

VILNIAUS UNIVERSITETAS

FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Tadas Mineikis

STOCHASTINĖ GALAKTIKŲ DISKŲ EVOLIUCIJA.  
2-D MODELIAI

Daktaro disertacija

Fiziniai mokslai, fizika (02 P)

Vilnius, 2015

Disertacija parengta 2010–2014 metais Vilniaus universitete.

Mokslinis vadovas –

Prof. dr. Vladas Vansevicius (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai,  
fizika – 02 P)

VILNIUS UNIVERSITY

CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

Tadas Mineikis

STOCHASTIC GALAXY DISK EVOLUTION.  
2-D MODELS

Doctoral Dissertation

Physical sciences, Physics (02 P)

Vilnius, 2015

Doctoral dissertation was completed during 2010–2014 at Vilnius University.

Scientific supervisor –

Prof. dr. Vladas Vansevicius (Vilnius University, Physical sciences, Physics – 02 P)



# Santrauka

Žvaigždėdaros procesų supratimas galaktikose yra vienas svarbiausių šiuolaikinės astrofizikos uždavinių. Nepaisant sparčiai augančio stebėjimų duomenų, tinkamų žvaigždėdaros tyrimams galaktikose, kiekio vis dar nėra greitų ir patikimų skaitmeninių modelių šiems duomenims analizuoti. Todėl mes sukūrėme stochastinį 2-D galaktikų diskų evoliucijos modelį. Jame žvaigždėdara modeliuojama kaip stochastinis saviindukcinis procesas. Papildomai modelyje įskaitomas dujų bei žvaigždžių judėjimas galaktikos diske ir sunkiaisiais elementais praturtintų dujų netekimas iš galaktikos. Modelis yra išskirtinis tuo, jog gali generuoti sintetines žvaigždžių populiacijų spalvos-ryškio diagramas bet kuriuo evoliucijos momentu ir bet kurioje galaktikos disko vietoje. Mūsų sukurtas programinis paketas modeliui realizuoti įgalina registruoti cheminę ir spektrofotometrinę 2-D informaciją per visą galaktikos evoliucijos laikotarpį.

Naują žvaigždėdaros modeliavimo galaktikose modelį panaudojome M33 galaktikos tyrimui. Remiantis detalios šios galaktikos evoliucijos analize buvo įrodyta, kad norint išspręsti galaktikos evoliucinių parametrų išsigimimo problemą būtina panaudoti ir 2-D galaktikos modelį, ir jo generuojamas spalvos-ryškio diagramas, kurios yra bene pati informatyviausia priemonė tiriant artimų galaktikų evoliuciją.



# Padėka

Dėkoju savo vadovui Vladui Vansevičiui už ilgo ir nuoširdaus bendravimo laikotarpiu suteiktas neįkainojamas mokslinio darbo ir asmeninio tobulėjimo pamokas.

Esu dėkingas kolegoms Philippe de Meulenaer, Donatui Narbučiui, Dmitrij Semionov, Audriui Bridžiui ir Rimai Stonkutei už nuoširdžią pagalbą visose gyvenimo srityse.

Nuoširdžiai dėkoju Kristinai ir savo šeimos nariams, kurie visada buvo ir yra šalia, kai to labiausiai reikia.



# Turinys

<b>Santrauka</b>	<b>5</b>
<b>Padėka</b>	<b>7</b>
<b>Įvadas</b>	<b>17</b>
Tyrimo tikslas . . . . .	19
Uždaviniai . . . . .	19
Ginamieji teiginiai . . . . .	19
Publikacijos disertacijos tema . . . . .	19
Kitos publikacijos . . . . .	20
Pranešimai konferencijose . . . . .	20
Asmeninis indėlis . . . . .	21
Disertacijos planas . . . . .	21
<b>1 2-D stochastinis galaktikų diskų evoliucijos modelis</b>	<b>23</b>
1.1 2-D galaktikų diskų modelių kūrimo istorija . . . . .	23
1.2 Modelis . . . . .	24
1.2.1 Modelio geometrija . . . . .	24
1.2.2 Masės akrecija . . . . .	26
1.2.3 Žvaigždėdaros scenarijus . . . . .	28
1.2.4 Ląstelių evoliucija . . . . .	29
1.2.5 Dujų dinamika . . . . .	31
1.2.6 Dujų netekimas . . . . .	32
1.2.7 Žvaigždžių populiacijų generavimas . . . . .	34
1.3 Modelio parametrai . . . . .	35
1.4 Modelio parametrų nustatymas . . . . .	41
<b>2 Modelio taikymas M33 galaktikos tyrimui</b>	<b>49</b>
2.1 M33 galaktika . . . . .	49
2.2 Stebėjimų duomenys . . . . .	50
2.2.1 Dujų paviršinis tankis . . . . .	50
2.2.2 Metalingumas . . . . .	52
2.2.3 Paviršinės fotometrijos profiliai . . . . .	54
2.2.4 Žvaigždžių fotometrijos duomenys . . . . .	55
2.3 M33 disko masės nustatymas . . . . .	56
2.4 M33 galaktikos evoliucijos tyrimas . . . . .	60

<b>3</b>	<b>1-D ir 2-D galaktikų diskų evoliucijos modelių palyginimas</b>	<b>71</b>
3.1	Tolydinis 1-D modelis . . . . .	71
3.2	Modelių kalibracija . . . . .	72
3.3	Rezultatai . . . . .	74
	<b>Išvados</b>	<b>81</b>
	<b>Literatūros sąrašas</b>	<b>81</b>

# Iliustracijų sąrašas

1	Pagrindinių galaktikos evoliucijos procesų schema. . . . .	18
1.1	Sukurto modelio 2-D disko tinklelio geometrija. . . . .	25
1.2	Dujų akrecijos scenarijus naudojamas 2-D modelyje. . . . .	27
1.3	Dujų praturtintų metalais praradimas. . . . .	33
1.4	Barioninės galaktikos masės, $M_G$ , įtaka modelio numatomiems stebimų parametrų profiliams. . . . .	37
1.5	Indukuotos žvaigždėdaros tikimybės parametro, $P_T$ , įtaka modelio numatomiems stebimiems parametrams. . . . .	37
1.6	Žvaigždėdaros efektyvumo parametro, $\epsilon$ , įtaka modelio numatomiems stebimiems parametrams. . . . .	38
1.7	Žvaigždėdaros efektyvumo parametro, $\alpha$ , įtaka modelio numatomiems stebimiems parametrams. . . . .	38
1.8	Praturtintų metalais dujų netekimo parametro, $\eta$ , įtaka modelio numatomiems stebimiems parametrams. . . . .	39
1.9	Spontaninės žvaigždėdaros tikimybės parametro, $P_S$ , įtaka modelio numatomiems stebimiems parametrams. . . . .	39
1.10	Kritinio dujų tankio žvaigždėdarai parametro, $\Sigma_C$ , įtaka modelio numatomiems stebimiems parametrams. . . . .	40
1.11	Žvaigždžių dispersijos parametro, $D_S$ , įtaka modelio numatomiems stebimiems parametrams. . . . .	40
1.12	Dujų sugrįžimo laiko skalės parametro, $\tau$ , įtaka modelio numatomiems stebimiems parametrams. . . . .	41
1.13	Galaktikos sukimosi kreivės įtaka modelio numatomiems stebimiems parametrams. . . . .	41
1.14	Galaktikų modelių su skirtingomis sukimosi kreivėmis vaizdai GALEX <i>FUV</i> juostoje. . . . .	42
1.15	Modelių tinklelio parametrai, naudoti dirbtinio parametrų nustatymo teste. . . . .	43
1.16	Modelių tinklo radialiniai profiliai naudoti parametrų nustatymo teste. . . . .	43

1.17	Dujų paviršinio tankio stebėjimų svarba modelio parametru nustatymui. . . . .	45
1.18	<i>i</i> paviršinio šviesio stebėjimų svarba modelio parametru nustatymui. . . . .	45
1.19	GALEX <i>FUV</i> paviršinio šviesio stebėjimų svarba modelio parametru nustatymui. . . . .	46
1.20	Dujų metalingumo profilio stebėjimų svarba modelio parametru nustatymui. . . . .	46
2.1	M33 galaktikos nuotrauka GALEX <i>FUV</i> juostoje. . . . .	49
2.2	Atominiio vandenilio dujų apžvalgų M33 galaktikoje, vykusių vėliau nei 1987 m., rezultatai. . . . .	51
2.3	Molekulinio vandenilio apžvalgų M33 galaktikoje rezultatai .	52
2.4	Dujų ir žvaigždžių metalingumo stebėjimai M33 galaktikoje.	53
2.5	Radialiniai M33 galaktikos paviršinio šviesio profiliai GALEX <i>FUV</i> ir <i>i</i> juostose. . . . .	54
2.6	HST/ACS laukelių stebėtų Williams ir kt. (2009) padėtyse M33 galaktikos diske. . . . .	55
2.7	M33 galaktikos disko stebėjimų spalvos-ryškio diagramos. . .	56
2.8	M33 galaktikos sukimosi kreivės modeliavimo rezultatai. . .	58
2.9	M33 sukimosi kreivių priklausomybė nuo radiuso. . . . .	59
2.10	Modelių tinklo palyginimas su M33 galaktikos stebėjimais. .	61
2.11	Geriausiai M33 stebėjimų duomenis atitinkantys modeliai. .	62
2.12	Geriausiai M33 galaktikos stebėjimus atitinkančių modelių parametrai. . . . .	62
2.13	„Išsigimimo slėnio“ modelių vaizdai GALEX <i>FUV</i> juostoje. .	63
2.14	Modelių, įskaitančių praturtintų dujų netekimą, palyginimas su M33 galaktikos stebėjimais parametrais. . . . .	64
2.15	Žvaigždėdaros žybsnių energija atžvilgiu energijos reikalingos praturtintoms dujoms išmesti iš galaktikos. . . . .	65
2.16	M33 galaktikos stebėtų žvaigždžių spalvos ryškio diagramos palyginimas su modeliu A. . . . .	67
2.17	M33 galaktikos stebėtų žvaigždžių spalvos ryškio diagramos palyginimas su modeliu B. . . . .	68



2.18	M33 galaktikos stebėtų žvaigždžių spalvos ryškio diagramos palyginimas su modeliu C. . . . .	69
3.1	Žvaigždėdaros spartos standartinių nuokrypių radialiniai profiliai . . . . .	72
3.2	2-D modelio MS žvaigždėdaros laiko skalės parametro $\tau_{SF,i}$ evoliucija . . . . .	73
3.3	2-D modelio MS dujų paviršinio tankio, žvaigždėdaros spartos bei dujų metalingumo evoliucija radialiniuose žieduose .	75
3.4	2-D modelio DS dujų paviršinio tankio, žvaigždėdaros spartos bei dujų metalingumo evoliucija radialiniuose žieduose .	75
3.5	2-D modelio MS dujų ir žvaigždėdaros paviršinio tankio bei metalingumo radialiniai profiliai ties skirtingais galaktikos evoliucijos laikais . . . . .	76
3.6	2-D modelio DS dujų ir žvaigždėdaros paviršinio tankio, bei metalingumo radialiniai profiliai ties skirtingais galaktikos evoliucijos laikais . . . . .	77
3.7	2-D modelio MS GALEX <i>FUV</i> , <i>V</i> ir <i>K</i> paviršinių šviesių evoliucija . . . . .	77
3.8	2-D modelio DS GALEX <i>FUV</i> , <i>V</i> ir <i>K</i> paviršinių šviesių evoliucija . . . . .	78
3.9	2-D modelio MS GALEX <i>FUV</i> , <i>V</i> ir <i>K</i> paviršinių šviesių radialinių profilių evoliucija . . . . .	78
3.10	2-D modelio DS GALEX <i>FUV</i> , <i>V</i> ir <i>K</i> paviršinių šviesių radialinių profilių evoliucija . . . . .	79



## Lentelių sąrašas

1.1	Panaudoti PEGASE-HR programinio paketo SSP parametrai.	29
1.2	Parametrų jautrio tyrimui naudotas standartinis modelis. . .	36
1.3	Modelių tinklo parametrai. . . . .	42
2.1	Atominio vandenilio apžvalgos M33 galaktikoje. . . . .	50
2.2	Molekulinio vandenilio apžvalgos M33 galaktikoje. . . . .	51
2.3	M33 galaktikos tyrimui naudoto modelių tinklo parametrai.	60
3.1	2-D modelių parametrai. . . . .	74
3.2	1-D modelio parametrai. . . . .	74



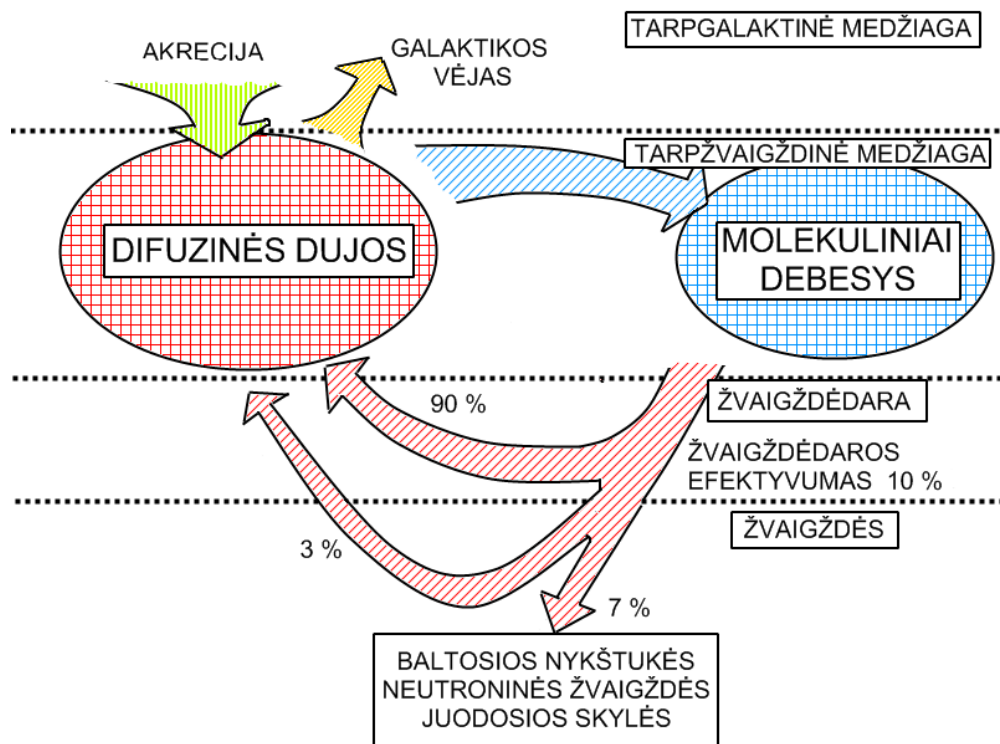
# Įvadas

Stebimoji Visata yra didžiulė žmonijai prieinama gamtos mokslų laboratorija. Tačiau, norint pasinaudoti šiais resursais, reikia gerai suprasti jos veikimą. Per pastarąjį šimtmetį mūsų supratimas apie Visatą pasikeitė iš esmės. Ši proveržį sąlygojo padidėjusios stebėjimo instrumentų ir teorinių metodų galimybės. Tačiau, nepaisant didžiulių pastangų, vis dar iki galo nėra suprastas vienas svarbiausių procesų Visatoje – žvaigždėdara galaktikose (žr. 1 pav.).

Dėl ekstremalių laiko ir erdvės mastelių būdingų galaktikoms, mes negalime tirti astrofizikinių procesų pasinaudodami kontroliuojamais eksperimentais. Dėl šios priežasties žvaigždėdaros tyrimai labai priklauso nuo teorinių modelių, kurie įgalina atlikti virtualius eksperimentus ir numatyti stebimas objektų savybes, o joms pasitvirtinus galime teigti, jog modelis gerai atitinka realybę.

Sudėtingiausi šiuo metu naudojami galaktikų formavimosi ir evoliucijos modeliai remiasi hidrodinaminiais/N-kūnų modeliavimo metodais. Tačiau šie modeliai susiduria su tam tikrais sunkumais. Jie reikalauja didžiulių skaičiavimo resursų, stipriai priklauso nuo erdvėje neišskiriamų procesų parametrizacijos ir netgi nuo pasirinkto kodo realizavimo metodo (Scannapieco ir kt. 2012). Taipogi, modeliuojant vėlyvo morfologinio tipo galaktikas reikalingas tikslus parametrų suderinimas (Roškar ir kt. 2014, ir nuorodos ten). Itin didelės erdvinės skyros modeliai gali padėti išspręsti šias problemas (Guedes ir kt. 2011), tačiau tai padarytų galaktikų evoliucijos modelius dar reiklesnius skaičiavimo resursams. Dėl šių priežasčių hidrodinaminiai/N-kūnų modeliai vis dar nėra efektyviai panaudojami didesnės erdvinės skyros žvaigždėdaros stebėjimo duomenų analizei ir interpretacijai.

Galaktikų formavimąsi ir evoliuciją taip pat galima modeliuoti pasinaudojus pusiau-analitiniais metodais (pvz., Kang ir kt. 2012). Pusiau-analitiniai modeliai galaktikose vykstančius procesus aprašo analitinėmis išraiškomis, todėl jie yra itin sparčiai skaičiuojami, tačiau turi daug laisvųjų modelio parametrų. Šiuo metu naudojami pusiau-analitiniai modeliai galaktikas vaizduoja kaip vienmačius objektus (1-D, skyra tik išilgai galak-



**1 pav.** Pagrindiniai procesai galaktikų tarpžvaigždinėje terpėje. Galaktikos nėra izoliuotos sistemos, o jų evoliucijai didelę įtaką daro barioninės medžiagos apsikeitimo procesai su tarpgalaktine terpe. Svarbiausieji dujų procesai galaktikose: dujų akrecija į galaktiką; dujų, praturtintų sunkiaisiais elementais, praradimas į tarpgalaktinę erdvę; cikliškas molekulinį debesų susidarymas iš difuzinių dujų ir atvirkščias vyksmas – jų suardymas dėl energingo grįžtamojo ryšio vykstant žvaigždėdarai. Nedidelė dalis molekulinį debesų dujų virsta žvaigždėmis, kurios evoliucionuodamos grąžina dalį sunkiaisiais elementais praturtintų dujų – taip vyksta galaktikos cheminė evoliucija. Baigusios savo raidą žvaigždės virsta baltosiomis nykštukėmis, neutroninėmis žvaigždėmis arba juodosiomis skylėmis, iš kurių į tarpžvaigždinę terpę medžiaga jau nebegrįžta.

tikos spindulio), todėl jų pritaikymas artimų erdvėje gerai išskirtų galaktikų žvaigždėdaros procesų tyrimams yra ribotas.

Disertacijoje yra pristatomas naujas diskinių galaktikų evoliucijos ir žvaigždėdaros jose modelis dvimačių (2-D) galaktikų diskų atvejui. 2-D galaktikų diskų modeliavimas įgalina sugeneruoti didelę numatomų stebimų parametrų įvairovę ir daro modelį naudingu įrankiu tiriant diskines galaktikas vis sparčiau augančio stebėjimų duomenų kiekio kontekste.

## Tyrimo tikslas

Ištirti žvaigždėdaros stochastiškumo įtaką galaktikų diskų evoliucijai.

## Uždaviniai

1. Sukurti 2-D galaktikų diskų stochastinės žvaigždėdaros modelį.
2. Sukurti programinį paketą galaktikų diskų modeliavimui.
3. Atlikti žvaigždėdaros procesų tyrimą M33 galaktikoje.

## Pagrindiniai rezultatai ir ginamieji teiginiai

1. Sukurtas stochastinis 2-D galaktikų diskų evoliucijos modelis gerai atkuria vėlyvo morfologinio tipo galaktikų diskų stebėjimų rezultatus.
2. Sukurtas galaktikų diskų modeliavimo programinis paketas leidžia prognozuoti žvaigždžių populiacijų stebėjimo rezultatus bet kurioje fotometrinėje sistemoje.
3. Siekiant patikimai nustatyti vėlyvojo morfologinio tipo galaktikų diskų ir žvaigždžių populiacijų parametrus, privalu atsižvelgti į stochastinį žvaigždėdaros pobūdį ir dėl to atsirandančius didelės stebėjimų duomenų sklaidos efektus.
4. Nustatyti pagrindiniai M33 galaktikos disko parametrai: indukuotos žvaigždėdaros tikimybė,  $P_T = 0.34$ , žvaigždėdaros efektyvumas,  $\epsilon = 0.2\%$ , sunkiaisiais elementais praturtintų dujų praradimas,  $\eta = 0.9$ .

## Publikacijos disertacijos tema

1. **Mineikis T.**, Vansevičius V. 2010, *Disk galaxy models driven by stochastic self-propagating star formation* // Baltic Astronomy, 19, 111
2. **Mineikis T.**, Vansevičius V. 2014, *Stochastic 2-D models of galaxy disk evolution. The galaxy M33* // Baltic Astronomy, 23, 209
3. **Mineikis T.**, Vansevičius V. 2014, *Models of late-type disk galaxies: 1-D versus 2-D* // Baltic Astronomy, 23, 221
4. **Mineikis T.**, Vansevičius V. 2015, *Stochastic 2-D galaxy disk evolution models. Resolved stellar populations in the galaxy M33* // Baltic Astronomy, 24, 223

## Kitos publikacijos

1. de Meulenaer P., Narbutis D., **Mineikis T.**, Vansevičius V. 2013, *Deriving physical parameters of unresolved star clusters. I. Age, mass, and extinction degeneracies* // A&A, 550, A20
2. de Meulenaer P., Narbutis D., **Mineikis T.**, Vansevičius V. 2014, *Deriving physical parameters of unresolved star clusters. II. The degeneracies of age, mass, extinction, and metallicity* // A&A, 569, A4
3. de Meulenaer P., Narbutis D., **Mineikis T.**, Vansevičius V. 2015, *Deriving physical parameters of unresolved star clusters. III. Application to M 31 PHAT clusters* // A&A, 574, A66
4. de Meulenaer P., Narbutis D., **Mineikis T.**, Vansevičius V. 2014, *Stochasticity in star clusters: reduced random sampling method* // Baltic Astronomy, 23, 199
5. Narbutis D., Semionov D., Stonkutė R., de Meulenaer P., **Mineikis T.**, Bridžius A., Vansevičius V. 2014, *Deriving structural parameters of semi-resolved star clusters. FitClust: a program for crowded fields* // A&A, 569, A30
6. Narbutis D., Stonkutė R., de Meulenaer P., **Mineikis T.**, Vansevičius V. 2014, *Structural parameters of star clusters: stochastic effects* // Baltic Astronomy, 23, 103

## Pranešimai konferencijose

1. Mineikis T., Vansevičius V. *Spiralinės galaktikos M33 disko evoliucija* // "4-oji Lietuvos astronomų sąjungos konferencija. Kosmoso tyrimai vakar, šiandien ir rytoj.", Vilniaus universiteto planetariumas, birželio 13, 2008 (žodinis pranešimas)
2. Mineikis T., Vansevičius V. *Stochastinis galaktikų diskų modelis* // "38-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija", Vilniaus universitetas, birželio 8-10, 2009 (stendinis pranešimas)
3. Mineikis T., Vansevičius V. *GALEMO: diskinių galaktikų evoliucijos modelis* // "39-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija", Vilniaus universitetas, spalio 6-8, 2011 (stendinis pranešimas)
4. Mineikis T., Vansevičius V. *Models of late type galaxy evolution: 1D versus 2D* // "European week of astronomy and space science", Turku (Suomija), liepos 8-12, 2013 (žodinis pranešimas)
5. Mineikis T., Vansevičius V. *Stochastic 2-D galaxy disk evolution modeling. The M33 galaxy* // "Physical Processes of Galaxy Formation: Consensus and Challenges", Aix en Provance (Prancūzija), liepos 22-26, 2013 (stendinis pranešimas)



## **Asmeninis indėlis**

Autorius kartu su moksliniu vadovu sukūrė stochastinį 2-D galaktikų diskų evoliucijos modelį, analizavo modeliavimo rezultatus ir publikavo 4 straipsnius disertacijos tema. Autorius savarankiškai realizavo modelį ir pagalbinių modelių programų paketą, surinko ir apdorojo M33 galaktikos stebėjimo duomenis palyginimui su modeliu. Suminis autoriaus įnašas ne mažesnis nei 70%.

## **Disertacijos planas**

1 skyriuje aprašome sukurtą stochastinį 2-D galaktikų diskų evoliucijos modelį; 2 skyriuje aprašome modelio taikymą M33 galaktikos disko evoliucijos tyrimui; 3 skyriuje palyginame 1-D ir 2-D galaktikų diskų evoliucijos modelius, svarbiausias išvados pateikiame paskutiniame skyriuje.



## Skyrius 1

# 2-D stochastinis galaktikų diskų evoliucijos modelis

### 1.1 2-D galaktikų diskų modelių kūrimo istorija

Istoriškai pirmieji 2-D galaktikų diskų evoliucijos modeliai buvo pradėti kurti siekiant paaiškinti fotogeniškausias diskinių galaktikų struktūras – spiralines vijas. Mueller ir Arnett (1976) pademonstravo paprastą 2-D modelį valdomą keleto parametrų, kuriuos varijuojant buvo galima generuoti žvaigždėdaros regionų struktūras panašias į stebimas galaktikų diskuose. Modelis buvo paremtas savaimine plintančios žvaigždėdaros scenarijumi, kuomet žvaigždėdara, vykstanti tam tikrame galaktikos disko regione, indukuoja žvaigždėdarą aplinkiniuose regionuose, jeigu aplinkiniai regionai neformavo žvaigždžių tam tikrą laiko intervalą – regeneracijos laiką. Šį modelį vėliau tobulino Gerola ir Seiden (1978), kurių esminis indėlis buvo deterministinio žvaigždėdaros modelio pakeitimas stochastiniu. Modelyje, aprašytame Mueller ir Arnett (1976), žvaigždėdara aplinkiniuose regionuose vyksta visada, jeigu tik tam yra palankios sąlygos, t.y. regionuose paskutinioji žvaigždėdara vyko anksčiau nei užduotas regeneracijos laikas. Tuo tarpu Gerola ir Seiden (1978) įvedė papildomą parametą – indukuotos žvaigždėdaros tikimybę, pagal kurią žvaigždėdara indukuojama su tam tikra tikimybe, kuri yra modelio parametras. Tokiu būdu generuojama žvaigždėdaros regionų morfologija pasidarė gerokai artimesnė realioms galaktikoms. Tolesni modelio tobulinimai (Seiden ir Gerola 1979) susiejo modelyje vykstančią žvaigždėdarą su disko dujų kiekiu bei susiformavusių žvaigždžių mase.

Gerola ir kt. (1980) pademonstravo, jog 2-D saviindukcinės žvaigždėdaros modelis gali paaiškinti žybciojančią žvaigždėdaros istoriją netaisyklingose nykštukinėse galaktikose. Žybciojanti žvaigždėdaros istorija yra natūrali saviindukcinės žvaigždėdaros savybė mažų matmenų (1-2 kpc) sistemose. Mažose sistemose žvaigždėdara išplinta po galaktiką per trumpą, palyginus

su regeneracijos laiku, laikotarpį. Dėl šios priežasties žvaigždėdara pradeda gesti, nebegalėdama toliau plisti. Sekantis žvaigždėdaros žybsnis vyksta kuomet didžioji dalis modeliuojamos galaktikos regionų „ataušta“, t. y. laiko tarpas praėjęs po paskutinio žvaigždėdaros žybsnio tampa didesnis nei regeneracijos laikas. Taip pat Feitzinger ir kt. (1981) pademonstruotas modelio taikymas Didžiojo Magelano Debesies galaktikos stebimoms savybėms modeliuoti įrodė, jog 2-D diske savaime plintančios žvaigždėdaros modelio pritaikymas neapsiriboja nykštukinėmis netaisyklingosiomis galaktikomis, tačiau tinka ir didesnėms spiralinėms galaktikoms.

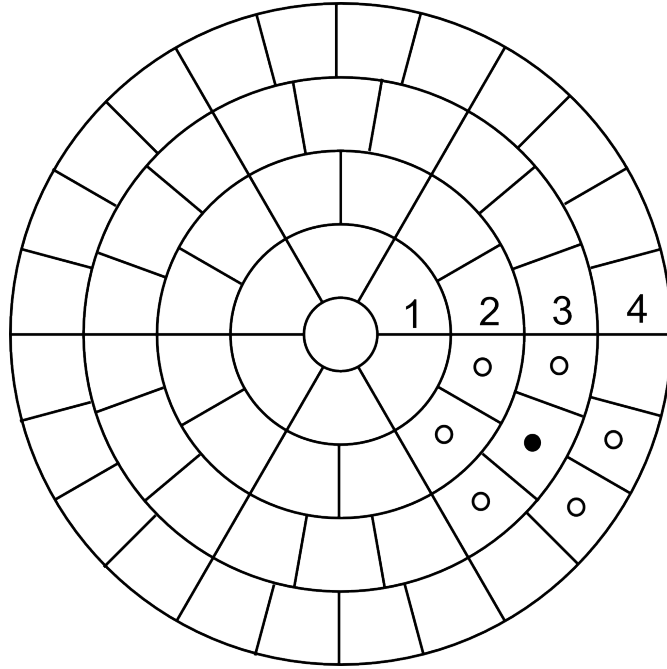
Vėlesniuose 2-D savaime plintančios žvaigždėdaros modelio tobulinimo etapuose buvo išbandyti be geometrinio tinklelio ribojimų suskaičiuoti modeliai (Jungwiert ir Palous 1994). Sleath ir Alexander (1995) pademonstravo savaime plintančios žvaigždėdaros scenarijaus suderinamumą su Kennicutt-Schmidt žvaigždėdaros paviršinio tankio ir dujų paviršinio tankio sąryšiu (Kennicutt 1989). Tačiau nesant pakankamai didelės erdvinės skyros galaktikų diskų stebėjimų duomenų tolesnis modelio tobulinimas sustojo.

## 1.2 Modelis

Šiame skyriuje aprašomas (Mineikis ir Vansevičius 2010, 2014a,b, 2015) publikacijose pateiktas stochastinis galaktikų diskų evoliucijos modelis.

### 1.2.1 Modelio geometrija

Barioninės masės pasiskirstymas galaktikų diskuose pasižymi plonumu. Tipinis santykis tarp disko skalės ilgio ir aukščio yra  $\sim 10$ , ir gali siekti netgi didesnes vertes vėlyvojo morfologinio tipo (Sc-Sd) galaktikose (pvz., van der Kruit ir Freeman 2011). Ši savybė leidžia diskų modeliavimą supaprastinti ir neatsižvelgti į disko storį. Išnaudodami šią galaktikų diskų savybę, mes disko evoliuciją modeliuojame 2-D tinklelyje (žr. 1.1 pav.). Modelio diskas suskaidomas į vienodo pločio koncentriškus žiedus  $N_R$ . Kiekvienas žiedas suskaidomas į  $6 \cdot i$ , o visas diskas į  $3N_R(N_R - 1) + 1$  ląsteles, kur  $i \in [1, N_R]$ . Toks disko skaidymas užtikrina vienodą ląstelių plotą visame diske. Išimtimi lieka centrinė ląstelė, kurios plotas sudaro  $3/4$  kitų ląstelių ploto. Vienintelis parametras apibūdinantis modelio tinklelį – žiedų skaičius  $N_R$ .



**1.1 pav.** Modelyje naudojama 2-D galaktikos disko tinklelio geometrija. Diskas suskaidomas į vienodo pločio žiedus  $N_R$ . Kiekvienas žiedas suskaidomas į  $6 \cdot i$ , o visas diskas į  $3N_R(N_R - 1) + 1$  ląsteles. Toks skaidymo būdas padalina diską į vienodo ploto ir perimetro ląsteles, išskyrus centrinę ląstelę, kurios plotas sudaro  $3/4$  kitų ląstelių ploto. Ląstelė pažymėta juodu skrituliuku turi bendras sienes su kaimyninėmis ląstelėmis (balti skrituliukai).

Modelio tinklelio geometrija sudaro sąlygas kiekvienam žiedui nustatyti sukimosi greitį pagal realios galaktikos sukimosi kreivę. Ši tinklelio savybė įgalina realistiškai modeliuoti disko žvaigždėdaros regionų morfologiją konkrečioje galaktikoje. Tačiau, dėl kintančios tinklelio geometrijos ir jos įtakos žvaigždėdaros regionų plitimui centrinėse disko dalyse, tinklelio žiedai,  $i \in [1, 10)$ , rezultatų analizei turėtų būti naudojami su atitinkamomis pataisomis.

Kadangi modelis skirtas žvaigždėdaros (SF) plitimui galaktikos diske modeliuoti, fizinis ląstelės dydis turi būti parinktas taip, kad atitiktų charakteringą žvaigždėdaros regiono dydį. Charakteringo žvaigždėdaros regiono definicija yra komplikauta dėl fraktalinės žvaigždėdaros prigimties (Elmegreen ir Efremov 1998). Todėl iš stebėjimų nustatomas regiono dydis priklauso nuo naudojamo žvaigždėdaros indikatoriaus amžiaus ribos. Jaunos OB spektrinės klasifikacijos žvaigždės turi esminę įtaką žvaigždėdaros regiono evoliucijai, todėl tikslinga ląstelės dydį susieti su OB žvaigždžių asociacijų charakteringu dydžiu. Kaip žvaigždėdaros indikatorių naudojant OB

asociacijas, kurios yra  $\sim 10$  mln. m. amžiaus, nustatomas charakteringas regiono dydis yra  $\sim 100$  pc (M33 galaktikoje, pvz. Ivanov 2005). Toks ląstelės dydis ir buvo panaudotas mūsų modelyje ( $d_C = 100$  pc).

Modelio integravimo laiko žingsnis ( $\Delta t_I$ ) turi būti suderintas su fiziniu ląstelės dydžiu. Šiame darbe mes darome prielaidą, jog žvaigždėdaros plitimo greitis diske yra  $v_{SF} = 10$  km/s (Feitzinger ir kt. 1981), t.y. lygus charakteringam garso greičiui tarpžvaigždinėje medžiagoje. Modelio integravimo laiko žingsnis turi būti parinktas taip, kad žvaigždėdaros banga spėtų kirsti  $d_C$  per vieną  $\Delta t_I$ , arba:

$$\Delta t_I = 10 \text{ mln. m.} \cdot \frac{d_C}{100 \text{ pc}} \cdot \left( \frac{v_{SF}}{10 \text{ km/s}} \right)^{-1}. \quad (1.1)$$

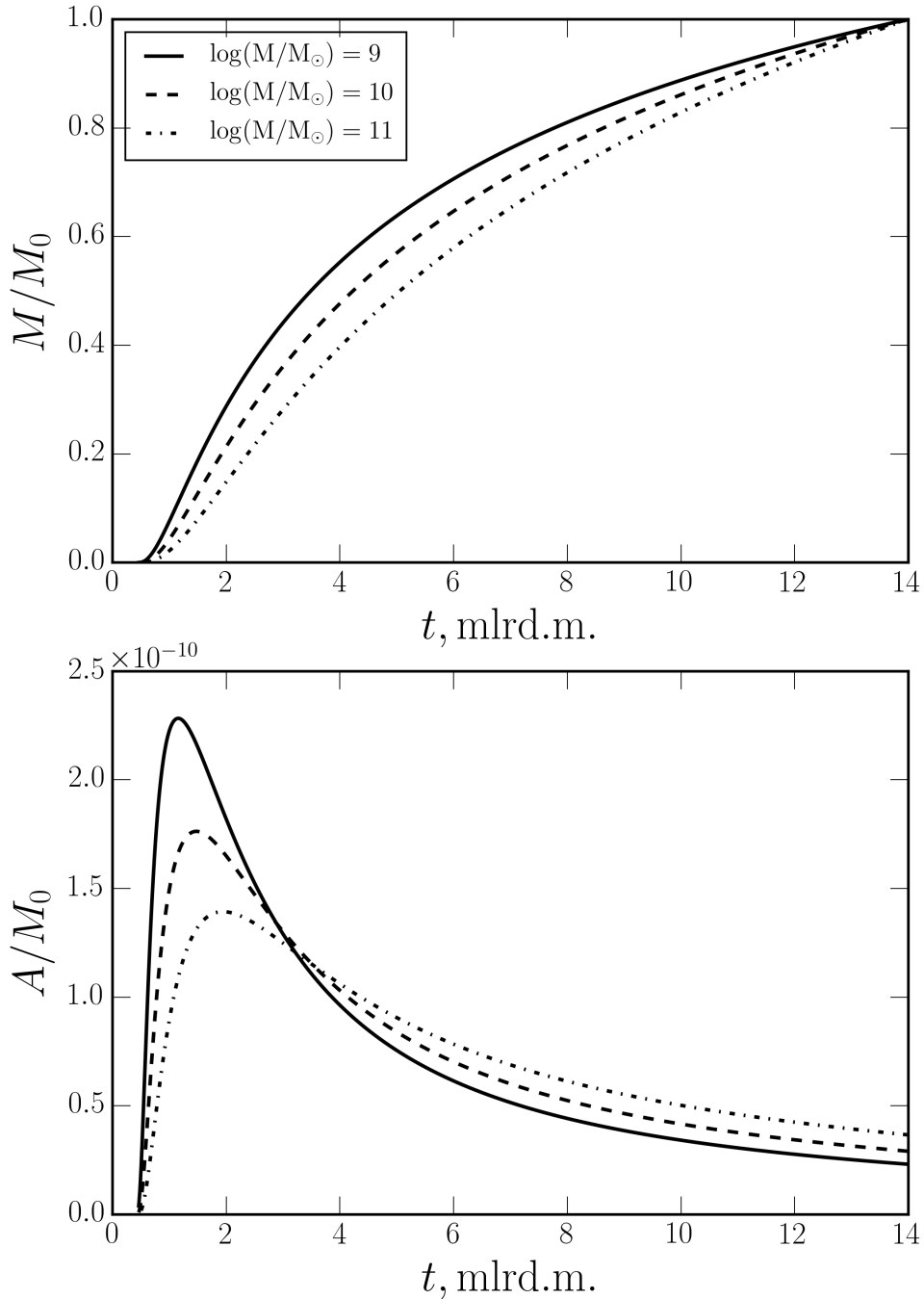
### 1.2.2 Masės akrecija

Modelyje naudojamas masės akrecijos scenarijus, paremtas tamsiosios medžiagos (TM) struktūrų modeliavimu. Nors TM halų masės akrecijos istorijos gali stipriai skirtis priklausomai nuo aplinkos tankio, tačiau vidutinę TM akrecijos spartą galima modeliuoti supaprastintais sąryšiais. Remdamiesi *Millenium* kosmologinio modeliavimo rezultatais McBride ir kt. (2009) nustatė, jog vidutinė TM akrecijos sparta priklauso tik nuo TM halo masės ir Visatos amžiaus. Fakhouri ir kt. (2010), remdamiesi *Millenium II* modeliavimo rezultatais, kurie lyginant su *Millenium* turi 125 kartus geresnę masės ir 5 kartus geresnę erdvinę skyrą, patvirtino McBride ir kt. (2009) nustatytą sąryšį mažesnėms TM halo masėms. Šiame darbe, modeliuojant galaktikos masės augimą, yra naudojamas Fakhouri ir kt. (2010) nustatytas vidutinis TM akrecijos greitis  $A_{TM}(t)$  (žr. 1.2 pav.).

Radialinis dujų akrecijos pasiskirstymas  $A_G(r, t)$  modelio diske nustatomas padarius prielaidą, jog barioninės disko masės radialinis profilis bėgant laikui auga tolygiai visame diske:

$$A_G(r, t) = \frac{B(r)}{2\pi \int_0^R B(r) r dr} \cdot A_{TM}(t) \cdot \beta. \quad (1.2)$$

kur  $B(r)$  žymi barioninės medžiagos radialinį tankio profilį diske,  $\beta$  žymi modelyje naudojamą pastovų barioninės ir TM medžiagos santykį  $\beta = \Omega_{BM}/\Omega_{TM} = 0.19$  (Planck Collaboration ir kt. 2014). Laikoma, jog akrecijos



**1.2 pav.** Dujų akrecijos scenarijus naudojamas modelyje. Tamsiosios medžiagos akrecijos sparta, kuria remiantis suskaičiuojama dujų akrecija, nustatyta pagal Fakhouri ir kt. (2010). Viršuje pavaizduotos masės augimo kreivės modeliams su skirtingomis dabartinės tamsiosios medžiagos halo masėmis. Modelių masės sunormuotos į dabartinę galaktikos masę. Laiko ašyje 0 žymi Visatos pradžią, o 14 mlrd. m. – dabartinį laiką. Apačioje pavaizduota masės akrecijos sparta sunormuota į dabartinę galaktikos masę. Matome, kad dujų akrecija į didesnės masės galaktikas vyksta santykinai didesne sparta, pradedant nuo 4 mlrd. m. po Didžiojo sprogo iki dabar. Ši tendencija atitinka hierarchinį galaktikų formavimąsi pradedant nuo mažų struktūrų iki didelių (pvz. Gawiser 2006).

dujų metalingumas nepriklauso nuo Visatos amžiaus ir lygus  $Z_A = 0.0001$ .

### 1.2.3 Žvaigždėdaros scenarijus

Žvaigždėdaros procesas diske modeliuojamas kaip diskretiškai vykstantys stochastiniai žvaigždėdaros žybsniai ląstelėse. Ląstelėse žvaigždėdara gali vykti spontaniškai (tikimybė  $P_S$ ) arba būti indukuojama (tikimybė  $P_T$ ).

Spontaninės žvaigždėdaros tikimybė apibūdina spontaniškai, be išorinės sąveikos tarp ląstelių, vykstančių žvaigždėdaros žybsnių skaičių ląstelėse. Spontaninės žvaigždėdaros žybsniai padeda palaikyti žvaigždėdaros aktyvumą diske, neleisdami visiškai išnykti aktyviems žvaigždėdaros regionams. Modelyje naudojame mažą spontaniškos žvaigždėdaros tikimybę, kuri vidutiniškai atitinka 1 spontaninį žvaigždėdaros žybsnį per  $\Delta t_I$ . Darome prielaidą, jog spontaninės žvaigždėdaros žybsniai yra labiau tikėtini ląstelėse su didesniu paviršiniu dujų tankiu  $P_S \propto \Sigma_G^2$ , kur  $\Sigma_G$  yra paviršinis dujų tankis ląstelėje.

Indukuotos žvaigždėdaros tikimybė apibūdina kompleksiškus procesus, vykstančius ląstelės tarpžvaigždinėje medžiagoje (molekuliniame debesyje) po įvykusio žvaigždėdaros žybsnio. Molekulinis debesis, kuriame vyksta žvaigždėdara, yra suardomas žvaigždėdaros grįžtamojo ryšio: jaunų žvaigždžių vėjų, besiplečiančių jonizuoto vandenilio zonų bei supernovų sprogimų. Nors šie procesai ir sustabdo žvaigždėdarą molekuliniame debesyje, kuriame jie vyksta, tačiau sąveikaudami su aplinkine tarpžvaigždine medžiaga (pvz. kaimyninėse ląstelėse) gali indukuoti tolesnę žvaigždėdarą. Šis procesas modeliuojamas kiekvienai ląstelei  $i$ , kurioje įvyko žvaigždėdaros žybsnis laiko momentu  $t_k$ , laiko momentu  $t_{k+1}$  indukuojant žvaigždėdarą kaimyninėse ląstelėse  $j$  su tikimybe  $P_{T,j}$ .

Modeliavimo pradžioje žvaigždėdara diske yra slopinama kritinio dujų tankio žvaigždėdarai parametro  $\Sigma_C$ . Jeigu dujų tankis ląstelėje yra mažesnis už kritinį, žvaigždėdaros tikimybė ląstelėje sumažinama santykiu  $\Sigma_G/\Sigma_C$ . Modeliui evoliucionuojant laike dujų tankis ląstelėse didėja, todėl žvaigždėdara pasidaro labiau tikėtina, pradedant centriniiais galaktikos disko regionais. Išoriniuose disko regionuose, kuriuose dujų tankis ilgą laiko periodą išlieka mažas lyginant jį su  $\Sigma_C$ , susiformuoja žvaigždės formuojančio disko kraštas. Modelyje naudojamas kritinis dujų tankis žvaigždėdarai  $\Sigma_C$  yra



**1.1 lentelė.** Panaudoti PEGASE-HR programinio paketo SSP parametrai.

Parametras	Parinktis	Nuoroda
Žvaigždžių spektrų biblioteka	žemos skyros	Le Borgne ir kt. (2004)
Pradinė masės funkcija	pataisyta dėl dvinarių	Kroupa (2002)
Artimų dvinarių dalis	0.05	PEGASE-HR parinktis
Masyvių žvaigždžių sprogimų modelis	B tipo	Woosley ir Weaver (1995)
Nebulinės linijos	taip	PEGASE-HR parinktis

lokalus dujų tankis ląstelėje, o ne azimutine kryptimi suvidurkintas, kaip dažniausiai gaunama iš stebėjimų.

Žvaigždėdaros žybsnio metu iš dalies dujų, esančių ląstelėje, susiformuoja žvaigždės – šis procesas charakterizuojamas žvaigždėdaros efektyvumu:

$$\text{SFE} = \epsilon \cdot \left( \frac{\Sigma_{\text{G}}}{10 M_{\odot}/\text{pc}^2} \right)^{\alpha} \quad (1.3)$$

kur  $\epsilon$  ir  $\alpha$  yra laisvi modelio parametrai. Siekiant išvengti nefizikinių SFE verčių, mažiausia ir didžiausia SFE vertės atitinkamai yra apribotos 0.05% ir 50%. Taip pat, jei susiformavusi žvaigždžių populiacija ląstelėje yra mažesnės masės nei  $100 M_{\odot}$ , tokia ląstelė neindukuoja žvaigždėdaros kaimyninėse ląstelėse, nes vidutiniškai  $100 M_{\odot}$  masės žvaigždžių populiacijoje nesusiformuoja pakankamai masyvių žvaigždžių, kurios galėtų sprogti kaip supernovos.

#### 1.2.4 Ląstelių evoliucija

Kiekvieną žvaigždžių populiaciją susiformavusią ląstelėje žvaigždėdaros žybsnio metu galima gerai aproksimuoti paprastąją žvaigždžių populiacija (*angl.* Simple Stellar Population, SSP). Modelyje kiekvienos ląstelės žvaigždėdaros istorija yra saugoma 2-D matricoje  $S$ , turinčioje amžiaus  $a$  ir metalingumo  $z$  dimensijas. Laiko dimensijos žingsnis matricoje yra lygus modelio integravimo laiko žingsniui  $\Delta t_I$ , o metalingumo žingsnis yra 0.1 – 0.3 dex. Skirtingų amžių ir metalingumų SSP evoliucija yra sekama naudojantis suskaičiuota SSP evoliucijos biblioteka. Biblioteka buvo suskaičiuota PEGASE-HR (Le Borgne ir kt. 2004) programiniu paketu. SSP parametrai nurodyti 1.1 lentelėje.

Ląstelės modelyje gali keistis žvaigždžių populiacijomis, todėl kiekvienu laiko žingsniu  $S_{a,z}$  turi būti atitinkamai atnaujinta. Apsikeitimas žvaigždžių populiacijomis tarp ląstelių modelyje realizuotas kaip žvaigždžių „dispersija“. Žvaigždžių masės evoliucija ląstelėje aprašoma lygtimi:

$$\frac{\Delta S_i}{\Delta t} = \Psi_i - D_S \cdot \sum_j \lambda_{i,j} \cdot (S_i - S_j), \quad (1.4)$$

kur  $\Psi_i$  yra naujai susiformavusi žvaigždžių populiacija,  $D_S$  yra žvaigždžių „dispersijos“ parametras,  $\lambda_{i,j}$  yra lietimosi linijos tarp ląstelės  $i$  ir  $j$  ilgis. Siekiant išvengti anizotropiškumų prie tinklelio centro  $\lambda$  yra pakoreguojama taip, kad dujų tėkmė pro visas ląstelės sienelės išliktų vienoda.

Dujų masės  $G_i$  evoliucija  $i$ -oje ląstelėje skaičiuojama atsižvelgiant į žvaigždžių populiacijų evoliuciją:

$$\frac{\Delta G_i}{\Delta t} = -\Psi_i + A_i - \sum_j F_{i,j} - m_{\text{OUT},i} + \sum_k \sum_l (S_i \circ R)_{k,l}, \quad (1.5)$$

kur  $A_i$  yra dujų akrecija,  $F_{i,j}$  atitinka dujų apsikeitimą (žr. 1.2.5 skyrių) tarp ląstelės  $i$  ir  $j$ ,  $m_{\text{OUT},i}$  – prarandamą dujų masę iš ląstelės (žr. 1.2.6 skyrių) ir  $R$  – grįžtančią dujų masės dalį, t. y. paskutinis narys<sup>1</sup> susumuoja dujų masę grįžtančią į ląstelės dujų rezervuarą iš visų žvaigždžių populiacijų esančių ląstelėje (indeksai  $k$  ir  $l$  atitinkamai žymi amžių ir metalingumą).

Metalingumo  $Z_i$  evoliucija  $i$ -oje ląstelėje aprašoma:

$$\frac{\Delta(Z_i \cdot G_i)}{\Delta t} = -\Psi_i \cdot Z_i + A_i \cdot Z_A - \sum_j F_{i,j} \cdot Z_j - m_{\text{OUT},i} \cdot Z_{\text{OUT},i} + \sum_k \sum_l (S_i \circ Z)_{k,l}, \quad (1.6)$$

kur  $Z_A$  žymi akrecijos dujų metalingumą, indeksas  $j$  žymi kaimynines ląsteles,  $Z_{\text{OUT},i}$  yra sunkiaisiais metalais praturtintų prarandamų dujų metalingumas ir  $Z$  yra matrica, aprašanti metalų masę grįžtančią į ląstelę iš visų žvaigždžių populiacijų evoliucionuojančių ląstelėje.

---

<sup>1</sup>Žinomas kaip Hadamard (arba Schur) operatorius, vienodų dimensijų matricoms,  $(B \circ C)_{k,l} = B_{k,l} \cdot C_{k,l}$

### 1.2.5 Dujų dinamika

Kadangi modeliuojamo disko ląstelės fiziniai matmenys yra santykinai maži ( $\sim 100 \times 100$  pc), dujos per vieną modelio integravimo laiko žingsnį  $\Delta t_I$  gali iškelti už ląstelės ribų. Pagrindiniai veiksniai sukeltantys dujų tūkmės galaktikos diske yra žvaigždėdaros grįžtamojo ryšio procesai – žvaigždžių vėjas, jonizuojanti spinduliuotė ir supernovų sproginiai. Remiantis analitiniais įverčiais (Castor ir kt. 1975), žvaigždėdaros žybsnis įvykęs ląstelėje su tipišku paviršiniu dujų tankiu  $20 M_\odot/\text{pc}^2$  per 10 mln. m. išskiria pakankamai energijos, kad išpūstų  $\sim 100$  pc spindulio super-burbulą. Tokiu būdu ląstelė, kurioje įvyko žvaigždėdaros žybsnis, per 10 mln. m. laiko tarpą užpildoma karštomis retomis dujomis, o didžioji dujų masės dalis išstumama į kaimynines ląsteles.

Pagrindinis super-burbulų energijos šaltinis yra supernovų sproginiai. Po  $\sim 40$  mln. m., kuomet supernovų sproginiai jau nebevyksta, grįžtančių dujų tūkmės užpildo ląstelę. Vienas pagrindinių mechanizmų, sukeliančių šį dujų judėjimą – atominio vandenilio debesų greičių dispersija. Remiantis Roy ir Kunth (1995) įvertinimu, 100 pc atstumais dėl greičių dispersijos ląstelės užpildymo dujomis charakteringasis laikas,  $\tau \simeq 50$  mln. m.

Šiame darbe mes realizavome abu dujų tūkmių tipus: dujų išstūmimą iš ląstelės energingų grįžtamojo žvaigždėdaros ryšio procesų ir lėto užpildymo dėl atominio vandenilio debesų greičių dispersijos.

- *Dujų išstūmimas* realizuotas perkeltant dujas iš ląstelės, kurioje įvyko žvaigždėdaros žybsnis, į kaimynines ląsteles. Dujos perkeltamos tik į tas ląsteles, kuriose per pastaruosius 40 mln. m. nevyko žvaigždėdara:

$$F_{i,j} \cdot \Delta t_I = \lambda_{i,j} \cdot \begin{cases} 0 & \Delta_{\text{SF},j} \leq 40 \text{ Myr} \\ G_i & \Delta_{\text{SF},j} > 40 \text{ Myr}, \end{cases} \quad (1.7)$$

kur dujų tūkmė tarp ląstelių  $F_{i,j}$  priklauso nuo lietimosi linijos ilgio,  $\lambda$ , ir dujų masės likusios ląstelėje,  $G_i$ , po žvaigždėdaros žybsnio. Dujų pertekėjimas įvyksta per vieną laiko žingsnį.

- *Ląstelės užpildymas* aprašomas darant prielaidą, kad pusiausvirasis dujų pasiskirstymas galaktikos diske atitinka dabartinį barioninės medžiagos pasiskirstymą,  $B(r)$ , o nukrypimai nuo šio pasiskirstymo ( $G(r_i)/G(r_j) \neq$

$B(r_i)/B(r_j)$ ) tarp ląstelių išsilygina per charakteringąjį laiką,  $\tau$ :

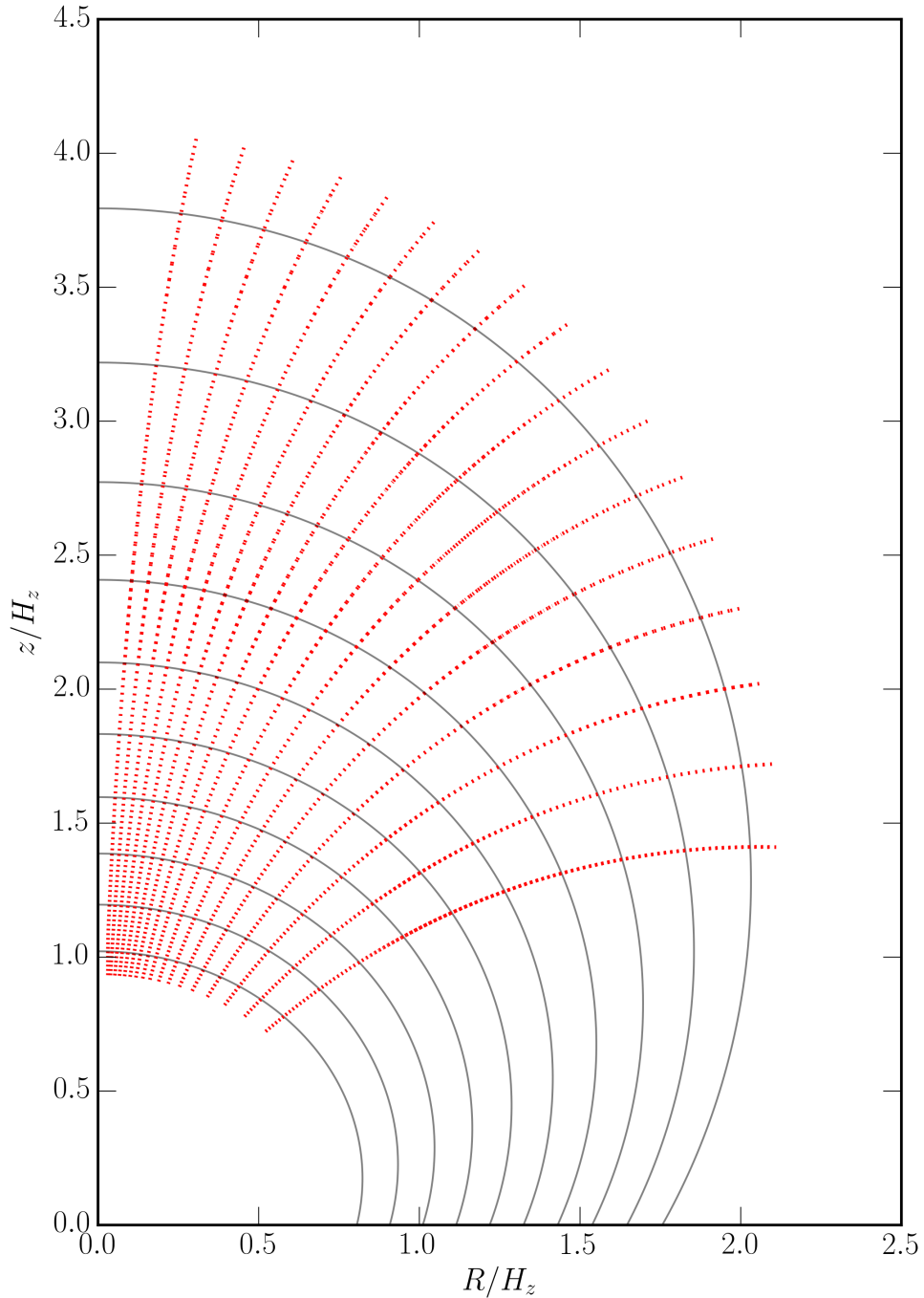
$$F_{i,j} = \lambda_{i,j} \cdot \frac{1}{\tau} \cdot \frac{G(r_j) \cdot B(r_i) - G(r_i) \cdot B(r_j)}{B(r_i) + B(r_j)}. \quad (1.8)$$

### 1.2.6 Dujų netekimas

Modelio diske dujos gali persiskirstyti tarp ląstelių dėl žvaigždėdaros grįžtamojo ryšio procesų suformuoto super-burbulo (žr. ankstesnę skyrių). Tačiau super-burbului plečiantis labai greitai, dalis dujų gali būti pagreitintos ir viršyti pabėgimo greitį iš galaktikos gravitacinio potencialo bei būti išmestos į tarpgalaktinę erdvę. Dujų išmetimo iš galaktikų diskų problema astrofizikoje yra labai aktuali dėl šio proceso svarbos galaktikų evoliucijai ir dabartinio riboto šio proceso supratimo (Bland-Hawthorn ir kt. 2007). Dujų išmetimo iš galaktikos disko problemos kompleksiskumas atsiranda dėl sudėtingo šio proceso modeliavimo bei daugiafazinės išmetamų dujų būsenos, kurias sudėtinga aptikti stebėjimais (Scannapieco ir Brüggén 2015).

Žvaigždėdaros grįžtamojo ryšio sąveika su homogeniška dujų terpe yra gerai žinoma (Castor ir kt. 1975; Weaver ir kt. 1977). Tačiau realių galaktikų diskuose pastovaus dujų tankio prielaida galioja tik trumpą laiko tarpą, kol super-burbulo spindulys pasiekia 100 pc dydį – disko dujų skalės aukštį diskinėse galaktikose. Super-burbulo evoliucija realistiškesnėje stratifikuotoje atmosferoje skaičiuojama skaitmeniniais hidrodinaminiais modeliais (Tomisaka ir Ikeuchi 1986). Tačiau galimas ir analitinis šio proceso sprendimas. Pasinaudojus Kompaneets (1960) publikuotu metodu analitiškai suskaičiuotas modelis gerai atitinka hidrodinaminių modeliavimų rezultatus (Mac Low ir McCray 1988, taip pat žr. 1.3 pav.).

2-D modelyje dujų netekimui iš galaktikos disko aprašyti mes panaudojome Baumgartner ir Breitschwerdt (2013) aprašytą metodą. Šis metodas yra paremtas analitinio super-burbulo plėtimosi stratifikuotoje atmosferoje sprendiniu. Realizuojant dujų netekimą modelyje buvo padaryta prielaida, jog po žvaigždėdaros žybsnio susiformavusi žvaigždžių populiacija energiją tarpžvaigždinėms dujoms atiduoda ląstelės centre, kuris yra disko plokštumoje. Dujų tankiui disko plokštumoje apskaičiuoti mes padarėme prielaidą, kad dujos ląstelėje yra hidrostatinėje pusiausvyroje su pastoviu išilgai disko



**1.3 pav.** Pagal Kompaneets (1960) metodą suskaičiuotas besiplečiančio super-burbulo pjūvis galaktikos diske. Pavaizduota dalis simetriško super-burbulo. Pilkos linijos žymi super-burbulo dydį bėgant laikui. Raudonos punktyrinės linijos žymi tėkmės kryptis. Matomas spartesnis super-burbulo augimas  $z$  kryptimi atsiranda dėl šia kryptimi eksponentiškai mažėjančio dujų tankio.

spindulio nekintančiu skalės aukščiu,  $H_Z = 100$  pc. Tokiame dujų netekimo modelyje super-burbulo plėtimosi greitis statmena diskui  $z$  kryptimi

priklauso tik nuo dujų tankio ląstelėje ir susiformavusios žvaigždžių populiacijos masės. Susiformavusi žvaigždžių masė yra tiesiogiai proporcinga spinduliuojamam šviesiui.

Baumgartner ir Breitschwerdt (2013) nustatė dujų netekimo sąlygas Paukščių Tako galaktikoje. Dujos prarandamos iš disko, jei super-burbulo plėtimosi greitis  $z$  kryptimi, iki plėtimosi greitėjančiai (dėl eksponentiškai mažėjančio dujų tankio) pradžios, pasiekia kritinį greitį,  $v_{z,c} = 20$  km/s. Savo modelyje mes naudojame tą patį kritinį plėtimosi greitį.

Modelyje daroma prielaida, kad žvaigždėdaros žybsniui tenkinant dujų netekimo sąlygą, dujos prarandamos negrįžtamai. Prarandamos dujos yra sudarytos iš visų žvaigždžių populiacijų, tuo metu esančių ląstelėje, gražinamų dujų praturtintų sunkiaisiais elementais per pastaruosius 10 mln. metų. Prarandamas dujų kiekis ląstelėje  $i$ ,  $m_{\text{OUT},i}$ , po žvaigždėdaros žybsnio yra:

$$m_{\text{OUT},i} = \begin{cases} 0, & n_{\text{SN}} < f(\Sigma_{\text{G},i}) \\ \eta \cdot E_i, & n_{\text{SN}} > f(\Sigma_{\text{G},i}), \end{cases} \quad (1.9)$$

kur  $n_{\text{SN}}$  žymi vidutinį supernovų skaičių susiformavusį žvaigždėdaros žybsnio metu,  $f(\Sigma_{\text{G},i})$  – Baumgartner ir Breitschwerdt (2013) dujų praradimo sąlyga,  $E_i$  – visų žvaigždžių populiacijų esančių ląstelėje gražinamos dujos,  $\eta$  – laisvasis modelio parametras nusakantis ląstelės prarandamą praturtintų dujų dalį. Jei žvaigždėdaros žybsnio metu vidutiniškai susiformuoja  $n_{\text{SN}} \leq 2$ , dujų praradimas iš ląstelės nevyksta.

### 1.2.7 Žvaigždžių populiacijų generavimas

Mūsų sukurtas galaktikos evoliucijos modelis yra pritaikytas sintetinės žvaigždžių fotometrijos katalogų generavimui. Visa modelio ląstelės  $i$  žvaigždėdaros istorija yra saugoma matricoje  $S_i$ . Kiekvienam matricos amžiaus ir metalingumo elementui ( $a$  ir  $z$ ) mes sugeneruojame žvaigždžių masių skirstinį naudodamiesi pradine masės funkcija. Pradinė masės funkcija nustato žvaigždžių skaičiaus kitimą  $\xi$  masės intervale  $dm$ ,  $\xi = dN/dm$ . Šiame darbe naudojama Kroupa (2002) pradinė masės funkcija, kuri sudaryta iš

kelių masių intervalų, aprašomų laipsnine funkcija su skirtingais rodikliais:

$$\xi(m) = \begin{cases} k_1 \cdot m^{-0.3} & 0.01 \leq m/M_\odot < 0.08 \\ k_2 \cdot m^{-1.3} & 0.08 \leq m/M_\odot < 0.5 \\ k_3 \cdot m^{-2.3} & 0.5 \leq m/M_\odot < 1 \\ k_4 \cdot m^{-2.7} & 1 \leq m/M_\odot \end{cases} \quad (1.10)$$

kur  $k_i$  yra funkcijos tolydumą užtikrinantis narys. Išsireiškus pradinę masės funkciją tikimybės tankiu  $\rho(m)$  galime užrašyti:

$$X(m) = \int_{m_0}^m \rho(m') dm' \quad (1.11)$$

kur  $m_0$  atitinka mažiausią galimą žvaigždės masę, o funkcija  $X(m) \in [0, 1]$ , invertavus, yra tinkama generuoti žvaigždžių masių skirstinį naudojantis tolydiniu atsitiktinių skaičių generatoriumi. Kiekvienam  $S_i$  elementui žvaigždės generuojamos kol tenkinama sąlyga  $\sum_j m_j \leq S_i$ .

Siekiant užtikrinti žvaigždžių populiacijų tolydumą, ypatingai jaunoms žvaigždėms, mes darome prielaidą, kad  $S_i$  elementuose amžiai yra ne diskretūs, o tolydūs, t.y. žvaigždžių sudarančių populiaciją  $k$  amžiai  $a_k$  tolydžiai pasiskirstę intervale  $\Delta t_1$ . Kiekvienai žvaigždei priskiriami šviesiai interpoliuojant tarp žvaigždžių masių izochronų banke. Kadangi metalingumai  $S_i$  matricoje yra diskretūs, mes neinterpoliuojame tarp metalingumų.

### 1.3 Modelio parametrai

Norėdami nustatyti galaktikos modelio stebimų radialinių profilių priklausomybę nuo modelio parametrų, atlikome testą. Testo metu buvo fiksuoti visi modelio parametrai, išskyrus tiriamąjį, ir jį varijuojant įvertintas profilių kitimas. Modelio parametrų kitimo įtaka buvo tiriama šiems radialiniams profilams: paviršinio dujų tankio, paviršinio šviesio  $i$  ir  $FUV$  fotometrinėse juostose bei dujų metalingumo.

Galaktikos radialinių profilių kitimas buvo nustatytas lyginant juos su standartiniu modeliu. Standartiniam modeliui parinkome tipiškos Sc-Sd galaktikos parametrus nurodytus 1.2 lentelėje. Masės pasiskirstymui galaktikoje aprašyti naudojome eksponentinį dėsnį išilgai disko spindulio, skalės ilgio parametras,  $R_S = 1.7$  kpc. Visi palyginimai atlikti 13 mlrd. m. am-

**1.2 lentelė.** Parametrų jautrio tyrimui naudotas standartinis modelis.

Parametras	Žymėjimas	Vertė
Fiksuoti parametrai		
Amžius	–	13 mlrd. m.
Disko radiusas	–	12 kpc
Ląstelės dydis	$d_C$	100 pc
SF plitimo greitis	$v_{SF}$	10 km/s
Akrecijos sparta	$A_{TM}(t)$	Fakhouri et al. (2010)
Varijuojami parametrai		
Barioninė galaktikos masė	$M_G$	$10^{10} M_\odot$
Disko sukimasis	$V_R$	Sd galaktikos sukimosi kreivė
Dujų netekimo parametras	$\eta$	0
SF kritinis dujų tankis	$\Sigma_C$	$8 M_\odot/\text{pc}^2$
Ląstelės užpildymo dujomis charakteringasis laikas	$\tau$	50 mln. m.
Žvaigždžių dispersija	$D_S$	$200 \text{ pc}^2/\text{mln.m.}$
Spontaninės SF tikimybė	$P_S$	1 SF regionas per $\Delta t_1$
Indukuotos SF tikimybė	$P_T$	0.34
SFE koeficientas	$\epsilon$	0.2 %
SFE rodiklis	$\alpha$	2

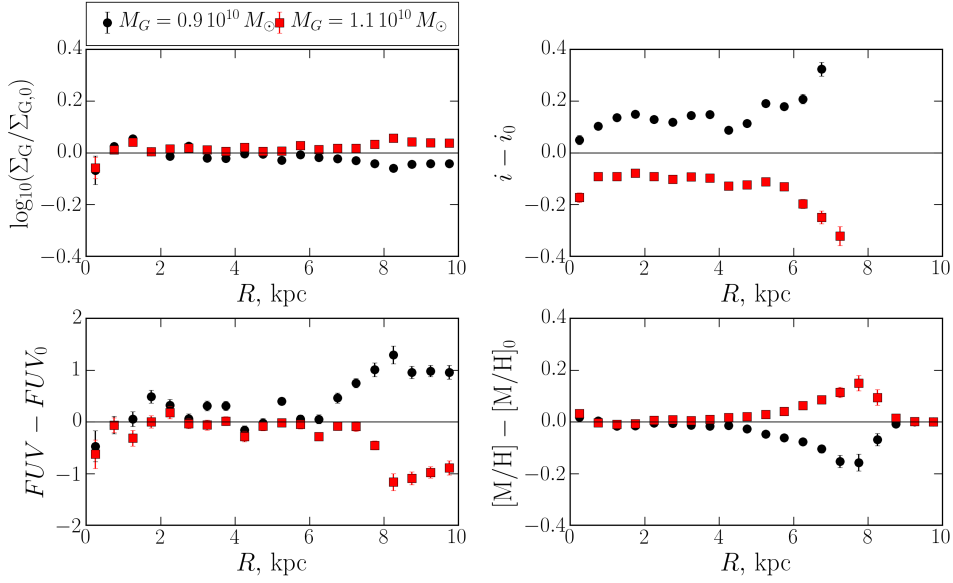
žiaus modeliams. Modelio geometrija šiame teste nebuvo keičiama. Iš viso buvo varijuojama 10 parametrų:  $P_T$ ,  $\epsilon$ ,  $\alpha$ ,  $P_S$ ,  $\Sigma_C$ ,  $D_S$ ,  $\tau$ ,  $M_G$ ,  $\eta$  ir  $V_R$ . Atlikto testo rezultatai pateikti 1.4-1.14 pav.

Radialinių profilių jautris galaktikos masės,  $M_G$ , kitimui pavaizduotas 1.4 pav. Matome, kad dujų paviršinio tankio ir paviršinio šviesio  $i$  juostoje profiliai nėra tiesiogiai proporcingi  $M_G$ . Paviršinio šviesio profilis  $i$  juostoje proporcingai didėja dėl  $M_G$  didėjimo tik vidiniame diske. Išorinėse disko dalyse sąryšis yra sudėtingesnis. Dujų paviršinis tankis, dujų metalingumo profilis bei paviršinis šviesis GALEX  $FUV$  juostoje praktiškai nėra jautrūs  $M_G$  kitimui 10 % intervale.

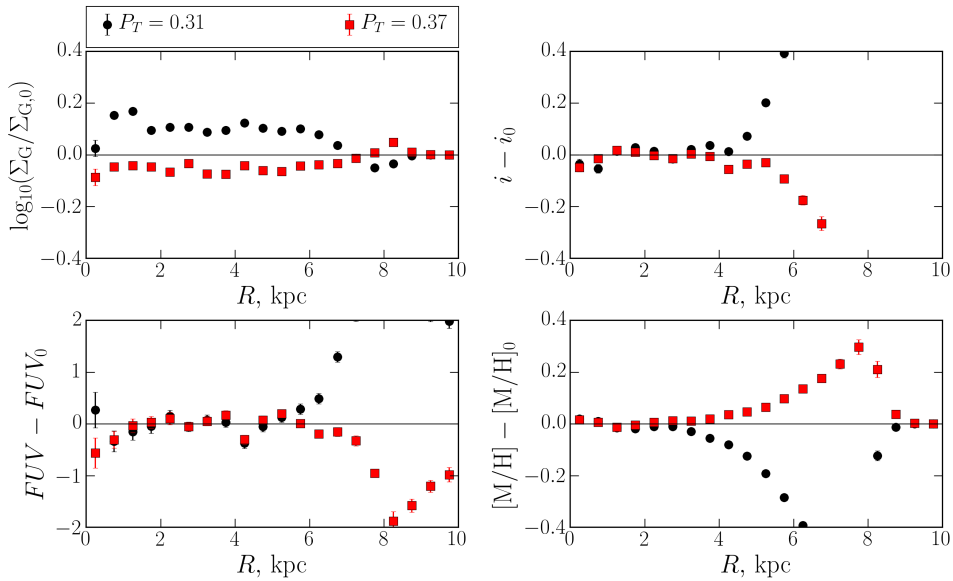
Keičiant žvaigždėdaros spartą reguliuojančių parametrų  $P_T$ ,  $\epsilon$  ir  $\alpha$  vertes (žr. atitinkamai 1.5, 1.6 ir 1.7 pav.) reikšmingai kinta dauguma profilių. Šių parametrų kitimui jautrūs: dujų paviršinio tankio ir dujų metalingumo profiliai. Paviršinio šviesio  $i$  juostoje, jautraus žvaigždžių disko masei, kitimas matomas tik išorinėse disko dalyse. Paviršinio šviesio GALEX  $FUV$  juostoje kitimas taip pat matomas tik išorinėse disko dalyse.

Sunkiaisiais elementais praturtintų dujų netekimo parametras,  $\eta$ , kontroliuoja žvaigždžių populiacijų prarandamą metalų kiekį po žvaigždėdaros





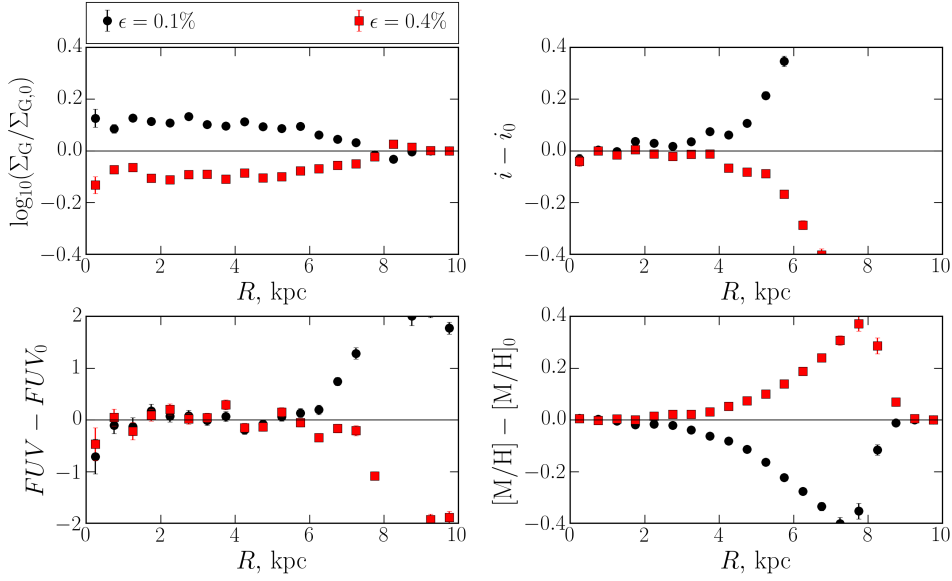
**1.4 pav.** Barioninės galaktikos masės,  $M_G$ , įtaka galaktikos modelio radialiniams profiliams: dujų paviršinio tankio,  $i$  ir GALEX  $FUV$  paviršinio šviesio bei metalingumo. Pavaizduotos skirtuminės kreivės tarp *standartinio* modelio ir modelio su skirtingomis  $M_G$  vertėmis, kai visi kiti parametrai yra fiksuoti.



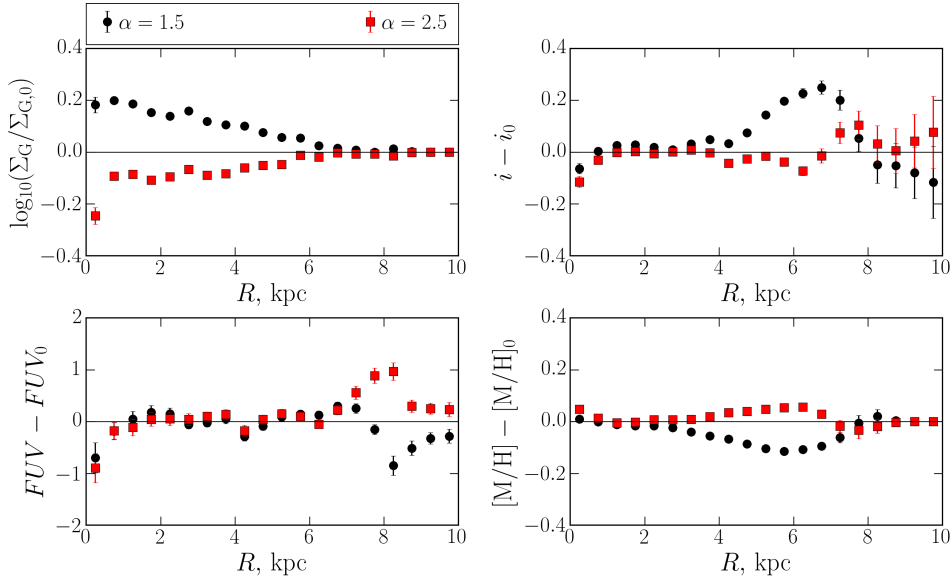
**1.5 pav.** Tas pats kaip 1.4 pav. indukuotos žvaigždėdaros tikimybės,  $P_T$ , atveju.

žybsnio. Kadangi prarastos dujos sudaro tik nedidelę ląstelės masės dalį, parametras,  $\eta$ , veikia išskirtinai tik dujų metalingumo profilį galaktikoje (1.8 pav.).

Modelyje spontaninė žvaigždėdara sudaro tik nereikšmingą dalį visos žvaigždėdaros vykstančios galaktikos diske. Radialinių profilių kitimas didinant spontaninės žvaigždėdaros dažnį pavaizduotas 1.9 pav. Šiam paramet-



1.6 pav. Tas pats kaip 1.4 pav. žvaigždėdaros efektyvumo parametro,  $\epsilon$ , atvejui.

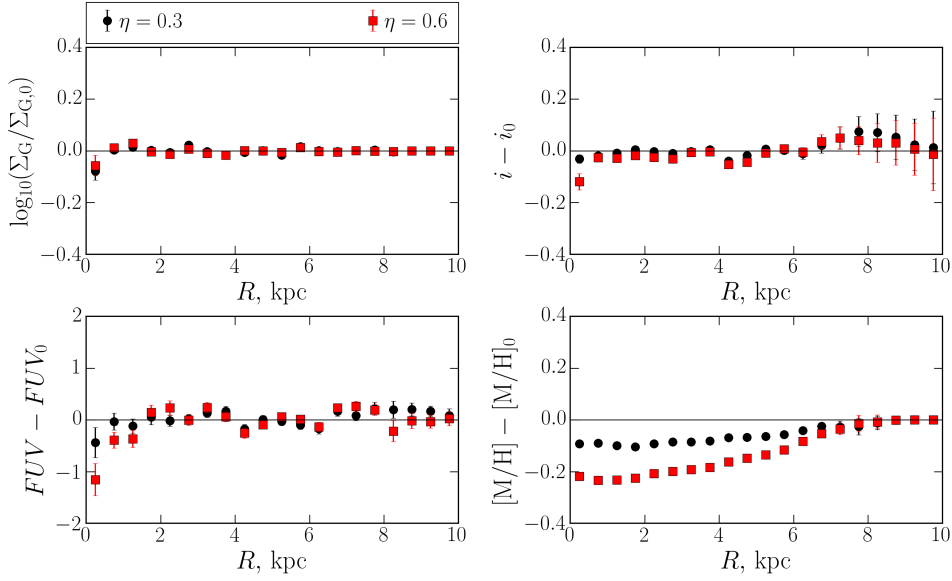


1.7 pav. Tas pats kaip 1.4 pav. žvaigždėdaros efektyvumo parametro,  $\alpha$ , atvejui.

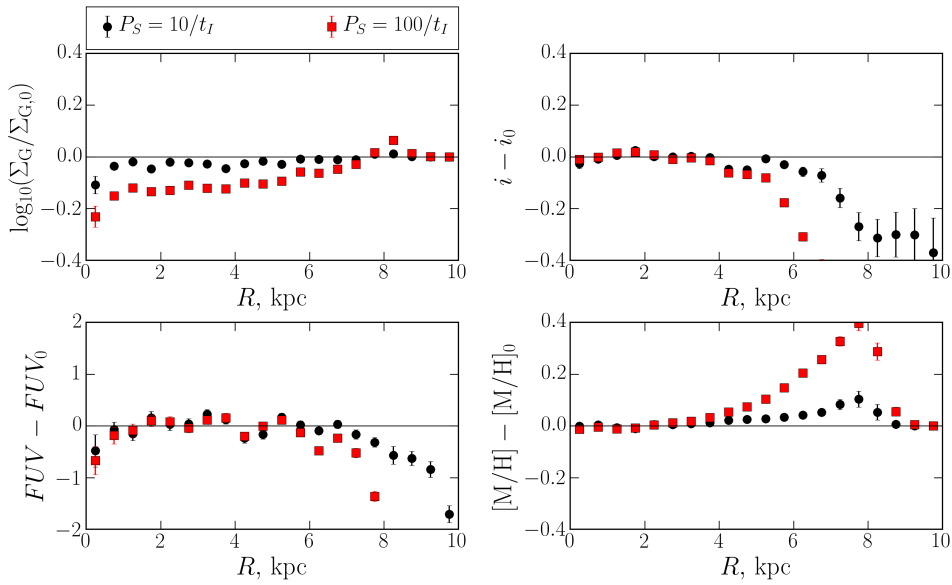
ruoi ypatingai jautrios išorinės disko sritys. Jose žvaigždėdara intensyvėja didėjant spontaninės žvaigždėdaros dažniui,  $P_S$ .

$\Sigma_C$ ,  $D_S$  ir  $\tau$  parametrų variavimo efektai pavaizduoti 1.10, 1.11 ir 1.12 pav. Matome, kad šie parametrai daro nedidelį poveikį kai kuriems profiliams.  $\Sigma_C$  veikia tik žvaigždėdaros spartą išoriniame diske.  $D_S$  keičia tik disko šviesio profilio polinkį  $i$  juostoje.  $\tau$  parametrui jautrios tik išorinės disko sritys.

Disko sukimosi kreivės poveikis galaktikos modelio profiliams pavaizduo-



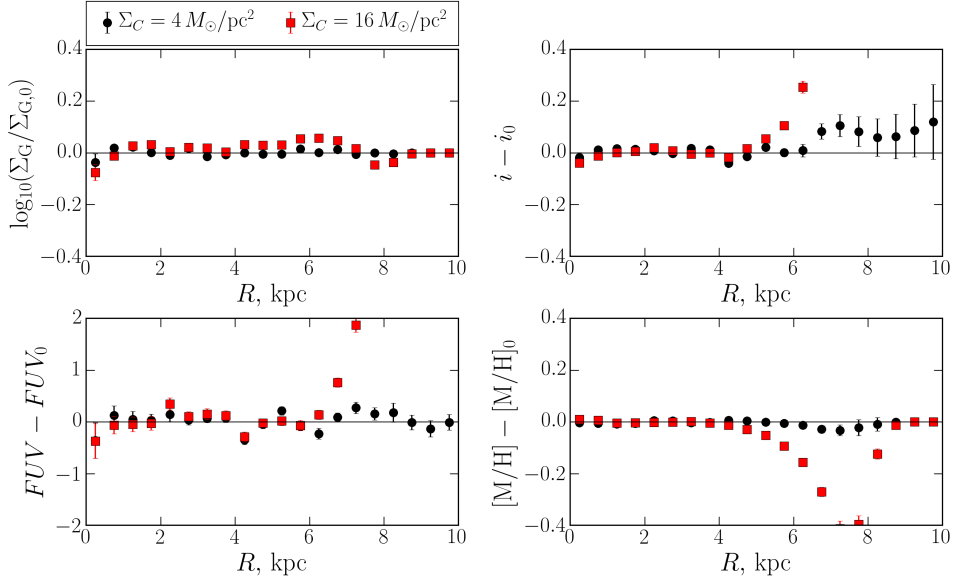
**1.8 pav.** Tas pats kaip 1.4 pav. praturtintų metalais dujų netekimo parametro,  $\eta$ , atveju.



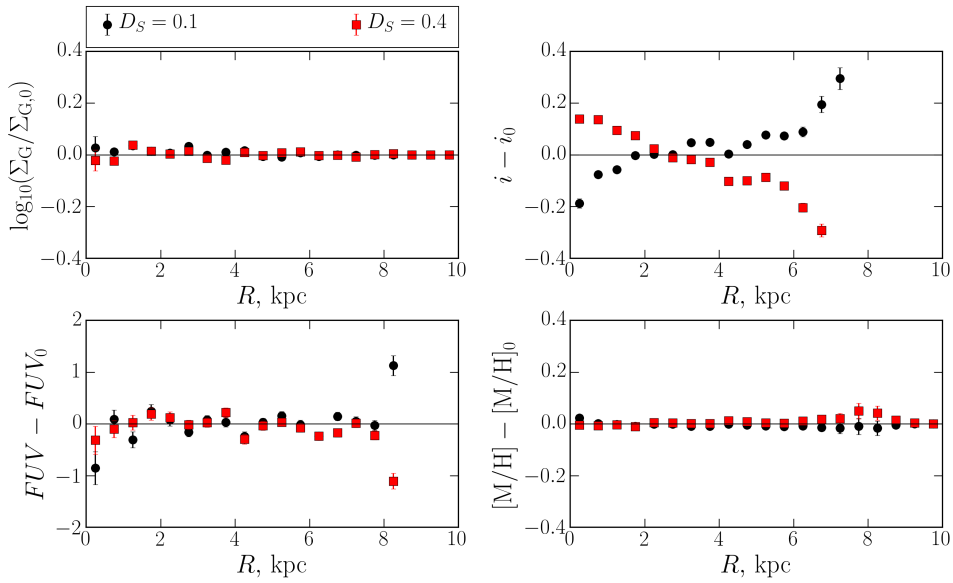
**1.9 pav.** Tas pats kaip 1.4 pav. spontaninės žvaigždėdaros tikimybės,  $P_S$ , atveju.

tas 1.13 pav. Nors nagrinėti ribiniai modeliai – kieto kūno sukimosi kreivė ( $K$ ) ir visame diske pastovaus greičio sukimosi kreivė  $V_R = 100$  km/s ( $D$ ), matome, kad sukimosi kreivė praktiškai neturi įtakos profiliams. Tačiau nors 1-D radialiniai profiliai nerodo reikšmingų skirtumų, 2-D žvaigždėdaros regionų struktūra labai priklauso nuo sukimosi kreivės formos (1.14 pav.).

Apibendrinant radialinių profilių testą galima teigti, kad labiausiai galaktikų profilius veikia žvaigždėdarą kontroliuojantys parametrai:  $P_T$ ,  $\epsilon$  ir

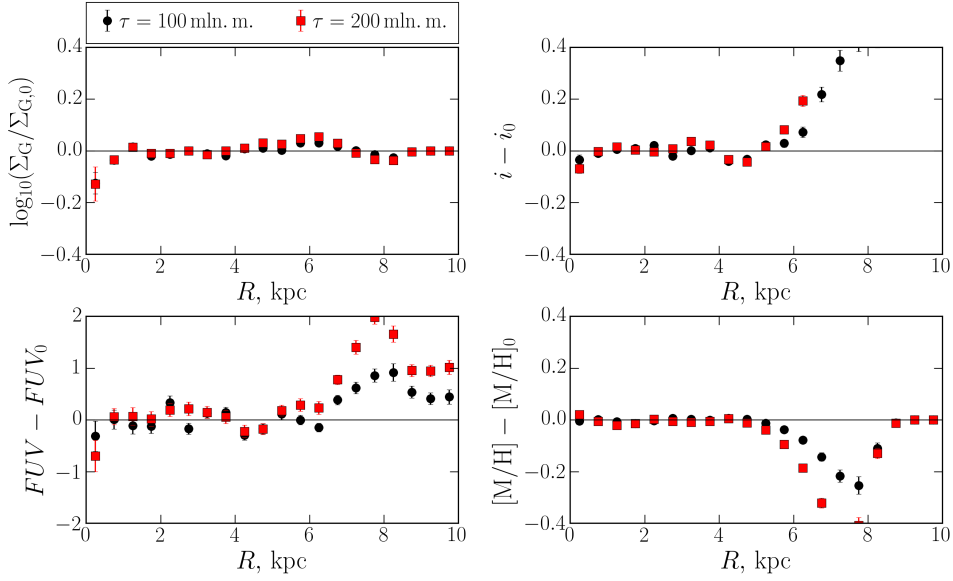


**1.10 pav.** Tas pats kaip 1.4 pav. kritinio dujų tankio žvaigždėdarai parametro,  $\Sigma_C$ , atveju.

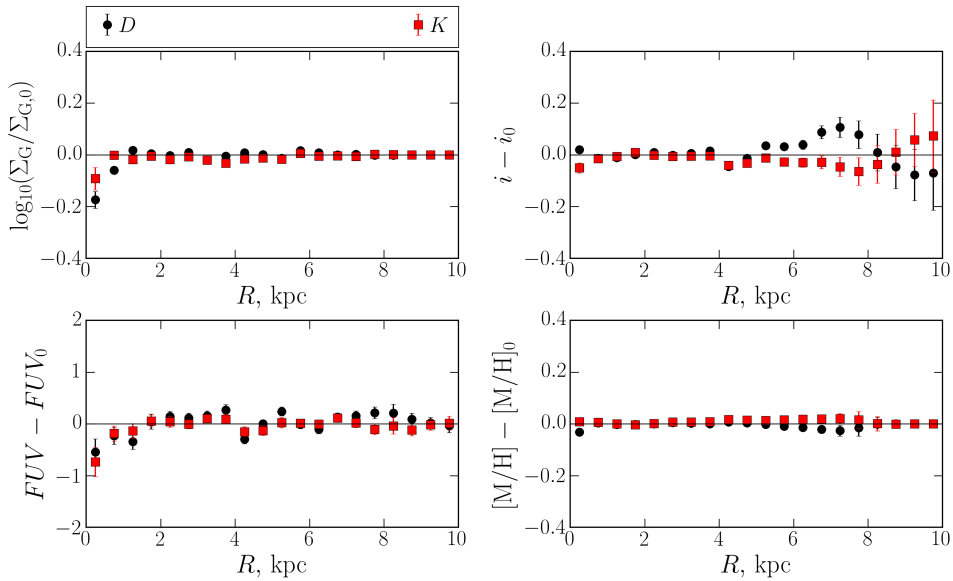


**1.11 pav.** Tas pats kaip 1.4 pav. žvaigždžių dispersijos parametro,  $D_S$ , atveju.

$\alpha$ . Taip pat svarbi yra galaktikos masė,  $M_G$ . Praturtintų sunkiaisiais elementais dujų netekimo parametras,  $\eta$ , veikia tik dujų metalingumo profilį galaktikoje, todėl jo nustatymui reikia patikimų galaktikos metalingumo matavimų. Likusių parametų įtaka 1-D profiliams nėra reikšminga, tačiau kai kurie parametrai, neturėdami poveikio radialiniams profiliams, reikšmingai veikia 2-D žvaigždėdaros struktūrų morfologiją.



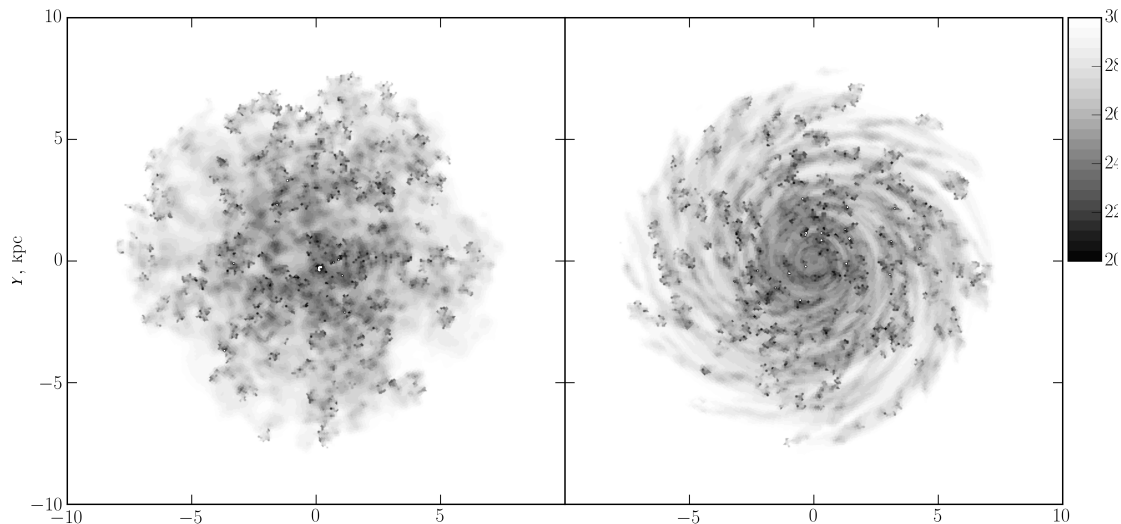
**1.12 pav.** Tas pats kaip 1.4 pav. laštelių užpildymo dujomis charakteringojo laiko,  $\tau$ , atveju.



**1.13 pav.** Tas pats kaip 1.4 pav. disko sukimosi kreivės kitimo atveju.  $D$  modelis atitinka pastovaus greičio sukimosi kreivę visame diske,  $V_R = 100$  km/s,  $K$  modelis – kietojo kūno sukimosi kreivę,  $V(R) \propto R$ .

## 1.4 Modelio parametrų nustatymas

Ankstesniame 1.3 poskyryje buvo pademonstruota, kad penki modelio parametrai gali reikšmingai keisti stebimus galaktikų radialinius profilius. Siekiami supaprastinti šio testo rezultatus, mes fiksavome galaktikos masę,  $M_G$ , ir sunkiaisiais elementais praturtintų dujų netekimo parametru,  $\eta$ . Likę



**1.14 pav.** Galaktikų modelių su skirtingomis sukimosi kreivėmis vaizdai GALEX  $FUV$  juostoje. Parodyti modeliai: kairėje su kieto kūno,  $V(R) \propto R$ , ir dešinėje su pastovaus linijinio greičio,  $V_R = 100$  km/s, sukimosi kreivėmis.

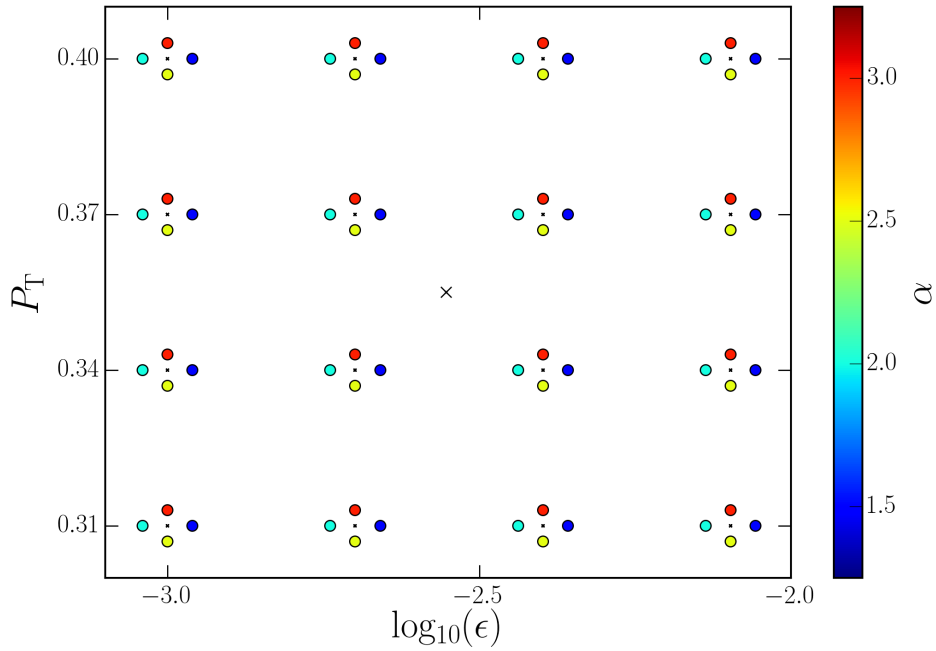
**1.3 lentelė.** Modelių tinklo parametrai.

Parametras	Žymėjimas	Vertė
Indukuotos SF tikimybė	$P_T$	0.31, 0.34, 0.37, 0.40
SFE koeficientas	$\epsilon$	0.1, 0.2, 0.4, 0.8 %
SFE rodiklis	$\alpha$	1.5, 2.0, 2.5, 3.0

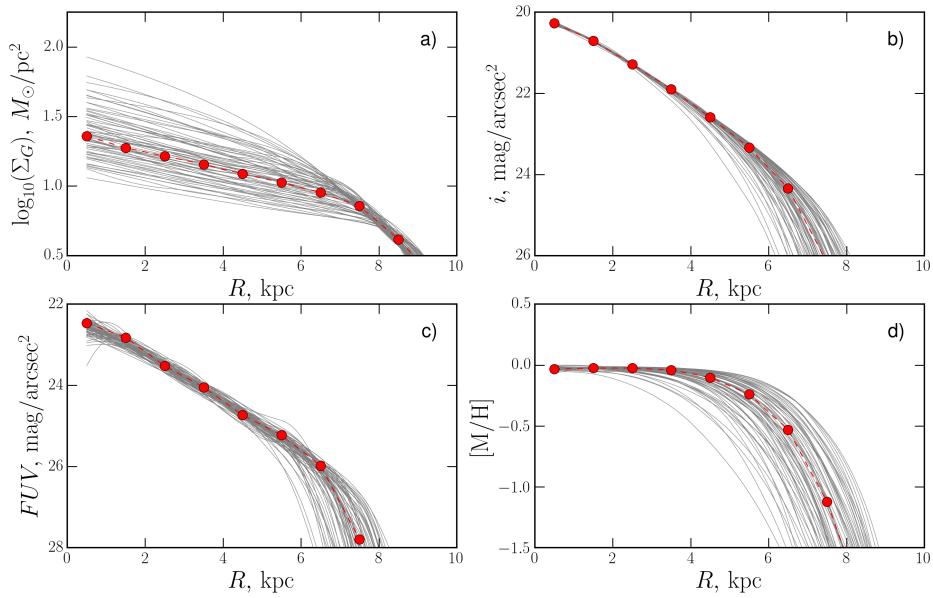
trys žvaigždėdaros procesą reguliuojantys parametrai (žr. 1.3 lentelę) buvo varijuojami ir suskaičiuotas modelių tinklas, sudarytas iš keturių tiesiškai kintančių  $P_T$  ir  $\alpha$  bei 4 geometrine progresija kintančių  $\epsilon$  verčių (1.15 pav.). Atskirus tinklo modelius palyginome su tinklo vidurio modeliu (TVM), kurio parametrai:  $P_T = 0.355$ ,  $\epsilon = 0.28$  % ir  $\alpha = 2.25$ .

Modelių parametrai buvo nustatomi naudojant keturis anksčiau nagrinėtus radialinius profilius: dujų paviršinio tankio, paviršinio šviesio GALEX  $FUV$  ir  $i$  fotometrines juostose bei dujų metalingumo. Visi modelio parametrų tinklo profiliai kartu su TVM pavaizduoti 1.16 pav.

Modelių sutapimui su TVM nustatyti, naudojome radialinių profilių santykio vidutinį kvadratinį nuokrypį (r.m.s.) išreikštą procentais. Šis nuokrypis buvo suskaičiuotas profilius suvidurkinus 1 kpc pločio žieduose. Siekiant sumažinti modelių stochastiškumo efektus, profilių, sugeneruotų galaktikos evoliucijos nuo 12 iki 13 mlrd. m. laikotarpiu, vidurkinimas buvo atliekamas kas 200 mln. m. Siekdami modelių duomenis priartinti prie realių stebėjimų, tarėme, kad dėl stebėjimų paklaidų profiliai, kurių r.m.s. skiriasi mažiau



**1.15 pav.** Modelių tinklas, naudotas parametų nustatymo teste. Tinklo vidurio modelis pavaizduotas kryželiu.



**1.16 pav.** Modelių tinklo radialiniai profiliai naudoti parametų nustatymo teste. Pilkos linijos žymi modelių tinklo modelius, raudoni skrituliukai – tinklo vidurio modelį. Parodyti: (a) dujų paviršinio tankio, (b)  $i$  paviršinio šviesio, (c) GALEX  $FUV$  paviršinio šviesio ir (d) dujų metalingumo profiliai.

nei: 10 % dujų paviršinio tankio; 10 % paviršinio šviesio  $i$  juostoje; 15 % paviršinio šviesio  $FUV$  juostoje; ir 25 % metalingumo yra praktiškai neišskiriami. Kadangi išorinėse galaktikos disko srityse, dėl mažo signalo ir triukšmo santykio, netikslumai gali būti daug didesni, modelius lyginome tik 0-7 kpc spinduliu nuo galaktikos centro.

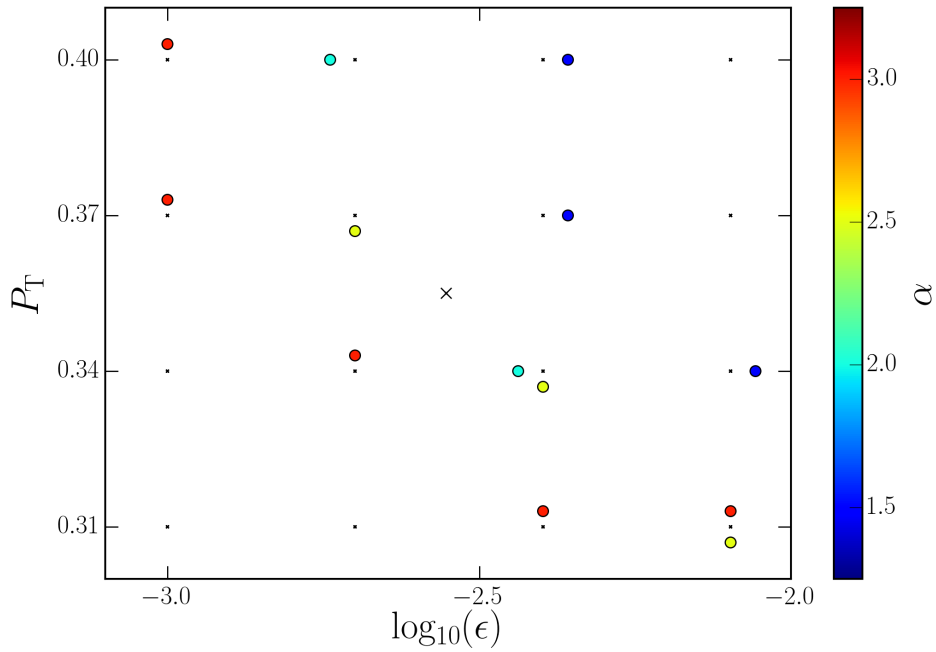
Dujų paviršinio tankio radialinio profilio atrenkama modelių tinklo dalis pavaizduota 1.17 pav. Dėl didelio jautrio žvaigždėdaros spartą kontroliuojantiems parametrams (žr. 1.3 skyrių), šis profilis yra vienas svarbiausių norint nustatyti galaktikos disko parametrus. Jis visiškai eliminuoja modelius tinklo viršutiniame dešiniajame ir apatiniame kairiajame kampe. Dujų paviršinio tankio profilis didžiausią jautrumą modelių parametrms turi centrinėse disko dalyse (1.16 pav.). Kadangi centrinėse vėlyvų tipų diskinių galaktikų srityse dažnai dominuoja molekulinės dujos, svarbu patikimai išmatuoti jų paviršinį tankį.

Paviršinio šviesio  $i$  juostoje radialinio profilio atrenkama modelių tinklo dalis pavaizduota 1.18 pav. Kaip matome 1.16 pav., šviesis  $i$  juostoje, kuris yra jautrus žvaigždžių disko tankiui, centrinėse disko srityse kinta nežymiai. Tai daugiausiai lemia fiksuota galaktikos barioninė masė. Didžiausio profilio kitimai matomi išorinėse disko srityse, todėl paviršinio šviesio profilį naudinga turėti patikimai išmatuotą kiek įmanoma toliau nuo galaktikos centro. Tačiau net ir 0–7 kpc intervale  $i$  profilis eliminuoja nemažai modelių.

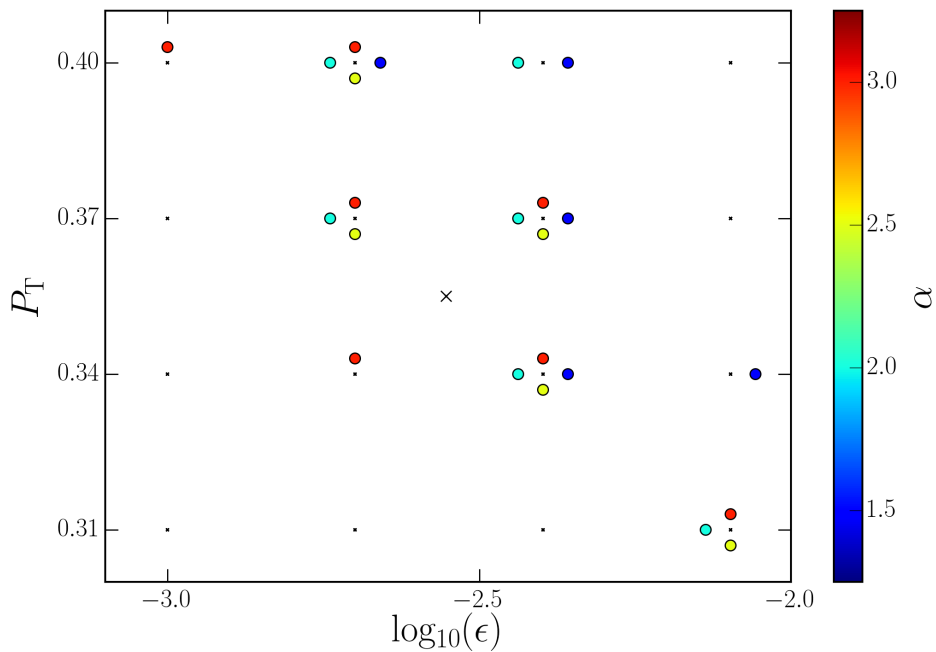
Paviršinio šviesio GALEX  $FUV$  juostoje radialinio profilio atrenkama modelių tinklo dalis pavaizduota 1.19 pav. Šis profilis yra proporcingas žvaigždėdaros spartai galaktikos diske per pastaruosius  $\sim 100$  mln. m. ir dažnai naudojamas kaip vienas pagrindinių galaktikų evoliucijos modelių generuojamų parametrų. Tačiau paviršinis šviesis UV spektro srityje yra stipriai veikiamas dulkių, todėl jį naudojant būtinos didelės ekstinkcijos pataisos. Kaip matome iš 1.19 pav., šis profilis eliminuoja modelius tik nedidelėje modelių tinklo srityje. Vienas iš veiksnių tai nulemiančių – visuose modeliuose vienoda sparta vykstanti dujų akrecija. Lėta dujų akrecija tiesiogiai reguliuoja žvaigždėdaros spartą dėl netiesinio žvaigždėdaros efektyvumo parametro,  $\alpha$ , (Elmegreen 2015).

Dujų metalingumo profilio atrenkama modelių tinklo dalis pavaizduota



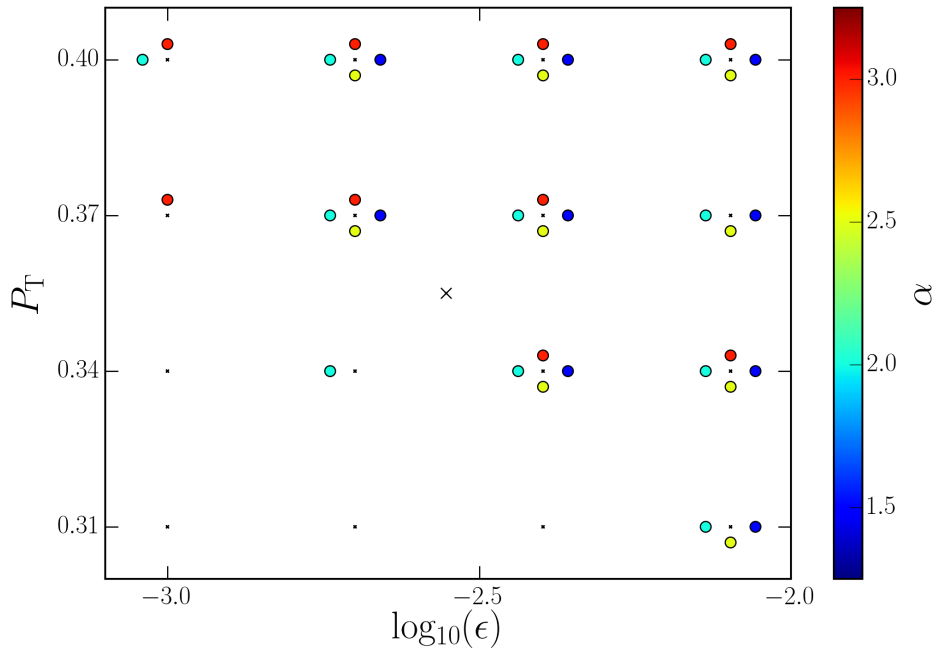


**1.17 pav.** Modeliai, kurių dujų paviršinio tankio profilio santykinis vidutinis kvadratinis nuokrypis nuo TVM modelio yra mažesnis nei 10 %.

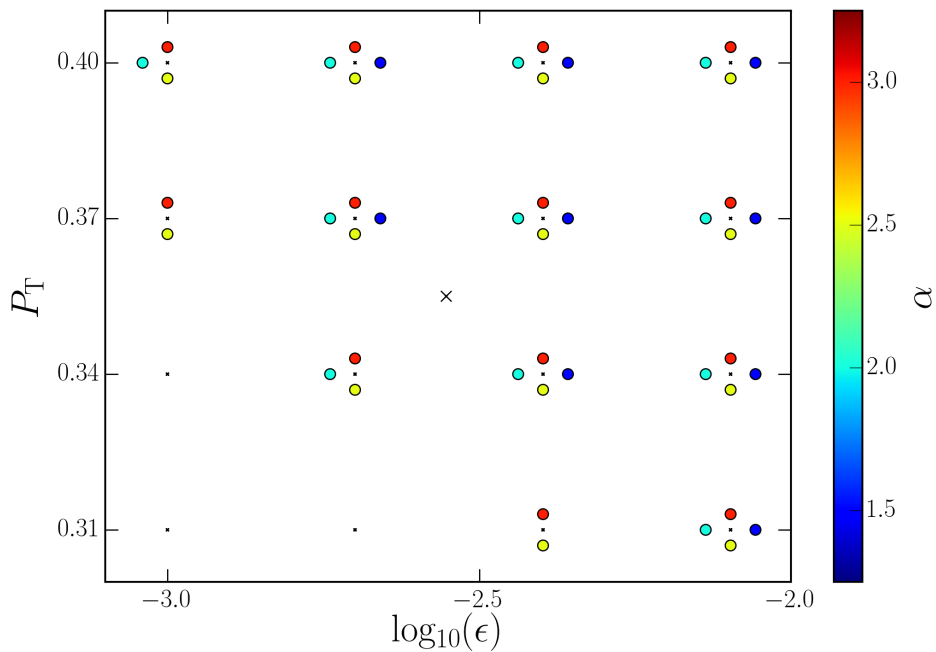


**1.18 pav.** Modeliai, kurių  $i$  paviršinio šviesio profilio santykinis vidutinis kvadratinis nuokrypis nuo TVM modelio yra mažesnis nei 10 %.

1.20 pav. Šis profilis atspindi per visą galaktikos evoliucijos laikotarpį vykusių dujų praturtinimo sunkiaisiais elementais būseną. Pagal mūsų taikytą



**1.19 pav.** Modeliai, kurių GALEX *FUV* paviršinio šviesio profilio santykinis vidutinis kvadratinis nuokrypis nuo TVM modelio yra mažesnis nei 15 %.



**1.20 pav.** Modeliai, kurių dujų metalingumo profilio santykinis vidutinis kvadratinis nuokrypis nuo TVM modelio yra mažesnis nei 25 %.

modelių palyginimo procedūrą, šis profilis eliminuoja tik nedidelę modelių tinklo dalį. Tačiau turint tiksliau išmatuotą dujų metalingumo profilį,

jį galima būtų efektyviai naudoti galaktikos disko parametrų nustatymui. Reikia pažymėti, jog šiame teste praturtintų dujų netekimo parametras,  $\eta$ , buvo fiksuotas, o tai gali reikšmingai paveikti dujų metalingumo profilius.

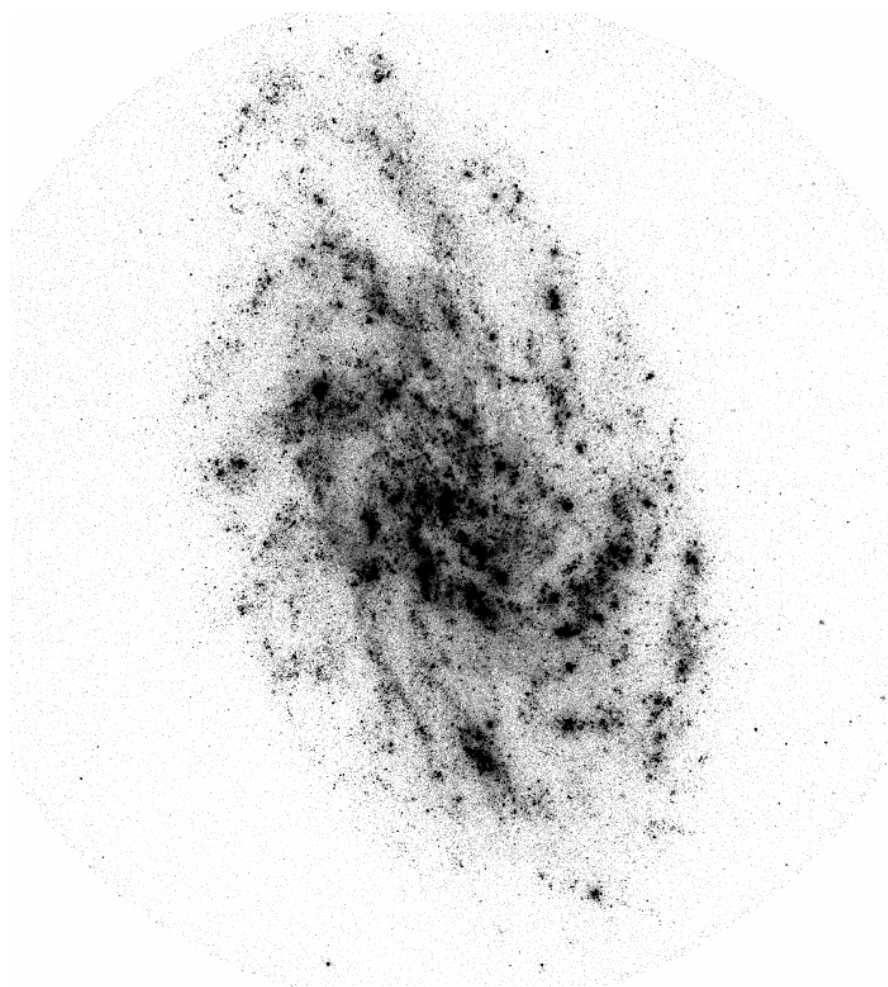
Apibendrinant testo rezultatus, galima teigti, kad galaktikų diskų parametrams nustatyti reikalingas kiek galima platesnis spektras stebėjimo duomenų, iš kurių svarbiausieji: dujų paviršinio tankio ir disko masei jautraus paviršinio šviesio (pvz.,  $i$  juostos) radialiniai profiliai.



## Skyrius 2

# Modelio taikymas M33 galaktikos tyrimui

### 2.1 M33 galaktika



**2.1 pav.** M33 galaktika matoma GALEX *FUV* juostoje. Šiame negatyviniame vaizde tamsesni dariniai atitinka intensyviau spinduliuojančias sritis. Matome kelias spiralines vijas sudarytas iš žvaigždėdaros sričių.

M33 arba kitaip dar vadinama Trikampio galaktika yra viena artimiausių (840 kpc, Gieren ir kt. 2013) diskinių galaktikų, ji yra trečioji pagal šviesį ( $M_V = -18.9$ ) Vietinės galaktikų grupės narė, vėlyvo morfologinio

tipo (Sc–Sd, de Vaucouleurs ir kt. 1991) galaktika su praktiškai nepastebimu baldžu (McLean ir Liu 1996). Ferguson ir kt. (2007) nustatė, kad M33 disko paviršinio šviesio profilis neturi substruktūrų, charakteringų galaktikoms išgyvenusioms eilę susiliejamų. M33 eksponentinis diskas tęsiasi 4.5 skalės ilgius ( $\sim 8$  kpc), toliau profilis tampa gerokai statesnis. Substruktūrų nebuvimas paviršinio šviesio profilyje leidžia manyti, kad M33 evoliucionavo santykinai izoliuotoje aplinkoje. M33 disko posvyris  $54^\circ$  (Makarov ir kt. 2014) ir padėtis toli nuo Galaktikos disko plokštumos ( $b = -31^\circ$ ) sudaro palankias sąlygas žvaigždėdaros procesų diske stebėjimams.

## 2.2 Stebėjimų duomenys

Aptarsime M33 galaktikos stebėjimų duomenis, panaudotus tiriant jos evoliuciją.

### 2.2.1 Dujų paviršinis tankis

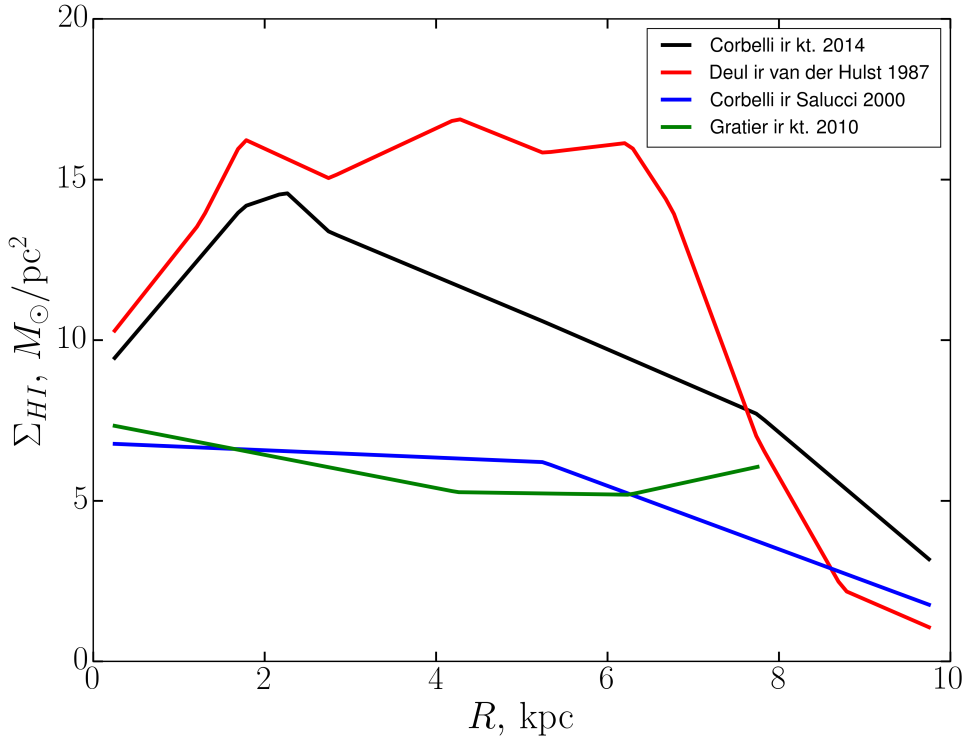
M33 galaktika buvo net kelių atominio vandenilio (HI) apžvalgų objektu: Arecibo, Very Large Array, Green Bank Telescope ir Westerbork Synthesis Array (žr. 2.1 lentelę). Nepaisant to, nėra aiškumo dėl galaktikos HI dujų paviršinio tankio profilio (žr. 2.2 pav.). Vienas iš galimų paaiškinimų dideliame neatitikime tarp stebėjimų – apžvalgoms naudoti skirtingo tipo teleskopai. Interferometriniai radijo teleskopai yra didelės erdvinės skyros, tačiau jie nefiksuoja dalies difuzinės HI spinduliuotės srauto. Tuo tarpu vienos antenos teleskopai yra gerokai mažesnės skyros, tačiau registruoja visą HI spinduliuotės srautą. Kadangi galaktikos evoliucijos modeliavimui svarbiausias parametras – patikimas radialinis viso HI paviršinio tankio profilis, naudojome vienos antenos tipo Arecibo teleskopu atliktų stebėjimų rezultatus Corbelli ir Salucci (2000).

**2.1 lentelė.** Atominio vandenilio apžvalgos M33 galaktikoje.

Teleskopas	Skyra arcmin	Jautris mJy/beam	Nuoroda
WSA+Effelsberg	$12 \times 24$	2.8	Deul ir van der Hulst (1987)
Arecibo	3.9	5.5 K/Jy	Corbelli ir Salucci (2000)
VLA BCD	$5 \times 25$	1.1-2.8	Gratier ir kt. (2010)
VLA+GBT	9.1	7.2	Corbelli ir kt. (2014)

**2.2 lentelė.** Molekulinio vandenilio apžvalgos M33 galaktikoje.

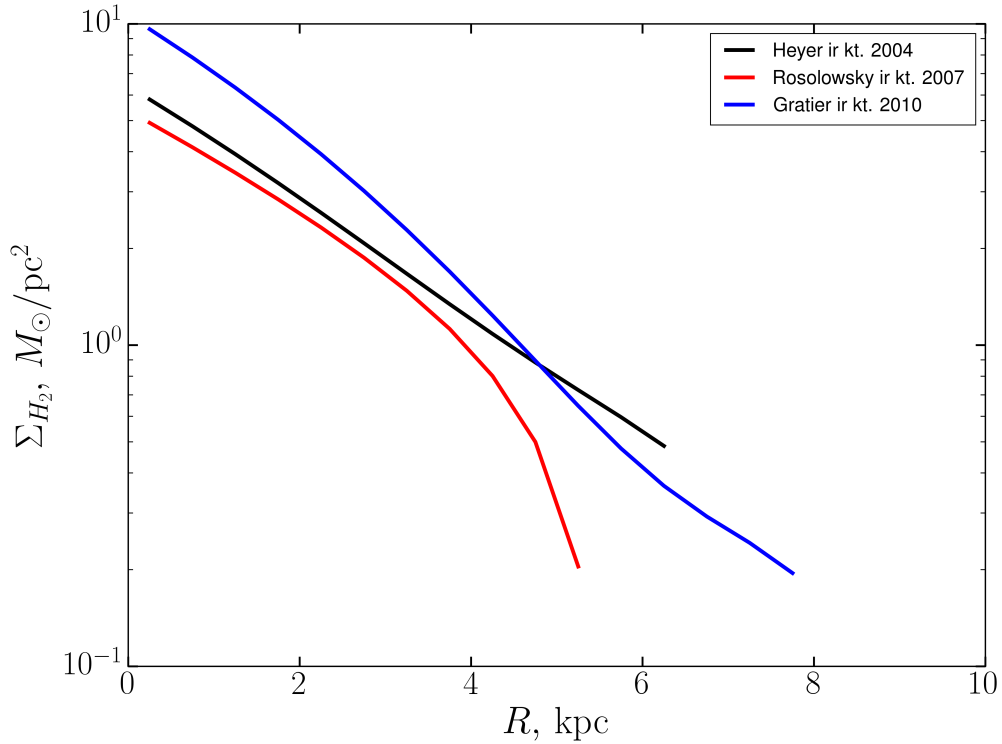
Teleskopas	Skyra arcsec	Jautris mJy/beam	Nuoroda
FCRAO	45	53	Heyer ir kt. (2004)
BIMA+FCRAO	20	60	Rosolowsky ir kt. (2007)
IRAM	12	15-30	Gratier ir kt. (2010)



**2.2 pav.** Atominio vandenilio apžvalgų M33 galaktikoje radialiniai HI paviršinio tankio profiliai. Skirtingos spalvos linijomis atvaizduoti apžvalgų rezultatai (apžvalgų parametrai pateikiami 2.1 lentelėje).

M33 galaktikos molekulinio vandenilio ( $H_2$ ) apžvalgų, atliktų FCRAO, IRAM ir BIMA teleskopais, parametrai pateikti 2.2 lentelėje. Molekulinio vandenilio paviršinio tankio profiliai pavaizduoti 2.3 pav. Skirtumai tarp šių profilių nedideli, išskyrus Gratier ir kt. (2010) matavimus, kuriuose buvo panaudotas neįprastai didelis CO konversijos į  $H_2$  faktorius. Siekiant išvengti molekulinio vandenilio srauto dalies praradimo, bendro dujų tankio M33 galaktikoje nustatymui naudosisime vienos antenos tipo teleskopu FCRAO atliktų stebėjimų rezultatus Heyer ir kt. (2004).

Heyer ir kt. (2004) ir Corbelli ir Salucci (2000) stebėjimai buvo panaudoti paviršinio dujų tankio profiliui galaktikoje nustatyti. Vandenilio dujų



**2.3 pav.** Molekulinio vandenilio apžvalgų M33 galaktikoje radialiniai paviršinio  $H_2$  tankio profiliai. Skirtingos spalvos linijomis atvaizduoti apžvalgų rezultatai (apžvalgų parametrai pateikiami 2.2 lentelėje).

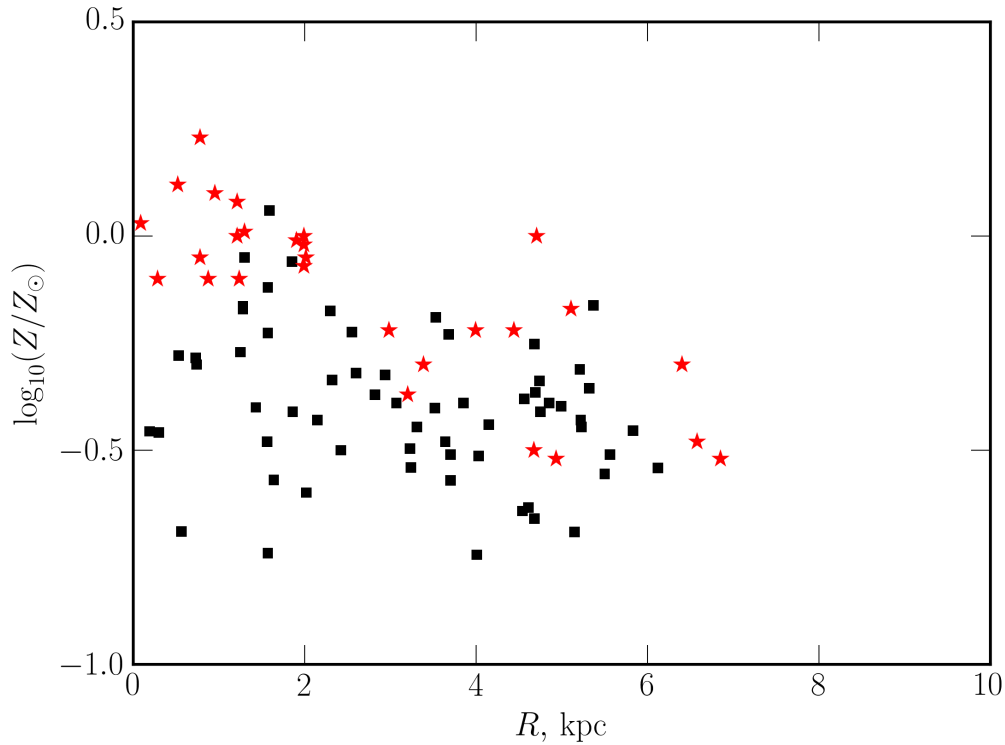
profilis buvo pakoreguotas dėl helio buvimo – įskaičiuota helio masės dalis lygi 0.25.

### 2.2.2 Metalingumas

Nepaisant kelis dešimtmečius besitęsiančių M33 disko metalingumo tyrimų, tai vis dar yra diskusijų objektas. Pirmieji jonizuoto vandenilio (HII) zonų metalingumo tyrimai (Smith 1975; Kwitter ir Aller 1981; Vilchez ir kt. 1988) rodė aiškų metalingumo gradientą, siekiantį  $\sim 0.1$  dex/kpc. Tačiau šie tyrimai rėmėsi mažomis HII zonų imtimis, o centrinėje M33 disko dalyje buvo nustatyti statistiškai nepatikimai.

Rosolowsky ir Simon (2008) pateikė 61 HII zonos metalingumą remdamiesi temperatūra nustatyta pagal OIII (436.3 nm) emisijos liniją. Jie gavo gerokai plokštesnį metalingumo gradientą (0.027 dex/kpc) ir atkreipė dėmesį į reikšmingą metalingumų sklaidą (0.11 dex), kuri nepaaiškinama matavimų netikslumais. Tokia sklaida paaiškintų visus istorinius didelio metalingumo gradiento rezultatus, gautus naudojantis mažomis HII zonų



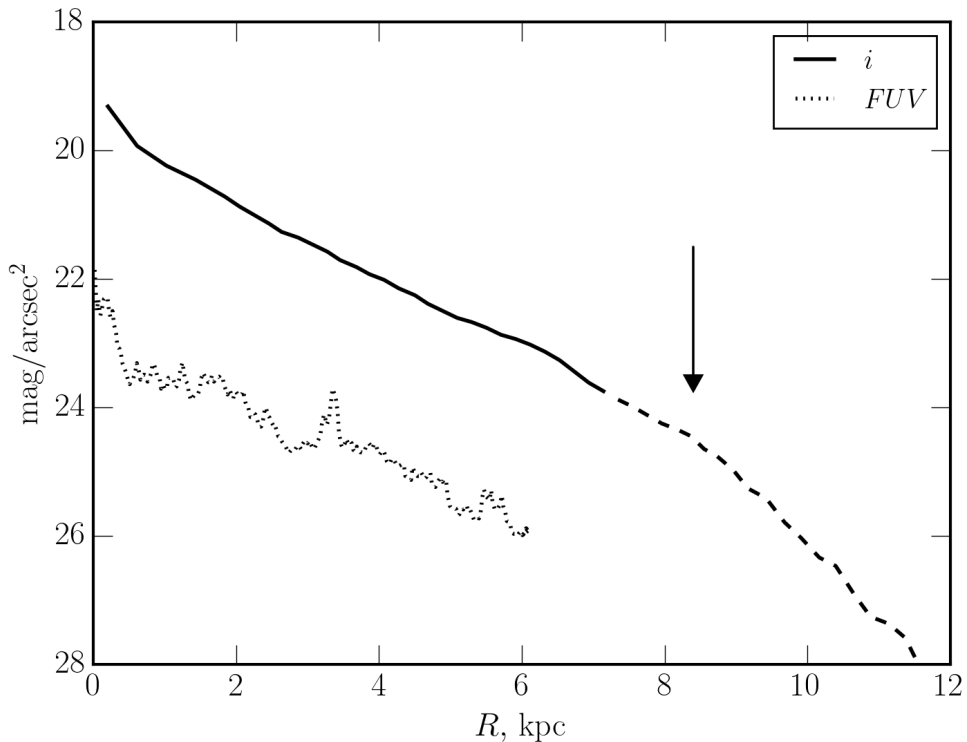


**2.4 pav.** Dujų ir žvaigždžių metalingumas M33 galaktikoje. Raudonos žvaigždutės atitinka B ir A spektrinių klasių supermilžines (Urbaneja ir kt. 2005; U ir kt. 2009), juodi kvadratai – jonizuoto vandenilio (HII) sritis (Rosolowsky ir Simon 2008). Konvertuojant HII zonų deguonies gausas į metalingumo skalę, panaudota deguonies gausa Saulėje:  $12 + \log_{10}(\text{O}_{\odot}) = 8.67$  (Asplund ir kt. 2009) ir prielaida, kad elementų gausų santykiai yra sauliniai.

intimis. Tačiau Bresolin (2011) atkreipė dėmesį, kad ši sklaida gali kilti ir dėl matavimų, o ne realaus dujų metalingumo nehomogeniškumo.

Remiantis B ir A spektrinių klasių supermilžinių atmosferų metalingumo matavimais (Urbaneja ir kt. 2005; U ir kt. 2009), buvo nustatytas  $\sim 0.07$  dex/kpc gradientas (U ir kt. 2009) – daug statesnis nei Rosolowsky ir Simon (2008). Pažymėtina, kad nustatytas supermilžinių metalingumas yra sistemingai didesnis nei HII zonų.

Nesant aiškaus konsensuso tarp HII zonų ir žvaigždžių atmosferų metalingumo bei pagal juos nustatyto metalingumo gradiento M33 galaktikoje (žr. 2.4 pav.), sudėtinga efektyviai panaudoti metalingumą kitiems galaktikos evoliucijos parametrų nustatyti.



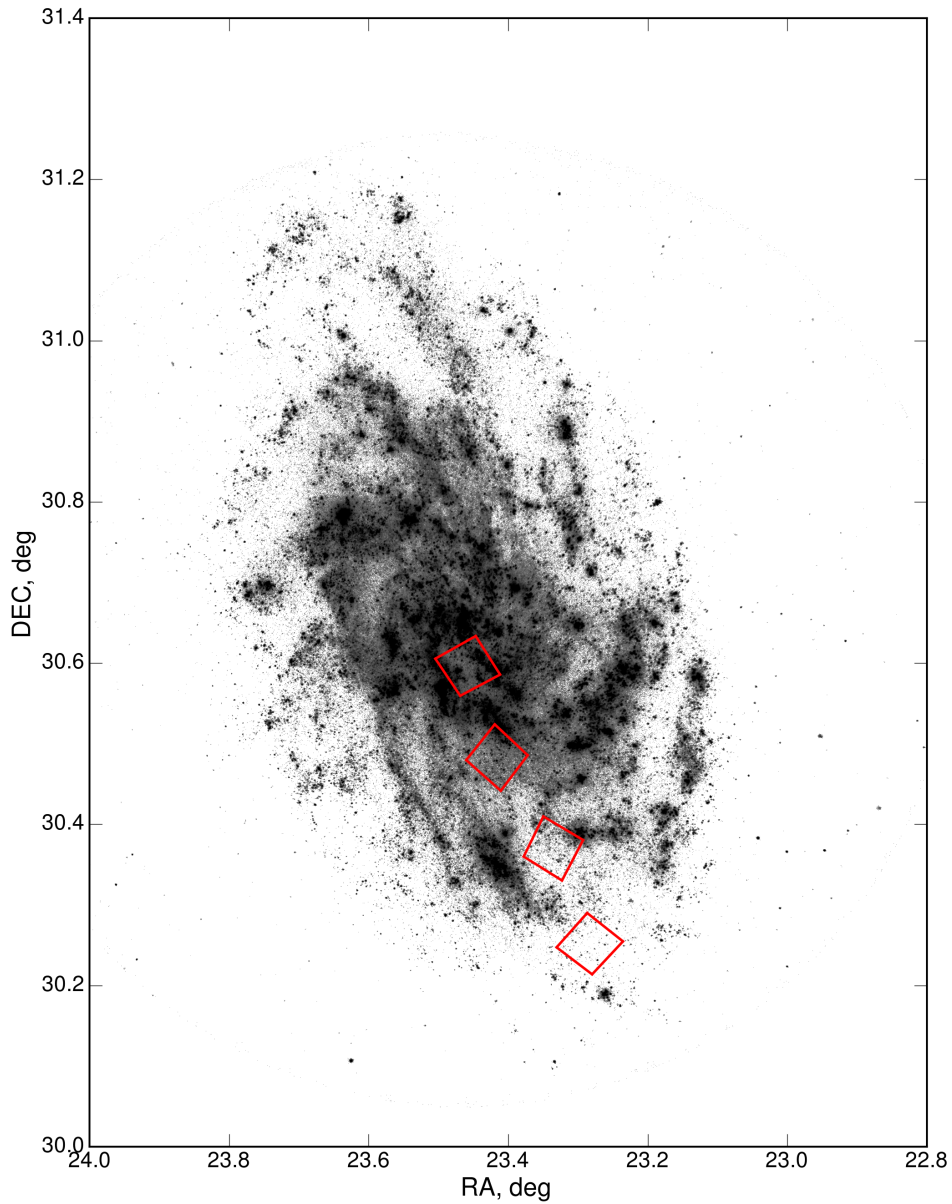
**2.5 pav.** Radialiniai M33 galaktikos paviršinio šviesio profiliai: taškinė linija žymi GALEX stebėjimus  $FUV$  juostoje (Muñoz-Mateos ir kt. 2007), ištinė ir brūkšninė linija – stebėjimus  $i$  juostoje (Ferguson ir kt. 2007). Rodykle pažymėtas disko eksponentinio šviesio profilio lūžio taškas ( $\sim 8$  kpc). Paviršinio šviesio profilis  $FUV$  juostoje dėl stochastiško masyvių žvaigždžių pasiskirstymo diske atrodo netolygus.

### 2.2.3 Paviršinės fotometrijos profiliai

M33 galaktikos paviršinio šviesio profiliai  $i$  (Ferguson ir kt. 2007) ir GALEX  $FUV$  (Muñoz-Mateos ir kt. 2007) juostose pavaizduoti 2.5 pav.

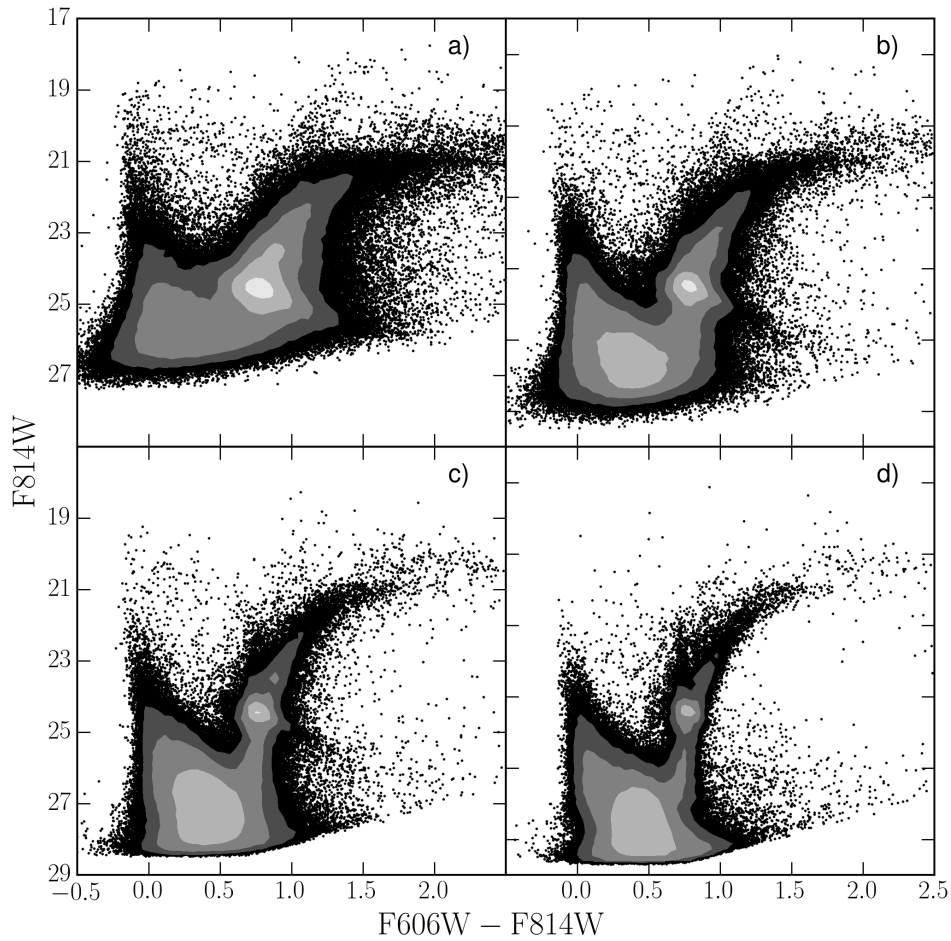
Profilis  $i$  juostoje iki matomos disko ribos buvo nustatytas standartiniu paviršinio šviesio matavimo metodu. Nuo šios ribos profilis buvo pratęstas naudojant raudonųjų milžinių sekos žvaigždžių fotometrijos duomenis. Toks gilus profilis įrodė, kad M33 eksponentinis žvaigždžių diskas tęsiasi iki  $\sim 8$  kpc ( $\sim 4.5$  skalės ilgių), o toliau gradientas yra didesnis. Paviršinio šviesio UV profilis buvo nustatytas naudojant GALEX stebėjimus  $FUV$  juostoje. UV spektro srityje spinduliuojančios masyvios jaunos žvaigždės yra labai geras žvaigždėdaros, vykstančios galaktikoje pastaruosius 100 mln. m., indikatorius. Muñoz-Mateos ir kt. (2007) pateikė ir vidinės M33 disko ekstinkcijos įverčius.

## 2.2.4 Žvaigždžių fotometrijos duomenys



**2.6 pav.** Raudonai pažymėti HST/ACS stebėti laukeliai (Williams ir kt. 2009) pavaizduoti ant M33 galaktikos nuotraukos GALEX *FUV* juostoje.

Gilią M33 galaktikos disko žvaigždžių fotometriją Hubble kosminiu teleskopu atliko Williams ir kt. (2009). Keturi ACS kamera stebėti laukeliai yra išsidėstę išilgai galaktikos didžiosios ašies: 0.9, 2.4, 4.1 ir 5.8 kpc atstumu nuo centro (žr. 2.6 pav.). Šie stebėjimai siekia seniausių galaktikos žvaigždžių pagrindinės sekos posūkio tašką dviejuose išoriniuose laukeliuose ir tankaus lauko sąlygojamą fotometrijos ribą dviejuose vidiniuose lauke-



**2.7 pav.** HST/ACS M33 galaktikos disko žvaigždžių stebėjimai (Williams ir kt. 2009). Languose pavaizduotos spalvos-ryškio diagramos ties skirtingais atstumais nuo galaktikos centro: a) 0.9 kpc, b) 2.4 kpc, c) 4.1 kpc, d) 5.8 kpc. Kontūrai rodo žvaigždžių tankį logaritminiu žingsniu.

liuose (žr. 2.7 pav.). Žvaigždžių matavimai ties pagrindinės sekos posūkio tašku įgalina nustatyti galaktikos žvaigždėdaros istoriją, todėl HST/ACS stebėjimai yra labai svarbūs mūsų tyrimui siekiant ištirti M33 galaktikos disko evoliuciją.

### 2.3 M33 disko masės nustatymas

Akrecija į galaktiką modeliuojama kaip diską dujomis pildantis procesas, dėl kurio barioninės medžiagos masė auga tolygiai ir proporcingai ties įvairiais radialiniais atstumais. Norint palyginti modelius su stebėjimų duomenimis,

akrecija į diską per visą evoliucijos laiką turi sukurti šiuo metu stebimą disko masės pasiskirstymą.

Šių dienų masės pasiskirstymą galaktikoje nustatėme dekodavdami M33 galaktikos sukimosi kreivę. Modeliavome keturis masės komponentus: žvaigždžių diską, taškinį centrinį branduolį, dujų diską ir tamsiosios medžiagos sferoidą, kurie ir sąlygoja sukimosi kreivę. Suminė galaktikos sukimosi kreivė yra skirtingų komponentų sukiamų sukimosi greičių kvadratų suma:

$$V_O^2(R) = V_S^2(R) + V_D^2(R) + V_{TM}^2(R) + V_C^2(R) \quad (2.1)$$

kur  $V_O$  yra stebimas galaktikos sukimosi greitis ties tam tikru radialiniu atstumu,  $R$ , o  $V_S$ ,  $V_D$ ,  $V_{TM}$  ir  $V_C$  atitinkamai yra žvaigždžių ir dujų diskų, tamsiosios medžiagos sferoido ir branduolio sąlygojamos sukimosi kreivės.

Lygties 2.1 sprendimą supaprastinome skaičiuodami dujų disko sukimosi kreivę laikydami, kad dujų disko tankis vertikalia kryptimi aprašomas eksponentine funkcija su pastoviu skalės aukščio parametru lygiu 100 pc. Corbelli (2003) modeliavimo rezultatai rodo, kad centrinio žvaigždžių branduolio masė yra  $(0.3 - 8) \cdot 10^8 M_\odot$  intervale, todėl šiame darbe laikysime, jog centrinis branduolys yra taškinis masės šaltinis,  $10^8 M_\odot$ .

Modeliuodami žvaigždžių diską jį aprašėme eksponentine tankio priklausomybe nuo radiuso ir aukščio virš disko plokštumos:

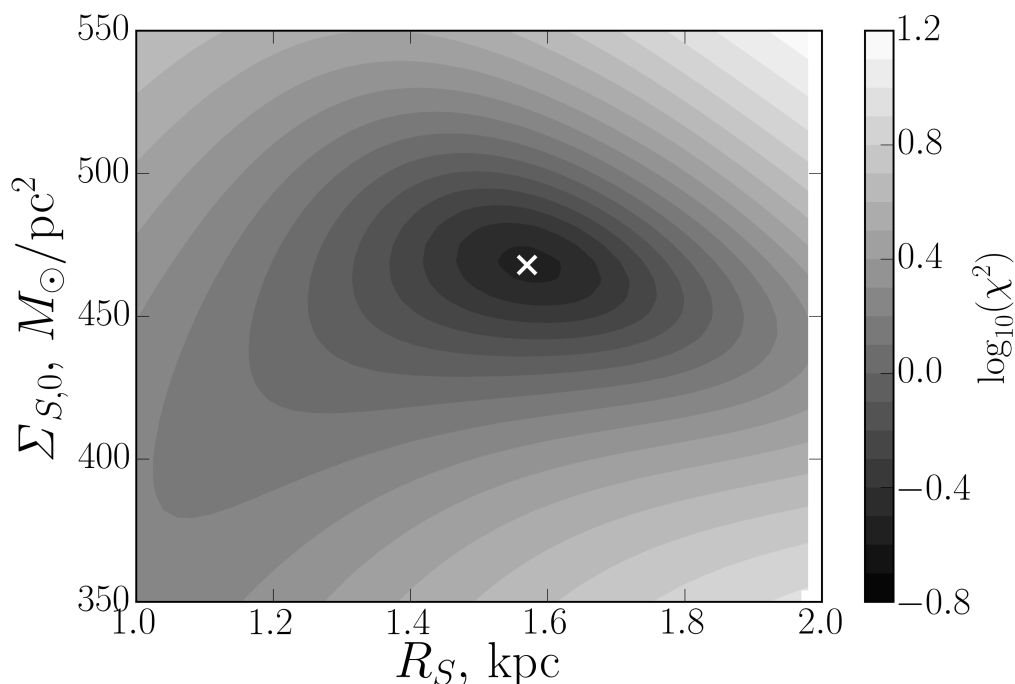
$$\rho_S(R, Z) = \rho_{S,0} \cdot \exp(R/R_S) \cdot \exp(Z/Z_S), \quad (2.2)$$

kur  $\rho_{S,0}$  žymi žvaigždžių centrinį tankį disko plokštumoje, o  $R_S$  ir  $Z_S$  yra atitinkamai disko skalės ilgis ir aukštis. Šiame darbe laikome, kad žvaigždžių disko skalės aukštis radialia kryptimi yra pastovus,  $Z_S = 100$  pc.

Modeliuodami tamsiosios medžiagos sferoidą jį aprašėme pseudoizoterminiu masės pasiskirstymu:

$$\rho_{TM}(R) = \rho_{TM,0} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{R}{R_C} \right)^2 \right]^{-1} \quad (2.3)$$

kur  $\rho_{TM,0}$  žymi tamsiosios medžiagos centrinį tankį,  $R_C$  – pseudoizoterminio pasiskirstymo šerdies radiusą.



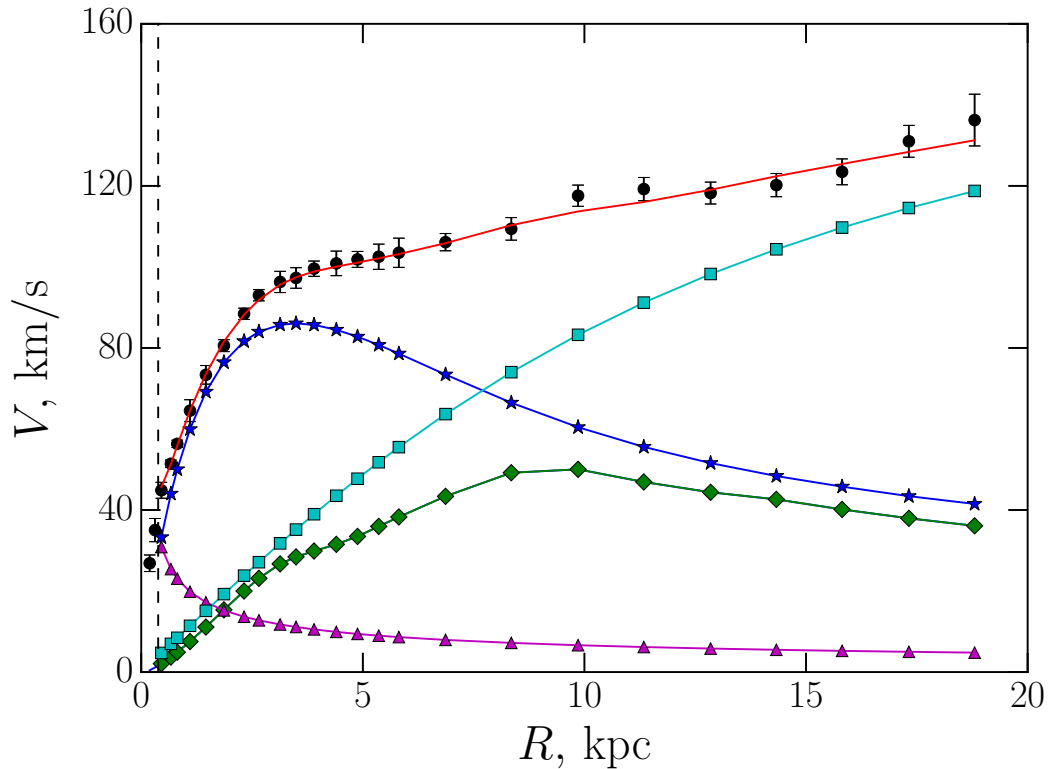
**2.8 pav.** M33 galaktikos sukimosi kreivės modeliavimo rezultatai:  $\chi^2$  skirstinys nuo  $R_S$  ir  $\Sigma_{S,0}$  (paviršinis masės tankis galaktikos centre). Kiekvienai parametru  $R_S$  ir  $\Sigma_{S,0}$  porai buvo minimizuojama  $\chi^2$  vertė fitinant tamsiosios medžiagos sferoidą,  $R_C$  ir  $\rho_{TM,0}$ . Baltas kryželis žymi geriausią sprendinį toliau naudojamą M33 galaktikos barioninės medžiagos tankio profilio nustatymui.

Modeliuodami atskirų masės komponentų sukimosi kreives naudojome programinį paketą GIPSY (van der Hulst ir kt. 1992), kuriame sukimosi kreivė integruojama pagal Casertano (1983). Skaičiuodami disko masės modelį kiekvienai žvaigždžių diską apibūdinančiai parametru porai,  $\rho_{S,0}$  ir  $R_S$ , ieškojome  $\chi^2$  minimizuojančio tamsiosios medžiagos sferoido:

$$\chi^2 = \frac{1}{N-1} \sum_i^N \frac{(V_M(R_i) - V_{O,i})^2}{\sigma_i^2}, \quad (2.4)$$

kur  $V_M$  žymi modelio numatomą sukimosi greitį ties radialiniu atstumu  $R_i$ ,  $V_{O,i}$  – iš stebėjimų žinomą sukimosi greitį, o  $\sigma_i$  – stebėjimų paklaidas.

Sukimosi kreivės modeliavimo rezultatai pateikti 2.8 pav., kur pavaizduota  $\chi^2$  priklausomybė nuo žvaigždžių diską apibūdinančių parametru:  $R_S$  ir paviršinio masės tankio galaktikos centre,  $\Sigma_{S,0}$ . Aiškiai matomas globalus minimumas. Labai mažos  $\chi^2$  vertės minimume rodo, kad pateikiamos stebėjimų paklaidos gali būti per didelės. Geriausiai stebimą M33



**2.9 pav.** M33 galaktikos sukimosi kreivės dekompozicija. Juodi taškai su pažymėtomis paklaidomis žymi iš stebėjimų nustatytą sukimosi kreivę (Corbelli ir Salucci 2007). Raudona linija – geriausiai stebėjimus atitinkančio galaktikos masės modelio numatoma sukimosi kreivė. Atskirų komponentų sąlygotos sukimosi kreivės: pseudo-izoterminio tamsiosios medžiagos halo (žydri kvadratai), eksponentinio žvaigždžių disko (mėlynos žvaigždės), dujų disko (žali rombais) ir taškinio branduolio (violetiniai trikampiai). Vertikali punktyrinė linija žymi radialinį atstumą, nuo kurio stebėjimo duomenys buvo naudojami masės modeliui nustatyti.

sukimosi kreivę (2.9 pav.) atkuria M33 masės modelis, kurio parametrai:  $\Sigma_{S,0} = 470 M_{\odot}/\text{pc}^2$ ,  $R_S = 1.57 \text{ kpc}$ ,  $R_C = 10.2 \text{ kpc}$  ir  $V_{TM}(\infty) = 184 \text{ km/s}$  ( $V_{TM}(\infty)$  yra proporcingas  $\rho_{TM,0}$ ). Nustatytas žvaigždžių disko skalės ilgis gerai atitinka iš paviršinės žvaigždžių fotometrijos gaunamus įverčius: 1.4 kpc, matuojant  $K$  juostoje iki 4 kpc atstumo (Regan ir Vogel 1994) ir 1.5-1.6 kpc, matuojant Spitzer juostose ties 3.4 ir 4.5  $\mu\text{m}$  (Verley ir kt. 2009).

Iš sukimosi kreivės modeliavimo gautas žvaigždžių disko masės skirstinys kartu su išmatuotu dujų masės profiliu buvo panaudoti apskaičiuojant dabartinį barioninės medžiagos tankio profilį, kuris naudojamas M33 galaktikos modelyje nustatant dujų akrecijos radialinę priklausomybę.

**2.3 lentelė.** M33 galaktikos tyrimui naudoto modelių tinklo parametrai.

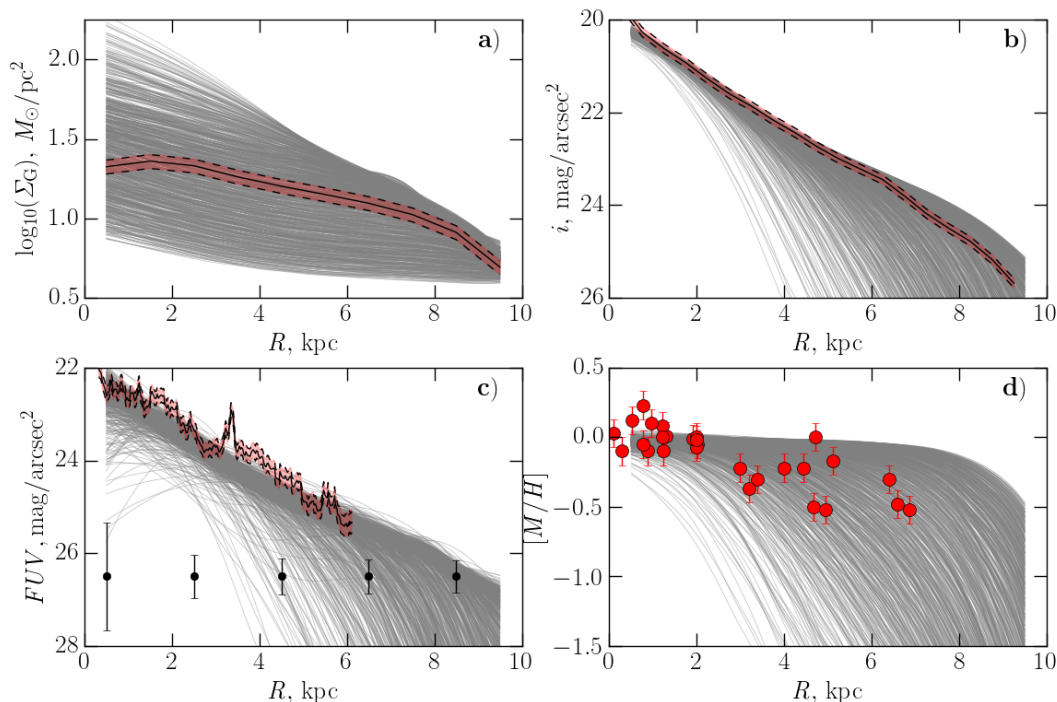
Parametras	Žymėjimas	Vertė
Fiksuoti parametrai		
Amžius	–	13 mlrd. m.
Barioninė masė	–	$1.1 \cdot 10^{10} M_{\odot}$
Disko radiusas	–	12 kpc
Disko sukimasis	–	Corbelli & Salucci (2007)
Ląstelės dydis	$d_C$	100 pc
SF plitimo greitis	$v_{SF}$	10 km/s
Akrecijos sparta	$A_{TM}(t)$	Fakhouri et al. (2010)
SF kritinis dujų tankis	$\Sigma_C$	$8 M_{\odot}/pc^2$
Ląstelės užpildymo dujomis charakteringasis laikas	$\tau$	50 mln. m.
Žvaigždžių dispersija	$D_S$	$200 pc^2/mln.m.$
Spontaninės SF tikimybė	$P_S$	1 SF regionas per $\Delta t_I$
Varijuojami parametrai		
Indukuotos SF tikimybė	$P_T$	0.28-0.44
SFE koeficientas	$\epsilon$	0.018-5.7 %
SFE rodiklis	$\alpha$	1.5-2.5

## 2.4 M33 galaktikos evoliucijos tyrimas

Šiame poskyryje aptarsime stochastinio 2-D galaktikų diskų evoliucijos modelio taikymo M33 galaktikos evoliucijos tyrimui rezultatus (Mineikis ir Vansevičius 2014a, 2015). Tyrimas buvo atliktas modelių tinklo, kuriame varijuojami trys pagrindiniai žvaigždėdarą kontroliuojantys parametrai:  $P_T$ ,  $\epsilon$  ir  $\alpha$ , pagrindu. Tinklas sudarytas iš 935 modelių: 17 – vienodo dydžio žingsnių  $P_T = 0.28 - 0.44$  intervale; 11 – vienodo dydžio žingsnių logaritminėje skalėje  $\epsilon = 0.018 - 5.7\%$  intervale; 5 – vienodo dydžio žingsniai  $\alpha = 1.5 - 2.5$  intervale. Siekdami sumažinti modelių tinklą, fiksavom dujų netekimo parametras,  $\eta = 0$ . Šio parametro įtaką nagrinėjome vėliau tiems modeliams, kurie pateko tarp geriausiųjų iš pirminio tinklo.

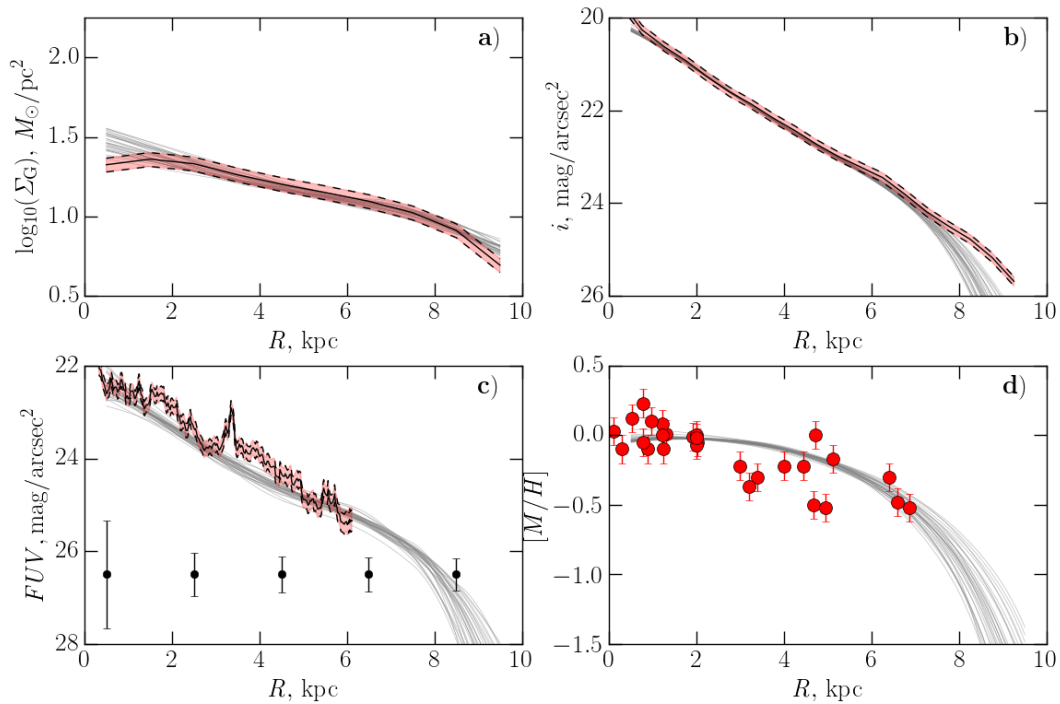
2.10 pav. modeliai palyginti su iš stebėjimų nustatytais 1-D radialiniais profiliais: dujų paviršinio tankio, HI (Corbelli ir Salucci 2000) + H<sub>2</sub> (Heyer ir kt. 2004), paviršinio šviesio  $i$  (Ferguson ir kt. 2007) bei GALEX  $FUV$  (Muñoz-Mateos ir kt. 2007) juostose ir metalingumo (Urbaneja ir kt. 2005; U ir kt. 2009). Matome, kad dujų paviršinio tankio radialinis profilis (2.10a pav.) stipriai apriboja modelio parametrų erdvę, ypatingai jaut-



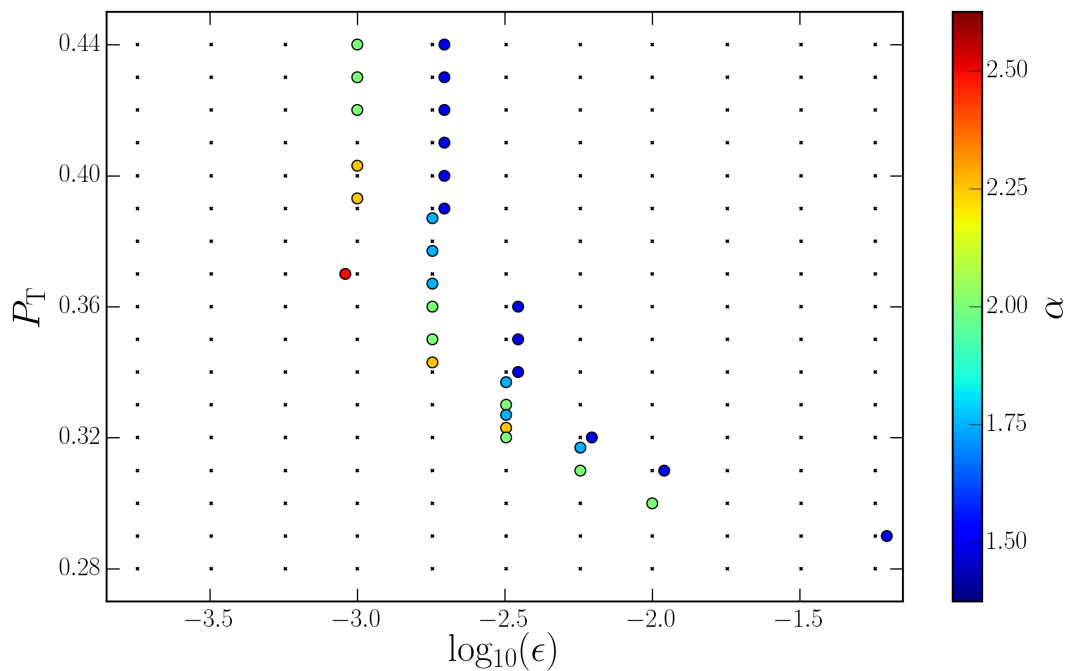


**2.10 pav.** Modelių tinklo palyginimas su M33 galaktikos stebėjimais: (a) dujų paviršinis tankis gautas sudėjus atominio vandenilio (Corbelli ir Salucci 2000) bei molekulinio vandenilio (Heyer ir kt. 2004) paviršinio tankio profilius ir įskaičius He masės dalį (0.25); (b) paviršinis šviesis  $i$  juostoje (Ferguson ir kt. 2007) pataisytas dėl vidinės M33 galaktikos ekstinkcijos naudojant radialinį ekstinkcijos profilį (Muñoz-Mateos ir kt. 2007) ir Didžiojo Magelano debesies ekstinkcijos dėsnį (Gordon ir kt. 2003); (c) paviršinis šviesis GALEX  $FUV$  juostoje (Muñoz-Mateos ir kt. 2007) pataisytas dėl vidinės ekstinkcijos; (d) M33 supermilžinių metalingumo stebėjimai (Urbaneja ir kt. 2005; U ir kt. 2009). Visi radialiniai profiliai pakoreguoti dėl projekcijos efektų naudojant  $54^\circ$  M33 galaktikos disko posvyrį.

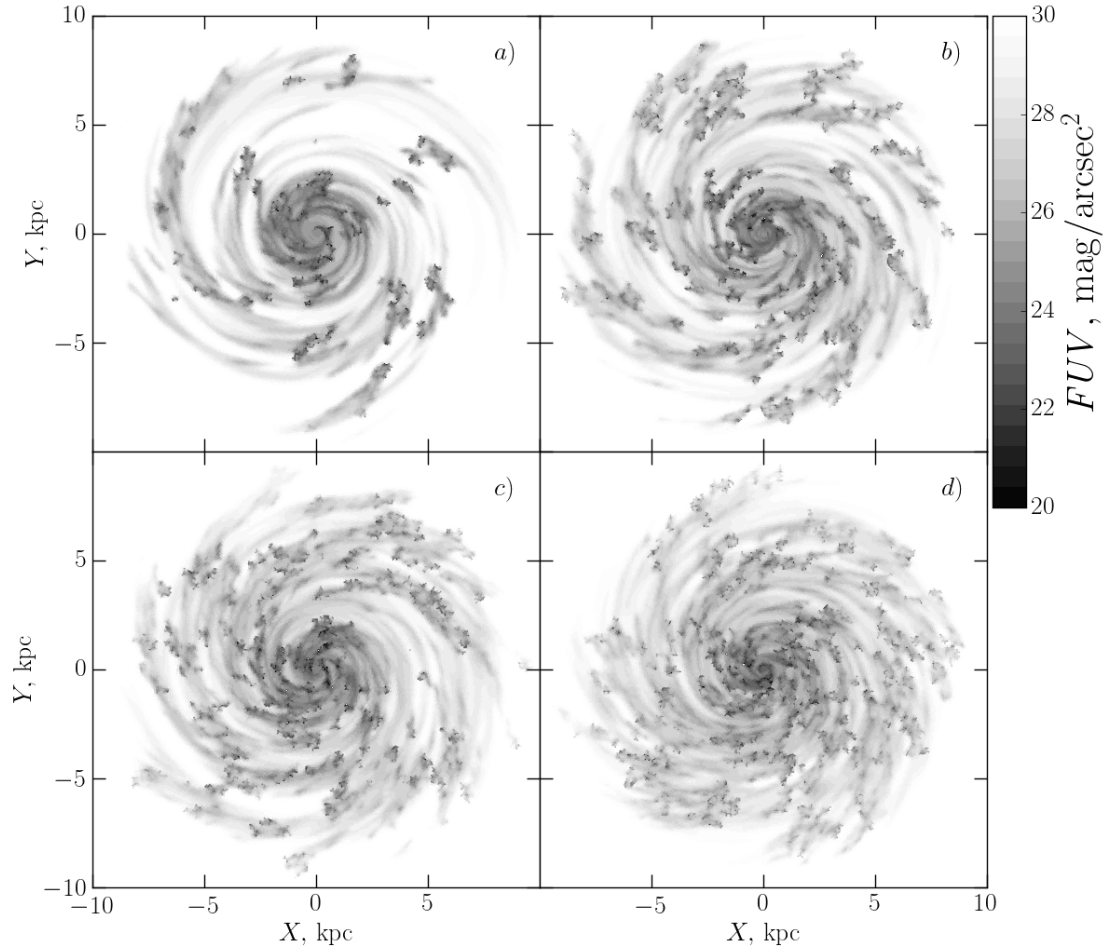
rios centrinės disko dalys. Paviršinio šviesio  $i$  juostoje radialinis profilis (2.10b pav.) yra jautrus žvaigždžių disko masės radialiniam kitimui, tačiau modeliuose naudojame akrecijos scenarijų su fiksuota galaktikos mase, todėl modelių kintamumas nėra reikšmingas, išskyrus išorines disko dalis. Paviršinio šviesio radialinis profilis GALEX  $FUV$  juostoje (2.10c pav.) yra jautrus einamosios žvaigždėdaros spartos indikatorius, tačiau jis nėra jautrus modelio parametrams. Tai nulemia trumpesnė žvaigždėdaros laiko skalė, lyginant ją su dujų akrecijos laiko skale. Dėl šios priežasties žvaigždėdara galaktikoje vyksta dujų akrecijos reguliuojamu režimu (Elmegreen 2015). Metalingumo radialinis profilis (2.10d pav.) yra pakankamai jautrus modelio parametrams, ypač išorinėse disko srityse, tačiau dėl didelės stebėjimo rezultatų sklaidos šiuos duomenis sunku efektyviai panaudoti.



**2.11 pav.** Tas pats kaip ir 2.10 pav., parodyti tik modeliai, kurių santykinis vidutinis kvadratinis nuokrypis nuo stebimų dujų paviršinio tankio ir paviršinio šviesio  $i$  juostoje radialinių profilių (nuo 2 iki 7 kpc) neviršija 10 %.



**2.12 pav.** Geriausiai M33 galaktikos stebėjimus atitinkančių modelių (2.11 pav.) 3-D parametrų erdvė. Spalvos žymi parametro  $\alpha$  vertės. Siekiant išvengti simbolių persiklojimo  $\epsilon$  ir  $P_T$  plokštumoje, jie pastumti priklausomai nuo  $\alpha$  vertės.

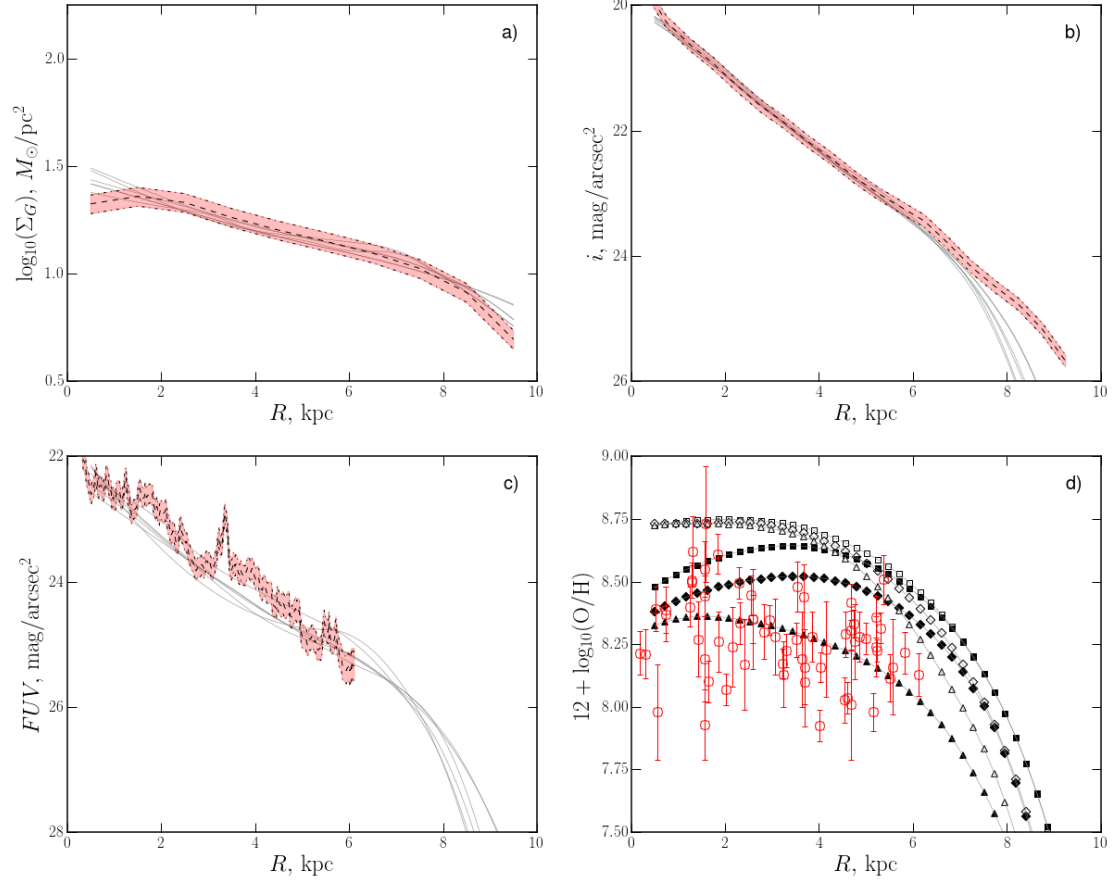


**2.13 pav.** Modelių išilgai „išsigimimo slėnio“ (2.12 pav.) 2-D vaizdai GALEX  $FUV$  juostoje: a)  $P_T = 0.30$ ,  $\epsilon = 1\%$ ; b)  $P_T = 0.31$ ,  $\epsilon = 0.6\%$ ; c)  $P_T = 0.32$ ,  $\epsilon = 0.3\%$ ; d)  $P_T = 0.34$ ,  $\epsilon = 0.2\%$ .

Tolesnei modelių tinklo analizei pasirinkome dujų paviršinio tankio ir paviršinio šviesio  $i$  juostoje radialinius profilius. Kiekvienam tinklo modeliui buvo suskaičiuotas santykinis vidutinis kvadratinis nuokrypis nuo stebimų profilių 2–7 kpc intervale. Nenaudojome vidinių ( $< 2$  kpc) ir išorinių ( $> 7$  kpc) disko sričių dėl galimų kraštinių modelio efektų. 2.11 pav. parodyti tik tie modeliai, kurių santykinis vidutinis kvadratinis nuokrypis nuo stebėjimų yra  $< 10\%$ .

Modelių pavaizduotų 2.11 pav. parametrų erdvė parodyta 2.12 pav. Aki vaizdus yra „išsigimimo slėnis“ – sritis modelio parametrų erdvėje, į kurią patenka modeliai atrinkti pagal aukščiau aprašytą procedūrą. „Išsigimimo slėnis“ atsiranda dėl žvaigždėdaros 2-D disko savybių. Žvaigždėdara, priklausomai nuo modelio parametrų, gali vykdyti mažo žvaigždėdaros efekty-

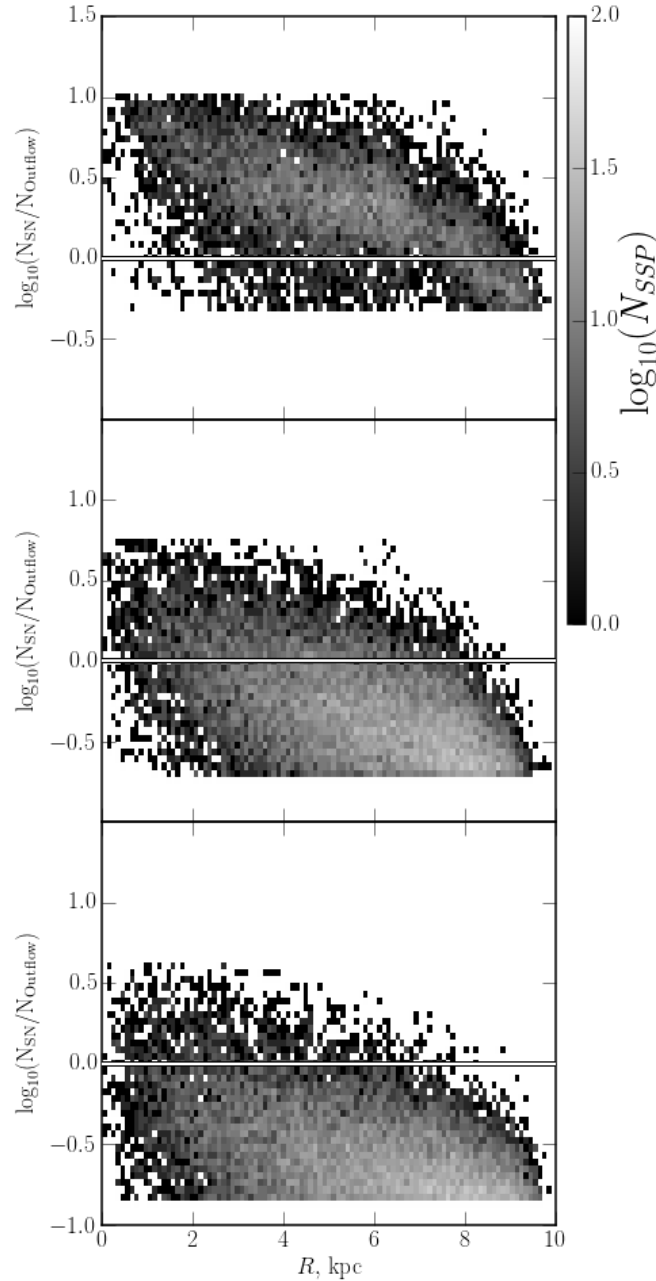
vumo regionuose, užimančiuose didelę disko ploto dalį, arba didelio žvaigždėdaros efektyvumo regionuose, užimančiuose mažą disko ploto dalį. Šie modeliai sprendžiant vien tik pagal radialinius profilius stebėjimo paklaidų ribose yra neatskiriama – išsigimę. Tačiau galimą išsigimimo problemos sprendimą gerai iliustruoja 2.13 pav., kur parodyti keturių „išsigimimo slėnio“ modelių  $FUV$  vaizdai.



**2.14 pav.** Modelių su parametru,  $\eta$ , ir M33 galaktikos radialiniai profiliai: (a) dujų paviršinis tankis; (b) paviršinis šviesis  $i$  juostoje pataisytas dėl vidinės galaktikos ekstinkcijos; (c) paviršinis šviesis GALEX  $FUV$  juostoje pataisytas dėl vidinės galaktikos ekstinkcijos; (d) deguonies gausa (Rosolowsky ir Simon 2008). Trikampiai atitinka  $P_T = 0.3, \epsilon = 1\%$ , rombai –  $P_T = 0.34, \epsilon = 0.2\%$ , kvadratai –  $P_T = 0.44, \epsilon = 0.1\%$ ; juodi ir balti simboliai atitinka  $\eta = 0.2, 0.9$ .

Ieškodami modelio parametrų išsigimimo problemos sprendimo atrinkome 3 modelius iš „išsigimimo slėnio“, kurių parametrai,  $P_T, \epsilon$ : 0.30, 1.0% (modelis A); 0.34, 0.2% (modelis B), 0.44, 0.1% (modelis C). Šiems modeliams fiksavome SFE rodiklį,  $\alpha = 2$ , ir varijavome tik dujų netekimo parametras,  $\eta$ , nuo 0.2 iki 0.9. 2.14 pav. parodyti: dujų paviršinio tankio,  $i$  bei  $FUV$  paviršinio šviesio ir dujų metalingumo radialiniai profiliai. Mode-

lių dujų metalingumas konvertuotas į deguonies gausą laikant, kad Saulės metalingumas  $Z_{\odot} = 0.015$  (Bressan ir kt. 2012) ir Saulės deguonies gausa  $12 + \log_{10}(\text{O}_{\odot}) = 8.67$  (Asplund ir kt. 2009).



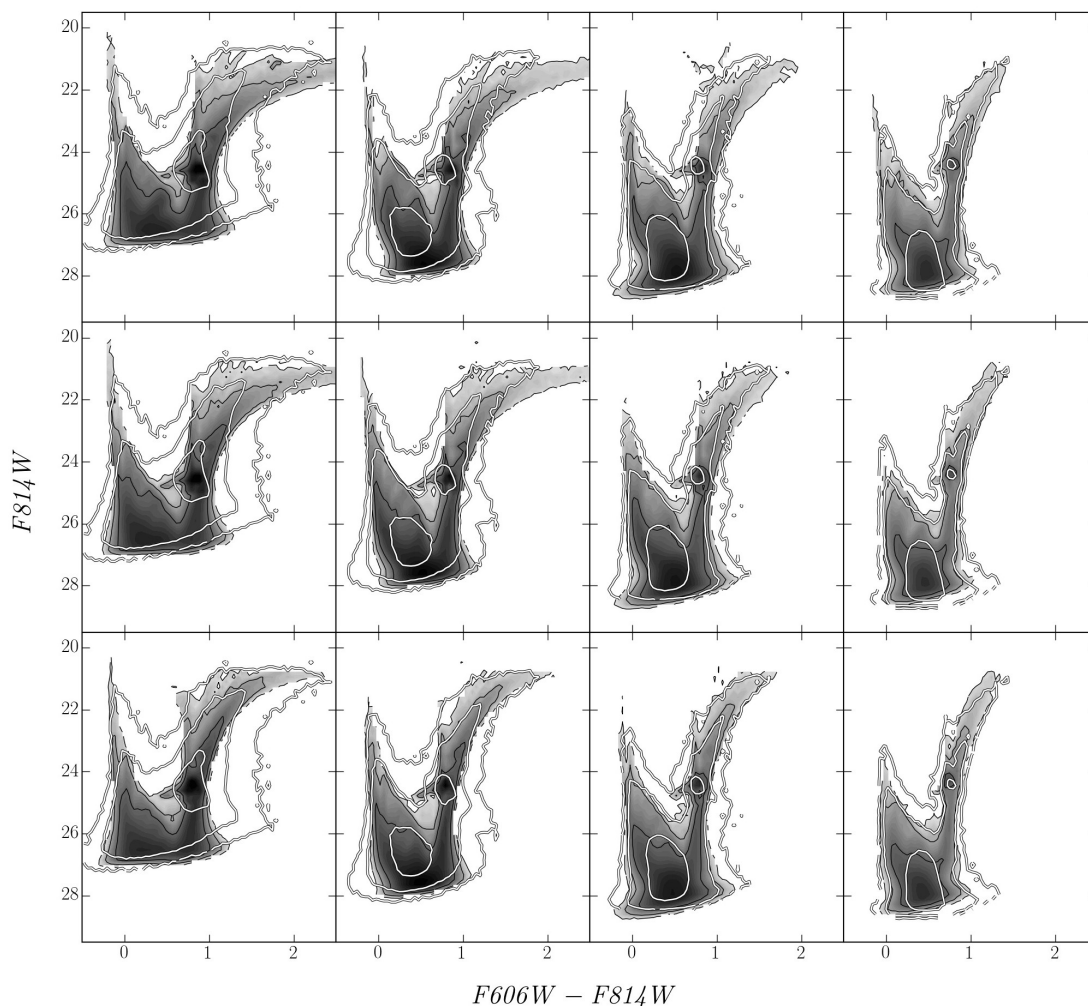
**2.15 pav.** Modelių (A, B ir C – parodytų eilės tvarka languose nuo viršaus žemyn) ląstelėse vykstančių žvaigždėdaros žybsnių energijos santykis su kritine energija (Baumgartner ir Breitschwerdt 2013), kuri reikalinga praturtintų metais dujų išmetimui iš galaktikos. Balta linija žymi santykio ribą, kurią viršijus dujos išmetamos iš galaktikos į tarpgalaktinę erdvę. Pilki atspalviai proporcingi žvaigždėdaros žybsnių, įvykusių 12.5 – 13 mlrd. m. laikotarpiu, skaičiaus logaritmui.

Modeliai esantys „išsigimimo slėnyje“ net ir turėdami identišką parametru,  $\eta$ , vertes praranda skirtingus sunkiaisiais elementais praturtintų dujų kiekius dėl skirtingų žvaigždėdaros efektyvumo  $\epsilon$  verčių (2.15 pav.). Žvaigždėdaros žybsnio metu modeliai su didžiausia  $\epsilon$  verte (A) suformuoja masyvias žvaigždžių populiacijas. Tokios populiacijos net ir galaktikos pakraštyje yra pakankamai energingos, kad išmestų dalį praturtintų dujų. Tuo tarpu modeliai su mažomis  $\epsilon$  vertėmis (C) praranda daug mažiau praturtintų dujų. Praturtintų dujų praradimas tarp modelių skiriasi ne tik bendru kiekiu, tačiau ir radialinėmis savybėmis. Centrinėse galaktikos disko dalyse, kur formuojasi masyviausios žvaigždžių populiacijos, skirtingi modeliai praranda panašius kiekius praturtintų dujų. Tačiau išorinėse disko dalyse skirtumai tarp modelių išauga ir modeliai su didžiausiomis  $\epsilon$  vertėmis (A) praranda daug daugiau praturtintų dujų lyginant su mažų  $\epsilon$  verčių (C) modeliais (žr. 2.15 pav.). Šie skirtumai tarp modelių, esančių „išsigimimo slėnyje“, teikia vilčių išspręsti parametru išsigimimo problemą gerai matuojant metalingumą galaktikose.

Kitas metodas, įgalinantis išspręsti parametru išsigimimo problemą, yra žvaigždžių fotometrinių stebėjimų duomenų analizė į žvaigždes išskiriamose galaktikose. Šiuo tikslu panaudojome HST/ACS WFC stebėjimus M33 galaktikoje, kuriuos geranoriškai atidavė Benjamin Williams (Williams ir kt. 2009).

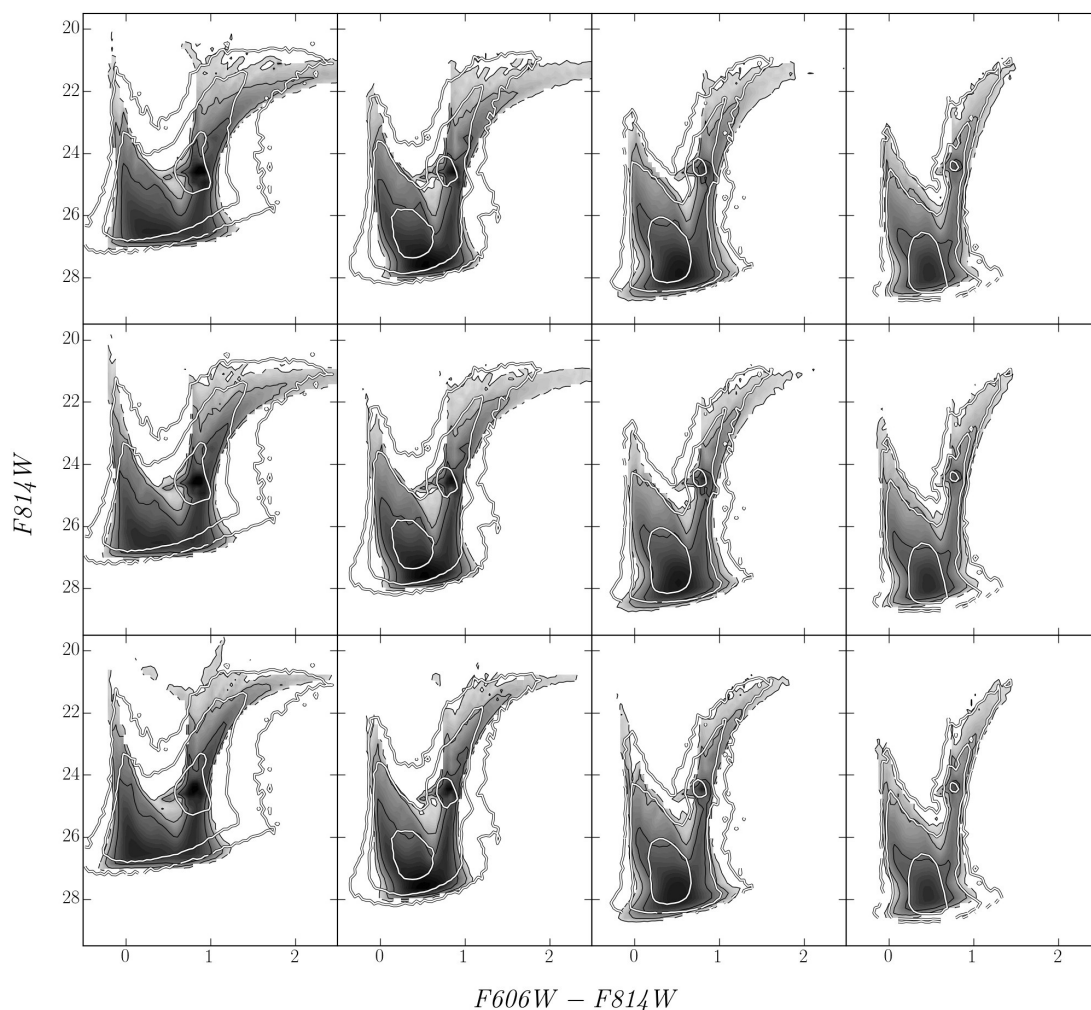
Modelių spalvos-ryškio diagramų palyginimui su stebėjimais buvo sugeneruotos žvaigždžių populiacijos to paties ploto laukeliuose ir tuo pačiu atstumu nuo galaktikos centro, kaip ir HST/ACS stebėjimuose (Williams ir kt. 2009). Modelio generuojamoms žvaigždėms buvo pridėtos pataisos dėl mūsų Galaktikos bei vidinės M33 galaktikos ekstinkcijos,  $A_V = 0.3$ , ir Gausinės paklaidos, kurių dydis buvo įvertintas remiantis sąryšiais tarp fotometrinių paklaidų ir žvaigždžių ryškio, nustatytais kiekvienam laukeliui atskirai pagal stebėtų žvaigždžių katalogą. Ekstinkcija HST/ACS juostoje buvo suskaičiuota remiantis Cardelli ir kt. (1989) ekstinkcijos dėsniumi ( $R_V = 3.1$ ). Reikia pabrėžti, kad modelio sugeneruotam žvaigždžių katalogui pritaikant stebėjimų paklaidas nebuvo atsižvelgta į kintamo tankio lauko ir diferencialinės ekstinkcijos M33 galaktikos diske efektus.

A modelio su skirtingomis parametru,  $\eta$ , vertėmis sintetinės žvaigž-



**2.16 pav.** HST/ACS WFC žvaigždžių fotometrija M33 galaktikoje (Williams ir kt. 2009) ir A modelio duomenys. Viršutinėje eilėje su stebėjimais lyginamas modelis, kurio  $\eta = 0.2$ , vidurinėje –  $\eta = 0.5$  ir apatinėje –  $\eta = 0.9$ . Stulpeliuose (iš kairės į dešinę) parodytos spalvos ryškio diagramos žvaigždėms, esančioms laukeliuose: 0.9, 2.4, 4.1 ir 5.8 kpc atstumu nuo galaktikos centro. Modelio žvaigždėms, priklausomai nuo jų ryškio, buvo pridėtos statistinės fotometrinių matavimų paklaidos. Visuose laukeliuose modelio žvaigždėms buvo pridėtos sisteminės pataisos dėl foninės ir M33 galaktikos vidinės ekstinkcijos,  $A_V = 0.3$ .

džių spalvos-ryškio diagramos parodytos 2.16 pav., kur jos palygintos su HST/ACS stebėjimų duomenimis. Langų stulpeliuose (iš kairės į dešinę) pavaizduoti 4 laukelių, esančių: 0.9, 2.4, 4.1 ir 5.8 kpc atstumu nuo galaktikos centro, fotometrijos duomenys. Langų eilutės atitinka A modelio su skirtingomis parametro,  $\eta = 0.2, 0.5, 0.9$ , vertėmis (atitinkamai – viršuje, viduryje ir apačioje) duomenis. Matome, kad A modelio spalvos-ryškio diagramos neatitinka stebėjimo duomenų, ir tik  $\eta = 0.2, 0.5$  atvejais neblogai atitinka stebėjimus labiausiai nuo centro nutolusiame laukelyje. Tuo

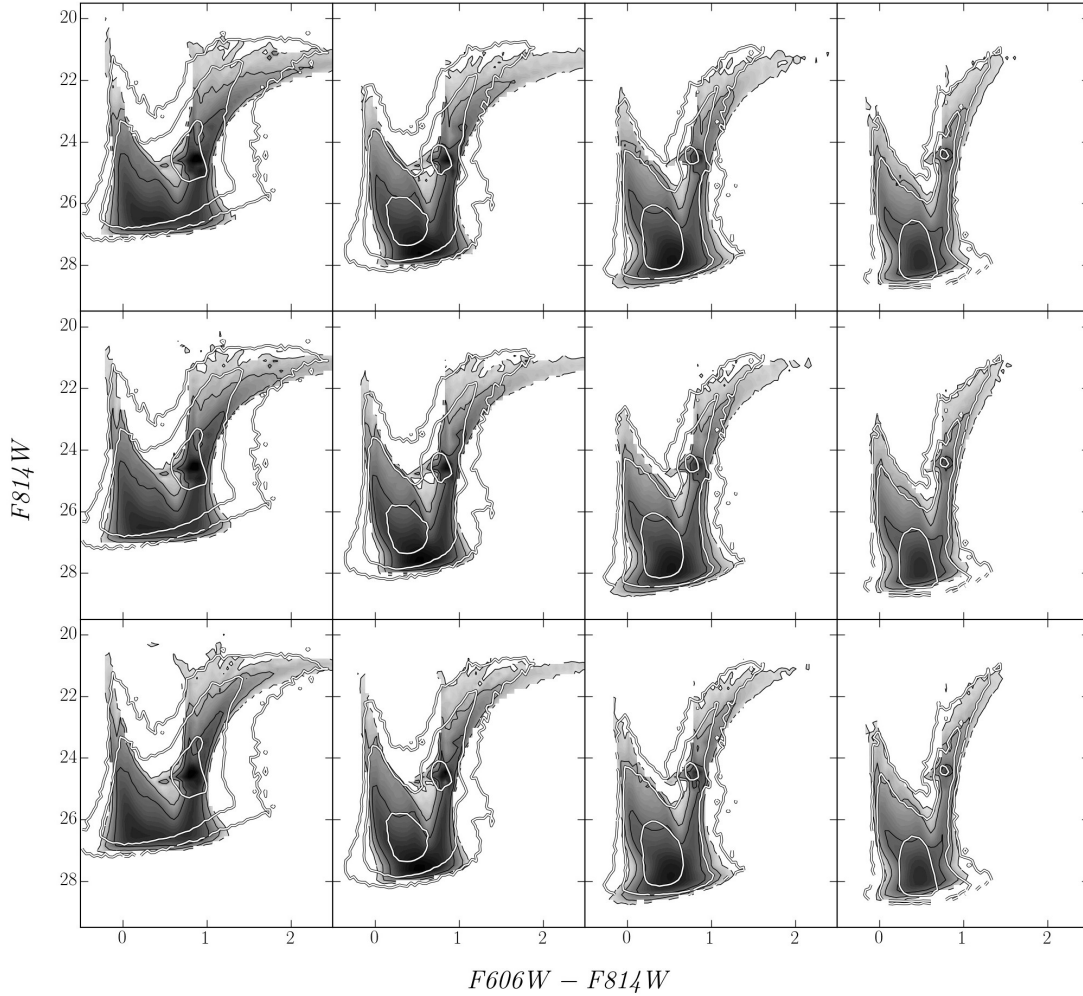


**2.17 pav.** Tas pats kaip ir 2.16 pav., tik čia parodyti B modelio duomenys.

tarpu spalvos ryškio diagramos arčiau galaktikos centro esančiuose laukeliuose turi aiškiai per daug metalingą raudonųjų milžinių seką. Modelis su didžiausia  $\eta = 0.9$  verte gali atkurti spalvos-ryškio diagramos morfologiją vidiniuose laukeliuose, tačiau toliausiai nuo centro esančiame laukelyje numato aiškiai per daug nemetalingą žvaigždžių populiaciją. Tokiu būdu eliminuojame „išsigimimo slėnio“ A modelį dėl jo spalvos-ryškio diagramų neatitikimo stebėjimams.

2.17 pav. panašiai kaip ir 2.16 pav. su stebėtomis žvaigždėmis palygintos sintetinės spalvos-ryškio diagramos, tačiau šiuo atveju nagrinėjamas B modelis. Panašiai kaip ir A modelio atveju, dviejuose vidiniuose laukeliuose B modelio su parametru,  $\eta = 0.2, 0.5$ , vertėmis, žvaigždžių pasiskirstymo morfologija išduoda per daug metalingą, lyginant su stebėjimais, raudonųjų milžinių seką. Tačiau šiuo kartu B modelis su didžiausia parametru,





**2.18 pav.** Tas pats kaip ir 2.16 pav., tik čia parodyti C modelio duomenys.

$\eta = 0.9$ , vertė jau pakankamai gerai atkuria spalvos ryškio-diagramų morfologiją vidiniuose ir išoriniuose laukeliuose tuo pačiu metu.

2.18 pav. palygintos C modelio sintetinio žvaigždžių katalogo spalvos-ryškio diagramos su stebėjimais. C modelis turi mažiausią žvaigždėdaros efektyvumo parametro,  $\epsilon$ , vertę. Dėl šios priežasties didžioji dalis susiformavusių žvaigždžių populiacijų nėra pakankamai masyvos, kad galėtų prarasti praturtintas dujas. Šis efektas gerai matomas spalvos-ryškio diagramose, kuriose nepriklausomai nuo parametro,  $\eta$ , modelio žvaigždžių populiacijos turi akivaizdžiai per daug metalingas raudonųjų milžinių sekas.



## Skyrius 3

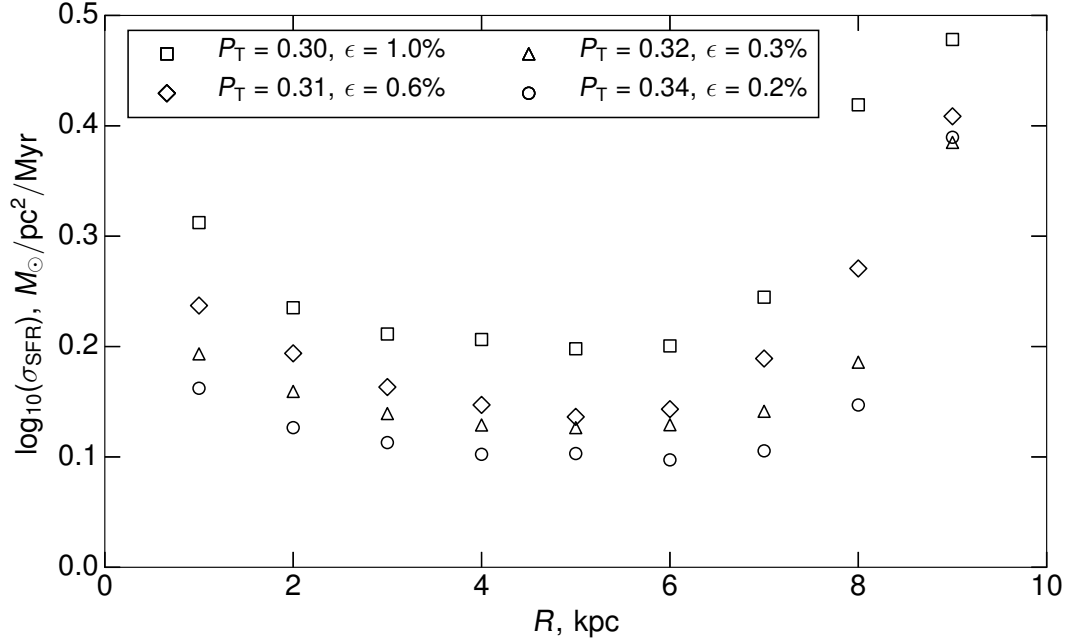
# 1-D ir 2-D galaktikų diskų evoliucijos modelių palyginimas

Artimų, erdviškai gerai išskirtų galaktikų tyrimai atskleidė, jog žvaigždėdaros procesas diskinėse galaktikose vyksta stochastiškais žybsniais (pvz. Harris ir Zaritsky 2009). Žvaigždėdaros žybsniai labiausiai paveikia išorinius galaktikų diskų regionus (Barnes ir kt. 2013), tačiau fotometrinių stebėjimų parametrai, ypač UV spektro srityje, yra reikšmingai paveikiami visame diske (Simones ir kt. 2014). Nepaisant to, vienmačiuose (1-D, išskirti pagal radialinį atstumą) galaktikų evoliucijos modeliuose žvaigždėdara modeliuojama kaip tolydinis procesas (Magrini ir kt. 2007; Marcon-Uchida ir kt. 2010; Kang ir kt. 2012).

Šiame skyriuje mes aprašome charakteringus skirtumus tarp 1-D modelių, kuriuose žvaigždėdara modeliuojama kaip tolydinis procesas, ir mūsų sukurto 2-D modelio, kuriame žvaigždėdara modeliuojama kaip stochastinis procesas. Šiam palyginimui mes naudojame 2-D modelio parametrus, kurie geriausiai atkuria M33 galaktikos stebėjimo duomenis (žr. Skyrių 2).

### 3.1 Tolydinis 1-D modelis

Šiame palyginime naudojamas 1-D tolydinės žvaigždėdaros modelis yra sukurtas remiantis artimų diskinių galaktikų tyrimais (pvz. Marcon-Uchida ir kt. 2010). Galaktikos diskas modelyje yra sudalinamas į koncentrinis 1 kpc pločio žiedus. Diskas formuojasi vykstant dujų akrecijai iš rezervuaro (priskiriamo kiekvienam žiedui atskirai), kuriame pradiniu momentu yra sukaupta visa masė. Dujos modelyje nemigruoja tarp žiedų radialine kryptimi, tačiau visą laiką yra gerai susimaišiusios (azimutiškai homogeniškos). Disko evoliucija skaičiuojama programiniu paketu PEGASE-HR (Le Borgne ir kt. 2004). Žvaigždėdarai diske modeliuoti panaudojome empirinę Schmidt-Kennicutt sąryšį tarp dujų ir žvaigždėdaros spartos paviršinių tankių:



**3.1 pav.** Žvaigždėdaros spartos standartinio nuokrypio radialiniai profiliai, suskaičiuoti 2-D modeliams išilgai „išsigimimo slėnio“ (žr. 2 Skyrių). Standartiniai nuokrypiai buvo suskaičiuoti 1 kpc pločio žieduose 10-13 mlrd. m. periodu su 10 mln. m. laiko skyra.

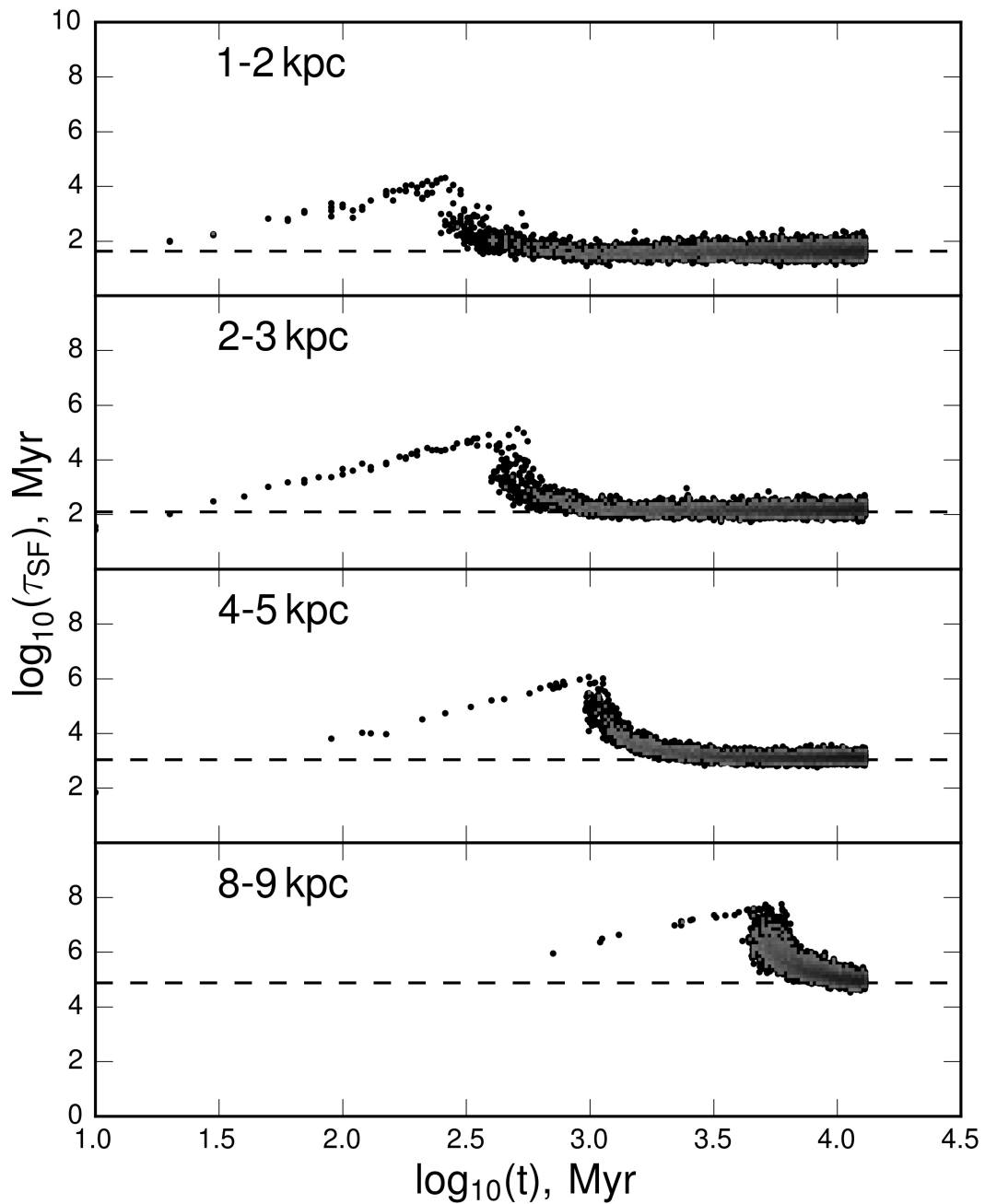
$$\text{SFR}_i = \frac{1}{\tau_{\text{SF},i}} \cdot \left( \frac{\Sigma_{\text{G},i}(t)}{\Sigma_{0,i}} \right)^n, \quad (3.1)$$

kur žvaigždėdaros sparta žiede  $i$  ( $\text{SFR}_i$ ) yra proporcinga dujų paviršiniui tankiui  $\Sigma_{\text{G},i}$  sunormuotam iš pradinės rezervuaro masės  $\Sigma_{0,i}$ . Žvaigždėdaros parametras  $\tau_{\text{SF},i}$  nustato galaktikos žiedo susiformavimo laiko skalę. PEGASE-HR parametrai naudoti 1-D ir 2-D modeliams skaičiuoti pateikti 1.1 lentelėje.

## 3.2 Modelių kalibracija

Palyginimui su 1-D modeliais mes naudojame du skirtingus 2-D modelius pasirinktus iš „išsigimimo slėnio“ (žr. 3.1 lentelę), aprašyto 2 skyriuje. 2-D modeliai „išsigimimo slėnyje“ turi 10% ribose neišskiriamus dujų tankio ir  $i$  juostos paviršinio šviesio radialinius profilius. Tačiau šių modelių žvaigždėdaros regionų struktūrinės savybės (žr. 2.13 pav.) bei žvaigždėdaros stochastiškumas (žr. 3.1 pav.) reikšmingai skiriasi.

Kad palygintume 1-D ir 2-D modelių rezultatus, suklibravome 1-D modelio parametrus naudodamiesi 2-D modeliais, suskaičiuotais M33 galak-



**3.2 pav.** 2-D modelio MS (žr. 3.1 lentelę) žvaigždėdaros laiko skalės parametro  $\tau_{\text{SF},i}$  evoliucija.  $\tau_{\text{SF},i}$  evoliucija nustatyta iš aštuonių skirtingų to paties 2-D modelio realizacijų.  $\tau_{\text{SF},i}$  parametras buvo skaičiuotas 1 kpc pločio žieduose su 10 mln. m. laiko skyra. Brūkšniuota linija žymi medianines  $\tau_{\text{SF},i}$  vertes, nustatytas žvaigždėdarai pasiekus pusiausvyrą būseną.

tikai. 1-D modelio evoliucija valdoma dviem parametrais:  $n$  ir  $\tau_{\text{SF}}$ . Mes fiksavome parametro  $n$  vertę,  $n = 3$ , nustatytą iš stebėjimų (Heyer ir kt. 2004).  $\tau_{\text{SF},i}$  vertė kiekvienam žiedui buvo nustatyta naudojantis 3.1 lygtimi

**3.1 lentelė.** 2-D modelių parametrai.

Modelis	$P_T$	$\epsilon$	$\alpha$
Didelio stochastiškumo (DS)	0.30	1.0%	2
Mažo stochastiškumo (MS)	0.34	0.2%	2

**3.2 lentelė.** 1-D modelio parametrai.

$R$ , kpc	$\log_{10}(\tau_{\text{SF}})$ , mln. m.	$n$
1.5	1.6	3
2.5	2.1	3
4.5	3.0	3
8.5	4.9	3

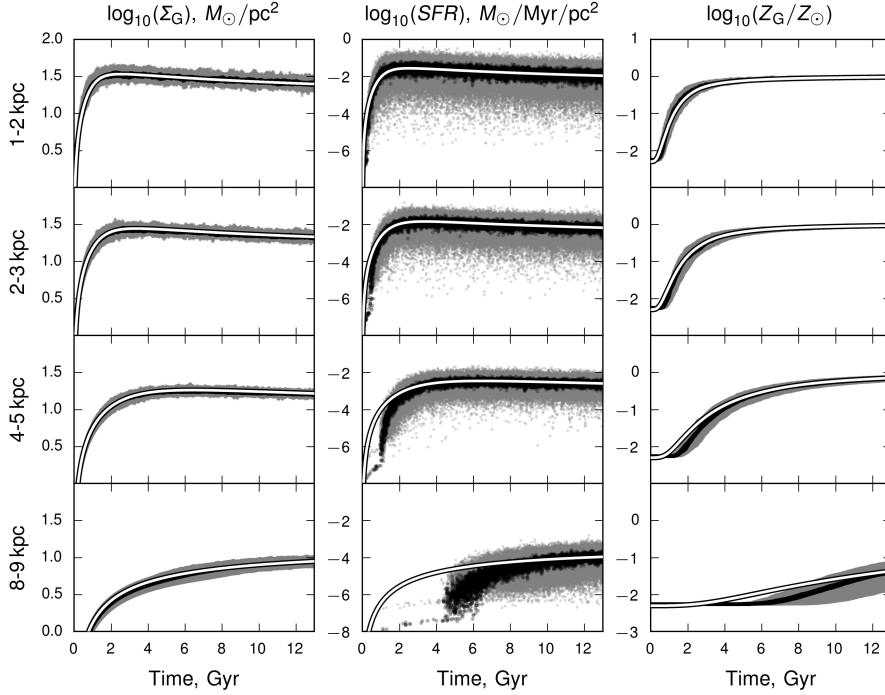
iš 2-D modelio MS (modelio parametrai pateikti 3.1 lentelėje).

$\tau_{\text{SF},i}$  parametro evoliucija pasirinktuose 2-D modelio žieduose vaizduojama 3.2 pav. Diagramoje matoma, jog modeliavimo pradžioje  $\tau_{\text{SF},i}$  vertės didėja visuose žieduose. Tai vyksta dėl lėtos žvaigždėdaros, kuri yra slopinama mažo dujų tankio ( $\Sigma_G < \Sigma_C$ , kur kritinis tankis žvaigždėdarai  $\Sigma_C = 8 M_\odot/\text{pc}^2$ ). Dujų tankis greičiausiai auga vidinėse disko dalyse, todėl žvaigždėdara čia pradeda vykti normaliu tempu per trumpiausią laiko tarpą. Nustatytos medianinės  $\tau_{\text{SF},i}$  vertės, žvaigždėdarai pasiekus pusiausvyrą būseną, pateiktos 3.2 lentelėje.

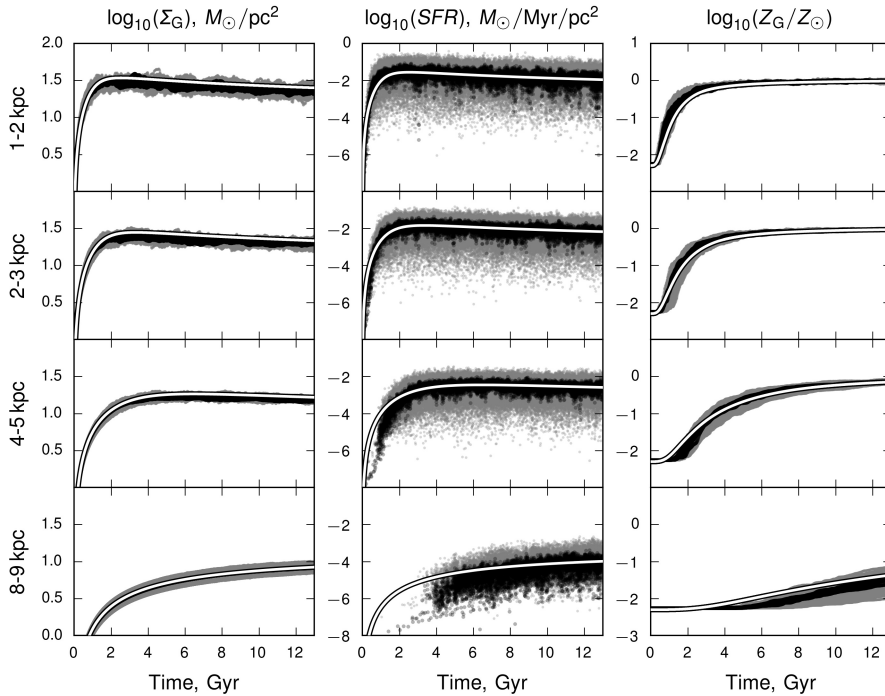
### 3.3 Rezultatai

Mums pavyko sukalibruoti tolydinės žvaigždėdaros 1-D modelį ir transformuoti 1-D modelio rezultatus į vieną sistemą kartu su stochastiniu 2-D modeliu. Tokiu būdu palygindami šių modelių rezultatus, galime aiškiai pademonstruoti reikšmingus efektus, atsirandančius dėl stochastinės žvaigždėdaros (3.3 pav., MS modelis).

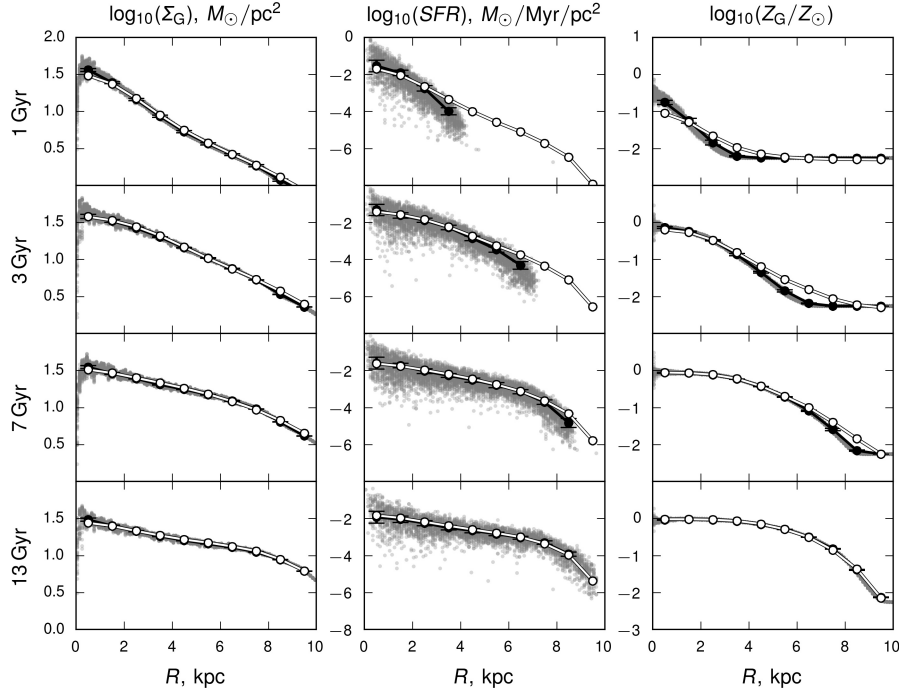
Dujų paviršinio tankio ir metalingumo evoliucija nėra jautrus stochastinės žvaigždėdaros efektams. Tačiau šių parametrų įtaka žvaigždėdaros spartai ankstyvuose evoliucijos etapuose aiškiai matoma kaip 1-D ir 2-D modelių neatitikimas. Šis efektas atsiranda dėl mažo dujų tankio 2-D galaktikos modelio diske, dėl kurio žvaigždėdara yra slopinama ir negali vykti normaliomis sąlygomis. Matoma didelė žvaigždėdaros spartos sklaida, kuri labiausiai paveikia centrinius ir išorinius galaktikos disko regionus. Centrinuose 2-D modelio disko regionuose sklaidą dalinai didina mažas ląstelių



**3.3 pav.** Dujų paviršinio tankio, žvaigždėdaros spartos bei dujų metalingumo evoliucija radialiniuose žieduose. Balta linija žymi tolydinės žvaigždėdaros 1-D galaktikos evoliucijos modelį, kuris sukalibruotas pagal 2-D modelį MS. Juodi taškai žymi aštuonių skirtingų realizacijų to paties MS modelio 1 kpc pločio žiedų vidurkių vertes. Pilki taškai žymi vidurkius 0.1 kpc pločio žieduose. 2-D MS modelio laiko skyra yra 10 mln. m.



**3.4 pav.** Taip pat kaip ir 3.3 pav., tik čia 1-D modelis lyginamas su 2-D modeliu DS.



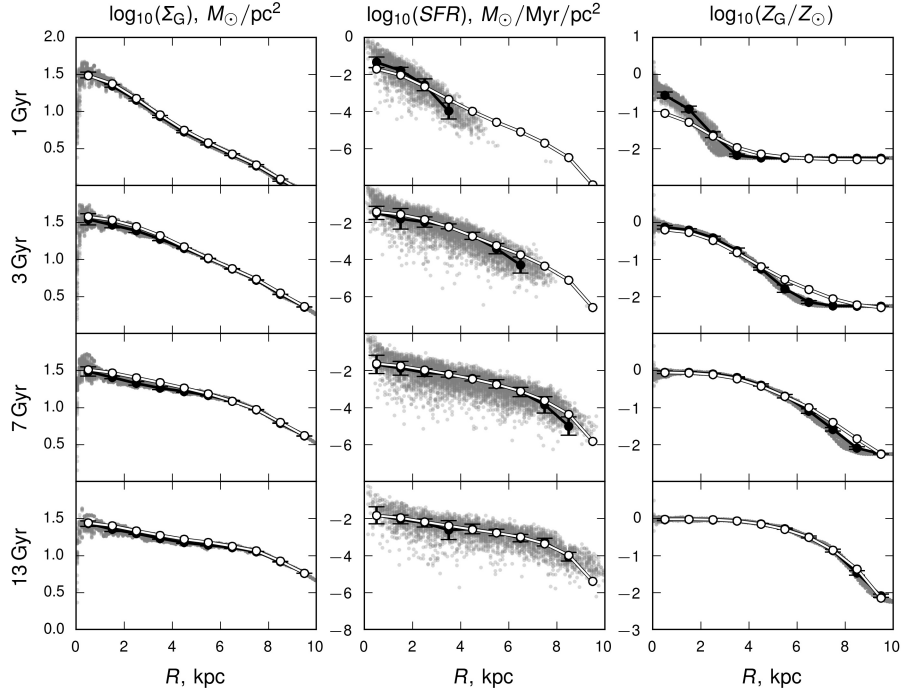
**3.5 pav.** Dujų ir žvaigždėdaros paviršinio tankio, bei metalingumo radialiniai profiliai ties skirtingais galaktikos evoliucijos laikais. Balti apskritimai žymi tolydinės žvaigždėdaros 1-D modelį. Juodi taškai žymi aštuonių skirtingų to paties 2-D MS modelio realizacijų vidurkius 1 kpc pločio žieduose, paklaidų ūsai žymi standartinius nuokrypius. Pilki taškai žymi MS modelio vidurkius 0.1 kpc pločio žieduose. Pateiki 2-D modelio profiliai suvidurkinti 100 mln. m. trukmės laikotarpiu.

skaičius sudarantis 1 kpc pločio žiedą. Išorinėse disko dalyse žvaigždėdaros sklaida yra didelė dėl mažo dujų tankio, kuris neleidžia žvaigždėdarai vykti normaliu tempu.

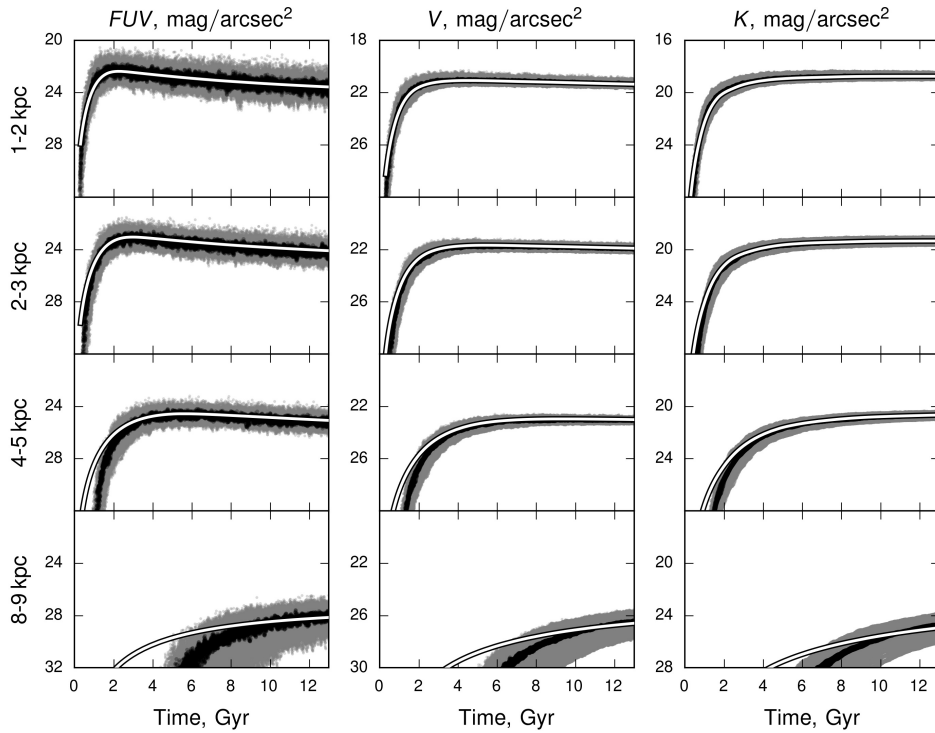
Tokie patys stochastiniai efektai, tik gerokai didesni, matomi didelio stochastiškumo (DS) 2-D modeliuose (3.4 pav.). Šiame tyrime naudojamas tolydžios žvaigždėdaros 1-D modelis buvo kalibruotas tik pagal MS modelį, tačiau kalibracijų skirtumai tarp MS ir DS modelių yra nereikšmingi.

Gerai žinoma, jog spektrinės energijos pasiskirstymas yra jautrus stochastiniams žvaigždėdaros efektams. Paviršinio šviesio GALEX *FUV*, *V* ir *K* juostose evoliucija pavaizduota 3.7 pav. ir 3.8 pav., atitinkamai MS ir DS modeliams. Diagramose vaizduojama šviesų evoliucija 1 kpc pločio žieduose ties skirtingais atstumais nuo galaktikos centro. Didžiausi stochastiškumo efektai matomi GALEX *FUV* juostoje, kuri ypatingai jautri jaunoms žvaigždžių populiacijoms. Tačiau disko išorinėse srityse didelė sklaida stebima netgi *V* ir *K* juostose.



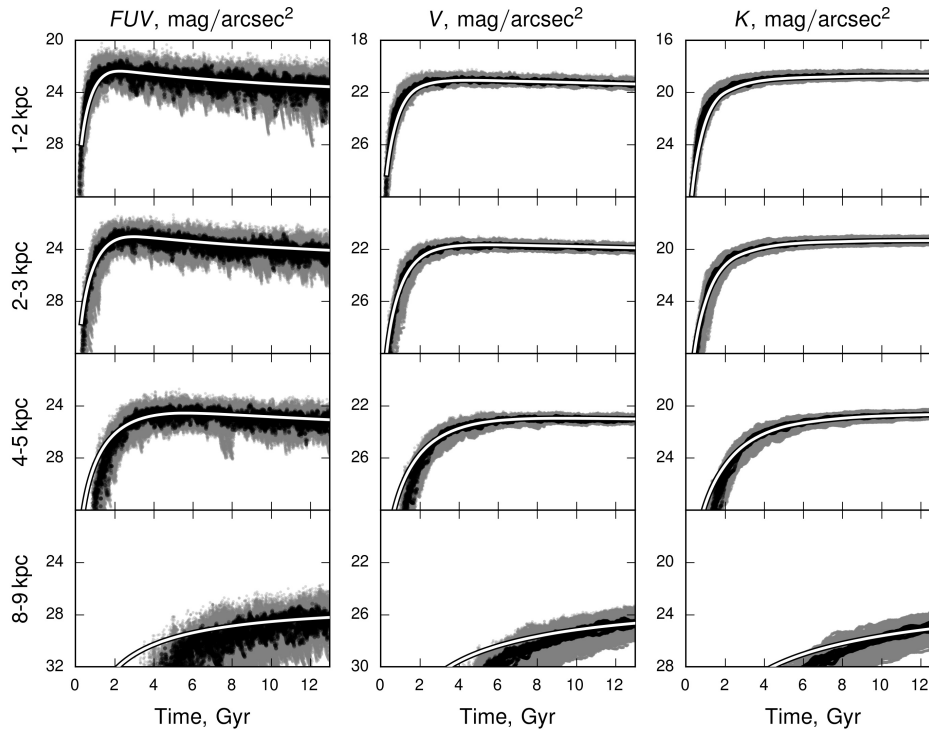


**3.6 pav.** Taip pat kaip ir 3.5 pav., tik čia 1-D modelio rezultatai lyginami su 2-D DS modeliu.

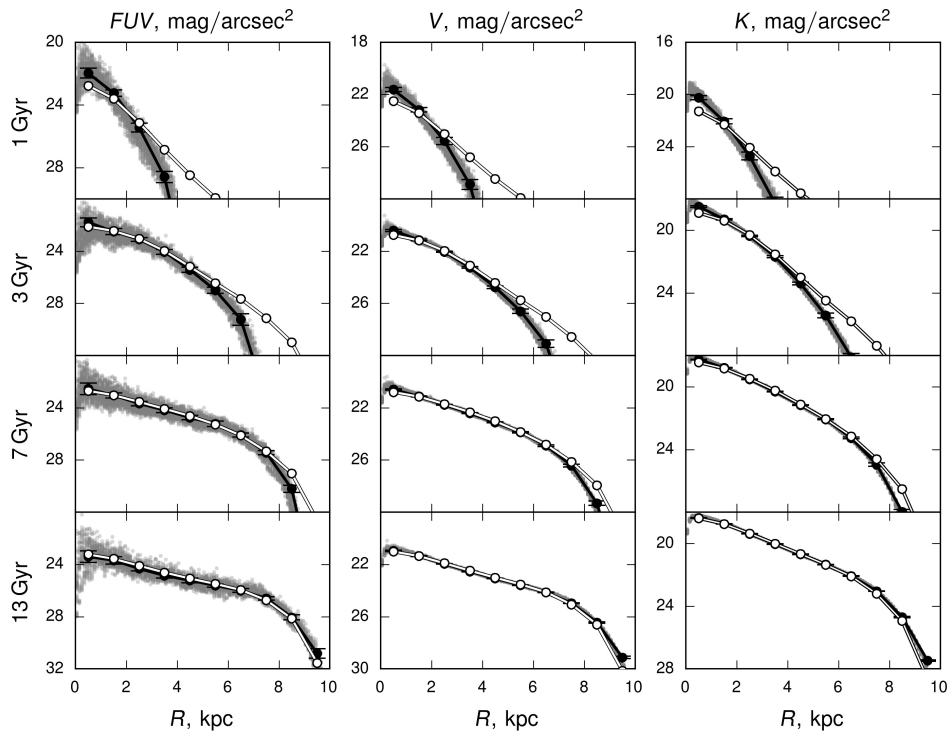


**3.7 pav.** Taip pat kaip ir 3.3 pav., tik čia vaizduojama modelių GALEX *FUV*, *V* ir *K* paviršinių šviesių evoliucija.

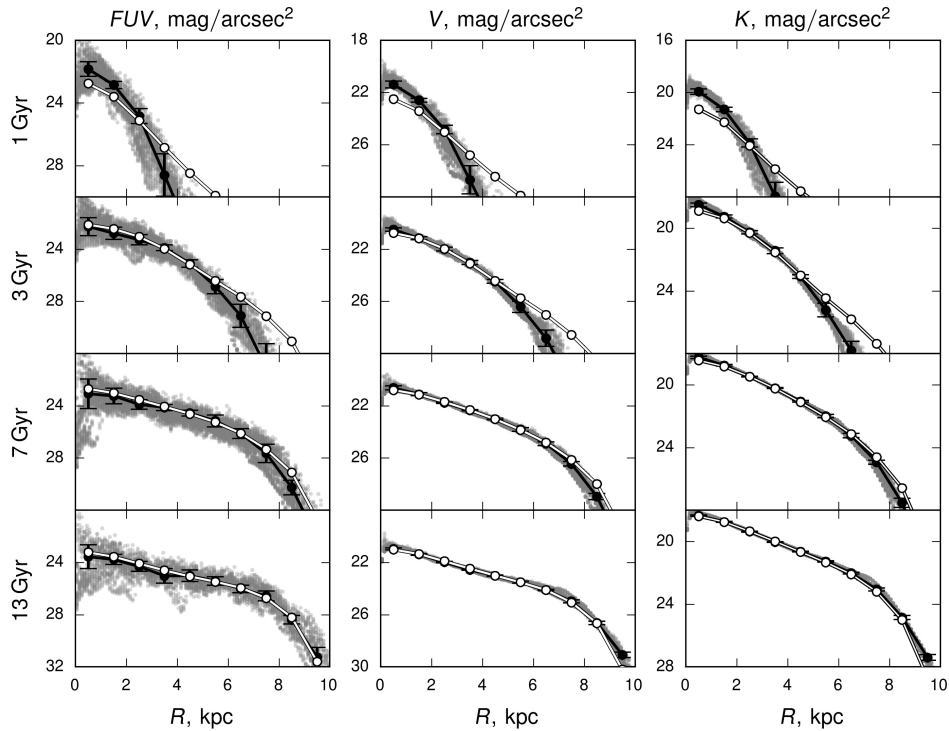
Žvaigždėdaros stochastiškumo efektai išilgai modeliuojamo galaktikos disko radiuso ties skirtingais evoliucijos laikais pavaizduoti 3.5 pav. ir



3.8 pav. Taip pat kaip ir 3.7 pav., tik čia 1-D modelis lyginamas su 2-D DS modeliu.



3.9 pav. Taip pat kaip ir 3.5 pav., tik čia vaizduojami GALEX *FUV*, *V* ir *K* paviršinio šviesio radialiniai profiliai.



**3.10 pav.** Taip pat kaip ir 3.9 pav., tik čia 1-D modelis lyginamas su 2-D DS modeliu.

3.6 pav., atitinkamai MS ir DS modeliams.

Stochastiškumo efektai radialiniams fotometrinių parametrų profiliams ties skirtingais evoliucijos periodais pavaizduoti 3.9 pav. ir 3.10 pav., atitinkamai MS ir DS modeliams. Fotometriniai stochastiškumo efektai radialiniams profiliams senesniems nei 5 mlrd. m. praktiškai išnyksta  $V$  ir  $K$  juostose, tačiau net ir tokie nedideli efektai gali būti stebimi šiuolaikinėmis stebėjimų galimybėmis.

Šiame skyriuje pademonstruota, jog suvidurkintas stochastinės žvaigždėdaros 2-D modelis yra suderinamas su tolydžios žvaigždėdaros 1-D modeliais, kuriuose žvaigždėdara aprašoma empiriniu Schmidt-Kennicutt dėsnium. 2-D modelio žvaigždėdaros spartos ir paviršinės fotometrijos stebėjimo parametruose matoma didelė sklaida, ypač ultravioletinėje spektro dalyje. Didžiausi stochastiškumo efektai numatomi centriniuose disko regionuose ir per pirmuosius 1-2 mlrd. m. evoliucijos.



# Išvados

Šiame darbe mes pristatėme ir ištestavome stochastinį 2-D galaktikų diskų evoliucijos modelį. Modelyje žvaigždėdara modeliuojama kaip stochastinis saviindukcinis procesas. Modelyje įskaitoma parametrizuota dujų ir žvaigždžių dinamika bei sunkiaisiais elementais praturtintų dujų praradimas iš galaktikos disko. Realizuotas programinis paketas įgalina tirti 2-D cheminę ir spektrofotometrinę dujų ir žvaigždžių populiacijų evoliuciją. Viena svarbiausių modelio savybių – galimybė generuoti sintetines spalvos-ryškio diagramas erdviškai išskirtoms žvaigždžių populiacijoms bet kurioje disko vietoje ir bet kuriuo metu.

Mes pritaikėme modelį M33 galaktikos disko evoliucijos tyrimui ir sėkmingai atkūrėme pagrindinius stebėjimų radialinius profilius: dujų paviršinio tankio, metalingumo, paviršinio šviesio  $FUV$  ir  $i$  juostose. Taip pat buvo sėkmingai atkurtos spalvos-ryškio diagramos išilgai didžiosios galaktikos ašies. Mes pademonstravome, kad naudojantis tik radialiniais stebėjimo duomenų profiliais neįmanoma vienareikšmiškai nustatyti modelio parametrų dėl išsigimimo efektų. Norint įveikti parametrų išsigimimą, reikia pasinaudoti 2-D modelio galimybe generuoti sintetines spalvos-ryškio diagramas. M33 galaktikos diskui nustatyti modelio parametrai: indukuotos žvaigždėdaros tikimybė  $P_T = 0.34$ , žvaigždėdaros efektyvumas  $\epsilon = 0.2\%$  ir praturtintų sunkiaisiais elementais dujų netekimo parametras  $\eta = 0.9$

Mes palyginome stochastinio 2-D galaktikos disko evoliucijos modelio rezultatus su tolydžios žvaigždėdaros 1-D galaktikos disko evoliucijos modeliais, kuriuose žvaigždėdara vyksta pagal empirinį Schmidt-Kennicutt dėsnį. 2-D modelis, jį suvidurkinus, gerai atitinka 1-D modelį, tačiau numato didelę žvaigždėdaros greičio ir paviršinės fotometrijos sklaidą išilgai galaktikos disko bei laike, ypač ultra-violetiniame spektro ruože. Didžiausi stochastiniai efektai numatomi centriniuose ir išoriniuose galaktikų diskų regionuose per pirmuosius 1-2 mlrd. m. evoliucijos.

Modelis bei realizuotas modelio programinis paketas M33 galaktikos disko evoliucijos tyrimui gali būti lengvai pritaikyti artimų galaktikų tyrimui, kuriuose yra žvaigždžių fotometrijos stebėjimo duomenų.



# Literatūra

- Asplund M., Grevesse N., Sauval A.J., ir kt. 2009, *ARA&A*, 47, 481
- Barnes K.L., van Zee L., Dowell J.D. 2013, *ApJ*, 775, 40
- Baumgartner V., Breitschwerdt D. 2013, *A&A*, 557, A140
- Bland-Hawthorn J., Veilleux S., Cecil G. 2007, *Ap&SS*, 311, 87
- Bresolin F. 2011, *ApJ*, 730, 129
- Bressan A., Marigo P., Girardi L., ir kt. 2012, *MNRAS*, 427, 127
- Cardelli J.A., Clayton G.C., Mathis J.S. 1989, *ApJ*, 345, 245
- Casertano S. 1983, *MNRAS*, 203, 735
- Castor J., McCray R., Weaver R. 1975, *ApJ*, 200, L107
- Corbelli E. 2003, *MNRAS*, 342, 199
- Corbelli E., Salucci P. 2000, *MNRAS*, 311, 441
- . 2007, *MNRAS*, 374, 1051
- Corbelli E., Thilker D., Zibetti S., ir kt. 2014, *A&A*, 572, A23
- de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., Corwin Jr. H.G., ir kt. 1991, Third Reference Catalogue of Bright Galaxies. Volume I: Explanations and references. Volume II: Data for galaxies between  $0^h$  and  $12^h$ . Volume III: Data for galaxies between  $12^h$  and  $24^h$ .
- Deul E.R., van der Hulst J.M. 1987, *A&AS*, 67, 509
- Elmegreen B.G. 2015, in *Proceedings, Conference on Lessons from the local group* (Springer), 477–488
- Elmegreen B.G., Efremov Y.N. 1998, in *The Orion Complex Revisited*, eds. M.J. McCaughrean, A. Burkert, J. Barnes, vol. 25 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 34
- Fakhouri O., Ma C.P., Boylan-Kolchin M. 2010, *MNRAS*, 406, 2267
- Feitzinger J.V., Glassgold A.E., Gerola H., ir kt. 1981, *A&A*, 98, 371
- Ferguson A., Irwin M., Chapman S., ir kt. 2007, in *Proceedings, Conference on Island Universes: The Structure and Evolution of Disk Galaxies*, 239–244

- Gawiser E. 2006, in *New Horizons in Astronomy: Frank N. Bash Symposium*, eds. S.J. Kannappan, S. Redfield, J.E. Kessler-Silacci, M. Landriau, N. Drory, vol. 352 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 177
- Gerola H., Seiden P.E. 1978, *ApJ*, 223, 129
- Gerola H., Seiden P.E., Schulman L.S. 1980, *ApJ*, 242, 517
- Gieren W., Górski M., Pietrzyński G., *ir kt.* 2013, *ApJ*, 773, 69
- Gordon K.D., Clayton G.C., Misselt K.A., *ir kt.* 2003, *ApJ*, 594, 279
- Gratier P., Braine J., Rodriguez-Fernandez N.J., *ir kt.* 2010, *A&A*, 522, A3
- Guedes J., Callegari S., Madau P., *ir kt.* 2011, *ApJ*, 742, 76
- Harris J., Zaritsky D. 2009, *AJ*, 138, 1243
- Heyer M.H., Corbelli E., Schneider S.E., *ir kt.* 2004, *ApJ*, 602, 723
- Ivanov G.R. 2005, *Publications of the Astronomical Society "Rudjer Boskovic"*, 5, 75
- Jungwiert B., Palous J. 1994, *A&A*, 287, 55
- Kang X., Chang R., Yin J., *ir kt.* 2012, *MNRAS*, 426, 1455
- Kennicutt Jr. R.C. 1989, *ApJ*, 344, 685
- Kompaneets A.S. 1960, *Soviet Physics Doklady*, 5, 46
- Kroupa P. 2002, *Science*, 295, 82
- Kwitter K.B., Aller L.H. 1981, *MNRAS*, 195, 939
- Le Borgne D., Rocca-Volmerange B., Prugniel P., *ir kt.* 2004, *A&A*, 425, 881
- Mac Low M.M., McCray R. 1988, *ApJ*, 324, 776
- Magrini L., Corbelli E., Galli D. 2007, *A&A*, 470, 843
- Makarov D., Prugniel P., Terekhova N., *ir kt.* 2014, *A&A*, 570, A13
- Marcon-Uchida M.M., Matteucci F., Costa R.D.D. 2010, *A&A*, 520, A35
- McBride J., Fakhouri O., Ma C.P. 2009, *MNRAS*, 398, 1858
- McLean I.S., Liu T. 1996, *ApJ*, 456, 499
- Mineikis T., Vansevičius V. 2010, *Baltic Astronomy*, 19, 111
- . 2014a, *Baltic Astronomy*, 23, 209



— . 2014b, *Baltic Astronomy*, 23, 221

— . 2015, *Baltic Astronomy*, 24, 223

Muñoz-Mateos J.C., Gil de Paz A., Boissier S., ir kt. 2007, *ApJ*, 658, 1006

Mueller M.W., Arnett W.D. 1976, *ApJ*, 210, 670

Planck Collaboration, Ade P.A.R., Aghanim N., ir kt. 2014, *A&A*, 571, A1

Regan M.W., Vogel S.N. 1994, *ApJ*, 434, 536

Rosolowsky E., Keto E., Matsushita S., ir kt. 2007, *ApJ*, 661, 830

Rosolowsky E., Simon J.D. 2008, *ApJ*, 675, 1213

Roškar R., Teyssier R., Agertz O., ir kt. 2014, *MNRAS*, 444, 2837

Roy J.R., Kunth D. 1995, *A&A*, 294, 432

Scannapieco C., Wadepuhl M., Parry O.H., ir kt. 2012, *MNRAS*, 423, 1726

Scannapieco E., Brüggen M. 2015, *ApJ*, 805, 158

Seiden P.E., Gerola H. 1979, *ApJ*, 233, 56

Simones J.E., Weisz D.R., Skillman E.D., ir kt. 2014, *ApJ*, 788, 12

Sleath J.P., Alexander P. 1995, *MNRAS*, 275, 507

Smith H.E. 1975, *ApJ*, 199, 591

Tomisaka K., Ikeuchi S. 1986, *PASJ*, 38, 697

U V., Urbaneja M.A., Kudritzki R.P., ir kt. 2009, *ApJ*, 704, 1120

Urbaneja M.A., Herrero A., Kudritzki R.P., ir kt. 2005, *ApJ*, 635, 311

van der Hulst J.M., Terlouw J.P., Begeman K.G., ir kt. 1992, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems I*, eds. D.M. Worrall, C. Biemesderfer, J. Barnes, vol. 25 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 131

van der Kruit P.C., Freeman K.C. 2011, *ARA&A*, 49, 301

Verley S., Corbelli E., Giovanardi C., ir kt. 2009, *A&A*, 493, 453

Vilchez J.M., Pagel B.E.J., Diaz A.I., ir kt. 1988, *MNRAS*, 235, 633

Weaver R., McCray R., Castor J., ir kt. 1977, *ApJ*, 218, 377

Williams B.F., Dalcanton J.J., Dolphin A.E., ir kt. 2009, *ApJ*, 695, L15

Woolley S.E., Weaver T.A. 1995, *ApJS*, 101, 181