

MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

PLOŠNÁ FOTOMETRIE ELIPTICKÝCH
GALAXIÍ

KATEŘINA BARTOŠKOVÁ

BRNO 2007

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně, za použití uvedené literatury a podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

.....
Kateřina Bartošková
V Brně dne 25. května 2007

Za obrovskou pomoc, morální oporu a za celkové množství času věnovanému této práci děkuji vedoucímu bakalářské práce Filipu Hrochovi.

This work has made use of data from The Galaxy Catalog, published by Princeton university and created by Zsolt Frei and James E. Gunn, research was supported in part by NSF through grant No. AST 9100121.

This work has made use of data from Nearby Galaxy Survey programme, conducted at Konkoly Observatory, Hungary, supported by Hungarian OTKA Grant No. T034615.

Based on observations made with the NASA/ESA Hubble Space Telescope, obtained from the data archive at the Space Telescope Institute. STScI is operated by the association of Universities for Research in Astronomy, Inc. under the NASA contract NAS 5-26555.

Anotace Bakalářská práce se zabývá plošnou fotometrií eliptických galaxií. První dvě kapitoly rozebírají vlastnosti eliptických galaxií a základy plošné fotometrie. Pozorování pěti galaxií ve filtru R byla uskutečněna na observatoři Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky Masarykovy univerzity v Brně. Tato práce používá také snímky z jiných dalekohledů včetně Hubblova vesmírného teleskopu. Eliptický tvar galaxií poskytuje možnost aproximovat isofotální strukturu elipsami a převést je na radiální rozložení jasu. Fotometrické profily eliptických galaxií jsou proloženy de Vaucoulerovým zákonem, známým také pod názvem $R^{1/4}$ zákon. Ten poskytuje celkem dobrý odhad radiálního plošného rozložení jasu normálních eliptických galaxií. V několika případech jsou s $R^{1/4}$ zákonem porovnávány další fotometrické modely.

Annotation. This bachelor thesis deals with surface photometry of elliptical galaxies. In the first two parts are mentioned general informations about elliptical galaxies and surface photometry. A sample of five galaxies has been observed in the R passband at the observatory of the Institute of theoretical physics and astrophysics of the Masaryk University in Brno. This paper also use frames from other telescopes including Hubble Space Telescope as well. Elliptical shape of galaxies provides oportunity to fit ellipses to their isophotal structure and devolve them into radial distribution. Photometric profiles of elliptical galaxies are fitted to the de Vaucouleurs' law, also known as the $R^{1/4}$ law. This provides resonably good approximation to radial surface brightness distribution of general elliptical galaxies. In several cases other photometric models are compared to $R^{1/4}$ law.

Obsah

Úvod	3
1 Galaxie	4
1.1 Ostrůvky vesmíru	4
1.1.1 Mléčné katalogy	4
1.1.2 Rozdělení galaxií	5
1.2 Eliptické galaxie	6
1.2.1 Eliptická a trpasličí eliptická sekvence	7
2 Úvod do fotometrie eliptických galaxií	10
2.1 Astronomická fotometrie	10
2.1.1 Hvězdná velikost	10
2.1.2 Kalibrace	12
2.2 Plošná fotometrie eliptických galaxií	13
2.2.1 de Vaucouleursův zákon	13
2.2.2 Tam kde $r^{1/4}$ zákon selhává	15
2.2.3 Výpočet konstanty k pro $1/4$ zákon	16
3 Pozorování galaxií a zpracování snímků	18
3.1 Úvod	18
3.1.1 Observatoř MonteBoo	18
3.2 Eliptické galaxie v Brně	18
3.2.1 Pozorované galaxie	19
3.2.2 Kalibrační pole	21
3.3 Zpracování pořízených snímků	21
3.4 Snímky z dalších dalekohledů	22
3.4.1 Lowell	22
3.4.2 Konkoly	22
3.4.3 HST	23
4 Fitování elips na eliptické galaxie	25
4.1 Úvod do problematiky	25
4.1.1 Transformace souřadnic	26
4.2 První přiblížení	27
4.2.1 Momentová metoda	27
4.2.2 Problém hvězd	29
4.3 Přesnější fitování elipsy	30
4.3.1 Metoda nejmenších čtverců	30

4.3.2	B2AC	30
4.3.3	Výběr dat	32
4.3.4	Chyby metody nejmenších čtverců	33
4.4	Výsledky fitování elips pomocí obou metod	33
5	Získané poznatky z plošné fotometrie eliptických galaxií	35
5.1	Programový základ pro plošnou fotometrii galaxií	35
5.1.1	Fitování elips	35
5.1.2	Vykreslování fotometrických profilů	36
5.2	Získané informace o eliptických galaxiích z fitování elips	36
5.2.1	Elipticita	37
5.3	de Vaucouleursův zákon	38
5.4	Fotometrické profily z různých pozemských dalekohledů	41
5.5	Centra eliptických galaxií	41
	Závěr	43
	Literatura	46
	A Přílohy	47

Úvod

V průběhu několika posledních desetiletí se naše chápání eliptických galaxií radikálně mění. Největší zásluhu na tom má pozorování uskutečněná pomocí Hubbleova vesmírného dalekohledu, která nám umožnila nahlédnout do oblastí vesmíru, pro pozemské pozorovatele nepřístupných. Oproti kdysi starým jednotvárným neaktivním a vůbec nezajímavým objektům se dnes zdají být eliptické galaxie mnohem komplexnějšími systémy. Studium jejich struktury a vlastností nám může poskytnout mnoho cenných informací o okolním vesmírném prostoru. Plošné rozložení jasu je mnohdy jediným vodítkem, které nám pak eliptické galaxie dávají k dispozici.

Tato práce se věnuje studiu rozložení plošného jasu eliptických galaxií na hlubokých CCD snímcích pomocí plošné fotometrie těchto objektů. K realizaci se používají nejen data napozorovaná v rámci této práce ale i snímky z dalších dalekohledů. Plošná jasnost objektů se aproximuje eliptickými křivkami a výsledné radiální průběhy jasu, tzv. fotometrické profily, se interpretují například pomocí de Vaucoursova zákona.

Kapitola 1

Galaxie

1.1 Ostrůvky vesmíru

Po dlouhou dobu se lidská pozornost ke galaxiím¹ nezaměřovala. Vzdálené objekty nemohly lidské oči zachytit, natož odlišit od hvězd. V pozdější době, po nástupu optických přístrojů, byly tyto mlhovinové útvary již běžně pozorovatelné, avšak jejich skutečná podstata zůstávala neodhalena. V polovině 18. století Immanuel Kant (1724 – 1804) a Thomas Wright (1711 – 1786) prohlásili, že **Mléčná dráha** (the Milky Way²) je vlastně rotující diskovité seskupení hvězd zaujímající ve vesmíru určitý prostor.

Velikost Galaxie³ se zdála být velikostí vesmíru. Ostatní galaxie se klasifikovaly jako mlhoviny neznámého původu. Kant však přišel s myšlenkou, že pokud je Galaxie omezena v rozloze, tak jsou možná některé rozlehlé a slabé eliptické mlhoviny velmi vzdálené diskovité systémy, podobné Galaxii, ale nacházející se daleko za jejími hranicemi. Kant tyto objekty nazýval vesmírné ostrovy (island universes).

1.1.1 Mléčné katalogy

Zájem o studování mlhovin vznikl částečně také zásluhou sestavených katalogů nehvězdných objektů. Mezi nejstarší a nejpoužívanější katalogy dodnes, podle nichž se označení používá i v této práci, patří Messierův katalog a New General Catalogue.

Messierův katalog obsahuje celkem 110 položek. Jméno každé položky začíná písmenem M a pak následuje číselné označení podle pozice v katalogu (např. M31). Sestavil jej francouzský astronom Charles Messier (1730 – 1817) za účelem vytvořit seznam mlhovinových stálých objektů, které se tehdy mohly při pozorování komet za komety zaměnit. Jeho finální seznam, obsahující pozorování i jiných astronomů, například Pierre Méchaina, obsahoval 103 objektů a byl vydán v roce 1781. Později byly přidány další položky, které Messier s Méchainem pozorovali, ale z neznámých důvodů do katalogu nezařadili.

New General Catalogue čítá mnohonásobně větší počet nehvězdných objektů (celkem 7840 záznamů). Jednotlivé objekty se označují zkratkou NGC a následujícím číslem opět podle pořadí v katalogu. Katalog sestavil a vydal v roce 1888, irský astronom J. L. E. Dreyer (1852–1926). Učinil tak na objednávku Královské astronomické společnosti. V příštích letech vydal ještě dva doplňkové seznamy IC I a IC II (Index Catalogue I a II), které dohromady s NGC katalogem obsahují kolem 13 tisíc položek.

¹z řeckého *kyklos galaktikos* (mléčný kruh).

²Poprvé v anglické literatuře použil pojem Milky Way anglický básník a filozof Geoffrey Chaucer.

³pojem Galaxie v této práci označuje galaxii ve které se momentálně nacházíme.

1.1.2 Rozdělení galaxií

O postavení některých mlhovin neznámého původu jako relativně samostatných gravitačně vázaných systémů, nalézajících se mimo Galaxii, definitivně rozhodl rok 1923, kdy Edwin Hubble (1889–1953) detekoval proměnné hvězdy typu δ Cephei v galaxii M31. Pomocí modulu vzdálenosti cefeid ($m - M$) určil vzdálenost M31 na 285 kpc⁴ a posunul tak její pozici daleko za tehdy známé hranice. Z pozorování dalších podobných objektů vyšlo najevo, že Galaxie je jen jedna z mnoha obrovských hvězdných uskupení.

Velký počet rozdílně vypadajících galaxií vedl k potřebě tyto objekty jistým způsobem třídit. Nejstarší rozdělení galaxií ustanovil již Edwin Hubble. Rozdělil galaxie jednoduše podle pozorovaného vzhledu na **eliptické** (zkrácené označení E), **spirální** (S) a **iregulární** (irregular, nepravidelné, Irr nebo Ir). Spirální galaxie byly později ještě rozčleněny na **normální spirální** (S nebo SA) a **spirální s příčkou** (SB). Pro galaxie nalézající se na pomezí mezi spirálními a eliptickými skupinami se zavedlo označení **lentikulární** (lenticular, čočkovité, označení S0 nebo SB0).

Spirální typy galaxií se zjednodušeně poznají podle dobře rozlišitelných struktur, podle tzv. **spirálních ramen**, nalézajících se ve zploštělé vnější části, **disku** galaxie. Dále obsahují velmi jasnou centrální vypouklou oblast, galaktickou **výduť**. Spirální ramena galaxií s příčkou nezačínají přímo od centra, ale navazují na rozlehlý pruh hvězd, na tzv. **příčku**. Obě spirální skupiny jsou členěny na tři poddruhy podle poměru jasnosti galaktické výdutě a disku a podle míry zatočení (rozevření) spirálních ramen (k označení se přidávají malá písmena a-c, například Sb, SBc).

Eliptické galaxie, které mají eliptický tvar bez zjevných výrazných struktur, se rozlišují podle elipticity pozorovaného tvaru (například E0 pro kulaté, nebo E7 pro velmi protáhlé galaxie). Irregulární galaxie se začaly také dělit, a to na dva poddruhy. Na typ Irr I, jenž označuje galaxie, které si zachovaly alespoň nějaký náznak uspořádání a na Irr II, které jsou kompletně rozrušené.

Z těchto druhů a skupin složil Hubble morfologickou sekvenci ve formě diagramu, známého dnes pod označením Hubblův vývojový diagram (tunnig-fork diagram). Mylně se domníval, že se dá interpretovat jako vývojová posloupnost galaxií. Galaxie v levé části diagramu (eliptické) považoval za rané typy (early types) a pravou část diagramu (spirální skupiny) interpretoval jako pozdní vývojové typy (late types). Jeho základní rozdělení galaxií se používá dodnes. Dokonce i termíny early types a late types se objevují zcela běžně v souvislosti s určitou základní skupinou galaxií.

Postupem času se diagram modifikoval a začaly vznikat i další dělení. Pro spirální galaxie zavedl Sidney van den Bergh tzv. **luminózní třídu** (luminosity class)⁵, s označením I–V, která třídí galaxie podle výraznosti spirálních ramen (I–velmi dobře viditelná ramena). Další modifikaci uskutečnil Gerard de Vaucouleurs (1918–1985), když změnil klasifikaci irregulárních galaxií. Méně nepravidelné uskupení Irr I zařadil do spirálních skupin jako poddruhy Sd a Sm (SBd a SBm), které následují v diagramu za galaxiemi typu Sc (SBc). Předešlé Irr II galaxie pak dostaly označení Ir (nebo amorphous). Některé pozdní typy spirálních skupin a malé eliptické galaxie jsou označovány pro svou menší velikost jako **trpasličí** (dwarf, přidává se malé písmeno d, např. dSa, dE2). Pro subjekty, vykazující jisté odlišnosti od popsaného chování a tvarů běžných zastupitelů v zařazeném poddruhu, se používá dále ještě předpona pec (peculiar, podivný).

Hubblova klasifikace je jistou možností jak galaktické objekty rozčlenit, ale bere v úvahu

⁴Dnes je vzdálenost galaxie M31 určena na 770 kpc.

⁵Toto dělení však nekoresponduje s absolutní magnitudou objektu.

jen některé vlastnosti pozorovaných galaxií. Další nevýhodou této klasifikace je to, že je v podstatě založena na optickém pozorování a nezahrnuje tedy poznatky získané později po zpřístupnění ostatních spektrálních oborů. Při bližším pohledu se galaxie jeví mnohem komplexnějšími a záhadnějšími, než se na první pohled zdálo.

Zkoumání a rozlišování galaxií není zdaleka u konce. Neustále se vydávají novější revidované katalogy, shrnující doposud získané informace o galaxiích a jejich klasifikaci. Tato práce využívá informací ze dvou takových katalogů ([1], [2]).

1.2 Eliptické galaxie

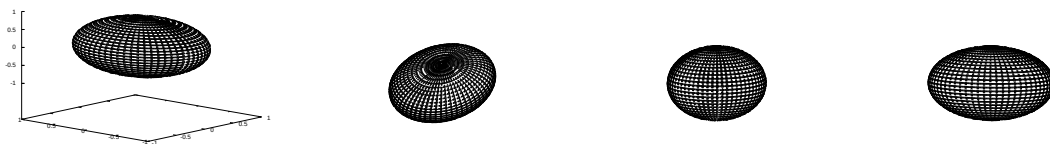
Mezi eliptické galaxie se řadí velká skupina rozdílných galaktických objektů, které mají několik společných rysů. Při pozorování z velké vzdálenosti připomínají, jak již název napovídá, plochu elipsy s relativně hladkým, rovnoměrně rozloženým jasem, spojitě klesajícím směrem od centra.

Od spirálních typů se eliptické galaxie liší převážně svým celkovým vzhledem. Jedná se o objekty připomínající tvar elipsoidu s obecně třemi rozdílnými osami. Nevykazují tedy rozdělení na zploštělou diskovitou část a kulovitou centrální výduť, jak je tomu u spirálních galaxií. Při projekci (pozorování ze Země) na nebeskou rovinu pak pozorujeme elipsu, která může, v závislosti na natočení galaxie směrem k pozorovateli, nabývat mnoha různých tvarů (**ellipticity**) a sklonů. Pro výpočet ellipticity platí vztah

$$\epsilon = 1 - b/a, \quad (1.1)$$

kde a je hlavní a b vedlejší poloosa pozorované elipsy. Poddruhové číselné označení galaxie Hubblovy klasifikace se pak určí jako $10 \cdot \epsilon$. Tímto způsobem se eliptické galaxie dělí do osmi podskupin (E0–E7)⁶.

S tvarem souvisí pohyb hvězd v galaxii. Rychlost pohybu každé hvězdy se dá rozdělit na dvě komponenty: na pomalou rotaci kolem hlavních os objektu a na náhodný pohyb (random motion). Zatímco u spirálních galaxií je velmi výrazná rotace disku v hlavní rovině galaxie a náhodná složka je znatelně menší, u eliptických galaxiích je tomu naopak. Rotace kolem hlavních os objektu je velmi pomalá a ve většině případech dominuje druhá náhodnější komponenta pohybu. Hvězdy se chovají podobně jako atomy nebo molekuly v plynu.



Obrázek 1.1: Tentýž elipsoid (poměry os jsou 7:9:8) vykreslený z několika různých pohledů.

Eliptické galaxie mají velmi málo mezihvězdného materiálu, ze kterého se obvykle vytvářejí nové hvězdy. Jsou tedy dost chudé na počet mladých hvězd a obsahují převážně starší hvězdy II. populace. Mezi obry eliptických galaxií dominují červení obři, výskyt

⁶Eliptická galaxie s ellipticitou $\epsilon > 0.7$ nebyla pozorována.

modrých obrů je téměř mizivý. To způsobuje trochu červenější nádech, než mají spirální typy galaxií. S malým počtem vzniklých hvězd se spojuje i malý výskyt otevřených hvězdokup, o kterých se soudí, že jsou tvořeny hlavně mladými hvězdami. Větší poddruhy eliptických galaxií mají rozsáhlý systém kulových hvězdokup, což také dokazuje starší hvězdné složení.

Novější poznatky ze studia struktury eliptických galaxií však naznačují, že většina normálních eliptických galaxií obsahuje mnohem více mezihvězdného prachu a plynu, než se na první pohled jeví. Plynné oblasti se ale vyskytují buď ve velice horkých formách ionizovaného nebo dvakrát excitovaného vodíku, nebo v chladné formě H I a pozorují se převážně jen ve spektrálních oborech, které jsou lidské zvědavosti k dispozici teprve několik posledních desetiletí (rentgenový obor, H_α , 21 cm). Eliptické galaxie obsahují i významné množství mezihvězdného prachu, uspořádaného ve volně natočených pruzích nebo prstencích s ohledem na optické osy galaxie. Tyto pruhy prachu se pozorují převážně v optických a infračervených vlnových délkách.

1.2.1 Eliptická a trpasličí eliptická sekvence

Rozdělení eliptických galaxií podle elipticity není dostačující a někdy je dokonce, z důvodu natočení galaxie k pozorovateli, spíše matoucí. Další možnost, jak galaxie mezi sebou rozlišit, je rozdělení podle velikosti (hmotnosti) objektů. Rozlišují se tedy galaxie nejen podle této vlastnosti, ale i podle dalších fyzikálních charakteristik, jako je tok přicházejícího záření, absolutní hvězdná velikost objektu, poměrné zastoupení oblastí mezihvězdného prachu a plynu, počet kulových hvězdokup apod. Velmi oblíbeným se stalo určování poměru hmotnosti k celkovému zářivému toku, vyjadřující zastoupení nezářivé temné hmoty v galaxii, která svou hmotností gravitačně působí na ostatní zářivé složky.

Vzniklo tedy několik druhů eliptických galaxií, na Hubblově klasifikaci nezávislých, které slučují objekty s podobnými fyzikálními vlastnostmi. Při bližším zkoumání se však všechny dají rozdělit do dvou hlavních sekvencí: do normální eliptické větve a trpasličí větve. Mezi klasické eliptické galaxie patří cD (cD), normální eliptické (E) a někdy také lentikulární galaxie (S0). Mezi trpasličí se řadí trpasličí eliptické (dE), trpasličí sférické (dSph) a modré kompaktní trpasličí galaxie (BCD).

Toto dvoudělení má velmi silné opodstatnění. Zjistilo se totiž, že trpasličí typy eliptických galaxií vykazují vlastnosti vcelku odlišné od klasické eliptické definice a někdy dokonce i příbuzné s pozdními spirálními poddruhy (Sd, Sm). Na druhou stranu se zase často galaxie S0 (SB0) přidružují, a to i přes svůj zploštělý charakter, k eliptickým skupinám.

druh:	M_B [mag]	m [$M_\odot$]	r [kpc]	M/L_B [$M_\odot/L_\odot$]
S0	-17 až -22	10^{10} až 10^{12}	10 až 100	~ 10
cD	-22 až -25	10^{13} až 10^{14}	300 až 1000	> 100
E	-15 až -23	10^8 až 10^{13}	1 až 200	10 až 100
dE	-13 až -19	10^7 až 10^9	1 až 10	~ 10
dSph	-8 až -15	10^7 až 10^8	0.1 až 0.5	5 až 100
BCD	-14 až -17	$\sim 10^9$	< 3	0.1 až 10

Tabulka 1.1: Charakteristické vlastnosti galaxií všech uvedených typů (převzato z [3]). V tabulce se uvádí zleva absolutní hvězdná velikost objektu ve filtru B (M_B), hmotnost v hmotnostech slunečních (m), průměr galaxie (r), poměr hmotnosti k zářivému toku (M/L_B)

cD galaxie (cD galaxies)

Objekty tohoto typu jsou řazeny mezi největší a nejzářivější galaxie vůbec. Nalézají se v centrech velkých kup galaxií s vysokou koncentrací členů. Písmeno "D" v názvu označuje difuzní objekty (rozptýlené, diffuse), zatímco písmeno "c" pochází ze staršího spektroskopického označení pro veleobry (supergiants).

Typ D (diffuse) mají mimo jiné i tzv. D galaxie, jenž jsou na první pohled velmi podobné běžným velkým eliptickým galaxiím, ale jejich intenzita záření, převážně ve vnějších částech, klesá se vzdáleností od centra galaxie mnohem pomaleji. cD galaxie jsou výrazně větší a jasnější objekty, ale i u nich je patrný menší sklon poklesu intenzity záření. Zdá se tedy, že D a cD galaxie obsahují jisté difuzní halo, které ovlivňuje vzhled fotometrického profilu. Poměr hmotnosti a zářivého toku celé cD galaxie nabývá velmi vysokých (v řádu stovek) hodnot, což nejspíše svědčí o přítomnosti velkého množství nesvítivé temné hmoty.

Studium cD galaxií je velmi užitečné. Pro svou vysokou zářivost s relativně úzkým rozsahem jasností a obrovským počtem kulových hvězdokup se používají k určování mezigalaktických vzdáleností jako tzv. **standard candles** (standardní svíčky). Jejich obrovská hmotnost a zvláštní postavení mezi galaxiemi (tzv. centrum) poskytuje cenné podněty pro teorie zabývající se dynamikou galaktických skupin a pro studium událostí ve vývoji galaxií a galaktických kup. V dnešní době nabývá na oblíbenosti tvrzení, že se tyto objekty utvářejí **galaktickým kanibalismem** (galactic cannibalism), tedy postupným spojováním s mnohem menšími galaxiemi.

Normální eliptické galaxie (Normal elliptical galaxies)

Mezi normální eliptické galaxie se řadí skupina objektů s rozsáhlou škálou charakteristik, které však z klasické eliptické větve nevybočují. Podle velikosti (nebo také zářivosti) se dále člení na obří eliptické (giant ellipticals, gE), středně zářivé eliptické (intermediate-luminosity ellipticals, E) a na kompaktní eliptické galaxie (compact ellipticals, cE).

Všechny vykazují několik společných rysů. Jedná se o centrálně zhuštěné objekty s relativně vysokou plošnou jasností. Obsahují celkem velký počet kulových hvězdokup a s tím spojenou převážně starší populaci hvězd. Občas se k normálním eliptickým přidružují také lentikulární galaxie.

Lentikulární galaxie (Lenticular galaxies)

Lentikulární galaxie⁷ se obecně označují jako S0 (nebo SB0), řadí se tedy spíše mezi spirální galaxie (nebo spirální galaxie s příčkou). Vykazují však vlastnosti na hranici mezi eliptickými a spirálními skupinami. Je u nich patrný zploštělý disk a galaktická centrální výduť, nemají ale spirální strukturu a ani neobsahují významné množství mezihvězdného materiálu (oblasti mezihvězdného prachu a plynu). Skládají se převážně ze starších hvězd II. populace. Díky tomu se při pozorování lentikulární galaxie, která je k nám natočena čelem, nedá mnohdy s určitostí říci, zda je typu E nebo již S0.

Trpasličí eliptické galaxie (Dwarf elliptical galaxies)

Jedná se o druh galaxií odlišného charakteru, než je u normálních eliptických skupin běžné (běžně očekávané). Jak název napovídá, jsou to relativně malé galaktické objekty. Některé jsou však i velikostně srovnatelné s kompaktními eliptickými galaxiemi. Jejich povrchová

⁷Tyto galaxie, při pohledu z boku, připomínají čočku, odtud jejich název: Lenticular (čočkovitý)

jasnost je ale o mnoho menší než povrchová jasnost kompaktních galaxií, při stejné absolutní hvězdné velikosti. Většina pozorovaných objektů trpasličí větve jsou členové místní skupiny galaxií.

Mimo jiné jsou tyto ponuré galaxie obvykle chudé na mezihvězdný prach a plyn. Dřívější domněnka, že eliptické skupiny obsahují málo nebo žádné plynné a prachové oblasti, platí tedy spíše na trpasličí větev. Pokud chceme nalézt zástupce této skupiny, budeme mít nejspíše štěstí, když budeme hledat v blízkosti velkých eliptických a spirálních galaxií. Jsou jim totiž neodlučitelnými společníky.

Trpasličí sféroidní galaxie (Dwarf spheroidal galaxies)

Trpasličí sféroidní galaxie vykazují ještě mnohem menší plošnou jasnost, a vůbec nižší celkový tok záření, než typičtí trpasličí představitelé. Jedná se o málo rozměrné objekty bez galaktického jádra, spíše kulovitějšího tvaru. Z tohoto důvodu se často srovnávají s běžnými kulovými hvězdokupami. Liší se od nich však v několika ohledech. Větší poměr hmotnosti k zářivému výkonu galaxie ukazuje na větší množství temné hmoty. Platí také, na rozdíl od kulových hvězdokup, že s nižší jasností galaxie tento poměr stoupá.

Tyto galaxie se skládají ze dvou základních hvězdných skupin, z velmi starých na kovy chudých hvězd a ze středně staré populace (stárí tak kolem 1 – 10 miliard let). To ukazuje na několik etap hvězdných formování. V dnešní době však jsou tyto galaxie obvykle chudé na oblasti mezihvězdného plynu.

Modré kompaktní trpasličí galaxie (Blue compact dwarf galaxies)

Velmi zajímavé jsou také menší trpasličí galaxie s modravým nádechem. Ten získaly díky přítomnosti velmi hmotných horkých hvězd a ionizovaného plynu, zářícího převážně v ultrafialové oblasti. Mezihvězdného plynu obsahují na trpasličí podskupinu až nadbytek (kolem 15% hmotnosti celé galaxie), jedná se převážně o plyn ve formě H I a H II.

Malé stárí a velká hmotnost hvězdné populace indikuje nedávné prudce vyvolané utváření nových hvězd. To bylo způsobeno nejspíše obrovským výbuchem supernovy, který pak otrásl celou galaxií. Někdy natolik silným, že rozrušil strukturu celého objektu, který se pak řadí už spíše k iregulárním skupinám trpasličích galaxií.

Poznátky této kapitoly byly čerpány převážně z literatury [3], [4], [5], [6], [7], [8].

Kapitola 2

Úvod do fotometrie eliptických galaxií

2.1 Astronomická fotometrie

Eliptické galaxie vyzařují ve většině oborech elektromagnetického spektra. Ideálně bychom mohli zkoumat jejich celkovou vyzářenou energii v závislosti na vlnové délce záření. Její určení nám ale znemožňuje několik faktorů. Při pozorování ze Země není možné nebo je velmi obtížné některé spektrální obory detekovat. Zemská atmosféra ovlivňuje procházející záření dosti výrazným způsobem. Další překážkou, které se nezbavíme ani při pozorování mimo atmosféru, je rozdílná citlivost detektorů záření pro různé vlnové délky. Z tohoto důvodu se měří jasnosti objektů jen v určitých intervalech vlnových délek (pomocí fotometrických filtrů).

Přicházející záření detekované na ploše detektoru za určitý čas a v určitém intervalu vlnových délek (filtru) se nazývá zářivý tok. Ten se ve standardních jednotkách vyjadřuje jako

$$\frac{F_{\text{filtr}}}{\text{W} \cdot \text{m}^{-2}}. \quad (2.1)$$

Je zřejmé, že pro rozdílné spektrální obory může obecně zářivý tok nabývat různých hodnot. Měřením relativních toků záření (jasností) objektů ve filtrech optického a infračerveného oboru pomocí CCD detektoru se zabývá astronomická fotometrie.

2.1.1 Hvězdná velikost

Pro měření jasnosti objektů byla zavedena logaritmická jednotka toku přicházejícího záření, tzv. hvězdná velikost. Důvody zavedení jsou převážně historické, kdy první astronomové rozlišovali hvězdy podle jasnosti jediným pozorovacím přístrojem, který mají lidé odjakživa a vždy k dispozici, a to lidským zrakem. Vnímání a zpracovávání obrazu se v tomto případě uskutečňuje pomocí logaritmické stupnice. Nejjasnějším hvězdám se přiřazovala hvězdná velikost 1 a těm nejslabším, ještě lidským okem rozeznatelným, hvězdná velikost 6. Jedná se však o velmi subjektivní stanovení, jelikož záleží na zrakových dispozicích a psychickém rozpoložení a na pozorovacích podmínkách. Dnes se již samozřejmě používá přesnější definice této veličiny.

Hvězdná velikost¹ je definována prostřednictvím Pogsonovy rovnice, kdy porovnáváme poměry toků záření ze dvou svítících objektů. Rozdíl hvězdných velikostí dvou hvězd, kde

¹Ačkoliv se jedná o bezrozměrnou veličinu, přiřazuje se hvězdné velikosti jednotka mag (magnituda).

tok záření z jedné hvězdy je stokrát vyšší než z hvězdy druhé, je 5 mag, tedy

$$\frac{f_2}{f_1} = 100^{(m_1 - m_2)/5}, \quad (2.2)$$

$$\Rightarrow m_1 - m_2 = -2.5 \log_{10} \frac{f_1}{f_2}, \quad (2.3)$$

kde f_1, f_2 jsou toky záření srovnávaných hvězd a m_1, m_2 jejich hvězdné velikosti.

Absolutní hvězdná velikost

Pozorovaný tok záření závisí nejen na vlastní jasnosti objektu, ale také na jeho vzdálenosti od Země. Zavedením absolutní hvězdné velikosti můžeme porovnávat skutečné jasnosti hvězd. Jedná se o hvězdnou velikost objektu, kterou bychom určili, kdyby byl od Země vzdálen 10 pc. Pro podíl dvou toků z téhož objektu, měřených z různých vzdáleností, platí

$$\frac{f_1}{f_2} = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2. \quad (2.4)$$

Pokud tedy známe vzdálenost daného objektu v parsecích, můžeme určit jeho absolutní hvězdnou velikost. Definice hvězdné velikosti v tomto případě se napíše jako

$$100^{(m-M)/5} = \frac{f_{10}}{f} = \left(\frac{r}{10\text{pc}} \right)^2, \quad (2.5)$$

kde m, M jsou zdánlivá a absolutní hvězdná velikost objektu, r jeho vzdálenost a f_{10} tok záření téhož objektu, nalézající se ve vzdálenosti 10 pc. Rozdíl $m - M$ se říká modul vzdálenosti a obvykle se píše ve tvaru

$$m - M = 5 \log_{10} r - 5, \quad (2.6)$$

což je samozřejmě ekvivalentní k (2.5).

Plošná hvězdná velikost

Doposud jsme porovnávali celkové jasnosti. U hvězd, jakožto aproximativně bodových objektů, je tento postup na místě. Galaxie jsou však rozlehlé a složitě strukturované. Mimo jejich celkovou jasnost můžeme studovat i tok záření přicházející z jednotlivých částí, nebo i z každého rozlišitelného bodu galaxie (pixelu na snímku). Intenzita I , měřená z jednoho pixelu je vlastně tok záření na jednotku plochy tohoto pixelu, neboli plošná jasnost. Hvězdná velikost odpovídající této intenzitě je plošná hvězdná velikost μ .

Jelikož se vzdálenosti objektu od pozorovatele se mění nejen tok záření, ale i prostorový úhel, z kterého záření přichází, je výhodné, uvádět plošnou hvězdnou velikost právě v jednotkách $\text{mag} \cdot \text{arcsec}^{-2}$. Pogsonova rovnice pro plošnou hvězdnou velikost porovnávanou s obecnou hvězdnou velikostí se pak určí jako

$$\mu = m_0 - 2.5 \cdot \log_{10} \frac{\xi}{F_0}, \quad (2.7)$$

kde ξ je tok záření z jednotkové plochy (obvykle arcsec^2) a m_0 a F_0 jsou jisté referenční veličiny, například známá hvězdná velikost hvězdy a její celkový tok, nebo také již stanovená plošná hvězdná velikost pro určitý tok záření za jednotku plochy.

2.1.2 Kalibrace

Při pozorování vesmírných objektů ze Země je přichodí záření ovlivněno souhrnným vlivem atmosférických jevů (extinkce, světelné znečištění, rozptýlená oblačnost, fluktuace vzduchu apod.). Aby měla naměřená data obecnější charakter a dala se srovnávat s daty naměřenými v jiných podmínkách, je potřeba pozorování o tento vliv ošetřit.

Naměřené hvězdné velikosti objektů se pomocí diferenciální fotometrie se srovnávacími hvězdami zkalibrují na hvězdné velikosti, které by byly určeny při pozorování mimo zemskou atmosféru. Kdyby se jednalo o záření ze všech vlnových délek, vypočítali bychom tak bolometrickou hvězdnou velikost objektu. Jelikož však byla všechna pozorování prováděna jen ve filtru R, zabývá se tato podkapitola pouze kalibrací hvězdných velikostí v jednom filtru.²

Pro přesnou kalibraci se používá hvězdné pole kalibračního objektu (jedné hvězdy nebo více hvězd), u kterého je již hvězdná velikost v daném filtru co nejpřesněji změřená, například standardní pole jedné dobře změřené hvězdy (například viz. [9]) a nebo také pole hvězd v těsné blízkosti blazarů ([10]). Pokud pořídíme snímky objektu, který chceme kalibrovat a snímky kalibračního pole při stejných podmínkách³, můžeme výslednou hvězdnou velikost v tomto filtru určit poměrně snadným způsobem.

Pokud pořídíme snímky objektu, který chceme kalibrovat a snímky kalibračního pole při stejných pozorovacích podmínkách (v průběhu jedné noci), ve stejném filtru, se stejně dlouhými expozicemi a při stejném rozlišení, můžeme výslednou hvězdnou velikost v tomto filtru určit poměrně snadným způsobem.

Nejdříve zjistíme rozdíl mezi známou standardní hvězdnou velikostí kalibrační hvězdy a její instrumentální hvězdnou velikostí určenou pomocí aperturní fotometrie ve clonce. Součet všech intenzit ve clonce o poloměru A se převede na instrumentální hvězdnou velikost hvězdy například pomocí

$$m_{\text{clonka}} = 25 - 2.5 \log_{10} \sum_i \sum_j (I_{ij} - B) \quad \text{pro } \sqrt{(i_t - i)^2 + (j_t - j)^2} < A, \quad (2.8)$$

a rozdíl takto vypočítané hvězdné velikosti se stanovenou standardní hvězdnou velikostí určíme

$$\Delta m = m_{\text{clonka}} - m_{\text{standard}}. \quad (2.9)$$

Jelikož jsou oba snímky pořizovány při téměř totožných podmínkách⁴, můžeme určit výslednou hvězdnou velikost několika hvězd na druhém snímku jednoduše odečtením zjištěného rozdílu.

$$m_i = m_{i_{\text{clonka}}} - \Delta m. \quad (2.10)$$

Takto jsme zkalibrovali hvězdy. Tato práce se však věnuje fotometrii eliptických galaxií, proto nás zajímá kalibrace těchto objektů. Pokud známe plochu S , na které se na snímku galaxie nachází (jistým způsobem je to nová plocha clonky pro galaxii), můžeme nejlépe

²Mnohem přesnější by byla kalibrace provedená pomocí barevných indexů (tedy s užitím pozorování snímku pro kalibraci ve více filtrech) a pomocí měření atmosférické extinkce v místě pozorování. Oslabení přichodího světla totiž není ve všech vlnových délkách stejné a navíc dochází i k posunu maxima vyzařování.

³Stejnými podmínkami se myslí v průběhu jedné noci, ve stejném filtru, se stejně dlouhými expozicemi a při stejném rozlišení.

⁴Oba snímky obecně snímají pole hvězd o různých souřadnicích (jiná výška nad obzorem a azimut), mohou být tedy měřené intenzity v obou případech vlivem atmosférické extinkce oslabeny nestejně. Problém rozdílného oslabení intenzity se ale v tomto případě zanedbává a volí se alespoň kalibrační pole co nejbližší objektu, který chceme kalibrovat, abychom minimalizovali chybné určení výsledků.

z Pogsonovy rovnice určit celkovou hvězdnou velikost galaxie. Srovnáváme tedy celkovou intenzitu galaxie s intenzitou zkalibrované hvězdy (celková intenzita hvězdy určená ve clonce o poloměru A a v obou případech se používá stejné pozadí na snímku B). Platí-li podmínky ($\sqrt{(i_t - i)^2 + (j_t - j)^2} < A$) a $[(x_t - x), (y_t - y)] \in S$, kde $[i_t, j_t]$ je pozice těžiště hvězdy a $[x_t, y_t]$ centra galaxie, můžeme psát

$$m_{\text{galaxie}} = m_{\text{hvězdy}} - 2.5 \cdot \log_{10} \frac{\sum_{i,j} (I_{ij} - B)}{\sum_{x,y} (I_{xy} - B)}. \quad (2.11)$$

Při určování fotometrických profilů galaxií potřebujeme znát hvězdnou velikost na jednotku plochy jednotlivých pixelů v galaxii, tedy hvězdnou velikost na plochu prostorového úhlu. Tu získáme jednoduše tím, že porovnáváme pomocí diferenciální fotometrie intenzitu zkalibrované hvězdy s intenzitou jednoho pixelu

$$\mu_{\text{pixel}} = m_{\text{hvězdy}} - 2.5 \cdot \log_{10} \frac{\sum_{i,j} (I_{ij} - B) \cdot c^2}{(I_{\text{pixel}} - B)}, \quad (2.12)$$

kde c je měřítko jednoho pixelu, obvykle udávané v úhlových vteřinách.

2.2 Plošná fotometrie eliptických galaxií

Plošná fotometrie se zabývá popisem dvoudimenzionálního rozložení jasu rozlehlých (nebodových) objektů. Jedná se o jednu z nejučelnějších metod, jak studovat zářivé vlastnosti galaxií. Tato kapitola se snaží ve stručnosti teoreticky popsat některé metody a postupy studující plošné rozložení jasu eliptických galaxií, informace jsou čerpány především z [11], [4] a [12].

Předpokládáme-li, že je galaxie symetrická a zajímá nás radiální rozložení zářivé hmoty v galaxii, vykreslíme si tzv. **fotometrický profil**. Jedná se o graf závislosti plošné intenzity (plošné hvězdné velikosti) na vzdálenosti od centra měřeného objektu. Klasicky se veličiny vynášejí v jednotkách

$$\frac{\mu_{\text{filtr}}}{\text{mag} \cdot \text{arcsec}^{-2}} = f\left(\frac{r}{\text{arcsec}}\right). \quad (2.13)$$

Srovnáváním profilů bylo zjištěno, že jsou si eliptické galaxie vcelku podobné. Začaly tedy vznikat různé teoreticky, či empiricky založené modely, snažící se co nejlépe popsat rozložení svítivé hmoty v eliptických galaxiích. Podaří-li se nám úspěšně proložit fotometrický profil nějakou funkční závislostí, můžeme o tomto objektu získat mnoho cenných informací. Jedním z takových modelů je de Vaucouleursův $r^{1/4}$ zákon.

2.2.1 de Vaucouleursův zákon

Před více než padesáti lety publikoval Gérard de Vaucouleurs (1918 – 1995) jeden z nejdůležitějších poznatků fotometrie eliptických galaxií. Jedná se o zjištění, že fotometrické profily eliptických galaxií a centrální výdutě galaxií spirálních sledují tzv. $r^{1/4}$ zákon, jinými slovy radiální průběh plošného jasu závisí na $1/4$ mocnině vzdálenosti od centra objektu ($\mu \sim r^{1/4}$). Pokud bychom si tedy vynesli do grafu závislost $\mu = f(r^{1/4})$ a snažili se jí proložit nějakou křivkou, dostali bychom rovnici přímky

$$\mu(r) = A - Br^{1/4}. \quad (2.14)$$

Jelikož jsou nám mnohdy k dispozici pouze intenzity jednotlivých pixelů a neznáme přesnou plošnou hvězdnou velikost, je vhodné vyjádřit tento zákon také ve tvaru s radiální intenzitou

$$I(r) = K_1 \cdot 10^{-K_2 r^{1/4}}, \quad (2.15)$$

kde se konstanty K_1 , K_2 vyjadřují ve vztahu k jisté referenční intenzitě a adekvátnímu referenčnímu poloměru, například k centrální jasnosti objektu I_0 ve vzdálenosti r_0 od centra galaxie. Ukázalo se však, že obecně nejvhodnější je zápis $r^{1/4}$ zákona v matematicky ekvivalentním tvaru

$$I(r) = I_e e^{-7.6693((r/r_e)^{1/4}-1)}, \quad (2.16)$$

$$= I_e 10^{-3.3307((r/r_e)^{1/4}-1)}, \quad (2.17)$$

kde r_e je tzv. **efektivní poloměr**, I_e je efektivní intenzita odpovídající tomuto poloměru a konstanta 3.33 (respektive 7.67) se určuje tak, aby celková intenzita v rozsahu vzdáleností $r \in (0, r_e)$ odpovídala polovině celkové jasnosti objektu.⁵ Celkový tok přicházejícího záření se v případě, že je funkční závislost radiální intenzity dána právě $r^{1/4}$ zákonem, vypočítá jako

$$I_{\text{galaxie}} = \int_0^\infty I_e e^{-7.76((r/r_e)^{1/4}-1)} 2\pi r dr \doteq 7.22\pi r_e^2 I_e. \quad (2.18)$$

Pomocí definice efektivního poloměru a $r^{1/4}$ zákona můžeme z profilů získat další zajímavé informace o eliptických galaxiích. Průměrná intenzita části galaxie za efektivním poloměrem $\langle I \rangle_e$ se vypočítá jako

$$\langle I \rangle_e = \frac{1}{r_e} \int_0^{r_e} I_e e^{-7.76((r/r_e)^{1/4}-1)} dr \doteq 3.607 I_e. \quad (2.19)$$

Tok záření celého objektu se tedy pomocí $\langle I \rangle_e$ určí

$$I_{\text{galaxie}} = \langle I \rangle_e 2\pi r_e^2. \quad (2.20)$$

Z důvodu rozdílných pozorovacích podmínek je nejvhodnější převést funkční závislost intenzity galaxie na vzdálenosti od centra pomocí kalibrace na odpovídající závislost plošné hvězdné velikosti. Fotometrický profil galaxií se do grafu vynáší obvykle právě v těchto jednotkách. Pomocí Pogsonovy rovnice porovnáme efektivní intenzitu a plošnou efektivní hvězdnou velikost s intenzitou a plošnou hvězdnou velikostí, kterou chceme vypočítat

$$\mu = \mu_e - 2.5 \log_{10} \frac{I}{I_e}. \quad (2.21)$$

Odpovídající $r^{1/4}$ zákon se pak píše ve tvaru

$$\mu(r) = \mu_e + 8.325 \left(\left(\frac{r}{r_e} \right)^{1/4} - 1 \right). \quad (2.22)$$

Uvedený zákon předpokládá radiální průběh jasu, což u eliptických galaxií obecně neplatí. Oblasti stejné intenzity (isofoty) mívají přibližně symetrický eliptický tvar. Řešením je vypočítat parametry elips, odpovídající jednotlivým isofotám, a z nich určit adekvátní radiální průběh jasu, jaký by galaxie měla, kdyby byla kruhově symetrická. Pokud tedy například známe velkou a malou poloosu isofotální elipsy pro efektivní intenzitu, můžeme určit efektivní poloměr pomocí geometrického průměru

$$r_e = \sqrt{a_e b_e}. \quad (2.23)$$

⁵Za zjednodušeného předpokladu, že je galaxie kruhově symetrická a zákon platí ve všech vzdálenostech

2.2.2 Tam kde $r^{1/4}$ zákon selhává

I přes výborné výsledky de Vaucouleursova zákona, vykazují eliptické galaxie jistou rozmanitost v rozložení svítivé hmoty (tedy i ve vzhledech eliptických profilů), se kterou tento zákon nepočítá. Rozdíl mezi galaxiemi je například v jejich celkové jasnosti. Podle [11] je extrapolace pomocí $r^{1/4}$ zákona nejpřesnější u objektů s absolutní hvězdnou velikostí kolem $M_B = -21$ mag. Ostatní galaxie vykazují odchylky, převážně ve vzdálenějších částech profilu. Profily jasnějších galaxií mají ke konci méně strmý spád poklesu jasnosti, než by podle $r^{1/4}$ zákona měly mít a méně svítivé galaxie naopak.

S tím také částečně souvisí rozlišování fotometrických profilů podle typů galaxií. V tomto případě sedí nejlépe de Vaucouleursův zákon u normálních eliptických galaxií (dále v závislosti na výše uvedené zářivosti). Největší odklon od této větve pak vykazují cD galaxie, u kterých mnohdy ovlivňuje vzhled fotometrického profilu také rozsáhlé halo (právě u nich se nejvíce projevuje málo strmý pokles jasnosti ve vzdálenějších částech profilu). Dále se díky své odlišné povaze od normální eliptické sekvence, neberou za vzor pro $r^{1/4}$ zákon ani trpasličí typy galaxií.

Původní de Vaucouleursův zákon závisí na dvou fitovaných parametrech. Obecně se soudí, že více parametrické modely budou reprezentovat fotometrické profily eliptických galaxií lépe. Z tohoto důvodu byl zaveden tzv. Sersic profil, což je v podstatě zobecněný de Vaucouleursův zákon ve tvaru

$$I(r) = I_e e^{-b_n((r/r_e)^{1/n} - 1)}, \quad (2.24)$$

kde I_e a r_e jsou opět efektivní intenzita a poloměr. Třetím parametrem je n , který určuje mocninu poloměru. Konstanta b_n se opět stanoví tak, aby polovina celkového zářivého toku ležela uvnitř efektivního poloměru. V tomto případě je však, vlivem rozdílné mocniny poloměru, konstanta závislá na n a s mocninou se mění i její velikost. Podle [12] je tato závislost celkem dobře určena⁶ jako $b_n = 1.9992n - 0.3271$. Pro $n = 4$ vychází $b_n \doteq 7.6697$, což je původní $r^{1/4}$ zákon.

Odchylky od $r^{1/4}$ zákona vznikají ale i v rámci jednoho fotometrického profilu. Odlehlé části galaxie jsou vlivem nižší citlivosti detektoru zašumělé a fitování funkční závislosti zde nemá velký význam (přesnost metody tedy není ověřitelná). Nejhuře se $r^{1/4}$ funkcí fituje centrum galaxie, které obecně ze zákona vybočuje. Při $r \rightarrow 0$ se funkce zvedá mnohem strměji než je pozorovaný centrální profil. Na tyto části galaxií je tedy vhodnější fitovat jiné funkční závislosti.

Při bližším zkoumání fotometrických profilů se dospělo k závěru, že eliptické galaxie mají poměrně konstantní jádro. Vykazují konstantní centrální jasnost I_0 do vzdálenosti r_0 . S tím počítají další dvouparametrické modely, například Hubblův-Reynoldův zákon

$$I(r) = \frac{I_0}{(1 + r/r_0)^2}, \quad (2.25)$$

nebo také modifikovaný Hubblův zákon (Kingův isotermální model)

$$I(r) = \frac{I_0}{1 + (r/r_0)^2}. \quad (2.26)$$

V dnešní době je však díky získaným poznatkům z plošné fotometrie HST snímků prokázáno, že konstantní jasnost center eliptických galaxií je v podstatě mýtus, který vznikl díky nedokonalým pozorovacím podmínkám na Zemi.

⁶Pro různá n může rovnice vypadat odlišně a nejlépe se určí numericky, ale tato práce si nekladla za cíl výpočet konstanty b_n a spokojí se tedy s převzatým výsledkem.

2.2.3 Výpočet konstanty k pro $1/4$ zákon

V některých případech se nám může stát, že získáme snímky jen neúplných dat galaxií. Konstanta uvedená v (2.16) platí pro efektivní poloměr v polovině celkové intenzity galaxie a de Vaucouleursův zákon pak předpokládá, že jsme napozorovali celý objekt, nebo alespoň jeho většinu. Tato práce však používá snímky z Hubbleova dalekohledu, kde jsou napozorovány jen centrální části uvedených galaxií. Abychom mohli vůbec $r^{1/4}$ zákon na centrální profily úspěšně nafitovat, musíme stanovit novou konstantu pro jinou procentuální část celkového zářivého toku galaxie. Následující řádky se z toho důvodu zabývají obecným odvozením konstanty k a jejím výpočtem pro polovinu a čtvrtinu celkové intenzity.

Souhrnný tok záření z plochy ohraničené dvěma kružnicemi o poloměrech r_1, r_2 se v souladu s definicí (2.16) vypočítá

$$I_{(r_1, r_2)} = \int_{r_1}^{r_2} I_e e^{-k((r/r_e)^{1/4}-1)} 2\pi r dr, \quad (2.27)$$

kde I_e, r_e jsou efektivní intenzita a poloměr, k je konstanta určená podle toho, jaké množství z celkového toku záření se nalézá uvnitř poloměru r_e . Pomocí substituce $r = x^4$ a vytknutí konstantních členů se integrál převede do tvaru

$$I_{(r_1, r_2)} = 2\pi I_e e^k \int_{x_1}^{x_2} e^{-k \cdot x/r_e^{1/4}} x^7 dx, \quad (2.28)$$

kde $x_1 = r_1^{1/4}$, $x_2 = r_2^{1/4}$ jsou nové meze intervalu. Po několikerým použitím metody per partes se získá výsledek

$$I_{(r_1, r_2)} = -8\pi I_e \frac{e^k}{k^8} \left[e^{-\frac{kx}{r_e^{1/4}}} \sum_{i=1}^8 \frac{k^{8-i} r_e^{i/4} x^{8-i}}{(8-i)!} \right]_{x_1}^{x_2}. \quad (2.29)$$

V případě, že dosadíme rozsah intervalu $r_1 = 0$, $r_2 = \infty$, vychází po dosazení a aplikaci limity ($r \rightarrow \infty$)

$$I_{(0, \infty)} = \pi I_e r_e^2 \frac{8! e^k}{k^8}. \quad (2.30)$$

Pokud předpokládáme, že profil eliptické galaxie sleduje $1/4$ zákon, určili jsme tímto způsobem tok záření z celého objektu. Neznáme však hodnotu konstanty k . Pro její určení můžeme využít definice efektivního poloměru pro polovinu celkové intenzity, tím pádem platí

$$I_{(0, \infty)} = 2I_{(0, r_e)}, \quad (2.31)$$

$$\int_0^\infty I_e e^{-k((r/r_e)^{1/4}-1)} 2\pi r dr = 2 \int_0^{r_e} I_e e^{-k((r/r_e)^{1/4}-1)} 2\pi r dr. \quad (2.32)$$

Dosazením mezí a porovnáním dospějeme k rovnici

$$\pi I_e r_e^2 \frac{8! e^k}{k^8} = 2\pi I_e r_e^2 \frac{8!}{k^8} (e^k - p(k)), \quad (2.33)$$

kde

$$p(k) = 1 + k + \frac{k^2}{2!} + \frac{k^3}{3!} + \frac{k^4}{4!} + \frac{k^5}{5!} + \frac{k^6}{6!} + \frac{k^7}{7!}, \quad (2.34)$$

což je mimochodem Taylorův rozvoj funkce e^k sedmého řádu v nule. Je tedy zřejmé, že musí platit

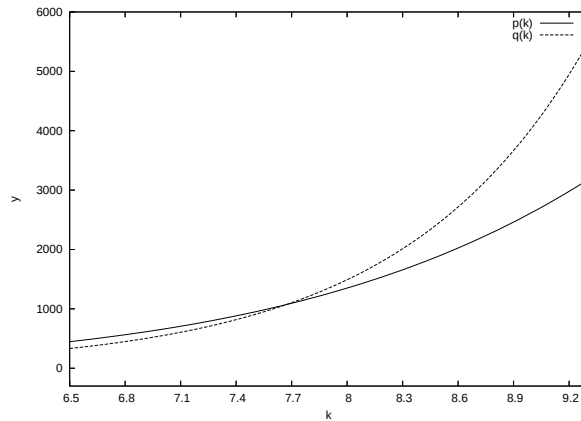
$$\frac{1}{2} = 1 - \frac{p(k)}{e^k}. \quad (2.35)$$

Řešení rovnice bude mít několik kořenů, z nichž z fyzikálních důvodů (tvar profilů eliptických galaxií) hledáme pouze reálné kladné kořeny. K tomu nám pomůže iterační Newtonova metoda tečen

$$k_{i+1} = k_i - \frac{f(k_i)}{f'(k_i)}, \quad (2.36)$$

kde je v tomto případě funkce $f(k) = (1/2)e^k - p(k) = 0$. Postupným iterováním (až do chvíle, kdy se dva následující výsledky od sebe liší jen o velmi malé číslo) se získá požadovaná konstanta.

Newtonova metoda má tu výhodu, že velmi rychle konverguje v blízkém okolí kořenu rovnice. Reálných řešení je však více (například záporný kořen, který nás ale nezajímá), hodí se tedy mít první člen co nejbližší výslednému řešení. Na první odhad můžeme použít grafickou metodou, kdy se funkční závislost vynese do grafu a odečte se přibližná hodnota kladného průsečíku. Takovým způsobem byla vypočtena, pro efektivní poloměr poloviny celkové intenzity, konstanta $k = 7.66925$.



Obrázek 2.1: Graf průběhu dvou funkcí a jejich kladného průsečíku, $q(k) = \frac{1}{2} \cdot e^k$

Někdy nás zajímá efektivní poloměr pro jinou část intenzity galaxie, například pro čtvrtinu celkového toku objektu v případě snímků z HST. Postup výpočtu nové konstanty k bude stejný jako v předchozím případě, s tím rozdílem, že rovnice (2.35) bude mít tvar

$$\frac{1}{4} = 1 - \frac{p(k)}{e^k}. \quad (2.37)$$

Konstanta k pro čtvrtinu celkové intenzity galaxie vychází $k = 5.95611$.

Kapitola 3

Pozorování galaxií a zpracování snímků

3.1 Úvod

Pořizování a zpracovávání získaných snímků tvoří nemalou součást práce. Úkolem této kapitoly je tedy seznámit s pozorováním vybraných eliptických galaxií a zpracováním dat pro další použití.

Mnoho observatoří, výzkumných ústavů nebo organizací dává svá napozorovaná data k dispozici odborné veřejnosti (v tomto případě snímky eliptických galaxií). K porovnání získaných profilů z dat pořízených různými přístroji, bylo získáno touto cestou několik cenných snímků. Závěr kapitoly se z toho důvodu věnuje informacím o použitých snímcích z jiných dalekohledů.

3.1.1 Observatoř MonteBoo

Všechna data, pozorována v rámci této práce, byla pořízena v pozorovatelně Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity v Brně (MonteBoo Observatory [13]), nacházející se v areálu Hvězdárny a planetária Mikuláše Koperníka na Kraví Hoře.

Observatoř vlastní Newtonův dalekohled s primárním zrcadlem o průměru 62 cm a ohniskové vzdálenosti 2.78 m. V sekundárním ohnisku dalekohledu je umístěna Dual CCD kamera ST-8 Santa Barbara Instruments Group s čipem KAF-1600. Zorné pole tohoto přístroje je přibližně 17.0'x11.3'. Při plném rozlišení (binning 1x1) 1530x1020 pixelů vychází měřítko jednoho pixelu na $c \doteq 0.736''/\text{pix}$.

3.2 Eliptické galaxie v Brně

Za pomoci výše uvedeného přístroje, programů a díky dobrému počasí se podařilo získat snímky několika eliptických galaxií. Pozorovací noci se volily pokud možno s dobrými pozorovacími podmínkami a co nejméně rušené měsíčním svitem, aby hluboké CCD snímky nesly co nejvíce užitečných informací. Podle období pozorování byly vybírány objekty s vhodnou výškou nad obzorem a s co největší jasností (viz například [14]). Všechna pozorování byla pořízena ve filtru R při binningu 2x2 (velikost jednoho snímku je 765x510 pixelů, měřítko

$\doteq 0.736$ arcsec/pixel). Filtr R byl vybrán z důvodu největší citlivosti CCD kamery na tyto vlnové délky.

Galaxie:	počáteční datum a čas v UT	expozice [s]	počet snímků
NGC 205	16. 10. 2006, 18:38	90	130
NGC 3379	11. 3. 2007, 19:21	60	191
NGC 2768	12. 3. 2007, 18:56	90	85
NGC 5322	12. 3. 2007, 22:33	90	83
NGC 4486	13. 4. 2007, 20:26	60	166

Tabulka 3.1: Seznam pozorovaných objektů

3.2.1 Pozorované galaxie

Jednotlivá pozorování se od sebe liší v mnoha ohledech. Pokaždé se pořizovaly snímky jiného objektu (obvykle jedna galaxie během pozorovací noci, s výjimkou NGC 2768 a NGC 5322) a čelilo se rozdílným pozorovacím podmínkám. Následující odstavce stručně rozebírají pozorování rozdělená podle galaxií, jejichž snímky se pořizovaly. U každé galaxie se uvádí informace o objektu a o noci, kdy byla pozorována. Dále je zde uvedeno i několik důvodů nebo spíše zajímavostí, které z části také přispěly k zaměření pozornosti na tyto objekty.

NGC 205

Jeden ze dvou známých průvodců spirální galaxie M31 v Andromedě je trpasličí galaxie NGC 205. Toto uskupení náleží do místní skupiny galaxií (spolu s naší Galaxií). Jedná se tedy o blízký objekt, vzdálený pouhých 2.7 Mly. Již Charles Messier popsal tuto galaxii, ale tehdy ji do svého katalogu nezařadil. Byla až dodatečně přidána, jako poslední položka M110, K. G. Jonsem v roce 1966.

Řadí se podle Hubbleovy klasifikace mezi trpasličí galaxie E5 až E6 a má také označení pec (peculiar), pro přítomnost dvou rozlišitelných temných struktur, nejspíše oblastí mezihvězdného prachu. V dnešní době se však častěji řadí mezi dwarf spheroidal galaxie, i když je mnohem zářivější než typičtí představitelé. Dále se v centrálních částech galaxie objevily důkazy o nedávném vzniku hvězd, což s uvedenými oblastmi prachu může souviset. Pozorují se zde totiž mladé hvězdy spektrální třídy O a B.

Pozorování: Galaxie NGC 205 byla pozorována za velmi jasné noci 16. 10. 2006. Jelikož se Měsíc nacházel kolem poslední čtvrti (vycházel až po jedné hodině), nebylo pozorování měsíčním svitem ovlivněno. V počátku pozorování byly ale snímky ozářeny nejspíše infračerveným zářením neznámého původu. Jedná se o šest snímků, které byly z pozdějšího zpracování vyloučeny.

NGC 3379

NGC 3379 je nejjasnějším členem skupiny galaxií Leo I (nalézající se v souhvězdí Lva). Její vzdálenost od Slunce (kolem 38 Mly) a velké rozměry z ní činí velmi dobře pozorovatelnou galaxii. Byla objevena již Pierrem Méchainem v roce 1781. Pravděpodobně nějakým nedopatřením ji však Messier do katalogu nezařadil a byla přidána až později Helen B. Sawyer Hoggovou v roce 1947, jako položka M105. Podle Hubbleovy klasifikace je typu E1.

Galaxie NGC 3379 je považována za typickou představitelku eliptických galaxií. Dlouhou dobu se používá jako fotometrický standard rozložení plošného jasů. Průzkum galaxie pomocí Hubbleova vesmírného dalekohledu objevil v centrální části velice hmotný objekt (50 miliónů $M_{\odot}$), je možné, že se jedná o černou díru. Řadí se mezi tzv. LINERs objekty (Low-ionization nuclear emission-line regions), což je jeden z druhů galaxií s aktivním jádrem (AGN – active galactic nuclei).

Pozorování: Snímky galaxie NGC 3379 byly pořízeny v noci 12. 3. 2007. Měsíc den před poslední čtvrtí (vycházel kolem půl druhé ráno) neměl taktéž vliv na kvalitu pořízených snímků. Bylo poměrně jasné počasí, v druhé polovině pozorování se dokonce kvalita pořízených snímků zlepšila. Bohužel však, zejména ke konci, se čím dál častěji pořizovaly nekvalitní snímky, na nichž se obrazy hvězd nezvykle vodorovně protahovaly, dokonce někdy došlo i k rozdvojení hvězd, kdy místo jedné byly na obrázku dvě totožné hvězdy vedle sebe. Z dalšího zpracování bylo z tohoto důvodu vyřazeno 31 snímků. Na pořízených snímcích se spolu s tímto objektem nacházejí i galaxie NGC 3384 a NGC 3389, které však nebyly do výsledné práce zahrnuty.

NGC 2768

Jedna z galaxií, nalézající se v souhvězdí Velké medvědice, je eliptická galaxie NGC 2768. Je od nás vzdálená okolo 73 miliónů světelných let. Podle Hubbleovy klasifikace má nejistý typ. V některých případech je klasifikována jako eliptická galaxie typu E6, v jiných jako lentikulární galaxie S0. Nachází se tedy nejspíše na hranici mezi těmito galaktickými skupinami. Díky emisním čarám centrální oblasti se řadí mezi Seyfertovy galaxie, což je další typ galaxií s aktivním jádrem.

Pozorování: Galaxie NGC 2768 byla pozorována z počátku noci 12.3 2007. Měsíc se chýlil k poslední čtvrti (vycházel chvíli před třetí hodinou), tedy znovu se nebylo potřeba jeho vlivu obávat. I přes pěkné počasí byla kvalita snímků trochu menší než u předchozích pozorovacích nocí. Některé počáteční snímky obsahovaly světlou skvrnu neznámé povahy, která se za nějaký čas ze zorného pole vytratila. Vyřadilo se tedy sedm snímků.

NGC 5322

Další z galaxií ve Velké medvědici je NGC 5322. Je to nejvzdálenější objekt, který byl v rámci této práce pozorován (její vzdálenost od Slunce je asi 103 miliónů světelných let). Jedná se o eliptickou galaxii typu E3 nebo E4 Hubbleovy klasifikace. Řadí se také mezi galaxie s aktivním jádrem Seyfertova typu. Na snímcích z Hubbleova vesmírného dalekohledu je vidět patrný tmavý pruh blízko centra galaxie, nejspíše se jedná o nějaký druh prachových nebo plynných mračen.

Pozorování: Galaxie NGC 5322 se pozorovala v druhé polovině noci 12.3 2007. Podmínky byly nadále podobné jako u předchozí galaxie. Několik snímků bylo poškozeno podobnými světelnými úkazy. Z pozdějšího zpracování bylo vyřazeno sedm snímků.

NGC 4486

Jedna z nejzajímavějších eliptických galaxií je obří cD galaxie NGC 4486. Byla objevená a katalogizovaná v roce 1781 Charlesem Messierem, který ji zařadil jako 87 položku (M87). Galaxie je od nás vzdálena okolo 51 Mly a náleží do kupy galaxií v Panně¹, čítající několik

¹Správnější je označení Coma-Virgo cluster, jelikož se do této kupy řadí i galaxie ze souhvězdí Vlasu Bereniky

tisíc členů. Má se za to, že spolu s obřími galaxiemi M84 a M86 leží v centru této kupy a výrazně ovlivňuje její dynamiku. Podle Hubbleovy klasifikace je typu E0 nebo E1 a z důvodů uvedených níže obdržela také označení pec (peculiar).

NGC 4486 je známá nejen svojí velikostí a centrální pozicí, ale i dalšími rysy. Má jeden z největších známých systémů kulových hvězdokup (přes 10 000). Řadí se také mezi LINERs galaxie (jako NGC 3379), galaxie s aktivním jádrem. Dále je velmi silným zdrojem rádiového záření (nejjasnější v souhvězdí Panny), nese tedy označení Virgo A. U galaxie M87 je pozorovatelný velmi silný výtrysk plynu (5000 světelných let dlouhý), tzv. jet. Jet se pozorují převážně v rádiovém oboru, ale tento je také částečně, nejspíše díky relativní blízkosti zdroje, viditelný i v oboru optickém. Pozorování M87 je zajímavé i v dalších vlnových délkách, například v rentgenovém spektru, kde se galaxie viditelná blízko centra horkého, rentgenového oblaku.

Pozorování: Snímky galaxie NGC 4486 byly pořízeny v noci 13. 4. 2007. Jednalo se o pěknou jasnou noc. Měsíc se blížil k novu (vycházel až chvíli před pátou hodinou ranní). Získaly se tedy velmi kvalitní snímky. Bohužel však ke konci pozorování se začaly objevovat čím dál častěji snímky se stejným defektem, jako při pozorování galaxie NGC 3379. Vyřazeno bylo 41 snímků. Na pořízených snímcích, a zejména pak na výsledném složeném snímku, se podařila zachytit přítomnost optického jetu.

3.2.2 Kalibrační pole

Podařilo se uskutečnit pozorování několika standardních polí pro kalibraci galaxií. Snímky byly pořízeny však mnohem později (až od března letošního roku), než se začalo s pozorováním galaxií. U NGC 205 se tedy kalibrace, z důvodu nízké výšky nad obzorem v jarním období, nepodařila uskutečnit. Ostatní čtyři pozorované objekty byly úspěšně zkalibrovány.

Jelikož se s pozorovala standardní pole u objektů NGC 2768, NGC 5322 a NGC 3379 v jinou pozorovací noc, pořídilo se k polím ještě znovu několik snímků těchto galaxií a kalibrace byla provedena na nich. Takto získané hvězdné velikosti se lišily od hvězdných velikostí bodů v galaxii původně napozorovaných o jistou konstantu, která se vypočítala fitováním na soubor měřených dat. U NGC 4486 se snímky standardního pole pořizovaly v tutéž noc. Byla tedy zkalibrována data určená přímo na plošnou fotometrii objektu.

3.3 Zpracování pořízených snímků

Získané série snímků na observatoři MonteBoo byly zpracovány a dále složeny ve výsledný snímek pomocí fotometrického systému *MuniPack*[15] vytvořeného Filipem Hrochem. Při každém pozorování bylo získáno několik temných snímků (dark frames) při stejné dlouhých expozicích, stejném filtru a shodném rozlišení jako pořízené série. Ze získaných temných snímků byl určen robustní průměr programem *mdark*. Tento temný snímek byl odečten od všech snímků dané galaxie pomocí programu *darkbat*.

Dále byla provedena korekce jednotlivých snímků podělením flat fieldem (stejný binning a filtr) a to programem *flatbat*. Použitý flat field vznikl také složením několika flat fieldů (program *aflat*), od kterých se odečetl temný snímek se stejnou expozicí.

Takto připravené snímky byly zpracovány fotometrickými a astrometrickými programy balíku *muniphot*. Tímto byly získány informace o instrumentálních hvězdných velikostech hvězd, určeno pozadí apod. Posunutí snímků mezi sebou pak bylo zkontrolováno pomocí programu *munistack*.

Použitím *kombine* byl vytvořen složený snímek, který byl použit k vykreslení fotometrických profilů. Získaný výsledný snímek je dvakrát větší (1530x1020 pixelů, tedy binning 1x1) a intenzity na snímku jsou normovány.

3.4 Snímky z dalších dalekohledů

Fotometrické profily eliptických galaxií byly získány i ze snímků pořízených jinými dalekohledy. Jedná se sice o data pořízena za jinými účely, ale pro použití v této práci bohatě postačující. Výběr z dostupných dat se řídil hlavně dvěma kritérii: Získat ke každé galaxii snímky alespoň ze dvou různých nebrněnských dalekohledů, které musí být pořízeny v oboru blízkém R.

3.4.1 Lowell

The Galaxy Catalog, sestavený Zsoltem Freiem and James E. Gunnem, dává k dispozici snímky a obrázky 113 nejbližších galaxií v několika filtrech nebo formátech. Celkem 31 snímků je pořízeno na 1.5 metrovém dalekohledu Palomarské observatoře a zbylých 82 na 1.1 metrovém dalekohledu Lowellské observatoře. Lowellská observatoř se nachází ve městě Flagstaff v severní části státu Arizona v USA. Všechna data získána z Galaxy katalogu jsou napozorována jen pomocí druhého zmíněného dalekohledu.

Kamera dalekohledu obsahuje RCA CCD čip o velikosti 320 x 512 pixelů. Celkové zorné pole bylo 7' x 11' úhlových minut (1.35 "/pixel). Pozorovalo se ve dvou filtrech J a R (maximum 450 nm a 650 nm) [16].

Snímky jsou oříznuty na velikost 313 x 313 pixelů, kde pozorovaná galaxie se nachází přibližně uprostřed snímku. Dále je mimo obvyklé redukce použito před uveřejněním ještě empirické dvoudimenzionální metody point-spread-function (PSF) na odstranění hvězd v popředí snímku. Na obrázku se pak nachází pouze samotná galaxie. U některých se však vyskytuje malé množství hvězd (jedna hvězda v případě snímku NGC 3379), které nebyly odstraněny nejspíše z důvodu, že se nacházejí příliš blízko centra galaxie. Prostřednictvím Galaxy katalogu se získaly 4 snímky eliptických galaxií ve filtru R, jedná se o objekty NGC 2768, NGC 3379, NGC 4486 a NGC 5322.

3.4.2 Konkoly

Snímky byly získány díky programu Nearby Galaxy Survey vedeném lidmi ze Szegedské univerzity a Observatoře Konkoly v Maďarsku [17]. Cílem projektu je mimo jiné vytvoření databáze vzorových snímků galaxií (neobsahujících žádné supernovy) pro fotometrii a detekci supernov (Template frames for SN-photometry, [18]).

Pozorování získaných dat bylo uskutečněno pomocí 60/90 cm Schmidt dalekohledu na pozorovací stanici Konkolské Observatoře Piszkestető Mountain Station, nacházející se v pohoří Mátra asi 150 km severo-východně od Budapeště.

Dalekohled má ohniskovou vzdálenost 180 cm a používá AT 200 CCD kameru. Snímky mají dimenzi 1536 x 975 pixelů, celkové zorné pole je 26.1' x 17.4' úhlových minut (1.02 "/pixel) a pořizují se v několika filtrech standardního Johnsonova fotometrického systému (B,V,R,I). Pro účely této práce byly použity snímky, pořízené pouze ve filtru R. Jedná se o objekty NGC 205, NGC 2768, NGC 4486.

3.4.3 HST

V roce 1990 byl vypuštěn na oběžnou dráhu Země Hubbleův vesmírný dalekohled (Hubble Space Telescope – HST). Provoz tohoto významného přístroje je výsledkem spolupráce dvou organizací: NASA (National Aeronautics and Space Administration) a Evropské kosmické agentury (ESA – European Space Agency). Jelikož se jedná o velmi dobře známý, mnohokrát zmiňovaný dalekohled, není důvod se jím v této práci nějak podrobněji zabývat (další informace viz například [19]).

Snímky všech pěti eliptických galaxií z Hubbleova dalekohledu jsou získány díky rozsáhlé internetové vědecké databázi SAF – Science Archive Facility ([20]). Byla vybírána pozorování pořízena přístrojem WFPC2 (Wide Field Planetary Camera 2) ve vlnových délkách co nejbližší vlnovým délkám filtru R.

Získané snímky jsou již komplexně zpracovaná a normalizovaná data. Postup těchto metod je složitý a předmětem této práce není se jimi zabývat. Za zmínku ale stojí uvést některé skutečnosti, kterých bylo využito při studiu plošné fotometrie galaxií. Mimo klasických údajů, které jsou k dispozici v hlavičce každého standardního FITS souboru, se dozvíme mnoho jiných užitečných informací. Asi nejdůležitější je možnost stanovení hvězdných velikostí objektů na snímku.

V hlavičce každého snímku se uvádí hodnota toku záření konstantního zdroje (konstantním zdrojem se myslí, že vykazuje konstantní tok záření na vlnovou délku), který produkuje 1 DN za sekundu (DN je jednotka intenzity odečítané ze snímku). Najdeme ho pod označením *photflam* a uvedený v jednotkách $\text{erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{\AA}^{-1}$. Díky tomuto údaji a dalším hodnotám můžeme vypočítat tzv. *zeropoint* (nulový bod) v jednotkách $\text{mag} \cdot \text{s}^{-1}$, podrobněji viz například [21]. Zpracované snímky uvádí tento nulový bod v několika variantách, například hodnota *zeroabs* je ta, která nás zajímá. Pokud dále tedy známe dobu expozice *exptime* a měřítko *pixscale*, převedeme *zeropoint* na jednotky $\text{mag} \cdot \text{arcsec}^{-2}$

$$\mu_0 = \text{zeropoint} + 2.5 \log_{10} \text{exptime} - 2.5 \log_{10} \text{pixscale}^{-2}, \quad (3.1)$$

což je plošná hvězdná velikost odpovídající 1 DN. Plošnou hvězdnou velikost měřených dat pak určíme jako

$$\mu_i = \mu_0 - 2.5 \log_{10} \frac{I_i}{\text{pixscale}^2}. \quad (3.2)$$

galaxie	datum a čas v UT	pozorovatel	t [s]	rozlišení [pix]	filtr
NGC 3379	30. 3. 1989 04:38	J.A.Tyson	80	313x313	R
NGC 2768	27. 3. 1989 19:57	J.A.Tyson	250	313x313	R
NGC 5322	28. 3. 1989 10:45	J.A.Tyson	100	313x313	R
NGC 4486	28. 3. 1989 10:45	J.A.Tyson	100	313x313	R

Tabulka 3.2: Informace o získaných snímcích z Lowellské observatoře.

galaxie	datum a čas v UT	pozorovatel	t [s]	rozlišení [pix]	filtr
NGC 2768	24. 12. 2001 00:23	Sry/Fgr	300	1536x975	R
NGC 205	3. 12. 2001 21:14	Sry/Fgr	300	1536x975	R
NGC 4486	25. 4. 2001 22:29	Vnk/Hnr/Frg	300	1536x975	R

Tabulka 3.3: Informace o získaných snímcích z Konkolské observatoře.

galaxie	datum a čas v UT	pozorovatel	t [s]	rozlišení [pix]	filtr
NGC 4486	9. 5. 1996 12:22	—	13 900	1563x1530	F658N
NGC 205	30. 9. 1994 7:4	—	150	1565x1529	F675W
NGC 2768	28. 1. 1999 19:39	—	2800	1563x1531	F658N
NGC 5322	23. 11. 1994 23:15	—	1000	1564x1531	F555W
NGC 3379	25. 11. 2004 23:15	—	2400	1563x1531	F658N

Tabulka 3.4: Informace o získaných snímcích galaxií z HST.

Kapitola 4

Fitování elips na eliptické galaxie

4.1 Úvod do problematiky

Před vlastním zjišťováním fotometrických profilů eliptických galaxií je třeba získat z pořízeného snímku několik informací. Předně je potřeba znát pozici středu galaxie, její sklon oproti souřadnicovým osám snímku a v neposlední řadě, jelikož eliptické galaxie obvykle nelze aproximovat kružnicí, nás zajímá také tvar dané galaxie.

I přesto, že se nejedná o zploštělé útvary¹, jak lze třeba považovat ramena spirálních galaxií, stačí tvar objektu aproximovat plošnou křivkou (v tomto případě elipsou) a předpokládat, že k nám detekované záření přichází ze stejné vzdálenosti, jako kdyby se jednalo o plochý útvar (tudíž z roviny procházející středem galaxie a kolmé na směr k pozorovateli). U eliptických galaxií se jedná o plochu elipsy stejných rozměrů.

Pokud se fituje větší počet elips různých intenzit na eliptickou galaxii, získáme celkem dobrou představu o struktuře rozložení intenzit. Zjistíme nakolik je daná galaxie symetrická, nakolik jsou symetrické její jednotlivé části, a porovnáním s isofotami fitovaných intenzit zjistíme jak moc je fitování pro různé intenzity přesné. Fotometrické profily se pak určují z mnohonásobného fitování elips pro různé intenzity.

Pro získávání profilů eliptických galaxií nám však může stačit znát parametry pouze jedné elipsy. Nejúčelněji se jeví stanovit si jistou srovnávací elipsu, jejíž parametry budou určovat vlastnosti galaxie (sklon, střed, velikost).

Způsobů, jak fitovat elipsu na galaxii, může být několik. Při zpracovávání snímků jsem použila a následně i zkombinovala dvě metody: Momentovou metodu a algoritmus B2AC, který je založen na metodě nejmenších čtverců.

Než se ale do výpočtů parametrů elips pustíme, je užitečné si nejdříve tyto křivky definovat a zavést nové polární souřadnice. Elipsy jsou specifické kuželosečky, pro které platí

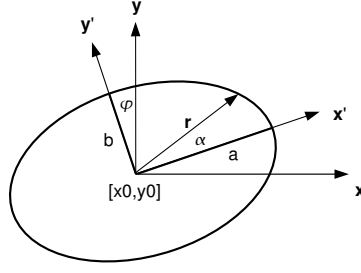
$$\frac{(x - x_t)^2}{a^2} + \frac{(y - y_t)^2}{b^2} = 1, \quad (4.1)$$

kde a , b jsou hlavní a vedlejší poloosa, a $[x_t, y_t]$ souřadnice středu elipsy. Parametricky se vyjadřuje elipsa jako

$$x - x_t = a \sin \alpha, \quad (4.2)$$

$$y - y_t = b \cos \alpha. \quad (4.3)$$

¹eliptické galaxie mají obecně tvar elipsoidu, tudíž z jakéhokoliv úhlu pohledu vypadají jako elipsy, avšak s různými délkami a poměry poloos.



Obrázek 4.1: Schéma elipsy a jejích parametrů

V polárních souřadnicích zápis vypadá

$$\alpha = \arctan \frac{b \cdot (x - x_t)}{a \cdot (y - y_t)}, \quad (4.4)$$

$$r = \sqrt{(x_t + a \sin \alpha)^2 + (y_t + b \cos \alpha)^2}. \quad (4.5)$$

4.1.1 Transformace souřadnic

Při práci s vypočtenými daty a získáváním informací ze snímku (například vykreslení efektivní elipsy, získání fotometrických profilů a pod.) je potřeba převádět a transformovat souřadnice mezi různými souřadnicovými soustavami.

Na práci s elipsou se z transformací využívá pootočení a posun středu pravoúhlých souřadnic. Původní souřadnice jsou souřadnice snímku objektu se středem v levém dolním rohu, nové souřadnice mají střed ve středu galaxie a jsou pootočený souhlasně s ní. Parametrické vyjádření těchto nových souřadnic s počátkem ve středu elipsy se napíše jako

$$x' = a \sin \alpha, \quad (4.6)$$

$$y' = b \cos \alpha. \quad (4.7)$$

Pootočení kolem středu $[x_t, y_t]$ o úhel φ se definuje

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x - x_t \\ y - y_t \end{pmatrix}, \quad (4.8)$$

což se ekvivalentně napíše v maticovém tvaru

$$\mathbf{x}' = \mathbf{T} \cdot \mathbf{x} \quad (4.9)$$

kde $\mathbf{T}$ je uvedená matice transformace. Opačný převod se pak jednoduše vyjádří jako

$$\begin{pmatrix} x - x_t \\ y - y_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}, \quad (4.10)$$

tedy

$$\mathbf{x} = \mathbf{T}^T \cdot \mathbf{x}'. \quad (4.11)$$

Pokud například chceme spočítat pozice bodů na snímku nalézající se na obvodu určené elipsy, vypadají vypsání rovnice transformace následovně:

$$x = x_t + (a \sin \alpha) \cos \varphi - (b \cos \alpha) \sin \varphi, \quad (4.12)$$

$$y = y_t + (a \sin \alpha) \sin \varphi + (b \cos \alpha) \cos \varphi. \quad (4.13)$$

4.2 První přiblížení

4.2.1 Momentová metoda

Pro získání představy, jak bude výsledné fitování vypadat, byla použita metoda výpočtu parametrů elipsy pomocí druhých momentů galaxie. Jedná se vlastně o vážené průměry středních kvadratických odchylek souřadnic bodů v galaxii od těžiště soustavy. Těžiště galaxie se spočítá pomocí váhového aritmetického průměru

$$w_{t_i} = \begin{cases} I_i - B & \text{pro } I_i > B, \\ 0 & \text{pro } I_i \leq B. \end{cases} \quad (4.14)$$

V případě momentů se zvolila konstantní váha

$$w_{I_i} = \begin{cases} 1 & \text{pro } I_i > B, \\ 0 & \text{pro } I_i \leq B, \end{cases} \quad (4.15)$$

což je z důvodu různého rozložení zářivé hmoty v galaxiích nutností. Počítáme tedy elipsu obepínající konstantní eliptickou plochu. Těžiště galaxie a její druhé momenty se pak určí jako

$$x_t = \frac{\sum x_i \cdot w_{t_i}}{\sum w_{t_i}}, \quad y_t = \frac{\sum y_i \cdot w_{t_i}}{\sum w_{t_i}}, \quad (4.16)$$

$$I_{xx} = \frac{\sum w_{I_i} (x_i - x_t)^2}{\sum w_{I_i}}, \quad I_{yy} = \frac{\sum w_{I_i} (y_i - y_t)^2}{\sum w_{I_i}}, \quad (4.17)$$

$$I_{xy} = I_{yx} = \frac{\sum w_{I_i} (y_i - y_t) \cdot (x_i - x_t)}{\sum w_{I_i}}. \quad (4.18)$$

Z vypočtených elementů se vytvoří matice druhých momentů

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} I_{xx} & I_{xy} \\ I_{yx} & I_{yy} \end{pmatrix}. \quad (4.19)$$

Jedná se o pozitivně definitní čtvercovou matici jejíž vlastní čísla a vektory určují tvar a velikost galaxie. Jejich spočtením a následným převedením na určitý tvar se získají parametry elipsy. Z vlastních čísel matice druhých momentů se určí hlavní a vedlejší poloosa elipsy a z vlastních vektorů můžeme získat úhel sklonu vůči souřadnicovým osám na snímku. Vlastní vektor čtvercové matice splňuje charakteristickou rovnici

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{u} = \lambda \cdot \mathbf{u}, \quad (4.20)$$

Vlastní čísla se vypočítají pomocí

$$\det(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{E}) = 0, \quad (4.21)$$

$$(I_{xx} - \lambda)(I_{yy} - \lambda) - I_{xy}^2 = 0. \quad (4.22)$$

Z matice $\mathbf{A}$ nám pro určení sklonu elipsy stačí znát jen jeden vlastní vektor, ten se vypočítá, při znalosti vlastních čísel z rovnice

$$(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{E}) \cdot \mathbf{u} = \mathbf{0}, \quad (4.23)$$

což pro λ_1 a odpovídající vlastní vektor $\mathbf{u} = (u_x, u_y)$ vede k soustavě rovnic

$$u_x(I_{xx} - \lambda_1) + u_y I_{xy} = 0, \quad (4.24)$$

$$u_y(I_{yy} - \lambda_1) + u_x I_{xy} = 0. \quad (4.25)$$

Při jejím řešení však díky podmínce (4.22) vychází, že jedna komponenta vektoru je libovolná a druhá je na ní závislá proměnná. Můžeme si tedy například určit, že $u_y = 1$. Pro tangens úhlu stačí znát podíl x-ové a y-ové složky vektoru. Úhel sklonu elipsy se určí například výpočtem

$$\varphi = \arctan \frac{u_x}{u_y} = \frac{\pi}{2} - \arctan \left(\frac{I_{xx} - \lambda_1 - I_{xy}}{I_{yy} - \lambda_1 - I_{xy}} \right). \quad (4.26)$$

Získali jsme tedy střed elipsy a její sklon. Zajímá nás však také ještě její výstřednost. Řešení problému bylo zjednodušeno úvahou, že byla předpokládána elipsa se stejnými poloosami (kružnice) o velikosti a a se spojitě rozloženou plochou o hustotě w_I . Druhé momenty z plochy elipsy se v souladu s (4.17, 4.18) vypočítají jako

$$I_{yy} = I_{xx} = \frac{1}{\omega} \int_S w_I x^2 dS = \frac{\psi}{\omega}, \quad (4.27)$$

$$\psi = \int_0^a \int_0^a w_I x^2 dx dy = \int_0^a \int_0^{2\pi} r^3 \cos^2 \alpha dr d\alpha = \frac{\pi}{2} a^4, \quad (4.28)$$

$$\omega = \int_0^a \int_0^a w_I dx dy = \int_0^a \int_0^{2\pi} r \cos \alpha^2 dr d\alpha = \pi a^2, \quad (4.29)$$

$$\Rightarrow I_{xx} = \frac{a^2}{2}, \quad (4.30)$$

kde bylo dosazeno za $w_I = 1$, což je stanovená váha výpočtů druhých momentů. V tomto případě také platí, že $I_{xy} = 0$. Vlastní čísla pak odpovídají $\lambda_{1,2} = I_{xx}$ a obdobně by se postupovalo pro kružnici s poloměrem b . Hlavní a vedlejší poloosa se tedy vypočítají z vlastních čísel matice $\mathbf{A}$ následovně

$$a = 2 \cdot \sqrt{\lambda_1}, \quad (4.31)$$

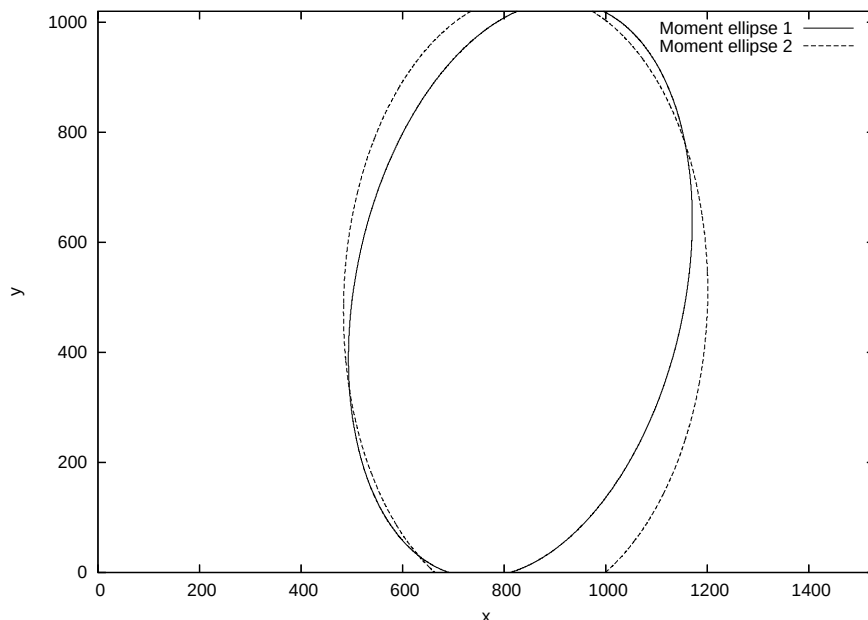
$$b = 2 \cdot \sqrt{\lambda_2}. \quad (4.32)$$

4.2.2 Problém hvězd

Galaxie jsou velmi rozlehlé a nacházejí se ve velkých vzdálenostech. Je velmi málo pravděpodobné, že se mezi galaxií a námi nebude v zorném poli nacházet žádná hvězda. Momentová metoda, používající konstantní plochu vyšších intenzit, je na rozložení zářivé hmoty citlivá. Pokud se například na snímku v okrajových částech galaxie nachází nějaká jasná hvězda (výrazně jasnější než galaktické okolí) nebo větší množství blízkých, méně jasných hvězd (ale jasnějších než galaktické okolí), ovlivní tyto objekty výsledné charakteristiky fitovaných elips dosti výrazným způsobem. Oproti tomu v centrální části galaxie, kde se intenzita pohybuje ve vysokých číslech a je pravděpodobné, že bychom dané pixely stejně vzali v potaz, nemá výskyt hvězd na snímku mezi galaxií a námi tak silný účinek (není však zanedbatelný).

Problém hvězd ve fitované oblasti na snímku je vyřešen nahrazováním intenzit, kde oblasti nacházející se ve hvězdách jsou nahrazovány intenzitou galaktického okolí. Jinými slovy se tyto hvězdy přebarvují. Jedná se o zjednodušený postup, kdy se celá hvězda nahradí jednou intenzitou, takže u poměrně velkých hvězd, zasahujících do několika oblastí (intenzit) galaxie, dochází k nepřesnému následnému výpočtu parametrů elipsy. Avšak vzhledem k tomu, že rozdíl intenzit není zvláště v okrajových částech eliptických galaxií nijak velký, je pak výsledek mnohem přesnější, než kdybychom hvězdu nenahrazovali vůbec.

Na obrázku 4.2 jsou vykresleny momentové elipsy galaxie NGC205 pro stejnou hodnotu pozadí. V případě elipsy číslo jedna se hvězdy v oblasti galaxie nahrazovaly průměrnou hodnotou okolí, u elipsy číslo dvě se nenahrazovaly žádné hvězdy. Je patrné, že se jedná o celkem odlišné výsledky a že vliv hvězd na momentovou elipsu je příliš velký, než aby se mohl zanedbat. Největší odchylky výsledné elipsy způsobují největší hvězdy.



Obrázek 4.2: Elipsy galaxie NGC 205 z brněnského snímku, vypočítané momentovou metodou pro stejnou intenzitu. Elipsa č. 1 se stanovila za pomoci nahrazování hvězd okolí, při stanovení elipsy č. 2 se žádné hvězdy nenahrazovaly.

4.3 Přesnější fitování elipsy

4.3.1 Metoda nejmenších čtverců

Metoda nejmenších čtverců je aproximační metoda, která má za úkol najít vhodnou regresní funkci pro daná empiricky zjištěná data. Přesněji řečeno se určitý zápis funkce již předpokládá a odhadují se pouze parametry funkce. Tato podkapitola, zabývající se metodou nejmenších čtverců a především algoritmem B2AC, vychází z literatury [22], [23]. Postup zjišťování parametrů je založen na minimalizaci reziduálního součtu čtverců

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (F_i - F)^2. \quad (4.33)$$

Minimalizace se provádí pomocí derivace předešlého výrazu a pro získání parametrů křivky se řeší soustava lineárních rovnic.

V případě fitování eliptické galaxie se metoda nejmenších čtverců snaží minimalizovat vzdálenost naměřených dat (pixelů určité intenzity na snímku galaxie) od vypočítané elipsy. Regresní funkcí je obecná rovnice kuželosečky

$$F(\mathbf{a}, \mathbf{x}) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{x} = A_{xx}x^2 + A_{xy}xy + A_{yy}y^2 + A_x x + A_y y + A_0 = 0, \quad (4.34)$$

$$\mathbf{a} = [A_{xx} \ A_{xy} \ A_{yy} \ A_x \ A_y \ A_0]^T, \quad (4.35)$$

$$\mathbf{x} = [x^2 \ xy \ y^2 \ x \ y \ 1]^T. \quad (4.36)$$

Zápis $F(\mathbf{a}, \mathbf{x}_i)$ se nazývá algebraická vzdálenost bodu (x_i, y_i) od křivky $F(\mathbf{a}, \mathbf{x}) = 0$. Fitování obecné kuželosečky se snaží minimalizovat součet čtverců těchto algebraických vzdáleností

$$S^2(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^N F(\mathbf{a}, \mathbf{x}_i)^2. \quad (4.37)$$

Metod na určení parametrů kuželosečky je několik. Všechny pracují s maticí určujících rovnic (design matrix) $\mathbf{D} = [\mathbf{x}_1 \mathbf{x}_2 \dots \mathbf{x}_n]^T$ pro n naměřených dat ($nx6$ matice). Liší se hlavně definicí vzdálenosti a různými omezujícími faktory parametrů vektoru $\mathbf{a}$. Mimo algebraické vzdálenosti (viz rovnice (4.37)) využívají některé algoritmy geometrickou vzdálenost a jiné.

4.3.2 B2AC

Tato práce používá k získání parametrů elips, pomocí metody nejmenších čtverců, algoritmus B2AC: Direct Least Square Fitting of Ellipses². Metoda využívá algebraických vzdáleností mezi souborem dat a fitovanou křivkou. Omezující podmínka pro zjednodušení výpočtu je kvadratického charakteru.

Důvodů pro výběr právě této metody je několik.³ Asi nejdůležitější je vlastnost algoritmu, která předpokládá, že fitujeme přímo elipsu (a ne obecnou kuželosečku), takže i z hodně špatných dat vygenerujeme eliptickou křivku. Jelikož jsou eliptické galaxie většinou

²Viz literatura [23]

³Tento algoritmus byl vybrán na základě dostupných informací z literatury uvedené na konci práce. Výhody výběru oproti ostatním algoritmům nebyly ověřeny a vycházejí také z uvedených informací. Ostatní algoritmy výpočtu metody nejmenších čtverců nebyly bohužel testovány.

pouze tvaru eliptického, je taková vlastnost algoritmu výhodou. Další plusy s tímto omezením výpočtu také souvisejí, metoda je jednodušší, početně méně náročná a z hlediska elipticity robustní.

Pro elipsy platí $4A_{xx}A_{yy} - A_{xy}^2 > 0$. Autoři však využili jisté volnosti ve stanovení parametrů vektoru $\mathbf{a}$ a dali omezující kvadratickou podmínku striktně na $4A_{xx}A_{yy} - A_{xy}^2 = 1$. Omezující podmínka se maticově zapíše ve tvaru $\mathbf{a}^T \mathbf{C} \mathbf{a} = 1$, kde omezující matice má tvar:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (4.38)$$

Metoda definuje sumu čtverců algebraické vzdálenosti jako

$$\sum_{i=1}^N F(\mathbf{a}, \mathbf{x}_i)^2 = \|\mathbf{D}\mathbf{a}\|^2. \quad (4.39)$$

Po zderivování a zavedení omezující podmínky vede výpočet na soustavu rovnic

$$2\mathbf{D}^T \mathbf{D} \mathbf{a} - 2\lambda \mathbf{C} \mathbf{a} = 0, \quad (4.40)$$

$$\mathbf{a}^T \mathbf{C} \mathbf{a} = 1, \quad (4.41)$$

kde λ je Lagrangerův multiplikátor. Pomocí substituce $\mathbf{S} = \mathbf{D}^T \mathbf{D}$ (matice $\mathbf{S}$ je pozitivně definitní) získáme

$$\mathbf{S} \mathbf{a} = \lambda \mathbf{C} \mathbf{a}, \quad (4.42)$$

$$\mathbf{a}^T \mathbf{C} \mathbf{a} = 1. \quad (4.43)$$

Řešením rovnice (4.42) získáme systém šesti párů vlastních čísel a vektorů $(\lambda_i, \mathbf{u}_i)$. Pro hledané parametry vektorů řešení $\mathbf{a}_i$ bude platit $\mathbf{a}_i = \kappa \mathbf{u}_i$, kde konstantu κ pomocí podmínky (4.43) vypočítáme jako

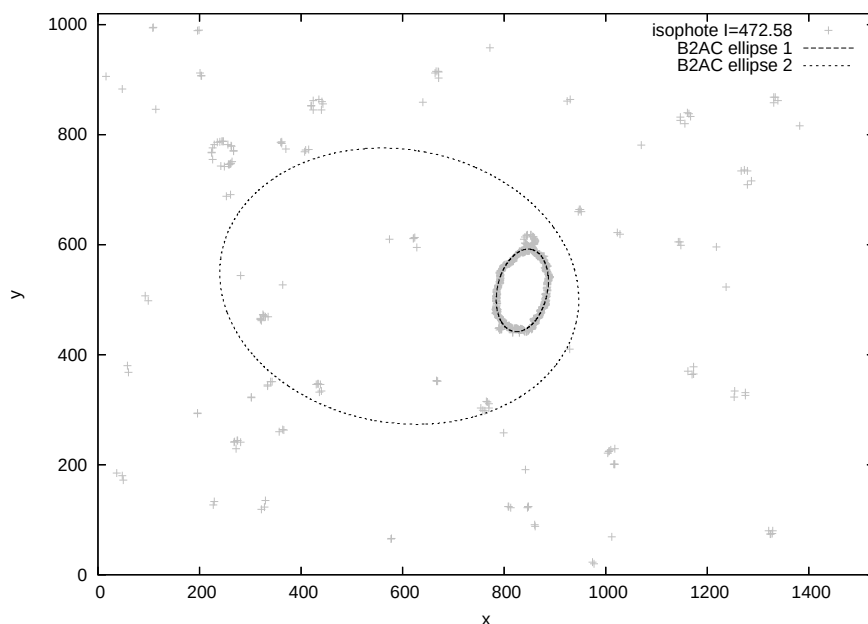
$$\kappa = \frac{1}{\sqrt{\mathbf{u}_i^T \mathbf{C} \mathbf{u}_i}} = \frac{1}{\sqrt{\mathbf{u}_i^T \mathbf{S} \mathbf{u}_i}}. \quad (4.44)$$

Omezující podmínce vyhovuje jedno řešení, z šestice vlastních čísel je pouze jedno vlastní číslo $\lambda_i > 0$, toto řešení charakterizuje výslednou fitovanou elipsu. Důkaz viz [23]. Z šestice získaných parametrů $\hat{\mathbf{a}} = [A_{xx} \ A_{xy} \ A_{yy} \ A_x \ A_y \ A_0]^T$ se pak vypočítá úhel sklonu, střed, velká a malá poloosa elipsy.

4.3.3 Výběr dat

Metodu nejmenších čtverců je potřeba aplikovat na určitý soubor dat. Ten se získá ze snímku pomocí určitých kritérií. Čím lépe data reprezentují elipsu, tím přesnější je fitovaná elipsa. Pro fitování elipsy na galaxii pro určitou hodnotou intenzity B se tudíž jako soubor dat nabízí isofota snímku pro hodnoty intenzit $B \pm konst.$ (kde $konst. \ll B$). Problém nastává v okamžiku, kdy do souboru dat jsou tímto způsobem začleněna i data ze vzdálenějších oblastí na snímku, které nepatří ke galaxii, nebo data vyskytující se sice v oblasti galaxie, ale mimo pomyslnou očekávanou eliptickou část (jedná se například o pixely z hvězd ležící mezi pozorovatelem a galaxií). Fitovaná elipsa pak nevychází příliš přesně. Řešením je vyseparování těchto nevhodných dat z fitovaného souboru.

Výběr dat tedy podléhá, mimo výběru intenzity, dalším omezením. Nejúčelnější je omezit oblast, v níž se s největší pravděpodobností správně fitovaná elipsa má nacházet. Z toho vyplývá také otázka: Jak danou oblast dobře odhadnout? Právě v tento moment přicházejí vhod nabyté znalosti z předešlého textu, z kapitoly o fitování elips momentovou metodou. Jelikož momentová elipsa (první přiblížení) je již poměrně dost přesná, vyplatí se jejích parametrů využít. Oblast výběru dat se omezí jistým vhodným okolím kolem momentové elipsy a následující metoda se aplikuje na vybraná data, minimalizuje se tak nepřesnost výpočtu metody nejmenších čtverců.



Obrázek 4.3: Vypočítané elipsy metodou nejmenších čtverců pro jednu intenzitu, ale pro různý soubor dat. Elipsa č. 1 je fitovaná elipsa na vybraná data, omezená nejen intenzitou, ale i pozicí na snímku. Elipsa č. 2 se vytvořila fitováním na celý soubor isofotálních dat.

4.3.4 Chyby metody nejmenších čtverců

Fitování regresní křivky na soubor dat metodou nejmenších čtverců je sice celkem přesné, ale obecně rozptýlená data vykazují odchylky od hledané funkce. Při výpočtu parametrů elipsy nás tedy zajímají jejich chyby.

Matice standardních odchylek parametrů vypočítané elipsy se určí jako

$$\mathbf{S}_b = \sqrt{\frac{\mathbf{S}^{-1} S_0}{N - p}}, \quad (4.45)$$

kde S_0 zbytkový reziduální součet čtverců odchylek

$$S_0 = \|\mathbf{D}\mathbf{a}_0\|^2, \quad (4.46)$$

kde $\mathbf{a}_0$ je matice vypočtených parametrů, $\mathbf{S}^{-1}$ je inverzní matice k matici soustavy normálních rovnic $\mathbf{S} = \mathbf{D}^T \mathbf{D}$, N počet fitovaných dat a p počet vypočtených parametrů z metody nejmenších čtverců ($p = 6$). Standardní odchylku jednotlivých parametrů b_i vypočítáme

$$S_{b_i} = \sqrt{\frac{s_{ii} S_0}{N - p}}, \quad (4.47)$$

kde s_{ii} je reálný diagonální prvek matice $\mathbf{S}^{-1}$.

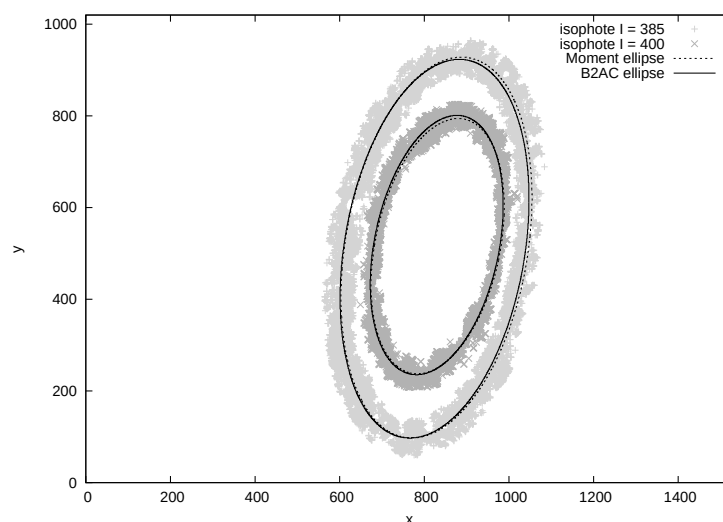
Tím bychom měli získat chyby šestice parametrů z (4.35). Při použití B2AC metody však již není určení chyb parametrů a stanovení následných chyb odvozených parametrů triviální. Jelikož tato práce neklade v tomto směru velké nároky (určené chyby by měly, z důvodu výběru isofotálních dat, jen přibližný informativní charakter a v dalším zpracování by se nejspíše nepoužily), nebylo potřeba standardní odchylky parametrů elipsy stanovovat. Obecný výpočet je zde uveden tedy jen pro úplnost.

4.4 Výsledky fitování elips pomocí obou metod

Momentová metoda měla původně sloužit jako první přiblížení. Výsledky však ukazují, že pokud odstíníme dostatečné množství viditelných hvězd ze snímku, tak je již metoda natolik přesná, že už může, v rámci chyb, plnohodnotně plnit funkci fitování elips na eliptické galaxie. Z metody nejmenších čtverců se tedy stává vlastně jen upřesňující metoda, kdy pro soubor dat určité intenzity, v jistém okolí momentové elipsy, se získávají parametry nové elipsy, která se od původní příliš neliší.

Uvedené závěry však neplatí pro galaxie vykazující odchylky některých isofot od předpokládaného pravidelného uspořádání celkové struktury. Takové neposedné oblasti se Momentová metoda snaží napravit částečným uspořádáním, výsledná elipsa pak ale neodpovídá isofotám dané intenzity.

Algoritmus B2AC zaručuje, díky svému zaměření na elipsy, že výsledná křivka bude vždy elipsa, ale nechová se již robustně k fitovanému souboru dat, závisí tedy na jeho vhodném výběru. Jelikož jsou výsledky momentové metody sice relativně dobré, ale pro jistotu abychom nepřišli o některá data a aby stanovený výsledek byl co nepřesnější, vypočítává se výsledná elipsa v několika krocích (iteracích). Ze stanovené momentové elipsy byl vybrán soubor isofotálních dat v širším okolí a v širším rozsahu intenzit. Na taková data byla použita metoda nejmenších čtverců a vypočítána B2AC elipsa. Tato elipsa sice mnohem lépe charakterizuje dané rozložení intenzity, ale pro větší rozptyl fitovaných dat,



Obrázek 4.4: Srovnání Momentové a B2AC metody dvou intenzit pro galaxii NGC205 z brněnského snímku. Do grafu jsou vyneseny i isofoty daných intenzit. Je vidět, že momentové elipsy jsou už celkem přesné a elipsy vypočítané B2AC metodou se moc neliší.

je ještě vcelku nepřesná. Podle této nové elipsy však můžeme vybrat znovu data na metodu nejmenších čtverců, a to tentokrát již v užším okolí a rozsahu intenzit. Znovu stanovená elipsa, by pak mohla být už hledané fitování. Pro větší přesnost je možné pro jistotu tento krok několikrát zopakovat.

Kapitola 5

Získané poznatky z plošné fotometrie eliptických galaxií

Tato kapitola se věnuje výsledkům a následně vyvozeným závěrům z praktické aplikace plošné fotometrie eliptických galaxií. Klade si za cíl ověření uvedených modelů fotometrických profilů eliptických galaxií pro různé pozorovací podmínky a získání informací o těchto objektech na základě teoretických znalostí uvedených v kapitolách 2 a 4.

5.1 Programový základ pro plošnou fotometrii galaxií

Plošná fotometrie galaxií se neobejde bez počítačového zpracování. Díky rozlehlosti těchto objektů se manipuluje s velkým množstvím dat a počítají se rozsáhlé výpočty. Prezентované výsledky jsou získávány na základě zpracování několika programů.

Praktická část práce se dá rozdělit do dvou fází. První je fáze přípravná, kdy na zredukovaném CCD snímku (redukce je provedena podle kapitoly 3.3) aproximujeme plošnou zářivou strukturu galaxií elipsami různých intenzit. V další části se v závislosti na získaných informacích o rozložení jasu vykreslují fotometrické profily.

Všechny programy pracující s FITS formáty jsou napsané v jazyce C a využívají na manipulaci s těmito soubory funkce knihovny CFITSIO ([24]).

Fitování funkčních závislostí na fotometrické profily a vykreslování grafů pak bylo uskutečněno pomocí programu GNU Gnuplot. Nejčastěji uvedené grafy prezentují závislost plošné hvězdné velikosti μ v jednotkách $\text{mag} \cdot \text{arcsec}^{-2}$ na vzdálenosti od centra galaxie r v arcsec. Druhá varianta profilových grafů je opět závislost μ na vzdálenosti, ale tentokrát na její mocnině $r^{1/4}$.

5.1.1 Fitování elips

Momentová metoda

Momentovou metodu, popsanou v kapitole 4.2, používá k různým výpočtům několik programů. Souhrnně se jim při volání programu předává jako parametr snímek s eliptickou galaxií a soubor se souřadnicemi středů a poloměry hvězd. Nemusí se jednat o všechny hvězdy na snímku, programy pracují s oblastí předpokládaného fitování zadané na vstupu (jedná se o plochu obdélníku ve tvaru $[x_1, y_1, x_2, y_2]$), hvězdy mimo tuto oblast tedy výpočet neovlivňují. Dále se na vstup, po uvedení oblasti fitování, napíše intenzita ze snímku, pro

kterou chceme elipsu vypočítat. Názvy zdrojových souborů a jejich základní funkce jsou následující:

Mellc.c vypisuje na výstupu body nacházející se na Momentové elipse, vypočítané ze zadané oblasti a intenzity.

MMellc.c vypočítává také Momentovou elipsu, ale s tím rozdílem, že na výstupu získáme její parametry. Programu je možno zadat množinu více intenzit, ten pak vypíše postupně parametry elipsy pro každou z nich.

ellc.c se zabývá výběrem vhodných isofotálních dat na fitování elipsy metodou nejmenších čtverců. Na vstup se před uvedením isofotální intenzity napíše ještě minimální intenzita na snímku a velikost intervalu intenzit, ve kterém se vybírají data.

ellc2.c je modifikací předešlého zdrojového kódu. Program ale nevypočítává žádnou momentovou elipsu. Dostane na vstupu již stanovené parametry elipsy (dále požaduje stejné informace jako předešlý program) a z nich určí isofotální data stejným způsobem, jen v o něco menším intervalu intenzit a rozsahu vzdáleností od uvedené elipsy.

B2AC

Na implementaci B2AC metody se používají dva skripty programu GNU Octave. Jedná se o modifikovaný kód určený původně pro Matlab a převzatý od autorů této metody z [25]. Skripty pracují se zadaným souborem isofotálních dat a nařizují na něj elipsu.

b2ac.m je výpočet elipsy ze zadaných dat metodou B2AC, získáme body nalézající se na obvodu vypočtené elipsy.

B2ac.m obsahuje tytéž postupy jako předešlý skript, s tím rozdílem, že získáme parametry výsledné elipsy.

5.1.2 Vykreslování fotometrických profilů

Na vykreslování fotometrických profilů bylo vytvořeno několik specifických programů, kterým se předává na vstupu jako parametr snímek dané galaxie. Dále se načítají parametry elipsy, použité na normalizování dat, její intenzita, pozadí snímku, měřítko a nulový bod (referenční hvězdná velikost odpovídající jednotkové intenzitě (toku záření)).

profile.c je program vypisující pomocí uvedených postupů data fotometrického profilu galaxie z bodů na snímku.

mprofile.c je modifikací předchozího programu a používá se při kalibraci plošných hvězdných velikostí bodů v galaxii. Při spuštění se předá jako parametr navíc soubor s intenzitami a zkalibrovanými hvězdnými velikostmi několika hvězd na snímku.

5.2 Získané informace o eliptických galaxiích z fitování elips

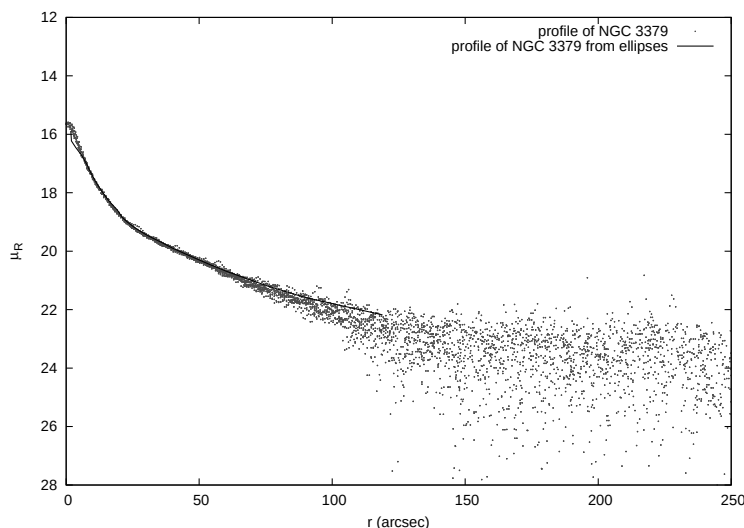
Jak již bylo řečeno, jsou eliptické galaxie přibližně eliptického tvaru, a tím pádem nám poskytují možnost jejich strukturu za eliptické křivky zaměnit.

Z fitování na isofotální data se z vypočítaných parametrů elipsy zjistí zářivý tvar daného objektu. Touto aproximací jsme si výrazně zjednodušili cestu k získání výsledného profilu. Fotometrické profily se pak mohou vynášet jako závislost intenzity nařizovaných několika elips na geometrickém poloměru ($r = \sqrt{ab}$, kde a a b jsou hlavní a vedlejší poloosa elipsy)¹,

¹Vypočítané elipsy se tedy převedou na radiální rozložení (kružnice) o daném poloměru $r = \sqrt{ab}$ a stejné plochy jako původní elipsa. Všechny profily vyneseny do grafů v této práci jsou právě převedeny na tento radiální průběh jasů. Není to však podmínkou a v některých pracích zaměřených také na plošnou fotometrii

nebo díky normování jednou elipsou se vykreslí daný profil mnoha bodů v galaxii.

Srovnáme-li oba profily, měli bychom teoreticky dojít k závěru, že jejich průběh je totožný. Jak obrázek 5.1 ukazuje, jsou si tyto dvě varianty vykreslení profilu do dané vzdálenosti, do kterých jsou elipsy fitovány, opravdu odpovídající. Při vykreslování fotometrických profilů můžeme, v závislosti na situaci, tedy použít oba způsoby.



Obrázek 5.1: Fotometrický profil galaxie NGC 3379. Na obrázku se srovnává vykreslený profil určený z mnohonásobného fitování elips a radiální profil bodů v galaxii.

Fitování elips na isofoty nemusí být vždy nejúspěšnější. Zářivá struktura eliptických galaxií vykazuje jisté odchylky od symetrického uspořádání a eliptického tvaru isofot. Příkladem objektu se znatelným odlišením od eliptické struktury je pozorovaná galaxie NGC 2768, jejíž isofoty nabývají tvaru připomínající zaoblený obdélník. Její méně eliptická struktura je také patrná z vykreslených fotometrických profilů, kde jsou data více rozptýlená než je běžné u ostatních galaxií.

Při aproximaci zářivé struktury galaxií z HST snímků elipsami se vyskytly také jisté komplikace. Použité snímky jsou v podstatě složeny ze čtyř hlavních komponent, jedné malé střední části a ze tří větších snímků k ní přiléhajících. K úplnému obrázku centra galaxie nám chybí levá dolní oblast. Elipsy nižších intenzit jsou tedy fitovány na neúplná data a B2AC metoda pak vykazuje méně přesné výsledky. Tato informace byla brána v potaz a větší váha byla kladena na elipsy s úplnými isofotami.

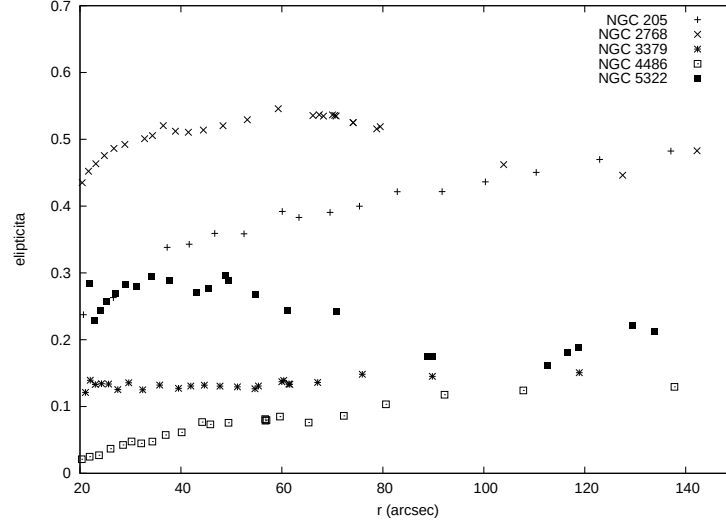
5.2.1 Elipticita

Známe-li parametry fitovaných eliptických křivek, můžeme si podle (1.1) stanovit elipticitu jednotlivých elips. Vykreslením závislosti elipticity na radiální vzdálenosti od centra galaxie, zjistíme, že tvar elipsový se směrem ke středu mění ve tvar kruhový (elipticita tedy klesá k nule).

Hubbleova klasifikace eliptických galaxií je založená právě na pozorované elipticitě těchto objektů. Můžeme se tedy pokusit vypočítat celkovou elipticitu galaxie a tím pádem také

galaxií se setkáváme i s jiným způsobem. Jedná se o vynesení závislosti plošné hvězdné velikosti na hlavních poloosách odpovídajících elips.

stanovit její zařazení v Hubbleově diagramu. V souladu s výše uvedeným ale na zjištění celkové elipticity galaxie nemůžeme vzít v potaz všechny fitované elipsy. Hrubý odhad typu pozorovaných galaxií byl učiněn na základě fitování elips pouze v určitých vzdálenostech od středu, viz například 5.2



Obrázek 5.2: Elipticita pozorovaných galaxií, určená z fitování elips a vykreslená ve středních částech profilu (od 20 do 150 arcsec).

galaxie:	typ (RC 3)	typ (RSA)	typ (x)
NGC 3379	E1	E0	E1
NGC 4486	E0-1 p	E0	E0-1
NGC 5322	E3-4	E4	E3
NGC 2768	E6*	S0	E5
NGC 205	E5 p	E5 p	E4-5

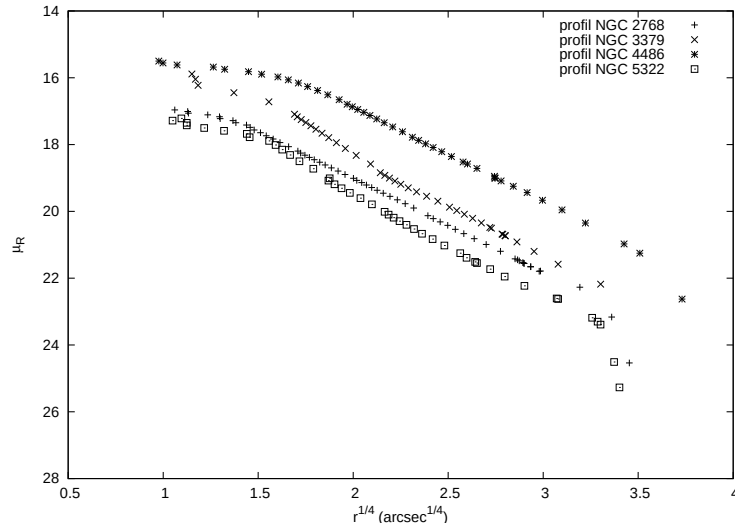
Tabulka 5.1: Klasifikace pozorovaných eliptických galaxií. První dva sloupce představují typ galaxie zjištěný ze dvou galaktických katalogů – Third Reference Catalogue of Bright Galaxies (RC 3, [2]) a A revised Shapley-Ames Catalog of bright galaxies (RSA, [1]). Ve třetím sloupci je uvedený odhad Hubblova typu galaxie na základě fitování elips v této práci.

5.3 de Vaucouleursův zákon

Jednou z nejdůležitějších náplní této práce je zkoumání charakteristik eliptických galaxií fitováním modelů na jejich fotometrické profily. Převážně nás zajímá de Vaucouleursův zákon a jeho praktická aplikace.

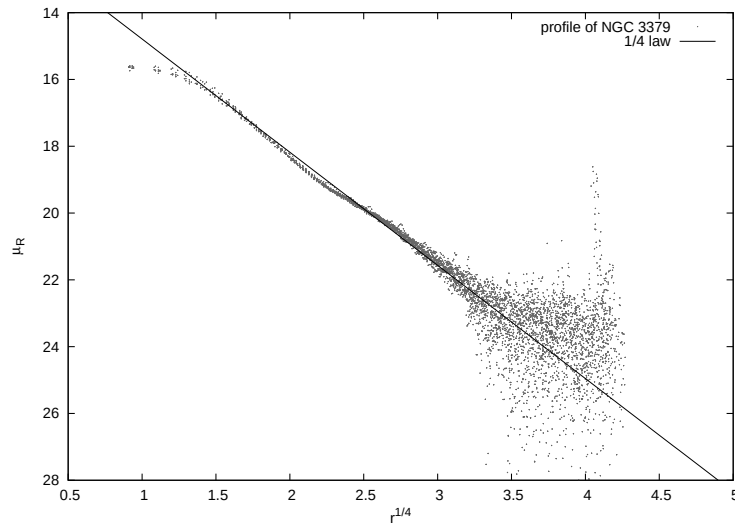
Profily všech pěti pozorovaných galaxií byly aproximovány $r^{1/4}$ zákonem, zjistila se tak efektivní intenzita a efektivní poloměr. Abychom se ujistili, že takto stanovené konstanty odpovídají alespoň přibližně skutečnému rozložení jasu, naftujeme na galaxii efektivní elipsu vypočtené intenzity. Z jejích parametrů se může zpětně určit poloměr odpovídající kružnice ($r = \sqrt{a_e b_e}$) a pokud ten se v rámci chyb shoduje s efektivním poloměrem, naftovali jsme

$r^{1/4}$ zákon úspěšně. Pokud tomu tak není, je potřeba výpočet zpřesnit, například vhodnějším výběrem dat.



Obrázek 5.3: Profily čtyř eliptických galaxií z fitovaných elips.

Obecně není vhodné fitovat funkční závislosti na vzdálenější zašumělá data profilů (fotometrické profily jsou fitovány do vzdálenosti max. 150 arcsec) a ani na centrální oblasti. Tuto domněnku potvrzuje obrázek 5.4, kde je vykreslen profil galaxie NGC 3379 (fotometrický standard eliptických galaxií) a odpovídající $r^{1/4}$ zákon v mocninné podobě. Vzdálenější oblasti jsou zašumělé a centrum galaxie nesleduje přímkovou závislost.



Obrázek 5.4: Profil galaxie NGC 3379 z brněnského snímku. Na obrázku je vidět, že větší část profilu galaxie (vyjma okrajových oblastí) dobře koresponduje s $r^{1/4}$ zákonem.

Další možností, kdy se nám nemusí dařit aproximovat fotometrický profil galaxie de Vaucouleurovým zákonem, je skutečnost, že radiální rozložení jasu tomuto zákonu neodpovídá.

Z pěti fitovaných galaxií se nejméně dařilo aproximovat tímto zákonem galaxii NGC 205, což by mělo být u trpasličích galaxií, jakožto objektů s odlišnými fotometrickými vlastnostmi, celkem očekávané. Další galaxie, u které by se odklon od $r^{1/4}$ zákona, díky obvyklému u cD galaxií vyskytujícímu se rozsáhlému halu, očekával je NGC 4486. Profil galaxie získaný z uvedených pozorování ale velice dobře koresponduje s de Vaucouleursovým zákonem. U CCD pozorování je však známo, že se tyto hala nedaří zachytit. Galaxie NGC 3379 je považována za fotometrický standard klasických eliptických galaxií a mnohdy je na jejím profilu de Vaucouleursův zákon prezentován. V tomto ohledu se dá říci, že fitování nezklamalo a profil galaxie celkem dobře koresponduje s $r^{1/4}$ zákonem.

Mimo efektivního poloměru a efektivní intenzity (efektivní plošné hvězdné velikosti) můžeme v souladu s definicí de Vaucouleursova zákona určit další fotometrické vlastnosti galaxií, jako například odhad centrální jasnosti, celkové hvězdné velikosti galaxie a pokud známe vzdálenost objektu, tak i absolutní hvězdnou velikost v daném filtru. V tabulce 5.3 jsou uvedené zmíněné charakteristiky eliptických galaxií.

galaxie:	r_e (arcsec)	μ_e	μ_{centrum}	$\langle\mu\rangle_e$	$m_{\text{galaxie}}(\text{mag})$	$M_{\text{galaxie}}(\text{mag})$
NGC 3379	36.3124	20.076	11.751	18.684	8.8870	-21.445
NGC 4486	55.872	20.650	12.325	19.257	8.5251	-22.446
NGC 5322	46.318	20.719	12.394	19.326	9.0006	-23.496
NGC 2768	62.639	21.520	13.195	20.127	9.1466	-22.603
NGC 205	566.51	23.823	15.498	22.430	6.6677	-17.922

Tabulka 5.2: Vlastnosti pozorovaných galaxií určené z plošné fotometrie a aplikace $r^{1/4}$ zákona. V tabulce se uvádí efektivní poloměr r_e , efektivní plošná hvězdná velikost μ_e , odhadnutá centrální plošná hv. velikost μ_{centrum} , průměrná plošná hv. velikost oblasti za efektivním poloměrem $\langle\mu\rangle_e$, celková hvězdná velikost galaxie m_{galaxie} a absolutní hvězdná velikost galaxie M_{galaxie} . Všechny uvedené plošné hvězdné velikosti jsou uvedeny v jednotkách $\text{mag} \cdot \text{arcsec}^{-2}$ a výpočty jsou uskutečněny podle teorie v kapitole č. 2. Absolutní hvězdné velikosti jsou určeny jen přibližně, kde za vzdálenost daných objektů se dosadila hodnota v parsecích uvedená v kapitole o pozorování.

Pro názornost a přibližné srovnání byl na profily těchto pěti galaxií nafitován také zobrazený de Vaucouleursův zákon (Sersic model) s třetím fitovaným parametrem funkce – mocninou vzdálenosti od centra galaxie. V některých případech byla získána lepší funkční aproximace galaktických profilů. Zejména u profilu galaxie NGC 205 vychází fitovaná mocnina přibližně dvakrát větší.

galaxie:	r_e (arcsec)	μ_e	n
NGC 3379	59.972	21.113	5.300
NGC 4486	56.711	20.657	2.744
NGC 5322	152.270	22.886	6.171
NGC 2768	68.925	21.729	4.170
NGC 205	192.460	21.760	1.877

Tabulka 5.3: Nafitované parametry Sersic modelu: efektivní poloměr r_e , efektivní hvězdná velikost μ_e a mocnina radiální vzdálenosti od centra galaxie $1/n$.

5.4 Fotometrické profily z různých pozemských dalekohledů

Tato podkapitola se věnuje srovnání fotometrických profilů získaných z brněnských snímků a ze snímků, které byly pořízeny na jiných observatořích. Jak již bylo v kapitole 3 zmíněno, jedná se o observatoře Konkoly a Lowell.

Jelikož byly snímky pořízeny při odlišných pozorovacích podmínkách, různými přístroji a zpracovány různými metodami, neodpovídají si rozsahy intenzit ani instrumentální hvězdné velikosti získané z různých dalekohledů. Ideální by bylo aplikovat kalibraci plošných hvězdných velikostí také na tato data. Výsledné profily by byly pak na daných podmínkách relativně nezávislé a dobře srovnatelné se skutečností.

Kalibrační měření jsou však k dispozici jen pro snímky napozorované v Brně a to také ne pro všechny. Pro srovnání je však nejdříve potřeba mít výsledná data ve stejném rozsahu. Budeme-li předpokládat, že zkalibrovaný fotometrický profil jedné galaxie bude z různých pozorování vycházet stejně, což by teoreticky měl, můžeme zkalibrovat data z druhých dalekohledů posunutím o jistou konstantu, kterou získáme fitováním na soubory dat z brněnských snímků. Jedná se ale jen o velmi hrubou metodu, která nemůže samotnou kalibraci nahradit.

Na profily galaxií napozorovaných ostatními pozemskými dalekohledy byl také naftován de Vaucouleursův zákon. Získané profily eliptických galaxií jsou velmi podobné profilům z brněnského pozorování. Pozorují se jen velmi nepatrné rozdíly, například sklonu závislosti u NGC 4486 nebo NGC 5322, ale vzhledem k velmi přibližné kalibraci těchto dat se to dá považovat za úspěšné srovnání. Pokud bychom měli všechny snímky jedné galaxie nakalibrovány stejným způsobem, dalo by se porovnání takovýchto měření více rozebrat.

galaxie:	r_{eM} (arcsec)	r_{eL} (arcsec)	r_{eK} (arcsec)
NGC 3379	36.312	33.790	—
NGC 4486	55.872	45.307	88.010
NGC 5322	46.318	30.243	—
NGC 2768	62.639	62.171	73.216
NGC 205	566.510	—	338.708

Tabulka 5.4: Efektivní poloměry získané fitováním na profily z různých dalekohledů. Jedná se o observatoř MonteBoo, Lowell a Konkoly.

5.5 Centra eliptických galaxií

Velmi zajímavým a novým objektem zájmu jsou centrální části galaxií. V rámci zkoumání eliptických galaxií byly pro srovnání použity také snímky z Hubbleova dalekohledu. Jedná se sice o velmi dobrý přístroj, ale jeho hlavní předností jsou výborné pozorovací podmínky nerušené zemskou atmosférou. Získávají se tak velmi kvalitní a ostré snímky.

Srovnáním výsledků plošné fotometrie se dospělo k zajímavým závěrům. Všechny čtyři klasické eliptické galaxie vykazují v HST profilech výrazný vzestup intenzity směrem ke středu galaxie. Tento nárůst jasnosti se rychle zvyšuje a odklání se tím čím dál více od mírnějších zaoblených pozemských center. Taktéž nebylo pozorováno žádné předpokládané konstantní jádro, intenzity tedy stoupají jakoby k nekonečnu. U trpasličí galaxie NGC 205 je také pozorován pík zjasnění, ale pouze v nejužší části centra, jakoby se zde jádro galaxie naházelo "omylem".

Na centrální části profilů získaných z HST snímků nemůžeme fitovat klasický de Vaucoulerusův zákon s efektivním poloměrem určených v polovině celkové intenzity galaxie. Kdybychom se o to pokusili, zjistili bychom, že efektivní elipsa se nachází mimo snímek nebo na jeho okrajích a její fitování by bylo dosti problematické. Z tohoto důvodu se zavedla nová konstanta $r^{1/4}$ zákona, definující čtvrtinu zářivého toku celé galaxie uvnitř nového efektivního poloměru r_{e4} , který odpovídá isofotální intenzitě I_{e4} (viz kapitola 2.2.3).

Na HST snímky se fitoval $r^{1/4}$ zákon tedy v této podobě a srovnával se s profilem galaxií napozorovaných v Brně a de Vaucoulerusovým zákonem původně nafitovaným na nich. Další možnosti, jak aproximovat centrální oblasti galaxií jsou Hubbleův-Reynoldův zákon (2.25) a modifikovaný Hubbleův zákon (2.26).

Po aplikaci uvedených modelů fotometrických profilů se dospělo k několika zajímavým výsledkům. Oba Hubbleovy zákony počítají s tím, že galaxie mají různě velké konstantní jádro. Centrální pík profilů z HST snímků ale v uvedených případech nic takového nenažnačuje. Nejlépe se tato centra fitovala právě $r^{1/4}$ zákonem. Dále se v některých případech jevil celkem přesný Hubbleův zákon. Jeho modifikovaná podoba ale reálným centrům galaxií s výrazným zjasněním neodpovídá. Na druhou stranu se tímto zákonem velice dobře aproximují zaoblená centra pozorovaná ze Země.

galaxie:	μ_{e4}	r_{e4}	μ_{A0}	r_{A0}	μ_{B0}	r_{B0}
NGC 4486	15.0000	7.8167	9.6312	0.2267	15.2600	10.4957
NGC 3379	16.1208	4.8999	12.2792	0.9771	15.6537	4.9618
NGC 5322	16.5623	4.4362	13.3513	1.0288	17.4450	5.3835
NGC 2768	18.0180	9.0753	14.2143	1.8755	18.3224	20.78334
NGC 205	16.6181	44.7817	13.9351	15.2835	14.7161	19.4065

Tabulka 5.5: Parametry třech zákonů fitovaných na centra galaxie. Jedná se o de Vaucouleursův zákon ve čtvrtině celkové intenzity galaxie, Hubbleův zákon – A a modifikovaný Hubbleův zákon – B

Závěr

Úkolem této práce bylo nahlédnutí do tajů plošné fotometrie eliptických galaxií. Hlavním předmětem zájmu je studium radiálního rozložení zářivé struktury těchto objektů. Zkoumal se tvar profilu galaxií, neboli závislost poklesu jasnosti na vzdálenosti od centra objektu. Zářivá struktura galaxie je zde převedena do radiálního rozložení jasů. Abychom toho mohli dosáhnout, bylo nejdříve potřeba popsat eliptickou strukturu galaxií.

Aproximace plošného rozložení jasů galaxií eliptickými křivkami tvoří nemalou část práce. Na fitování elips se klade dvojí požadavek: každá elipsa určité intenzity musí odpovídat isofotám této intenzity a zároveň se nesmí fitovat na data nepocházející z galaxie. Aby se podmínky splnily, bylo aplikováno fitování elips dvojího druhu. Nejdříve se aproximovala zářivá struktura galaxie elipsami vypočtenými pomocí druhých momentů plochy galaxie s konstantní intenzitou (jedná se o soubor souřadnic pixelů, které mají intenzitu na snímku vyšší, než je intenzita fitované elipsy). Z určitého okolí vypočtené elipsy se vybrala isofota dané intenzity a na ni se nafitovala nová elipsa, tentokrát metodou nejmenších čtverců, používající algoritmus B2AC. Ten se zaměřuje na fitování pouze eliptických křivek.

Ačkoliv je takto aproximovaná struktura objektů elipsami velmi dobře popsána, nemůžeme od eliptických galaxií očekávat, že budou vždy symetrického tvaru s přesně eliptickým rozložením hmoty. Tak jako se liší pruhovaný vzor každé zebry, liší se ve své podobnosti každá eliptická galaxie. Leč při pozorování z velké vzdálenosti se nám mohou některé jevit skoro stejné. Na odlišení jemných pozorovaných rozdílů v eliptické struktuře galaxií by bylo zajímavé fitovat isofoty určitých intenzit nějakou obecnější křivkou, například Fourierovým polynomem. Tento postup by však neměl valný význam při aplikaci na snímky vzdálenějších galaxií pořízených v ne příliš kvalitních pozorovacích podmínkách, jaké má například brněnská observatoř.

Pro účely této práce se v pozorovatelně Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky Přírodovědecké fakulty MU v Brně pořídily ve filtru R hluboké CCD snímky pěti předpokládaných eliptických galaxií: NGC 205, NGC 3379, NGC 2768, NGC 5322 a NGC 4486. Dále se díky uveřejněným datům z jiných dalekohledů podařilo získat napozorovaná data také z Lowellské a Konkolské observatoře a snímky center těchto pěti galaxií z Hubblova vesmírného dalekohledu.

Zavedením tzv. de Vaucouleursova zákona, popisujícího radiální průběh jasů, byly zkoumány vlastnosti pozorovaných galaxií. Podle vykreslených grafů je patrné, že profily pěti eliptických galaxií při prvním přiblížení opravdu sledují závislost na $r^{1/4}$ rozložení svítivé hmoty. Podařilo se také tento zákon na uvedené galaxie většinou úspěšně nafitovat, byl tedy zjištěn efektivní poloměr a efektivní plošná hvězdná velikost. V souladu s použitou definicí tohoto zákona byly určeny další fotometrické vlastnosti galaxií, například celková hvězdná velikost objektů. Nejlépe lze de Vaucouleursův zákon aplikovat na galaxie NGC 4486 a NGC 3379. Nejhuře pak na trpasličí galaxii NGC 205.

Uvedené galaxie ale nemusí odpovídat přesně $1/4$ zákonu, tedy takto přesně stanovené

mocnině vzdálenosti. Pro upřesnění a porovnání byl na uvedené galaxie nafitován také zobecněný de Vaucouleursův zákon $r^{1/n}$, tzv. Sersic model, kde n se stává dalším fitovaným parametrem funkce. V některých případech (galaxie NGC 205 a NGC 5322) byl nově fitovaný tříparametrický model výrazně úspěšnější než původní de Vaucouleursův zákon.

Pro porovnání výsledků z různých pozorovacích podmínek byly nafitovány de Vaucouleursovým zákonem také profily těchže galaxií napozorované jinými pozemskými dalekohledy. Tyto však nebyly zkalibrovány a pro srovnání výsledků bylo potřeba výsledná data alespoň hrubým odhadem posunout o jistou konstantu. Bylo zjištěno, že se profily galaxií při takovém srovnání od sebe skoro vůbec neliší a maximálně je u galaxie NGC 4486 pozorovatelný mírně odlišný sklon přímkové závislosti $r^{1/4}$.

V poslední části práce byly srovnávány profily center eliptických galaxií pořízených Hubbleovým dalekohledem s daty těchže objektů, pozorovaných na brněnské observatoři. Jak je patrné, jsou centrální části galaxií na snímcích pořízených na Zemi jistým způsobem zahaleny. Vznikla tedy domněnka, že jsou tyto centra konstantní a svými zářivými vlastnostmi vybočují z de Vaucouleursova zákona. Následné pozorování Hubbleovým dalekohledem však bylo v tomto směru přelomové a ukázalo, že tomu tak vůbec nemusí být. Mnohé galaxie vykazují při vykreslení profilu rychlý výstup plošné jasnosti směrem ke středu v místech, kde se předpokládalo konstantní jádro.

Na centra galaxií byly také fitovány některé fotometrické modely. Nejlépe se HST profil čtyř normálních eliptických galaxií aproximoval právě $r^{1/4}$ zákonem. Z dalších dvou modelů se s relativně dobrým výsledkem setkal Hubbleův zákon, který počítá s výrazným centrálním zjasněním, ale menší středovou část jádra galaxie považuje za konstantní a její pozici nepatrně posouvá. Modifikovaný Hubbleův zákon na druhou stranu celkem dobře modeluje pozorované zaoblené centrum galaxií z pozemských dalekohledů.

Pokud se zabýváme centrálními částmi galaxií je mnohem přínosnější uskutečnit pozorování mimo zemskou atmosféru. Použité snímky z Hubbleova dalekohledu však zabírají, v případě zmíněných pěti galaxií, jen tuto oblast. Zajímavým námětem do budoucna by bylo pokusit se zkombinovat centrální části z HST pozorování se vzdálenějšími oblastmi z pozemských dalekohledů a modelovat tak reálnější rozložení jasu v eliptických galaxiích.

Uvedené praktické výsledky a domněnky této závěrečné části však vycházejí jen ze CCD pozorování uvedených pěti galaxií pomocí několika dalekohledů a jen v jednom filtru fotometrického systému (filtr R). Pro obecnější charakter těchto tvrzení by bylo potřeba zpracovat mnohem více pozorování s mnohonásobně větším vzorkem objektů.

Literatura

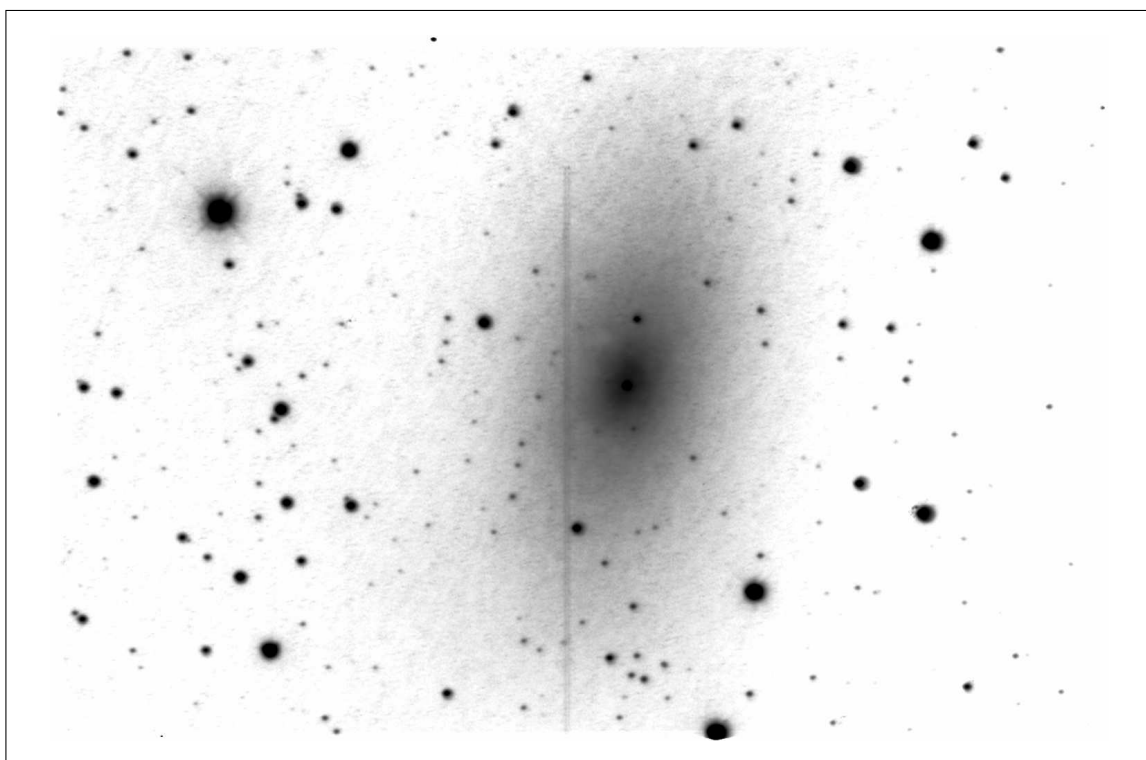
- [1] A. SANDAGE, G. A. TAMMANN. *A revised Shapley-Ames Catalog of bright galaxies*. Carnegie Institution of Washington Publication, Washington: Carnegie Institution, 1987, 2nd ed., 1987.
- [2] G. DE VAUCOULEURS, A. DE VAUCOULEURS, H. G. JR. CORWIN, R. J. BUTA, G. PATUREL, P. FOUQUE. *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies*. Volume 1-3, XII, 2069 pp. 7 figs.. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1991.
- [3] BRADLEY W. CARROLL, DALE A. OSTLIE. *An Introduction to Modern Astrophysics*. Weber Stat University. Addison-Wesley Publishing Company, INC., 1996. ISBN 0-201-54730-9.
- [4] JAMES BINNEY, MICHAEL MERRIFIELD. *Galactic Astronomy*. Princeton series in astrophysics. Addison-Wesley Publishing Company, INC., 1996. ISBN 0-201-54730-9.
- [5] Cosmos: The swinburne astronomy online encyclopedia:
<http://www.cosmos.swin.edu.au/index.html>.
- [6] The encyclopedia of astrobiology, astronomy, and spaceflight:
<http://www.daviddarling.info/encyclopedia/etemain.html>.
- [7] HENRY C. FERGUSON, BRUNO BINGGELI. Dwarf Elliptical Galaxies. *Astronomy and Astrophysics Review*, pages 67–122, 1994.
- [8] Dwarf spheroidal galaxies:
<http://www.astro.uu.se/ns/dwarf.html>.
- [9] A. U. LANDOLT. UBVRI photometric standard stars around the celestial equator. *The Astronomical journal*, 88:439–460, March 1983.
- [10] Finding charts for AGN:
<http://www.lsw.uni-heidelberg.de/projects/extragalactic/charts/>.
- [11] J. KORMEDY, D. DJORGOVSKI. Surface Photometry and the Structure of Elliptical Galaxies. *Annual review of astronomy and astrophysics*, pages 235–77, 1989.
- [12] ALISTER W. GRAHAM AND SIMON P. DRIVER. A concise reference to (projected) Sersic $R1/n$ quantites, including Concentration, Profile Slopes, Petrosian indices, and Kron Magnitudes. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, pages 118–127, 2005.
- [13] Monteboo observatory:
<http://www.physics.muni.cz/mb/>.

- [14] The 200 brightest galaxies:
<http://www.atlasoftheuniverse.com/galax200.html>.
- [15] F. Hroch. Computer Programs for CCD Photometry. In J. Dusek, editor, *20th Stellar Conference of the Czech and Slovak Astronomical Institutes*, pages 30–+, February 1998.
- [16] ZSOLT FREI, PURAGRA GUHATHAKURTA, JAMES E. GUNN, AND J. ANTHONY TYSON. A Catalog of Digital Images of 113 Nearby Galaxies. *The Astronomical journal*, 1996.
- [17] Template frames of nearby galaxies for SN-photometry:
<http://astro.u-szeged.hu/sn/gx/>.
- [18] K.SÁRNECZKY, J.VINKÓ, GY.M.SZABÓ ET AL. Template frames of nearby galaxies for SN-photometry. in: *Supernovae (10 years of SN 1993J) - Proceeding of IAU Colloquium No. 192*. eds: J.M.Marciade, K.Weiler, *RevMexAA-SC, in prep. (2004)*, 2004.
- [19] Wikipedia: Hubble space telescope:
http://en.wikipedia.org/wiki/hubble_space_telescope.
- [20] SAF - Science Archive Facility:
<http://archive.eso.org/>.
- [21] The WFPC2 Association Project Version 2 Stacking algorithm:
http://www1.cadc-ccda.hia-ihp.nrc-cnrc.gc.ca/hst/wfpc2/wfpc2_r2_processing.html.
- [22] A.W. FITZGIBBON, R.B. FISHER. A Buyer's Guide to Conic Fitting. *British Machine Vision Conf.*, pages 513–522, 1995. Department of Artificial Intelligence, Edinburgh University.
- [23] A.W. FITZGIBBON, MAURIZIO PILU AND R.B. FISHER. Direct Least Square Fitting of Ellipses. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pages 476–480, 1999. Department of Artificial Intelligence, Edinburgh University.
- [24] CFITSIO - A FITS File Subroutine Library:
<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/fitsio/>.
- [25] Maurizio pilu's past research works: Direct least square fitting of ellipses (1996):
<http://www.hpl.hp.com/personal/mp/research/ellipsefit/ellipse.htm>.
- [26] Galaxies and the universe - www course note:
<http://www.astr.ua.edu/keel/galaxies>.
- [27] The messier catalog:
<http://sed.s.org/messier/>.

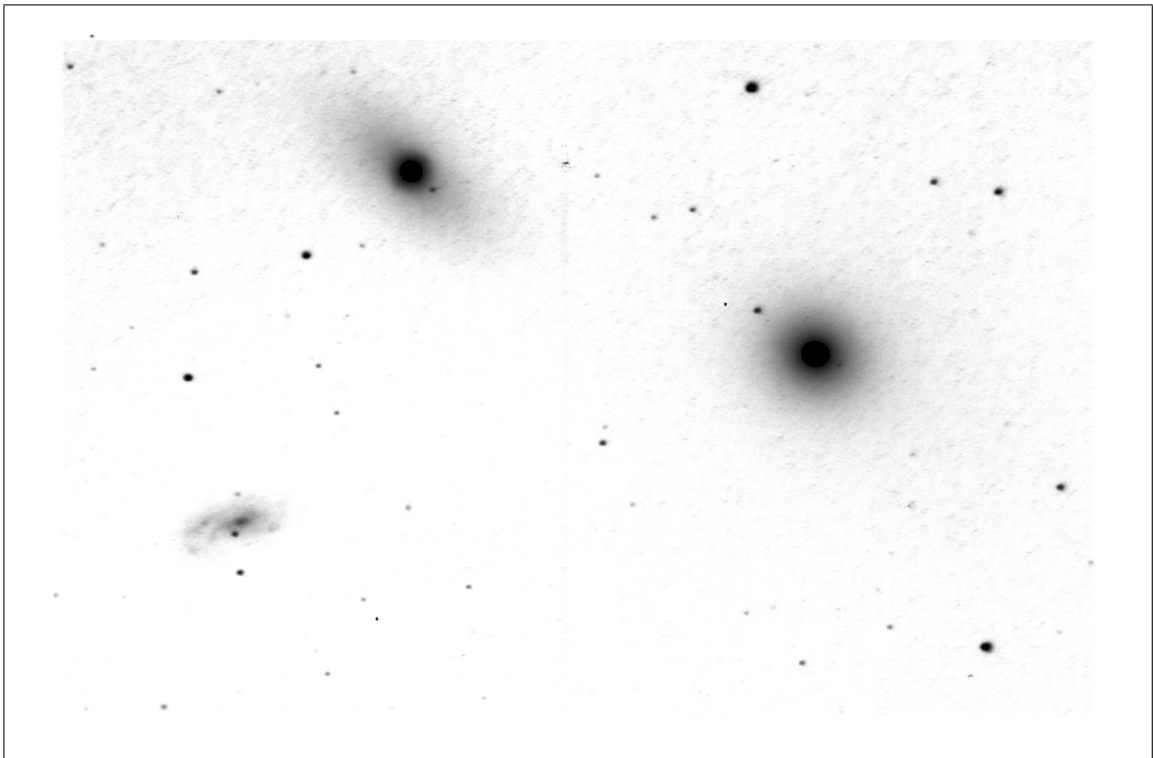
Vysázeno v typografickém systému L^AT_EX 2_ε

Dodatek A

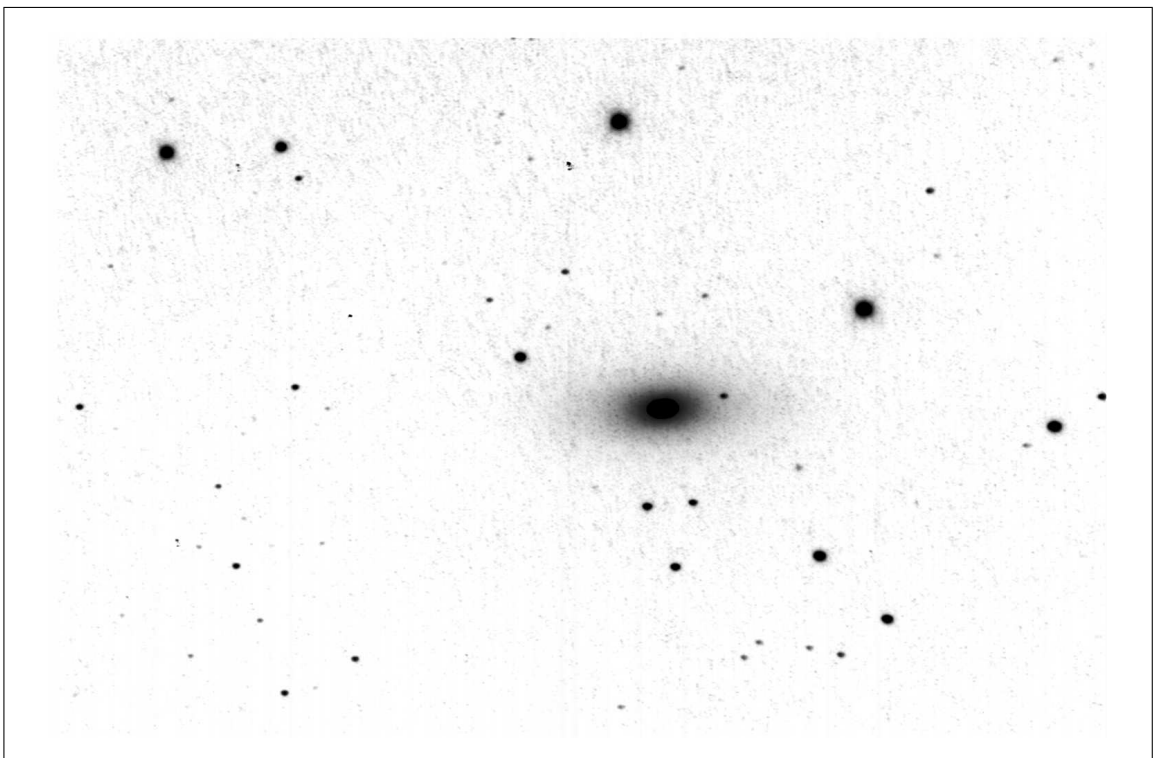
Přílohy



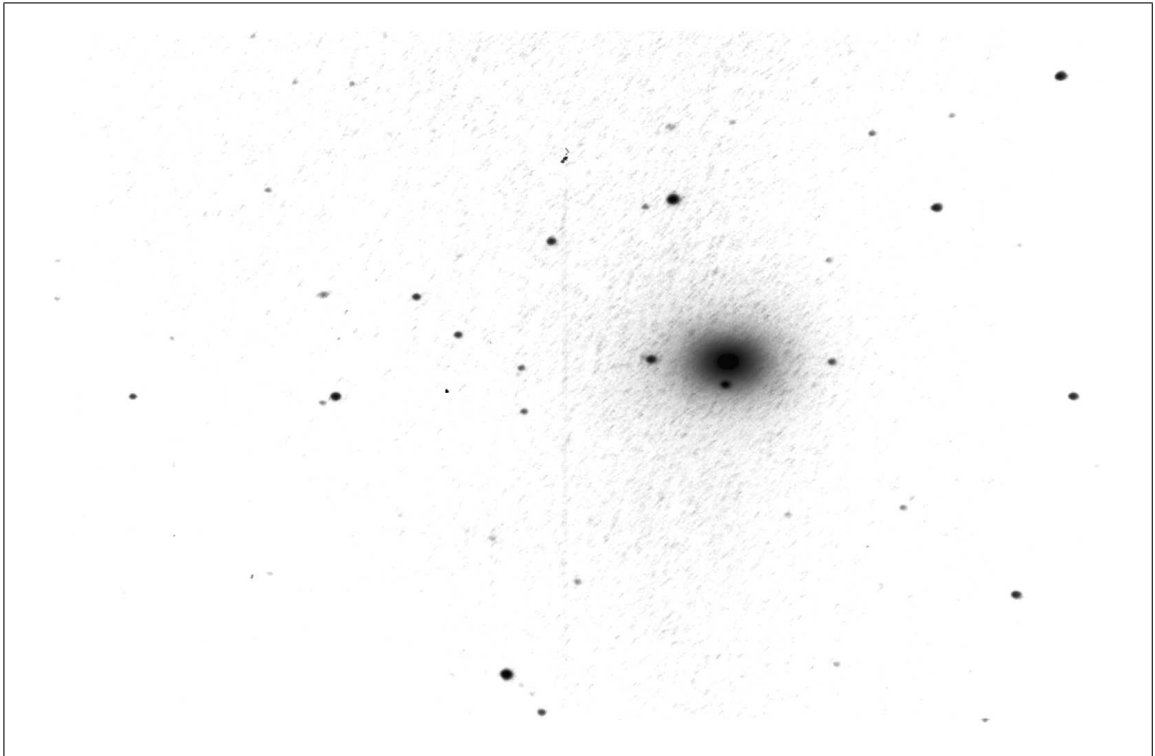
Obrázek A.1: Galaxie NGC 205 (MonteBoo observatory).



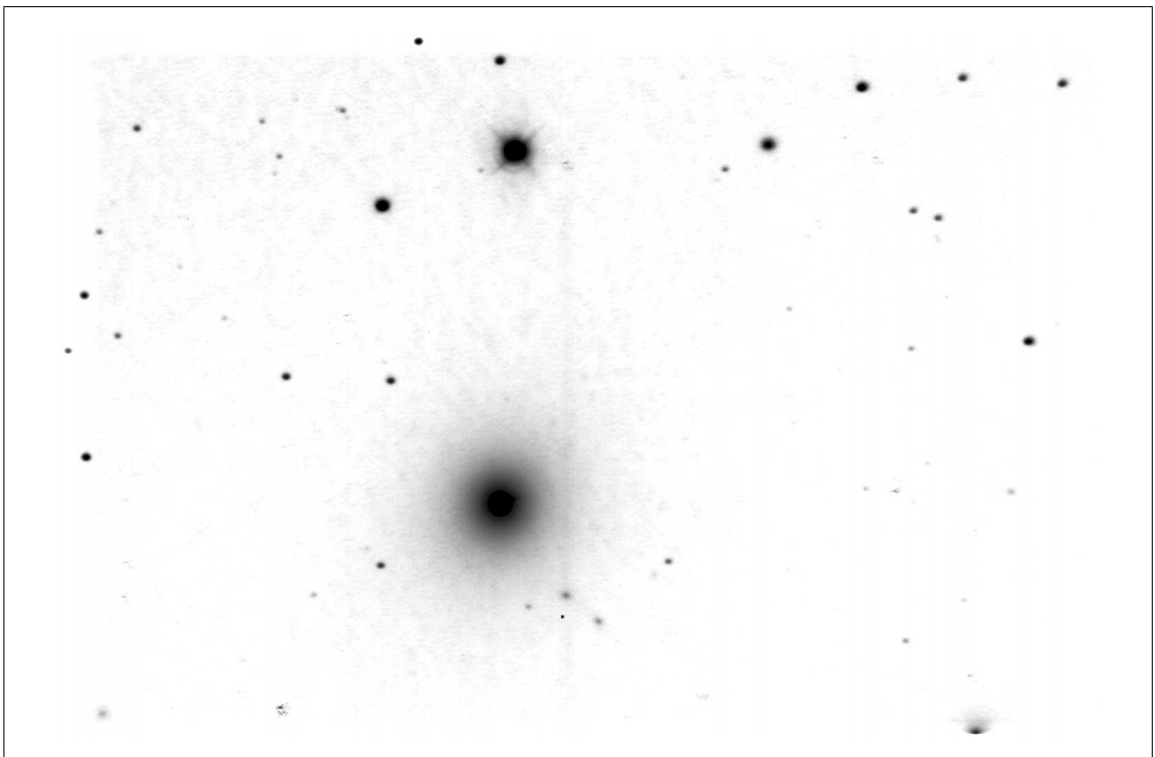
Obrázek A.2: Snímek třech galaxií – NGC 3379, NGC 3384 a NGC 3389 (MonteBoo observatory).



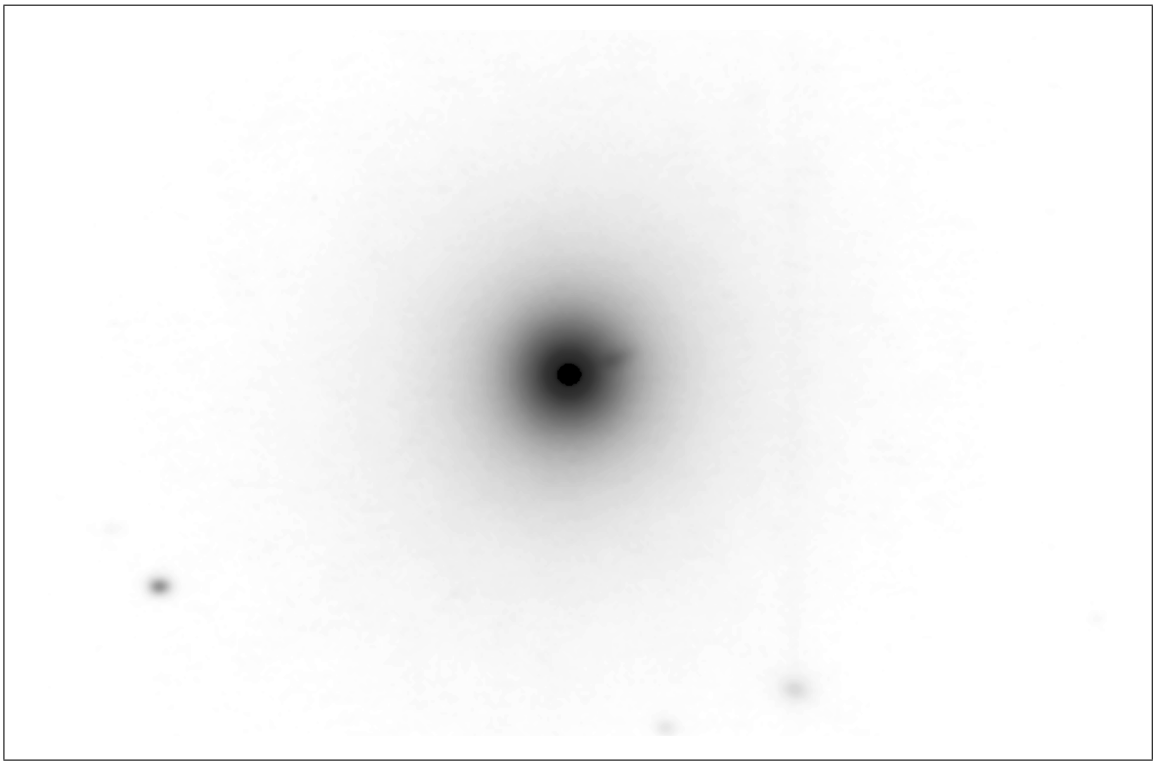
Obrázek A.3: Galaxie NGC 2768 (MonteBoo observatory).



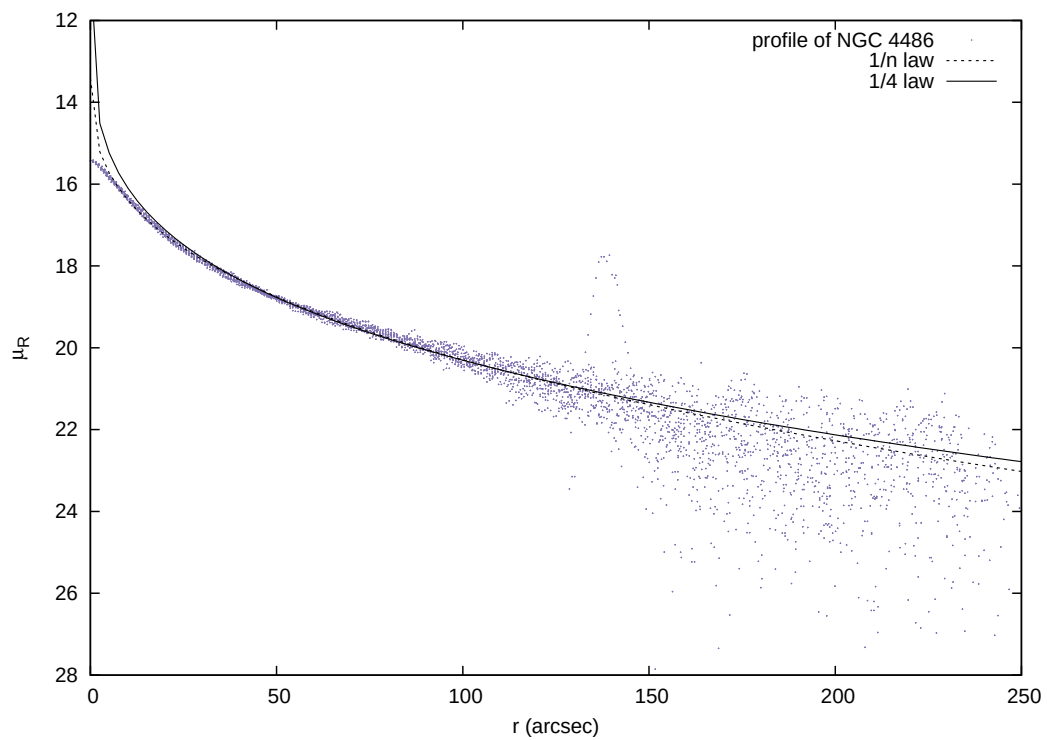
Obrázek A.4: Galaxie NGC 5322 (MonteBoo observatory).



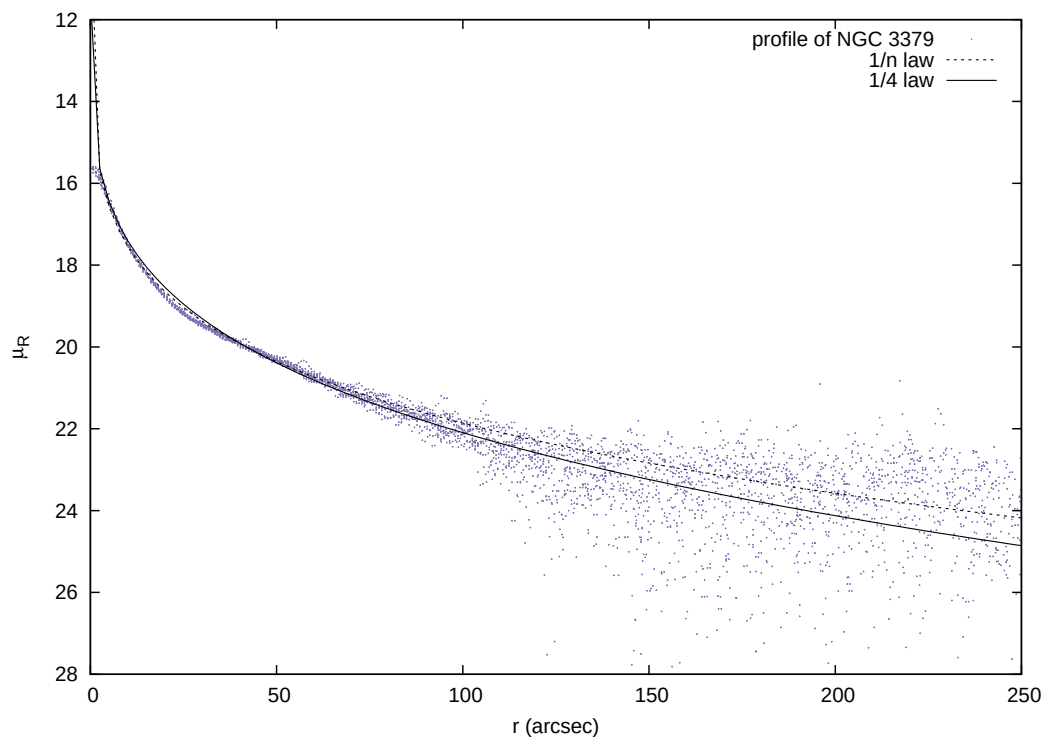
Obrázek A.5: Galaxie NGC 4486 (MonteBoo observatory).



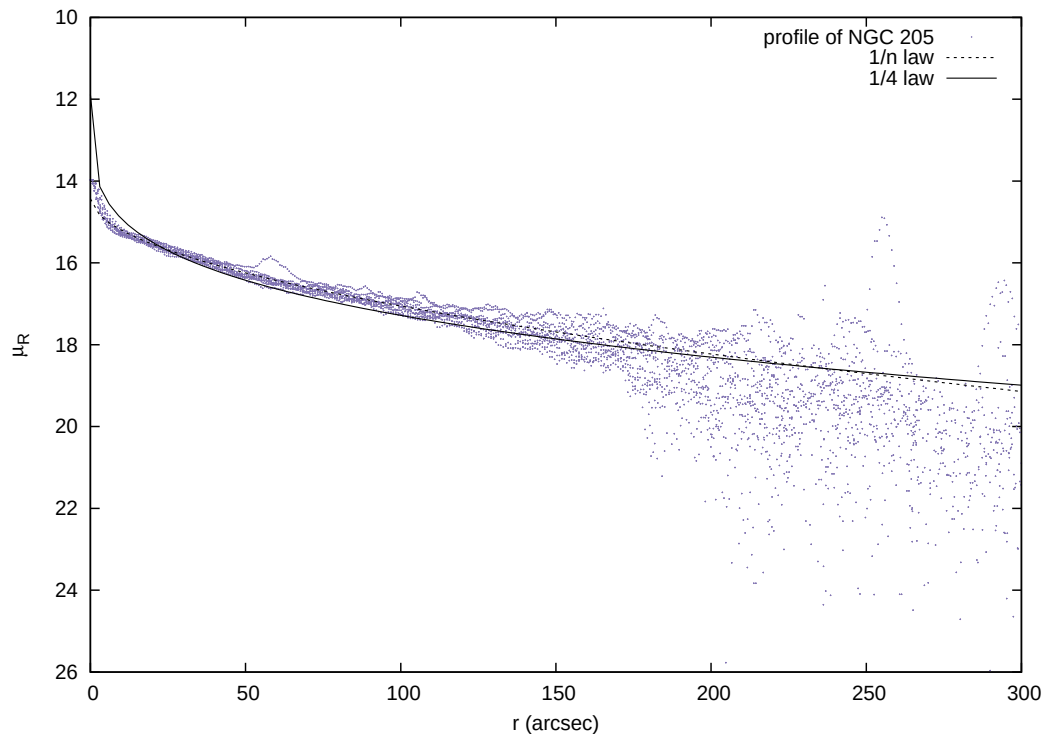
Obrázek A.6: Detail centrální části galaxie NGC 4486 s dobře viditelným jetem (MonteBoo observatory).



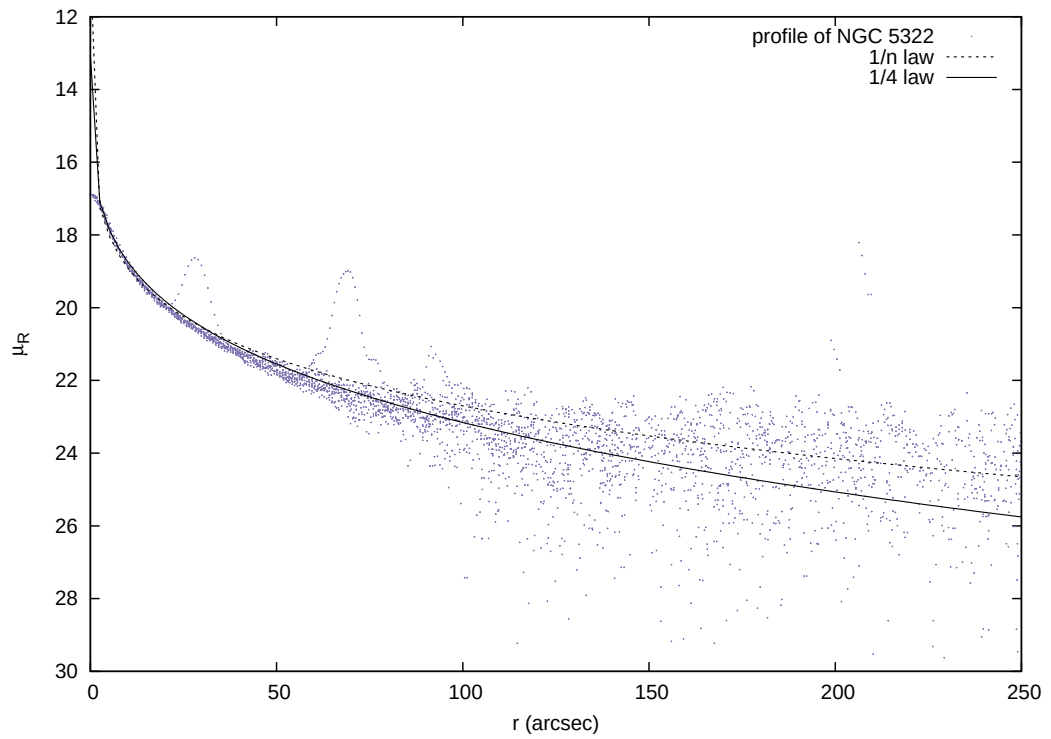
Obrázek A.7: Profil eliptické galaxie NGC 4486 a dva nafitované modely: 1/4 zákon a Sersic model.



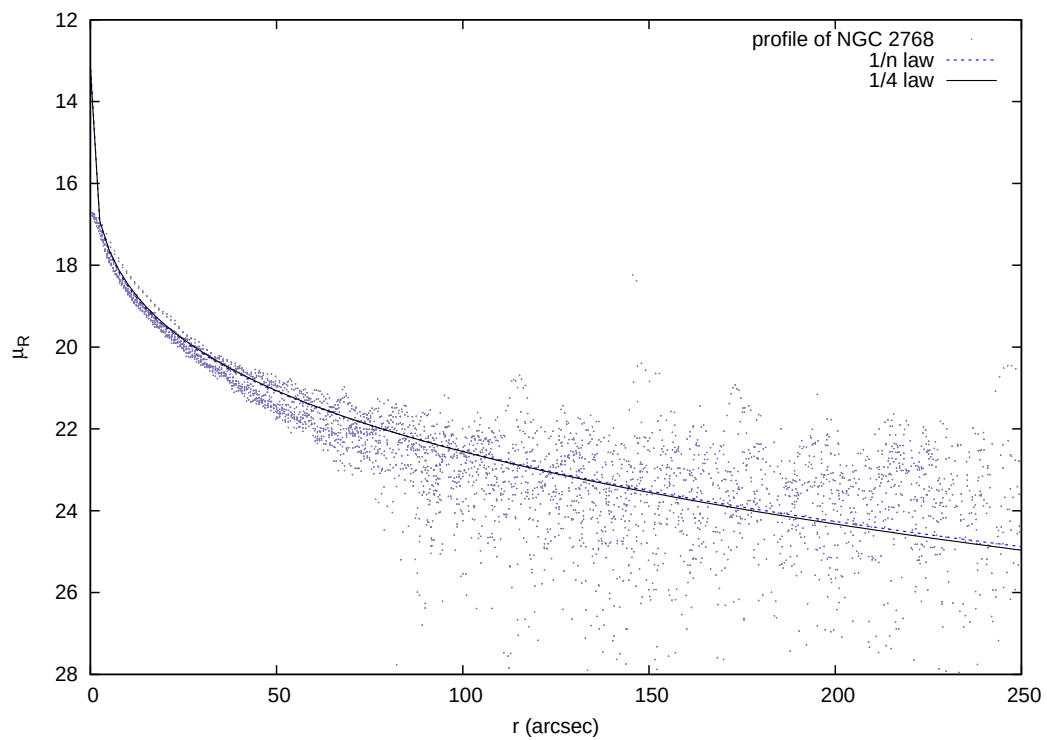
Obrázek A.8: Profil galaxie NGC 3379 a dva nafitované modely: 1/4 zákon a Sersic model.



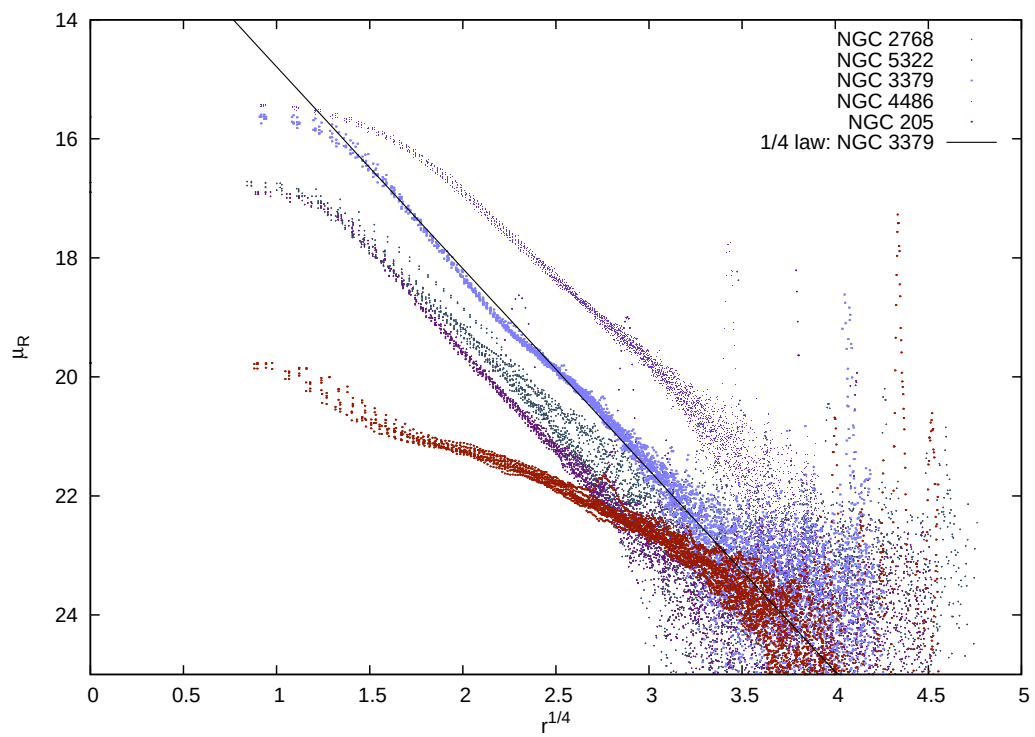
Obrázek A.9: Profil galaxie NGC 205 a dva naitované modely: 1/4 zákon a Sersic model.



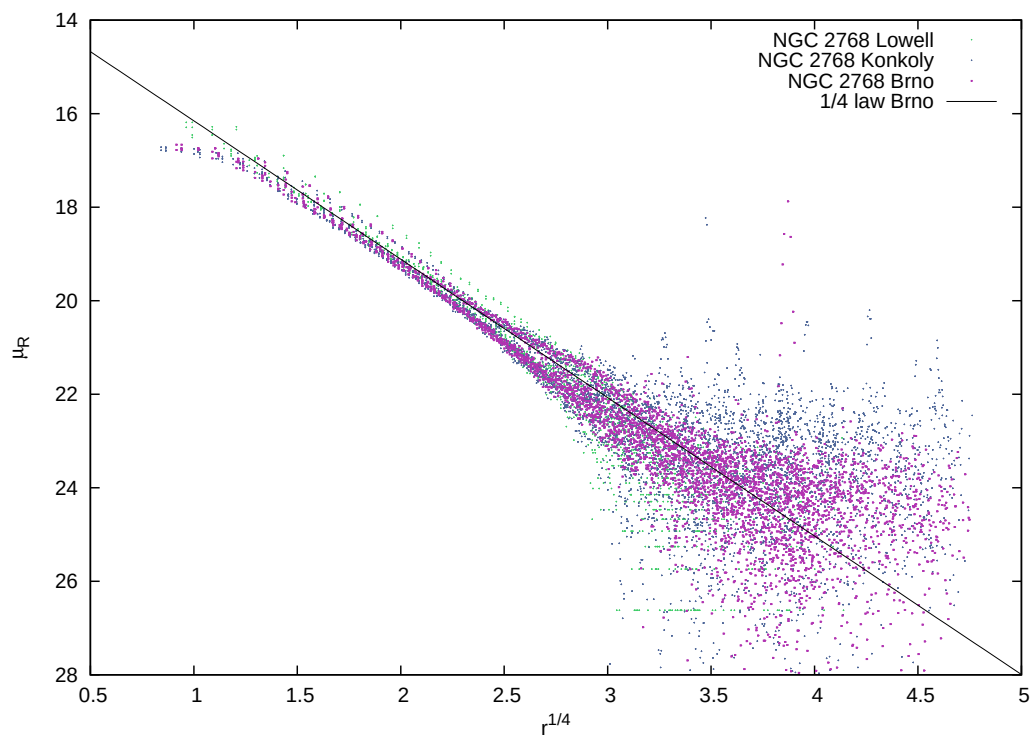
Obrázek A.10: Profil galaxie NGC 5322 a dva naitované modely: 1/4 zákon a Sersic model.



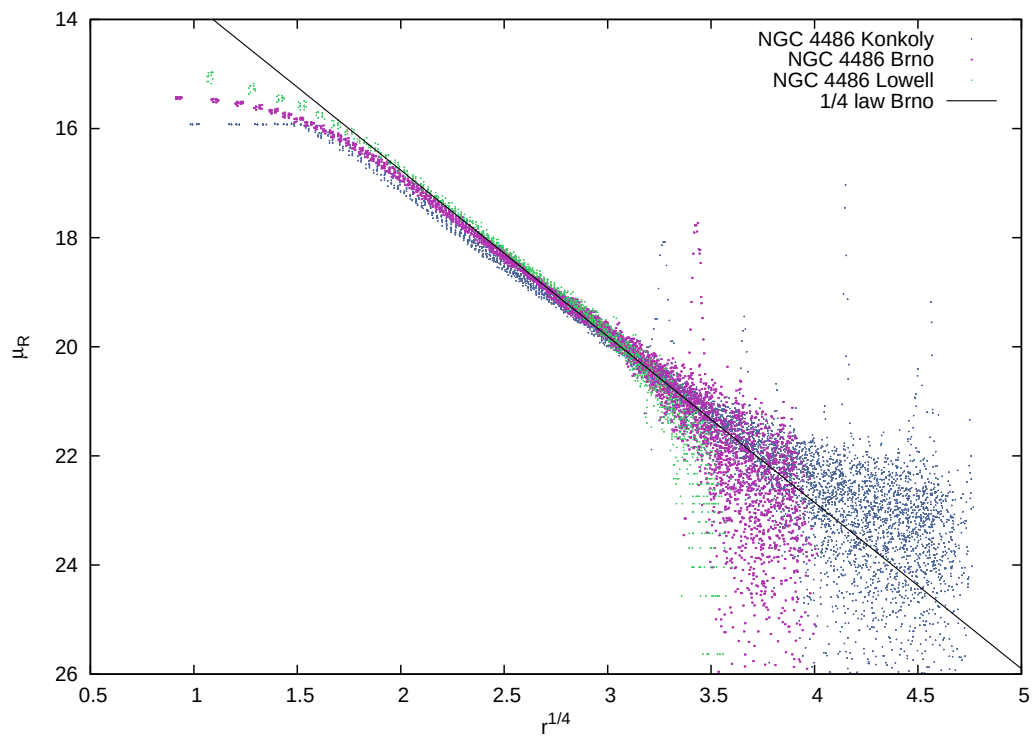
Obrázek A.11: Profil galaxie NGC 2768 a dva nařitované modely: 1/4 zákon a Sersic model.



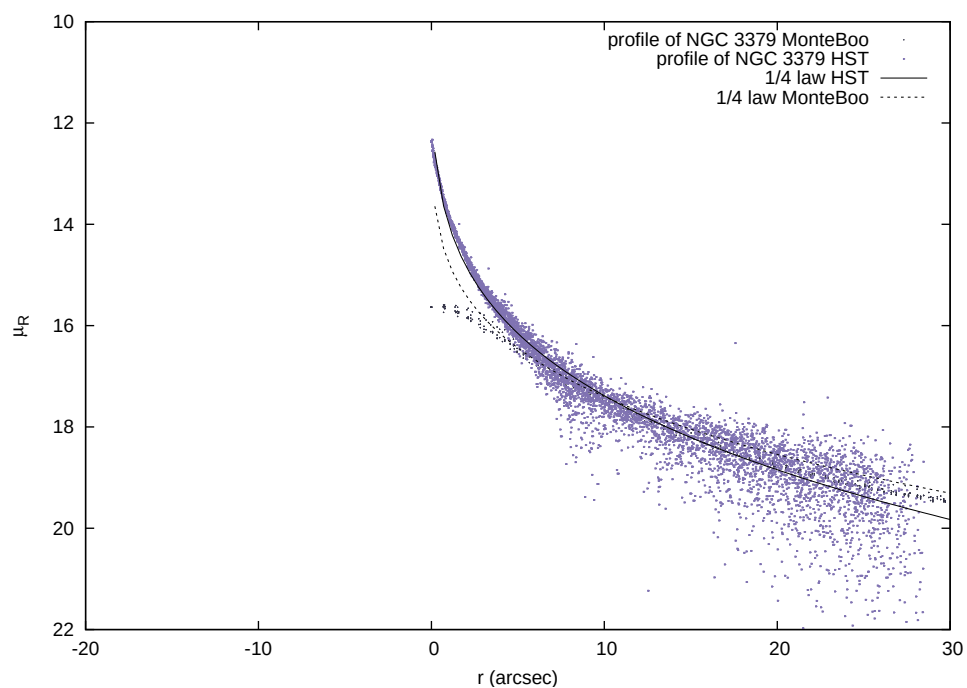
Obrázek A.12: Profily všech pěti galaxií.



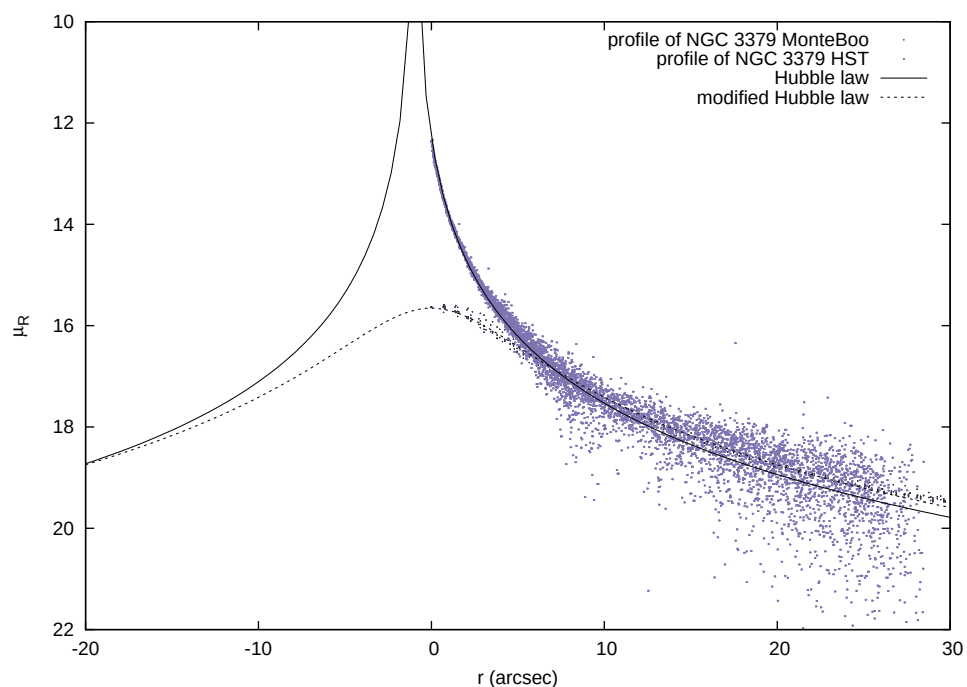
Obrázek A.13: Srovnání profilů galaxie NGC 2768 ze tří různých dalekohledů.



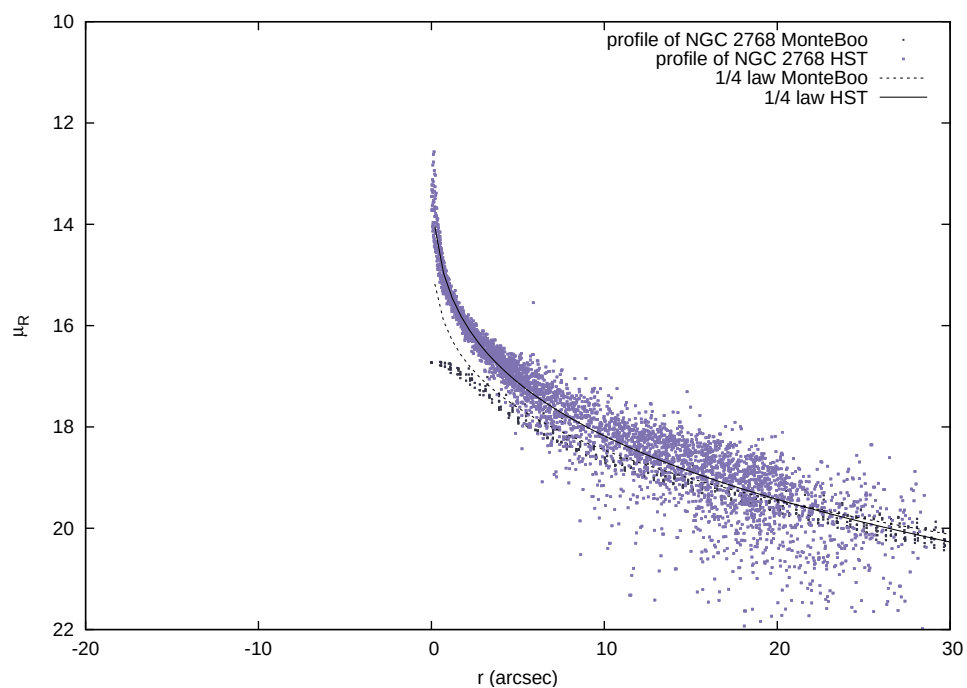
Obrázek A.14: Srovnání profilů NGC 4486 ze tří různých dalekohledů.



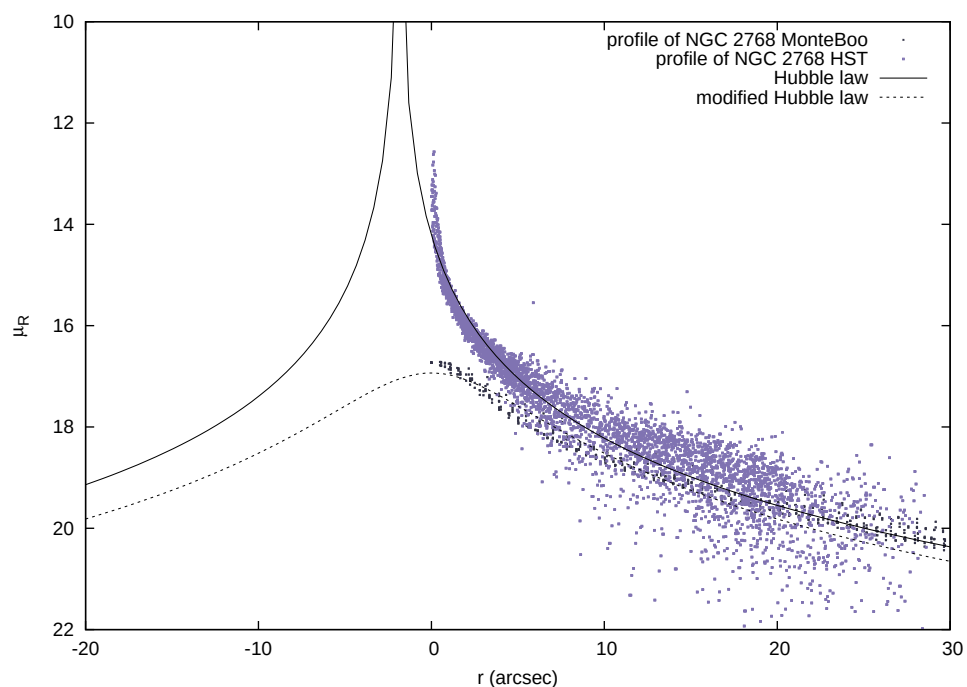
Obrázek A.15: Profil centrální části galaxie NGC 3379 z HST a z brněnského snímku. V grafu jsou vykresleny také 1/4 zákony pro každý profil.



Obrázek A.16: Profil centrální části galaxie NGC 3379 z HST a z brněnského snímku. V grafu jsou vykresleny nařizované Hubbleovy zákony.



Obrázek A.17: Profil centrální části galaxie NGC 2768 ze HST a brněnského snímku. V grafu jsou vykresleny také 1/4 zákony pro každý profil.



Obrázek A.18: Profil centrální části galaxie NGC 2768 ze HST a brněnského snímku. V grafu jsou vykresleny nařizované Hubbleovy zákony.