditeľnej oblasti spektra, ale sú ešte dostatočne výkonnými zdrojmi v rádiovnej oblasti. Sú to viac-menej eliptické galaxie s neobyčajne jasným, takmer hvieзде podobným jadrom, žiariacim najmä v ultrafialovej a modrej oblasti spektra. Na žiarení vo viditeľnej oblasti spektra ktoré je premenné, sa zúčastňuje takmer rovnakým dielom netepelné žiarenie jadra i žiarenie hviezd.

Kvazary sú to objekty veľmi vysokej svietivosti ($M = -21$ až -23), napriek tomu sa javia na fotografiách bodovými. Sú to najaktívnejšie známe objekty typu galaxií. Vyznačujú sa veľmi malými uhlovými rozmermi, mohutným ultrafialovým žiarením, širokými emisnými a úzkymi absorpčnými čiarami a veľkým červeným posunom $z = -3,5$. Kvazary bývajú obklopené hmlovinnými obláčikmi. U najbližších kvazarov boli tieto obláčiky stotožnené s galaxiami. Pri 90 % kvazarov boli nájdené špirálové galaxie

/ Ir - S - SyG - E - RG - NG - QSO/

V jadrách mnohých špirálnych galaxií, ktorých jadrá nepovažujeme za aktívne, nastávajú mohutné nestacionárne procesy. Preto hovoriť o aktívnych jadrách je veľmi obtiažne. Možno by bolo správnejšie hovoriť o štádiu zvýšenej aktivity v jadre. Sú dôvody predpokladať, že existuje postupnosť aktívnych jadier od jadier obyčajných galaxií do kvazarov. Ukazuje sa, že pozdĺž tejto postupnosti v priemere rastie žiarivý výkon netepelného charakteru a postupne sa menia aj ďalšie fyzikálne vlastnosti. Objav kvazarov v skupinách a kopách galaxií naznačuje, že kvazary predstavujú zvláštnu formu alebo vývojové štádium galaxií. Tento evolučný problém, ako aj mnohé iné hypotézy týkajúce sa podstaty kvazarov však v súčasnosti ostávajú otvorenou otázkou.

ZOZNAM LITERATÚRY

- I.A.Klimišin ASTRONOMIJA NAŠICH DNEJ /Nauka 1976/
V.Vanýsek ZÁKLADY ASTRONÓMIE A ASTROFYZIKY /Akademia Praha 1980/
P.G.Kulikovskij ZVEZDNAJA ASTRONOMIJA /Nauka Moskva 1985/
V.G.Gorbackij FYZIKA GALAKTIK I SKOPLenia GALAKTIK
/Nauka Moskva 1986/
J.Štohl ZO ŽIVOTA HVIEZD /Bratislava 1976/
L.S.Maročnik GALAKTIKA /Nauka Moskva 1984/

Vydala: Krajská hviezdáreň a planetárium v Prešove ako metodický materiál
pre astronomické krúžky vo Východoslovenskom kraji.

Zodpovedný: riaditeľ KHaP Štefánia Lenzová

Odborný posudok: RNDr. Milan Zboril

Autor: Mária Timková, prom.fyz.

Náklad: 1000 ks

Nepredajné!

Len pre vnútornú potrebu!

Vyšlo: 1987