MASARYKOVA UNIVERZITA

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

SLUPKOVÉ GALAXIE

Martin Vaculčík

BRNO 2011

V první řadě chci poděkovat mému vedoucímu práce, Mgr. Filipu Hrochovi Ph.D., za jeho nezměrné úsilí, trpělivost, cenné připomínky a vynaložený čas při tvorbě této práce. Dále chci poděkovat za podporu mojí rodině, která při mě stála v chvílích nejtemnějších. Mé díky patří i spolubydlícím, kteří projevili velkou dávku tolerance vůči mé osobě počas tvorby této práce. V neposlední řadě pak patří díky všem, kteří měli připomínky k této práci a velkou měrou tak přispěli k jejímu zkvalitnění.

This research used the HST Archive facilities of the STScI, the ST-ECF and the CADC with the support of the following granting agencies: NASA/NSF, ESA, NRC, CSA.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Brně dne 20. 05. 2011 Martin Vaculčík

Abstrakt:
Předkládaná práce se zabývá studiem morfologie a fotometrií slupkových galaxií. Na příkladu tří typických zástupců ukazuje metodiku fotometrického zpracování obrazu a postupy k nalezení základních rozměrových a fotometrických charakteristik těchto slupkových útvarů.
Klíčová slova: galaxie, slupky, fotometrie

Abstract:
Presented Bachelor's thesis is investigating morphology and photometry of shell galaxies. On example of three typical representatives shows the metodics of photometric processing of the image and presents procedures for finding basic dimensional and photometric characteristics of these shell-like structures.
Keywords: galaxy, shells, photometry

Obsah

Úvod **6**

1 Galaxie **7**
1.1 Stručná historie výzkumu galaxií 7
1.1.1 Katalogy mlhovin 8
1.2 Potvrzení existence galaxií 9
1.3 Typy galaxií 9
1.3.1 Eliptické galaxie 10
1.3.2 Spirální galaxie 10
1.3.3 Nepravidelné galaxie 11
1.4 Hubbleova sekvence 11

2 Slupkové galaxie **13**
2.1 „Podivné“ galaxie 13
2.2 Jak slupkové galaxie vznikají? 14
2.2.1 Srážkový model 16
2.2.2 Model slabé interakce 18

3 Fotometrie CCD snímků slupkových galaxií **20**
3.1 Zkoumané galaxie 20
3.1.1 NGC 474 20
3.1.2 NGC 1210 21
3.1.3 NGC 3923 21
3.2 Medián 21
3.3 Poloměr vzdálenosti slupek 21
3.4 Fotometrie slupek 22

4 Výsledky fotometrie **24**
4.1 NGC 474 25
4.2 NGC 1210 26
4.3 NGC3923 28

5 Závěr **31**

Použité zdroje **32**

Obrazové přílohy **34**

Úvod

Přestože jsou galaxie mnohdy součástí větších galaktických systémů, jsou to právě ony, které jsou považovány za základní stavební kámen nekonečného vesmíru. Studium jejich morfologie a vývoje nám může dát odpovědi na klíčové otázky týkající se jak budoucího vývoje naší vlastní Galaxie, tak i vesmíru jako celku.

Tato práce se zabývá morfologií a fotometrií slupkových galaxií. Tento speciální druh eliptických galaxií byl objeven v druhé polovině 20. století a vydává fascinující svědectví o kanibalismu mezi galaxiemi. Střety a kolize galaktických rozměrů dávají za vznik úchvatným strukturám, viditelným kolem mnohých eliptických galaxií.

Samotná práce se v první kapitole zabývá obecně všemi druhy galaxií, historií výzkumu a jejich obecnou morfologií. Druhá kapitola pak pojednává o slupkových galaxiích a mechanismech jejich vzniku. Ve třetí kapitole jsou popsány metody zpracování CCD snímků slupkových galaxií a konečně čtvrtá kapitola ukazuje výsledky morfologického a fotometrického výzkumu na třech vybraných slupkových galaxiích.

Kapitola 1

Galaxie

1.1 Stručná historie výzkumu galaxií

Po mnohá staletí byla existence galaxií[1] pro lidstvo skryta. Tyto objekty jsou totiž natolik vzdálené, že je pro pouhé lidské oko nemožné je zachytit, natož pak odlišit od hvězd. Jediným „objektem“, který lidstvo upozorňoval na existenci galaxií, tak byl po dlouhá staletí jakýsi bílý mlhavý pás světla, který je i dnes možné spatřit za temné noci někde daleko od světel moderní civilizace, kterak se vine přes celou oblohu od horizontu k horizontu. Podle staré řecké báje byl tento pás ve skutečnosti mateřské mléko bohyně Héry, manželky Dia, které se rozlilo po obloze, když Héra odmítla nakojit Diova nemanželského syna Hérakla, zplozeného s obyčejnou, leč neobyčejně krásnou, smrtelnicí Alkménou[1]. Římané pak tento pás označovali slovním spojením *Via Lactea*, neboli Mléčná dráha[2].

První myšlenky o tom, že tento bílý pás je ve skutečnosti složen z miliónů hvězd, od sebe nerozlišitelných pouhým okem, jsou zachyceny v Aristotelově díle *Meteorologica*. V něm zmiňuje dva řecké učence, Anxagora a Démokrita, podle nichž se Mléčná dráha může skládat z mnoha vzdálených hvězd. Podle Aristotela však byla Mléčná dráha způsobena „vzplanutím ohnivé exhalace některých hvězd, které byly velké, početné a blízko u sebe“. Toto vzplanutí se pak mělo odehrát „ve svrchních vrstvách atmosféry, které jsou součástí sublunární sféry“[2]. Aristotelův pohled na věc byl často kritizován, pokud

[1] slovo galaxie má původ v řeckém - $\Gamma\alpha\lambda\alpha\xi\iota\alpha\varsigma\ \kappa\nu\kappa\lambda\circ\varsigma$- *Galaxias Kyklos*, což znamená mléčný kruh.

[2] v moderní literatuře se anglické spojení Milky Way poprvé objevuje v práci anglického básníka a filosofa Geoffrey Chauceho

by totiž Mléčná dráha skutečně byla součástí sublunární sféry, pak by měla z různých míst na Zemi vypadat různě, a měla by mít změřitelnou paralaxu.

Na potvrzení povahy Mléčné dráhy se tak čekalo až do roku 1610, kdy italský fyzik a astronom Galileo Galilei poprvé namířil svůj dalekohled na Mléčnou dráhu. Tak přišel k poznání, že Mléčná dráha není „svítící nebeská tekutina“, ale že se skládá s velkého množství hvězd, nerozlišitelných pouhým okem[3].

Velký posun v poznání znamenala práce německého filozofa Emmanuela Kanta (1724—1804). Ten v polovině 18. století přišel s myšlenkou, ve které vycházel z analogie se Sluneční soustavou, že Mléčná dráha je ve skutečnosti rotující diskové seskupení hvězd vázané gravitací, které je v prostoru omezené. Svoji úvahu pak dále rozšířil, a vyslovil myšlenku, že některé z pozorovaných slabých rozmazaných eliptických útvarů - mlhovin - mohou být ve skutečnosti jiné diskovité systémy, v principu podobné struktury jako naše Galaxie, ovšem nacházející se daleko za jejími hranicemi. Kant pak o těchto objektech hovořil jako o vesmírných ostrovech (island universes)[3].

1.1.1 Katalogy mlhovin

S rozvojem pozorovací techniky ke konci 18. století přišel i vzrůst zájmu o tyto mlhavé objekty. Výsledkem bylo sestavení několika katalogů nehvězdných objektů.

Jedním z nejznámějších katalogů je bezesporu Messiérův katalog, který obsahuje celkem 110 položek. Jméno každé položky začíná velkým písmenem M, za nímž následuje pořadové číslo v katalogu. Sestavil jej francouzský astronom a lovec komet Charles Messier, primárně kvůli tomu, aby odlišil stálé mlhoviny od komet, které měl původně v úmyslu „lovit“. Originální katalog obsahoval pouze 103 položek, další položky, které Messier objevil, ale z neznámých důvodů do katalogu nezařadil, byly přidány až později.

Mnohem obsáhlejší výzkum provedl William Herschel společně se svou sestrou Caroline a synem Johnem. Ti objevili a sestavili katalog čítající celkem téměř 5000 mlhovin. Díky kvalitě Herschelových teleskopů byli schopni rozlišit světlo přicházející z nejbližších „mlhovin“ (ve skutečnosti to byly nejbližší kulové hvězdokupy) na jednotlivé hvězdy. To utvrdilo Herschela v Kantově myšlence, že vzdálené mlhoviny mohou být skutečně vesmírné ostrovy. Herschelův seznam byl během 19. století neustále doplňován, až v roce 1888 na objednávku Královské astronomické společnosti vydal irský astronom John Louis Emil Dreyer katalog čítající 7840 objektů a nazval jej

jednoduše New General Catalogue (zkráceně NGC). Později doplnil katalog dvěma doplňkovými seznamy — Index Catalogue I (1895) a Index Catalogue II (1908), zkráceně IC I a IC II. Celkem přidal 5086 objektů, takže dohromady katalog obsahuje téměř třináct tisíc položek. Názvy jednotlivých objektů jsou tvořeny zkratkou katalogu — NGC nebo IC — a pořadovým číslem v konkrétním katalogu[3].

1.2 Potvrzení existence galaxií

Definitivní potvrzení existence jiných galaxií přinesl až rok 1923. Americký astronom Edwin Hubble (1889—1953) nejprve za použití 100-palcového teleskopu na observatoři na Mount Wilson rozlišil u vnějších částí dvou nejbližších spirálních „mlhovin“ shluky velmi slabých objektů, které nemohly být ničím jiným než hvězdami. Za předpokladu, že tyto hvězdy byly přibližně stejně svítivé, jako nejjasnější hvězdy naší Galaxie, usoudil, že tyto objekty musí být ve velmi velké vzdálenosti. Při zkoumání „mlhoviny“ v Andromedě (M31) pak došel k zásadnímu objevu. Některé z mnoha hvězd v tomto uskupení vykazovaly periodické změny v jejich jasnosti, typicky charakteristické pro proměnné hvězdy typu δ Cephei. Pomocí modulu vzdálenosti pak byl Hubble schopen stanovit vzdálenost těchto objektů na 285 kpc[3]. Tím posunul hranice vesmírného prostoru daleko za hranice naší Galaxie.

1.3 Typy galaxií

Spolu s vzrůstajícím počtem odhalených galaxií nejrůznějších tvarů, považovaných dříve za mlhoviny, vzrůstala i potřeba nově objevené galaxie nějak roztřídit a „zaškatulkovat“. První takové rozdělení stanovil sám Edwin Hubble ve svém spise *Extra-galactic nebulae*, vydaném v roce 1926 v astronomickém časopise Astrophysical Journal. Galaxie rozdělil nejjednodušším možným způsobem, podle jejich pozorovaného vzhledu, na galaxie eliptické (označované písmenem E), spirální (označené písmenem S) a konečně nepravidelné (označované Irr nebo Ir podle anglického názvu Irregular)[4].

[3]Skutečná vzdálenost galaxie M31 je určena na 770 kpc

1.3.1 Eliptické galaxie

Eliptické galaxie jsou nápadné svým eliptickým tvarem. Můžeme sem zařadit rozličné množství objektů, tvarem připomínající kruh, až po velmi zploštělé objekty. Tyto galaxie nevykazují žádnou výraznou strukturu, a jejich zářivost rapidně klesá se vzdáleností od jádra. Jediným dalším kritériem pro klasifikování těchto objektů se tak jeví jejich elipticita. Ta se dá vyjádřit pomocí vztahu

$$\epsilon = \frac{a - b}{a} \tag{1.1}$$

kde a je hlavní a b vedlejší poloosa pozorované galaxie. Tímto způsobem jsou pak eliptické galaxie rozděleny do osmi podskupin (označení E0 až E7), kde E0 značí galaxii kulovitého tvaru a E7 galaxie tvaru velmi protáhlého. Galaxie s větší elipticitou než 0,7 nebyla pozorována, pravděpodobně by se však jednalo o nerozlišenou spirální galaxii. Pro přechodový typ mezi eliptickou a spirální galaxii se vžilo pojmenování čočková galaxie a je značen S0 [5, s.4-5][4, s.39-42].

1.3.2 Spirální galaxie

Spirální galaxie se již nerozlišují podle elipticity, jsou však lehce rozlišitelné podle dobře viditelných struktur, tzv. spirálních ramen, které vycházejí z jádra a dále tvoří tzv. disk galaxie. Mezi spirálními galaxiemi můžeme nadále rozlišit dva typy. Jsou to normální spirální galaxie (označovány S nebo SA), u kterých spirální ramena vycházejí přímo ze dvou protilehlých bodů na okraji jádra galaxie, odkud se pak vinou kolem jádra po spirálních drahách, a spirální galaxie s příčkou (označovány SB), kde ramena vycházejí z koncových bodů tzv. příčky.

K další klasifikaci spirálních galaxií můžeme využít tři následující kritéria: a) relativní velikost jádra galaxie v porovnání k velikosti jejího disku, b) míra rozvinutí spirálních ramen, c) detaily pozorovatelné v ramenech. Tyto kritéria rozřadí spirální galaxie do tří kategorií [5, s.6]. První kategorií, označovanou jako brzké (angl. early) typy, poznáme podle charakteristického velkého eliptického jádra a spirálních ramen, které se vinou těsně kolem něj. Druhým typem, označovaným jako střední (intermediate), jsou galaxie, u nichž se spirální ramena rozvíjejí na úkor centrální oblasti galaktického jádra a jsou více rozevřená, než u předchozího typu. Pozdní galaxie (late), tedy třetí typ, mají spirální ramena doširoka rozvinutá a centrální oblasti

jsou spíše nevýrazné. Tyto kategorie jsou označovány malými písmeny a, b, c (můžeme pak vidět označení jako Sa nebo SBc) [5, s.5-6] [4, s. 48-49].

1.3.3 Nepravidelné galaxie

Celkem dvě až tři procenta všech objevených galaxií však nelze zařadit do ani jedné z předchozích kategorií. Tyto galaxie postrádají buď osovou souměrnost, nebo nějaké výraznější jádro, případně obojí. Těmto galaxiím se říká nepravidelné a označují se písmeny Ir (z anglického slova Irregular). Typickým příkladem mohou být Malé a Velké Magellanovo mračno. Nepravidelné galaxie se později začaly také dělit na dva typy, Ir I a Ir II. První typ nepravidelných galaxií má zachován alespoň náznak jakéhosi uspořádání, zatímco druhý typ reprezentují naprosto rozrušené galaxie [4, s.47,48].

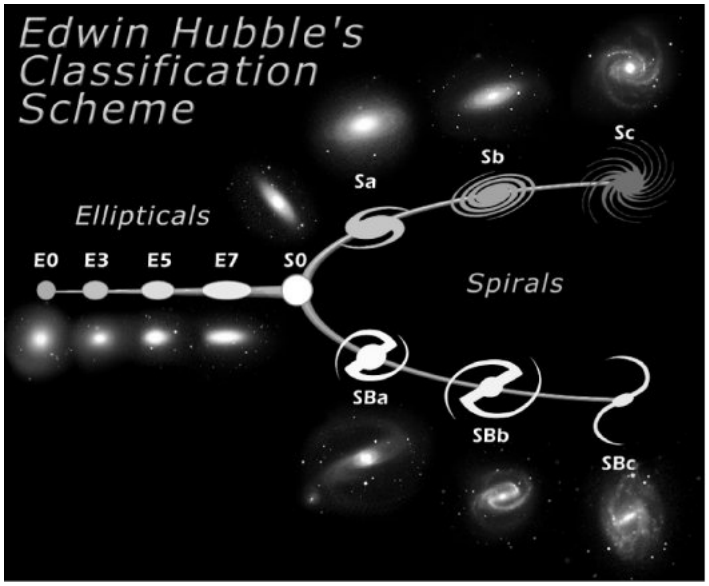
1.4 Hubbleova sekvence

Z těchto typů galaxií nakonec Edwin Hubble složil diagram morfologických sekvencí, známý dnes pod názvem Hubbleova sekvence (Hubble tuning-fork diagram)[4]. Toto základní rozdělení se s určitými úpravami používá dodnes.

Mezi tyto úpravy patří například přidání tzv. luminózních tříd (zavedeny kanadským astronomem Sydney van der Berghem) pro spirální galaxie. Luminózní třídy jsou označovány římskými čísly I-V, a klasifikace galaxií do jednotlivých tříd závisí hlavně na výraznosti a tloušťce spirálních ramen, kde I značí výrazná a dobře viditelná ramena[6]. Změn se dočkalo i dělení nepravidelných galaxií. Méně nepravidelné galaxie byly umístěny na konec sekvence a jejich značení bylo upraveno na Sd a Sm, pro ostatní nepravidelné galaxie se zavedlo značení Ir. Pro rozměrově malé galaxie se zavedlo pojmenování trpasličí galaxie (anglicky dwarf) a ke značení těchto galaxií se přidalo malé d (galaxie jsou pak značeny jako dE2, dSb a podobně). Pro některé galaxie, které vybočují z definovaných norem, se pak používá zkratka pec (z anglického peculiar — podivný).

Hubbleovo rozdělení má dvě velké nevýhody. Jednak neuvažuje některé morfologické aspekty galaxií, hlavní problémem je však založení čistě na optickém pozorování. S rozvojem techniky přišla na řadu pozorování v nejrozličnějších částech elektromagnetického spektra, výsledky těchto pozorování

[4]Hubbleova sekvence má tvar připomínající ladičku, odtud anglický název Hubble tuning-fork, pro lepší představu viz Obrázek 1.



Obrázek 1.1: Hubbleova sekvence.

však toto členění nijak nezohledňuje. Moderní věda a kvalitnější zobrazovací metody odhalily nové záhady ve struktuře galaxií a ukazuje se tak, že galaxie jsou mnohem záhadnějšími objekty, než se dříve zdálo.

Kapitola 2

Slupkové galaxie

2.1 „Podivné“ galaxie

Původně však byl rozšířen názor, že galaxie jsou konzistentní objekty bez závažnějších poruch ve struktuře či zjevných podivností vymykajících se standardně definovaným modelům galaxií. S rozvojem pozorovací techniky a možnostmi zobrazení však byly objeveny galaxie, které se vymykaly ze zaběhnutých definovaných struktur. První katalog takto různě podivných galaxií vydal v roce 1966 americký astronom Halton Arp. Obsahoval celkem 338 galaxií s podivnou strukturou a shrnoval tak více než čtyřletou práci jeho kolegů a jeho samotného na fotografování oblohy 200-palcovým teleskopem na observatořích Mount Wilson a Mount Palomar[7].

Mezi těmito podivnými galaxiemi pak bylo možno vysledovat jeden opakující se vzor. V roce 1980 astronomové David F. Malin a David Carter ve své práci *Giant shells around normal elliptical galaxies* popsali existenci „na první pohled obyčejných eliptických galaxií, které ovšem mají kolem sebe zvláštní obloukové struktury, převážně soustředné a výrazně odlišné od spirálních ramen, pozorovaných běžně u spirálních galaxií, s velmi nízkou jasností a velkou vzdáleností od jádra“. Tyto struktury pak pro svůj tvar nazvali slupky[8].

O tři roky později pak Carter a Malin vydali katalog eliptických galaxií se slupkami (*A catalog of eliptical galaxies with shells*), čítající celkem 137 položek. V této práci již hovoří o novém typu galaxií, nazývají jej souslovím slupková galaxie (shell-type galaxy) a přidávají její obecný popis: „Tyto galaxie na první pohled vypadají jako běžné eliptické galaxie, ale při bližším pohledu je možné odhalit jednu či více nepříliš jasných struktur, a to

buď přímo v optické obálce anebo (a to častěji) za rozeznatelnými hranicemi eliptické galaxie. Tyto slupky mohou být lehce rozmazané, avšak majoritní většina jich je zřetelně ohraničena a mohou být spojeny s jinými narušeními uvnitř obálky galaxie“[9, s.534].

O slupkách samotných a jejich charakteristikách pak píše P. J. Quinn (1984): Slupky byly pozorovány jak okolo normálních (např. NGC 1344, NGC 3923), tak i abnormálních (např. NGC 1316, NGC 3051) eliptických galaxií. Nejsou známy žádné příklady slupek okolo spirálních galaxií. Počet slupek detekovaných okolo jednotlivých galaxií se pohybuje od jedné po přibližně dvacet. Jsou to ostře ohraničené, obloukovité struktury s podobným zakřiveném u všech slupek. Jsou trojrozměrné a skutečně slupkové povahy (nejsou to obyčejné prstence), i přesto nebyly nalezeny žádné příklady velmi lomených slupek. Objevují se ve velmi velkém rozsahu vzdáleností od hlavní galaxie a tvoří neúplné, téměř soustředné oblouky, které ovšem jen velmi vzácně obalují celou galaxii. V prostoru jsou obecně uspořádány „na střídačku“, tzn. že v pořadí další vzdálenější slupka se většinou nachází na opačné straně galaxie, než předchozí slupka bližší k jádru. V případech, kdy má centrální galaxie velkou výstřednost, slupky mají tendenci být zarovnány okolo hlavní optické osy galaxie. Slupkové galaxie se pak nejčastěji vyskytují v regionech nízké hustoty galaxií[10, s.597].

Na základě pozorování pak byly ustanoveny tři základní typy slupkových galaxií. Typ 1, neboli zarovnaný typ (aligned), má slupky prokládány „na střídačku“ na obou koncích galaxie a slupky jsou zarovnány podél hlavní osy. Hlavní galaxie je většinou zjevně elipticky protažená (typ E2,5 — E5). U typu 2, neboli azimutálního typu, jsou slupky rozloženy náhodně okolo celé galaxie. Ta je oproti předchozímu typu více „zakulacená“ (E0,5 — E3,7). Konečně typem 3 jsou označovány ty slupkové galaxie, které buď mají pouze velmi málo slupek (typicky jednu nebo dvě), nebo mají příliš komplexní strukturu na to, aby mohly být spolehlivě zařazeny mezi první dva typy. Z pozorování vyplývá, ve všechny tři typy slupkových galaxií jsou ve vesmíru zastoupeny přibližně rovnoměrně, a že tyto galaxie se ve vesmíru většinou nacházejí osamoceně, v místech, kde je menší hustota výskytu galaxií, případně se vyskytují v menších skupinkách nebo shlucích.

2.2 Jak slupkové galaxie vznikají?

Velkou záhadou, která dodnes není úplně stoprocentně vysvětlena, je mechanismus, jakým slupkové galaxie vznikají. První logickou teorií, která přijde

na mysl, a se kterou přišli v roce 1980 astronomové Fabian, Nulsen a Stewart, byla myšlenka, že slupky jsou vlastně oblasti nedávného formování nových hvězd[10]. Pozorováním však tato teorie byla odvržena, naopak z něj vyplynulo, že slupkové galaxie pravděpodobně vznikají nějakou interakcí mezi blízkými galaxiemi. Započalo tedy hledání matematického modelu, který by pomocí interakce mezi galaxiemi dokázal vysvětlit vznik a formování slupek, stejně tak jako jejich vzhled a vysvětlil by i existenci tří typů galaxií, diskutovaných v předchozím odstavci.

Každý navržený model pak musí objasnit následující problémy:
1. Odkud pocházejí hvězdy, které tvoří slupky? Klíčovými údaji k určení původu pak mohou být barvy slupek a radiální rychlosti hvězd, pokud jsou měřitelné.
2. Existenci typů 1 a 2 a to, zda jsou tyto zjevně odlišné typy produkovány stejným mechanismem, či je jejich rozdílnost dána čistě prostorovou projekcí.
3. Proč jsou u typu 1 slupky prokládány na protilehlých stranách podél hlavní osy. Jde případně nějak vysvětlit jakoukoli pozorovanou symetrii u ostatních typů(např. symetrie okolo jádra nebo podobnost s jedno- či dvouramennými spirálními galaxiemi)?
4. Počet slupek. Bylo pozorováno přes dvacet slupek, nicméně většina systémů má slupek jen několik.
5. Rozložení slupek v prostoru a vztah mezi jejich radiálními pozicemi, ve kterých jsou pozorovány.
6. Problém populace, neboli může model osázet slupky hvězdami současně ve velké i malé vzdálenosti od centra galaxie? Otázka vyvstává kvůli velkému rozsahu poloměrů od jádra, ve kterých jsou slupky pozorovány (u NGC 3923 je poměr $R_{max}/R_{min} > 60$, ale obvykle je tento poměr menší jak 10).
7. Profily slupek, proč jsou některé slupky velmi ostře ohraničené, zatímco jiné (a to i ve stejném systému) vypadají rozmazaně? Napovídá rozmazanost o existenci masivního sekundárního nebo „horkého“ tlustého disku, kde slupky jsou fragmenty spirálních ramen? Lze potom vůbec rozlišit mezi spirálním ramenem a slupkou?
8. Asociace s pozorovanými plynnými strukturami, která nám může napovědět, zda se při formování slupek utvářely i samotné hvězdy.
9. Přítomnost či nepřítomnost prachových a plynných struktur[11, s.978].

Ačkoli bylo prezentováno vícero teoretických modelů vzniku slupek, v současné době jsou favorizovány dva modely. Jsou to srážkový (merger model) a model slabé interakce (a weak-interaction model).

2.2.1 Srážkový model

Úvahu, že slupkové galaxie by mohly být výsledkem srážky nebo akrece[5] zahrnující diskové systémy, poprvé prezentoval v roce 1980 F. Schweizer[10]. O čtyři roky později předložil P. J. Quinn matematický model, kterým se pokusil dokázat Schweizerovu myšlenku a vysvětlit, jak slupky vznikají a jak se nadále vyvíjejí.

V něm předpokládá, že slupky vznikají při střetu masivní eliptické galaxie a menší, méně hmotné diskové galaxie. Z jasnosti slupek (která je nižší než jasnost centrální galaxie) vyvozuje, že jejich hmota je vůči hmotě centrální galaxie zanedbatelná a tudíž se vlastní gravitace disku nepodílí na jejich tvorbě. Za těchto předpokladů lze eliptickou galaxii úspěšně nahradit modelem statické potenciálové jámy, což velmi zjednodušuje simulaci pomocí problému N těles a umožňuje použití velkého množství testovacích částic.

Quinn dále předkládá několik idealizovaných modelů galaktických střetů a mechanismus vzniku slupek popisuje za pomoci dvou procesů, závislých na velikosti orbitálního momentu hybnosti kolize. Při nízkých hodnotách počátečního momentu hybnosti lze utváření slupek chápat jako proces fázového (postupného) nabalování částic disku do potenciálové jámy. Pro lepší pochopení můžeme uvažovat jednorozměrný systém testovacích částic padajících od ostatních do fixovaného potenciálu. Nejvíce vázané částice mají nejkratší oběžné doby kolem středu potenciálu. S posunem v čase začínají částice s nejkratší periodou „předbíhat“ ty s periodou delší a systém se začne zabalovat v rovině dané fáze. Prostorový vývoj systému lze nalézt promítnutím fázové křivky do prostorových souřadnic. Maximum dosahu každého fázového nabalení v prostoru odpovídá ostře definovanému hustotnímu maximu. Tato maxima se vyskytují v bodě obratu na orbitální dráze částic a pomalu se v prostoru posouvají do větších vzdáleností od středu potenciálu do nejvzdálenějších bodů obratu stanovených nejméně vázanými částicemi. Tato maxima hustoty jsou tedy extrémy hustotních vln, tedy místa, kde vznikají slupky.

Vznik slupek interpretovaný pomocí fázového nabalování vysvětluje jednak prokládané rozložení reálně pozorovaných slupek v prostoru, stejně tak i počet pozorovaných slupek. Počet slupek je totiž dán čistě časem uběhlým od kolize, tzn. čím více slupek v systému je, tím je střet staršího data[10].

Při vyšších počátečních hodnotách momentu hybnosti uvažujeme srážky, kde je pohyb těžiště dopadajícího disku převážně neradiální. Obecně je třeba

[5] akrecí se rozumí jev nabalování hmoty na objekt po malých kouscích

uvažovat, že je dopadající disk skloněný pod určitým úhlem. V takovém případě způsobí rozdíly v oběžných dobách jeho roztrhání. Tyto rozdíly pak rezultují v prostorové nabalování, v principu podobné nabalování fázovému. Výsledné struktury vyprodukované prostorovým nabalováním mají ovšem několik charakteristik, které nejsou v souladu s pozorovanými slupkami. Při pozorování z bodu v rovině disku struktury nejsou slupkovité, ale spíše lomené a nejasné. Navíc se často překrývají a mají znatelně rozdílné zakřivení, zatímco slupky jsou soustředné a nedotýkají se. Díky projekci navíc tyto struktury vypadají, jakoby obepínaly celou galaxii, což u slupek obecně neplatí. Z těchto důvodů proto Quinn vyvozuje, že převážná většina systémů vznikla díky radiálním střetům mezi masivními eliptickými galaxiemi a méně hmotnými diskovými galaxiemi[10].

Quinn uvažoval pouze několik idealizovaných střetů hmotnější centrální galaxie s méně hmotným průvodcem. Jak však ukázal další výzkum, slupkové struktury mohou být produkovány i při mnohých jiných kolizích. Lars Hernquist a J. Quinn předložili (1988) matematické modely, které simulují vznik slupek za následujících okolností:
1. kolize málo hmotné sférické galaxie s málo hmotnou diskovou galaxií (přirozeně vysvětluje i absenci prachu a plynu u některých slupkových galaxií)
2. kolize s průvodci na radiálních i neradiálních oběžných drahách
3. transfer hmoty během zhruba parabolických střetů[12].

O rok později Hernquist a Quinn prezentují modely, kdy ke tvorbě slupek dochází i při srážkách málo hmotných diskových galaxií s nesférickými galaxiemi. V principu je podle jejich modelů možné, aby slupky vznikaly i kolem spirálních galaxií. V porovnání s eliptickými galaxiemi však mají spirální galaxie větší vliv na oběžnou dráhu průvodce, a mohou tak ovlivnit jeho dráhu oběhu v mnohem větší vzdálenosti, než je poloměr slapového působení. V takovém případě má průvodce tendenci klesat k diskové rovině i před dosažením středu galaxie. Pozůstatky takové srážky by pak byly omezeny do blízkosti diskové roviny a bylo by těžké je rozeznat od spirálních ramen. Spirální galaxie jsou také křehčí, než eliptické galaxie, takže je možné, že v průběhu střetu může být centrální spirální galaxie natolik poškozena, že je klasifikována jako typ S0 nebo eliptická galaxie. Tím se vysvětluje, proč je pozorováno velké množství slupkových systémů okolo eliptických galaxií, ale téměř žádné okolo galaxií spirálních[13].

Konečně, v roce 1992 prezentují L. Hernquist a David N. Spergel způsob, jakým mohou vznikat slupkové galaxie při srážkách dvou galaxií o přibližně stejné hmotě a naznačují, že mnohé z pozorovaných systémů mohly vznik-

nout právě při srážce dvou podobně hmotných galaxií (dobrým příkladem může být galaxie NGC 3923)[14].

Podle R. C. Thomsona a A. E. Wrighta však „má srážkový model několik zásadních nedostatků. Předně, asymetrie u slupkových galaxií prvního typu vyžaduje, aby se střet se sekundární galaxií odehrával čelně, jakékoliv posunutí může vést ke vzniku velmi komplexních slupkových struktur. Slupky u typu 1 jsou k tomu zarovnány kolem hlavní osy, což vyžaduje, aby i střet byl v rovině hlavní osy. Zároveň musíme nahlížet výsledek střetu z roviny téměř kolmé k linii impaktu, jinak by asymetrická struktura byla jen stěží pozorovatelná. Navíc většina pozorovaných systémů má zjevně hvězdnou populaci velmi podobnou nebo lehce modřejší než primární galaxie. Ve výsledku by tak vznik galaxie typu 1 vyžadoval čelní střet dvou galaxií v rovině hlavní osy primární galaxie nahlížený z roviny kolmé k linii impaktu, kde sekundární galaxie bude mít podobnou hvězdnou populaci jako galaxie primární. Při úvaze, že mnohem častější střety jsou ty neradiální, pak musíme dojít k závěru, že frekvence výskytu typů 2 a 3 by měla být mnohem vyšší, než typu 1, což odporuje pozorováním“[15, s.123]. Kombinace těchto faktorů pak vede Thomsona a Wrighta k odmítnutí slučovacího modelu jako nepravděpodobného.

2.2.2 Model slabé interakce

Namísto slučovacího modelu pak tito dva astronomové prezentují svůj model slabé interakce (a weak-interaction model). Oproti předchozímu modelu předpokládá pouze blízké přiblížení, ne však sloučení dvou galaxií. Slupky pak proto nutně musí být tvořeny materiálem pocházejícím z primární galaxie. Vznik slupek je přičítán hustotním vlnám v (hypotetickém) tlustém disku s populací dynamicky chladných hvězd. Slupkové struktury v slupkových galaxiích typu 1 a 2 pak mají velmi podobnou prostorovou strukturu, která, když je projektována do plochy oblohy, vypadá jako typ 1, když je nahlížena z boku, a jako typ 2, když je nahlížena čelně[15]. Hlavním opěrným bodem celého modelu je předpoklad, že slupkové galaxie obsahují populaci dynamicky chladných hvězd na téměř kruhových (ale ne koplanárních) drahách. Tato populace je pak označována jako tlustý disk.

Numerické simulace ukazují, že slupky mohou vzniknout, pokud galaxie typu S0/E, obsahující malou, ale významnou populaci dynamicky chladných hvězd, projde blízkým setkáním s menší galaxií pohybující se po parabolické oběžné dráze. Hlavními parametry, které ovlivňují výsledný vzhled

slupek, jsou vzdálenost mezi přibližujícími se galaxiemi (má vliv na symetrii/asymetrii slupek) a hmota sekundární galaxie (ovlivňuje kontrast a ostrost slupek). Asymetrická struktura slupek je pak vidět při pohledu z boku, zatímco symetrická struktura je viditelná při čelním pohledu. Korelace mezi kulatostí primární galaxie a typem zarovnání je pak vysvětlována projekcí a naznačuje, že převážná většina primárních galaxií je tvořena sférickými zploštělými galaxiemi. Potvrdit nebo vyvrátit tento model může jednoznačně detekování tlustého disku u eliptických galaxií[15].

Právě nutnost přítomnosti speciálního tlustého disku (jehož existence dosud nebyla potvrzena pozorováním) a závěr, že převážná většina primárních galaxií je tvořena zploštělými sférickými galaxiemi odsunují tento model do pozadí zájmu. I když je zatím nemožné model slabé interakce úplně vyloučit, pozorování zatím favorizují ze dvou prezentovaných modelů právě srážkový model.

Kapitola 3

Fotometrie CCD snímků slupkových galaxií

Cílem práce je fotometrická studie CCD snímků několika slupkových galaxií. Základním úkolem je snaha o zviditelnění slupkových struktur, které jsou na fotografiích běžně hůře patrné. Prvořadým cílem je však určení charakteristik slupek, tzn. určení jejich počtu u každé ze zkoumaných galaxií, určení rozměrů, poloměrů vzdáleností a v neposlední řadě odhadnutí povrchové jasnosti každé slupky.

3.1 Zkoumané galaxie

Ke studiu byly vybrány tři různé slupkové galaxie, NGC 474, NGC 1210 a NGC 3923. Níže je uveden jejich stručný popis.

3.1.1 NGC 474

Galaxie NGC 474 se nachází v souhvězdí Ryb. Byla uvedena i v Arpově katalogu podivných galaxií pod číslem 227. Objevil ji (a klasifikoval jako mlhovinu) v roce 1784 William Herschell. Morfologický typ galaxie je S0. Je součástí systému interagujících galaxií. Rovníkové souřadnice objektu jsou $\alpha = 1^h\ 20^m\ 40.91^s$ $\delta = +3^\circ\ 28'\ 22.6''$.

3.1.2 NGC 1210

Tuto galaxii objevil roku 1888 americký astronom Ormond Stone. Nachází se na jižní obloze v souhvězdí Pec (lat. Fornax). Je klasifikována jako typ SOa, některé zdroje však uvádějí zařazení SB0. Rovníkové souřadnice této galaxie jsou $\alpha = 3^h\ 7^m\ 14.035^s$ $\delta = -25^\circ\ 40'\ 28.39''$.

3.1.3 NGC 3923

Slupková galaxie NGC 3923 se nachází v souhvězdí Hydry. Morfologický typ galaxie je E4. Objevil ji v roce 1791 William Herschel. Rovníkové souřadnice galaxie jsou $\alpha = 11^h\ 51^m\ 35.302^s$ $\delta = -28^\circ\ 52'\ 02.67''$.

3.2 Medián

Protože slupky jsou strukturou nevýraznou, je třeba originální fotografie upravit, aby bylo vůbec možné slupky pozorovat. K tomu nám dobře poslouží funkce mediánu. Medián je statistická míra centrální tendence. Je to taková hodnota, která rozděluje hodnoty v souboru tak, že výskyt hodnot větších či menších než medián je alespoň 50%. Matematicky zapsáno

$$\mathrm{P}(X \leq \tilde{x}) \geq \frac{1}{2}\ a\ \mathrm{P}(X \geq \tilde{x}) \geq \frac{1}{2}\ , \tag{3.1}$$

kde X je hodnota vybraná ze souboru a $\tilde{x}$ značí hodnotu mediánu[16]. V CCD snímku pak funkce *median* v programu IRAF nahradí hodnotu daného pixelu hodnotou mediánu se souboru hodnot ze zvoleného okolí vybraného pixelu. Takto získaný mediánový snímek pak odečteme od snímku původního. Výsledné snímky jsou vyobrazeny v obrazové příloze.

3.3 Poloměr vzdálenosti slupek

Určení poloměru vzdálenosti jest úlohou čistě geometrickou. Na CCD snímku určíme x-ovou a y-ovou souřadnici středu dané konkrétní galaxie (za střed galaxie postačí brát pixel s nejvyšší intenzitou). Poté zjistíme v každé slupce souřadnice několika vhodných bodů, spočteme jejich vzdálenost od středu galaxie a aritmetický průměr vzdáleností těchto bodů nám dá střední vzdálenost dané slupky. Ovšem pouze v pixelech. Pro zjištění úhlové vzdálenosti musíme tuto hodnotu vynásobit měřítkem snímku (v [″]/pix).

K určení měřítka je třeba nejprve snímek ztotožnit s hvězdným atlasem (např. Aladin). Pro několik vhodných referenčních objektů pak zjistíme jejich rovníkové souřadnice a souřadnice jejich středů na snímku (opět postačí pixel s nejvyšší intenzitou). Poté vypočteme jejich vzdálenosti na snímku a také jejich úhlové vzdálenosti. Pro výpočet úhlové vzdálenosti je třeba převést rektascenzi všech objektů na obloukovou míru podle vzorce

$$\alpha(^\circ) = H \times 15 + \frac{M \times 15}{60} + \frac{S \times 15}{3600}, \tag{3.2}$$

kde H, M a S značí hodiny, minuty a sekundy rektascenze. Když podělíme úhlovou vzdálenost vzdáleností na snímku, dostaneme hledané měřítko.

Pro přepočet úhlové vzdálenosti na vzdálenost v parsecích je nejprve nutné znát, jak daleko od nás se zkoumané galaxie nacházejí. To lze lehce odhadnout za pomoci rudého posuvu. Nejprve ze vzorce

$$v = c \times z, \tag{3.3}$$

kde v je rychlost galaxie, c rychlost světla a z rudý posuv, určíme právě rychlost galaxie. Následně potom můžeme odhadnout vzdálenost galaxie ze vztahu

$$v = H_0 \times D, \tag{3.4}$$

kde v je rychlost galaxie,H_0 je Hubbleova konstanta (73 ± 5 kms^{-1}Mpc^{-1}) a D vzdálenost galaxie. Pro přepočet úhlové vzdálenosti na vzdálenost v parsecích pak vyjdeme ze vzorce

$$\tan \alpha = \frac{x}{D}, \tag{3.5}$$

kde α je úhlová vzdálenost v radiánech, D vzdálenost galaxie a x hledaná vzdálenost (v Mpc).

3.4 Fotometrie slupek

Fotometrie slupek byla provedena ve vhodně zvolené clonce aperturní fotometrií. Clonky byly voleny tak, aby pokryly profil slupky. Fotometrie proběhla po celé ploše slupek tak, aby nebyly zahrnuty žádné hvězdy nebo podobné objekty z pozadí.

Z naměřených hodnot plošného toku uděláme průměrný tok na jeden plošný pixel. Poté převedeme tok na plošný pixel na jednu plošnou sekundu

$([''])^2$). Na snímku určíme instrumentální magnitudy několika hvězd podle vzorce

$$m_o = 25 - 2,5 \times \log F_O, \tag{3.6}$$

kde F_O je celkový tok z dané hvězdy aperturou. Poté ve vhodném hvězdném atlase (např. SIMBAD) nalezneme skutečné magnitudy pro daný filtr. Poté určíme rozdíl vypočítané hvězdné velikosti a standardní magnitudy

$$\Delta m = m_o - m_{standard}, \tag{3.7}$$

Výsledný rozdíl potom odečteme od plošné magnitudy. Tu získáme ze vztahu

$$\mu = m_o - 2,5 \times \log \frac{\sigma}{F_O}, \tag{3.8}$$

kde μ je plošná magnituda, F_O tok od hvězdy a σ je plošný tok ze slupky vztažený na jednu čtvereční sekundu.

Kapitola 4

Výsledky fotometrie

Všechny snímky použité při zpracování a fotometrii byly získány z archivů ESO/ST-ECF (European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere (ESO) and the Space Telescope - European Coordinating Facility (ST-ECF)). Ke zpracování snímků byly použity programy IRAF a ds9.

Hlavním úskalím studia slupek je jejich zviditelnění. Na originálních snímcích jsou slupkové struktury jen stěží pozorovatelné a tak by bez kalibrace fotografií nebylo možné určit jakékoliv charakteristiky slupek. I přes veškerou snahu mohou některé slupkové struktury zůstat skryty, ať už díky velkému šumu pozadí na snímku, nebo kvůli přehlušení mnohem jasnějším jádrem galaxie.

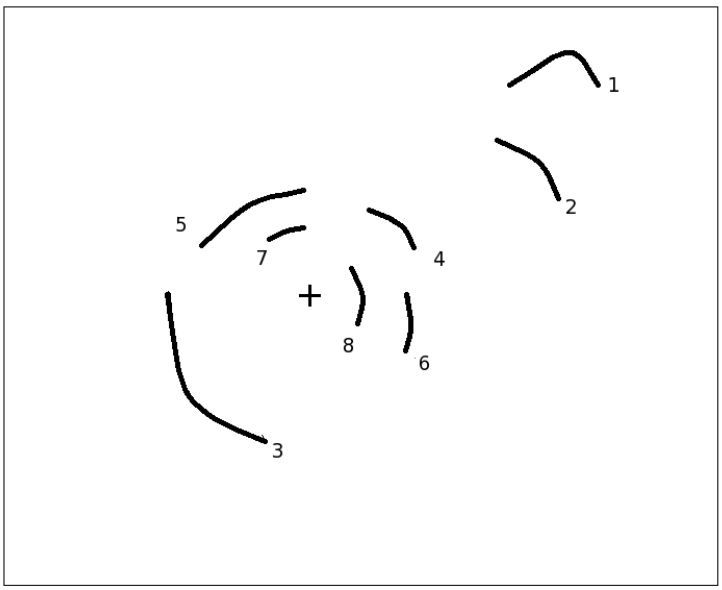
Většina pozorovaných slupek je jasně ohraničena, některé však jsou spíše rozmazanější. U těchto pak určení jejich vzdálenosti může být zatíženo větší chybou díky ne úplně přesnému odečtu polohy okrajových bodů slupky na snímku. Rozměr jednotlivých slupek byl určován ze vzdálenosti dvou nejvzdálenějších viditelných koncových bodů. Protože však nelze s dostatečnou přesností určit, kde daná slupka začíná a kde končí, má tato hodnota spíše informativní charakter.

Fotometrie slupek může být zatížena velkou nepřesností, je třeba dát pozor na to, aby se v apertuře neobjevily žádné nechtěné objekty z pozadí, které by mohly výrazně ovlivnit výslednou hodnotu měření. Přesto však nelze vliv těchto objektů úplně vyloučit. Některé slupky pak mohou být ovlivněny luminositním profilem jádra galaxie.

4.1 NGC 474

Tato galaxie je klasifikována jako slupková galaxie typu 2, což znamená, že slupky jsou rozprostřeny náhodně v azimutu okolo celé galaxie. Na snímcích lze dobře rozlišit 8 různých slupek. Kromě slupek je na fotografii vidět i část blízké menší spirální galaxie NGC 470. Tyto dvě galaxie jsou spolu ve vzájemné interakci, zdá se, že tato malá spirální galaxie obíhá okolo větší, eliptické.

Pro lepší představu rozložení slupek okolo galaxie poslouží následující schématický náčrt (Obrázek 4.1). Má pouze informativní charakter, vzdálenosti i rozměry slupek jsou pouze přibližné, nelze z něj usuzovat na přesné rozměry slupek ani na jejich přesné poměrné vzdálenosti od středu galaxie. Všechny slupky jsou podle konvence očíslovány od nejvzdálenější k nejbližší. Snímky galaxie jsou přiloženy v obrazové příloze na konci této práce.



Obrázek 4.1: Schématický náčrt rozložení slupek okolo galaxie NGC 474.

Nejvzdálenější slupka (vzdálená přibližně 203[″]) má oproti ostatním neobvyklý tvar, zdá se, jakoby se stáčela směrem do středu galaxie a jakoby ji nějaký „most“ spojoval se slupkou 2 a centrem galaxie. Slupka číslo 2 je na snímku přerušena zlomem a nelze proto přesně určit, kam až se rozpíná.

Ostatní slupky jsou na snímcích dobře pozorovatelné. Poměr poloměrů nejvzdálenější a nejbližší slupky $R_{max}/R_{min} = 5$. Přesné hodnoty poloměrů vzdáleností jednotlivých slupek pak shrnuje Tabulka 4.1. Výsledky fotometrie pak obsahuje Tabulka4.2. Vynechaná místa naznačují, že danou veličinu nebylo možné dostatečně přesně určit nebo by její určení bylo pouhým hádáním.

slupka	vzdálenost [″]	vzdálenost (kpc)	rozměr $[''])^{-2}$
1	203,4 ± 3,5	31,4	73
2	142,8 ± 1,8	22,0	
3	102,0 ± 1,6	15,7	132
4	76,8 ± 1,3	11,3	84
5	73,2 ± 0,9	11,8	40
6	60,6 ± 1,1	9,3	46
7	53,4 ± 0,8	8,2	
8	40,2 ± 0,7	6,2	37

Tabulka 4.1: Poloměry vzdáleností a rozměry slupek u NGC 474.

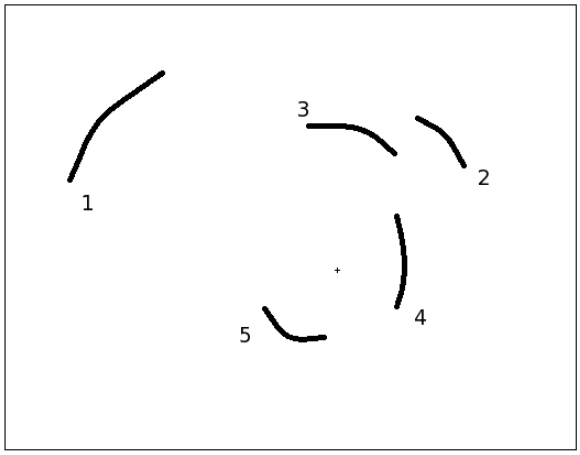
slupka	magnituda $([''])^{-2}$
1	24,02 ± 0,08
2	
3	25,34 ± 0,09
4	24,59 ± 0,07
5	24,63 ± 0,09
6	24,27 ± 0.06
7	23,82 ± 0,22
8	17,94 ± 1,20

Tabulka 4.2: Plošné magnitudy jednotlivých slupek u NGC 474.

4.2 NGC 1210

Tato galaxie je stejně jako předchozí klasifikována jako typ 2. Slupky jsou náhodně rozloženy okolo celé galaxie. Celkem lze na snímcích identifikovat

5 jasně rozlišitelných slupkových struktur, některé další mohou být skryty pod výrazným jádrem. Část slupky 1 může být na snímku zastíněna výraznou hvězdou. Schématické rozložení slupek okolo galaxie zobrazuje Obrázek 4.2.



Obrázek 4.2: Schématický náčrt rozložení slupek okolo galaxie NGC 1210.

Slupky okolo NGC 1210 jsou soustředné a mají typický obloukový tvar. Napříč slupkou číslo 4 se na snímku táhne zlom, a tak mohou být výsledky fotometrie této slupky mírně zkreslené. Poměr vzdáleností nejbližší a nejvzdálenější slupky $R_{max}/R_{min} = 2,5$. Hodnoty poloměrů jednotlivých slupek shrnuje Tabulka 4.3, fotometrii pak Tabulka 4.4.

slupka	vzdálenost [″]	vzdálenost (kpc)	rozměr [″]
1	68,4 ± 2,4	17,6	37,8
2	53,4 ± 2,1	13,8	31,8
3	42,0 ± 1,7	10,8	44,4
4	27,1 ± 1,0	7,0	28,2
5	27,1 ± 1,0	7,0	30

Tabulka 4.3: Poloměry vzdáleností a rozměry slupek u NGC 1210.

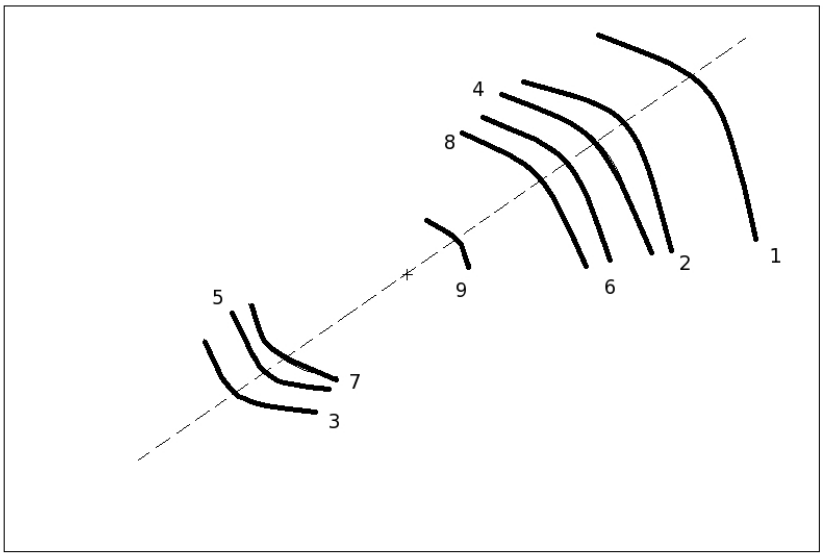
slupka	magnituda ($[''']^{-2}$)
1	24,43 ± 0,12
2	25,55 ± 0,15
3	23,37 ± 0,35
4	22,48 ± 0,82
5	24,21 ± 0,21

Tabulka 4.4: Plošné magnitudy jednotlivých slupkových struktur u NGC 1210.

4.3 NGC3923

Kolem galaxie NGC 3923 se rozprostírá nejzajímavější ze všech tří studovaných systémů. Tato galaxie má slupky typicky zarovnány okolo hlavní osy, což je typicky charakteristické pro slupkové galaxie typu 2. Na snímku je jednoznačně identifikovatelných 9 slupek. V systému se ovšem s velkou pravděpodobností nachází větší množství slupek, na snímku jsou však přehlušeny šumem z pozadí, nebo, jak lze částečně pozorovat u slupky číslo 9, jsou překryty jasným jádrem galaxie. Vznik tohoto slupkového systému je přisuzován střetu dvou podobně hmotných galaxií[14] Schéma rozložení slupek okolo této galaxie je na obrázku 4.3.

Slupky u této galaxie jsou pravidelné, charakteristicky zarovnané podél hlavní osy galaxie a lze na nich pozorovat pro typ 2 typické prokládání slupek na opačných stranách osy. Poměr poloměrů vzdáleností $R_{max}/R_{min} = 7,2$. Zpracovávaný snímek má špatný poměr signálu k šumu, proto bylo téměř nemožné určit přesné rozměry slupek a u některých provést jejich fotometrii. Výsledky provedených měření shrnují Tabulka 4.5 a Tabulka 4.6.



Obrázek 4.3: Schématický náčrt rozložení slupek okolo galaxie NGC 3923.

slupka	vzdálenost [″]	vzdálenost (kpc)
1	112,5 ± 3,5	13,0
2	84.0 ± 2,1	9,7
3	79,5 ± 1,9	9,2
4	72,7 ± 2,6	8,4
5	64,7 ± 0,6	7,5
6	57,4 ± 1,2	6,6
7	54,7 ± 1,9	6,3
8	46,0 ± 1,6	5,3
9	15,6 ± 0,4	1,8

Tabulka 4.5: Poloměry vzdáleností slupek u NGC 3923

slupka	magnituda ($[''']^{-2}$)
1	
2	
3	
4	
5	23,67 ± 0,15
6	23,23 ± 0,13
7	23,42 ± 0,12
8	22,98 ± 0,17
9	

Tabulka 4.6: Plošné magnitudy jednotlivých slupek u NGC 3923

Kapitola 5

Závěr

Cílem této práce byla studie slupkových galaxií. Hlavním úkolem bylo zidentifikovat na snímcích slupkové útvary, určit jejich charakteristiky (vzdálenost od středu konkrétní galaxie) a provést fotometrii a určit tak plošnou jasnost těchto objektů.

Provedením mediánů snímků a jejich následného odečtení od původních snímků byly zviditelněny slupky tak, aby je bylo možné identifikovat. Takto bylo jednoznačně určeno 5, 8 a 9 slupkových struktur postupně u galaxií NGC 1210, NGC 474 a NGC 3923.

Následně byly určeny rozměry a poloměry vzdáleností slupek. Poměry poloměrů nejvzdálenější a nejbližší slupky byly určeny pro galaxii NGC 474 $R_{max1}/R_{min1} = 5$, $R_{max2}/R_{min2} = 2,5$ pro galaxii NGC 1210 a $R_{max}/R_{min} = 7,2$ pro galaxii NGC 3923. U prvních dvou jde o očekávatelné výsledky, u galaxie NGC 3923 je však v literatuře uváděn poměr neporovnatelně vyšší ($R_{max}/R_{min} > 60$). Rozpor je způsoben tím, že u galaxie NGC 3923 její jádro na snímcích zastiňuje slupkové struktury, které jsou mnohem blíže středu galaxie než touto prací identifikované slupky, nízké rozlišení snímku také znemožnilo jednoznačně identifikovat slupky ve vzdálenějších oblastech od středu galaxie.

Fotometrií byly určeny plošné magnitudy některých slupek. U galaxie NGC 3923 byla přesná fotometrie určitých slupek znemožněna malým poměrem signálu k šumu pozadí.

Celkově byla úspěšně provedena fotometrická studie galaxií NGC 474, NGC 1210 a NGC 3923.

Literatura

[1] Peters Ch. F. Miles, M. A. *Along the milky way.* http://starryskies.com/Artshtml/dln/10-02/along-the-milky-way.html, 2002. Citováno 10. 5. 2011

[2] Josep Puig Montada. *Ibn Bajja.* http://plato.stanford.edu/entries/ibn-bajja/, 2007. Citováno 10. 5. 2011

[3] J. Binney and M. Merrifield. *Galactic astronomy.* Princeton series in astrophysics. Princeton University Press, 1998.

[4] E. P. Hubble. *The realm of the nebulae.* Mrs. Hepsa Ely Silliman memorial lectures. Yale University Press, 1936.

[5] E. P. Hubble. *Extragalactic nebulae.* Astrophysical Journal, 64:321–369, 12 1926.

[6] Galaxy classification. http://www.jrank.org/space/pages/2353/galaxy-classification.html. Citováno 10. 5. 2011

[7] H. Arp. *Atlas of peculiar galaxies.* Astrophysical Journal Supplement, 14:1–+, 11 1966.

[8] D. F. Malin and D. Carter. *Giant shells around normal elliptical galaxies.* Nature, 285:643–645, 6 1980.

[9] D. F. Malin and D. Carter. *A catalog of elliptical galaxies with shells.* Astrophysical Journal, 274:534–540, 11 1983.

[10] P. J. Quinn. *On the formation and dynamics of shells around elliptical galaxies.* Astrophysical Journal, 279:596–609, 4 1984.

[11] A. Wilkinson, J.-L. Prieur, R. Lemoine, D. Carter, D. Malin, and W. B. Sparks. *0422-476: a shell galaxy with azimuthally distributed shells.* Monthly Notices of the Royal Astronomy Society, 319:977–990, 12 2000.

[12] L. Hernquist and P. J. Quinn. *Formation of shell galaxies. I - spherical potentials.* Astrophysical Journal, 331:682–698, 8 1988.

[13] L. Hernquist and P. J. Quinn. *Formation of shell galaxies. II - non-spherical potentials.* Astrophysical Journal, 342:1–16, 7 1989.

[14] L. Hernquist and D. N. Spergel. *Formation of shells in major mergers.* Astrophysical Journal Letters, 399:L117–L120, 11 1992.

[15] R. C. Thomson and A. E. Wright. *A weak interaction model for shell galaxies.* Monthly Notices of the Royal Astronomy Society, 247:122–+, 11 1990.

[16] Medián. http://cs.wikipedia.org/wiki/Medián.
Citováno 17. 5. 2011

[17] Intaractive NGC Catalog online.
http://spider.seds.org/ngc/ngc.html.

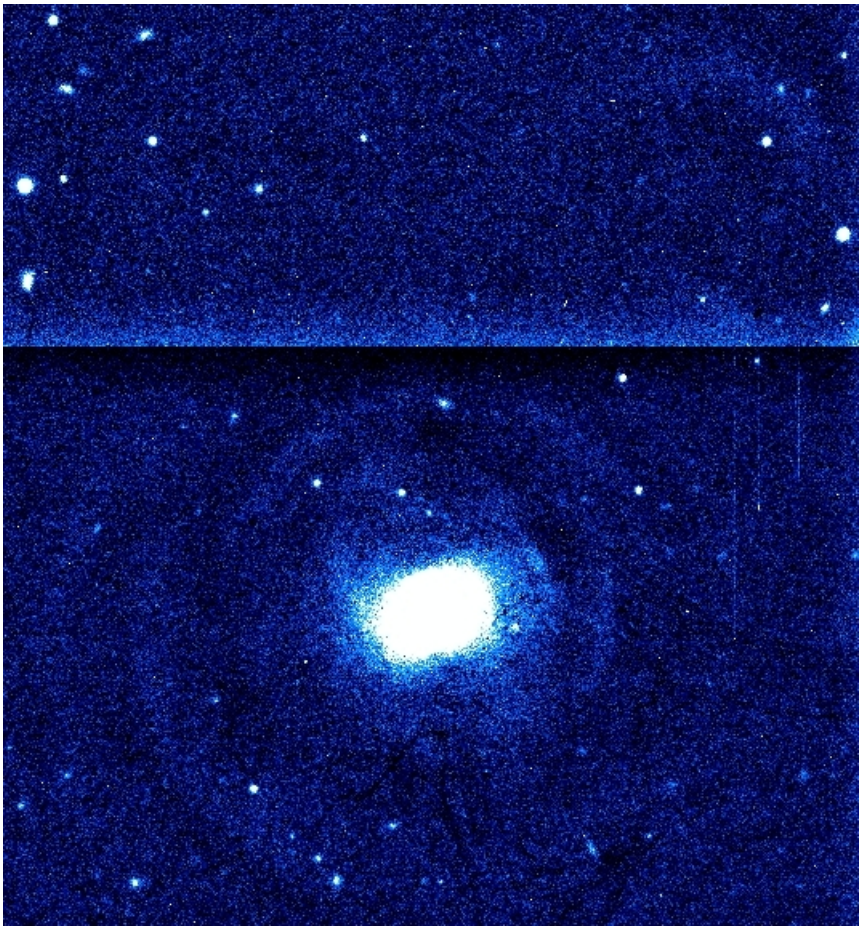
[18] F. Hroch. *Astronomické praktikum.* 2006

[19] European organisation for astronomical research in the southern hemisphere and the space telescope - european coordinating facility science archive. http://archive.eso.org/cms/.

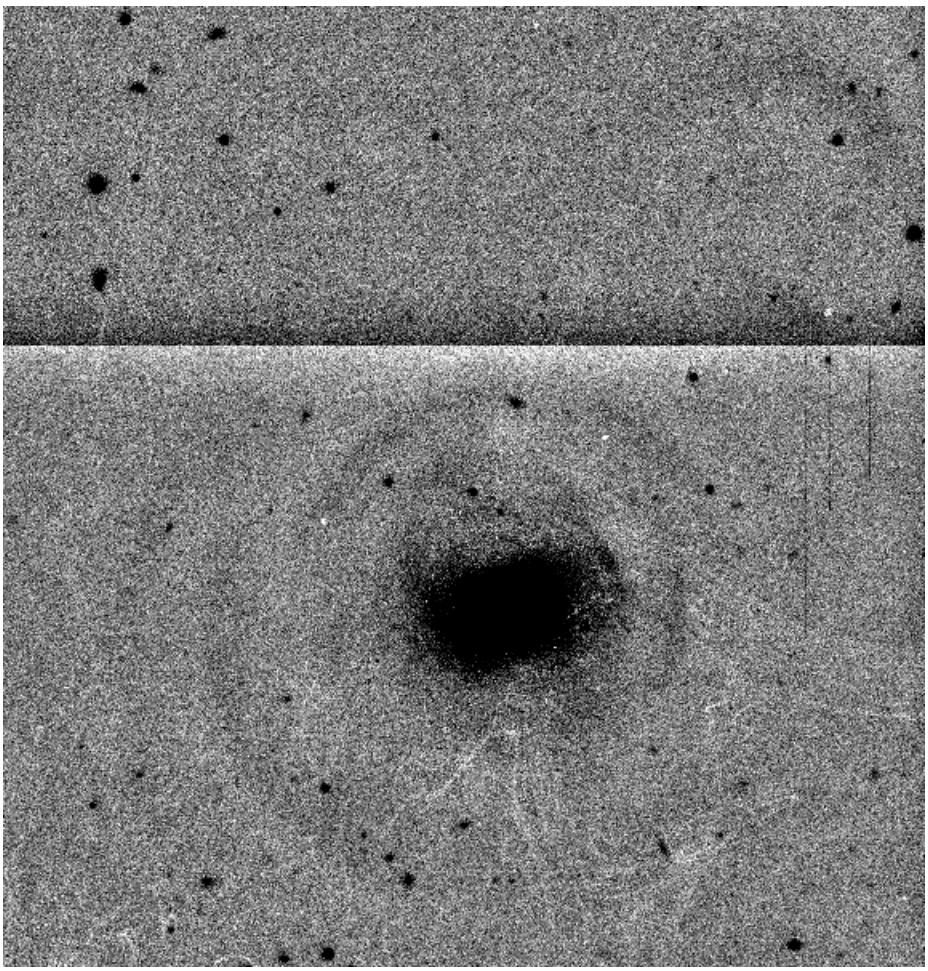
[20] SIMBAD Astronomical Database. http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/

[21] Aladin SkyAtlas. http://aladin.u-strasbg.fr/aladin.gml.

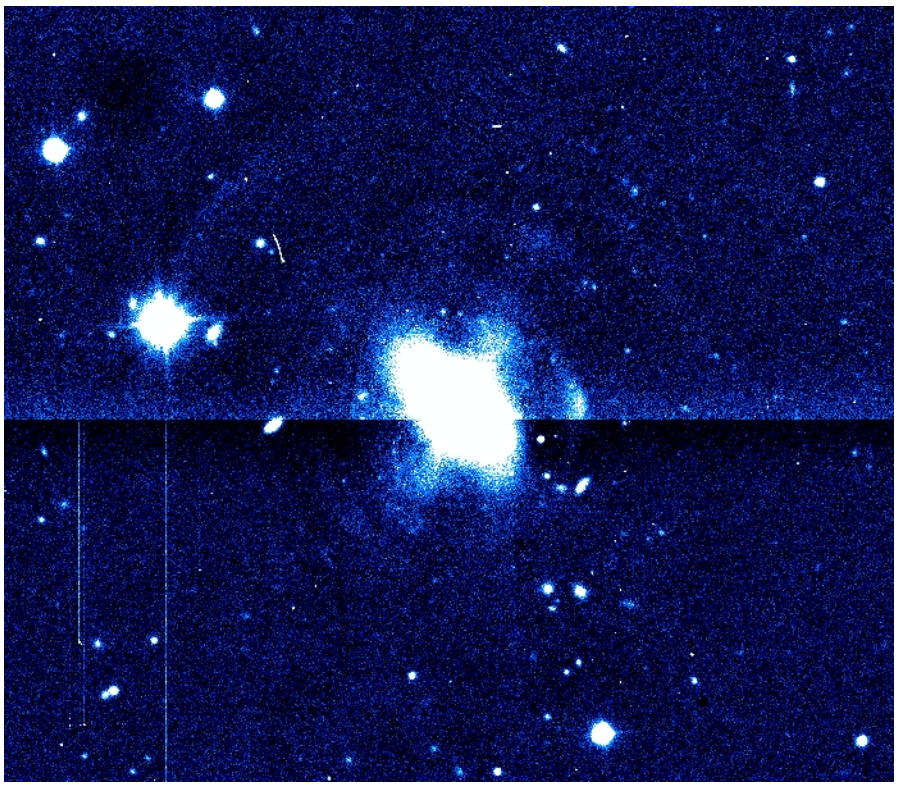
Obrazové přílohy



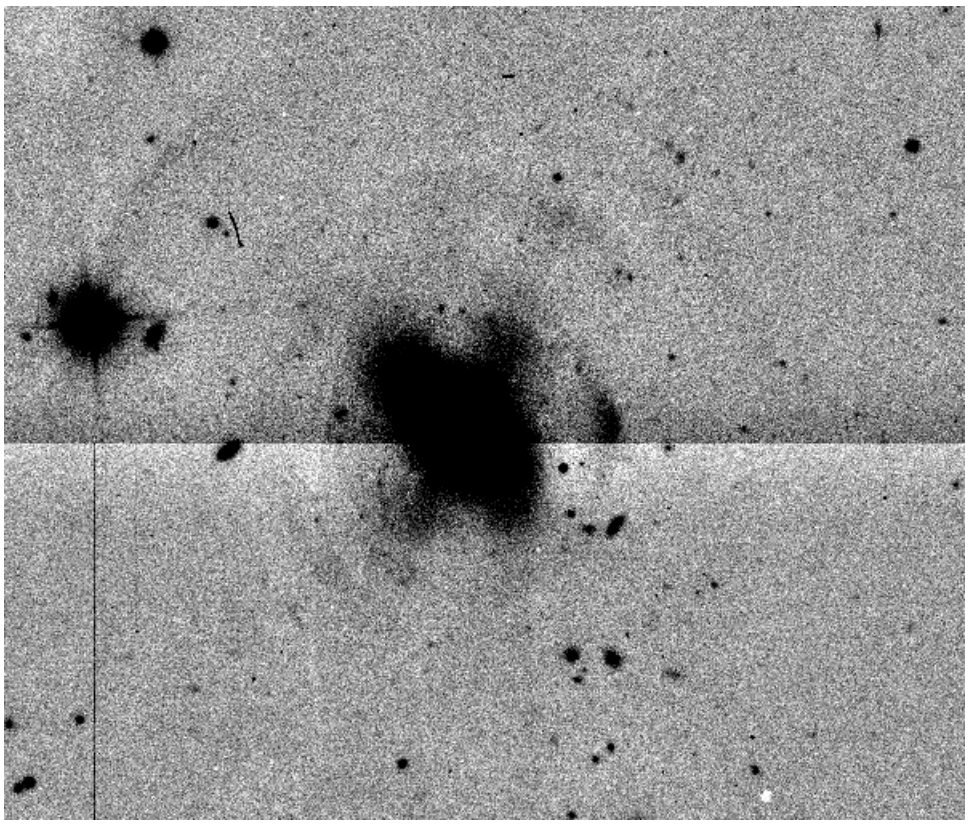
Obrázek 5.1: Galaxie NGC 474 a její slupková struktura



Obrázek 5.2: Galaxie NGC 474 a její slupková struktura v negativu

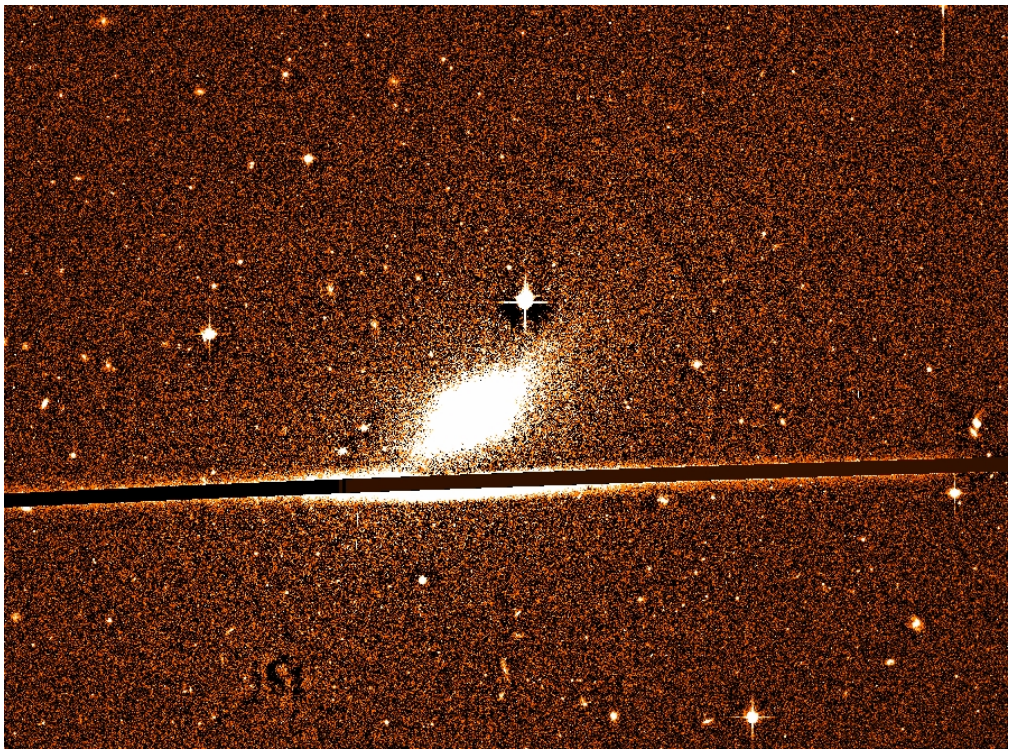


Obrázek 5.3: Galaxie NGC 1210 a slupkové struktury okolo ní



Obrázek 5.4: Galaxie NGC 1210, slupky jsou uspořádány azimutálně okolo jádra galaxie

Obrázek 5.5: Galaxie NGC 3923 a její slupkovité struktury



Obrázek 5.6: Galaxie NGC 3923, slupky jsou prokládány na opačných stranách galaxie a zarovnány okolo hlavní osy