

MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY

Bakalářská práce

BRNO 2015

ANDREA DOBEŠOVÁ



MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY



Fotometrické studium temné hmoty

Bakalářská práce

Andrea Dobešová

Vedoucí práce: Mgr. Filip Hroch, Ph.D. Brno 2015

Bibliografický záznam

Autor: Andrea Dobešová
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Název práce: Fotometrické studium temné hmoty

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Astrofyzika

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

Akademický rok: 2014/2015

Počet stran: ix + 34

Klíčová slova: Galaxie; temná hmota; rotační křivka; fotometrie; NFW profil

Bibliographic Entry

Author: Andrea Dobešová
Faculty of Science, Masaryk University
Department of Theoretical Physics and Astrophysics

Title of Thesis: Photometric study of dark matter

Degree Programme: Physics

Field of Study: Astrophysics

Supervisor: Mgr. Filip Hroch, Ph.D.

Academic Year: 2014/2015

Number of Pages: ix + 34

Keywords: Galaxy; dark matter; rotation curve; photometry; NFW profile

Abstrakt

Tato bakalářská práce je věnována studiu rotačních křivek spirálních galaxií a jejich využití ke stanovení poměru dynamické a zářivé hmoty v galaxiích. Úvodní část je zaměřena na galaxie, jejich objev, vlastnosti a rozdělení. Dále jsou rozebírány různé modely popisující rozložení jasu v galaxiích. Následující oddíl se zabývá temnou hmotou, historickým pozadím jejího objevu, předpokládaným rozložením v galaxiích a rotačními křivkami. Poslední část je věnována samotnému zpracování dat a výsledkům.

Abstract

This bachelor's thesis is focused on examining rotation curves of spiral galaxies and on utilizing these curves to establish mass to light ratio within galaxies. The first part of the thesis is an overview of a galaxy topic – discovery of galaxies, their properties and classification. Next part lists several radial brightness profile models of galaxies. The third part of the thesis covers the topic of dark matter – history of dark matter research, hypothetical dark matter halo profiles of galaxies and rotation curves of galaxies. The last part of the thesis is focused on processing the gathered data and interpreting the results.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Akademický rok: 2014/2015

Ústav: Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Studentka: Andrea Dobešová

Program: Fyzika

Obor: Astrofyzika

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

Téma práce: Fotometrické studium temné hmoty

Téma práce anglicky: Photometric study of dark matter

Oficiální zadání:

Pokrok ve vývoji metod plošné fotometrie nám dává do rukou silné nástroje pro analýzu obrazů galaxií s vysokým prostorovým rozlišením, jež jsou nám umožněny moderní experimentální technikou v různých oborech spektra. Detailní studium obrazu je jedna z mála cest k poznání galaktické dynamiky nebo studiu rozložení svítivé i temné hmoty v galaxiích. Fotometrická analýza tak ve spojení s ostatními metodami galaktické astronomie poskytuje silný nástroj studia galaxií.

Cílem této práce je fotometrické studium galaxií. K úspěšnému zvládnutí práce je tak třeba běžná rutina v použití základních metod zpracování obrazu, matematické statistiky a příslušných fyzikálních oblastí.


Jazyk závěrečné práce: čeština

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


Datum zadání práce: 30. 10. 2014

V Brně dne: 10. 12. 2014

Souhlasím se zadáním (podpis, datum):


.....
Andrea Dobešová
studentka


.....
Mgr. Filip Hroch, Ph.D.
vedoucí práce


.....
prof. Rikard von Unge, Ph.D.
ředitel Ústavu teoretické fyziky a
astrofyziky

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu práce Mgr. Filipu Hrochovi, Ph.D. za cenné rady, které mi poskytl při zpracování této práce, ochotu, trpělivost a veškerý věnovaný čas.

Prohlášení

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

Brno 21. května 2015

.....
Andrea Dobešová

Obsah

Úvod	ix
Kapitola 1. Galaxie	1
1.1 Historie	1
1.1.1 Od mýtů k vědě	1
1.1.2 Počítání hvězd	2
1.1.3 Velká debata	2
1.2 Klasifikace galaxií	3
1.2.1 Eliptické galaxie	4
1.2.2 Vřetenové galaxie	4
1.2.3 Spirální galaxie	5
1.2.4 Nepravidelné galaxie	5
Kapitola 2. Fotometrická analýza	7
2.1 Fotometrie v astronomii	7
2.2 Plošná fotometrie	8
2.2.1 Eliptické galaxie	8
2.2.2 Centrální profily	9
2.2.3 Spirální galaxie	9
Kapitola 3. Rotační křivky a temná hmota	11
3.1 Pozorování neviditelného	11
3.2 Rotační křivky	12
3.3 Temná hmota v galaxiích	13
3.4 Modely temného hala	15
3.4.1 Navarro – Frenk – White (NFW) profil	15
3.4.2 Pseudoisotermální halo	15
3.4.3 Burkertův profil	16
3.5 Kandidáti na temnou hmotu	16
Kapitola 4. Zpracování dat	18
4.1 Data	18
4.1.1 Rotační křivky a vybraný vzorek galaxií	18
4.1.2 Fotometrická data	19
4.2 Zpracování	20
4.2.1 Určení zářivého výkonu galaxií	20
4.2.2 Stanovení hmotnosti galaxií	22

4.2.3 Proložení křivek	23
4.2.4 Určení poměru hmoty k zářivému výkonu	23
Závěr	30
Seznam použité literatury	32

Úvod

Roste-li kruh našich znalostí, rostou i jeho hranice s okolím, které ještě neznáme.

Anaximénés, 6. st. př. n. l.

Tisíce let hledělo lidstvo na noční oblohu a věřilo, že to co vidí, je veškerý vesmír. Roku 1610 však zamířil na oblohu svůj dalekohled Galileo Galilei a zjistil, že ve vesmíru se nachází mnohem více objektů, než lze vidět pouhým okem. Během následujících staletí se díky využití stále lepších a lepších dalekohledů vesmír z pohledu lidstva postupně rozrostl o nové planety obíhající Slunce a miliardy hvězd tvořících Galaxii.

Ještě na počátku 20. století se obecně soudilo, že naše galaxie tvoří celý vesmír, přestože se postupně začaly objevovat názory, že některé podivné mlhovinné útvary by mohly být vzdálenými galaxiemi podobnými té naší. Tuto otázku definitivně vyřešil roku 1923 Edwin Hubble, který objevil cefeidu ve Velké mlhovině v Andromedě a stanovil její vzdálenost, čímž dokázal, že se nepopíratelně nachází mimo naši galaxii. Tato podivná mlhovina byla tedy stejně jako mnoho dalších samostatným hvězdným ostrovem. Náhle byl vesmír plný galaxií a nabyl dosud nemyslitelných rozměrů.

Dnes je možné s využitím nejmodernějších dalekohledů pozorovat objekty tak vzdálené, že leží až téměř na samé mezi fyzikální detekovatelnosti. I přes tento obrovský pokrok však bylo v průběhu posledních několika desetiletí zjištěno, že veškerá pozorovatelná hmota tvoří pouze nepatrnou část našeho vesmíru. Drtivou většinu pak tvoří záhadná temná hmota a ještě záhadnější temná energie.

Jedním z prvních ukazatelů na tuto skrytou hmotu byly pozorované vzhledy rotačních křivek galaxií. Rotační křivky spolu s hmotnostním modelem představují jeden z možných nástrojů k odvození rozložení hmoty v galaxiích. Takto odvozené dynamické hmotnosti galaxií porovnané s modelem popisujícím rozložení jejich jasu a z něj vyvozených hmotností odpovídajících zářivé hmotě naznačují, že dominantní složku galaxií tvoří temná hmota.

Kapitola 1

Galaxie

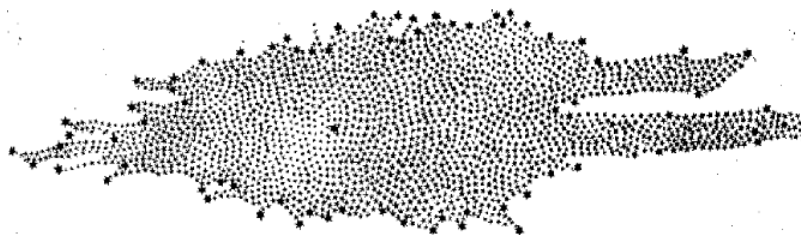
1.1 Historie

1.1.1 Od mýtů k vědě

Přestože galaxie patří k největším gravitačně vázaným objektům ve vesmíru, jejich existence zůstávala lidstvu dlouho skryta. Poznávání těchto hvězdných ostrovů začalo, jak jinak, než u naší vlastní galaxie. Při pozorování noční oblohy mohl lidem jen těžko uniknout mlhavý pás Mléčné dráhy. Většina starověkých civilizací se pokoušela o vysvětlení tohoto jevu alespoň formou bájí. Později se u starověkých učenců objevily názory, že by se mohlo jednat o bývalou dráhu Slunce či stopu po meteoritu. Aristoteles se domníval, že vzniká v horní části atmosféry zapálením ohnivých výdechů hvězd.

Mezi těmito spekulacemi vyniká názor Démokritův (450 – 370 př. n. l.), který vyslovil domněnku, že Mléčná dráha se skládá z velkého počtu hvězd, jejichž světlo se slévá dohromady a vytváří tak světlý pás táhnoucí se oblohou. Ve své době ale neměl možnost svou teorii prokázat, k jejímu obhájení mohlo dojít až roku 1610, kdy na oblohu zamířil svůj dalekohled Galileo Galilei (1564 – 1642).

Ve starověku se ujala představa hvězd rozložených na sféře, která se otáčí kolem nehybné Země. Všechny hvězdy byly tedy stejně daleko a o jejich prostorovém uspořádání se tudíž dlouho neuvažovalo. První filosofické názory na prostorové uspořádání naší galaxie předložil na počátku 18. století švédský filosof Emanuel Swedenborg (1688 – 1722), který soudil, že Slunce je jen jednou z hvězd, které tvoří uspořádaný systém a takovýto systémů se může ve vesmíru nacházet mnoho. Anglický učenec Thomas Wright (1711 – 1786) vyslovil myšlenku, že viditelný pás Mléčné dráhy a okolní hvězdy tvoří soustavu ve tvaru plochého disku udržovanou gravitací, přičemž jednotlivé hvězdy vykonávají orbitální pohyb kolem středu gravitace. Německý filosof Imanuel Kant (1724 – 1804) dále rozšířil tyto teorie. Předpokládal, že vesmír je tvořen nekonečným počtem hvězdných soustav podobných té naší, díky jejich veliké vzdálenosti je však můžeme pozorovat jen jako mlžné objekty.



Obrázek 1.1: Herschelův model Galaxie [4]. Herschel předpokládal, že Slunce (znázorněné větší hvězdou) se nachází v blízkosti středu Galaxie.

1.1.2 Počítání hvězd

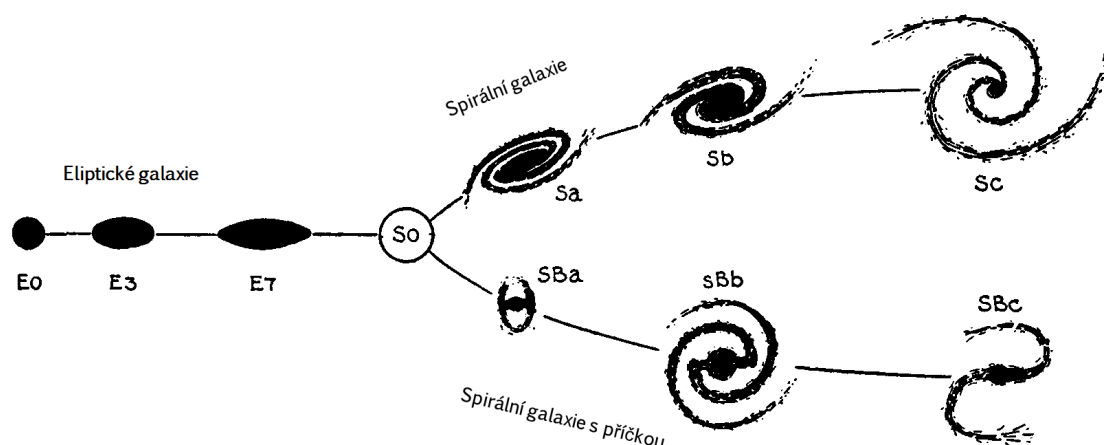
Tyto spíše filosofické úvahy bylo ovšem třeba podepřít průkazným pozorovacím materiálem, k tomu bylo potřeba nejprve sestavit lepší přístroje. Velkým průkopníkem v konstruování dalekohledů se stal William Herschel (1738 – 1822). Jedním z jeho největších výzkumných projektů bylo určení prostorového rozložení hvězd. Za tímto účelem zkoumal vybrané oblasti oblohy a výsledky pozorování statisticky vyhodnocoval. Vycházel při tom z předpokladu, že všechny hvězdy mají stejné zářivé výkony. Jelikož neznal vzdálenosti mezi hvězdami, využil faktu, že jasnost klesá se čtvercem vzdálenosti, je-li tedy některá hvězda devětkrát slabší, nachází se ve třikrát větší vzdálenosti. Jako referenční hvězdu použil Sirius, nejjasnější hvězdu na obloze, a veškeré vzdálenosti udával v násobcích vzdálenosti k Siriu, tedy v siriometrech. Dále předpokládal, že prostorová hustota hvězd je v rámci Galaxie zhruba stejná, počítal-li tedy hvězdy ve vybrané oblasti, měl by být jejich počet úměrný tloušťce systému v daném směru. Neuvažoval mezihvězdnou extinkci a domníval se, že dokáže dohlédnout až na okraj. Takto dospěl k modelu soustavy zploštělé v poměru 1 : 5 o rozměrech 1000×100 siriometrů, přičemž Slunce se nacházelo v blízkosti jejího středu.

Další model Galaxie předložil roku 1901 Jacobus Cornelius Kapteyn (1851 – 1922). Ve své době se již mohl opřít o známé absolutní hvězdné velikosti některých typů hvězd, byl schopen tedy určovat závislost prostorové hustoty hvězd v závislosti na jejich vzdálenosti. Výsledkem byl model ve tvaru zploštělého elipsoidu o rozměrech disku přibližně 8×2 kpc se Sluncem ležícím poblíž středu.

K podivným mlhovinným útvarům se pozornost astronomů začala obracet až koncem 18. století. První katalog mlhovin, obsahující 103 objektů, uveřejnil roku 1781 Charles Messier (1730 – 1817). William Herschel počet těchto objektů zvýšil na 2500 a v některých z těchto mračen rozlišil jednotlivé hvězdy. Roku 1888 vydal irský astronom John Dreyer (1852 – 1926) *New General Catalogue*, který obsahoval téměř 8000 objektů. Roku 1845 se podařilo Williamu Parsonsovi (1800 – 1876) sestavit dalekohled o průměru 1,8 m, pomocí něhož byl schopen rozlišit vnitřní strukturu některých galaxií, např. spirální strukturu galaxie M51, přičemž uvažoval, že by mohla být výsledkem rotace.

1.1.3 Velká debata

Otázkou zůstávalo, zda Galaxie vyplňuje celý vesmír a tyto mlžné útvary jsou její součástí, nebo se jedná o extragalaktické objekty. Spor o tuto záležitost mělo vyřešit setkání zastánců obou teorií, známé později jako Velká debata, které roku 1920 naplánovala Národní akademie věd USA ve Washingtonu. Své názory zde konfrontovali Harlow Shapley (1885 – 1972) z Lickovy observatoře a Heber Curtis (1872 – 1942) z observatoře na Mount Wilsonu.



Obrázek 1.2: Hubbleova klasifikace galaxií. Upraveno dle [5].

Shapley na základě svých měření vzdáleností a rozložení kulových hvězdokup pomocí cefeid zastával názor, že mlhoviny jsou součástí naší galaxie, jež měla podle jeho předpokladů v průměru přibližně 100 kpc, přičemž Slunce se nacházelo zhruba 15 kpc od jejího středu. Curtis zpochybňoval Shapleyho výsledky a naopak se přikláněl spíše ke Kapteynově modelu Galaxie a extragalaktickému původu mlhovin.

Definitivně tuto otázku vyřešil až Edwin Hubble (1889 – 1953). Roku 1923 objevil klasickou cefeidu v galaxii M31 a stanovil její vzdálenost na 300 kpc. Tím dokázal, že se nepopíratelně nachází mimo naši galaxii.

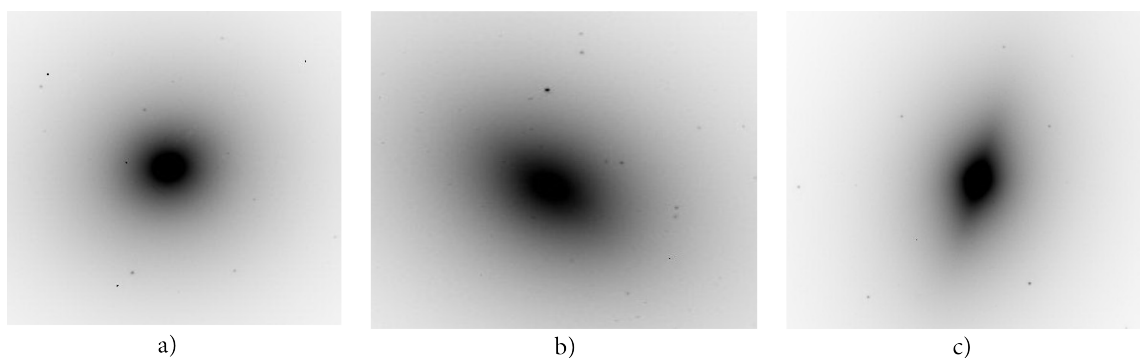
Tato podkapitola byla vypracována na základě [1], [2], [3].

1.2 Klasifikace galaxií

Ve chvíli, kdy bylo rozhodnuto o povaze galaxií, objevila se potřeba tyto objekty nějak roztřídit. I v tomto případě sehrál klíčovou roli Edwin Hubble. Ve své knize *The Realm Of The Nebulae* z roku 1926 rozdělil galaxie na základě jejich vzhledu na eliptické (E), vřetenové (S0) a spirální (S). Objekty, které se nedaly zařadit ani do jedné z těchto kategorií, označil jako nepravidelné (Irr). Galaxie s náznakem organizované struktury byly zařazeny do skupiny Irr I, extrémně neuspořádané systémy do Irr II. Spirální a vřetenové galaxie se potom dále dělily na dvě skupiny – normální (S, S0) a s příčkou (SB, SB0).

Hubble poté toto své rozdělení graficky znázornil formou diagramu, označovaného jako Hubbleův vývojový diagram (viz obr. 1.2). Na základě mylné domněnky, že diagram může být interpretován jako vývojová sekvence, označil galaxie umístěné vlevo jako galaxie raného a napravo jako pozdního typu. Toto označení se zachovalo dodnes.

Později došlo k několika modifikacím Hubbleova rozdělení. Sidney van den Bergh zavedl pro spirální galaxie luminozitní třídy označované I až V, přičemž typ I představuje galaxie s dobře definovanými rameny, směrem k typu V jejich zřetelnost klesá. Navzdory svému názvu však luminozitní třída nekoresponduje s absolutní hvězdnou velikostí objektu.



Obrázek 1.3: Příklady eliptických galaxií. a) M89 (E0), b) NGC 4365 (E3), c) NGC 4621 (E5). (Negativy fotografií převzatých z veřejného archivu Hubbleova teleskopu.)

Další úpravy provedl Gerard de Vaucouleurs (1918 – 1995). K Hubbleově původní klasifikaci dělící spirální galaxie podle přítomnosti příčky přidal střední třídu objektů s málo zřetelnou příčkou. Objekty dříve patřící do skupiny Irr I přesunul do nově vytvořených tříd spirálních galaxií Sd, Sm a Im. Skutečně nepravidelné galaxie zařadil do skupiny označené Ir. Dále galaxie rozdělil podle toho, zda vykazují prstencovou strukturu.

1.2.1 Eliptické galaxie

Eliptické galaxie jsou na první pohled nevýrazné hvězdné systémy s jasnem postupně klesajícím směrem od centra. Vyznačují se tím, že neobsahují žádný nebo jen malé množství mezihvězdného plynu a prachu a není u nich patrný hvězdný disk. Skládají se většinou z velmi starých hvězd, jejich stáří bývá srovnatelné se stářím vesmíru.

Jedná se o různorodou skupinu objektů, jejichž fyzické parametry se nachází v širokém rozpětí hodnot. Obří eliptické galaxie patří mezi největší objekty ve vesmíru, zatímco nejmenší trpasličí nejsou o moc větší než typická kulová hvězdokupa. Totéž platí o jejich hmotnostech, které leží v rozmezí $10^7 - 10^{13} M_{\odot}$ a absolutních hvězdných velikostech nacházejících se v intervalu od -8 až po méně než -23 mag ($L = 10^5 - 10^{12} L_{\odot}$).

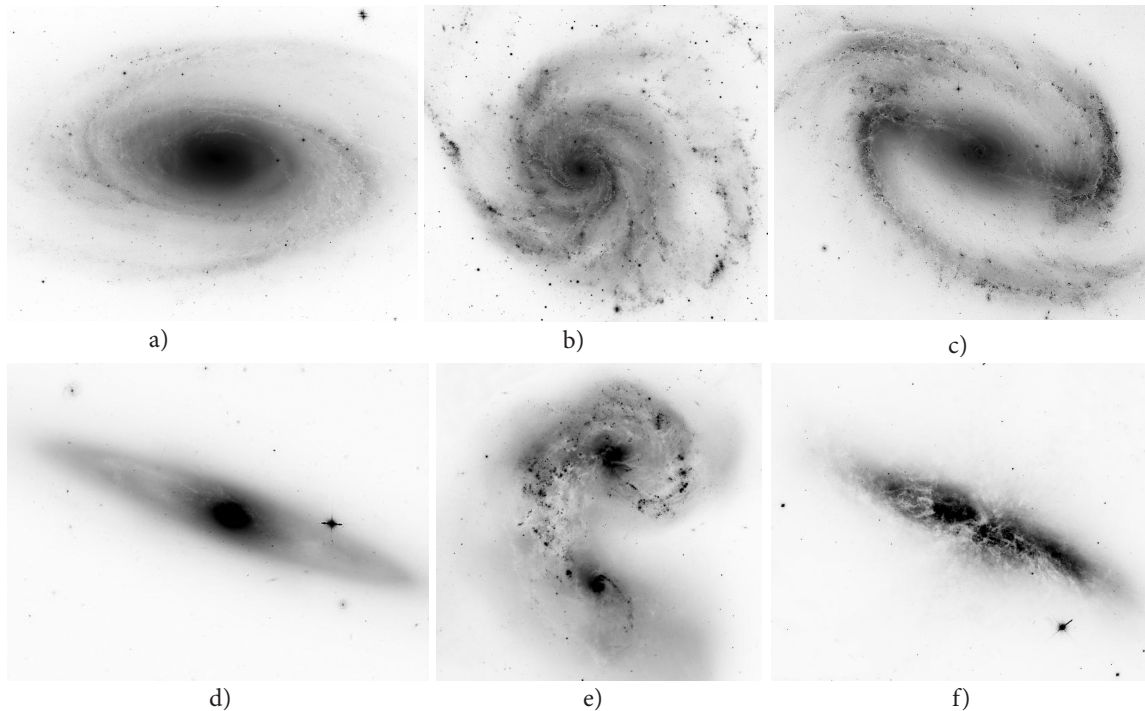
Hubble tyto galaxie rozdělil na základě jejich pozorované elipticity definované vztahem

$$\varepsilon = 1 - \frac{a}{b}, \quad (1.1)$$

kde a a b představují velkou a malou poloosu elipsy.

1.2.2 Vřetenové galaxie

Jedná se o objekty na pomezí mezi eliptickými a spirálními galaxiemi. Se spirálními galaxiemi sdílí rychle rotující disk, ve kterém ovšem nejsou patrná spirální ramena, a centrální výduť, přičemž mohou mít také příčku. Podobně jako eliptické obsahují jen malé množství mezihvězdného plynu, mají hladký nevýrazný vzhled a vyskytují se zejména v hustě osídlených oblastech vesmíru. Jejich hmotnosti a zářivé výkony jsou srovnatelné s většími eliptickými galaxiemi ($M = 10^{10} - 10^{12} M_{\odot}$, $L = 10^9 - 10^{11} L_{\odot}$).



Obrázek 1.4: a) M81 (Sb I-II), b) M 101 (Sc I), c) NGC 1300 (SBb I), d) NGC 4866 (vřetenová galaxie), e) pár interagujících galaxií NGC 4038/NGC 4039, f) M82 ("starburst" galaxie). (Negativy fotografií z archivu Hubbleova teleskopu.)

1.2.3 Spirální galaxie

Tyto objekty se vyznačují výrazným diskem tvořeným hvězdami, mezihvězdným plynem a prachem, v němž jsou patrná spirální ramena, a jasnou kulovitou centrální oblastí nazývanou centrální výduť (bulge). Základem Hubbleovy klasifikace je poměr svítivosti centrální výdutě vůči disku. Podél sekvence Sa – Sd klesá svítivost výdutě, ramena jsou volněji navinutá a lze v nich lépe rozlišit shluky hvězd a oblasti HII. Zhruba polovina těchto objektů vykazuje centrální příčku, která může tvořit až třetinu celkového jasů.

U spirálních galaxií nacházíme menší rozdíly v parametrech než u eliptických. Jejich rozměry se pohybují v rozmezí 5 – 100 kpc při hmotnostech $10^9 - 10^{12} M_{\odot}$ a absolutních hvězdných velikostech nacházejících se v intervalu od -16 až po méně než -23 mag ($L = 10^7 - 10^{12} L_{\odot}$).

1.2.4 Nepravidelné galaxie

Podél sekvence Sc – Sd jsou galaxie méně zářivé a jejich struktura se stává méně organizovanou. Tento trend pokračuje dále, nacházíme málo zářivé diskové galaxie, ve kterých jsou mladé hvězdy uspořádány spíše chaoticky než ve spirálách. V Hubbleově sekvenci se tyto typy označují jako Sm a Im, prototypy těchto galaxií jsou Velký a Malý Magellanův oblak.

Dále sem spadají objekty, které se jednoduše nehodí do žádné jiné kategorie – objekty, které postrádají jakoukoli organizovanou spirální či jinou strukturu, galaxie, jejichž tvar je deformován díky interakci s jinou galaxií, která se dostala do těsné blízkosti, či ty, které vznikly sloučením dvou nebo více menších galaxií. Také sem lze zařadit galaxie, u nichž došlo v nedávné době k překotné

tvorbě hvězd, tzv. starburst galaxie. Typické velikosti těchto systémů jsou 0,5 až 50 kpc, hmotnosti $10^8 - 10^{10} M_{\odot}$, absolutní hvězdné velikosti leží v rozmezí -13 až -20 mag ($L = 10^7 - 10^{10} L_{\odot}$).

Tato podkapitola byla vypracována podle [6], [7], [8].

Kapitola 2

Fotometrická analýza

2.1 Fotometrie v astronomii

Slovo fotometrie pochází z řeckého *photos* = světlo a *metron* = měření, jedná se tedy o vědní odvětví zabývající se měřením množství světla.

Vesmírná tělesa nelze díky jejich obrovským vzdálenostem zkoumat přímo. Téměř veškeré astronomické informace získáváme prostřednictvím elektromagnetického záření. Jednou ze základních informací, kterou lze o kosmických tělesech získat, je množství energie ve formě elektromagnetického záření, které od tohoto objektu získáváme. Tuto veličinu nazýváme světelný tok. V kombinaci s odhadem vzdálenosti zkoumaného objektu nám potom může poskytnout informaci o jeho celkové produkci energie (zářivém výkonu), teplotě, velikosti a dalších parametrech.

V astronomii se často jasnost objektu vyjadřuje prostřednictvím tzv. hvězdné velikosti (m) v jednotkách zvaných magnitudy. Původ této jednotky sahá až do starověkého Řecka. Kolem roku 120 př. n. l. rozdělil Hipparchos hvězdy podle pozorované jasnosti do šesti tříd neboli magnitud. První skupina zahrnovala nejjasnější hvězdy, nejslabší objekty spadaly do šesté kategorie. Původně byla tedy magnituda pouze odhadem vizuálního vjemu bez kvantitativní definice. V 19. století bylo zjištěno, že magnitudová škála je přibližně logaritmická. Roku 1856 Norman Pogson navrhl definovat tento systém tak, že rozdíl pěti magnitud představuje podíl jasností 100. To znamená, že hvězda o jasnosti první magnitudy je přesně $10^{1/2,5}$ krát (přibližně 2,512krát) jasnější než hvězda druhé magnitudy atd.

Rozdíl hvězdných velikostí m_1, m_2 dvou hvězd o zářivých tocích F_1, F_2 lze tedy definovat jako

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log \frac{F_1}{F_2}. \quad (2.1)$$

Pokud chceme vyjadřovat hvězdnou velikost určité hvězdy a ne jen rozdíl mezi dvojicí hvězd, potřebujeme nějaký nulový bod. Jako referenční bod se používá hvězda o hvězdné velikosti 0 mag, která dává mimo zemskou atmosféru ve filtru V zářivý tok $F_0 = 3,2 \cdot 10^{-9} \text{ W m}^{-2}$. Potom hvězdnou velikost dané hvězdy můžeme určit pomocí vztahu

$$m = -2,5 \log \frac{F}{F_0}. \quad (2.2)$$

Tato hvězdná velikost je odvozena z pozorovaného světelného toku. Abychom mohli porovnávat skutečné toky od objektů, potřebujeme znát jejich vzdálenosti. Z tohoto důvodu se zavádí absolutní

hvězdná velikost vyjadřující, jak jasný by se nám jevil objekt ze vzdálenosti $r = 10 \text{ pc}^1$. Pro rozdíl vizuální (m) a absolutní (M) hvězdné velikosti (nazývaný též modul vzdálenosti) získáme vztah

$$m - M = 5 \log r - 5. \quad (2.3)$$

2.2 Plošná fotometrie

U rozlehlých objektů, jako jsou galaxie, se provádí plošná fotometrie, pomocí níž lze získat rozložení jasu daného útvaru. Na rozdíl od bodových zdrojů, u kterých jsme schopni zjistit pouze celkovou jasnost, můžeme tedy u galaxií určovat, jak se jejich intenzita (popř. jiná veličina, jako je elipticita) mění se vzdáleností od jádra. Intenzita se v astronomii většinou udává pomocí plošné hvězdné velikosti dané vztahem

$$\mu = \mu_0 - 2,5 \log \frac{I}{I_0} \quad (2.4)$$

v magnitudách na čtvereční vteřinu ($\text{mag} \cdot \text{arcsec}^{-2}$), přičemž I značí intenzitu, čili světelný tok na jednotku plochy vyzařovaný z jednotkového úhlu.

2.2.1 Eliptické galaxie

K popisu plošného rozložení jasu eliptických galaxií byla nalezena řada empirických vztahů. Jedním z nejúspěšnějších je **Sérsicův profil** odvozený roku 1963 J. L. Sérsicem

$$I_n(R) = I_e \exp \{ -b_n [(R/R_e)^{1/n} - 1] \}, \quad (2.5)$$

kde $I(R)$ je intenzita v promítnuté vzdálenosti R od centra, I_e je intenzita vztahující se k efektivnímu poloměru R_e (poloměr obsahující polovinu celkového jasu), parametr n je tzv. Sérsicův index související se zářivým výkonem galaxie. Funkci b_n lze dobře aproximovat vztahem

$$b_n = 2n - 0,324, \quad (2.6)$$

přičemž pro $1 < n < 10$ je chyba $\lesssim 0,001$ [6]. Pro vyjádření jasu pomocí plošné hvězdné velikosti lze tento vztah transformovat do následující podoby [13]:

$$\mu(r) = \mu_0 + \frac{2,5 b_n}{\ln 10} \left[\left(\frac{R}{R_e} \right)^{1/n} - 1 \right]. \quad (2.7)$$

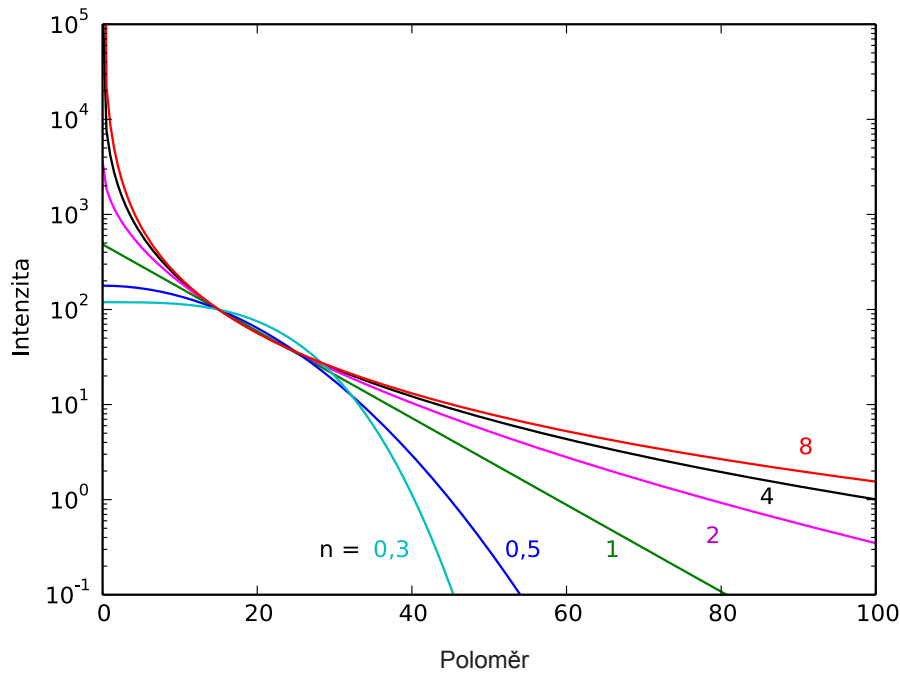
Pro $n = 4$ se tento vztah redukuje na tzv. **de Vaucouleursův zákon**:

$$I(R) = I_e \exp \{ -7,67 [(R/R_e)^{1/4} - 1] \}, \quad (2.8)$$

$$\mu(R) = \mu_e + 8,327 [(R/R_e)^{1/4} - 1]. \quad (2.9)$$

Tuto závislost nastínil již roku 1948 kanadský astronom Gérard de Vaucouleurs (1918 – 1995).

¹ $1 \text{ pc} = 3,08567758 \cdot 10^{16} \text{ m}$

Obrázek 2.1: Sérsicův profil pro různé indexy n při konstantním r_e, I_e .

2.2.2 Centrální profily

Tyto profily se využívají, jak již název naznačuje, k modelování jasu jader galaxií. Jednou z možností, jak popsat rozložení jasu v centrálních oblastech, je **Hubbleův – Oemlerův model** [14]:

$$I(R) = \frac{I_0 \exp(-R^2/R_t^2)}{(1 + R/r_0)^2}, \quad (2.10)$$

kde I_0 je centrální jas, r_0 je poloměr, do kterého lze křivku průběhu intenzity aproximovat konstantou, pro $r_0 < R < R_t$ se intenzita mění podle $I \sim R^{-2}$, pro $R > R_t$ profil velice rychle klesá.

V limitě $R_t \rightarrow \infty$ se redukuje na **Hubbleův profil** publikovaný roku 1930 E. Hubblem [15]:

$$I(R) = \frac{I_0}{(1 + R/R_c)^2}, \quad (2.11)$$

kde R_c je poloměr jádra.

Dalším rozšířením Hubbleova profilu je **modifikovaný Hubbleův profil**

$$I(R) = \frac{I_0}{1 + (R/a + 1)^n}, \quad (2.12)$$

kde a je poloměr, na kterém jas klesne o faktor 4 [16].

2.2.3 Spirální galaxie

Pro popis rozložení jasu v discích spirálních galaxií se využívá exponenciální profil

$$I(R) = I_0 \exp(-R/h_R), \quad (2.13)$$

$$\mu(R) = \mu_0 + 1,086(R/h_R), \quad (2.14)$$

kde h_R je charakteristická šířka disku [13]. Pro centrální výduť lze použít, stejně jako u eliptických galaxií, již zmíněný Sérsicův profil.

Tato kapitola byla vypracována s využitím [9], [10], [11], [12].

Kapitola 3

Rotační křivky a temná hmota

3.1 Pozorování neviditelného

Myšlenka, že vesmír obsahuje skrytou hmotu, je poměrně stará. Již v roce 1932 našel Jan Oort důkaz pro existenci temné hmoty v Galaxii. O rok později se Fritz Zwicky zabýval studiem kupy galaxií v souhvězdí Vlasů Bereniky. Zaznamenal, že disperze radiálních rychlostí galaxií v kupě byla příliš velká (kolem 1000 km/s). Hvězdy a plyn viditelné uvnitř galaxií nemohly poskytnout dostatek gravitační přitažlivosti k udržení kupy pohromadě. Zwicky tedy došel k závěru, že kupa musí obsahovat značné množství dodatečné neviditelné hmoty. Porovnáním hmotností kupy určené na základě disperze radiálních rychlostí galaxií v kupě a z množství světla, kterou vyzařuje, zjistil, že obsahuje asi 150krát více hmoty, než odpovídalo hmotě zářivé. Podobný experiment provedl roku 1936 Sinclair Smith s kupou galaxií v Panně. Podle jeho výpočtů obsahovala stokrát více temné hmoty než svítivé a tato dodatečná hmota se pravděpodobně nacházela mezi galaxiemi.

Nesoulad v hmotnostech kup galaxií určených z rotačních křivek a vyplývajících z pozorované zářivé hmoty nebyl jedinou oblastí, kde se vyskytla potřeba připustit možnost skryté hmoty. Podle našich pozorování je vesmír s velkou přesností plochý, tudíž jeho hustota musí být rovna kritické hustotě dané

$$\rho_{\text{crit}} = \frac{3H_0^2}{8\pi G}, \quad (3.1)$$

kde H_0 představuje současnou hodnotu Hubbleovy konstanty a G je gravitační konstanta.

Z mnoha výzkumů ale vyplývá, že hmota obsažená ve hvězdách tvoří jen malou část (přibližně 1 %) kritické hustoty. Samozřejmě hmota ve vesmíru není uložena jen ve hvězdách, podstatnou část hmoty představuje například mezigalaktická látka. Dále je možné, že velká část hmoty je obsažena ve velmi málo hmotných hvězdách, které jsou příliš slabé, aby je bylo možné detekovat. Nicméně existuje důvod se domnívat, že v běžné hmotě se nemůže ukrývat dostatek hmotnosti k dosažení kritické hustoty. Důkaz poskytuje teorie nukleosyntézy. Tato teorie dokáže předpovědět pozorované zastoupení prvků jen v případě, že hustota baryonové hmoty Ω_B vzhledem ke kritické hustotě je

$$0,016 \leq \Omega_B h^2 \leq 0,024^1. \quad [19]$$

Nicméně ani se zavedením temné hmoty nebylo možné dosáhnout požadované hustoty. Celkové množství hmoty měřené pomocí kosmického mikrovlnného záření tvoří pouze zhruba 30 % kritické

¹ $h = H_0 / (100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1})$

parametr	hodnota	
Ω_Λ	$0,685 \pm \begin{smallmatrix} 0,018 \\ 0,016 \end{smallmatrix}$	hustota temné energie vůči kritické hustotě
Ω_m	$0,315 \pm \begin{smallmatrix} 0,016 \\ 0,018 \end{smallmatrix}$	hustota hmoty vůči kritické hustotě
$\Omega_B h^2$	$0,02205 \pm 0,00028$	současná hustota baryonové hmoty
$\Omega_{DM} h^2$	$0,1199 \pm 0,0027$	současná hodnota hustoty temné hmoty
H_0	$67,3 \pm 1,2$	Hubbleova konstanta ($\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$)

Tabulka 3.1: Výsledky měření provedeného družicí Planck [21].

hustoty. Bylo tedy nutné připustit existenci dodatečné formy energie, jež byla nazvána temnou energií. Podle současných poznatků tvoří baryonová hmota přibližně 4,9 % vesmíru, temná hmota 25,6 % a na temnou energii připadá 68,5 %. Výsledky měření jednotlivých komponent družicí Planck jsou uvedeny v tabulce 3.1.

3.2 Rotační křivky

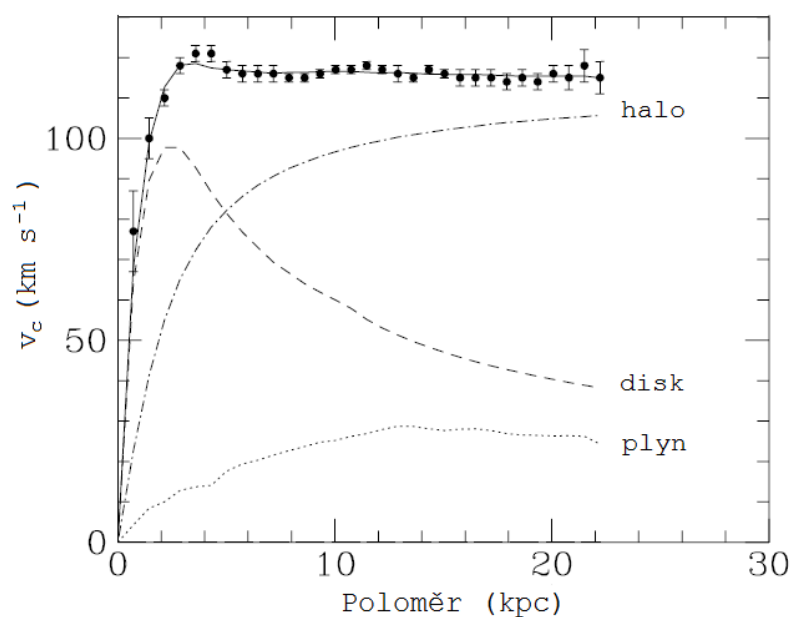
Rotační křivky galaxií představují závislost oběžné rychlosti objektů v galaxii na jejich vzdálenosti od středu. Pomocí takovýchto křivek lze přímo měřit rozložení hmoty v galaxiích. V 70. letech minulého století se jejich výzkumem zabývala americká astronomka Vera Rubinová a došla k překvapivým výsledkům. Podle všeobecně přijímané koncepce gravitace by ve vnějších částech galaxií mělo docházet k tzv. Keplerovu poklesu rotační rychlosti ($v_{\text{kruh}} \propto r^{-1/2}$). Rubinová však zjistila, že rotační křivky galaxií se od tohoto očekávaného poklesu odchyľují. Po dosažení maximální rychlosti ve vzdálenosti několika kpc od středu místo předpokládaného poklesu rychlosti zůstávaly rotační křivky ploché ($v_{\text{kruh}} \approx \text{konst.}$), a to i ve velkých vzdálenostech od centra. Vnější části galaxií rotovaly tak rychle, že se v nich muselo nacházet mnohem více hmoty, jinak by se rozpadly. Jedinou možností, jak vyřešit tuto záhadu, bylo předpokládat, že galaxii obklopuje halo neviditelné hmoty, která ji drží pohromadě. Rubinová odhadla, že v galaxiích musí být desetkrát více temné hmoty než té obyčejné zářící.

Rotační křivky spirálních galaxií jsou tedy fundamentálním nástrojem nejen ke studiu rozložení zářivé hmoty, ale i k mapování skryté hmoty. Znalost radiálního hustotního profilu galaxií má klíčový význam pro řešení zásadních problémů spojených s teoriemi o formování galaxií, včetně samotné povahy temné hmoty.

V 70. letech 20. století byly také nalezeny vztahy dávající do souvislosti některé vlastnosti galaxií. Využilo se při tom důležitého faktu, že pomocí některých parametrů, jejichž určení je nezávislé na znalosti vzdálenosti objektu, je možné získat informaci o dalších vlastnostech, které na ní závislé jsou. Roku 1977 Richard Brent Tully a James Richard Fisher objevili, že existuje vztah mezi maximální rotační rychlostí spirální galaxie a její absolutní hvězdnou velikostí související se zářivým výkonem a tedy i hmotností. Tuto závislost, známou jako **Tully – Fisherův vztah**, lze vyjádřit jako

$$L \sim v_{\text{max}}^n, \text{ kde } n \approx 4, \quad (3.2)$$

přičemž L je celkový zářivý výkon galaxie (v jednotkách $10^{10} L_\odot$) a v_{max} je rychlost v km/s. Maximální rotační rychlosti spirálních galaxií bývají obvykle 150 – 300 km/s, zřídka stoupají nad 400 km/s. [7]



Obrázek 3.1: Rotační křivka spirální galaxie NGC 6503. Body jsou naměřené kruhové rotační rychlosti jako funkce vzdálenosti od centra galaxie. Čárkovaná čára představuje rotační křivku odpovídající zářivé hmotě v disku, tečkovaná čára pozorovanému plynu, čerchovanou čarou je vyznačen příspěvek od temné hmoty. Upraveno podle [22].

Tento vztah se stal dobrým nástrojem nejen k určování vzdáleností na extragalaktické úrovni, ale také prostředkem ke zjišťování poměru svítivé a dynamické hmotnosti. Pokud je maximální rotační rychlost z velké části dána neviditelnou hmotou, zatímco zářivý výkon pochází z hvězdného disku, vyplývá z tohoto vztahu, že množství temné hmoty v galaxii nějak souvisí s množstvím zářivé hmoty [7].

U eliptických galaxií lze uplatnit podobný vztah mezi disperzní rychlostí (σ) a zářivým výkonem, tzv. **Faberův – Jacksonův vztah** (1976)

$$L \sim \sigma^4. \quad (3.3)$$

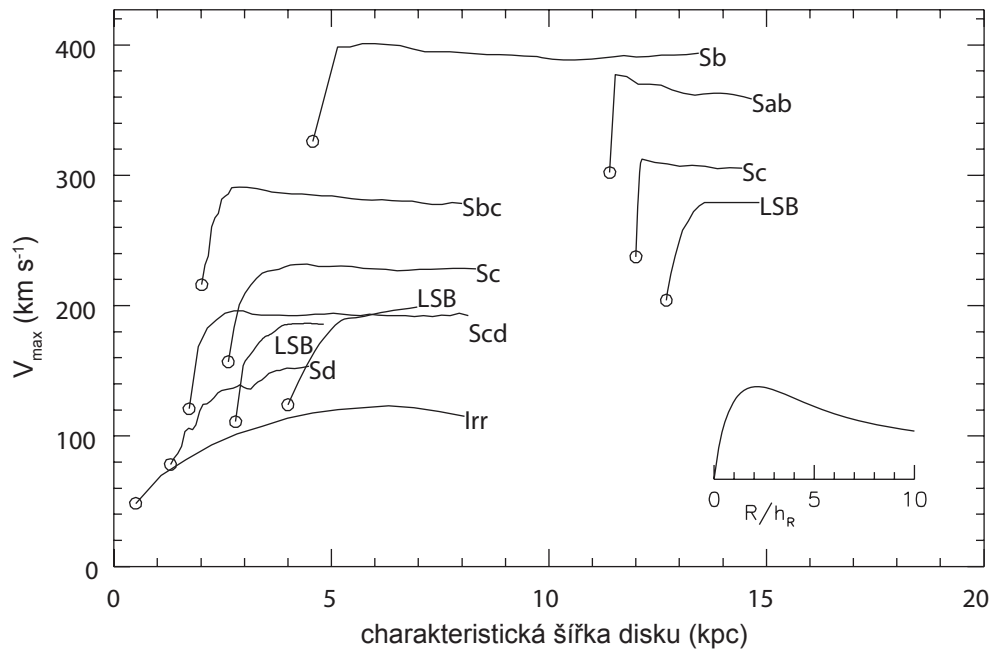
Pro zářivý výkon ve filtru V přibližně platí:

$$L_V \approx 2 \cdot 10^{10} L_{\odot} \left(\frac{\sigma}{200 \text{ km/s}} \right)^4. \quad (3.4)$$

V centrech zářivých eliptických galaxií může disperze dosahovat až 500 km/s, zatímco v nejméně zářivých objektech se pohybuje kolem 50 km/s [7].

3.3 Temná hmota v galaxiích

Stejně jako povaha temné hmoty, je i její rozložení v galaxiích stále předmětem debat. Všeobecně se soudí, že galaxie jsou obklopeny rozsáhlými haly tvořenými temnou hmotou, jež jsou mnohonásobně hmotnější než viditelná část galaxie. K jejich detekci tedy potřebujeme provádět kinematická měření ve velkých vzdálenostech (na několiknásobcích efektivního poloměru), což bývá obtížnější.



Obrázek 3.2: Rotační křivky spirálních galaxií různých typů. Kroužky ukazují charakteristickou šířku disku h_R a maximální rotační rychlost v_{\max} pro každou galaxii. Křivky jsou vykresleny v jednotkách R/h_R ve stejné škále jako vnořený obrázek zobrazující V_R pro exponenciální disk. Upraveno dle [7].

Unikátní příležitost ke studiu temné hmoty v galaxiích poskytují trpasličí galaxie. Ve viditelných částech jasnějších galaxií přispívá baryonová a temná hmota k celkové hmotnosti zhruba stejným dílem, je tudíž těžké určovat rozložení temné hmoty v malých vzdálenostech od centra. Naproti tomu u některých trpasličích galaxií tvoří temná hmota i více než 90 % celkové hmotnosti, a to i v blízkosti středu. Dynamika takovýchto systémů je tedy určena především gravitačním polem temné hmoty. Obdobný obrázek nalézáme i u málo zářivých spirálních galaxií s nízkým plošným jasnem (dále značeny jako LSB galaxie z angl. *Low Surface Brightness*), u nichž se zdá, že temná hmota dominuje na všech vzdálenostech od centra. [6]

Co se týče diskových galaxií, pro daný morfologický typ (např. Sb) vykazují rotační křivky jistý systematický trend: křivky málo zářivých galaxií se vyznačují postupným nárůstem, zatímco u vysoce zářivých galaxií nejdříve strmě stoupají, poté zůstávají ploché nebo dokonce mírně klesají. Rotační křivky Sa a Sb galaxií vykazují zpočátku rychlý nárůst, což naznačuje, že většina jejich hmoty je soustředěna v centrálních oblastech. U Sd a Sm galaxií narůstá rotační rychlost pozvolněji. Tyto galaxie nemají rozsáhlá hala a jejich disky mají nízký centrální plošný jas. [7]

Většina galaxií s nízkým plošným jasnem rotuje pomalu a jejich rotační křivky vykazují postupný nárůst, podobně jako u Sd a Sm galaxií, nicméně vyskytují se i galaxie s větší rotační rychlostí a rychleji stoupajícími křivkami. Podíl temné hmoty potřebný k vysvětlení tvarů těchto rotačních křivek se pohybuje kolem 50 % pro Sa a Sb galaxie a 80 – 90 % pro Sd a Sm. [7]

3.4 Modely temného hala

V průběhu posledních let byly vytvořeny různé modely popisující tuto temná hala. Uved' me zde některé z nich.

3.4.1 Navarro – Frenk – White (NFW) profil

Jedním z nejčastěji využívaných profilů pro modelování temného hala je tzv. NFW profil, který publikovali roku 1996 J. F. Navarro, C. S. Frenk a S. D. M. White. V tomto profilu je hustota temné hmoty jako funkce poloměru dána vztahem

$$\rho_{\text{NFW}}(r) = \frac{\rho_s}{\frac{r}{r_s} \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2}, \quad (3.5)$$

kde $\rho_s = \rho_{\text{crit}} \delta_c$ a $r_s = r_{200}/c$ jsou škálovací faktory charakteristické pro dané halo, δ_c a c jsou bezrozměrné parametry propojené podmínkou

$$\delta_c = \frac{200}{3} \frac{c^3}{\ln(1+c) - c/(1+c)}, \quad (3.6)$$

r_{200} je poloměr, na kterém střední hustota hala dosahuje $200\rho_{\text{crit}}$. Z poloměru r_{200} lze odvodit hmotnost hala

$$M_{200} = \frac{4\pi}{3} r_{200}^3 200\rho_{\text{crit}}. \quad (3.7)$$

V jádře ($r < r_s$) se tento profil chová jako $\rho \propto r^{-1}$, pro $r = r_s$ je $\rho \propto r^{-2}$, ve vnějších částech galaxie ($r > r_s$) profil klesá strměji podle $\rho \propto r^{-3}$.

Rotační křivka spojená s tímto modelem je dána

$$v_{\text{NFW}} = v_{200} \sqrt{\frac{1}{x} \frac{\ln(1+cx) - (cx)/(1+cx)}{\ln(1+c) - c/(1+c)}}, \quad (3.8)$$

kde $x = r/r_{200}$ a v_{200} je kruhová rychlost na poloměru r_{200} . Pro tento model kruhová rychlost dosahuje maxima na $r_{\text{max}} \approx 2r_s = 2r_{200}/c$ [23].

Pro hmotnost potom platí vztah [24]:

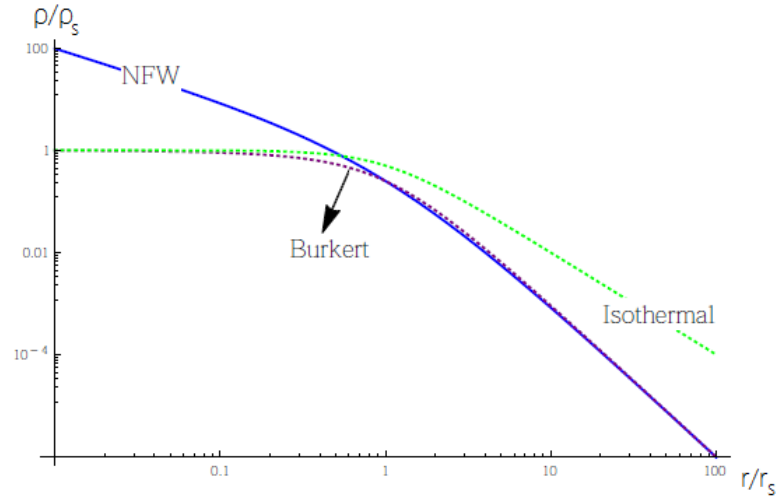
$$M_{\text{NFW}}(r) = 4\pi\rho_s r_s^3 \left[\ln\left(1 + \frac{r}{r_s}\right) - \frac{\frac{r}{r_s}}{1 + \frac{r}{r_s}} \right]. \quad (3.9)$$

3.4.2 Pseudoisotermální halo

Pseudoisotermální halo popisuje temné halo s jádrem přibližně konstantní hustoty a poskytuje ploché rotační křivky i na velkých poloměrech. Hustotní profil pseudoisotermálního hala je

$$\rho_{\text{iso}}(r) = \frac{\rho_0}{1 + (r/r_c)^2}, \quad (3.10)$$

kde ρ_0 je centrální hustota hala a r_c reprezentuje poloměr jádra hala [25].



Obrázek 3.3: Znázornění tvaru křivek jednotlivých modelů popisujících temné halo. Je vidět, že isothermální i Burkertův profil vykazují jádra s konstantní hustotou. Upraveno dle [28].

Rotační křivka korespondující s tímto profilem má tvar [26]:

$$v_{\text{iso}}(r) = \sqrt{4\pi G \rho_0 r_c^2 [1 - (r_c/r) \arctan(r/r_c)]}. \quad (3.11)$$

Maximální rychlost je tedy

$$v_{\text{iso}}^{\text{max}} = \sqrt{4\pi G \rho_0 r_c^2}. \quad (3.12)$$

3.4.3 Burkertův profil

Andreas Burkert roku 1995 ukázal, že pozorované rotační křivky několika trpasličích galaxií mají stejný tvar, který lze dobře popsat hustotním profilem

$$\rho_B(r) = \frac{\rho_0 r_0^3}{(r + r_0)(r^2 + r_0^2)}, \quad (3.13)$$

kde r_0 je poloměr jádra a ρ_0 centrální hustota [27].

Rozdíl mezi Burkertovým a NFW profilem spočívá ve faktu, že disperze rychlosti u NFW hala klesá s $\sigma \sim r^{1/2}$, kdežto hala popsaná Burkertovým modelem má isothermální jádra s konstantní velikostí disperze rychlosti.

3.5 Kandidáti na temnou hmotu

Přes veškerý pokrok ve studiu temné hmoty veškeré výše uvedené důkazy pro existenci temné hmoty vycházejí z jejího gravitačního působení. Vzhledem k univerzálnosti gravitace poskytují tyto důkazy jen málo informací o původu temné hmoty. Přitom původ temné hmoty má dalekosáhlé důsledky jak v astrofyzice, kde vlastnosti temné hmoty sehrály roli při formování vesmíru a nyní

určují jeho budoucí vývoj, tak ve fyzice částic, kde temná hmota představuje jeden z nejdůležitějších empirických důkazů pro existenci nových částic. Totožnost temné hmoty hraje tedy významnou roli v obou odvětvích a spojuje studium vesmíru na největších a nejmenších škálách.

Obecně lze říci, že část temné hmoty je tvořena kompaktními objekty složenými z běžných částic, které ovšem nemůžeme pozorovat, protože vyzařují jen nepatrné množství elektromagnetického záření (nebo nezáří vůbec). Z fyzikálního hlediska mohou tyto objekty zvané MACHO² (masivní kompaktní objekty galaktického hala) tvořit velmi málo hmotné hvězdy (hnědí trpaslíci) či pozůstatky po hvězdném vývoji (bílé trpaslíci, neutronové hvězdy a černé díry). Tito kandidáti zaujímají mezi ostatními jedinečnou pozici, která tkví v tom, že tyto objekty již byly objeveny metodou gravitačního čočkování. V těchto objektech se však neskrývá tolik hmoty, aby jimi bylo možné vysvětlit pozorované množství temné hmoty. Z tohoto důvodu se předpokládá, že většina temné hmoty je tvořena nějakými exotickými částicemi.

Jednou z možností jsou neutrina. Jako o možném kandidátovi na post temné hmoty se o neutrinu uvažuje již od konce 70. let 20. století a oproti mnoha ostatním kandidátům má nespornou výhodu v tom, že můžeme s určitostí říct, že existuje. Tyto částice jsou produkovány při β rozpadu. Příliš neinteragují s jinými částicemi, navíc jsou ve vesmíru hojně zastoupeny, což z nich dělá vhodného kandidáta. Experimenty však ukazují, že mají pravděpodobně příliš nízkou hmotnost na to, aby mohly tvořit temnou hmotu.

Dalším možným kandidátem jsou axiony. Jejich předností je skutečnost, že předpoklad jejich existence byl motivován řešením jistého problému v jedné z teorií částicové fyziky a jejich role jakožto temné hmoty je tedy pouze jakýmsi bonusem navíc. Měly by být velmi lehké, ale zároveň velmi početné, takže by úlohu temné hmoty plnit mohly. Předpokládá se, že vznikly už při velkém třesku, stejně jako temná hmota. Teorie však předpovídá, že by se měly postupně přeměňovat na protony. Temná hmota je však stabilní.

Dnes jsou jedním z velkých kandidátů tzv. WIMPy³, čili slabě interagující částice. Jedná se o skupinu elementárních částic, jejichž existence vyplývá z teorie supersymetrie⁴. Příkladem takovýchto částic jsou např. neutralina, gravitina či fotina. Tyto částice sice doposud nebyly objeveny, ale jejich vlastnosti dobře odpovídají předpokládaným parametrům temné hmoty.

Informace využití v této kapitole byly převzaty z [17], [18], [19], [20], [29].

² z angl. MAssive Compact Halo Object

³ z angl. Weakly Interacting Massive Particle

⁴ Teorie podle které má každá známá elementární částice supersymetrického partnera, který má identické vlastnosti, ale jejich spin se liší o 1/2.

Kapitola 4

Zpracování dat

Práce se zaměřuje na určení poměru dynamické a zářivé hmoty ve spirálních galaxiích pomocí jejich rotačních křivek a metod plošné fotometrie.

4.1 Data

4.1.1 Rotační křivky a vybraný vzorek galaxií

Zpracovávané rotační křivky byly převzaty z prací [30], [31], [32]. Vybraný vzorek zahrnuje jak normální spirální galaxie pozdního typu, tak galaxie trpasličí a galaxie s nízkým plošným jasem. Přehled vybraných galaxií je v tabulce 4.1. Mezi těmito kandidáty se nachází zajímavé objekty, uveďme si zde proto alespoň některé z nich.

NGC 2976 je trpasličí galaxie objevená Williamem Herschelem roku 1801. Jedná se o členku skupiny M81. Tato zvláštní spirální galaxie je někdy označována jako Scp nebo Sdp kvůli chaotické vnitřní struktuře s mnoha tmavými pruhy a těžko dohledatelným spirálním ramenům. [39]

Galaxie IC 2233 v souhvězdí Rysa, kterou objevil roku 1894 Isaac Roberts, určitě není typickou galaxií. Jedná se o jednu z nejtenčích známých galaxií. Galaxie tohoto typu se vyznačují nízkým jasem a téměř všechny postrádají centrální výduť. Při pohledu z boku se tedy jeví jen jako prostý hvězdný disk. [33]

IC 342 je středně velká galaxie nacházející se v souhvězdí Žirafy objevená Williamem Frederickem Denningem roku 1895. Obsahuje spíše slabou příčku, v nejněvnitřnějších částech příčky se však nachází extrémně koncentrovaný molekulární plyn. [34], [32]

Značné množství mezihvězdného materiálu v centrálních oblastech se vyskytuje také u galaxií NGC 4519 a NGC 6946. Galaxii NGC 6946 v souhvězdí Cefeja, někdy nazývanou také jako Ohňostrojová galaxie, objevil 9. září 1798 William Herschel. Jedná se o velmi aktivní galaxii, která prochází ohromným poryvem vznikání hvězd. Důvodem takto vysokého podílu nově vznikajících hvězd může být nedávná akrece mnoha prvotních mračen neutrálního vodíku o nízké hmotnosti z okolních oblastí. [35], [36], [32]

NGC 5964 je galaxie v souhvězdí Hada, kterou objevil James Dunlop roku 1926. Vyznačuje se výraznou příčkou a je velmi bohatá na neutrální vodík. Odhaduje se, že jeho hmotnost dosahuje

galaxie	typ	d [Mpc]		ref.
NGC 2976	Sm	3,63	trp.	[40]
UGC 711	Sc	20,61	LSB	[40]
UGC 1281	Sd	5,27	trp.	[40]
UGC 4325	SAm	11,91	trp.	[40]
IC 2233	Sd	12,59	LSB	[40]
NGC 3274	SABd	6,5	LSB	[42]
NGC 5023	Sd	6,69	LSB	[40]
IC 342	SACd	2,73		[40]
NGC 4519	SBcd	31,48		[40]
NGC 5964	SBcd	27,8		[40]
NGC 6946	SABcd	5,5		[41]

Tabulka 4.1: Vybraný vzorek galaxií s vyznačenými trpasličími galaxiemi (trp.) a galaxiemi s nízkým plošným jasem (LSB).

82 % celkové hmotnosti galaxie. Rotační křivka $H\alpha$ vykazuje zhruba do vzdálenosti 10 kpc nárůst přibližně jako tuhé těleso. [37], [32]

4.1.2 Fotometrická data

Zpracovávané snímky jsou převzaty z archivu snímků Hubbleova vesmírného dalekohledu. Data obsažená ve snímku jsou udávána v jednotkách zvaných „data numbers“ (DN). Převod na zářivý tok (v jednotkách $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$) lze provést pomocí údajů zapsaných v hlavičce snímku jednoduše vynásobením DN hodnotou PHOTFLAM (zářivý tok zdroje o konstantním toku na jednotku vlnové délky, který by vyprodukoval 1 DN za sekundu) a vydělením expoziční dobou (EXPTIME). Hvězdnou velikost objektu v systému ST magnitud (STMAG) lze poté získat užitím údaje PHOTZPT (nulový bod v systému STMAG) jako

$$m = -2,5 \log \left(PHOTFLAM \times \frac{DN}{EXPTIME} \right) + PHOTZPT. \quad (4.1)$$

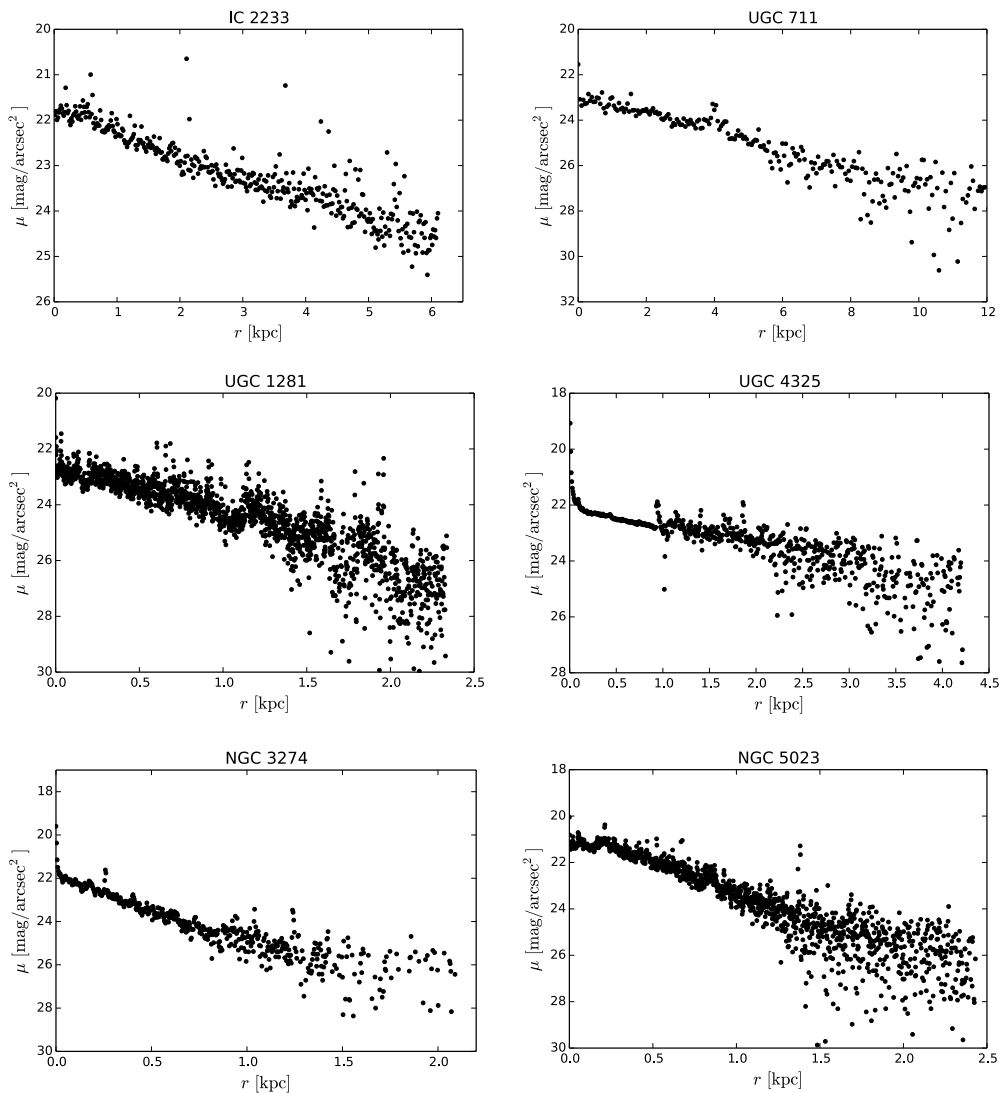
Systém STMAG je založen na spektru s konstantním tokem na jednotku vlnové délky nastavený tak, aby zhruba odpovídal Johnsonovu systému ve filtru V. [38]

Všechny využití snímky byly pořízeny ve filtru F814W (přibližně odpovídá filtru I v Johnsonově fotometrickém systému), kromě snímků galaxií UGC 711 a IC 342, které byly pořízeny ve filtru F675W (přibližně odpovídá filtru R).

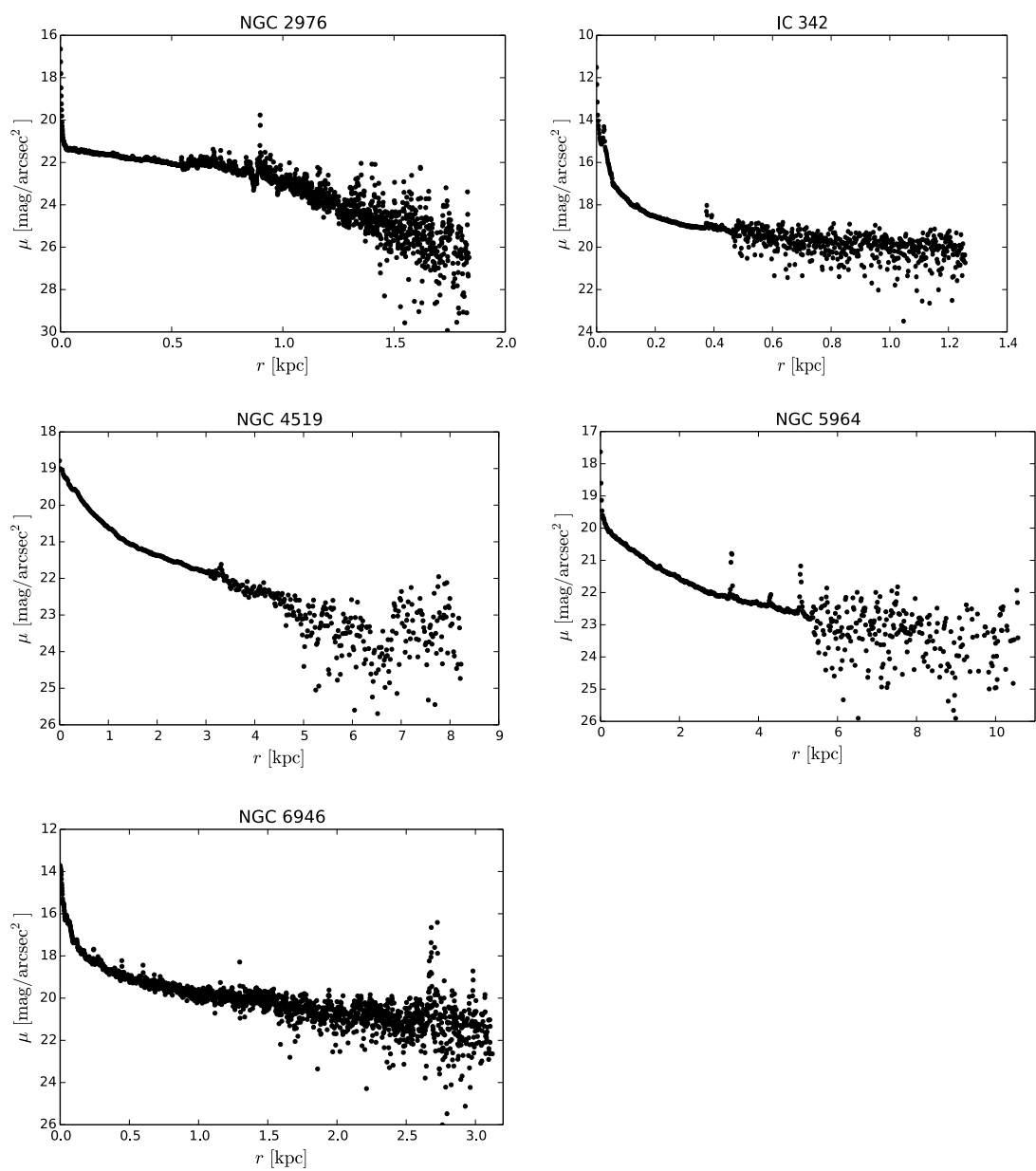
4.2 Zpracování

4.2.1 Určení zářivého výkonu galaxií

K určení zářivého výkonu galaxií v závislosti na vzdálenosti od centra potřebujeme nejprve provést plošnou fotometrii na vybraných snímcích a získat radiální profil galaxie. Za tímto účelem nejprve určíme fotometrický střed galaxie, k určení jejího profilu použijeme metodu prstenců. Střed galaxie tedy obklopíme řadou prstenců o vzrůstajícím poloměru a v každém z nich určíme střední hodnotu z hodnot jednotlivých pixelů. Intenzitu jednotlivých pixelů po odečtení hodnoty pozadí přepočteme na intenzitu na čtvereční vteřinu a tu potom můžeme pomocí vztahu 4.1 vyjádřit v magnitudách na vteřinu čtvereční. Pro galaxie, na které pohlížíme z boku (UGC 711, UGC 1281, NGC 5023, IC 2233), byla použita metoda řezu středem galaxie v určitém směru. Radiální profily galaxií jsou vyobrazeny na obrázku 4.1. Výsledky jsou shrnuty v tabulce 4.2.



Obrázek 4.1: Radiální profily galaxií.



Obrázek 4.1

galaxie	$\mu_{0,I}$ (1)	h_R (2)	$L_{0,I}$ (3)
NGC 2976	16,65	0,6	205,8
UGC 711	22,7	2,4	14,5
UGC 1281	22,35	0,6	11,7
UGC 4325	17,6	1,4	46,9
IC 2233	21,73	2,3	10,1
NGC 3274	19,6	0,4	36,1
NGC 5023	20,7	0,8	23,9
IC 342	11,5	0,7	7950
NGC 4519	18,8	2,5	154,9
NGC 5964	17,6	4,0	183,4
NGC 6946	13,7	1,2	7870

Tabulka 4.2: Výsledky fotometrie: (1) centrální jas ve filtru I [mag arcsec^{-2}] (UGC 711, IC 342 ve filtru R), (2) charakteristická šířka disku [kpc], (3) zářivý výkon v centru ve filtru I (popř. R) [$L_{\odot} \text{pc}^{-2}$].

K převodu hvězdné velikosti na zářivý tok v určitém filtru vyjdeme z Pogsonovy rovnice (2.1), kam můžeme dosadit

$$F_0 = f_{v0} \Delta v, \quad (4.2)$$

kde f_{v0} představuje referenční hustotu toku filtrem na jednotku frekvence a Δv šířku filtru. Pro filtr R platí: $f_{v0} = 3080 \cdot 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$, $\Delta v = 147,2 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$. Pro filtr I : $\Delta v = 150,1 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$, $f_{v0} = 2550 \cdot 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$. [43]

Pro zářivý tok tedy dostáváme vztah

$$F = f_{v0} \Delta v 10^{m/2,5}. \quad (4.3)$$

Zářivý výkon potom určíme pomocí vztahu

$$L = 4 \pi d^2 F, \quad (4.4)$$

kde d je vzdálenost daného objektu.

4.2.2 Stanovení hmotnosti galaxií

Již zde bylo nastíněno, že pomocí rotačních křivek lze odvodit rozložení hmoty v galaxii. Při výpočtu vyjdeme z rovnice pro dostředivou sílu a Newtonova gravitačního zákona. Síla působící na hvězdu o hmotnosti m ve vzdálenosti r od středu galaxie prostřednictvím hmotnosti galaxie $M(r)$ pod poloměrem r je

$$\frac{m v^2}{r} = \frac{GM(r)m}{r^2} \quad (4.5)$$

za předpokladu sférické symetrie.[8]

Pro hmotnost galaxie tedy dostáváme vztah

$$M(r) = \frac{v^2 r}{G}. \quad (4.6)$$

4.2.3 Proložení křivek

Jednou z věcí, kterou můžeme udělat, je pokusit se proložit rotační křivky vybraných galaxií některým z modelů temného hala. V tomto případě byl k proložení křivek použit pseudoisotermální (ISO) a NFW profil. Výsledky jsou vyobrazeny na obrázku 4.3.

Ukazuje se, že rotační křivky trpasličích galaxií NGC 2976, UGC 1281 a UGC 4325 vystihuje pseudoisotermální model podstatně lépe než NFW. U NGC 2976 je tento nesoulad nejpatrnější. Temná hala trpasličích galaxií se proto popisují spíše ISO nebo Burkertovým profilem.

Pro galaxii NGC 3274 NFW model poskytuje srovnatelně dobré výsledky jako ISO. Ostatní LSB galaxie vystihuje lépe isotermální model.

U normálních galaxií IC 342, NGC 4519, NGC 5964 a NGC 6946 je proložení dat obtížnější díky problematickým centrálním oblastem, kde dochází k výraznému nárůstu rotační rychlosti. Pomineme-li tuto skutečnost, k jejich popisu se lépe hodí NFW model. Výjimku tvoří galaxie NGC 5964, u které lze lépe vystihnout průběh rotační křivky pomocí pseudoisotermálního modelu.

4.2.4 Určení poměru hmoty k zářivému výkonu

Z předchozího bodu máme určen zářivý výkon na jednotku plošky galaxie, z rotačních křivek jsme ale získali celkovou hmotnost pod daným poloměrem. Abychom tyto veličiny mohli porovnávat, potřebujeme tedy získat také celkový zářivý výkon vyprodukovaný touto částí galaxie. Za tímto účelem nejprve určíme zářivý výkon v jednotlivých kruhových slupkách. Pro získání zářivého výkonu ve vybrané oblasti potom stačí jednoduše sečíst příspěvky od všech slupek nacházejících se v této oblasti. Pro celkový zářivý výkon pod poloměrem R tedy dostáváme vztah

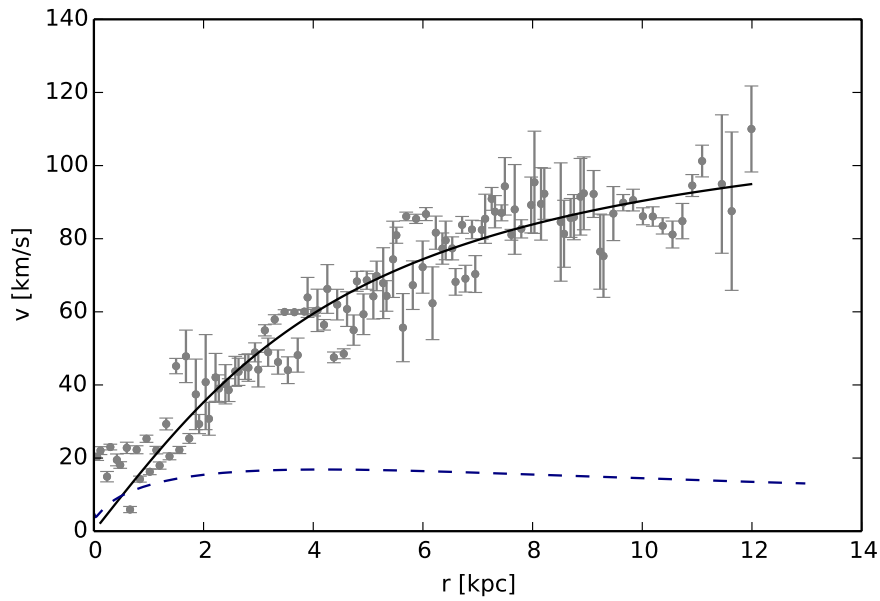
$$L(R) = 2\pi \int_0^R I(R') R' dR', \quad (4.7)$$

přičemž R značí průmět vzdálenosti od centra ve směru k pozorovateli.

Výsledky jsou znázorněny na obrázku 4.4. Nejistota určení poměru hmoty k zářivému výkonu vychází z nejistoty měření rotační rychlosti (pokud byla uveřejněna společně s daty) a nejistoty měření jasů ($\sim \sqrt{DN}$). Zářivé výkony použité k výpočtu jsou jen ve filtru I (popř. R), představují tudíž jen část celkového zářivého výkonu galaxií. Ve skutečnosti by tedy poměry hmoty k zářivému výkonu byly nižší.

UGC 711

Na příkladu galaxie UGC 711 si můžeme ukázat ještě jednu věc. Pokud známe průběh zářivého výkonu galaxie a navíc známe poměr hmoty k zářivému výkonu pro hvězdy, můžeme odhadnout jejich hmotnost v závislosti na vzdálenosti od centra galaxie. Pro galaxii UGC 711 lze dohledat, že $M_*/L_* = 0,6$ [44]. Poté můžeme porovnat hmotnost získanou z měřené rotační křivky s hmotností odpovídající hvězdám. Pokud sečteme celkovou hmotnost pod poloměrem 12 kpc,



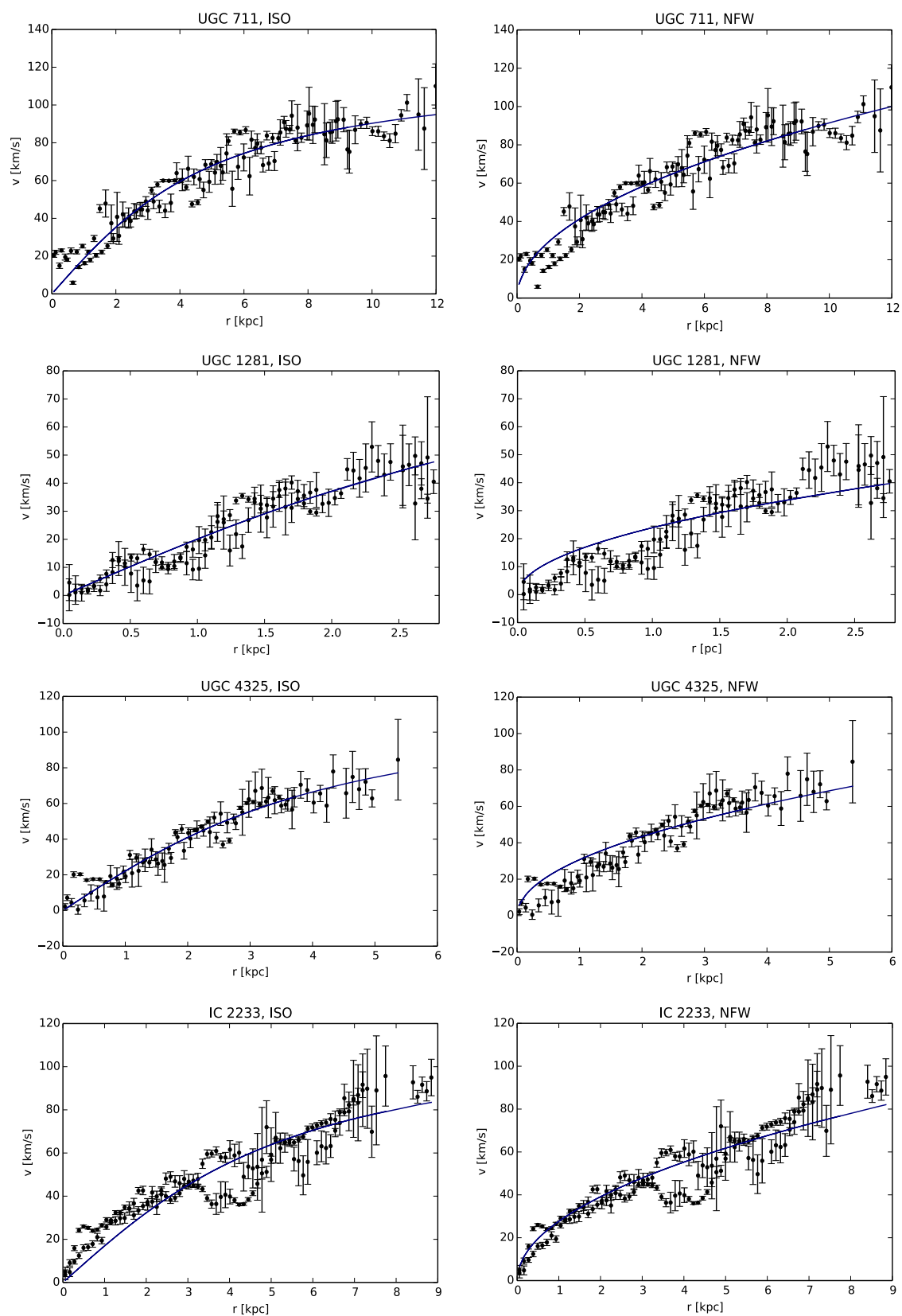
Obrázek 4.2: Rotační křivka galaxie UGC 711. Plnou čárou je vyznačeno proložení ISO modelem, čárkovanou čárou je značen příspěvek hvězd.

získáme $M_{celk} = 3,35 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ a pro hmotnost hvězd pod daným poloměrem získáváme $M_* = 1,01 \cdot 10^8 M_{\odot}$. Ukazuje se, že tato galaxie skutečně obsahuje velké množství skryté hmoty.

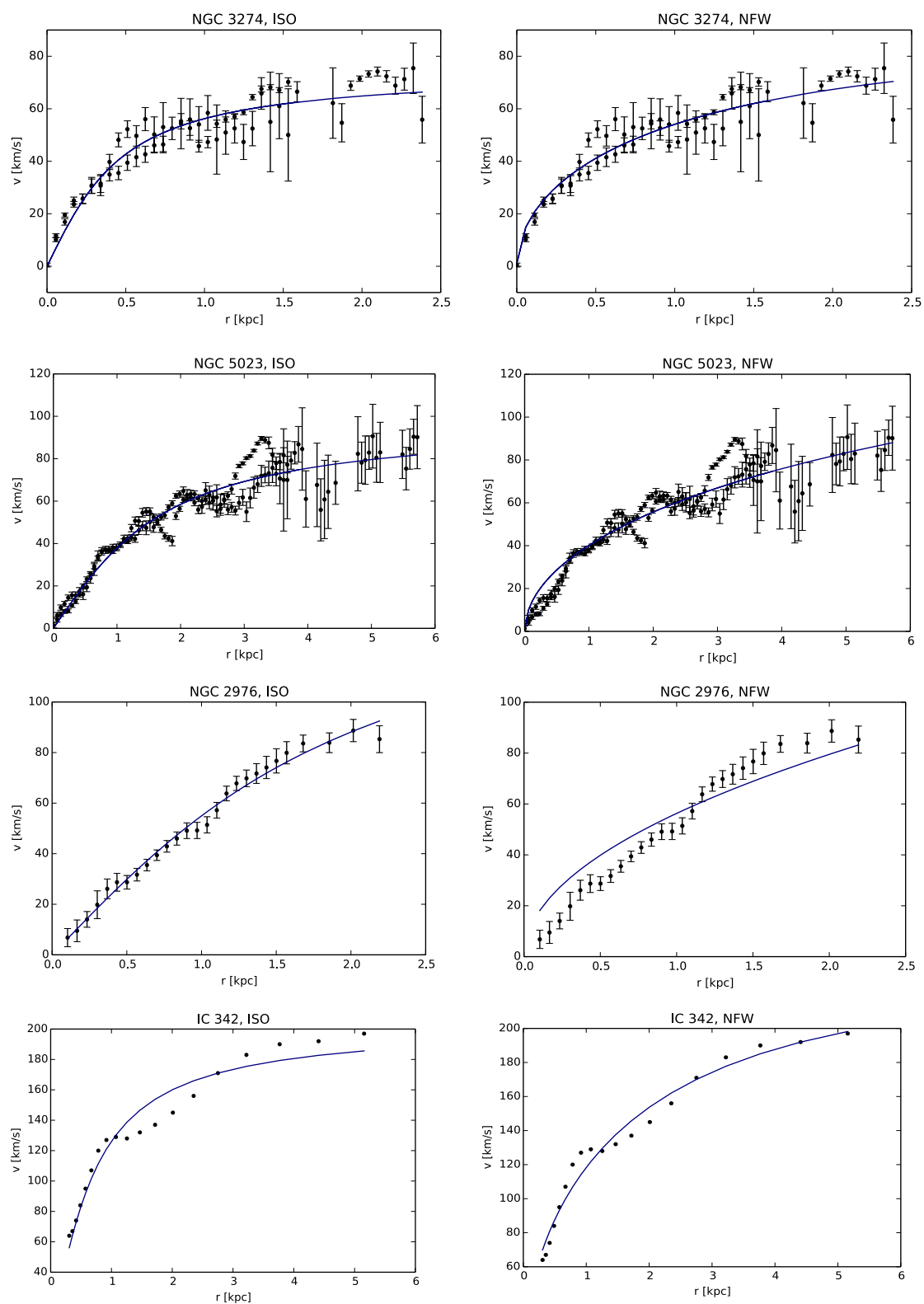
Při znalosti hmotnosti hvězd můžeme také sestrojit rotační křivku odpovídající pouze zářivé složce galaxie. Pro příspěvek hvězd k rotační rychlosti získáváme vztah

$$v_*^2(r) = \frac{G}{r} M_* / L_* L(R). \quad (4.8)$$

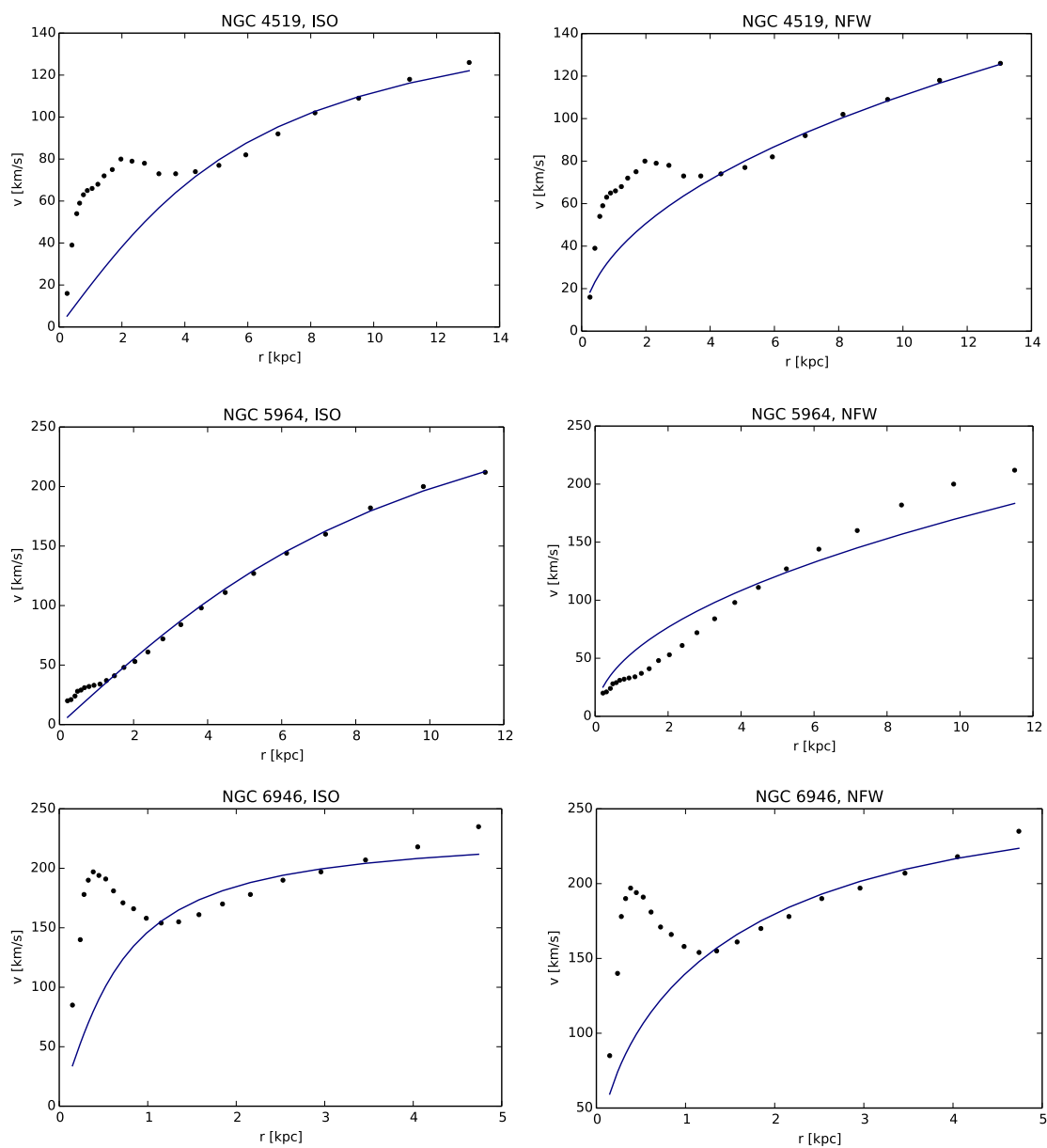
Výsledná rotační křivka je zobrazena na obrázku 4.2. Odtud je také názorně vidět, že u této galaxie představuje temná hmota dominantní složku. Zářivá hmota zde dominuje jen zhruba do vzdálenosti 500 pc od středu galaxie.



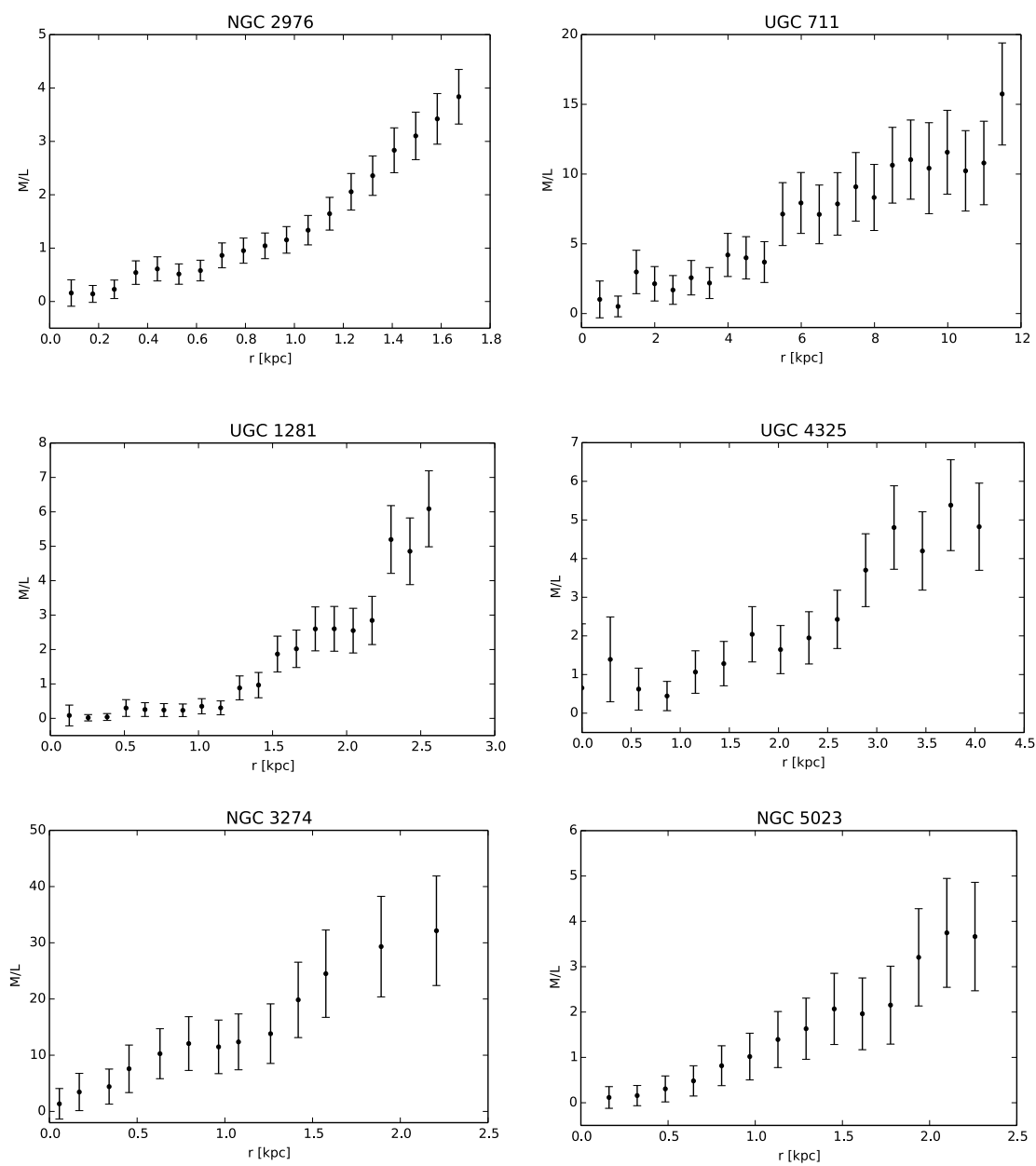
Obrázek 4.3: Výsledky proložení rotačních křivek pseudoisotermálním a NFW profilem.



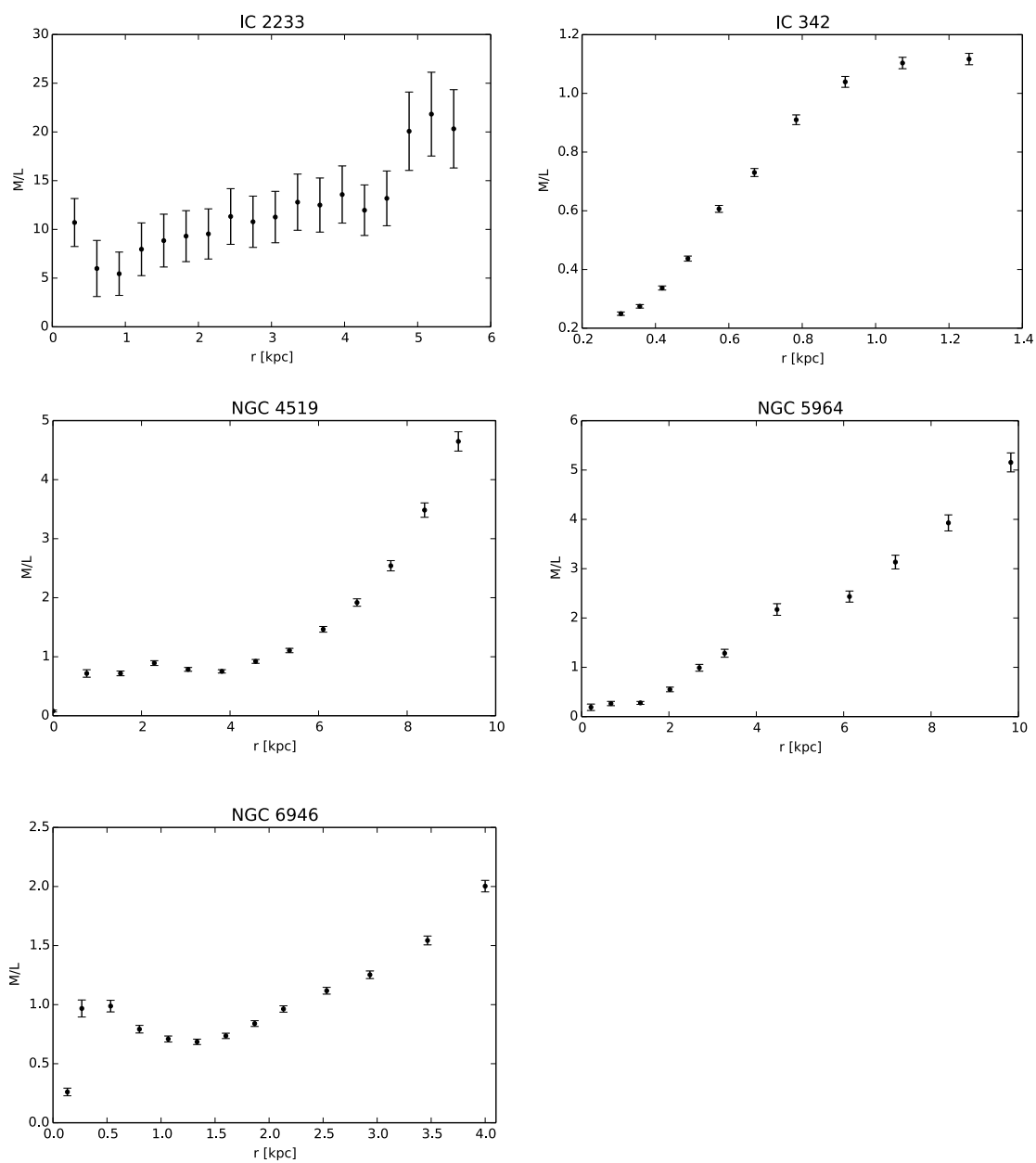
Obrázek 4.3



Obrázek 4.3



Obrázek 4.4: Poměr hmotnosti a zářivého výkonu pro vybrané galaxie v jednotkách M_{\odot}/L_{\odot} .



Obrázek 4.4

Závěr

Cílem této práce bylo pomocí rotačních křivek a metod plošné fotometrie určit poměr dynamické a svítivé hmoty v galaxiích a získat tak představu o přítomnosti skryté hmoty v těchto objektech. Vybraný vzorek galaxií byl zaměřenem především na trpasličí a LSB galaxie, pro porovnání byly využity některé normální spirální galaxie.

Při pohledu na vzhled rotačních křivek zjistíme, že rotační křivky všech vybraných galaxií vykazují spíše pozvolnější nárůst. Rotační křivky normálních galaxií však dosahují vyšších maximálních rychlostí, než je tomu u trpasličích a LSB galaxií, což poukazuje na jejich větší hmotnosti. Je také vidět, že ve většině případů rotační křivky neustále narůstají i v nejzazších měřených vzdálenostech.

Z proložení rotačních křivek vybranými modely temného hala vyplývá, že pro galaxie s nízkým plošným jasem a trpasličí galaxie je vhodnější využít pseudoisotermální model. Temná hala normálních galaxií naopak lépe vystihuje NFW profil. U těchto galaxií nebylo možno jednoduše docílit lepší shody s vybranými modely kvůli problematickým centrálním oblastem, kde dochází k strmému nárůstu rotační rychlosti. Tyto galaxie se vyznačují výraznou centrální příčkou a navíc se v jejich centrálních oblastech vyskytuje značné množství mezihvězdného materiálu. Nejvíce problematickou je z tohoto pohledu galaxie NGC 5964, jež je celkově velmi bohatá na neutrální vodík. K popisu rozložení hmoty v této galaxii je NFW model nevyhovující.

Poté byl u vybraných galaxií zjišťován poměr jejich hmoty získané z rotačních křivek a zářivého výkonu zjištěného pomocí plošné fotometrie. Jak již bylo uvedeno dříve v textu, u trpasličích a LSB galaxií by měla temná hmota dominovat na všech vzdálenostech od centra a tvořit většinu hmoty galaxie. V souladu s tímto předpokladem je poměr hmoty k zářivému výkonu u těchto galaxií v porovnání s normálními galaxiemi vyšší. U vybraných trpasličích a LSB galaxií se tento poměr ve vnějších částech galaxií pohybuje v rozmezí $5 - 35 M_{\odot}/L_{\odot}$, u normálních galaxií leží mezi $2 - 5 M_{\odot}/L_{\odot}$.

Dále, pokud se podíváme na průběh poměru hmoty k zářivému výkonu, vidíme, že u trpasličích a LSB galaxií tento poměr narůstá s rostoucí vzdáleností od centra strměji. U normálních galaxií se poměr hmoty k zářivému výkonu v blízkosti středu udržuje nízký a strměji narůstá až ve vnějších oblastech (kde už byl světelný tok od galaxií velmi nízký). Tomuto průběhu se vymyká galaxie NGC 5964, kde dochází k výraznějšímu nárůstu tohoto poměru i blíže centrálním oblastem, což může být opět dáno vysokým podílem mezihvězdného materiálu.

Dále jsme si na příkladu galaxie UGC 711 ukázali, že z předpokladu znalosti poměru hmotnosti hvězd vůči jejich zářivému výkonu můžeme odhadnout hmotnost hvězd a získat tak rotační křivku způsobenou pouze příspěvkem hvězd. Porovnáním rotační křivky odpovídající hvězdnému disku a měřené rotační křivky odpovídající celkové hmotě v galaxii můžeme vidět, že u této galaxie představuje temná hmota dominantní složku. Obdobný obrázek získáme, pokud srovnáme celko-

vou hmotnost galaxie s odhadem hmoty ukrývající se ve hvězdách. Ukazuje se, že hmotnost ukrytá ve hvězdách je pouze $1,0 \cdot 10^8 M_{\odot}$, zatímco celková hmotnost činí $3,4 \cdot 10^{10} M_{\odot}$.

Výsledky ukazují, že pozorované množství hmoty v galaxiích nemůže zcela vysvětlit jejich měřené rotační křivky. Nejvýraznější je tento jev u trpasličích a LSB galaxií. Například u galaxie UGC 711 by bylo zapotřebí zhruba stokrát více hmoty, aby bylo možné pozorovanou rotaci galaxie vysvětlit.

Rotační křivky galaxií jsou jedním z nejstarších důkazů pro existenci skryté hmoty ve vesmíru. Tyto a další klasické důkazy pro temnou hmotu ve vesmíru byly dále doplněny o informace získané pomocí slabého a silného čočkování, teorie nukleosyntézy, studia mikrovlnného kosmologického záření a dalších metod. Společně nám tato data poskytují ohromující důkaz, že nejen, že se ve vesmíru nachází skrytá hmota, ale většina této hmoty není složena z baryonů ani jiných známých částic. Podle současných údajů tato záhadná hmota převládá nad běžnou hmotou a tvoří zhruba čtvrtinu vesmíru.

Prozatím můžeme říci, že toho o temné hmotě a především temné energii víme stále jen velmi málo. Jejich záhada tak zůstává jedním z nejdůležitějších témat kosmologie 21. století. Pokaždé, když lidstvo dospělo k nějakému objevu, otevřelo mu to cestu k novým neprobádaným oblastem a nevyjasněným záhadám. Kdo ví, co všechno nového objevíme, pokud dokážeme porozumět původu temné hmoty a temné energie.

Seznam použité literatury

- [1] Z. Horský, M. Plavec: *Poznávání vesmíru*, Orbis, Praha 1962.
- [2] S. Singh: *Velký třesk*, Argo, Praha, 2007.
- [3] V. Štefl, J. Krtička: *Historie astronomie*, Brno, 2008.
- [4] W. Herschel: *On the Construction of the Heavens*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol.75:213-266, 1785.
- [5] E. P. Hubble: *The Realm of The Nebulae*, Dover Publications, 1958.
- [6] J. Binney, S. Tremaine: *Galactic Dynamics (Second Edition)*, Princeton University Press, 2008.
- [7] L. S. Sparke, J. S. Gallagher: *Galaxies in the Universe: An Introduction (Second Edition)*, Cambridge University Press, 2007.
- [8] B. W. Carroll, A. D. Ostlie: *An Introduction To Modern Astrophysics*, Addison-Wesley, 2007.
- [9] <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/458013/photometry> [cit. 2015-05-20]
- [10] C. Sterken, J. Manfroid, R. L. F. Boyd: *Astronomical Photometry: A Guide*, Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [11] W. Romanishin: *An Introduction to Astronomical Photometry Using CCDs*, 2006.
Dostupné z: <http://www.physics.csbsju.edu/370/photometry/manuals>
- [12] B. Milvang-Jensen, I. Jorgensen: *Galaxy Surface Photometry*, Baltic astronomy, vol.8:535-574, 1999.
- [13] A. W. Graham, S. P. Driver: *A Concise Reference to (Projected) Sérsic $R^{1/n}$ Quantities, Including Concentration, Profile Slopes, Petrosian Indices, and Kron Magnitudes*, PASA, 22:118-127, 2005.
- [14] A. Oemler, Jr.: *The structure of elliptical and cD galaxies*, ApJ, 209:693-709, 1976.
- [15] E. P. Hubble: *Distribution of luminosity in elliptical nebulae*, ApJ, 71:231-276, 1930.
- [16] J. Kormendy: *Brightness distributions in compact and normal galaxies. II - Structure parameters of the spheroidal component*, ApJ, 218:333-346, 1977.
- [17] B. Ryden: *Introduction to Cosmology*, Addison-Wesley, San Francisco, 2003.
- [18] <http://www.darkmatterphysics.com/> [cit. 2015-05-20]

- [19] A. Liddle: *An Introduction to Modern Cosmology*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2003.
- [20] K. Freeman, G. McNamara: *In Search of Dark Matter*, Springer Praxis Books / Space Exploration, 2006.
- [21] Planck Collaboration and, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al.: *Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters*, A&A 571:A16, 2014.
- [22] M. Kamionkowski: *Possible Relics from New Physics in the Early Universe: Inflation, the Cosmic Microwave Background, and Particle Dark Matter*, ArXiv Astrophysics e-prints, 1998.
- [23] J. F. Navarro, C. S. Frenk, S. D. M. White: *The Structure of Cold Dark Matter Halos*, ApJ, 462:563-575, 1996.
- [24] M. Dvornik, Z. Keresztes, L. Á. Gergely: *Bose-Einstein Condensate Dark Matter Halos confronted with galactic observations*, ArXiv e-prints, 2014.
- [25] K. G. Begeman, A. H. Broeils, R. H. Sanders: *Extended rotation curves of spiral galaxies - Dark haloes and modified dynamics*, MNRAS, 249:523-537, 1991.
- [26] R. Kuzio de Naray, S. S. McGaugh, W. J. G. de Blok: *Mass Models for Low Surface Brightness Galaxies with High-Resolution Optical Velocity Fields*, ApJ, 676:920-943, 2008.
- [27] A. Burkert: *The Structure of Dark Matter Halos in Dwarf Galaxies*, ApJ, 447:L25, 1995.
- [28] D. Bettoni, M. Colombo, S. Liberati: *Dark matter as a Bose-Einstein Condensate: the relativistic non-minimally coupled case*, JCAP, vol.2, 2014.
- [29] L. Bergström: *Dark matter candidates*, New Journal of Physics, vol.11, 2009.
- [30] W. J. G. de Blok, A. Bosma: *High-resolution rotation curves of low surface brightness galaxies*, A&A, 385:816-846, 2002.
- [31] J. D. Simon, A. D. Bolatto, A. Leroy, L. Blitz: *High-Resolution Measurements of the Dark Matter Halo of NGC 2976: Evidence for a Shallow Density Profile*, ApJ, 596:957-981, 2003.
- [32] K. Fathi, J. E. Beckman, N. Piñol-Ferrer et al.: *Pattern Speeds of Bars and Spiral Arms from H α Velocity Fields*, ApJ, 704:1657-1675, 2009.
- [33] http://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/science/ic2233.html [cit. 2015-05-20]
- [34] <http://spider.seds.org/spider/LG/i0342.html> [cit. 2015-05-20]
- [35] <http://messier.seds.org/xtra/ngc/n6946.html> [cit. 2015-05-20]
- [36] <http://www.astro.cz/apod/ap050125.html> [cit. 2015-05-20]
- [37] <http://astronomia.zcu.cz/objekty/ngc5946> [cit. 2015-05-20]
- [38] *Wide Field and Planetary Camera 2 Instrument Handbook*, verze 10.0, 2008.
Dostupné z: <http://www.stsci.edu/hst/wfpc2/documents/handbook>.
- [39] <http://messier.seds.org/xtra/ngc/n2976.html> [cit. 2015-05-20]
- [40] R. B. Tully, H. M. Courtois, A. E. Dolphin et al.: *Cosmicflows-2: The Data*, AJ, 146:86, 2013.

- [41] B. J. Smith, C. Struck, M. Hancock et al.: *The Spitzer Spirals, Bridges, and Tails Interacting Galaxy Survey: Interaction-Induced Star Formation in the Mid-Infrared*, AJ, 133:791-817, 2007.
- [42] D. V. Stark, S. S. McGaugh, R. A. Swaters: *A First Attempt to Calibrate the Baryonic Tully-Fisher Relation with Gas-Dominated Galaxies*, AJ, 138:392-401, 2009.
- [43] <http://www.astro.umd.edu/ssm/ASTR620/mags.html> [cit. 2015-05-20]
- [44] Caylin Mendelowitz: *Rotation Curve and Mass Decomposition for the Edge-on spiral galaxy UGC 711*. Dostupné z: <http://www.cv.nrao.edu/jhibbard/students/CMendelowitz/>

