

**VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
ASTRONOMIJOS OBSERVATORIJA**

Alina Leščinskaitė

**NETAISYKLINGOSIOS NYKŠTUKINĖS GALAKTIKOS
LEO A STRUKTŪRA**

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas
(studijų programa – Teorinė fizika ir astrofizika)

Studentė:	Alina Leščinskaitė
Darbo vadovė:	dr. Rima Stonkutė
Recenzentas:	dr. Dmitrij Semionov
VU observatorijos vedėjas:	prof. dr. Vladas Vansevičius

Vilnius 2017

Turinys

Įvadas	3
1. Netaisyklinga nykštukinė galaktika Leo A	4
2. Tyrime naudojami duomenys	5
3. Interaktyvus Leo A galaktikos fotometrinių katalogo valymas	5
3.1. Nežvaigždinių objektų atrinkimas	5
3.2. Nežvaigždinių objektų tipai	8
4. Fono žvaigždžių valymas iš spalvos-ryškio diagramų	11
4.1. Fono žvaigždžių regimojo pasiskirstymo tolygumas	11
4.2. Fono objektų tankis spalvos-ryškio diagramose	14
4.3. Fono lauko objektų valymas iš fono lauko spalvos-ryškio diagramos	19
4.4. Fono objektų valymas iš galaktikos lauko spalvos-ryškio diagramos	21
5. Leo A galaktikos struktūra	25
5.1. Raudonųjų milžinių sekos žvaigždės	25
5.2. Leo A galaktikos paviršinio žvaigždžių tankio radialinis profilis	27
5.3. Regimasis raudonosios milžinių sekos žvaigždžių pasiskirstymas	28
5.4. RGB žvaigždžių regimasis pasiskirstymas pagal jų amžių	29
Išvados	33
Literatūra	34
Santrauka	35
Summary	36

Ivadas

Galaktikų formavimasis ir evoliucija yra viena svarbiausių šiuolaikinės astrofizikos problemų. Pagal vieną priimtinausių kosmologinių modelių, Visatoje, kurioje vyrauja šaltaji tamsioji medžiaga, galaktikų formavimasis vyko hierarchiniu principu – visų pirma susiformavo mažos masės struktūros, tuomet joms sąveikaujant ir susiliejančioms susidarė masyvesnės sistemos. Gausūs astrofizikinių stebėjimų duomenys liudija apie didelę galaktikų struktūrų bei jose vykstančių evoliucinių procesų įvairovę. Pastebima, jog galaktikų sąveika bei susiliejamai ir šiandien yra dažnai pasitaikantis reiškinys. Vietinėje galaktikų grupėje aptinkamos kelios dešimtys nykštukinių sistemų, kurios būdamos didžiųjų galaktikų kaimynystėje yra ardomos ar kitaip pastarųjų paveikiamos, o dalis jų galiausiai susilieja su masyviomis sistemomis (McConachie ir kt. 2012). Dėl šios priežasties manoma, jog nykštukinės galaktikos gali būti pirminių, kosmologinių modelių nuspėjamų, struktūrų atitikmuo. Taigi detalūs mažos masės sistemų tyrimai gali padėti suprasti masyvių galaktikų formavimosi ir evoliucijos ypatybes.

Tinkamiausi objektai pirminių struktūrų savybių tyrimams yra nesąveikavusios nykštukinės galaktikos. Detalius struktūrinis tyrimus galima atlikti tik artimoms sistemoms, todėl šiame darbe tyrimams pasirinkta Vietinės grupės pakraštyje esanti netaisyklinga nykštukinė galaktika Leo A. Ši galaktika neturi artimų kaimyninių sistemų ir joje nematyti ankstyvesnės sąveikos su kitomis sistemomis požymių.

Darbo tikslas – ištirti netaisyklingosios nykštukinės galaktikos Leo A struktūrą ir nustatyti senosios populiacijos žvaigždžių savybių priklausomybę nuo jų padėties galaktikoje.

Darbo uždaviniai:

- Interaktyviai patikrinti Leo A galaktikos žvaigždžių fotometrijos katalogą ir identifikuoti nežvaigždinius objektus.
- Ištirti fono žvaigždžių paviršinio tankio tolygumą Leo A galaktikos aplinkoje.
- Sukurti ir pritaikyti metodą, skirtą fono žvaigždžių pašalinimui iš spalvos-ryškio diagramų.
- Ištirti Leo A galaktikos raudonųjų milžinių sekos žvaigždžių savybių kitimą išorinėse galaktikos srityse.

1. Netaisyklinga nykštukinė galaktika Leo A

Leo A yra netaisyklinga nykštukinė galaktika, priklausanti Vietinei galaktikų grupei. Apie 80% šios izoliuotos galaktikos masės sudaro tamsioji medžiaga (Brown ir kt. 2007). Galaktika pasižyminti maža žvaigždine mase ($M_* \approx 3 \pm 1 \cdot 10^6 M_\odot$, Cole ir kt. 2014), tačiau gan dideliu neutralaus vandenilio kiekiu ($M_{\text{HI}} \approx 11 \cdot 10^6 M_\odot$), kurio išplitimas tęsiasi dvigubai didesniu nei galaktikos Holmberg spindulys ($a = 3',5$; Mateo 1998) atstumu (Young ir Lo 1996). Vėliau atliktų raudonųjų milžinių sekos (angl., *Red Giant Branch, RGB*) žvaigždžių regimojo pasiskirstymo tyrimų rezultatai atskleidė, jog žvaigždinio ir dujų diskų kraštai beveik sutampa ($a \approx 8'$; Vansevičius ir kt. 2004). Remiantis HI dujų tyrimais (Young ir Lo 1996) bei RGB žvaigždžių spektroskopinių duomenų analizės rezultatais (Kirby ir kt. 2017) nustatyta, jog Leo A galaktika beveik nesisuka.

Leo A galaktika nuo Paukščių Tako yra nutolusi ~ 800 kpc atstumu. Šis atstumas buvo nustatytas pagal RR Lyr tipo kintamąsias žvaigždes (gautas atstumo modulis: $(m - M)_0 = 24,51 \pm 0,12$; Dolphin ir kt. 2002) bei raudonųjų milžinių sekos viršūnės padėtį ($(m - M)_0 = 24,5 \pm 0,2$; Tolstoy ir kt. 1998).

Leo A galaktika pasižymi labai mažu metalingumu ($12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7,38$; van Zee ir kt. 2006). RGB žvaigždžių spektroskopinių tyrimų rezultatai parodė, jog amžiaus-metalingumo sąryšis Leo A galaktikoje nėra išreikštas, tačiau pastebimas nedidelis metalingumo padidėjimas prie < 5 mlrd. m. amžių (Kirby ir kt. 2017).

Leo A galaktikos centrinės srities stebėjimų, atliktų Hubble kosminio teleskopo WFPC2 (angl., *Wide Field and Planetary Camera 2*) kamera, rezultatai leido daryti išvadą, jog galaktika yra gan jauna, o jos žvaigždėms būdingas amžius yra < 2 mlrd. m. (Tolstoy ir kt. 1998). Tačiau vėliau, Hubble teleskopu atlikus stebėjimus toliau nuo centro nutolusioje galaktikos srityje, paaiškėjo, jog egzistuoja ir gerokai didesnio amžiaus (~ 9 mlrd. m.) žvaigždžių populiacija (Schulte-Ladbeck ir kt. 2002). Senos, ~ 10 mlrd. m. amžiaus, žvaigždžių populiacijos egzistavimą patvirtino ir galaktikoje atrastos RR Lyr tipo kintamosios žvaigždės (Dolphin ir kt. 2002). Hubble ACS (angl., *Advanced Camera for Surveys*) kamera atlikti Leo A galaktikos stebėjimai leido pasiekti pagrindinės sekos posūkio tašką ir nustatyti galaktikos žvaigždėdaros istoriją. Gauti rezultatai parodė, jog seniausiai žvaigždžių populiacijai priklauso $< 10\%$ žvaigždžių, o didžioji jų dalis susiformavo per pastaruosius 8 mlrd. m. (Cole ir kt. 2007).

2. Tyrimo naudojami duomenys

Tyrimui panaudoti Leo A galaktikos duomenys gauti 8 m Subaru teleskopo (Havajai, JAV) židinyje sumontuota plataus lauko mozaikine CCD kamera, Suprime-Cam (5×2 CCD detektoriai, sudaryti iš 2048×4096 vaizdo elementų). Stebėjimų duomenys, t. y., nuotraukos B , V , R , I ir $H\alpha$ filtruose bei jų pagrindu sudarytas 20853 objektų fotometrinių katalogas, apima 20'×24' dydžio lauką (vieno vaizdo elemento apimamas plotas danguje yra 0",2×0",2; ~800 kpc nuotolyje esančioje Leo A galaktikoje 1' atitinka 230 pc) (Stonkutė ir kt. 2014).

Tarpžvaigždinė ekstinkcija Leo A galaktikos kryptimi yra $E(B - V) = 0,021$ (Schlegel ir kt. 1998, Stonkutė ir kt. 2014). Fotometrinių katalogo duomenys skirtinguose filtruose dėl ekstinkcijos pataisyti pasinaudojant ekscesų santykiais: $E(V - I)/E(B - V) = 1,25$, $E(R - I)/E(B - V) = 0,69$ (Straižys 1992). Ekstinkcijos vertė V filtre: $A_V = R_V \cdot E(B - V)$, čia $R_V = 3,1$.

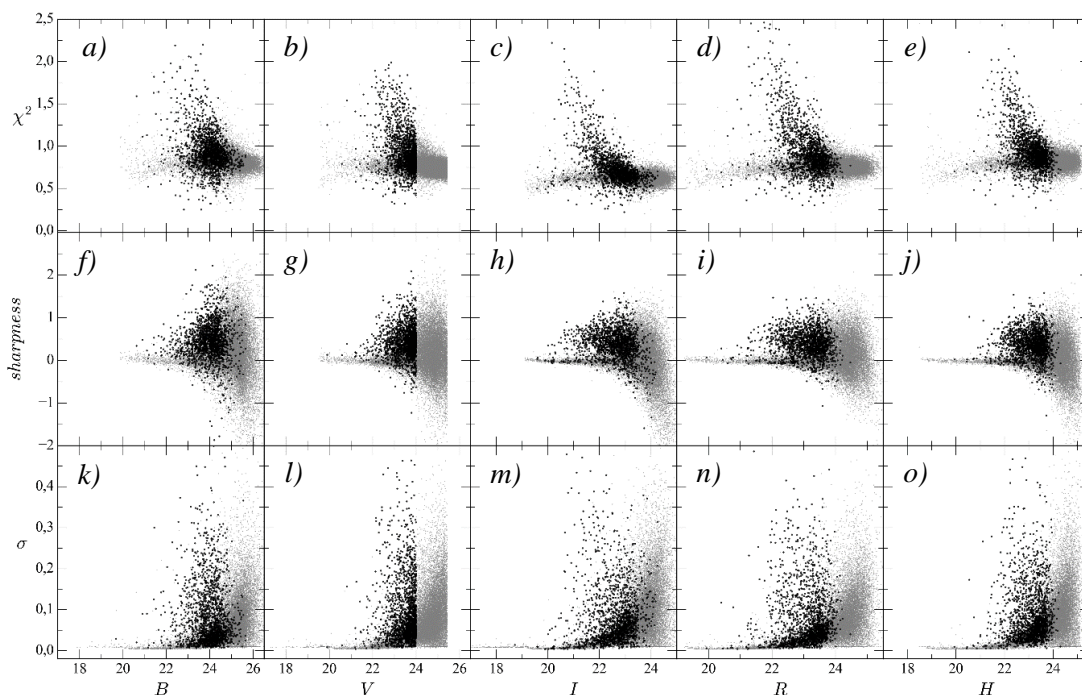
3. Interaktyvus Leo A galaktikos fotometrinių katalogo valymas

3.1. Nežvaigždinių objektų atrinkimas

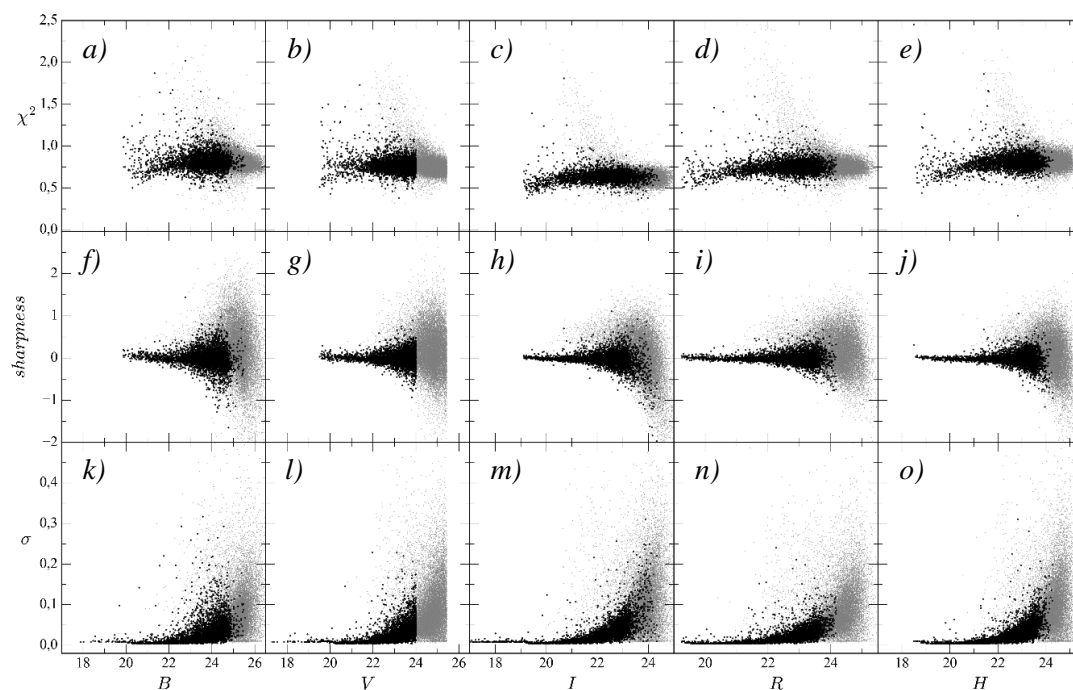
Pagal Subaru teleskopu gautų stebėjimų duomenis sudarytas fotometrinių katalogas apima lauką, į kurį patenka Leo A galaktika ir aplinkinės fono lauko sritys, o tai reiškia, jog šiam laukui būdingi dideli paviršinio žvaigždžių tankio skirtumai, galintys lemti fotometrinių duomenų netikslumus. Atliekant žvaigždžių fotometriją, bandoma aptikti atskirus žvaigždinius objektus, todėl matuojamame lauke susidūrus su išskirtinėmis savybėmis pasižyminčiais objektais, tikėtina, jog jų fotometriniai parametrai bus įvertinti klaidingai. Problemų gali sukelti itin artimi objektai, kurių vaizdai nuotraukose persidengia, arba foninės galaktikos, pasižyminčios išplitusiu (lyginant su žvaigždiniais objektais) vaizdu. Norint panaudoti tiriamo lauko fotometrijos katalogą Leo A galaktikos analizei, reikia atskirti neteisingai išmatuotus objektus nuo žvaigždinių objektų ir pašalinti juos iš katalogo. Siekiant tai padaryti, interaktyvios analizės būdu patikrinti katalogo objektai, atitinkantys sąlygą: $V < 24$ mag (didesnėmis ryškių vertėmis pasižymintys objektai nebuvo tikrinami, nes dėl prie silpnesnių ryškių reikšmingai sumažėjusio pilnumo ir išaugusių paklaidų, duomenys laikomi nepatikimais galaktikos struktūros analizei). Iš 19486 katalogo objektų atitinkančiųjų apsibrėžtą sąlygą yra 5240.

Pagrindinis objektų pašalinimo iš katalogo kriterijus buvo jų išvaizda skirtingų filtrų (B , I , $H\alpha$) nuotraukose bei kompozicinėje B , V ir I filtrų nuotraukoje. Taip pat patikrinti kiekvieno objekto χ^2 (nusako skirtumą tarp matuojamo objekto profilio ir žvaigždžių PSF (angl., *Point Spread Function*) modelio) ir *sharpness* (nusako matuojamo objekto profilio smailumą/bukumą PSF modelio atžvilgiu) parametrai bei fotometrinių paklaidų vertės. Objektai pašalinti orientuojantis į atitinkamas parametrų

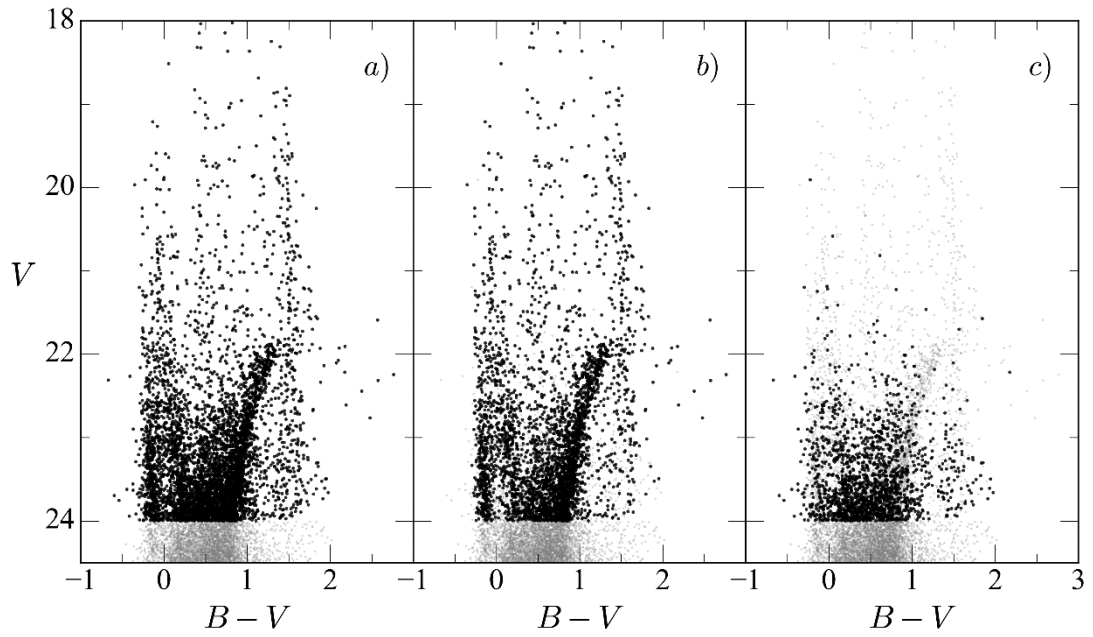
vertes: $\chi^2_i > 1$, $|sharpness_i| > 0,3$ ir $\sigma_i > 0,1$ mag, čia $i = B, V, R, I, Ha$. Interaktyviai patikrinus visus 5240 katalogo objektų ($V < 24$ mag), iš jų pašalinti 1692 (rezultatai pavaizduoti 1-6 pav.).



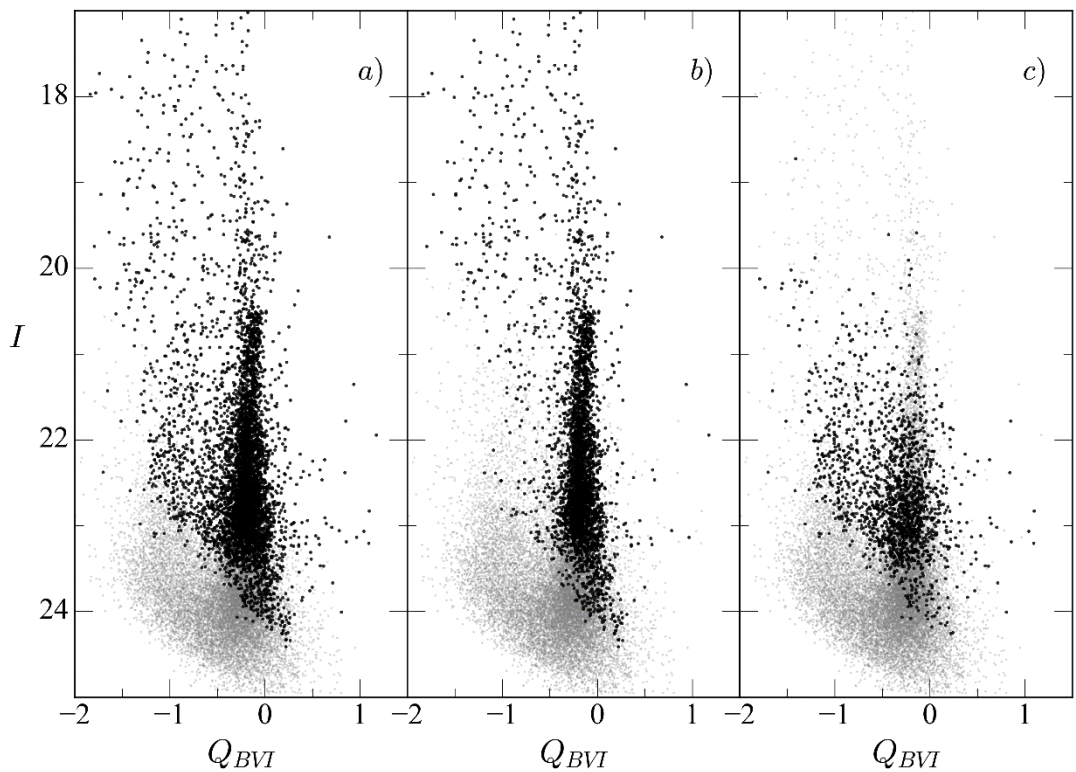
1 pav. Interaktyviu būdu iš Leo A galaktikos fotometrinių katalogo pašalintų objektų (juodi taškai) fotometrinių parametų priklausomybė nuo B, V, I (1692 objektai), R (1680) ir Ha (1683) ryškių: a-e) χ^2 – PSF modelio priderinimo prie duomenų tikslumą nusakantis parametras; f-j) $sharpness$ – matuojamo objekto profilio smailumą PSF modelio atžvilgiu nusakantis parametras; k-o) σ – fotometrinės paklaidos. Pilkais taškais pažymėti visi katalogo objektai, turintys B, V ir I ryškius (19486).



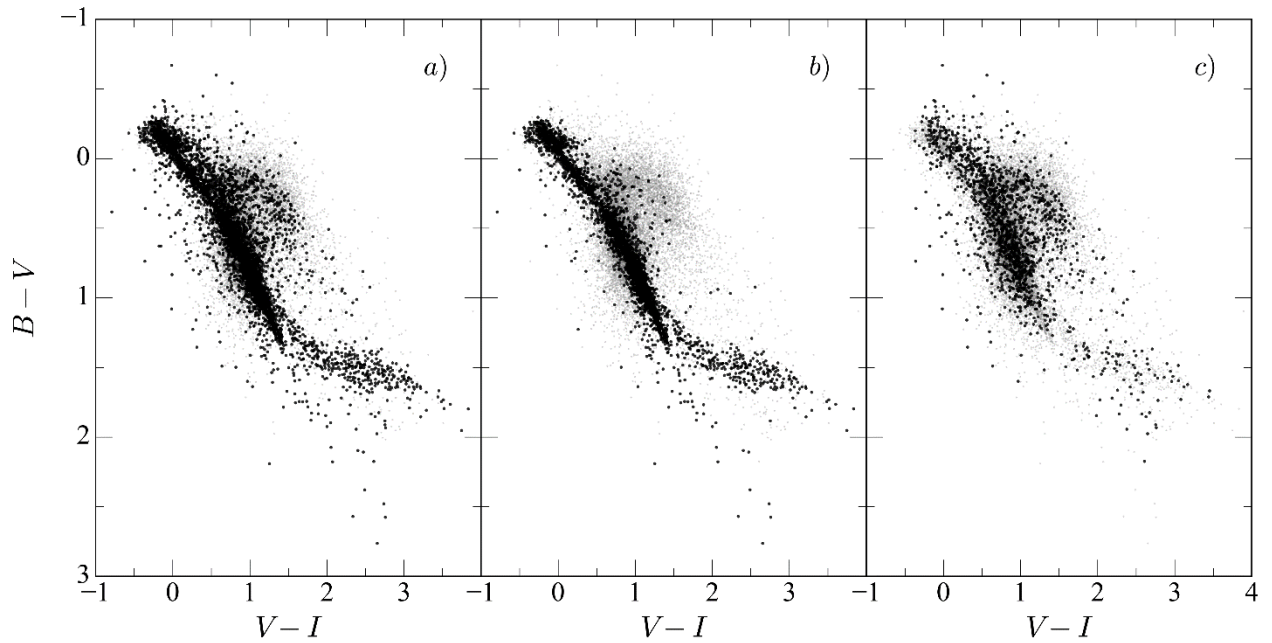
2 pav. Po interaktyvaus Leo A galaktikos fotometrinių katalogo valymo likusių objektų fotometrinių parametų priklausomybė nuo B, V, I (3548 objektai), R (3464) ir Ha (3506) ryškių (žymėjimai sutampa su 1 pav.).



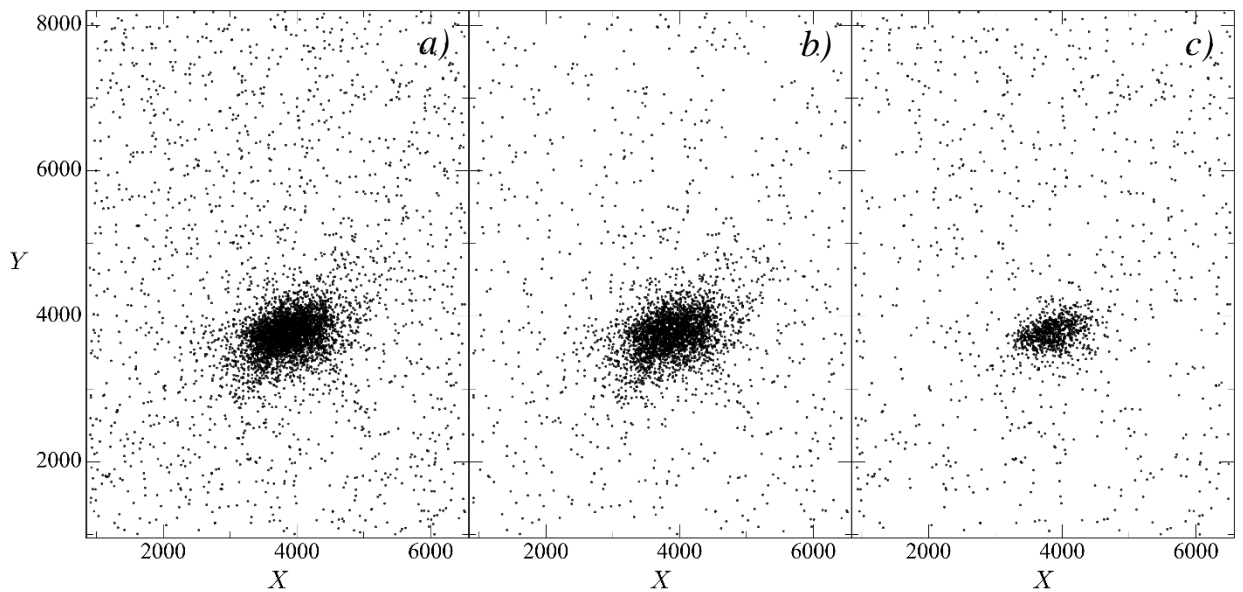
3 pav. Leo A galaktikos fotometrinio katalogo interaktyvaus valymo rezultatai: a) objektai, kurių $V < 24$ ($N = 5240$); b) po katalogo valymo likę objektai (3548); c) pašalinti objektai (1692). Pilkais taškais diagramose pavaizduoti visi katalogo objektai.



4 pav. Leo A galaktikos fotometrinio katalogo interaktyvaus valymo rezultatai: a) objektai, kurių $V < 24$; b) po katalogo valymo likę objektai; c) pašalinti objektai.



5 pav. Leo A galaktikos fotometrinio katalogo interaktyvaus valymo rezultatai: a) objektai, kurių $V < 24$; b) po katalogo valymo likę objektai; c) pašalinti objektai.



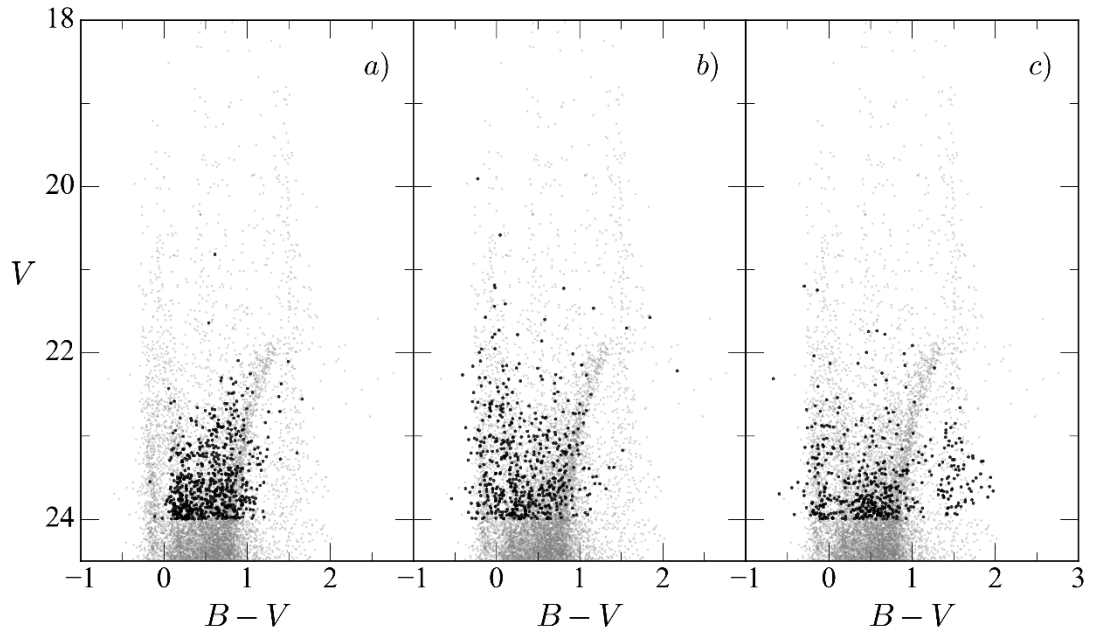
6 pav. Leo A galaktikos fotometrinio katalogo interaktyvaus valymo rezultatai: a) objektai, kurių $V < 24$; b) po katalogo valymo likę objektai; c) pašalinti objektai.

3.2. Nežvaigždinių objektų tipai

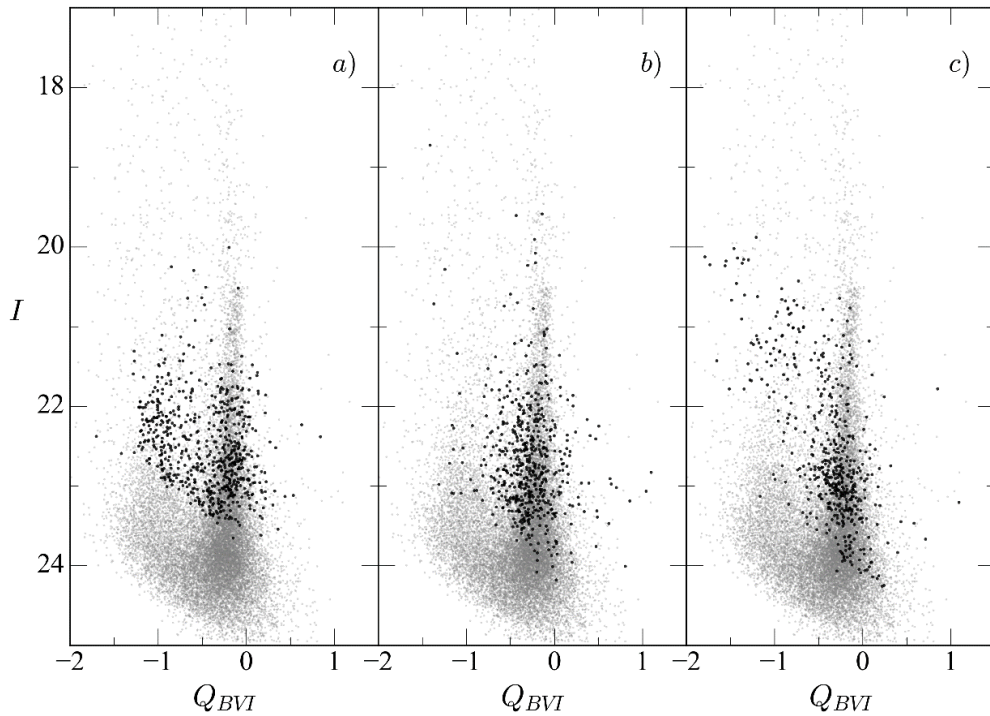
Iš katalogo pašalinti objektai pagal savo išvaizdą suskirstyti į tris grupes:

- Galaktikos – objektai pasižymintys išplitusiu (žvaigždžių atžvilgiu) vaizdu ($N = 643$);
- Gretimi objektai – neišskirtos žvaigždės („blendos“) tankiose tiriamo lauko srityse arba žvaigždžių spiečiuose ($N = 548$);

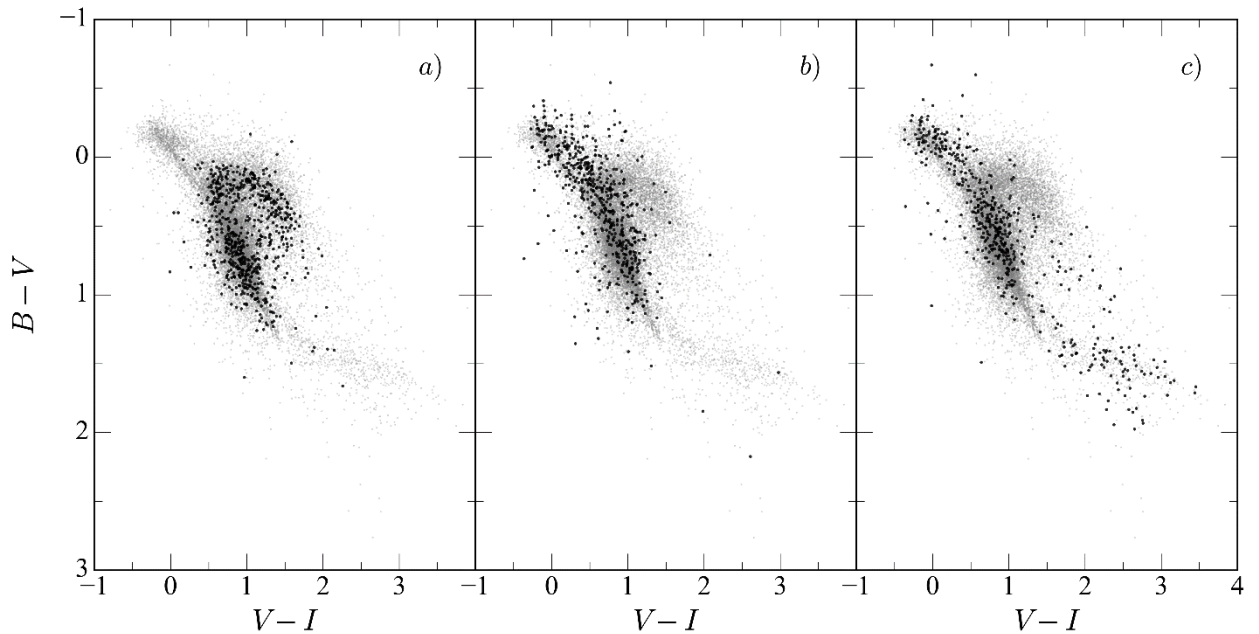
- Blogai išmatuoti objektai – fotometravimo klaidos, t. y., matavimai srityse, kuriose nėra aiškaus taškinio objekto, arba objektai pasižymintys blogais fotometriniais parametrais, tačiau pagal savo išvaizdą nepatenkantys nė į vieną iš pirmų dviejų grupių ($N = 501$).



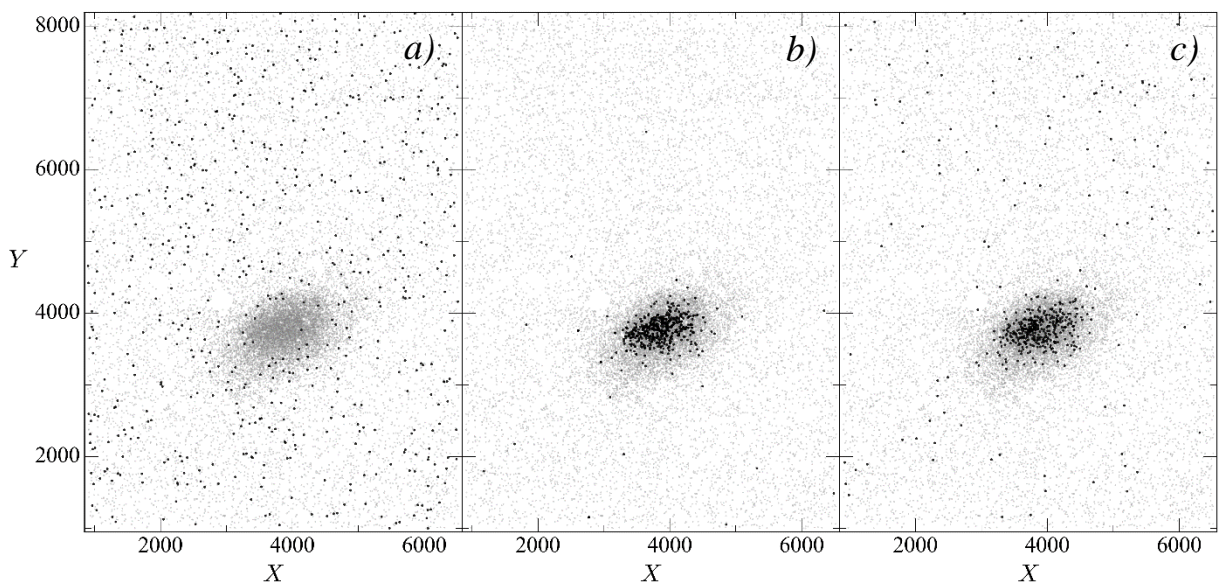
7 pav. Skirtingų tipų objektų, interaktyviu būdu pašalintų iš Leo A galaktikos katalogo, padėtys $V, B - V$ spalvos-ryškio diagramoje: a) galaktikos (643 objektai); b) gretimi objektai (548); c) blogai išmatuoti objektai (501). Pilki taškai – visi katalogo objektai.



8 pav. Skirtingų tipų objektų padėtys I priklausomybės nuo Q_{BVI} parametro diagramoje: a) galaktikos; b) gretimi objektai; c) blogai išmatuoti objektai.



9 pav. Skirtingų tipų objektų padėtys dvispalvėje ($B - V$ spalvos rodiklio priklausomybės nuo $V - I$) diagramoje: a) galaktikos; b) gretimi objektai; c) blogai išmatuoti objektai.



10 pav. Skirtingų tipų objektų regimasis erdvinis pasiskirstymas: a) galaktikos; b) gretimi objektai; c) blogai išmatuoti objektai. Pilki taškai – visi katalogo objektai.

Foninėms galaktikoms būdingas tolygus pasiskirstymas tiriamame lauke su išimtiną sritimi, sutampančia su tankia centrine Leo A galaktikos dalimi (10a pav.). Šie objektai pasižymi kitokiomis spalvos rodiklių vertėmis nei yra būdinga žvaigždiniams objektams (7-9 pav. pavaizduotose diagramose matomas Leo A galaktikos žvaigždžių sekų ir foninių galaktikų atsiskyrimas). Priešingai nei

galaktikos, kitoms dviem grupėms priklausantys objektai dominuoja centrinėse galaktikos srityse (10b-c pav.), kuriose dėl prastos stebėjimų skyros persidengia tankiai išsidėsčiusių objektų vaizdai. Tokie objektai dažniausiai yra neišskirtos žvaigždės, todėl, nepaisant to, kad jų fotometrinių matavimų įverčiai yra prasti, jų ryškiai ir spalvų rodikliai išlieka gan artimi tiems, kurie yra būdingi įprastoms žvaigždėms (7-9 pav.).

4. Fono žvaigždžių valymas iš spalvos-ryškio diagramų

Leo A galaktika yra Vietinės grupės narė, taigi tai santykinai artimas mūsų galaktikai objektas ir danguje užima pakankamai didelį plotą (didysis pusašis: $a = 8'$, ašių santykis: $b/a = 0,6$, Vansevičius ir kt. 2004), jog į tiriamąjį lauką patektų daug fono objektų, t. y., Leo A galaktikos kryptimi stebimų Paukščių Tako žvaigždžių. Išorinėse galaktikos srityse stipriai sumažėja žvaigždžių tankis ir fono objektai ima dominuoti, todėl regimajame erdviniame pasiskirstyme tikrasis galaktikos dydis ir forma tampa neįžvelgiami. Dėl šios priežasties foninių objektų atskyrimas nuo Leo A galaktikai priklausančių žvaigždžių yra itin svarbus žingsnis, siekiant iširti galaktikos struktūrą.

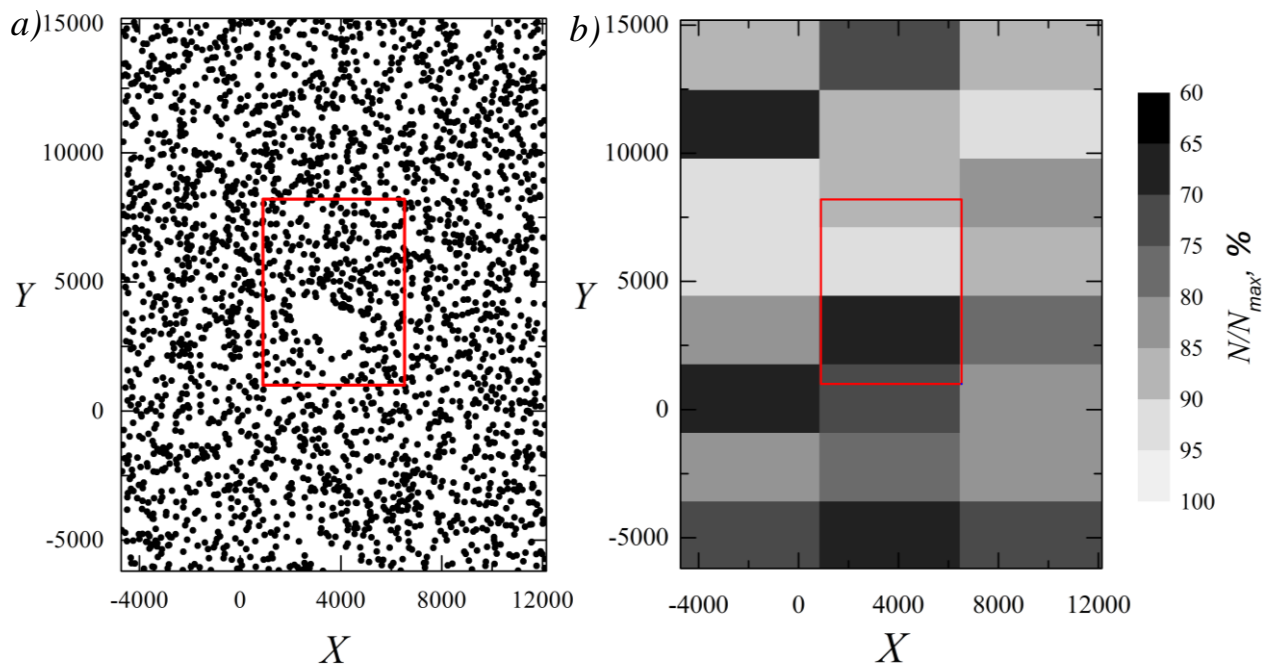
Atskirti Leo A galaktikos žvaigždes nuo Paukščių Tako žvaigždžių padeda jų fotometriniai parametrai. Bet kokiai žvaigždžių populiacijai priklausantys objektai spalvos-ryškio diagramoje suformuoja evoliucines sekas, nurodančias tos populiacijos savybes (amžių, žvaigždėdaros istoriją). Dideli atstumo bei evoliucinių savybių skirtumai tarp stebimų Leo A ir Paukščių Tako galaktikoms priklausančių žvaigždžių lemia jų suformuojamų sekų spalvos-ryškio diagramose atsiskyrimą. Dėl šios priežasties spalvos-ryškio diagramos gali būti panaudotos kaip įrankis fono objektų pašalinimui iš Leo A galaktikos fotometrinių katalogo.

4.1. Fono žvaigždžių regimojo pasiskirstymo tolygumas

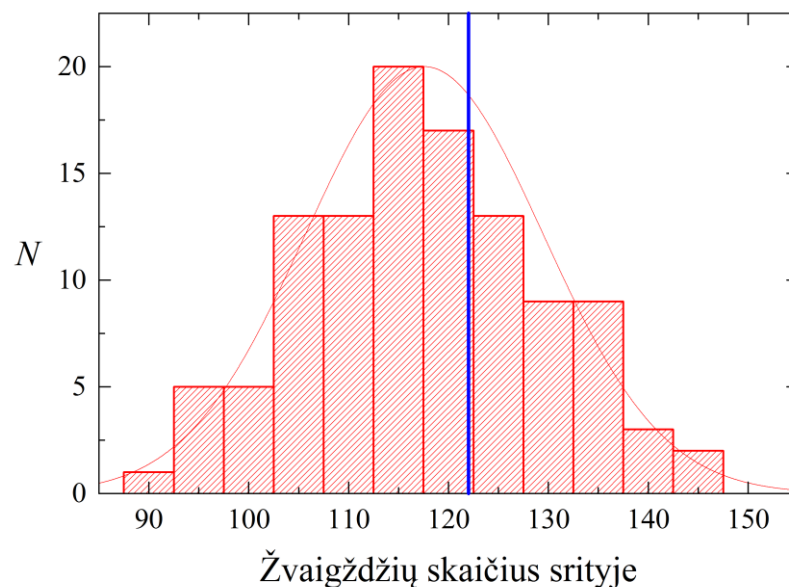
Į tiriamą lauką patenkančių Paukščių Tako žvaigždžių fotometrinių savybės nėra susijusios su jų padėtimi stebimajame erdviniame pasiskirstyme, todėl spalvos-ryškio diagramos fono objektų šalinimui iš tiriamo lauko gali būti naudojamos tik tokiu atveju, jei fono žvaigždės tiriamame lauke yra pasiskirsčiusios tolygiai. Esant reikšmingiems fono objektų paviršinio tankio gradientams tiriamajame lauke, valymas pagal fotometrinius parametrus gali dar labiau sustiprinti netolygumus erdviniame fono objektų pasiskirstyme, o tai neleistų patikimai iširti galaktikos struktūros savybių. Siekiant įvertinti fono žvaigždžių paviršinio tankio tolygumą, pasinaudota Sloan dangaus apžvalgos (angl., *Sloan Digital Sky Survey, SDSS*; Albareti ir kt. 2016) duomenimis. Ši apžvalga vykdoma 2,5 m

teleskopu Apache Point observatorijoje (Naujoji Meksika, JAV), o jos tikslas yra ištirti žvaigždžių, galaktikų bei kvazarų fotometrines ir spektrines savybes šiaurinėje hemisferoje. Programos vykdymo metu sukaupti duomenys jau apima 1/3 dangaus skliauto. Didelis šios apžvalgos duomenų kiekis suteikia galimybę ištirti fono žvaigždžių paviršinio tankio tolygumą Leo A galaktikos aplinkoje ir įvertinti nedidelio kiekio Subaru teleskopu gautų duomenų taikymo tinkamumą, fono žvaigždžių šalinimo metodikai kurti.

Analizei panaudotų SDSS duomenų padengiamas laukas yra 9 kartus didesnis už Subaru teleskopo duomenų apimamą sritį (11 pav.). Iš SDSS duomenų katalogo išskirti žvaigždinio tipo objektai, kurie dar papildomai apriboti sąlyga $g < 22$ mag (artėjant link ribinių ryškių, Žemės atmosfera gali stipriai paveikti antžeminių stebėjimų duomenų pilnumą bei jų fotometrinių parametrų tikslumą, todėl analizės rezultatų patikimumui užtikrinti apsiribota tik ryškiausiais katalogo objektais). Tiriamas SDSS duomenų laukas buvo padalintas į smulkesnes zonas (11b pav.), savo dydžiu atitinkančias Subaru teleskopo duomenų laukelyje fono objektų analizei pasirinktos srities matmenis, t. y., ~40% viso Subaru duomenų tiriamojo lauko ploto (žiūrėti 4.2. poskyrį, 13 pav.). Siekiant gauti patikimesnę statistinį rezultatą, žvaigždžių skaičius tokiose fiksuoto dydžio zonose nustatytas ir atlikus jų pastumdymus x , y arba x ir y ašių kryptimis, atstumais, lygiais pusei arba ketvirtadaliui šių zonų kraštinių ilgių. Tokiu būdu iš viso gauti 135 žvaigždžių skaičiaus vienodo ploto zonose įverčiai, iš kurių 110 buvo panaudoti sudarant tokių zonų skaičiaus skirstinį priklausomai nuo žvaigždžių skaičiaus jose (25 zonos apima Leo A galaktikos objektus, todėl jos neįtrauktos į fono žvaigždžių tolygumo tiriamame lauke analizę) (12 pav.). Sprendžiant pagal gauto skirstinio plotį pusaukštyje, Leo A galaktikos aplinkoje fono žvaigždžių paviršiniam tankiui būdingos variacijos siekia ~30%, tačiau nagrinėjant regimąjį žvaigždžių pasiskirstymą, matyti, jog tokios variacijos nesuformuoja reikšmingų fono objektų paviršinio tankio netolygumų tiriamajame lauke. Žvaigždžių, patenkančių į Subaru teleskopo duomenų ribose išskirtą fono lauko sritį, paviršinis tankis yra artimas vidutinei vertei Leo A galaktikos aplinkoje.



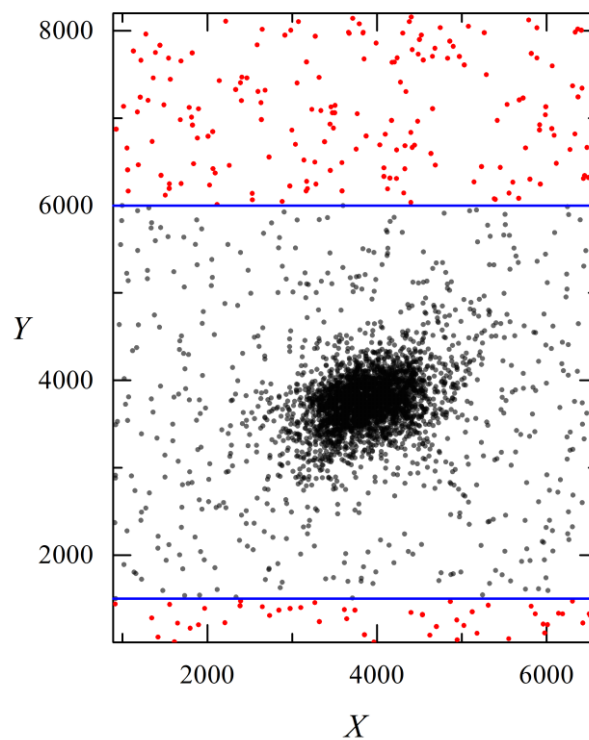
11 pav. Sloan dangaus apžvalgos (SDSS) duomenys: a) regimasis žvaigždinių objektų pasiskirstymas Leo A galaktikos aplinkoje; b) paviršinio žvaigždžių tankio skirtumai SDSS duomenų lauke. Skirtingos spalvos vieno ploto zonos žymi žvaigždžių skaičius, sunormuoto į maksimalų išskirtoms zonoms priklausančių žvaigždžių skaičių, įvertį procentais. Raudonos linijos žymi Subaru teleskopo duomenų padengiamo lauko ribas.



12 pav. Fono žvaigždžių (SDSS duomenys) paviršinio tankio kitimo Leo A galaktikos aplinkoje histograma, t. y., vieno ploto zonų skaičiaus skirstinys priklausomai nuo žvaigždžių skaičiaus jose. Mėlyna linija žymi SDSS katalogo žvaigždžių, patenkančių į Subaru teleskopo duomenų ribose išskirtą fono lauko sritį (13 pav.), skaičių.

4.2. Fono objektų tankis spalvos-ryškio diagramose

Fono objektų pasiskirstymui spalvos-ryškio diagramose nustatyti panaudoti tiriamojo lauko objektai, patenkantys į nuošaliau nuo galaktikos esančias sritis: $Y[1000; 1500]$ ir $Y[6000; 8200]$ (13 pav.). Pagal objektų pasiskirstymą spalvos-ryškio diagramose, siekiama pašalinti į tiriamąjį lauką besiprojektuojančias Paukščių Tako žvaigždes, todėl rezultatų patikimumui užtikrinti, analizei panaudotas interaktyvaus patikrinimo metu išvalytas katalogas ($V < 24$ mag), neįskaitantis reikšmingos dalies foninių galaktikų bei kitų prastai pamatuotų objektų, lemiančių duomenų sklaidą diagramose. Į pasirinktas fono lauko sritis patenka 227 objektai.



13 pav. Tiriamojo lauko žvaigždžių regimasis pasiskirstymas ($V < 24$). Mėlynos linijos žymi galaktikos lauko ribas, juodi taškai yra pastarajam priklausantys objektai ($N = 3321$), raudoni taškai – fono lauko objektai ($N = 227$).

Fono objektų tankio pasiskirstymas V , $V - I$ ir $V, B - V$ spalvos-ryškio diagramose gaunamas vykdant toliau nurodytus žingsnius.

I) Pradinis tankio pasiskirstymas

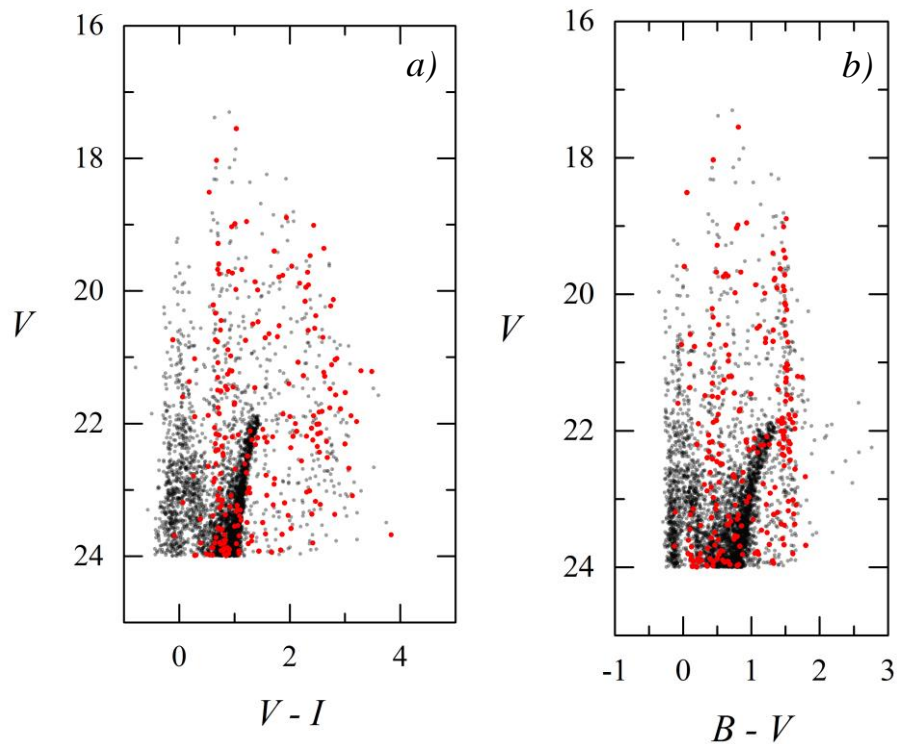
- Sukuriamos tuščios matricos su $0,01 \times 0,01$ mag² dydžio ląstelėmis: $V, V - I$ diagramos atveju, ryškių ribose nuo 16 iki 25 (V) ir nuo -1 iki 5 ($V - I$), $V, B - V$ diagramos atveju – nuo 16 iki 25 (V) ir nuo -1 iki 3 ($B - V$).

- Kiekvienai iš 227 fono žvaigždžių apskaičiuojama tikimybė pakliūti į tam tikrą matricos ląstelę. Tikimybė apskaičiuojama pagal dvimatį Gausinį pasiskirstymą (tūris po Gausiniu paviršiumi yra sunormuotas į vienetą):

$$P(x_x, x_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x_x-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{x_y-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right]\right),$$

čia σ_x ir σ_y , atitinkamai, žvaigždės $V-I$ (arba $B-V$) spalvos indekso ir V ryškio fotometrinės paklaidos, μ_x, μ_y – žvaigždės $V-I$ ($B-V$) spalvos indekso ir V ryškio vertės, x_x, x_y – matricos ląstelės koordinatės.

- Abiejų diagramų atvejais, visų žvaigždžių Gausinių pasiskirstymų vertės ląstelėse yra sumuojamos atitinkamose matricose, o galutinės diagramos yra sunormuojamos taip, jog ląstelių suma jose būtų lygi vienetui (16a, 17a pav.).



14 pav. Tiriamojo lauko žvaigždžių spalvos-ryškio diagramos: a) $V, V-I$; b) $V, B-V$. Juodi taškai – galaktikos laukui priklausantys objektai ($N_{V<24} = 3321$), raudoni taškai – fono lauko objektai ($N_{V<24} = 227$).

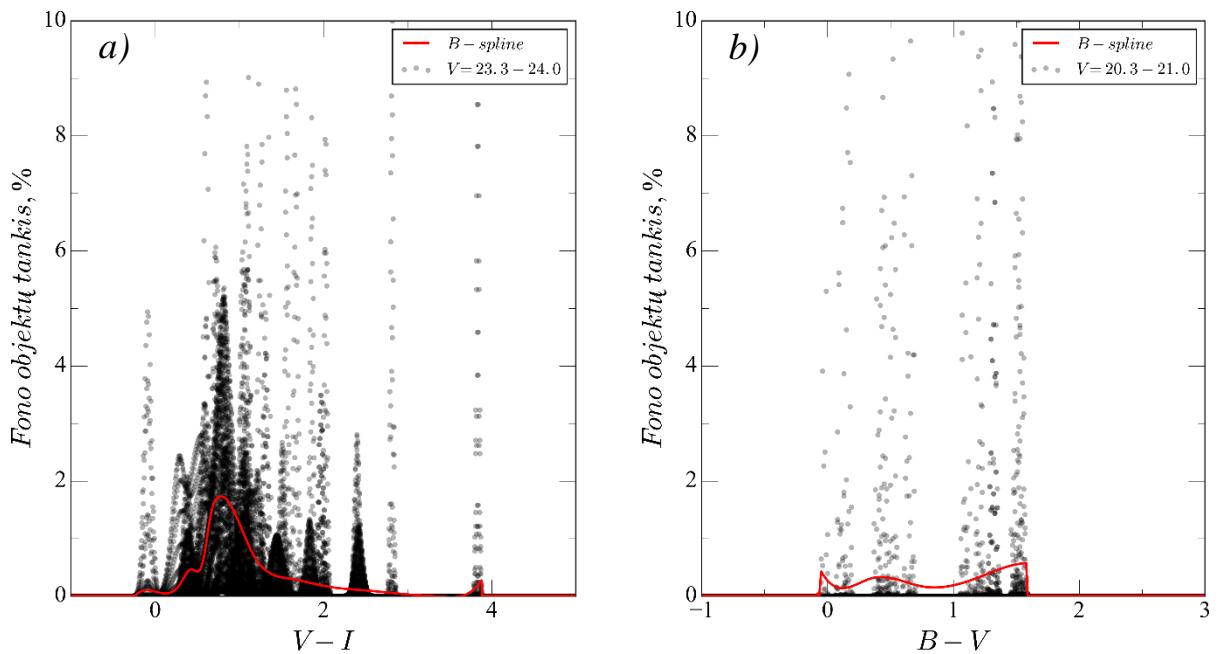
II) Fono objektų tankio pasiskirstymo spalvos-ryškio diagramose glotninimas

Dėl nedidelio turimų fono objektų skaičiaus ir didelės jų regimojo ryškio sklaidos (Paukščių Takui priklausančių žvaigždžių regimasis ryškis stipriai priklauso nuo atstumo iki jų, todėl fono objektų ryškių vertės gali apimti keletą ar net keliolikos ryškių intervalą spalvos-ryškio diagramoje) gaunamas tik dalinis fono objektų tankio pasiskirstymas. Siekiant gauti tolygų, fono objektams būdingas sritis padengiantį, tankio pasiskirstymą diagramose, atliekamas pradinio tankio pasiskirstymo glotninimas.

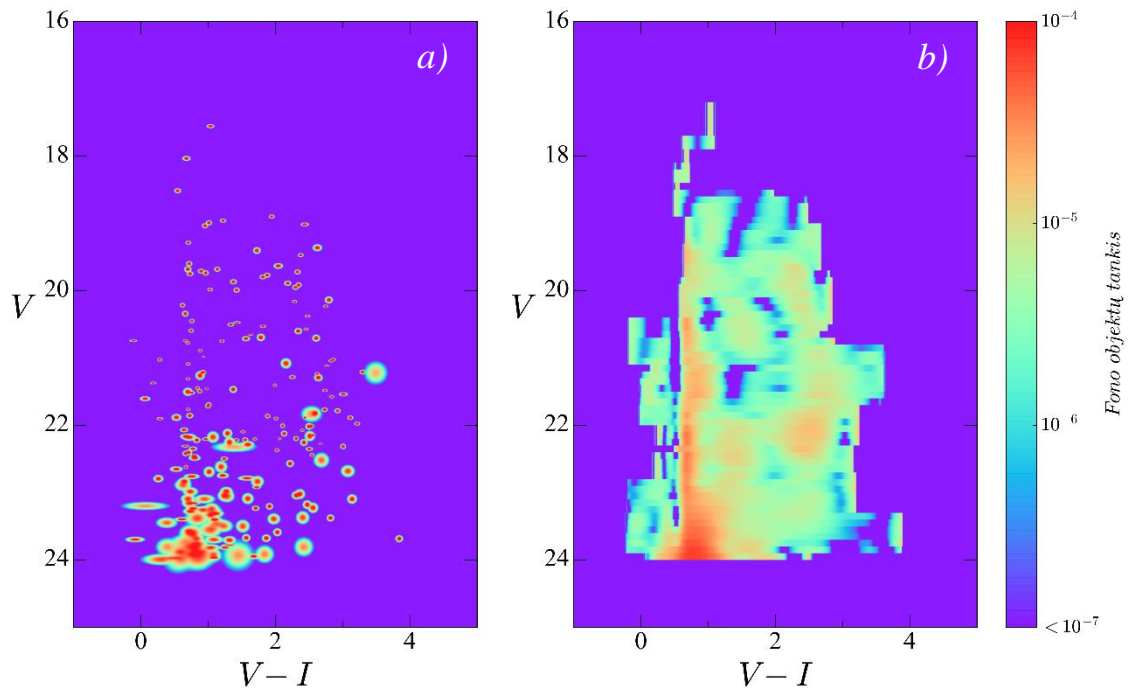
Glotninimo žingsniai:

- Pradinėje fono objektų tankio pasiskirstymo spalvos-ryškio diagramoje, pradedant nuo apatinės jos dalies ($V = 24$), pasirenkama tam tikro pločio (y ašies kryptimi) juosta, apimanti visas spalvos rodiklio vertes (x ašies kryptimi), ir nusibraižoma diagrama, vaizduojanti visų į šią juostą patenkančių $0,01 \times 0,01 \text{ mag}^2$ dydžio ląstelių verčių priklausomybę nuo jų padėties x ašyje (15 pav.).
- Gautasis taškų pasiskirstymas yra aproksimuojamas kubiniu B-splainu. B-splainas – tai polinomas, susidedantis iš tam tikro skaičiaus kubinių kreivių segmentų, sujungtų taškuose, vadinamuose mazgais. Netolygaus B-splaino atveju intervalai tarp mazgų yra nevienodi, todėl galima pasirinkti norimą B-splaino glotnumą tam tikruose intervaluose. Pastaroji savybė itin svarbi norint suglotninti fono objektų tankio pasiskirstymą spalvos-ryškio diagramoje, kartu išsaugant Paukščių Tako žvaigždžių suformuojamų sekų formą (t. y., neišplečiant tankio pasiskirstymo srityse, kurioms būdingos labai griežtos ribos). Siekiant gauti kuo realistiškesnį tankio pasiskirstymą, B-splaino mazgų skaičius ir padėtis parinkti kiekvienu priderinimo prie duomenų atveju, atsižvelgiant į duomenų kiekį ir pasiskirstymą. Fono objektai spalvos-ryškio diagramose, x ašies kryptimi, yra susitelkę centrinėje dalyje, todėl diagramų kraštinėse srityse jų tankio pasiskirstymo vertės yra artimos nuliui. Atsižvelgiant į tai, einant nuo diagramos kraštų iki pirmųjų tankio pasiskirstymo verčių, siekiančių bent 0,1% maksimalios tankio ląstelėse vertės, mazgai sudedami labai tankiai (žingsnis: 0,01 mag), o srityse, kuriose aptinkami fono objektai (t. y., srityse, esančiose tarp kraštinių verčių, siekiančių bent 0,1% maksimalios tankio ląstelėse vertės), mazgų tankis sumažinamas (žingsnis: 0,3 mag). Toks mazgų padėties pasirinkimas leidžia išvengti dėl aproksimacijos dirbtinai atsirandančių darinių srityse, kuriose tankio pasiskirstymas turi būti artimas nuliui, taip pat leidžia suglotninti tankio pasiskirstymą x ašies kryptimi, net ir turint nedaug objektų, bei tuo pat metu išsaugo griežtas ribas tarp šių skirtingo tankio sričių diagramose (15 pav.).

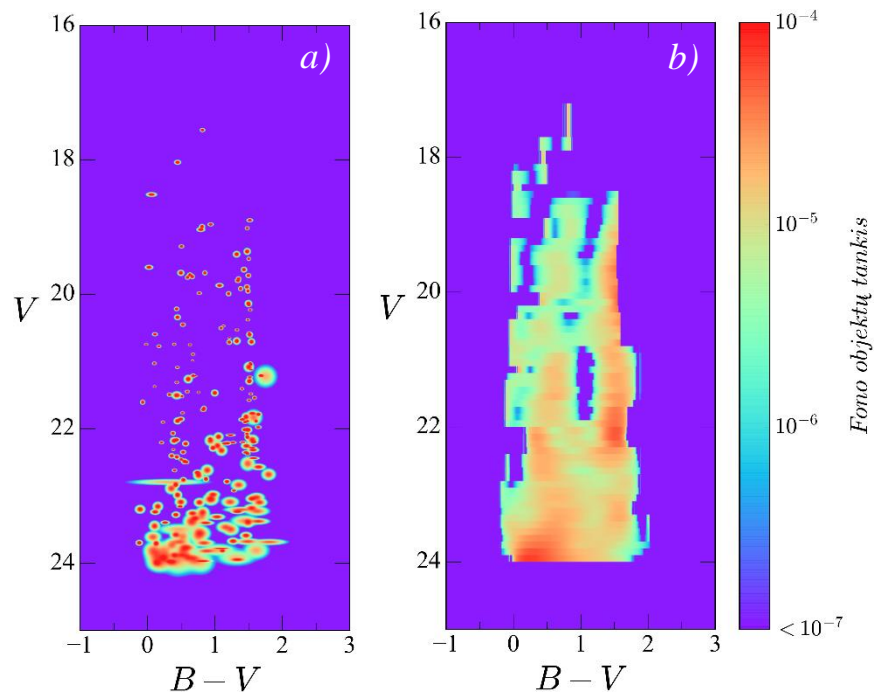
- Gavus B-splainą, aproksimuojantį visų į pasirinktą juostą patenkančių diagramos ląstelių vertes, šios juostos centre išskiriama siauresnė, 0,1 mag pločio, juosta ir ties kiekviena spalvos rodiklio (x ašyje) verte visoms šiai siauresnei juostai priklausančioms ląstelėms (y ašies kryptimi, ties kiekviena spalvos rodiklio verte, jų yra po 10) priskiriamos gauto kubinio B-splaino vertės.
- Pradinėje tankio pasiskirstymo diagramoje pasirinkta juosta paslenkama per jos centrinės juostos plotį (0,1 mag) aukštyn ir kartojama aukščiau aprašyta procedūra. Šie veiksmai kartojami tol, kol kubiniu B-splainu aproksimuotomis vertėmis padengiama visa diagrama. (16b, 17b pav.).



15 pav. Fono objektų tankio pasiskirstymo glotninimui naudotos metodikos taikymo pavyzdžiai – pradinio fono objektų tankio pasiskirstymo (juodi taškai; kiekvienas taškas atitinka tankio vertę $0,01 \times 0,01 \text{ mag}^2$ dydžio ląstelėje, sunormuotą į maksimalią tankio vertę) $\Delta V = 0,7 \text{ mag}$ pločio juostoje aproksimavimas B-splainu (raudona kreivė): a) V , $V-I$ diagramos atveju, ties apatine diagramos sritimi ($V = 23,3-24,0 \text{ mag}$), pasižyminčia didesniu fono objektų tankiu; b) V , $B-V$ diagramos atveju, nedideliu fono objektų skaičiumi pasižyminčioje srityje ($V = 20,3-21,0 \text{ mag}$).



16 pav. Fono objektų tankio pasiskirstymas V , $V-I$ diagramoje: a) pradinis tankio pasiskirstymas, gautas aproksimuojant objektus dvimačiu Gausiniu pasiskirstymu, pagal jų fotometrines paklaidas; b) suglontintas tankio pasiskirstymas, gautas aproksimuojant pradinį tankio pasiskirstymą B-splinais. Diagramos pavaizduotose ribose yra sunormuotos į vienetą (kiekviena diagrama sudaryta iš $0,01 \times 0,01$ mag² dydžio ląstelių).



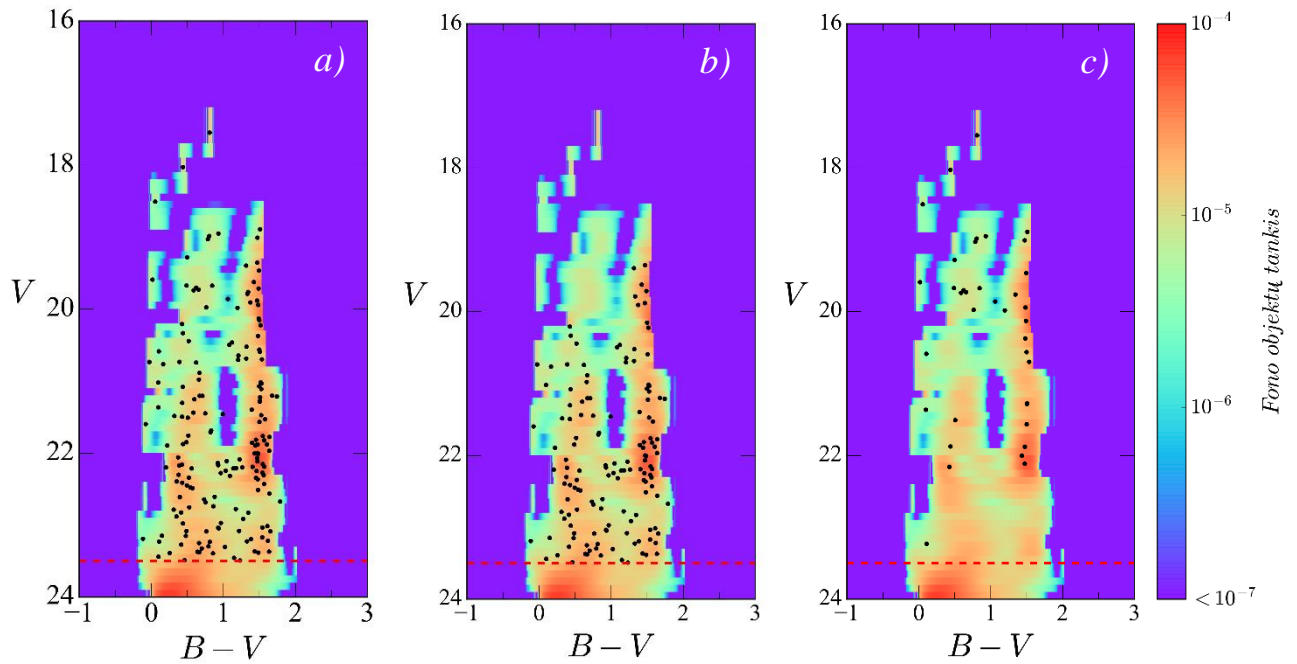
17 pav. Fono objektų tankio pasiskirstymas V , $B-V$ diagramoje. Pavaizduoti duomenys atitinka 16 pav. pateiktą aprašymą.

4.3. Fono lauko objektų valymas iš fono lauko spalvos-ryškio diagramos

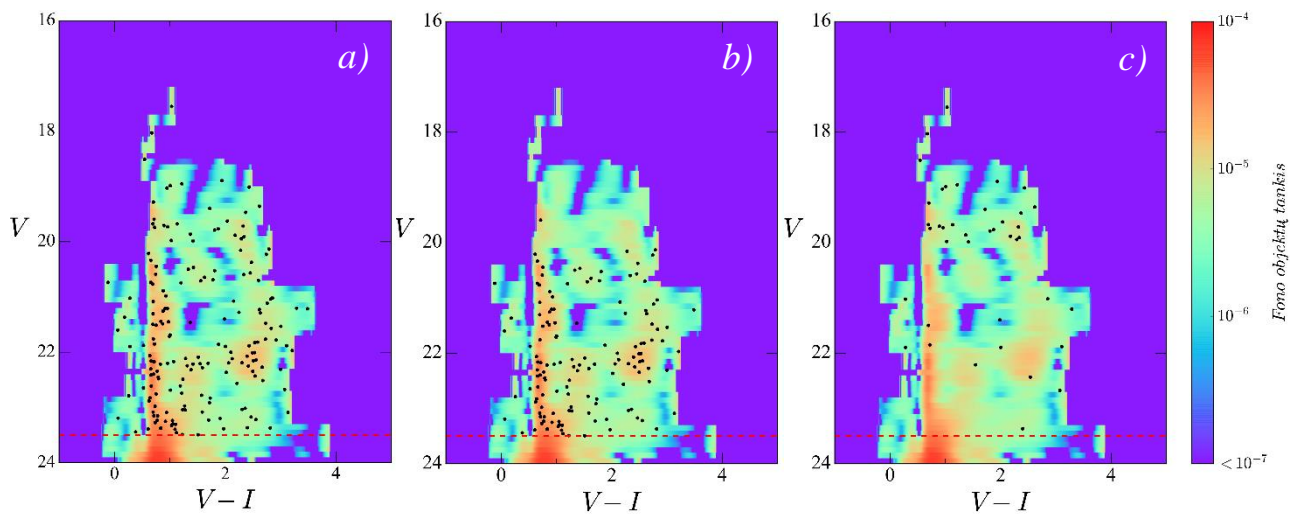
Siekiant patikrinti, ar fono objektų valymo iš spalvos-ryškio diagramos algoritmas veikia tinkamai, pirmiausiai, naudojantis fono objektų tankio pasiskirstymo diagrama, atliktas tų pačių fono laukui priklausančių objektų, kurie buvo panaudoti šiam tankio pasiskirstymui sudaryti, valymas. Siekiant išvengti kraštinių efektų, katalogo valymas vykdytas apsiribojant sąlyga: $V < 23,5$ mag.

Fono objektų spalvos-ryškio diagramos valymo procesas:

- Fono objektų tankio pasiskirstymo diagrama sunormuojama į fono objektų skaičių ($N = 227$, $V < 24$ mag).
- Aplink tikrinamą žvaigždę išskiriama stačiakampė sritis: $\pm 3\sigma_x$, $\pm 3\sigma_y$, čia σ_x – žvaigždės $V - I$ (arba $B - V$) spalvos indekso fotometrinių paklaidų, $\sigma_y - V$ ryškio fotometrinių paklaidų.
- Į išskirtą sritį patenkančių diagramos ląstelių vertės yra susumuojamos ir gaunamas pagal tankio pasiskirstymą numatomas fono žvaigždžių skaičius joje, N . Jei N yra mažesnis, nei apsirėžtas tam tikras žvaigždžių skaičius, N_0 (pasirinkta vertė: $N_0 = 10$), tuomet stačiakampė sritis yra didinama y ašies kryptimi, žingsniu $\Delta\sigma_y = \pm 0,01$ mag, tol, kol pasiekiamas N_0 vertė, arba, kol stačiakampės srities kraštas atsiremia bent į vieną iš diagramos ribų (tokia atveju, tolimesniuose žingsniuose naudojama sukaupioji $N (< N_0)$ vertė).
- N vertė yra lyginama su valomos diagramos žvaigždžių, patenkančių į tą pačią sritį, skaičiumi (N_{zv}):
 - jei $N > N_{zv}$, tikrinama žvaigždė yra pašalinama;
 - jei $N < N_{zv}$, generuojamas atsitiktinis skaičius n_{md} , patenkantis į intervalą $[0; 1]$:
 - jei $n_{md} < N/N_{zv}$, žvaigždė pašalinama,
 - jei $n_{md} > N/N_{zv}$, žvaigždė paliekama.



18 pav. Fono objektų valymo iš fono objektų $V, B - V$ diagramos rezultatai po 10 iteracijų: a) visi fono laukui priklausantys objektai ($N_{V < 23,5} = 179$); b) objektai, kurie buvo pašalinti bent 5 kartus iš 10 ($N = 142$); c) objektai, likę po diagramos valymo ($N = 37$).

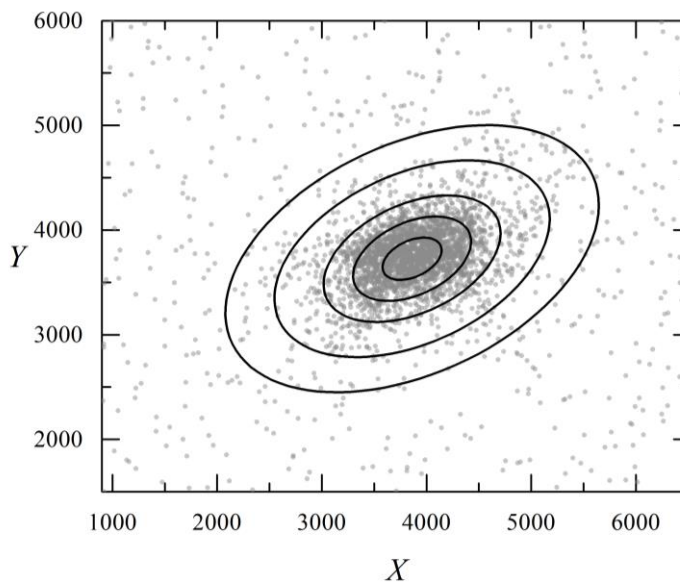


19 pav. Fono objektų valymo iš fono objektų $V, V - I$ diagramos rezultatai po 10 iteracijų: a) visi fono laukui priklausantys objektai ($N_{V < 23,5} = 179$); b) objektai, kurie buvo pašalinti bent 5 kartus iš 10 ($N = 139$); c) objektai, likę po diagramos valymo ($N = 40$).

4.4. Fono objektų valymas iš galaktikos lauko spalvos-ryškio diagramos

Valant galaktikos lauko ($X[900; 6525]$, $Y[1500; 6000]$) spalvos-ryškio diagramą, svarbu atsižvelgti į žvaigždžių paviršinių tankį, kadangi fono objektai tiriamame lauke yra pasiskirstę tolygiai, o srityse, kuriose žvaigždžių regimasis erdvinis pasiskirstymas yra netolygus, atsitiktine žvaigždžių atranka paremtas diagramos valymo metodas lemia didesnę išvalytų objektų skaičių tankiose srityse.

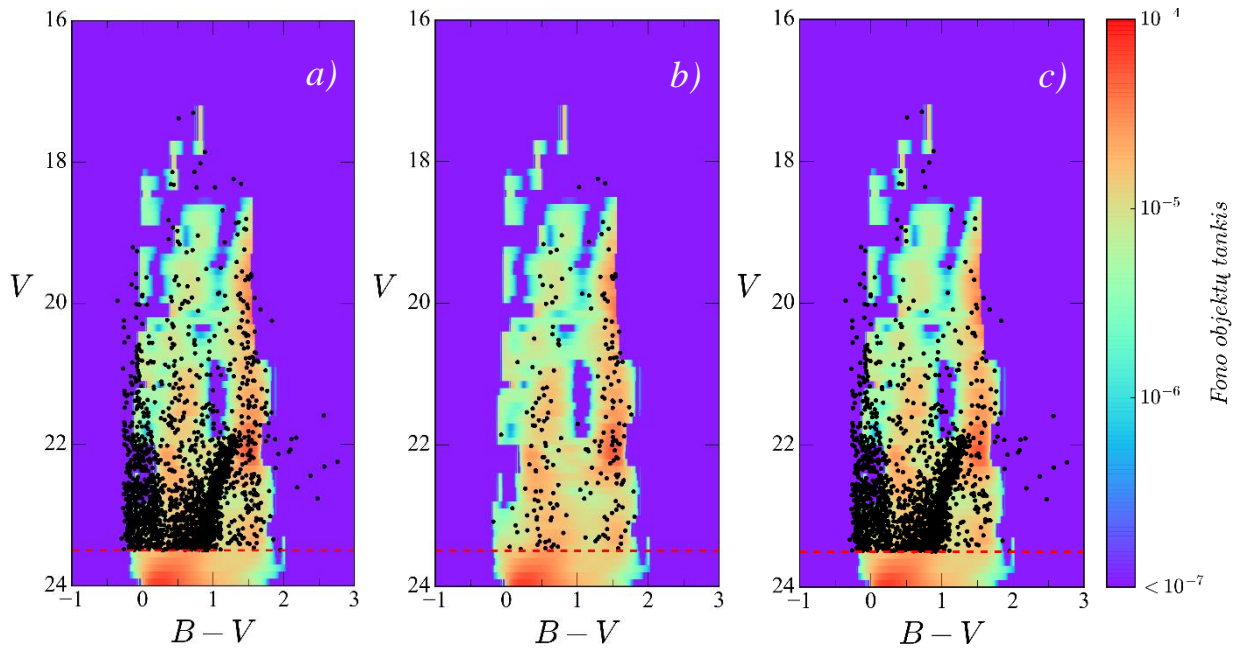
Galaktikos lauko objektų spalvos-ryškio diagramos valymo procesas prasideda nuo tiriamo lauko padalinimo į 6-ias sritis: elipsinę sritį centrinėje Leo A galaktikos dalyje, 4 koncentrinus elipsinius žiedus išorinėse galaktikos srityse bei sritį, apimančią už elipsinių sričių likusią tiriamo lauko dalį (20 pav.). Kiekvienai iš šių sričių priklausančių žvaigždžių spalvos-ryškio diagramos yra valomos atskirai, todėl kiekvienu atveju fono objektų tankio pasiskirstymo diagrama yra sunormuojama į atitinkamos srities plotą galinčių patekti fono objektų skaičių. Tolimesni spalvos-ryškio diagramos valymo algoritmo žingsniai yra analogiški pateiktiems 4.3. poskyryje.



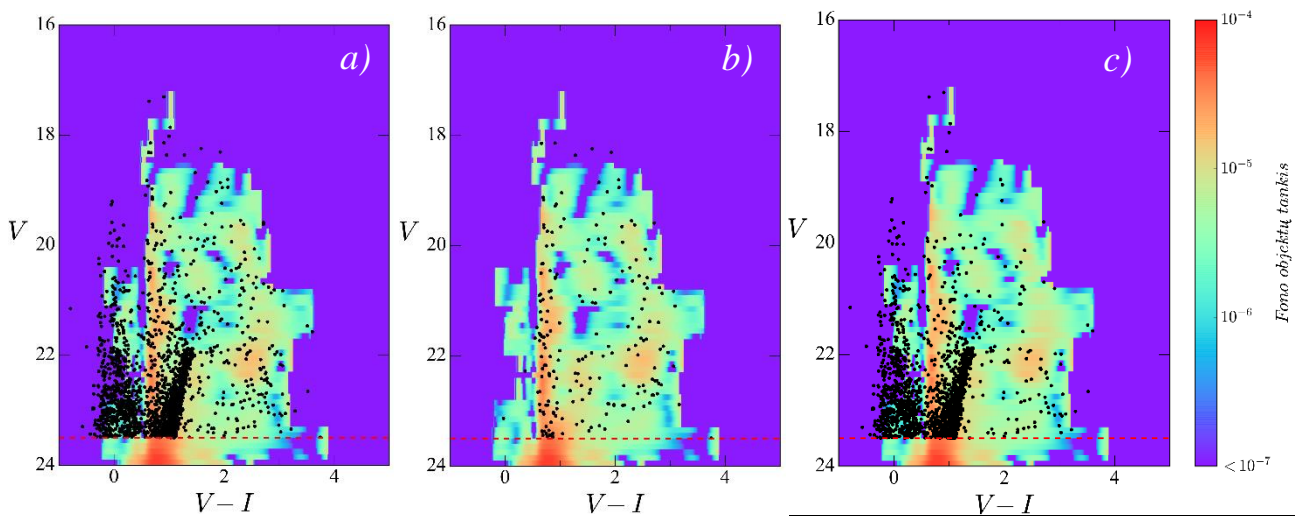
20 pav. Galaktikos lauko padalinimas į 6-ias panašaus paviršinio žvaigždžių tankio sritis: centrinė elipsė (didysis pusašis: $a = 300$), elipsiniai žiedai (dviejų vidinių žiedų plotis: $\Delta a = 300$, išorinių žiedų plotis: $\Delta a = 500$) ir už elipsinių žiedų esantis plotas. Pilki taškai – į galaktikos lauką patenkantys objektai ($V < 24$).

Vienos iteracijos atveju, naudojamas metodas visame galaktikos lauke tolygiai išvalo ~75-84% numatytų pašalinti fono objektų (23a, 24a pav.). Pašalinamų objektų trūkumą lemia ne tik algoritme naudojamas atsitiktinis objektų atrinkimo procesas, bet ir mažas objektų skaičius, panaudotas fono žvaigždžių tankio pasiskirstymo konstravimui, t. y., tankio pasiskirstymas diagramoje neapima visų fono objektams būdingo pasiskirstymo sričių, todėl dalis fono žvaigždžių turi itin mažą tikimybę būti pašalintos. Padidinus iteracijų skaičių iki 10 ir pašalinus objektus, kurie buvo pašalinti ne mažiau nei

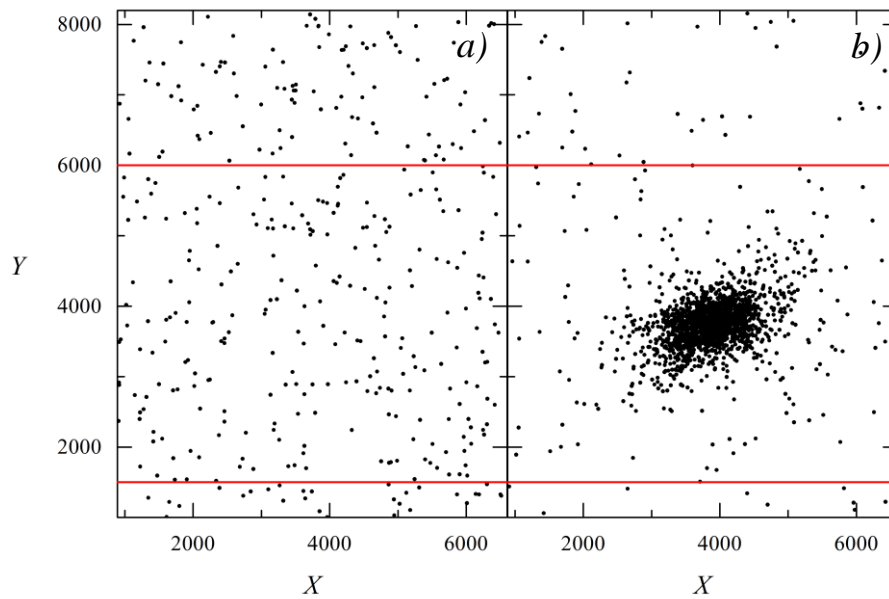
50% atvejų, išvalytų žvaigždžių skaičius sumažėja iki $\sim 70\%$, o regimajame erdviniame pasiskirstyme, srityje, sutampančioje su galaktikos centrine dalimi, atsiranda žvaigždžių trūkumas. Pastarąjį efektą nulemia paviršinio žvaigždžių tankio skirtumai išskirtose galaktikos lauko srityse – esant didiam žvaigždžių skaičiui srityje, sumažėja tikimybė tą patį objektą pašalinti daug kartų (26 pav.). Siekiant patikimesnio fono objektų valymo rezultato, tolimesnėje Leo A galaktikos analizėje naudojamas katalogas, iš kurio buvo pašalinti tik tie fono objektai, kurie 10 iteracijų atvejais buvo pašalinti iš abiejų nagrinėtų spalvos-ryškio diagramų, t. y., $V, V - I$ ir $V, B - V$ (21-22, 25 pav.).



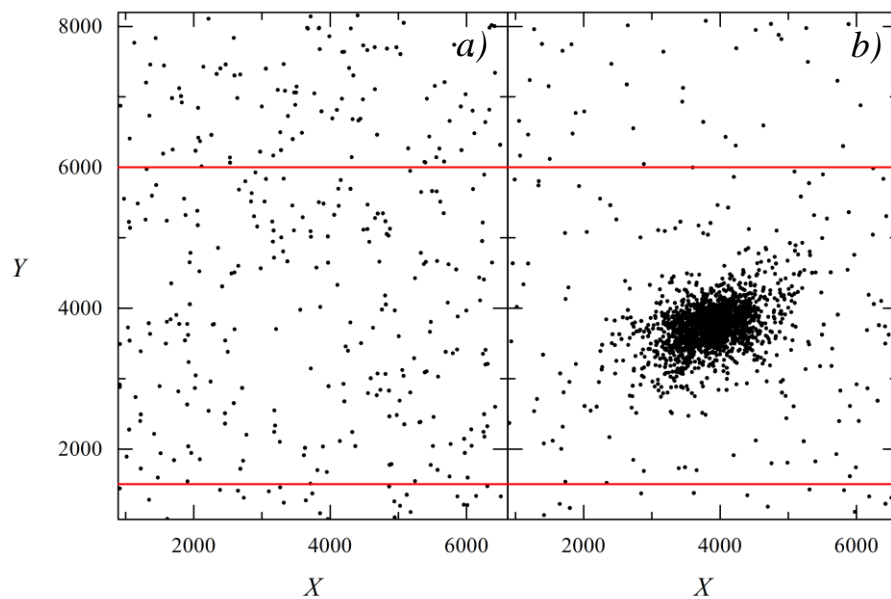
21 pav. Fono objektų valymo iš galaktikos lauko $V, B - V$ diagramos rezultatai po 10 iteracijų: a) visi galaktikos laukui priklausantys objektai ($N_{V<23,5} = 2152$); b) objektai, kurie buvo pašalinti bent 5 kartus iš 10 ($N = 204$); c) objektai, likę po diagramos valymo ($N = 1948$).



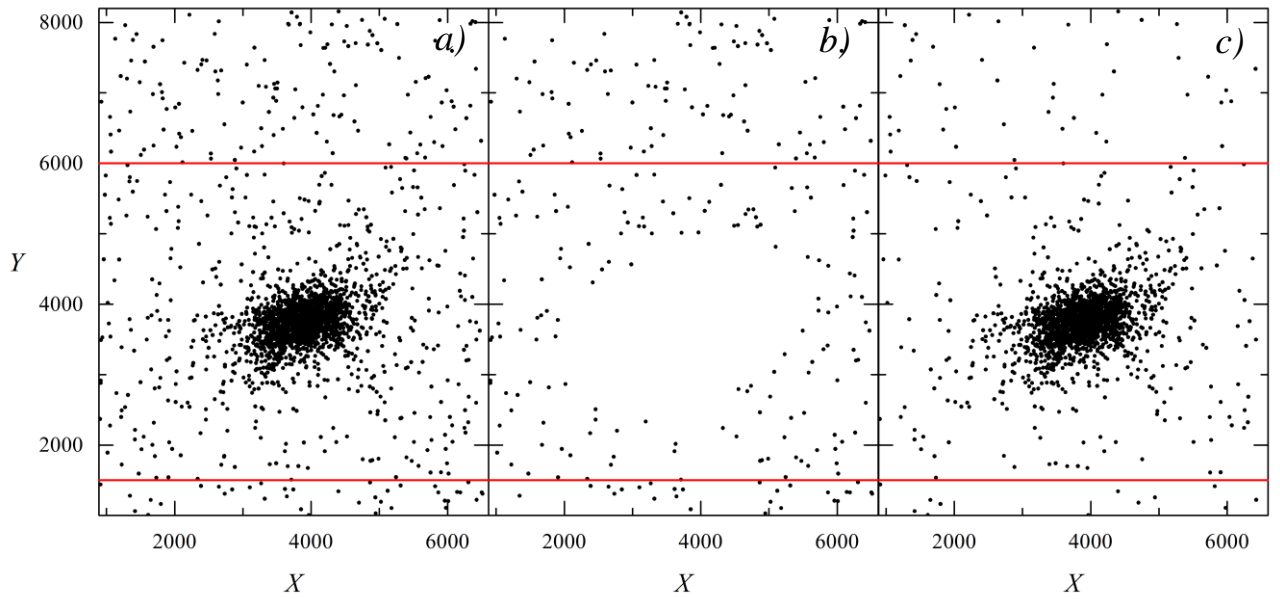
22 pav. Fono objektų valymo iš galaktikos lauko $V, V - I$ diagramos rezultatai po 10 iteracijų: a) visi objektai ($N_{V<23,5} = 2152$); b) objektai, kurie buvo pašalinti bent 5 kartus iš 10 ($N = 201$); c) objektai, likę po diagramos valymo ($N = 1951$).



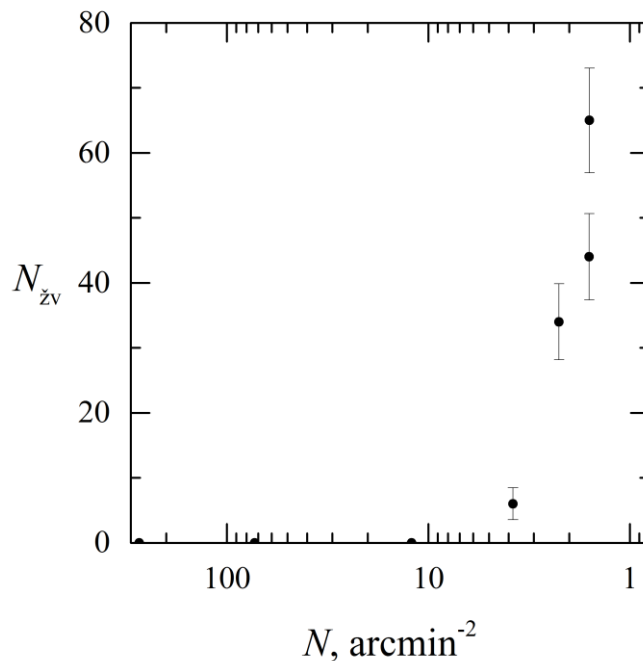
23 pav. Stebimasis žvaigždžių ($V < 23,5$ mag) pasiskirstymas tiriamajame lauke – fono objektų valymo iš galaktikos lauko $V, B - V$ diagramos rezultatai po vienos iteracijos: a) išvalyti objektai (249 objektai galaktikos lauke, 134 – fono laukeliuose); b) po diagramos valymo likę objektai (1903, 45).



24 pav. Stebimasis žvaigždžių ($V < 23,5$ mag) pasiskirstymas tiriamajame lauke – fono objektų valymo iš galaktikos lauko $V, V - I$ diagramos rezultatai po vienos iteracijos: a) išvalyti objektai (221 objektai galaktikos lauke, 129 – fono laukeliuose); b) po diagramos valymo likę objektai (1931, 50).



25 pav. Stebimasis žvaigždžių ($V < 23,5$ mag) pasiskirstymas tiriamajame lauke – fono objektų valymo iš galaktikos lauko spalvos-ryškio diagramų rezultatai (pašalinti objektai, kurie po 10 iteracijų buvo pašalinti iš abiejų, t. y. $V, V - I$ ir $V, B - V$, diagramų ne mažiau nei 50% atvejų): a) visi tiriamojo lauko objektai (2152 objektai galaktikos lauke, 179 – fono laukeliuose) b) išvalyti objektai (149, 122); c) po diagramos valymo likę objektai (2003, 57).



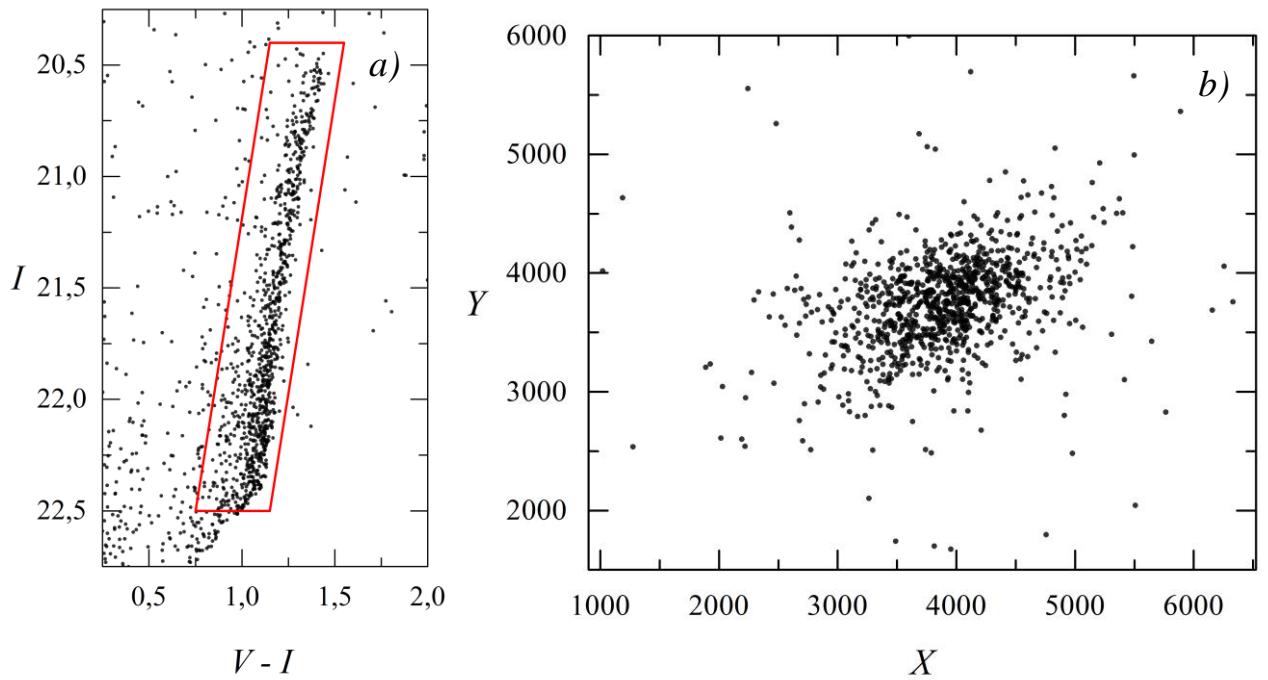
26 pav. Pašalintų fono objektų ($V = 23,5$) skaičiaus priklausomybė nuo paviršinio žvaigždžių tankio ($V = 24$) galaktikos lauke. Paviršinis žvaigždžių tankis nustatytas elipsinės formos žieduose: $x_0 = 3862$, $y_0 = 3726$, P.A. = 115° , $b/a = 0,58$, žiedų plotis išilgai didžiajam pusašiai $\Delta a = 1',7$. Paklaidos: $\sigma_i = \pm \sqrt{N_{zv,i}}$, čia $N_{zv,i}$ – pašalintų žvaigždžių skaičius i -ajame žiede.

5. Leo A galaktikos struktūra

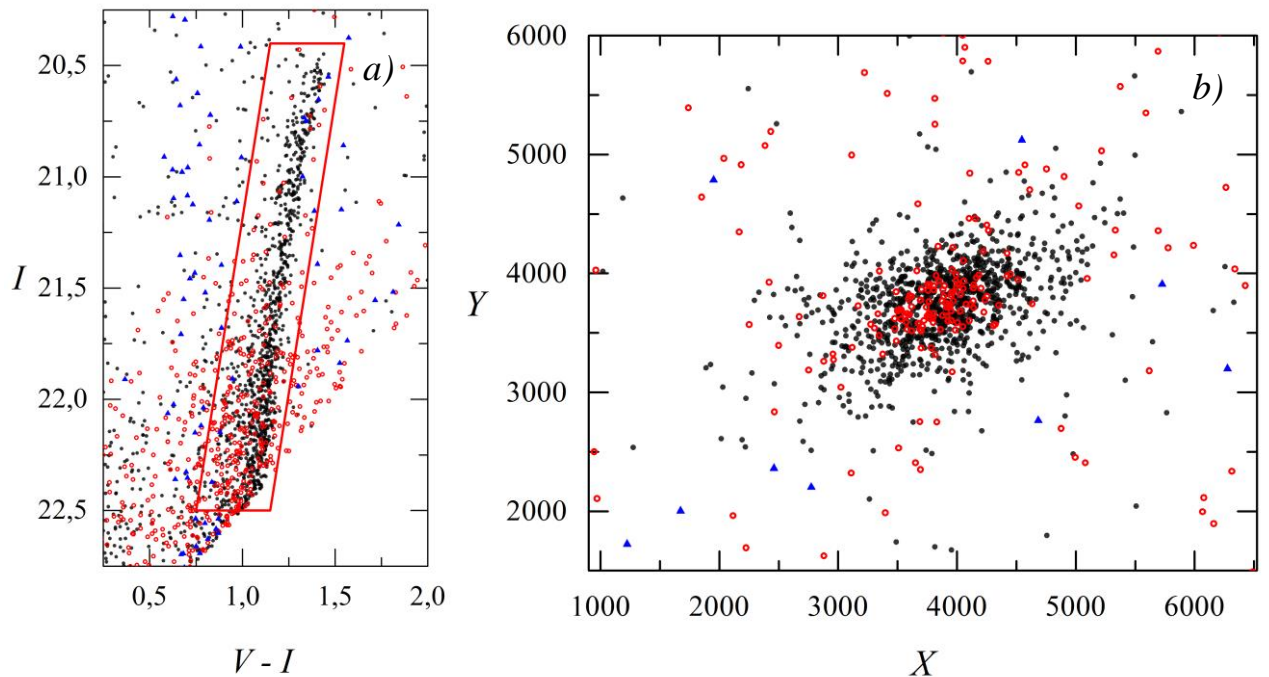
5.1. Raudonųjų milžinių sekos žvaigždės

Raudonųjų milžinių seką (angl., *Red Giant Branch, RGB*) sudaro mažos masės žvaigždės, esančios vėlyvoje evoliucijos stadijoje. Mažos masės žvaigždėms būdinga ilga gyvavimo trukmė, todėl pilnai susiformavusią RGB seką spalvos-ryškio diagramoje galime stebėti tik senoms žvaigždžių populiacijoms, pasiekusioms bent ~2 mlrd. m. amžių. Atsižvelgiant į šią savybę, RGB žvaigždžių pasiskirstymas turėtų būti artimas tolygiam, kadangi judėdamos galaktikoje jos turėjo pakankamai laiko atsiskirti nuo pirminių žvaigždžių grupių, kuriose susiformavo, ir tolygiai pasiskirstyti visame galaktikos tūryje. Tokią prielaidą patvirtina ir ankstesni Leo A galaktikos tyrimai, kurių rezultatai rodo, jog jaunų (< 1 mlrd. m.) ir senų (> 1 mlrd. m.) žvaigždžių populiacijos galaktikoje yra išsidėčiusios skirtingai – jaunesnės žvaigždės stebimos centrinėje, ~5' spindulio, srityje, o senesnių RGB žvaigždžių regimasis pasiskirstymas yra labiau išplitęs ir apima ~8' spindulio sritį (Vansevičius ir kt. 2004). Atsižvelgiant į tai, šiame darbe RGB žvaigždės pasirinktos kaip patikimiausias Leo A galaktikos struktūros rodiklis.

RGB žvaigždžių išskyrimui panaudota galaktikos lauko žvaigždžių, likusių po interaktyvaus katalogo valymo bei fono žvaigždžių atmetimo pagal jų tankio pasiskirstymą, $I, V - I$ diagrama. Atsirinktos RGB žvaigždės tenkina sąlygas: $20,4 < I < 22,5, V < 23,5, V - I > (26,44 - V)/5,25$ ir $V - I < (28,54 - V)/5,25$ (27a pav.). Į pasirinktas ribas patenka 944 objektai. Pastarųjų regimasis erdvinis pasiskirstymas pavaizduotas 27b pav. Objektų, patenkančių į pasirinktas ribas, tačiau atmestų katalogo valymo metu, regimasis pasiskirstymas pavaizduotas 28b pav. Į nurodytas ribas patenka 241 interaktyviu būdu iš katalogo pašalintas objektas ir 9 pagal fono žvaigždžių valymo, atsižvelgiant į jų tankio pasiskirstymą, metodiką atmesti objektai.



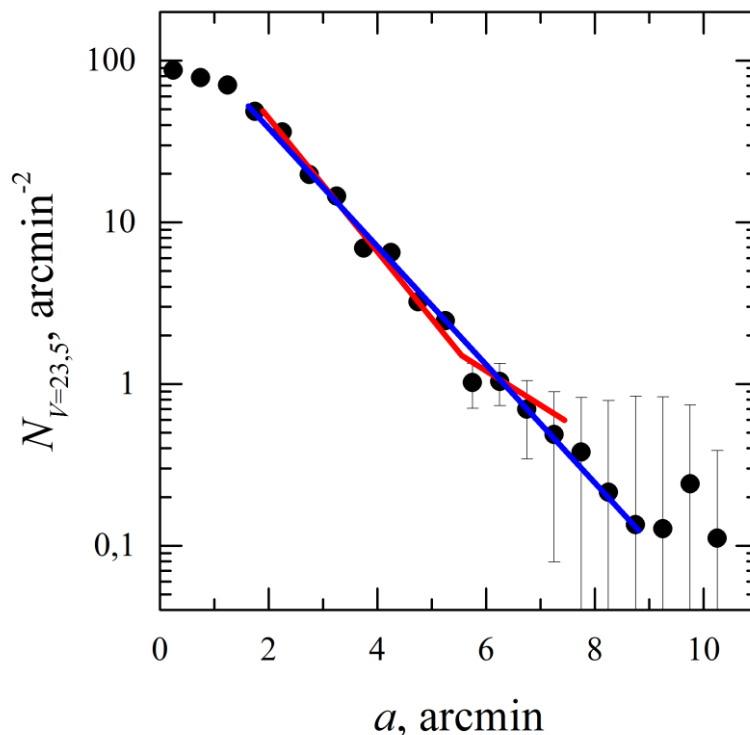
27 pav. Leo A galaktikos struktūros tyrimui pasirinkta žvaigždžių imtis – raudonosios milžinių sekos žvaigždės (944 objektai): a) žvaigždžių imties ribos; b) regimasis RGB žvaigždžių pasiskirstymas.



28 pav. a) Leo A galaktikos katalogo žvaigždžių ($V < 23,5$) $I, V - I$ diagrama. Juodi taškai – išvalyto katalogo objektai, raudoni apskritimai – interaktyviu būdu iš katalogo pašalinti objektai, mėlyni trikampiai – objektai, pašalinti pritaikant fono žvaigždžių atmetimo pagal jų tankio pasiskirstymą metodiką, raudonos linijos – RGB žvaigždžių imties ribos. b) Regimasis objektų, patenkančių į raudonomis linijomis $I, V - I$ diagramoje pažymėtas ribas, pasiskirstymas.

5.2. Leo A galaktikos paviršinio žvaigždžių tankio radialinis profilis

Atrinktos RGB žvaigždės buvo panaudotos Leo A galaktikos paviršinio žvaigždžių tankio radialiniam profiliui nustatyti. Tai įgyvendinta apskaičiuojant žvaigždžių paviršinį tankį atskiruose koncentrinėse elipsiniuose žiedų formos srityse (centro koordinatės: $x_0 = 3862$, $y_0 = 3726$, P.A. = 115° , $b/a = 0,58$). Tikrinant profilio formos priklausomybę nuo pasirinkto elipsinių žiedų pločio, šis išilgai didžiojo pusašio keistas $\Delta a = 0',1$ žingsniu ribose $\Delta a = 0',2-1',0$ ir nustatyta, jog esminių pokyčių profilio formoje neatsiranda. 29 pav. pavaizduotas galaktikos profilis, gautas atliekant skaičiavimus $\Delta a = 0',5$ pločio elipsiniuose žieduose. Radialinis profilis rodo, jog Leo A galaktikos diskas tęsiasi iki $a \sim 9'$ ir jame neišryškėja atskira žvaigždinio halo komponentė ($5',5 < a < 7',5$), kuri buvo aptikta ankstesniuose šios galaktikos tyrimuose, paremtuose Subaru teleskopo stebėjimų duomenimis (Vansevičius ir kt. 2004).

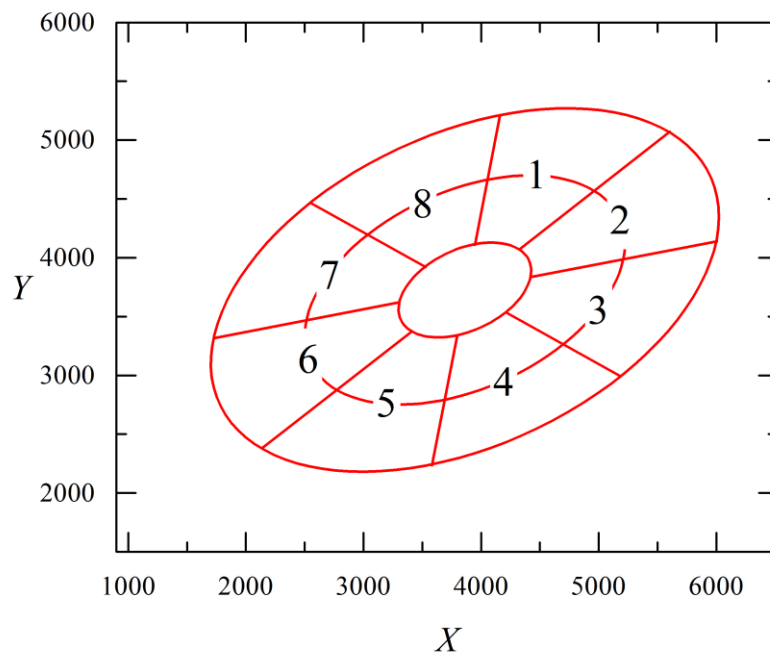


29 pav. Leo A galaktikos paviršinio RGB žvaigždžių tankio radialinis profilis. Taškai žymi paviršinį žvaigždžių tankį elipsinės formos žieduose (P.A. = 115° , $b/a = 0,58$, paklaidos: $\sigma_i = \pm \sqrt{N_i}/N_i$, čia N_i – žvaigždžių skaičius i -ajame žiede), mėlyna linija – galaktikos žvaigždžių diskas ($1',5 < a < 9',0$), raudonos linijos – Vansevičius ir kt. (2004) darbe nustatytos galaktikos komponentės: senosios žvaigždžių populiacijos diskas ($2',0 < a < 5',5$) ir žvaigždinis halas ($5',5 < a < 7',5$).

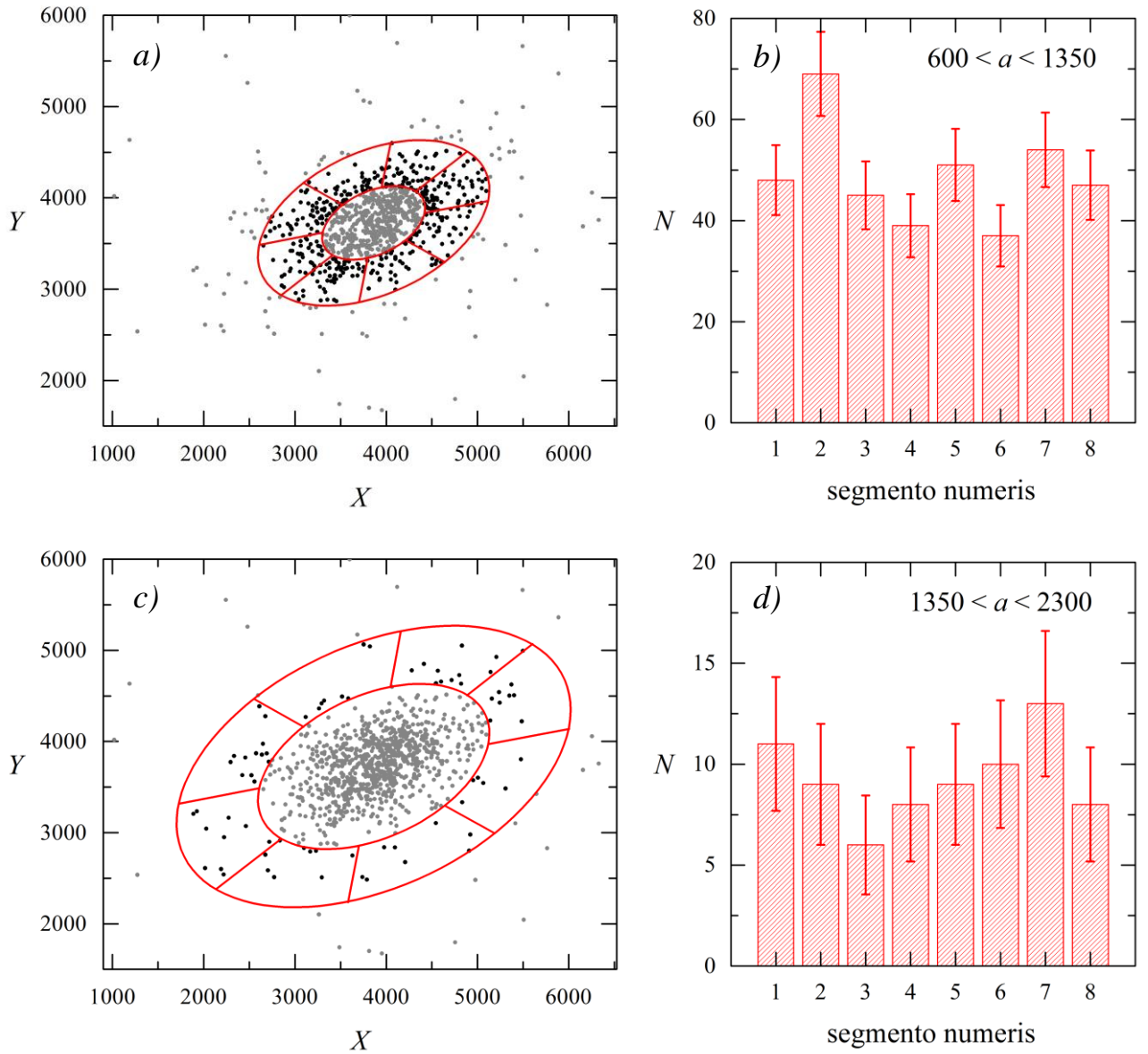
5.3. Regimasis raudonosios milžinių sekos žvaigždžių pasiskirstymas

Siekiant įvertinti RGB žvaigždžių pasiskirstymo tolygumą, atlikta statistinė Leo A galaktikos žvaigždžių analizė azimutine kryptimi. Tai įgyvendinta, suskirstant galaktiką į du koncentrinus elipsinius žiedus (P.A. = 115°, $b/a = 0,58$), apribotus elipsėmis, kurių didieji pusašiai $a = 600, 1350, 2300$ vaizdo elementų, ir vėliau padalinant kiekvieną žiedą į dar 8 vienodo ploto segmentus (30 pav.). Žvaigždės, patenkančios į centrinę elipsę ($a = 600$), toliau analizėje nenaudotos, siekiant išvengti mažesnio fotometrinių katalogo pilnumo tankiame lauke sukeliamų netikslumų.

Lyginant žvaigždžių skaičių skirtinguose segmentuose (31 pav.), matyti, jog nepaisant to, kad stebimos variacijos nėra statistiškai reikšmingos, t. y., skirtumai nesiekia 3σ ($\sigma_i = \sqrt{N_i}$, čia N_i – žvaigždžių skaičius i -ajame segmente), išilgai didžiosios ašies išsidėsčiusiuose segmentuose pastebimas žvaigždžių skaičiaus padidėjimas.



30 pav. Segmentai, naudoti Leo A galaktikos savybių azimutine kryptimi tyrimui. Elipsių didieji pusašiai $a = 600, 1350, 2300$ vaizdo elementų, $b/a = 0,58$, P.A. = 115°. Elipsės padalintos į 8 vienodo ploto segmentus. Pažymėti segmentų numeriai toliau naudojami šiame darbe, pateikiant žvaigždžių pasiskirstymo galaktikoje analizės rezultatus.



31 pav. RGB žvaigždžių pasiskirstymas azimutine kryptimi: a-b) vidiniame elipsiniame žiede, $600 < a < 1350$; c-d) išoriniame elipsiniame žiede, $1350 < a < 2300$. Paklaidos histogramose: $\sigma_i = \pm\sqrt{N_i}$, čia N_i – žvaigždžių skaičius i -ajame segmente.

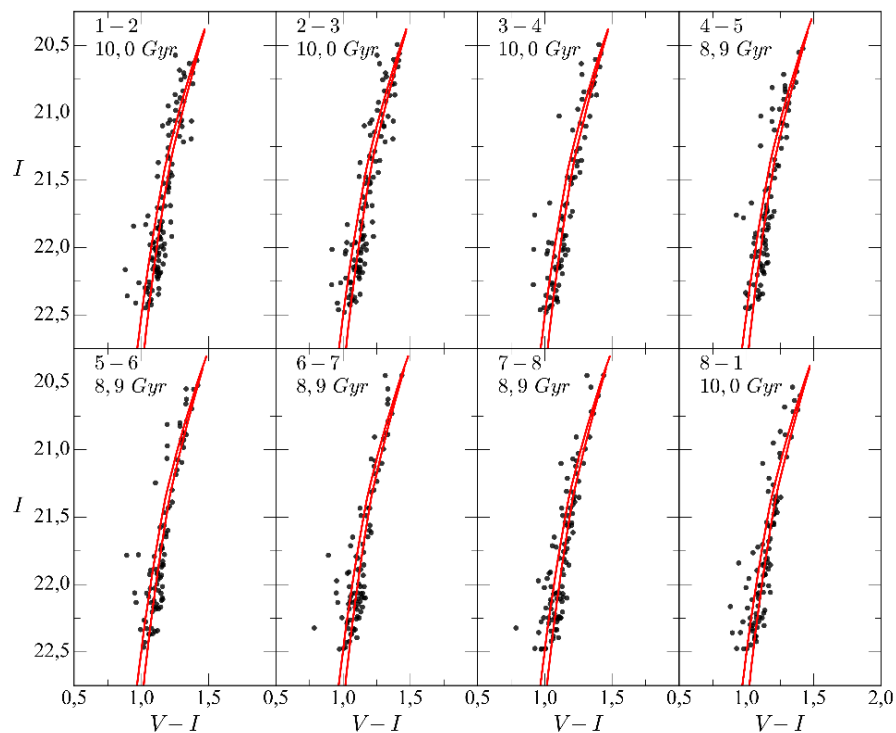
5.4. RGB žvaigždžių regimasis pasiskirstymas pagal jų amžių

Raudonųjų milžinių sekos išplitimas (27a pav.) leidžia nuspėti, jog Leo A galaktikoje egzistuoja keletas senųjų žvaigždžių populiacijų. Tačiau skirtingoms populiacijoms priklausančių žvaigždžių atskyrimą pagal jų padėtį sekoje apsunkina amžiaus-metalingumo išsigimimas, t. y., senos nemetalingos populiacijos RGB gali sutapti su jaunesnės ir metalingesnės populiacijos RGB, kadangi tiek senosios vėsios žvaigždės, tiek jaunesnės, bet metalingesnės žvaigždės spalvos-ryškio diagramoje elgiasi vienodai – pasislenka į raudonąją pusę.

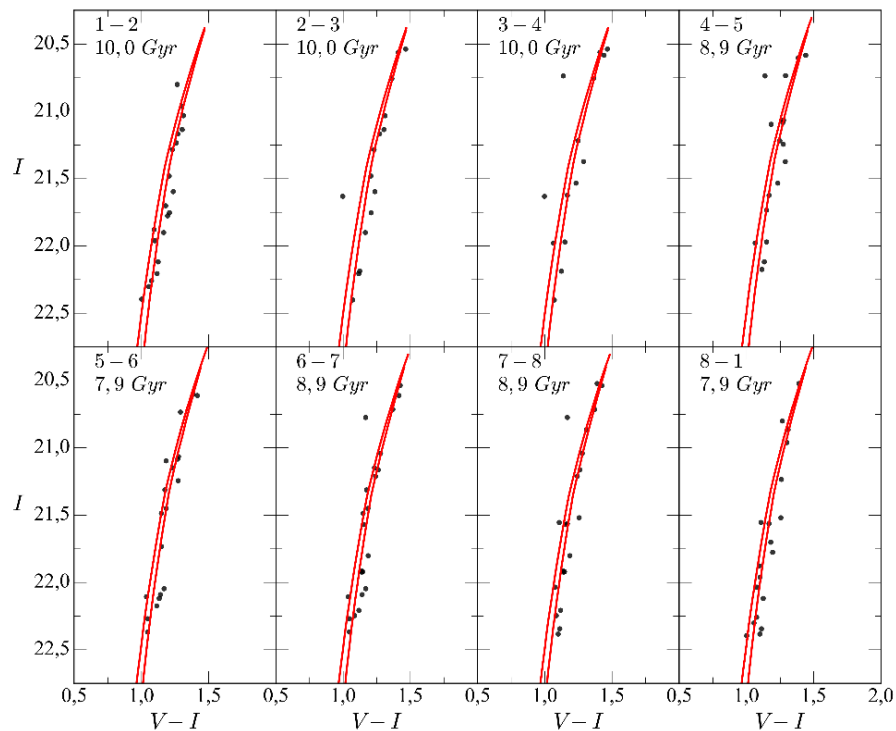
Kirby ir kt. (2017) gauti Leo A galaktikos RGB žvaigždžių spektroskopinių tyrimų rezultatai parodė, jog amžiaus-metalingumo sąryšis šioje galaktikoje yra artimas tolygiam, o metalingumo vertės šiek tiek padidėja tik prie jauniausių amžių (< 5 mlrd. m.). Atsižvelgiant į tai, RGB žvaigždžių (≥ 2 mlrd. m.) amžiaus priklausomybės nuo jų padėties galaktikoje tyrimo metu, vadovautasi prielaida, jog nedidelių metalingumo skirtumų galima nepaisyti. RGB žvaigždžių amžių pasiskirstymas galaktikoje, azimutine kryptimi ir skirtingu radialiniu atstumu, nustatytas izochronų priderinimo metodu, įvertinant skirtingiems galaktikos segmentams (30 pav.) priklausančių žvaigždžių amžių. Amžių nustatymui naudotos PARSEC izochronos (Chen ir kt. 2015).

Siekiant pagerinti izochronų priderinimo prie duomenų tikslumą, nagrinėjamų žvaigždžių skaičius padidintas apjungiant gretimus segmentus (t. y., RGB žvaigždžių amžius įvertintas 1-2 segmentuose, 2-3, 3-4 ir t. t.). Amžiaus nustatymui panaudotos 6-ios skirtingos metalingumų vertės: $Z = 0,0005, 0,0006, 0,0007, 0,0008, 0,0009, 0,0010$ (32 ir 33 pav. pateikti izochronų priderinimo prie skirtingiems segmentams priklausančių žvaigždžių vidiniame, $600 < a < 1350$, ir išoriniame, $1350 < a < 2300$, galaktikos žieduose pavyzdžiai, $Z = 0,0005$ atveju).

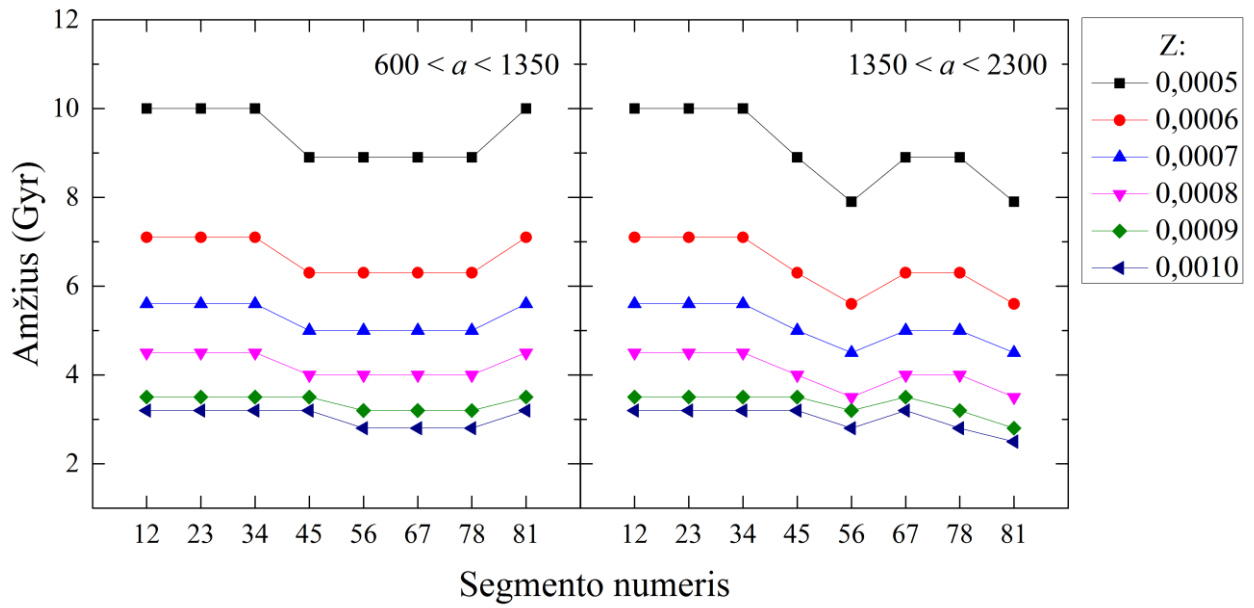
Gauti RGB žvaigždžių amžiaus kitimo azimutine kryptimi vidiniame ir išoriniame žieduose rezultatai pavaizduoti 34 pav. Leo A galaktikoje matomas nedidelis amžiaus gradientas, kuris rodo, jog skirtingose galaktikos pusėse RGB žvaigždžių amžius gali skirtis ~ 1 mlrd. m. Amžiaus netolygumas erdviniame žvaigždžių pasiskirstyme gautas abiejuose žieduose, nepaisant to, jog analizuotos žvaigždės juose nepersidengia.



32 pav. RGB žvaigždžių skirtinguose vidinio žiedo ($600 < a < 1350$) segmentuose $I, V-I$ diagramos. Raudonomis linijomis pavaizduotos $Z = 0,0005$ metalingumo PARSEC izochronos (Chen ir kt. 2015). Segmentų numeriai ir prie žvaigždžių sekų priderintų izochronų amžiai nurodyti kairiajame viršutiniame kiekvienos diagramos kampe.



33 pav. RGB žvaigždžių skirtinguose išorinio žiedo ($1350 < a < 2300$) segmentuose $I, V-I$ diagramos. Žymėjimai sutampa su 32 pav.



34 pav. Žvaigždžių amžiaus kitimas azimutine kryptimi vidiniame ($600 < a < 1350$) ir išoriniame ($1350 < a < 2300$) Leo A galaktikos žieduose. Amžius įvertintas priderinant įvairių metalingumų izochronas prie skirtingiems segmentams priklausančių žvaigždžių (pavyzdžiai $Z = 0,0005$ atveju vidiniame ir išoriniame elipsiniuose žieduose pateikti atitinkamai 32 ir 33 pav.).

Išvados

- Interaktyvios analizės metu Leo A galaktikos fotometriniame kataloge ($V < 24$) identifikuoti nežvaigždiniai objektai ($N = 1692$) gali būti suskirstyti į 3 grupes: foninės galaktikos (tolygiai visame lauke pasiskirstę objektai, pasižymintys platesniais vaizdais žvaigždžių atžvilgiu), greitimi objektai – „blendos“ (neiškiriami objektai tankiose centrinėse galaktikos srityse), blogai išmatuoti objektai (klaidingai aptikti arba išmatuoti objektai, dažniausiai aptinkami tankiose galaktikos srityse).
- Fono žvaigždžių pasiskirstymas Leo A galaktikos aplinkoje yra artimas tolygiam (žvaigždžių paviršiniam tankiui būdingos ne didesnės kaip $\pm 15\%$ variacijos).
- Raudonųjų milžinių sekos žvaigždžių paviršinio tankio radialinis profilis rodo, jog Leo A galaktika turi išplitusį žvaigždžių diską, kuris tęsiasi iki $a \sim 9'$.
- Raudonųjų milžinių sekos žvaigždžių pasiskirstymui būdingi nedideli žvaigždžių paviršinio tankio netolygumai (žvaigždžių skaičiaus padidėjimas išilgai didžiosios ašies) bei amžių skirtumai (priešingose galaktikos pusėse žvaigždžių amžius skiriasi ~ 1 mlrd. m.).

Literatūra

- Albareti, F. D., Allende Prieto, C., Almeida, A., ir kt., *The Thirteenth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the SDSS-IV Survey MAPPING Nearby Galaxies at Apache Point Observatory*, arXiv:1608.02013 (2016)
- Brown, W. R., Geller, M. J., Kenyon, S. J., Kurtz, M. J., *Stellar Velocity Dispersion of the Leo A Dwarf Galaxy*, *Astrophysical Journal*, 666, 231 (2007)
- Chen, Y., Bressan, A., Girardi, L., Marigo, P., Kong, X., Lanza, A., *PARSEC Evolutionary Tracks of Massive Stars up to 350 M_{\odot} at Metallicities $0.0001 \leq Z \leq 0.04$* , *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452, 1068 (2015)
- Cole, A. A., Skillman, E. D., Tolstoy, E., Gallagher III, J. S., Aparicio, A., Dolphin, A. E., Gallart, C., Hidalgo, S. L., Saha, A., Stetson, P. B., Weisz, D. R., *Leo A: Late-Blooming Survivor of the Epoch of Reionization in the Local Group*, *Astrophysical Journal*, 659, L17 (2007)
- Cole, A. A., Weisz, D. R., Dolphin, A. E., Skillman, E. D., McConnachie, A. W., Brooks, A. M., Leaman, R., *Delayed Star Formation in Isolated Dwarf Galaxies: HST Star Formation History of the Aquarius Dwarf Irregular*, *Astrophysical Journal*, 795, 54 (2014)
- Dolphin, A. E., Saha, A., Claver, J., Skillman, E. D., Cole, A. A., Gallagher, J. S., Tolstoy, E., Dohm-Palmer, R. C., Mateo, M., *Variable Stars in Leo A: RR Lyrae stars, Short-Period Cepheids and Implications For Stellar Content*, *Astronomical Journal*, 123, 3154 (2002)
- Kirby, E. N., Rizzi, L., Held, E. V., Cohen, J. G., Cole, A. A., Manning, E. M., Skillman, E. D., & Weisz, D. R., *Chemistry and Kinematics of the Late-Forming Dwarf Irregular Galaxies Leo A, Aquarius, and Sagittarius DIG*, *Astrophysical Journal*, 834, 9 (2017)
- Mateo, M., *Dwarf Galaxies of the Local group*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 36, 435 (1998)
- McConnachie, A. W., *The Observed Properties of Dwarf Galaxies in and Around the Local Group*, *Astronomical Journal*, 144, 4 (2012)
- Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., Davis, M., *Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds*, *Astrophysical Journal*, 500, 525 (1998)
- Schulte-Ladbeck, R., Hopp, U., Drozdovsky, I. O., Greggio, L., & Crone, M. M., *The Oldest Stars of the Extremely Metal-Poor Local Group Dwarf Irregular Galaxy Leo A*, *Astronomical Journal*, 124, 896 (2002)
- Stonkutė, R., Arimoto N., Hasegawa, T., Narbutis, D., Tamura, N., Vanevičius, V., *Dwarf Irregular Galaxy Leo A: Suprime-Cam Wide-Field Stellar Photometry*, *Astrophysical Journal Supplement*, 214, (2014)
- Straižys V., *Multicolor Stellar Photometry*, Pachart Publishing House, Tucson, Arizona, (1992)
<http://www.itpa.lt/MulticolorStellarPhotometry/>
- Tolstoy, E., Gallagher, J. S., Cole, A. A., Hoessel, J. G., Saha, A., Dohm-Palmer, R. C., Skillman, E. D., Mateo, M., Hurley-Keller, D., *WFPC2 Observations of Leo A: A Predominately Young Galaxy within the Local Group*, *Astronomical Journal*, 116, 1244 (1998)
- Vanevičius V., Arimoto N., Hasegawa T. Ikuta, C., Jablonka, P., Narbutis, D., Ohta, K., Stonkutė, R., Tamura, N., Vanevičius, V., Yamada, Y., *The Full-Fledged Dwarf Irregular Galaxy Leo A*, *Astrophysical Journal*, 611, L93 (2004)
- van Zee L., Skillman E. D., Haynes M. P., *Oxygen and Nitrogen in Leo A and GR 8*, *Astrophysical Journal*, 637, 239 (2006)
- Young, L. M., & Lo, K. Y., *The Neutral Interstellar Medium in Nearby Dwarf Galaxies. I. Leo A*, *Astrophysical Journal*, 462, 203 (1996)

NETAISYKLINGOSIOS NYKŠTUKINĖS GALAKTIKOS LEO A STRUKTŪRA

Alina Leščinskaitė

Santrauka

Šiame darbe atliktas netaisyklingosios nykštukinės galaktikos Leo A tyrimas. Tai izoliuota Vietinės galaktikų grupės narė, nerodanti sąveikos su kitais objektais požymių, todėl laikoma, jog ji gali būti pirminių Visatoje susiformavusių struktūrų atitikmuo, o detalūs jos tyrimai gali suteikti vertingų žinių apie tokių struktūrų savybes ir evoliuciją.

Darbo tikslas – ištirti netaisyklingosios nykštukinės galaktikos Leo A struktūrą ir nustatyti senosios populiacijos žvaigždžių savybių priklausomybę nuo jų padėties galaktikoje.

Darbo uždaviniai:

- Interaktyviai patikrinti Leo A galaktikos žvaigždžių fotometrijos katalogą ir identifikuoti nežvaigždinius objektus.
- Ištirti fono žvaigždžių paviršinio tankio tolygumą Leo A galaktikos aplinkoje.
- Sukurti ir pritaikyti metodą, skirtą fono žvaigždžių pašalinimui iš spalvos-ryškio diagramų.
- Ištirti Leo A galaktikos raudonųjų milžinių sekos žvaigždžių savybių kitimą išorinėse galaktikos srityse.

Darbo rezultatai ir išvados:

- Interaktyvios analizės metu Leo A galaktikos fotometriniame kataloge ($V < 24$) identifikuoti nežvaigždiniai objektai ($N = 1692$) gali būti suskirstyti į 3 grupes: foninės galaktikos (tolygiai visame lauke pasiskirstę objektai, pasižymintys platesniais žvaigždžių atžvilgiu vaizdais), gretimieji objektai – „blendos“ (neiškiriami objektai tankiose centrinėse galaktikos srityse), blogai išmatuoti objektai (klaidingai identifikuoti arba išmatuoti objektai, dažniausiai aptinkami tankiose galaktikos srityse).
- Fono žvaigždžių pasiskirstymas Leo A galaktikos aplinkoje yra artimas tolygiam (žvaigždžių paviršiniui tankiui būdingos ne didesnės kaip $\pm 15\%$ variacijos).
- Raudonųjų milžinių sekos žvaigždžių paviršinio tankio radialinis profilis rodo, jog Leo A galaktika turi išplitusį žvaigždžių diską, kuris tęsiasi iki $a \sim 9'$.
- Raudonųjų milžinių sekos žvaigždžių pasiskirstymui būdingi nedideli žvaigždžių paviršinio tankio netolygumai (žvaigždžių skaičiaus padidėjimas išilgai didžiosios ašies) bei amžių skirtumai (priešingose galaktikos pusėse žvaigždžių amžius skiriasi ~ 1 mlrd. m.).

STRUCTURE OF THE DWARF IRREGULAR GALAXY LEO A

Alina Leščinskaitė

Summary

Dwarf irregular galaxy Leo A is an isolated member of the Local Group. With no apparent evidence of interaction with other systems, it is thought to possess properties similar to the ones of the primordial systems in the early Universe. Therefore, a detailed analysis of the Leo A galaxy is expected to provide some valuable knowledge about the structure and evolution of the primordial systems.

The aim of this research is to study the structure of the dwarf irregular galaxy Leo A and to determine properties of the old stellar populations with regard to the position in the galaxy.

The tasks:

- Identify, by visual inspection, the non-stellar objects in the photometric catalogue of the Leo A galaxy.
- Analyse surface number density of the foreground stars in the vicinity of Leo A.
- Develop and apply a method aimed to remove the foreground stars from a colour-magnitude diagram.
- Determine azimuthal variations in the properties of the red giant branch stars in the outer regions of the Leo A galaxy.

Results and conclusions:

- Non-stellar objects identified by visual inspection in the photometric catalogue of the Leo A galaxy can be classified into three different groups: background galaxies (extended sources uniformly distributed in an entire field), blended objects (unresolved objects in the dense central regions of the galaxy), objects with bad photometry (misidentified or incorrectly measured objects).
- The observed spatial distribution of the foreground stars in the vicinity of Leo A is fairly uniform.
- Radial profile of the RGB star surface number density indicates the existence of an extended stellar disk with a radius of $a \sim 9'$.
- The properties of the RGB stars were determined to vary with respect to their position in the galaxy: surface number density of RGB stars is slightly larger along the major axis and the age of the RGB stars is somewhat different ($\Delta t \sim 1$ Gyr) on the opposite sides of the galaxy.