

**MASARYKOVA UNIVERZITA**  
**Přírodovědecká fakulta**  
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

## **Bakalářská práce**

**Brno 2013**

**Jakub Vulgan**



**MASARYKOVA  
UNIVERZITA**  
**Přírodovědecká fakulta**  
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

---



# Fotometrická analýza galaxií

Bakalářská práce

**Jakub Vulgan**

Vedoucí práce: Mgr. Filip Hroch, Ph.D.    Brno 2013

# Bibliografický záznam

**Autor:** Jakub Vulgan  
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita  
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

**Název práce:** Fotometrická analýza galaxií

**Studijní program:** Fyzika

**Studijní obor:** Astrofyzika

**Vedoucí práce:** Mgr. Filip Hroch, Ph.D.

**Akademický rok:** 2012/13

**Počet stran:** viii + 28

**Klíčová slova:** slupkové galaxie; slupky; fotometrie; medián; Kingovi modely

# Bibliographic Entry

**Author:** Jakub Vulgan  
Faculty of Science, Masaryk University  
Department of theoretical physics and astrophysics

**Title of Thesis:** On photometric analysis of galaxies

**Degree Programme:** Physics

**Field of Study:** Astrophysics

**Supervisor:** Mgr. Filip Hroch, Ph.D.

**Academic Year:** 2012/13

**Number of Pages:** viii + 28

**Keywords:** shell galaxies; shells; photometry; median; King's models

# Abstrakt

V této bakalářské práci se zabýváme fotometrií slupkových galaxií. V první části popisujeme historický úvod do skoumání galaxií jako takových, dále objev samotných slupek, jejich vzhled, výskyt a modely vysvětlující jejich vznik. V další části popisujeme matematické metody na odhalení těchto struktur, konkrétně použití mediánového filtru a odečtení galaktického profilu, získaného pomocí Kingových modelů. V poslední části předkládáme samotné zpracování a výsledky.

# Abstract

In this thesis, we study photometry of shell galaxies. In the first part, we describe the historic background to studying galaxies, furthermore the discovery of shells, their appearance, occurrence and models explaining their origin and formation. In next part, we describe mathematical methods of revealing these structures, specifically the use of median filter and subtraction of galactic profile acquired from King's models. In the last part, we present the processing itself and the obtained results.



Masarykova univerzita  
Přírodovědecká fakulta



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student : Jakub Vulgan  
Studijní program : Fyzika  
Studijní obor : Astrofyzika

Ředitel Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky PŘF MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje bakalářskou práci s tématem:

### Fotometrická analýza galaxií


#### On Photometric Analysis Of Galaxies

#### *Zásady pro vypracování:*

Pokrok ve vývoji metod plošné fotometrie nám dává do rukou silné nástroje pro analýzu obrazů galaxií s vysokým prostorovým rozlišením, jež jsou nám umožněny moderní experimentální technikou v různých oborech spektra. Detailní studium obrazu je jedna z mála cest k poznání galaktické dynamiky nebo studiu rozložení svítivé i temné hmoty v galaxiích. Fotometrická analýza tak ve spojení s ostatními metodami galaktické astronomie poskytuje silný nástroj studia galaxií. Cílem této práce je fotometrické studium galaxií. Ke úspěšnému zvládnutí práce je tak třeba běžná rutina v použití základních metod zpracování obrazů, matematické statistiky a příslušných fyzikálních oblastí. Práce bude vypracována ve slovenštině.

*Vedoucí bakalářské práce* : Mgr. Filip Hroch, Ph.D.  
*Datum zadání bakalářské práce* : září 2012  
*Datum odevzdání bakalářské práce* : dle harmonogramu ak. roku 2012/2013

V Brně dne 23. 11. 2012

  
Prof. Rikard von Unge, Ph.D.  
ředitel Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky  
PŘF MU

Zadání bakalářské práce převzal dne:

6. 11. 2012

Podpis studenta



# Poděkování

Najväčšia vd'aka patrí vedúcemu mojej práce, Filipovi Hrochovi, za jeho neoceniteľnú pomoc a rady vždy, keď bolo treba a najmä za to, že veril v úspešné dokončenie tejto práce, aj keď som už ja sám strácal nádej. Obrovské poďakovanie patrí aj mojej rodine a priateľom za ich podporu.

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně s využitím informačních zdrojů, které jsou v práci citovány.

Brno 23. května 2013

.....  
Jakub Vulgan

# Obsah

<b>Kapitola 1. Galaxie</b> .....	<b>1</b>
1.1 História výskumu .....	1
1.1.1 Začiatky skúmania .....	1
1.1.2 Pokrok a katalógy .....	1
1.2 Klasifikácia galaxií .....	2
1.2.1 Eliptické galaxie .....	2
1.2.2 Špirálne galaxie .....	2
1.2.3 Nepravidelné galaxie .....	3
1.3 Hubblova sekvencia .....	3
<b>Kapitola 2. Slupkové galaxie</b> .....	<b>4</b>
2.1 „Podivné“ galaxie a ich vlastnosti .....	4
2.2 Vznik slupkových galaxií .....	6
2.2.1 Zrážkový model .....	6
2.2.2 Model slabej interakcie .....	8
<b>Kapitola 3. Fotometrická analýza</b> .....	<b>10</b>
3.1 Astronomická fotometria .....	10
3.2 Matematická analýza obrazu .....	11
3.2.1 Mediánový filter .....	11
3.2.2 Kingove modely .....	11
3.3 Vlastná fotometria slupiek .....	14
3.4 NGC 3923 .....	16
<b>Kapitola 4. Výsledky fotometrie</b> .....	<b>17</b>
<b>Záver</b> .....	<b>21</b>
<b>Prílohy</b> .....	<b>22</b>



# Úvod

Galaxie sú považované za základné stavebné kamene vesmíru ako takého. Povaha týchto ohromných útvarov tvorených hviezdami, planétami, prachom, plynom, ale aj exotickou temnou hmotou bola pre ľudí dlho záhadou. Od začiatku minulého storočia je tomu však inak. Postupne boli za pomoci čím ďalej, tým väčších ďalekohľadov odhalené galaxie rôznych tvarov a rozmerov. V druhej polovici 20. storočia boli medzi nimi objavené aj také, ktoré obkolesujú nie príliš jasné kruhové štruktúry podobné slupkám alebo vlnkám. Časom sa od termínu vlnky upustilo a tento typ galaxií bol teda nazvaný *Slupkovými galaxiami*. Tieto kruhové štruktúry sú zaujímavé najmä tým, že vznikli pravdepodobne pri masívnych stretoch galaxií a ich študovaním sa teda môžeme dozvedieť mnoho informácií o týchto procesoch. A keďže ide o relatívne mladú tému, otáznikov a nezodpovedaných otázok je v tomto prípade ešte dosť.

V mojej práci sa zameriavam na odhalenie čo najväčšieho počtu týchto nejasných štruktúr okolo galaxie NGC 3923, určenie ich vzdialeností a ich plošných hviezdnych veľkostí.

# Kapitola 1

## Galaxie

### 1.1 História výskumu

#### 1.1.1 Začiatky skúmania

Keď človek vyjde z mesta niekam, kde svetelné znečistenie nie je až tak výrazné, môže si všimnúť, že hviezdy nie sú na oblohe rozložené rovnomerne, ale koncentrujú sa v istom mlhavom svetelnom pás. To isté si uvedomili už staroveké národy.

Podľa starej Gréckej báje chcel Zeus priložiť k prsníku svojej spiacej ženy Héry ne-manželského syna Hérakla. Ak by sa napil jej mlieka, stal by sa bohom, no malý Héraklés sal tak silno, že sa Héra zobudila, odtrhla ho od seba a z mlieka, ktoré jej vystreklo z prsníka vznikol onen svetelný pás, ktorému sa začalo hovoriť Mliečna dráha<sup>1</sup>.

Posun v skúmaní skutočného charakteru Mliečnej dráhy nastal až začiatkom sedemnásteho storočia, keď Galileo Galilei namieril na oblohu svoj ďalekohľad. Uvedomil si, že pás svetla tvorí množstvo hviezd samostatne nerozlíšiteľných ľudským okom.

Jeden z prvých názorov na povahu Mliečnej dráhy vypracoval Immanuel Kant v *General Natural History and Theory of the Heavens*. Tvrdí, že tak, ako rovinná štruktúra našej Slnčnej sústavy vznikla pôsobením gravitácie je tomu aj u Galaxie, ale gravitačná sila tu pôsobí v omnoho väčšom meradle. Hviezdy potom podobne ako planéty zaujímajú rovinnú štruktúru v priestore a rotujú okolo gravitačného centra, aby sa zabránilo kolapsu. Z nášho postavenia Zeme vnútri tohto systému by sa potom Galaktický disk premietal na oblohu ako pás hviezd rozprestierajúcich sa po oblohe, čo odpovedá Mliečnej dráhe. Kant celú myšlienku potiahol ešte ďalej, keď tvrdí, že naša Galaxia nemusí byť jediným takýmto gravitačne viazaným systémom, a že niektoré hmloviny na oblohe sú tiež takými vesmírnymi ostrovmi videnými z veľkej vzdialenosti a pod rôznymi uhlami.

#### 1.1.2 Pokrok a katalógy

Koncom osemnásteho storočia viedol rozvoj technológie ďalekohľadov k systematickejšiemu prieskumu oblohy. Charles Messier sa zameral na hmloviny severnej hemisféry a skatalogizoval 109 najjasnejších z nich.

Omnoho ďalej sa dostal William Herschel, ktorý spolu so sestrou a synom študoval oblohu oboch hemisfér. Podarilo sa im zaznamenať skoro 5000 hmlovín. Ich ďalekohľady boli dokonca schopné rozlíšiť jednotlivé hviezdy v hmlovinách a tak dokázal, že sú to Kantove vesmírne ostrovy. Taktiež však zaznamenali svietiace prstence okolo toho, čo sa zdalo

---

<sup>1</sup>preklad rímskeho *Via lactea* pochádzajúceho z gréckeho *Galaxias Kyklos* — *Mliečny kruh*

ako jediná hviezda — planetárne hmloviny. Herschel si uvedomil, že tieto plynné systémy sú diametrálne odlišné od gravitačne viazaných hviezdnych systémov, ale až do vynálezu spektroskopie to bola len nepotvrdená domnienka.

Počas nasledujúceho storočia bol Herschelov zoznam hmlovín postupne dopĺňaný, až roku 1888 vydal Dreyer svoj *New General Catalogue* obsahujúci 7840 objektov a neskôr pridal ďalších 5086 v *Index Catalogue*.

V roku 1845 dokončil William Parsons svoj, na tú dobu, obrovský ďalekohľad (priemer zrkadla činil 1,8 m), ktorý namieril na hmloviny a bol ním schopný rozlíšiť štruktúru v nich. Zistil, že ich môže rozdeliť do dvoch skupín:

1. pravidelného eliptického tvaru bez nejakej výraznej vnútornej štruktúry
2. s výraznou špirálnou štruktúrou

Stavba víru naznačovala rotovanie podľa Kantovej predstavy a podporovala predstavu vesmírnych ostrovov.

Definitívne potvrdenie existencie iných galaxií prišlo až v roku 1923. Edwin Hubble s pomocou teleskopu na Mt. Wilson v USA pozoroval hmlovinu v Andromede M31, konkrétnejšie cefeidy v nej. Pre tento typ premenných hviezd bola známa závislosť žiarivého výkonu na perióde a teda možnosť jednoducho určiť vzdialenosť z modulu vzdialenosti  $m - M$ . Výsledkom bola hodnota okolo 300 kpc, čo je podľa terajších dát viac ako dvojnásobne podcenené číslo, ale aj to stačilo ako dôkaz toho, že M31 nie je súčasťou našej Galaxie, ale samostatným hviezdным systémom.

Informácie použité v posledných dvoch podkapitolách sú z [2]

## 1.2 Klasifikácia galaxií

V čase Hubblovo objavu už bolo pozorovaných toľko galaxií, že ich bolo treba začať triediť podľa nejakých znakov. Prvé takéto triedenie vymyslel sám Hubble [12], ktorý rozdelil galaxie podľa vzhľadu na eliptické, špirálne a nepravidelné.

### 1.2.1 Eliptické galaxie

Eliptické galaxie sú typické svojim tvarom od kruhových po sploštélé elipsy a ich jasnosť rovnomerne klesá od jadra po okraje. Jedno z kritérií, podľa ktorých sa dajú deliť je ich excentricita, ktorá sa dá vyjadriť pomocou vzťahu

$$\epsilon = \frac{a - b}{a}, \quad (1.1)$$

kde  $a$  značí veľkú a  $b$  malú poloos elipsy. Takto sú potom eliptické galaxie rozdelené do ôsmich podskupín značených E0 (guľovitý tvar) až E7 (pretiahnutý tvar). Galaxia s excentricitou väčšou ako 0,7 nebola pozorovaná a pravdepodobne by sa jednalo o nerozlišenú špirálnu galaxiu.

### 1.2.2 Špirálne galaxie

U tohto typu galaxií sa nepoužíva na rozdelenie do skupín excentricita, ale vlastnosti typických štruktúr — špirálnych ramien — vystupujúcich z jadra galaxie. Bežne sa rozlišujú dva základné typy špirálnych galaxií. Tým, u ktorých ramená vystupujú priamo z dvoch

protiľahlých bodov na okraji jadra sa hovorí normálne špirálne galaxie (značia sa S alebo SA) a tie, u ktorých ramená vystupujú z tzv. priečky sa nazývajú špirálne galaxie s priečkou (značia sa SB).

K ďalšej klasifikácii sa používajú tri kritériá:

- relatívna veľkosť jadra k celkovej veľkosti disku
- miera rozvinutia ramien
- pozorovateľnosť detailov v ramenách.

Podľa tých kritérií sa dajú špirálne galaxie ďalej deliť na skorý (angl. *early*, majú veľké eliptické jadro, okolo ktorého sa tesne vinú špirálne ramená), stredný (angl. *intermediate*, špirálne ramená sa u nich rozvíjajú na úkor jadra a sú viac rozovreté, ako u predchodzieho typu) a neskorý (angl. *late*, špirálne ramená sú doširoka rozovreté a centrálna oblasť je skôr nevýrazná) typ. Tieto kategórie sa značia malými písmenami a, b, c.

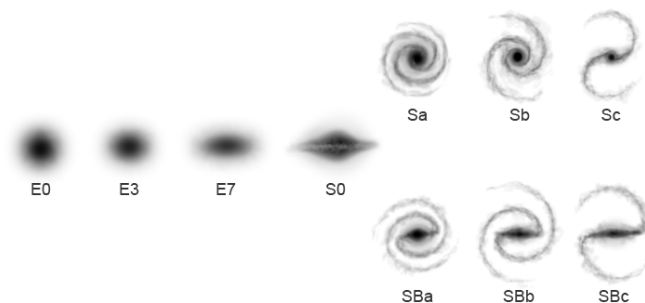
### 1.2.3 Nepravidelné galaxie

Mnoho galaxií sa nedá zaradiť ani do jednej z predošlých skupín, či už preto, že im chýba osovo súmerná štruktúra alebo nejaké výrazné jadro, prípadne postrádajú oboje. Tieto galaxie sa nazývajú nepravidelné a značia sa IR (angl. *irregular*). Typickým príkladom týchto galaxií je napríklad Veľké a Malé Magellanovo mračno.

## 1.3 Hubblova sekvencia

Spomínané typy galaxií zložil následne Hubble do morfológického diagramu, ktorému sa hovorí Hubblova sekvencia (alebo z angl. *Hubble tuning-fork style diagram* — *Hubblou ladičkový diagram* nazvaný podľa typického tvaru).

Pôvodne sa verilo, že Hubblova sekvencia je vývojová, teda, že každá špirálna galaxia bola pôvodne eliptickou a každá eliptická sa postupne vyvinie do špirálnej. Preto sa bežne eliptické galaxie označujú aj ako galaxie raného typu a špirálne s nepravidelnými ako galaxie neskorého typu. Táto domnienka však bola vyvrátená.



Obr. 1.1: Hubblova sekvencia [24]

## Kapitola 2

# Slupkové galaxie

### 2.1 „Podivné“ galaxie a ich vlastnosti

V čase Hubbľa a pár desaťročí po ňom sa verilo, že tvary galaxií sú definované ich typom bez akýchkoľvek výrazných porúch štruktúry. Až neskôr pokročila pozorovacia technika natoľko, že si astronómovia začali všímať rôzne „podivnosti“.

Prvý katalóg zaoberajúci sa takýmito podivnými galaxiami zostavil američan Halton Arp [1]. Obsahoval spolu 338 galaxií, ktoré sa všetky nejakým spôsobom vymykali z normálu. Bol výsledkom niekoľkoročnej práce autora a jeho spolupracovníkov, ktorí skúmali nočnú oblohu teleskopmi na Palomare a na Mt. Wilson. Slupkové galaxie majú označenie Arp 227 až Arp 231 a autor ich pomenoval spoločným názvom „sústredné kruhy“. V popise galaxie označenej Arp 230 sa vôbec prvý krát objavuje termín „slupky“.

Prvým katalógom zaoberajúcim sa výlučne slupkovými galaxiami zostavili Malin a Carter v roku 1983 [15]. Použili hviezdne polia nasnímané ďalekohľadmi ESO (European South Observatory — Európske južné observatórium) pokrývajúce oblohu v rozmedzí deklinácií od  $-90^\circ$  do  $-17^\circ$ . Na týchto snímkach rozpoznali 137 galaxií, ktoré vykazovali štruktúru podobnú slupkám alebo vlnkám. O týchto potom hovoria ako o novom type galaxií — slupkové galaxie.

Popisujú ich ako „galaxie, ktoré sa na prvý pohľad javia ako bežné eliptické, ale pri bližšom pohľade sa dá odhaliť jedna alebo viacero nie príliš jasných štruktúr buď v optickej obálke alebo (častejšie) za rozoznatelnými hranicami eliptickej galaxie. Tieto slupky môžu byť mierne rozmazané, všeobecne sú však ostro ohraničené a môžu byť spojené s inými narušeniami v obálke galaxie“ [15, s. 534].

Autori ďalej podávajú štatistické informácie o svojom katalógu. Zo všetkých galaxií raného typu (typ E a S0) objavených na snímkach ESO je približne 10% slupkových. Z týchto 137 identifikovaných galaxií je 47% izolovaných v priestore, 31% sa nachádza vo voľných skupinách, 4% sa nachádzajú v bohatých skupinách galaxií a zvyšných 18% je v skupinkách dvoch až piatich galaxií. Táto štatistika naznačuje, že slupkové galaxie sa nenachádzajú v oblastiach s vysokou galaktickou hustotou, čo môže byť spôsobené rušivými gravitačnými efektmi okolitých galaxií na tieto jemné štruktúry [15, s. 538].

P. J. Quinn [19] zosumarizoval vtedajšie znalosti o slupkových galaxiách vo svojom článku nasledovne:

1. Slupky sa vyskytujú ako u normálnych, tak aj u abnormálnych eliptických galaxií. Nie sú známe detekcie týchto štruktúr u špirálnych galaxií. Množstvo slupiek okolo galaxií môže byť od 1 až po približne 20.

2. Slupky sú ostro definované štruktúry podobné oblúkom s veľmi podobným tvarom u všetkých galaxií. Keďže neboli objavené žiadne špicaté slupky dá sa predpokladať, že ich štruktúra je 3-D.
3. Slupky sa objavujú v obrovskom rozmedzí vzdialeností od centier galaxií.
4. Slupky tvoria takmer koncentrické oblúky, ktoré len veľmi výnimočne obkolesujú celú galaxiu.
5. Slupky všeobecne vyzerajú byť rozmiestnené „na preskačku“ t.j. ďalšia slupka podľa vzdialenosti sa nachádza väčšinou na opačnej strane galaxie, ako predošlá.
6. V prípade eliptických galaxií s veľkou excentricitou bývajú slupky usporiadané s optickou hlavnou osou galaxie.
7. Slupkove galaxie sú pozorované častejšie v regiónoch s nízkou hustotou galaxií.

Na základe ďalších pozorovaní rozdelil Prieur [18] slupkove galaxie na tri typy:

- **Typ I:** zarovnaný (angl. *aligned*) typ, kde sú slupky usporiadané pozdĺž hlavnej osi väčšinou zjavne elipticky pretiahnutej galaxie (E2,5 – E5, napr. NGC 3923).
- **Typ II:** azimutálny typ, kde sú slupky rozložené náhodne okolo celej galaxie, ktorá má väčšinou menšiu excentricitu (E0,5 – E3,7, napr. NGC 474).
- **Typ III:** galaxie s veľmi malým počtom slupiek alebo také, ktoré sa nedajú zaradiť ani do jedného, z predošlých typov.

Pozorovania naznačujú, že všetky tri typy sú zastúpené približne rovnako.

U týchto galaxií sa veľmi často definuje tzv. radiálny rozsah slupkového systému, čo je pomer vzdialeností najvzdialenejšej a najbližšej slupky. Táto hodnota vychádza dosť veľká (rádovo desiatky) pre typ I, no typicky je to desať a menej. Pre galaxie s veľmi málo pozorovanými slupkami je tento pomer dokonca menej ako 5 [5].

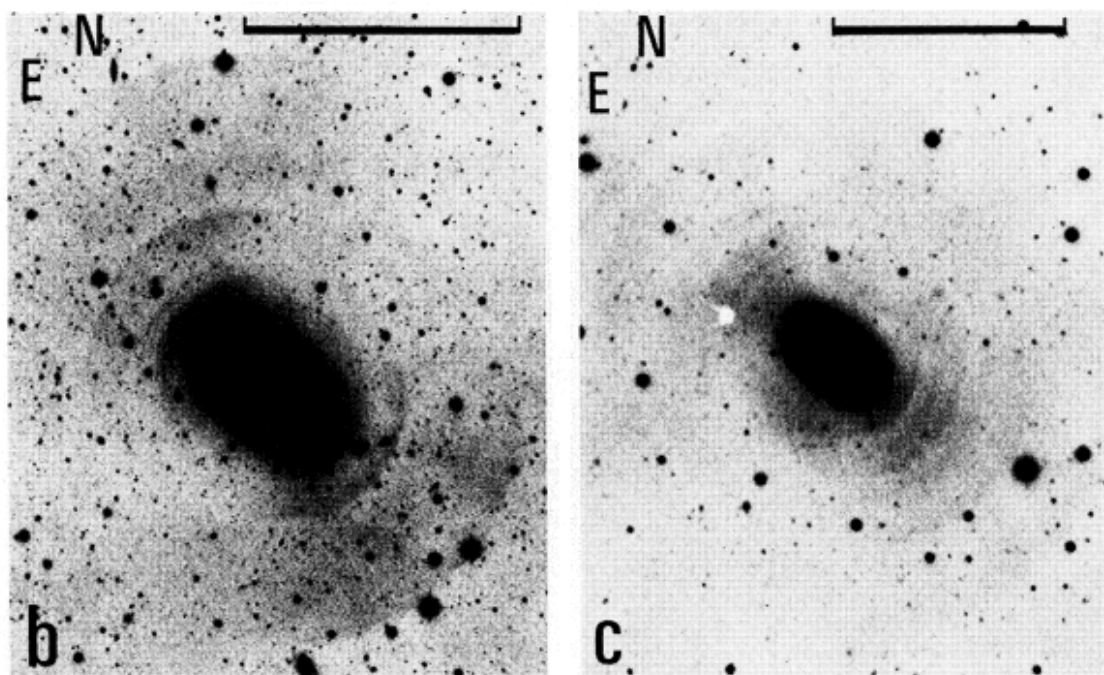
V osemdesiatych rokoch minulého storočia opadol záujem o slupkové galaxie, no v posledných pár rokoch sa opäť dostali do centra záujmu najmä vďaka objaveniu slupkovej štruktúry u galaxie obsahujúcej kvazar (Canalizo et al. 2007), u galaxie M31 (Fardal et al. 2007, 2008) a u trpasličej galaxie v súhvezdí Pec (Coleman et al. 2004). Taktiž existuje predpoklad, že prstencovité hviezdne štruktúry vrátane tých, pozorovaných v našej Galaxii by mohli byť analógiou k slupkám (Helmi et al. 2003) [7].

Po fotometrickej stránke sa okrem očividného faktu, že slupky sú často veľmi nevýrazné štruktúry ukázali aj mierne odlišnosti v ich farbách oproti ich centrálnym galaxiám. Všeobecne sa od začiatku súdilo, že slupky sú modrejšie, ako jadrá.

Za všetky výskumy spomeniem článok od Carter et al. [4], ktorí skúmali galaxiu NGC 1344 a zistili farebné indexy  $B - R = 1,2 \pm 0,3$  a  $B - H = 3,07 \pm 0,27$  pre slupky, zatiaľ čo pre jadro galaxie získali hodnoty  $B - R = 1,60 \pm 0,15$  a  $B - H = 3,84$ . Mnoho ďalších autorov zistilo rovnakú tendenciu vo farbe slupiek pre rôzne galaxie.

Pence et al. [16] sa zamerali na galaxie NGC 3051 a NGC 3923. U oboch zistili len veľmi nepatrný rozdiel farebných indexov slupiek a jadra galaxie, čo potvrdilo výsledky predošlej práce Forta et al. [9]. Dokázali však spozorovať červenanie slupiek s klesajúcou vzdialenosťou od jadra. Ako dôvod udávajú gradient metalicity.

Na rozdiel od toho zistili Sikkema et al. [21] trochu červensie sfarbenie slupiek u piatich zo šiestich galaxií, ktoré skúmali (červensie: NGC 474, NGC 1344, NGC 2865, NGC 5982 a NGC 7626, modrejšia NGC 3923). Tento výsledok zdôvodňujú autori väčším množstvom medzihviezdneho prachu, ako v centre galaxie.



Obr. 2.1: Galaxia NGC 3923 z *A catalog of elliptical galaxies with shells* [15]

## 2.2 Vznik slupkových galaxií

Už od objavenia týchto zvláštnych vesmírnych štruktúr trápila astronómov otázka, odkiaľ pochádzajú a ako vznikajú. Jeden z prvých pohľadov poskytli vo svojej práci Fabian, Nulsen a Stewart [8], ktorí boli toho názoru, že slupky sú tvorené hviezdami, ktoré sa v daných miestach utvorili za pomoci rázových vln od galaktického vetra.

Na túto teóriu nadviazali vo svojej práci Williams a Christiansen [23]. Podľa nich je pôvodná galaktická medzihviezdna hmota vytlačená vlnami z explózií hviezd v raných štádiách vývoja galaxie do expandujúcej obálky, ktorá postupne chladne hlavne vyžarovaním a tým sa aj stenčuje. Keď teplota tejto hmoty dosiahne rádovo stovky kelvinov, dochádza k jej fragmentácii a začína tvorba hviezd v týchto oblastiach. Po istom čase hviezdy s dostatočnou hmotnosťou vybuchujú ako supernovy a tým opäť zahrievajú okolitý materiál, ktorý znova začne expandovať a celý postup pokračuje odznova. Takto môže vzniknúť niekoľko slupiek.

Objavilo sa aj mnoho ďalších teórií, no žiadne z nich neprinášali túžené výsledky a nezodpovedali pozorovaniam. Ani dnes nie je možné s istotou povedať, aký je pôvod slupiek, no dve teórie ostali favorizované. Prvou z nich je zrážkový model (angl. *merger model*) a druhou je model slabej interakcie (angl. *weak-interaction model*).

### 2.2.1 Zrážkový model

Prvýkrát bola myšlienka, že slupky vznikajú zrážkou galaxií prezentovaná v práci Schweizera [20]. Matematický model pre túto teóriu navrhol o pár rokov neskôr Quinn [19], ktorý sa pokúsil popísať vznik a vývoj týchto štruktúr.

Autor predpokladá stret masívnej eliptickej galaxie a menej hmotnej diskovej galaxie. Z nízkeho relatívneho povrchového jasú slupiek v porovnaní s centrálnymi časťami galaxie

sa dá predpokladať ich nízka relatívna hmotnosť a teda ich vlastná gravitácia nie je pre ich tvorbu podstatná. V tom prípade sa dá použiť model statickej potenciálovej jamy a simulácia pomocou problému  $N$  telies, čo značne zjednodušuje prácu a umožňuje použitie veľkého množstva testovacích častíc. Autor ďalej uvádza, že mechanizmus vzniku je závislý na orbitálnom momente hybnosti zrážky.

Ako prvý testuje model zrážky s nízkym momentom hybnosti. Pri takomto procese dochádza k fázovému nabalovaniu častíc disku do potenciálovej jamy. Pre lepšie pochopenie autor uvažuje jednorozmerný systém testovacích častíc padajúcich do fixovaného potenciálu. Najviac viazané častice majú potom najkratšiu periódu obehu a ako čas postupuje, predbiehajú častice s dlhšou periódou a dochádza k nabalovaniu v rovine fáze. Rýchlosť nabalovania je určená rozsahom periód častíc. Priestorový vývoj sa dá nájsť projekciou fázovej krivky do priestorových súradníc. Potom maximá fázovej krivky korešpondujú s úzko definovanými hustotnými maximami, ktoré sa objavujú v bodoch obratu dráh častíc a pomaly sa šíria k najvzdialenejším bodom obratu patriacim najmenej viazaným časticiam. Hustotné maximá sú potom extrémami hustotnej vlny a miestami, kde vznikajú slupky [19].

Fázové nabalovanie vysvetľuje ako rozloženie slupiek „na preskačku“, tak aj ich počet, ktorý je jednoducho úmerný času uplynutému od zrážky.

Pri modeli s vysokým orbitálnym momentom hybnosti zrážky dochádza k neradiálnemu stretu galaxií. Pre všeobecný prípad inklinácie disku sa objavujú rozdiely v periódach skrz disk a dochádza k jeho roztrhaniu. Rozdiely periód spôsobujú priestorové nabalovanie podobné fázovému. Problémom je však, že takto vzniknuté štruktúry vykazujú vlastnosti, ktoré nezodpovedajú pozorovaniam: (1) Pri pohľade z bodu v rovine disku nie sú slupkovité, ale skôr lomené a nejasné. (2) Štruktúry sa často prekrývajú a majú rozdielne zakrivenie, no pozorovania ukazujú koncentrické slupky, ktoré sa nedotýkajú. (3) Modelované štruktúry obopínajú celú galaxiu, čo odporuje pozorovaniam. Pre tieto dôvody sa Quinn prikláňa k názoru, že slupkové galaxie vznikajú najmä radiálnymi stretmi masívnych eliptických a diskových galaxií [19, s. 603].

Ďalšiu prácu na tému zrážkového modelu vypracovali Dupraz a Combes [5]. Autori sa zamerali na rozdiely pri zrážkach sekundárnej galaxie s pretiahnutou a spolštenou eliptickou galaxiou. Ich simulácie ukázali, že 3-D tvar potenciálu eliptickej galaxie je nevyhnutný parameter pre vytvorenie slupkovej štruktúry. Ďalšou nevyhnutnou podmienkou je prítomnosť hala z temnej hmoty okolo viditeľnej časti galaxie, inak sa radiálna distribúcia slupiek nezhoduje s pozorovaniami. Toto halo musí byť navyše niekoľkonásobne hmotnejšie ako viditeľná časť (pre NGC 3923 vychádza hodnota 20). Model ukázal, že v prípade pretiahnutej eliptickej galaxie sa slupky sústreďujú okolo hlavnej osi a pre sploštené galaxie okolo vedľajšej osi. Pre slupkové galaxie typu II sa ukázalo, že primárna galaxia bola najpravdepodobnejšie sploštená, no v prípade, že sekundárna bola špirálna existuje šanca, že primárna mohla byť aj pretiahnutá. Po porovnaní výsledkov s rozdielnym typom sekundárnej galaxie sa ukázalo, že v prípade eliptickej galaxie sa tvoria slupky s nižším kontrastom, ale viac pravidelné, ako v prípade špirálnej galaxie. Jediným problémom ich modelu ostal radiálny rozsah slupiek, ktorý vychádza omnoho menší v simulácii, ako v realite. Taktiž predpovedali, že pokiaľ jadro sekundárnej galaxie prežije prvú zrážku, pri každej nasledujúcej vznikajú ďalšie generácie slupiek.

Hernquist s Quinnom vo svojich dvoch prácach vydaných rok po sebe simulujú ďalšie možné zrážky galaxií, pri ktorých môže dôjsť k vzniku slupiek.

V prvej práci modelujú zrážky málo hmotných systémov s veľkými sférickými galaxiami. Tieto strety mohli byť ako radiálne, tak aj neradiálne a sekundárnymi galaxiami boli buď sférické alebo diskové galaxie. Všeobecné výsledky ukázali, že pri použití sférickej galaxie



ako sekundárnej dochádza k vytvoreniu výraznejšej a symetrickejšej slupkovej štruktúry, ako v prípade diskovej galaxie. Ďalej sa ukázalo, že neradiálne stretý galaxií sú taktiež schopné vytvoriť slupky odpovedajúce pozorovaniam [10].

V druhej práci modelujú opäť radiálne aj neradiálne zrážky málo hmotných systémov, no tentokrát primárnu galaxiu volia nesférickú. Ukazujú, že v princípe je možná tvorba slupiek aj u špirálnych galaxií, no tie majú väčší vplyv na dráhu sekundárnej galaxie aj na omnoho väčšie vzdialenosti ako je vzdialenosť slapového pôsobenia. Potom má sekundárna galaxiu tendenciu ponoriť sa do disku primárnej skôr, ako dosiahne jadro a pozostatky by sa dali len ťažko odlíšiť od špirálnych ramien. Navyše v takýchto zrážkach môže často dochádzať k poškodeniu špirálnej galaxie do takej miery, že je klasifikovaná ako S0 alebo eliptická galaxia [11].

V posledných pár rokoch bolo na tému zrážkového modelu vypracovaných niekoľko prác. V jednej z nich skúmali Canalizo et al. [3] objekt s označením MC2 1635+119, galaxiu obsahujúcu kvazar a objavili v nej slupkové štruktúry, čím sa stala jedinou známou slupkovou galaxiou s kvazarom. Pomocou  $N$  časticovej simulácie modelovali danú galaxiu a z polohy najvzdialenejšej slupky určili čas zrážky na 100 miliónov až 2 miliardy rokov dozadu (čo napovedalo kauzálnemu spojeniu medzi zrážkou galaxií a začiatkom aktivity kvazaru).

V ďalšej práci však Ebrová et al. [6] ukázali, že takéto určovanie času môže byť zaťažené veľkou chybou. Keď do úvahy vzali aj dynamické trenie, ktoré býva v rámci zjednodušujúcich predpokladov z modelov vynechávané, výsledkom bol značne odlišný systém slupiek. Polohy najvzriadenejších slupiek síce ostali nezmenené, no ich jasnosť sa rapídne znížila, čo spôsobuje ich omnoho ťažšiu detekciu a možnosť určenia času zrážky z niektorej z polohy bližších, žiarivejších slupiek. Takáto zámena by potom znamenala v konkrétnom modelovanom príklade cca. dvojnásobné podhodnotenie času zrážky.

Podľa Thomsona a Wrighta [22, s. 123] má však zrážkový model niekoľko výrazných nedostatkov. Na vysvetlenie slupkových galaxií typu I treba aby prebehla čelná zrážka pozdĺž hlavnej osi primárnej galaxie, pozorovanie musí byť uskutočnené z roviny kolmej na rovinu zrážky, inak by sa nám stratila asymetrická štruktúra a sekundárna galaxia musí mať podobnú hviezdnu populáciu ako primárna. To ich donútilo k odmietnutiu zrážkového modelu.

## 2.2.2 Model slabej interakcie

Po zavrnutí zrážkového modelu si spomínaní autori vytvorili model vlastný a nazvali ho model slabej interakcie (angl. *weak-interaction model*, skrátene WIP). Autori v ňom nepredpokladajú priamu zrážku dvoch galaxií, ale len veľmi blízke priblíženie po parabolickej dráhe. Slupky musia byť potom tvorené hviezdami primárnej galaxie a ich vznik je interpretovaný hustotnými vlnami v tzv. tučnom disku, ktorý obsahuje dynamicky chladnú populáciu hviezd [22].

Numerické simulácie autorov ukázali, že týmto modelom vytvorené slupky sú 3-D štruktúry, ktoré po projekcii na oblohu vykazujú ostré vonkajšie okraje. Ich konečný vzhľad závisí na vzdialenosti medzi približujúcimi sa galaxiami a hmotnosti sekundárnej galaxie. Ďalším výsledkom simulácie je, že galaxie typu I aj II sú tvorené rovnakými procesmi a sú vlastne podobné systémy, len sú videné z inej perspektívy. Pokiaľ je galaxia pozorovaná s inklináciou väčšou ako cca.  $60^\circ$ , javí sa ako typ I, pokiaľ je inklinácia menšia, javí sa ako typ II. Model taktiež vysvetľuje pozorovanú koreláciu medzi excentricitou galaxie a rozmiestnením slupiek okolo nej ako ďalší efekt projekcie a naznačuje, že slupkové galaxie musia byť prevažne sploštelé sféroidy. Výsledky sa zhodujú aj s pozorovaným asymetrickým

rozmiestnením slupiek „na preskačku“.

Dôsledkom modelu slabej interakcie je fakt, že hviezdy musia krúžiť po takmer kruhových dráhach a teda autori očakávajú radiálne rýchlosti u hviezd tvoriacich typ I konzistentné s radiálnymi rýchlosťami nameranými v tučnom disku pozorovanom z boku. Naproti tomu by pri zrážkovom modeli mali byť dráhy hviezd v slupkach radiálne. Prítomnosť či neprítomnosť rotačného pohybu by teda mohla slúžiť ako ukazateľ toho, ktorý z dvoch modelov je ten správny. Definitívnu správnosť tohto modelu by ale ukázala len detekcia tučného disku u eliptických galaxií.

A práve nutnosť tučného disku je najväčšou nevýhodou a slabinou modelu slabej interakcie, keďže eliptické galaxie sú známe tým, že sú to dynamicky horúce systémy. Definitívnu nesprávnosť tohto modelu sa však ešte nepodarilo dokázať.

## Kapitola 3

# Fotometrická analýza

### 3.1 Astronomická fotometria

Slovo fotometria znamená v preklade meranie svetla. Zaoberá sa najmä určovaním jeho intenzity a farby. V astronómii je svetlo objektov hlavným zdrojom informácií o nich.

Najčastejšie používaná veličina jasnosti je hviezdna veľkosť meraná v magnitúdach. Pôvod tejto jednotky je v antickom Grécku. Hviezdy viditeľné na nočnej oblohe voľným okom rozdelil Hipparchos okolo roku 130 pred našim letopočtom do šiestich skupín podľa ich jasnosti. Tieto skupiny mali jednoduché číselné označenie, pričom platilo, že čím je hviezda jasnejšia, tým nižšiu hviezdnu veľkosť má.

Toto delenie pretrvávalo takmer dve tisícročia, až pokým pokrok v technológii nespôsobil spresnenie merania a v devätnástom storočí sa zistilo, že pomer svetelných tokov medzi hviezdami prvej a šiestej magnitúdy je približne sto. V roku 1856 navrhol britský astronóm Norman Pogson systém, ktorý sa riadil spomínaným pomerom. Ak sa hviezdna veľkosť líšila o jednu magnitúdu, pomer svetelných tokov je 2,512, ak je rozdiel 5 magnitúd, pomer je práve 100. Toto sa dá matematicky zapísať rovnicou, ktorá sa nazýva Pogsonova:

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log_{10} \frac{F_1}{F_2}, \quad (3.1)$$

kde  $m_1, m_2$  sú pozorované hviezdne veľkosti a  $F_1, F_2$  sú žiarivé toky hviezd.

Pozorované hviezdne veľkosti však nezohľadňujú rôznu vzdialenosť hviezd od Zeme. Preto sa zaviedli absolútne hviezdne veľkosti, ktoré vyjadrujú, ako jasné by sa nám zdali hviezdy ak by boli všetky vzdialené od nás rovnako. Tento „nulový bod“ vzdialenosti bol určený na 10 parsekov. Matematicky sa to zapíše:

$$m - M = 5 \log d - 5. \quad (3.2)$$

$M$  je absolútna hviezdna veľkosť,  $r$  je vzdialenosť hviezdy od Zeme. Rozdiel  $m - M$  sa nazýva modul vzdialenosti.

So začiatkom používania fotografických dosiek, neskôr fotonásobičov a najmä CCD (z angl. *charge-coupled device*) čipov sa ukázalo, že je nedostačujúce povedať hviezdnu veľkosť nejakého objektu, ale je treba povedať aj v akej farbe. To je spôsobené rozdielnou spektrálnou citlivosťou použitých prístrojov.

Na vyriešenie tohto problému vznikli fotometrické filtre, ktoré majú presne vymedzenú svoju spektrálnu priepustnosť. Najpoužívanejším fotometrickým systémom sa stal UBV systém navrhnutý v päťdesiatych rokoch dvadsiateho storočia američanmi Haroldom Johnsonom a Williamom Morganom. Pôvodne sa skladal z troch filtrov —  $U$  (z angl. *ultraviolet*

— ultrafialový),  $B$  (z angl. *blue* — modrý) a  $V$  (z angl. *visual* — vizuálny). Neskôr sa pridali ďalšie —  $R$  (z angl. *red* — červený),  $I$  (z angl. *infrared* — infračervený).

Informácie použité v tejto podkapitole sú z [25].

## 3.2 Matematická analýza obrazu

### 3.2.1 Mediánový filter

V mojej práci sa zaoberám fotometrickou analýzou slupkových galaxií, preto je dôležité najskôr tieto jemné štruktúry zvýrazniť. Jednou z možných metód je použitie nelineárneho mediánového filtra.

Medián v teórii štatistiky a pravdepodobnosti je numerická hodnota rozdeľujúca vyššiu polovicu vzorky od nižšej. Pre nepárny počet prvkov sa dá nájsť jednoducho tak, že ich zoradíme od najnižšieho po najvyššie a mediánom je potom prostredná hodnota. Pre párny počet prvkov neexistuje jedna taká hodnota, medián je potom obvykle definovaný ako aritmetický priemer dvoch prostredných prvkov.

Pre akékoľvek rozdelenie pravdepodobnosti je medián  $m$  číslo, ktoré vyhovuje nerovniciam

$$P(X \leq m) \geq \frac{1}{2} \quad \text{a} \quad P(X \geq m) \leq \frac{1}{2}. \quad (3.3)$$

V prípade spojitého rozdelenia zadaného hustotou pravdepodobnosti  $f$  platí pre medián

$$\int_{-\infty}^m f(x) dx = \frac{1}{2}. \quad (3.4)$$

Mediánový filter vezme hodnoty zadaného počtu pixelov okolo pixelu, pre ktorý hodnotu počítame, zoradí ich podľa veľkosti a vyberie z nich strednú hodnotu, ktorú potom priradí danému pixelu. Technicky je filter riešený skriptom v programovacom jazyku Python<sup>1</sup> s použitím knižníc PyFITS<sup>2</sup> a NumPy<sup>3</sup> a nachádza sa v prílohách.

Následne sa vytvorená snímka mediánu odčíta od pôvodnej snímky galaxie. Opäť je tento úkon riešený skriptom v Pythone, ktorý sa nachádza v prílohách. Výsledné snímky možno vidieť na obrázku 3.1

Informácie použité v tejto časti sú z [26].

### 3.2.2 Kingove modely

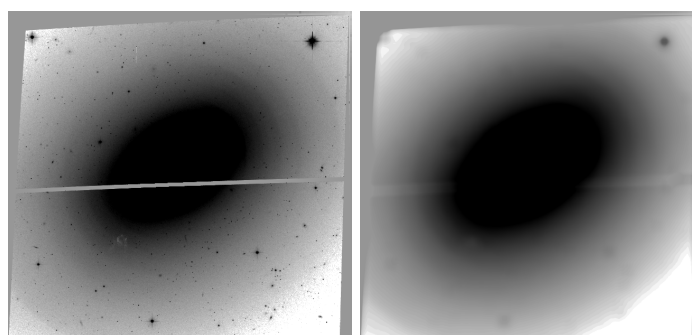
Iný spôsob, ako odhaliť nevýrazné slupky je namodelovať profil galaxie a ten odčítať od pôvodnej snímky. V mojej práci som použil tzv. Kingove modely [14]. Tieto modely boli pôvodne autorom použité na popis guľových hviezdokôp, no ukázalo sa, že sa úspešne popisujú aj eliptické galaxie.

Ich popis je založený na chovaní systému mnohých hviezd, ktoré môžeme aproximovať bodovými časticami vzhľadom na ich relatívny rozmer k celkovému rozmeru galaxie. Určujúcou interakciou v takomto systéme je gravitácia a väčšinu hmoty tu tvoria práve samotné hviezdy.

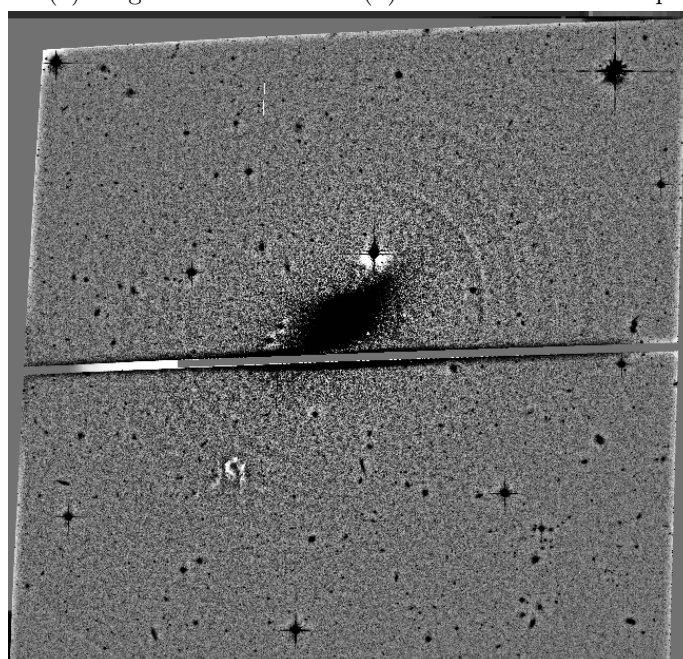
<sup>1</sup><http://python.org/>

<sup>2</sup><http://www.stsci.edu/institute/software/hardware/pyfits>

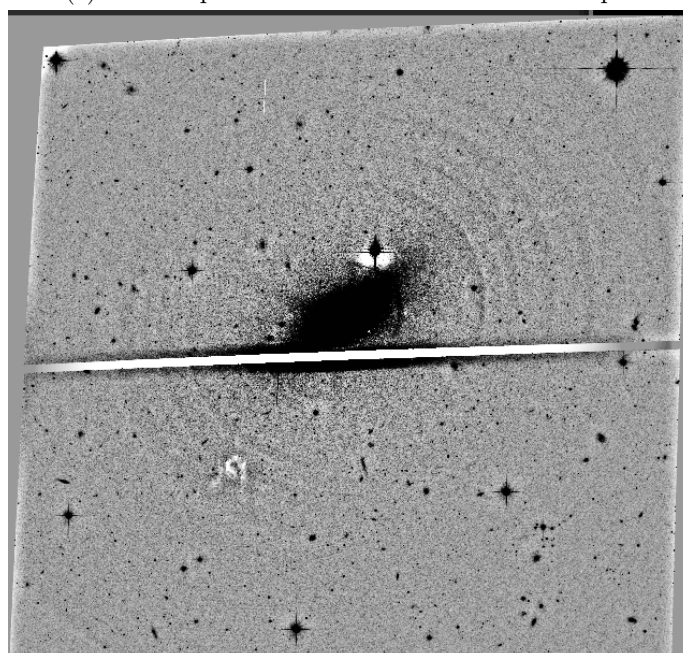
<sup>3</sup><http://www.numpy.org/>



(a) Originálna snímka (b) Medián s okolím 150 pix



(c) Snímka po odčítaní mediánu s okolím 100 pix



(d) Snímka po odčítaní mediánu s okolím 150 pix

Obr. 3.1: Mediánové snímky v invertovaných farbách

Gravitačný potenciál galaxie  $\phi$  a energiu častice  $E$  je vhodné nahradiť *relatívnym potenciálom*  $\psi$  a *relatívnou energiou*  $\varepsilon$ , ktoré sú definované ako

$$\psi \equiv \phi_0 - \phi, \quad a \quad \varepsilon \equiv M_* \left( \phi_0 - \phi - \frac{1}{2}v^2 \right) = M_* \left( \psi - \frac{1}{2}v^2 \right), \quad (3.5)$$

kde  $\phi_0$  je konštanta vhodnej veľkosti,  $M_*$  je hmotnosť jednej častice a  $v$  je jej rýchlosť.

Riešenie relatívneho potenciálu  $\psi$  sa potom vypočíta z Poissonovej rovnice v sférických súradniciach, do ktorej dosadíme priestorovú hustotu hmotnosti  $\rho(\psi)$ :

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dx} \left( r^2 \frac{d\psi}{dr} \right) = -4\pi G \rho_1 \left[ e^{\psi/\zeta^2} \operatorname{erf} \left( \sqrt{\frac{\psi}{\zeta^2}} \right) - 2\sqrt{\frac{\psi}{\pi\zeta^2}} \left( 1 + \frac{2\psi}{3\zeta^2} \right) \right]. \quad (3.6)$$

Radiálna vzdialenosť od centra galaxie je označená  $r$  a  $\operatorname{erf}(x)$  je tzv. *error funkcia* definovaná ako

$$\operatorname{erf}(x) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt. \quad (3.7)$$

Konštanty  $\rho_1$  a  $\zeta$  sú zavedené na zjednodušenie daného výrazu z konštánt  $A$ ,  $B$  a  $M_*$  nasledovne

$$\zeta^2 \equiv \frac{B}{M_*}, \quad \rho_1 \equiv AM_* \left( \frac{2\pi B}{M_*} \right)^{3/2} = AM_* (2\pi\zeta^2)^{3/2}. \quad (3.8)$$

Riešenie rovnice (3.6) dosadíme do rovnice pre priestorovú hustotu hmotnosti

$$\rho(\psi) = \rho_1 \left[ e^{\psi/\zeta^2} \operatorname{erf} \left( \sqrt{\frac{\psi}{\zeta^2}} \right) - 2\sqrt{\frac{\psi}{\pi\zeta^2}} \left( 1 + \frac{2\psi}{3\zeta^2} \right) \right]. \quad (3.9)$$

Pre získanie pozorovaných veličín je však ešte treba projektovať získanú priestorovú hustotu hmotnosti do smeru k pozorovateľovi. Takto získame *plošnú hustotu hmotnosti*  $\Sigma(R)$ :

$$\Sigma(R) = \Upsilon J(R) = 2 \int_R^{r_t} \frac{\rho(r) r dr}{\sqrt{r^2 - R^2}}. \quad (3.10)$$

$J(R)$  je *plošná hustota žiarivého výkonu*,  $\Upsilon$  je pomer hmotnosti častice a jej žiarivého výkonu  $\Upsilon = M_*/L_*$ .

Pri určovaní tých správnych parametrov Kingovho modelu pre mnou skúmanú galaxiu som natrafil hneď na niekoľko problémov. Nepodarilo sa mi nafitovať izofoty a z toho vykresliť profil žiarivého výkonu galaxie, tak som najskôr použil rez galaxiou vo vhodnom smere a pomocou toho som určil prvý odhad parametrov.

Neskôr som vzal hodnoty pixelov v prstenci tvorenom elipsami s vhodnými polomerami, z nich spravil medián a odčítal od seba hodnotu pre model a snímku galaxie. Takto som sa snažil dôjsť k čo najmenej odchýlke, čo sa mi aj podarilo, ale ukázalo sa, že pre takýto model je jadro galaxie až príliš žiarivé a zanikajú v ňom slupky najbližšie jadru. Preto bolo treba vytvoriť separátny model s inými parametrami pre jadro samotné.

Pri tom som postupoval rovnako ako pri odhadovaní parametrov modelu pre okolie jadra, najprv porovnával profil s rezom galaxiou vo vhodnom smere a neskôr porovnával medián hodnôt pixelov v prstenci tvorenom elipsami s vhodnými polomerami. Dokázal som sa opäť dostať k minimálnej odchýlke, ale aj tak nebol model vo veľmi dobrej zhode s pozorovaním. Napriek tomu sa mi podarilo odhaliť ďalšie dve slupky, ktoré boli predtým prežiarené jadrom.

parameter	hodnota
CD1_1	$-3,5114791084354 \cdot 10^{-6}$
CD1_2	$-1.3439095004869 \cdot 10^{-5}$
$\gamma$	0,05 pix/''

Tabuľka 3.1: Hodnoty z hlavičky snímky

Moje zistenia ohľadom fitovania Kingových modelov na profil NGC 3923 súhlasia so závermi Priera [17], podľa ktorého nie je mnou skúmaná galaxia dosť dobre reprezentovaná Kingovým modelom a aj on musel použiť dva rozdielne modely pre jadro a pre okolie a aj tak nedosiahol takú dobrú zhodu, ako pri použití iných modelov.

Použité Kingove modely boli opäť riešené skriptom v jazyku Python s použitím knižníc Math, SciPy<sup>4</sup>, NumPy, Matplotlib<sup>5</sup> a PyFITS. Nachádzajú sa v prílohách. Výsledné snímky možno vidieť na obrázku 3.2.

Pre viac informácií o Kingových modeloch odporúčam diplomovú prácu L. Jílkovej [13], podľa ktorej bola vypracovaná aj celá predchádzajúca podkapitola.

### 3.3 Vlastná fotometria slupiek

Po odhalení slupiek vykonáme ich fotometriu a to tak, že najskôr vyberieme na snímke pár hviezd, ktorým určíme inštrumentálne hviezdne veľkosti pomocou rovnice

$$m_i = 25 - 2,5 \log F_i, \quad (3.11)$$

kde  $F_i$  je celkový tok od  $i$ -tej hviezdy v zvolenej clonke. Následne zistíme ich skutočné hviezdne veľkosti  $m_{i,\text{cat}}$  z vhodného katalógu (napr. SIMBAD [27]). Tieto dve hodnoty od seba odčítame a zistíme rozdiel

$$\Delta m = m_i - m_{i,\text{cat}}. \quad (3.12)$$

Pri slupkách určujeme hviezdnu veľkosť na jednotku plochy, v tomto prípade magnitúdu na uhlovú sekundu štvorcovú ( $\text{mag}/(''^2)$ ). Najskôr je teda treba zistiť mierku, t.j. koľko pixelov odpovedá jednej uhlovej sekunde na snímke. Túto hodnotu nájdeme jednoducho pomocou hodnôt CD1\_1 a CD1\_2 z hlavičky snímky, keď sčítame ich druhé mocniny a výsledok odmocníme:

$$\gamma = \sqrt{\text{CD1}_1^2 + \text{CD1}_2^2}. \quad (3.13)$$

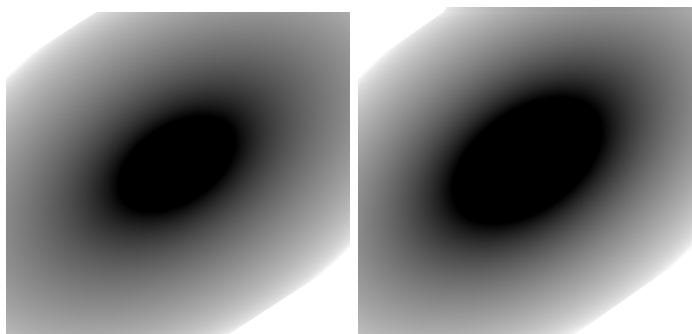
Pre mnou použitú snímku vyšli hodnoty uvedené v tabuľke 3.1.

Plošnú hviezdnu veľkosť  $\mu$  získame tak, že vyberieme vhodný výrez pixelov zo slupky tak, aby sa v ňom nenachádzali hviezdy alebo iné objekty, ktoré by mohli nežiadúcim spôsobom skresliť výsledky. Z týchto vybraných hodnôt potom spravíme aritmetický priemer, teda priemerný tok z jedného pixelu slupky a ten vynásobíme mierkou  $\gamma^2$  aby sme získali tok zo štvorcovej sekundy  $F_{\text{avg}}$ . Ten už len dosadíme do rovnice

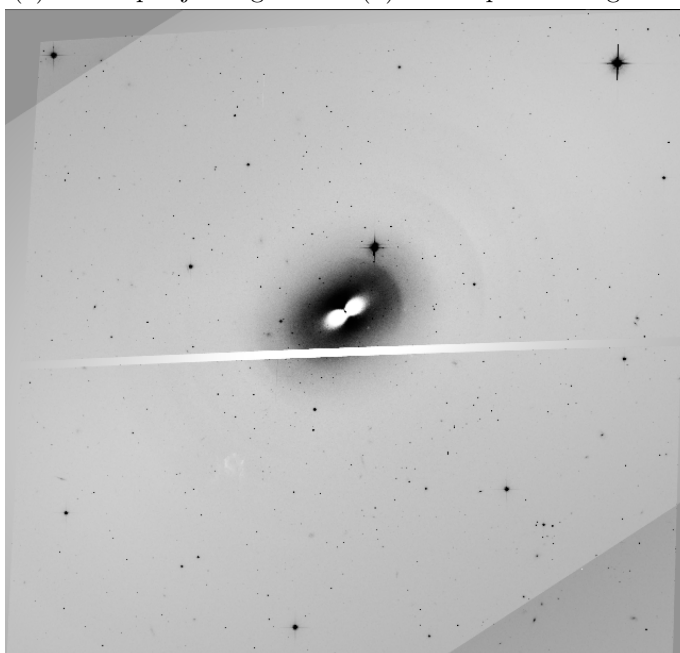
$$\mu = 25 - 2,5 \log F_{\text{avg}} - \Delta m. \quad (3.14)$$

<sup>4</sup><http://www.scipy.org/>

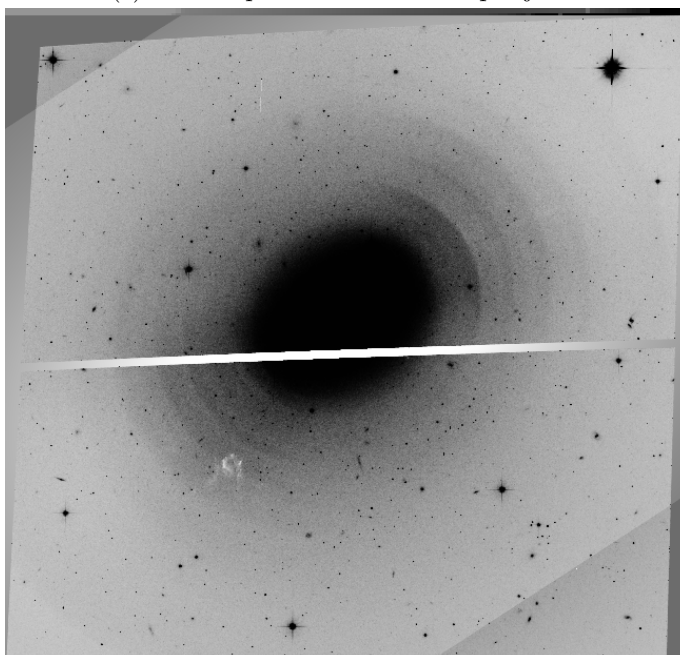
<sup>5</sup><http://matplotlib.org/>



(a) Model pre jadro galaxie (b) Model pre okolie galaxie



(c) Snímka po odčítaní modelu pre jadro



(d) Snímka po odčítaní modelu pre okolie

Obr. 3.2: Kingove modely a výsledky ich odčítania zobrazené v invertovaných farbách



### 3.4 NGC 3923

NGC 3923 objavil roku 1791 William Herschel a nachádza sa v súhvezdí Hydra. Jej rovníkové súradnice sú  $\alpha = 11^h 51^m 1.8^s$ ,  $\delta = -28^\circ 48' 22''$ , morfológický typ je E4 a hviezdna veľkosť vo filtri V je 9,80 mag. [27]

Najdôkladnejšiu štúdiu slupkových štruktúr tejto galaxie vypracoval ešte v roku 1988 Prieur [17]. Autor objavil okolo galaxie 22 slupiek v rozmedzí vzdialeností 1,65 až 103 kpc, čo dáva radiálny rozsah približne 60. Je to slupková galaxia typu I, čiže slupky sú usporiadané okolo hlavnej osi galaxie a sú rozmiestnené na preskačku.

Snímku, s ktorou som pracoval som získal z archívov ST-ECF (Space Telescope — European Coordinating Facility). Bola napozorovaná Hubblovým vesmírnym ďalekohľadom, konkrétne bola použitá kamera ACS (Advanced Camera for Surveys). Pozorovanie prebehlo 7.12.2002 s expozičnou dobou 978 sekúnd.

## Kapitola 4

# Výsledky fotometrie

Na mnou použitej snímke galaxie NGC 3923 bolo po odčítaní mediánu alebo modelu nájdených 12 slupiek. Ich schematický náčrt je možno vidieť na obrázku 4.1.

Ako prvú úlohu som si dal zistiť ich vzdialenosti od centra galaxie a radiálny rozsah tohto slupkového systému. Postupoval som tak, že som si zistil vzdialenosti v pixeloch na snímke a tie som pomocou známej mierky previedol na vzdialenosti v uhlových sekundách. Na zistenie reálnych vzdialeností som si vyhľadal v katalógu hodnotu červeného posuvu  $z$ , ktorú som dosadil do vzorcov

$$v_r = c \cdot z \quad , \quad v_r = H_0 \cdot d, \quad (4.1)$$

kde  $v_r$  je radiálna rýchlosť galaxie,  $c$  je rýchlosť svetla vo vákuu a  $H_0$  je *Hubbleova konštanta* ( $H_0 = 71,0 \pm 2,5$  (km/s)/Mpc). Hodnota červeného posuvu  $z$  pre galaxiu NGC 3923 je 0,005767, z čoho vychádza vzdialenosť 24,4 Mpc. Potom už som jednoducho pomocou goniometrickej funkcie tangens zistil vzdialenosti slupiek  $r$ :

$$\tan \varphi = \frac{r}{d}. \quad (4.2)$$

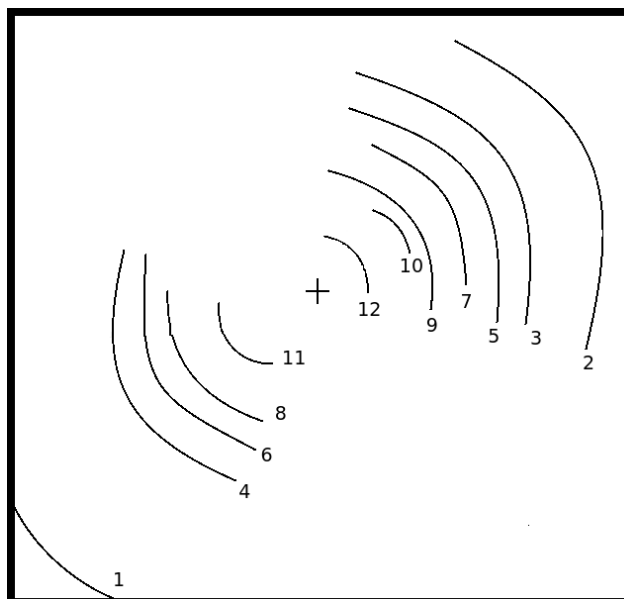
Za uhol  $\varphi$  som dosádzal uhlovú vzdialenosť slupiek od jadra.

Výsledné vzdialenosti slupiek sa nachádzajú v tabuľke 4.1, kde ich chyby boli určené ako polšírky jednotlivých slupiek. Hodnoty širok slupiek majú skôr informatívny charakter, keďže jednotlivé slupky nie sú ostro ohraničené, ale skôr rozmazané. Hodnoty  $r_{\text{lit}}$  sú prevzaté z práce Prieura [17] a ako je vidieť, sú v zhode s mojimi výsledkami.

Najbližšia slupka je vzdialená od jadra približne 2000 pc, zatiaľ čo najvzdialenejšia sa nachádza vo vzdialenosti približne 14500 pc, čo dáva radiálny rozsah slupkového systému  $r_{\text{max}}/r_{\text{min}} = 7,3$ . Toto číslo je o rád nižšie ako hodnota udávaná v literatúre, čo je spôsobené tým, že najbližšie slupky mohli ostať neodhalené vďaka nedokonalému odčítaniu jadra galaxie, ale aj príliš veľkou mierkou snímky, kedy už sa na nej nenachádzajú tie najvzdialenejšie slupky, ktoré podľa literatúry ležia vo vzdialenosti 103 kpc [17].

Fotometria slupiek bola prevedená pre obe snímky vytvorené ako odčítaním mediánu, tak aj Kingovho modelu. Pred samotným fotometrickým spracovaním bolo ešte treba odčítať hodnotu pozadia. Pre mediánovú snímku bolo pozadie pre celú snímku rovnaké, pri snímke vytvorenej odčítaním modelu sa hodnota pozadia líšila naprieč snímku a preto musela byť určená pre každú slupku osobitne. Po tejto úprave už bolo možné pokračovať postupmi popísanými v podkapitole 3.3. Výsledky sú zhrnuté v tabuľkách 4.2a a 4.2b.

Čo sa týka výsledkov fotometrie, po odčítaní modelu sa ukázalo, že žiarivosť jednotlivých slupiek klesá s rastúcou vzdialenosťou od centra galaxie. Slupky označené číslami



Obr. 4.1: Schematický náčrt slupiek okolo NGC 3923

Slupka	$r$ [pix]	$r$ ["]	$r_{\text{lit}}$ ["]	$r$ [pc]
1	$2451 \pm 82$	$122,5 \pm 4,1$	$128,1 \pm 2,0$	$14500 \pm 500$
2	$2033 \pm 48$	$101,6 \pm 2,4$	$104,7 \pm 0,5$	$12000 \pm 300$
3	$1558 \pm 53$	$77,9 \pm 2,6$	$79,3 \pm 1,0$	$9200 \pm 300$
4	$1400 \pm 55$	$70,0 \pm 2,8$	$73,0 \pm 2,0$	$8300 \pm 300$
5	$1296 \pm 51$	$64,8 \pm 2,6$	$67,1 \pm 1,0$	$7700 \pm 300$
6	$1166 \pm 35$	$58,3 \pm 1,7$	$57,5 \pm 1,0$	$6900 \pm 200$
7	$1082 \pm 36$	$54,1 \pm 1,8$	$55,7 \pm 1,0$	$6400 \pm 200$
8	$1000 \pm 25$	$50,0 \pm 1,3$	$48,0 \pm 2,0$	$5900 \pm 100$
9	$848 \pm 36$	$42,4 \pm 1,8$	$44,7 \pm 0,5$	$5000 \pm 200$
10	$717 \pm 25$	$35,9 \pm 1,3$	$30,0 \pm 1,0$	$4200 \pm 100$
11	$561 \pm 23$	$28,0 \pm 1,1$	$30,0 \pm 0,5$	$3300 \pm 100$
12	$336 \pm 22$	$16,8 \pm 1,1$	$18,8 \pm 0,5$	$2000 \pm 100$

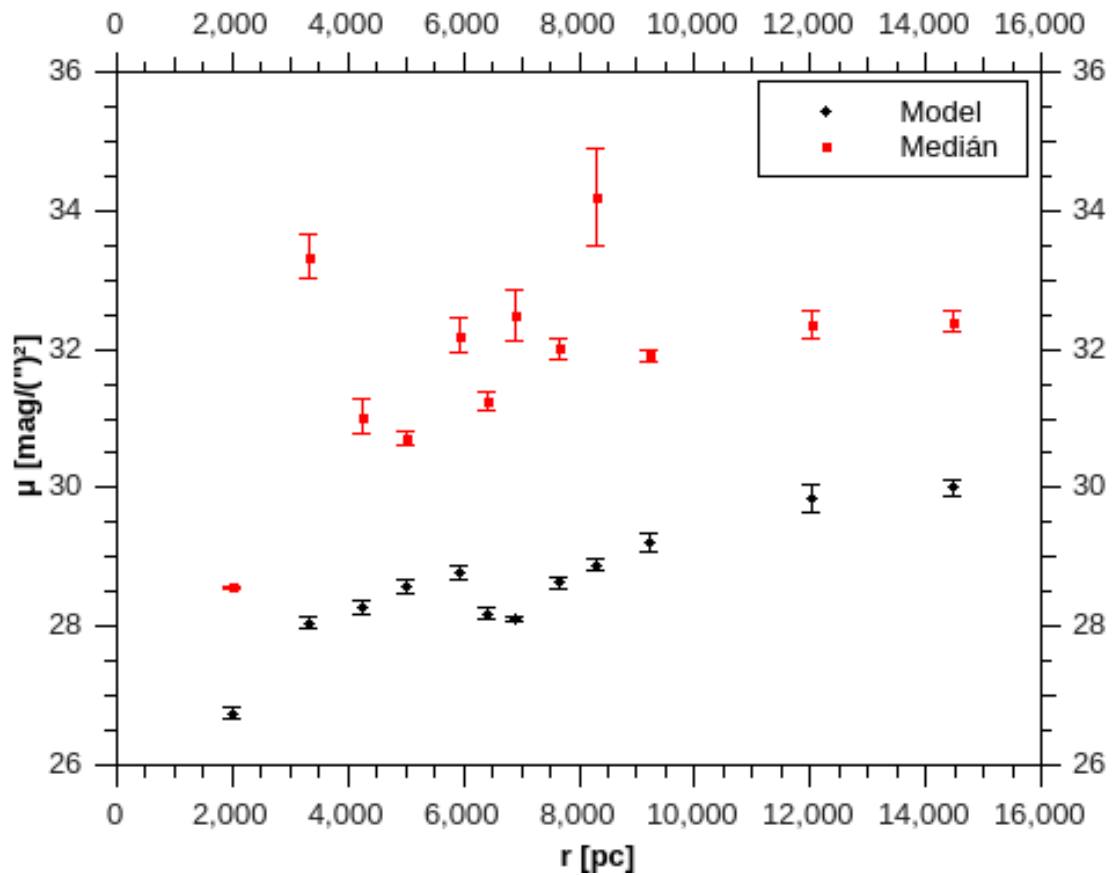
Tabuľka 4.1: Vzdialenosti slupiek

Slupka	$\mu$ [mag/(") <sup>2</sup> ]	Slupka	$\mu$ [mag/(") <sup>2</sup> ]
1	30,00 ± 0,13	1	32,40 ± 0,15
2	29,85 ± 0,19	2	32,37 ± 0,20
3	29,21 ± 0,13	3	31,91 ± 0,09
4	28,89 ± 0,07	4	34,18 ± 0,70
5	28,63 ± 0,08	5	32,01 ± 0,16
6	28,11 ± 0,03	6	32,49 ± 0,36
7	28,19 ± 0,09	7	31,25 ± 0,14
8	28,77 ± 0,11	8	32,20 ± 0,26
9	28,57 ± 0,10	9	30,72 ± 0,11
10	28,28 ± 0,11	10	31,03 ± 0,25
11	28,05 ± 0,09	11	33,34 ± 0,32
12	26,74 ± 0,08	12	28,56 ± 0,02

(a) Kingove modely

(b) Medián

Tabuľka 4.2: Plošné hviezdne veľkosti slupiek



Obr. 4.2: Graf závislosti plošnej hviezdnej veľkosti slupiek na vzdialenosti od jadra galaxie

5, 6 a 7 sa však tomuto trendu mierne vymykajú. Pre žiarivosti získané z mediánovej snímky sa žiadny takýto trend neobjavuje. Výsledky sú zobrazené na obrázku 4.2. Tento výsledok ukazuje, že použitie namodelovaného profilu galaxie a jeho následné odčítanie je výhodnejšou metódou, keďže zjasňovanie slupiek smerom k centru galaxie je predpovedané literatúrou.

Markantný rozdiel medzi získanými hviezdными veľkosťami z oboch snímok si vysvetľujem tým, že pri použití namodelovanej snímky odčítame od pôvodnej hladkú funkciu, zatiaľ čo pri odčítaní mediánu môže dochádzať k rôznym nelineárnym deformáciám. Táto skutočnosť opäť ukazuje, že použitie modelu je výhodnejšou variantou.

Ďalšou výhodou použitia modelu oproti mediánu je, že výsledná snímka sa javí byť menej zašumená, čo spôsobuje ako menšie chyby v určení hviezdnych veľkostí, tak aj jednoduchšie a presnejšie určenie hraníc jednotlivých slupiek, keďže sú menej rozmazané.

# Záver

Témou mojej práce je fotometrická analýza galaxií, konkrétne som sa zamerlal na štúdium slupkových galaxií. Za objekt svojho záujmu som si vybral galaxiu NGC 3923, ktorá je považovaná za jednu z najbohatších galaxií, čo sa týka slupkového systému, ktorý ju obkolesuje.

Najpodstatnejšiu časť celej práce však netvorí fotometrické spracovanie slupiek, ale ich zviditeľnenie. Vybral som si dva spôsoby: odčítanie mediánovej snímky a odčítanie namodelovaného profilu galaxie. Z porovnania vyšlo lepšie odčítanie modelu, aj keď mnou použité Kingove modely sa neukázali ako najvhodnejšia voľba najmä potrebou vytvoriť dva oddelené modely, jeden pre oblasť jadra a druhý pre okolie galaxie.

Popísanými metódami sa mi podarilo na snímke odhaliť 12 slupiek, pre ktoré som určil ich vzdialenosť od jadra a plošné hviezdne veľkosti. Vzdialenosti slupiek vyšli v dobrej zhode s literatúrou. Z vzdialeností som následne určil radiálny rozsah slupkového systému  $r_{\max}/r_{\min} = 7,3$ , teda o rád nižšia hodnota, ako sa udáva v literatúre. Táto nezrovnalosť je spôsobená tým, že vďaka nedokonalému odčítaniu jadra mohli ostať najbližšie slupky skryté, ale najmä tým, že literatúrou uvádzané najvzdialenejšie slupky sa na snímke vďaka jej mierke ani nenachádzajú. Z fotometrie sa ukázalo, že žiarivosť jednotlivých slupiek klesá s rastúcou vzdialenosťou od centra galaxie.

Slupkové galaxie sú relatívne mladou témou v astronómii a sú okolo nich ešte mnohé nezodpovedané otázky. Fotometrická analýza týchto objektov je schopná ponúknuť nám odpovede aspoň na niektoré z nich. Preto je pre rozvoj našich poznatkov o vzniku a vlastnostiach slupkových štruktúr dôležité čo najpresnejšie ich odhaliť a študovať. Ja som sa o takúto štúdiu pokúsil v tejto práci.

# Prílohy

## 01 Mediánový filter

```
import pyfits as pf

hdulist = pf.open('j8fk01010_drz.fits')
scidata = hdulist[1].data

import numpy as np
from scipy.ndimage import filters as f

nx = 4212 #rozmary vyslednej snimky
ny = 4239

a = np.zeros ((4239,4212))
f.median_filter(scidata,size=100,output=a) #size = velkost okolia

hdu = pf.PrimaryHDU(a)
hdu.writeto('median.fits')
```

## 02 Skript na odčítanie dvoch snímok

```
import pyfits as pf

hdulist1 = pf.open('j8fk01010_drz.fits')
hdulist2 = pf.open('median.fits')

scidata1 = hdulist1[1].data
scidata2 = hdulist2[0].data

a = scidata1 - scidata2
hdu = pf.PrimaryHDU(a)
hdu.writeto('odcitana.fits')
```

### 03 Kingov model pre okolie galaxie

```
import math as m
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import trapz
from scipy import special
from scipy.ndimage.interpolation import rotate
import pyfits as pf
A = 0.0001 #parametre
B = 43000.0
M = 7000
zeta2 = B/M
ro1 = A*M*((2.0*m.pi*zeta2)**(1.5))
G = 6.67e-11
def f(v,r):
    u = v[0]
    y = v[1]
    pre = -4.0*m.pi*G*(ro1/zeta2)
    ex = m.exp(y)
    sqr = m.sqrt(y)
    err = m.erf(sqr)
    f0 = pre*(ex*err-2.0*sqr*m.sqrt(1.0/m.pi)*(1.0+(2.0/3.0)*y))-(2.0/r)*u
    f1 = u
    return [f0,f1]
u0 = 0 #okrajove podmienky
y0 = 9.50
v0 = [u0,y0]
r_t = 6920
r = np.linspace (1e-10, r_t, 4610)
yy = odeint(f, v0, r, mxstep = 100000)
y = yy[:,1]
expy = np.exp(y)
sqrty = np.sqrt(y)
ro = ro1*(expy*special.erf(sqrty)-2.0*sqrty*(1.0/m.sqrt(m.pi))*(1.0+(2.0/3.0)*y))
np.clip(ro, 0, 1e20, out=ro)
delta_x = r[1]-r[0]
R = np.linspace (0,r_t-(0.01*r_t), 4610)
delta_R = R[1]-R[0]
tmp_ro = ro
tmp_r = r
epsilon = np.array([])
for i in range(0,len(R)):
    multiplier = tmp_r/(((tmp_r*tmp_r)-(R[i]*R[i]))**0.5)
    integrand = tmp_ro*multiplier
    g = 2.0*trapz(integrand,dx=delta_x)
    epsilon = np.append(epsilon, g)
    tmp_ro = np.delete(tmp_ro, 0)
    tmp_r = np.delete(tmp_r, 0)
```



```
epsilon = epsilon*2.5e-8
table1 = np.zeros ((3500,3000))
for a in range(0,3500):
    for b in range(0,3000):
        R_i = round(m.sqrt(a*a+b*b))
        table1[a,b] = epsilon[R_i]
table2 = np.fliplr(table1)
table3 = np.hstack((table2,table1))
table4 = np.flipud(table3)
table = np.vstack((table4,table3))
rotdtab = np.zeros((4200,6000))
matrix = np.array([[0.6,0],[0,1]])
u = np.array([[0],[0]])
for i in range(0,7000):
    for j in range(0,6000):
        v = np.array([[i],[j]])
        u = np.dot(matrix,v)
        rotdtab[round(u[0,0]),round(u[1,0])] = table[i,j]
newtab = np.zeros((4239,4212))
for a in range(0,4239):
    for b in range(0,4212):
        newtab[a,b] = otocena[a+1013,b+1574]
hdu = pf.PrimaryHDU(newtab)
hdu.writeto('namodelovane6920.fits')
hdulist1 = pf.open('j8fk01010_drz.fits')
scidata1 = hdulist1[1].data
sci = rotate(scidata1, 33)
odcitana = scidata1 - newtab
hdu = pf.PrimaryHDU(odcitana)
hdu.writeto('odcitana6920.fits')
```

## 04 Kingov model pre jadro galaxie

```
import math as m
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import trapz
from scipy import special
from scipy.ndimage.interpolation import rotate
import pyfits as pf
A = 0.00000053 #parametre
B = 31000.0
M = 0.001
zeta2 = B/M
ro1 = A*M*((2.0*m.pi*zeta2)**(1.5))
G = 6.67e-11
def f(v,r):
    u = v[0]
    y = v[1]
    pre = -4.0*m.pi*G*(ro1/zeta2)
    ex = m.exp(y)
    sqr = m.sqrt(y)
    err = m.erf(sqr)
    f0 = pre*(ex*err-2.0*sqr*m.sqrt(1.0/m.pi)*(1.0+(2.0/3.0)*y))-(2.0/r)*u
    f1 = u
    return [f0,f1]
u0 = 0 #okrajove podmienky
y0 = 16.0
v0 = [u0,y0]
r_t = 3.5e5
r = np.linspace (1e-10, r_t, 4610)
yy = odeint(f, v0, r, mxstep = 100000)
y = yy[:,1]
expy = np.exp(y)
sqrty = np.sqrt(y)
ro = ro1*(expy*special.erf(sqrty)-2.0*sqrty*(1.0/m.sqrt(m.pi))*(1.0+(2.0/3.0)*y))
np.clip(ro, 0, 1e20, out=ro)
delta_x = r[1]-r[0]
R = np.linspace (0,r_t-(0.01*r_t), 4610)
delta_R = R[1]-R[0]
tmp_ro = ro
tmp_r = r
epsilon = np.array([])
for i in range(0,len(R)):
    multiplier = tmp_r/(((tmp_r*tmp_r)-(R[i]*R[i]))**0.5)
    integrand = tmp_ro*multiplier
    g = 2.0*trapz(integrand,dx=delta_x)
    epsilon = np.append(epsilon, g)
    tmp_ro = np.delete(tmp_ro, 0)
    tmp_r = np.delete(tmp_r, 0)
```

```
epsilon = epsilon**32e-14
table1 = np.zeros ((3500,3000))
for a in range(0,3500):
    for b in range(0,3000):
        R_i = round(m.sqrt(a*a+b*b))
        table1[a,b] = epsilon[R_i]
table2 = np.fliplr(table1)
table3 = np.hstack((table2,table1))
table4 = np.flipud(table3)
table = np.vstack((table4,table3))
rotab = np.zeros((4200,6000))
matrix = np.array([[0.6,0],[0,1]])
u = np.array([[0],[0]])
for i in range(0,7000):
    for j in range(0,6000):
        v = np.array([[i],[j]])
        u = np.dot(matrix,v)
        rotab[round(u[0,0]),round(u[1,0])] = table[i,j]
newtab = np.zeros((4239,4212))
for a in range(0,4239):
    for b in range(0,4212):
        newtab[a,b] = otocena[a+1013,b+1574]
hdu = pf.PrimaryHDU(newtab)
hdu.writeto('namodelovane325.fits')
hdulist1 = pf.open('j8fk01010_drz.fits')
scidata1 = hdulist1[1].data
sci = rotate(scidata1, 33)
odcitana = scidata1 - newtab
hdu = pf.PrimaryHDU(odcitana)
hdu.writeto('odcitana325.fits')
```

# Zoznam použitej literatúry

- [1] H. Arp. *Atlas of peculiar galaxies*. Astrophysical Journal Supplement, 14:1-+, 11 1966.
- [2] J. Binney a M. Merrifield. *Galactic Astronomy*. Princeton University Press, 1998.
- [3] G. Canalizo et al. *Spectacular shells in the host galaxy of the QSO MC2 1635+119*. Astrophysical Journal, 669:801-809, 11 2007.
- [4] D. Carter, D. A. Allen, D. F. Malin *Nature of the shells of NGC1344*. Nature, 295:126-128, 1 1982.
- [5] C. Dupraz a F. Combes *Shells around galaxies: testing the mass distribution and the 3-D shape of ellipticals*. Astronomy and Astrophysics, 166:53-74, 9 1986.
- [6] Ebrova et al. *Shell galaxies: Dynamical Friction, Gradual Satellite Decay and Merger Dating*. Galaxy Wars: Stellar Populations and Star Formation in Interacting Galaxies ASP Conference Series Vol. 423, proceedings of a conference held 19-22 July 2009 at East Tennessee State University, Johnson City, Tennessee, USA. Edited by Beverly Smith, Nate Bastian, Sarah J. U. Higdon, and James L. Higdon. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2010., 236, 2010.
- [7] Ebrova et al. *Quadruple-peaked spectral line profiles as a tool to constraint gravitational potentials of shell galaxies*. Astronomy and Astrophysics, 545:A33, 9 2012.
- [8] A. C. Fabian, P. E. J. Nulsen, G. C. Stewart *Star formation in a galactic wind*. Nature, 287:613-614, 10 1980.
- [9] B. P. Fort et al. *Surface photometry of shell galaxies*. Astrophysical Journal, 306:110-121, 7 1986.
- [10] L. Hernquist a P. J. Quinn *Formation of shell galaxies. I. Spherical potetials*. Astrophysical Journal, 331:682-698, 8 1988.
- [11] L. Hernquist a P. J. Quinn *Formation of shell galaxies. II. Nonspherical potetials*. Astrophysical Journal, 342:1-16, 7 1989.
- [12] E. P. Hubble. *Extragalactic nebulae*. Astrophysical Journal, 64:321-369, 12 1926.
- [13] L. Jilkova. *Kinematika a dynamika galaxiı*. Diplomova praca. Masarykova univerzita, Prırodovedecka fakulta.
- [14] I. R. King. *The structure of star clusters. III. Some simple dynamical models*. Astronomical Journal, 71:64-75 2 1966

- [15] D. F. Malin a D. Carter *A catalog of elliptical galaxies with shells*. *Astrophysical Journal*, 274:534-540, 11 1983.
- [16] W. D. Pence *Spectrophotometry of shell galaxies*. *Structure and Dynamics of Elliptical Galaxies*, 127:463-+, 1987.
- [17] J. -L. Prieur *The shell system around NGC 3923 and its implications for the potential of the galaxy*. *Astrophysical Journal*, 326:596-615, 3 1988.
- [18] J. -L. Prieur *Status of shell galaxies*. *International Conference on Dynamics and Interactions of Galaxies*, 72-83, 1990.
- [19] P. J. Quinn *On the formation and dynamics of shells around elliptical galaxies*. *Astrophysical Journal*, 279:596-609, 4 1984.
- [20] F. Schweizer *An optical study of the giant radio galaxy NGC 1316 /Fornax A/*. *Astrophysical Journal*, 237:303-318, 4 1980.
- [21] G. Sikkema et al. *HST/ACS observations of shell galaxies: inner shells, shell colours and dust*. *Astronomy and Astrophysics*, 467:1011-1024, 6 2007.
- [22] R. C. Thomson a A. E. Wright *A weak-interaction model for shell galaxies*. *Monthly Notices of the Royal Astronomy Society*, 247:122-+, 11 1990.
- [23] R. E. Williams a W. A. Christiansen *Blast wave formation of the extended stellar shells surrounding elliptical galaxies*. *Astrophysical Journal*, 291:80-87, 4 1985.
- [24] [http://betelgeuse.altervista.org/images/Im\\_Art/Hubble\\_sequence\\_photo.png](http://betelgeuse.altervista.org/images/Im_Art/Hubble_sequence_photo.png)  
Citované 28.4.2013
- [25] [http://www.britastro.org/vss/ccd\\_photometry.htm](http://www.britastro.org/vss/ccd_photometry.htm)  
Citované 5.3.2013
- [26] <http://en.wikipedia.org/wiki/Median>  
Citované 5.3.2013
- [27] <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>  
Citované 5.3.2013

