



VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
ASTRONOMIJOS OBSERVATORIJA

Mindaugas Karčiauskas

Netaisyklingos nykštukinės galaktikos Leo A žvaigždėdaros istorija

Magistrinių studijų baigiamasis darbas
Studijų programa: TEORINĖ FIZIKA IR ASTRONOMIJA

Darbo vadovas

dr. Vladas Vansevičius

Recenzentė

dr. Stanislava Bartašiūtė

VU observatorijos vedėjas

doc.dr. Jokūbas Sūdžius

VILNIUS
2005

TURINYS

1. ĮVADAS	4
2. ANKSTESNI LEO A STEBĖJIMAI BEI ŠIOS GALAKTIKOS PARAMETRAI	6
3. STEBĖJIMAI IR DUOMENŲ REDUKCIJA	7
4. REZULTATAI	8
4.1. Nagrinėjamos SŠD sritys	8
4.2. Fono žvaigždžių išvalymas SŠD	9
4.3. Seniausios Leo A žvaigždės	10
4.3.1. <i>Sferoidinė komponentė</i>	10
4.3.2. <i>Diskas</i>	11
4.3.4. <i>Mėlynoji bei raudonoji RMS dalys</i>	12
4.4. Jaunosios Leo A žvaigždės	12
5. DISKUSIJA	13
5.1. Leo A galaktikos susidarymas	13
5.2. Jauniausioji žvaigždžių populiacija	16
6. IŠVADOS	17
SANTRUMPOS	18
LITERATŪRA	20
GRAFIKAI	21

Žydi vijokliai.
Melsvo žiedo taurelėj
Bedugnė gelmė

Buson Josa

1. Įvadas

Viena didžiausių šiuolaikinės astrofizikos mįslių - galaktikų susidarymas ir evoliucija nuo pradinių masės tankio fliktuacijų ankstyvoje visatoje iki dabartinių struktūrų. Šiuolaikinis, daugiausiai stebėjimų paaiškinantis visatos modelis, tai šaltosios tamsiosios medžiagos su kosmologine konstanta modelis – Λ CDM (*angl.* Lambda Cold Dark Matter) (Spergel ir kt. 2003, Tegmark ir kt. 2004). Pagal jį didžiausią masės dalį sudaro tamsioji medžiaga, kuri nulemia gravitacinį galaktikos potencialą. Tuo tarpu barioninė medžiaga, kuri sudaro mažiau nei 5% visos energijos kiekio visatoje (Spergel ir kt. 2003), susitelkia tamsiosios medžiagos sudarytose potencialinėse duobėse. Tai, jog pagrindinę galaktikos masės dalį sudaro tamsiosios medžiagos halo, o jų centruose yra barioninė medžiaga, patvirtina nykštukinių bei elipsinių galaktikų stebimų dydžių sąryšiai, t.y. paviršinio šviesio – galaktikos dydžio, metalingumo – šviesio, greičių dispersijos – šviesio, masės – šviesio santykiai su galaktikos šviesiu (Dekel ir Silk 1986).

Šaltosios tamsiosios medžiagos modelis numato hierarchinį struktūrų formavimąsi. Pagal jį pirmiausia susidarė mažos struktūros, kurios vėliau susiliejo taip sudarydamos didžiąsias galaktikas. Toks paaiškinimas geriausiai atitinka stebimos makroskopinės struktūros dviejų taškų koreliacijos funkciją, kitus kosmologinius stebėjimus (Seljak ir kt. 2005). Tačiau šis modelis turi ir kelis labai rimtus trūkumus. Pirmoji problema ta, jog teorinių tamsiosios medžiagos halo masės koncentracija centre daug didesnė negu nustatoma iš stebėjimų, antroji – teorija numato eile ar keliomis didesnę nykštukinių galaktikų kiekį negu stebime. Pastarajai problemai išspręsti yra keli keliai: pakeisti tamsiosios medžiagos prigimtį, pavyzdžiui, šiltoji tamsioji medžiaga (Bode ir kt. 2000), tačiau astrofizikine prasme labiau pagrįstas paaiškinimas, jog, kai kuriuose tamsiosios medžiagos halo taip ir neišsižiebė žvaigždėdara, todėl tokie halo liko nematomi. Ši hipotezė galėtų paaiškinti ir kitą fenomeną - tai didelio greičio debesis, kurie aptikti krentantys į mūsų bei Andromedos galaktikas. Mažas žvaigždėdaros efektyvumas galimas dėl vienos iš kelių priežasčių, o veikusiai dėl jų abiejų įtakos. Reliktinio spinduliavimo matavimai (Spergel ir kt. 2003) bei Laimano alfa miško debesų stebėjimai (Umemura ir kt. 2001) rodo, kad išsižiebus pirmosioms žvaigždėms visata buvo rejonizuota. Didelis ultravioletinių spindulių srautas jonizavo vandenilio debesis halo centruose bei pakėlė jų temperatūrą, todėl jos negalėjo atšalti ir įžiebti žvaigždžių (Susa ir Umemura 2004). Kitas mechanizmas, įtakojantis žvaigždėdaros evoliuciją, kaip parodė

Kravtsov ir kt. (2004), tai sąveika tarp pačių galaktikų. Viena vertus dėl sąveikos atsirandančios potvyninės jėgos gali pradinius galaktikų halo sudraskyti, kita vertus, priklausomai nuo aplinkos, kurioje yra galaktika, potvyninių sąveikų sukeltos smūginės bangos gali indukuoti naujų žvaigždžių atsiradimą.

Geriausias būdas patikrinti šiuos galaktikų formavimosi bei žvaigždėdaros atsiradimo modelius, tai stebėti galaktikas ir nustatyti jų evoliucijos istorijas. Žinoma, pats geriausias būdas būtų tirti ką tik, ankstyvoje visatoje, iš pradinių tankio fliuktuacijų susiformavusias galaktikas. Tačiau dėl jų nuotolio ir ribotų stebėjimo galimybių turime labai mažai informacijos apie tokių objektų fizikinius parametrus. Kita galimybė – stebėti galaktikas, esančias arti mūsų. Tačiau šių galaktikų evoliucija labai sudėtinga, jos daug kartų sąveikavo su savo grupės nariais įtakodamos viena kitos evoliuciją potvyninėmis sąveikomis ar net susiliedamos. Todėl detalus tokių sistemų evoliucijos atkūrimas yra labai sudėtingas. Šiuo atveju mus gali išgelbėti nykštukinės galaktikos (NG). Jos geros dėl kelių priežasčių. Pirmiausia, tai pats skaitlingiausias galaktikų tipas tiek Vietinėje grupėje, tiek visatoje apskritai. Antra, dėl savo mažos masės, tokių sistemų relaksacijos laikas yra gana ilgas (apie kelis milijardus metų), todėl bet kokių sąveikų ar žvaigždėdaros žybsnių pėdsakai išlieka ilgai ir gali būti aptinkami. Kita vertus, jei gamta bus dosni, mums gali pasisekti atrasti tokią NG, kuri po susidarymo išgyveno nesąveikavusi iki šių dienų. Kitaip tariant, būtų išlikęs pirminis makroskopinių struktūrų formavimosi „blokas“.

Savo tyrimui mes pasirinkome Liūto žvaigždyne esančią nykštukinę Leo A galaktiką. Tai Vietinės grupės NG, kurią atrado Zwicky (1942). Ši NG ypatinga dėl kelių priežasčių: pirmiausia ji pakankamai artima (diskusiją apie nuotolį žiūr. 2 skyriuje), kad joje būtų galima išskirti atskiras žvaigždes. Antra, aplink šią galaktiką nėra artimų kaimynių - Leo A yra viena iš labiausiai izoliuotų Vietinės grupės galaktikų. Šis faktas bei stebėjimai $H\alpha$ ir raudonojo kontinuumo srityje (Heller ir kt. 2000) leidžia tikėtis, kad ji evoliucionavo „natūraliai“, be sąveikos su kaimynėmis. Taigi, galima manyti, kad Leo A yra pirminė galaktika, susiformavusi iš pradinės tankio fliuktuacijos ir išlikusi nesąveikavusi iki šių dienų. Tokio objekto atradimas Vietinėje grupėje suteikia puikias galimybes detaliau tyrinėti ankstyvoje visatoje susiformavusius objektus.

Pagal hierarchinį struktūrų formavimosi modelį, tokios galaktikos kaip Leo A, susidarė tiesiogiai iš 1σ pradinių tankio fliuktuacijų (Dekel ir Silk 1986). Tai reikštų, kad NG negali turėti tokių sudėtingų struktūrinių elementų kaip kad joms susiliejan

susiformavusios didžiosios galaktikos. Netaisyklingose diskinėse galaktikose (NDG) turėtų būti tiksliai žvaigždžių bei dujų diskas. Iki šiol kitų NDG struktūrinių elementų ir nebuvo aptikta. Tačiau detalesni Leo A tyrimai atskleidė, kad situacija yra daug sudėtingesnė – Vansevičius ir kt. (2004) aptiko šios galaktikos senų žvaigždžių halo. Šie autoriai taip pat atrado, kad Leo A yra daugiau kaip du kartus didesnė nei manyta iki šiol. Šiame darbe atlikti tyrimai išryškino dar daugiau įrodymų apie sudėtingą Leo A struktūrą.

Tyrinėjome Leo A žvaigždėdaros istoriją naudodamiesi senąja žvaigždžių populiacija (2-12 mlrd. m.), t.y. raudonosiomis milžinėmis, ir jaunąja populiacija (iki 600 mln. m.), t.y. mėlynosios kilpos (MK) žvaigždėmis. Senosios žvaigždės leido nustatyti Leo A formavimosi istoriją, tuo tarpu jaunosios - šiuo metu galaktikos diske esančias sąlygas.

Darbo struktūra tokia. Kadangi nustatant žvaigždėdaros istoriją labai svarbu nepriklausomai išmatuoti fizikinius galaktikos parametrus, antrajame skyriuje pateikta kitų autorių Leo A matavimų analizė. Trečiajame skyriuje trumpai aprašome stebėjimus, bei gautus duomenis. Ketvirtas skyrius skirtas atliktiems tyrimams bei gautiems rezultatams aprašyti. Penktajame pateikiama stebimų rezultatų interpretacija bei aptarimas, o šeštasis skirtas išvadoms.

2. Ankstesni Leo A stebėjimai bei šios galaktikos parametrai

Ne tik tikrųjų matmenų, bet ir kitų parametrų, tokių kaip masė, amžius ir pan. nustatymui didelę įtaką turi galaktikos atstumas iki mūsų. Pirmą kartą nustatytas Leo A atstumo modulis $(m - M)_0 = 26,8 \pm 0,4$ (Demers ir kt. 1984) buvo klaidingas, kadangi dėl mažo stebėjimų tikslumo buvo klaidingai interpretuota spalvos-šviesio diagrama (SŠD). Tikrasis Leo A atstumas nustatytas tik pagal Hubble teleskopu atliktus stebėjimus. Priklausomai nuo metodo jis svyruoja nuo $24,9 \pm 0,7$ iki $24,1 \pm 0,1$ (Tolstoy ir kt. 1998). Šiame darbe naudojamas atstumo modulis $24,5 \pm 0,2$, nustatytas pagal raudonųjų milžinių sekos (RMS) viršūnę bei kintamąsias RR Lyr žvaigždes (Dolphin ir kt. 2002). Nors ankstesniuose straipsniuose (Tolstoy ir kt. 1998), diskutuojama dėl RMS viršūnės metodo patikimumo, kadangi iš RMS viršūnės patikimai galima nustatyti atstumą tik populiacijoms, kurių amžius didesnis nei 2 mlrd. m., o metalingumas mažesnis nei 10% Saulės metalingumo. Bet priešingai negu manė Tolstoy ir kt. (1998), pasirodė, kad galaktika išties yra sena, joje aiškiai matyti RMS, kurios amžius ne mažesnis nei 10 mlrd.

m. (Schulte-Ladbeck ir kt. 2002). Todėl, mūsų manymu, tai patikimiausiai nustatytas Leo A galaktikos atstumas.

Leo A vidinė ekstinkcija ir ekstinkcija Paukščių Tako galaktikoje Leo A kryptimi yra labai maža $E(B - V) < 0,03$ (Fitzpatrick 1985). Mūsų tyrimui tokia maža ekstinkcija praktiškai įtakos neturi, todėl mes jos nepaisome.

Vienintelis Leo A metalingumo matavimas atliktas planetiškajam ūkui (Skillman ir kt. 1989). Rasta, jog ši NDG yra anomaliai nemetalinga, jos metalingumas tik $Z = 0,0004$ (2% Saulės metalingumo). Tolstoy ir kt. (1998) bei Schulte-Ladbeck ir kt. (2002) derindami izochronas prie RMS nustatė, kad jų metalingumas suderinamas su planetiškojo ūko matavimais.

Leo A labai turtinga neutralaus vandenilio dujomis (Young ir Lo 1996) ir tik nedidelę jos masės dalį sudaro žvaigždės (Mateo 1998). Young ir Lo (1996) parodė, kad H I apvalkalo spindulys yra dvigubai didesnis negu žvaigždžių disko.

Taip pat buvo keli bandymai nustatyti Leo A žvaigždėdaros istoriją. Tolstoy ir kt. (1998) stebėjo centrinę galaktikos dalį Hubble teleskopu ir nustatė, kad ten dominuoja jaunos, iki 2 mlrd. m. metų žvaigždės. Tačiau Schulte-Ladbeck ir kt. (2002) stebėjo Leo A sritį, esančią toliau nuo centro ir atrado, kad visgi ši galaktika turi ir senąją populiaciją, tikrai senesnę negu 9 mlrd. m.. Šios išvados patikimumą ypač sustiprino RR Lyr žvaigždžių atradimas Leo A galaktikoje (Dolphin ir kt. 2002).

3. Stebėjimai ir duomenų redukcija

Mūsų stebėjimo duomenys detaliau aprašyti Vansevičius ir kt. (2004), čia paminėsime tik svarbiausias charakteristikas. Leo A galaktika buvo stebėta Subaru 8,3 m teleskopu su Suprime-Cam kamera, kurią sudaro 5×2 CCD matricos. Ši kamera yra ideali stebėti Leo A, kadangi visa galaktika telpa į vieną nuotrauką. Kameros laukas $34' \times 27'$ (vaizdo elemento dydis $0'',2 \times 0'',2$; $1'$ atitinka 230 pc, jeigu atstumas iki galaktikos 800 kpc), o 25 ryškį V filtre galima pasiekti 60 s trukmės ekspozicijose. Buvo gauti galaktikos vaizdai trijuose filtruose: $B(5 \times 600s)$, $V(5 \times 360s)$ ir $I(30 \times 240s)$. Žvaigždės buvo išmatuotos tankių laukų fotometrijos programa DAOPHOT, esančia IRAF programų pakete. Instrumentiniai ryškiai buvo transformuoti į Hubble teleskopo filtrų $F439W$, $F555W$, $F814W$ ryškius, kurie savo ruožtu buvo transformuoti į standartinę fotometrinę Johnson-Cousins sistemą, B , V ir I , atitinkamai. Transformacijų tikslumas V ir I filtruose

$\sim 0^m,01$, o B filtre $\sim 0^m,02$. Tyrime naudojamų matavimų paklaidų histogramos parodytos 1 ir 2 pav. Šios žvaigždės išsidėsčiusios $16' \times 16'$ lauke.

4. Rezultatai

4.1. Nagrinėjamos SŠD sritys

Visos išmatuotos Leo A žvaigždės pavaizduotos 3 pav., o jos SŠD 4 pav. Tyrimui pasirinkome dvi SŠD sritis. Jaunąją populiaciją reprezentuoja žvaigždės, esančios mėlynosios kilpos (MK) srityje. Tokių žvaigždžių amžius iki 600 mln. m. ir jaunesnės. MK sritis pasirinkta todėl, kad kaip matyti iš 5 pav. pavaizduotų izochronų, joje esančios skirtingo amžiaus žvaigždės nepersikloja. Ir iš tiesų, MK gale esančių, t.y. mėlyniausių, žvaigždžių dalis sudaro 94% visų žvaigždžių, kurios patenka iš kitų izochronos dalių į nagrinėjamą seką, t.y. pagrindinės sekos posūkio taško, bei paliekančios MK žvaigždės. Įvertinimui naudota Salpeterio pradinė masės funkcija.

Kita nagrinėta sritis, tai raudonųjų milžinių seka. Šioje srityje esančios žvaigždės sudaro seniausiąją galaktikos populiaciją. O teisingiau būtų sakyti populiacijas, kadangi matomas sekos plotis yra sąlygotas ne matavimo paklaidų, bet kaip bus parodyta vėliau, tai realus skirtingo amžiaus sąlygotas sekos plotis. Deja, šioje dalyje itin aštri amžiaus-metalingumo išsigimimo problema. Šie du efektai duoda skirtingą postūmį spalvos-šviesio diagramoje, metalingesnės žvaigždės yra raudonesnės, o mažiau metalingos – mėlynesnės. Atvirkščiai veikia amžius – senesnės RMS populiacijos yra raudonesnės. Stebimas RMS plotis atitinka 8 mlrd. m. populiacijų amžiaus arba $\Delta Z = 0.0016$ metalingumo skirtumus.

Iš tiesų į 5-ame pav. apibrėžtą RMS sritį patenka ir asimptotinės milžinių sekos (AMS) žvaigždės. Tai žvaigždės, kurios po helio žybsnio pabuvusios horizontaliojoje sekoje, pulsuodamos ir dideliu greičiu praradamos savo medžiagą, kyla SŠD diagramoje į viršų. Šios žvaigždės yra šiek tiek mėlynesnės nei RMS žvaigždės. Jų kiekis sudaro mažiau nei ketvirtadalį bendro AMS + RMS žvaigždžių kiekio (naudota Salpeterio pradinė masės funkcija). Turint omenyje mažą jų skaičių, palyginus su RMS žvaigždėmis, AMS žvaigždžių galima nepaisyti.

4.2. Fono žvaigždžių išvalymas SŠD

Ne visos išmatuotos lauke žvaigždės priklauso Leo A galaktikai. Yra du pagrindiniai fono objektų šaltiniai: pirmiausia tai mūsų Galaktikos žvaigždės, kurios yra regėjimo lauke tarp Galaktikos ir Leo A. Šios žvaigždės projektuojasi į matuojamą Leo A lauką. Kitas fono objektų šaltinis - mėlynos kompaktiškos galaktikos (MKG) (Babul ir Ferguson 1996). Šios galaktikos yra gana mažos ir labai tolimos, todėl nuotraukoje pagal vaizdą jos neatskiriamos nuo žvaigždžių. Laimei abiejų šių fono objektų įtaką SŠD galima statistiškai įskaityti.

Pirmiausiai aptarsim MK žvaigždes. Šioje srityje esančios žvaigždės nevalytos. Taip yra todėl, kad vienintelis tokių žvaigždžių atrinkimo būdas yra statistinis. Tai reiškia, kad galime įvertinti tik tikimybę jog konkreti žvaigždė nėra Leo A narė ir atitinkamai šiai tikimybei, žvaigždę pašalinti. Tokiu būdu mes prarastume naudingos informacijos apie duotos populiacijos erdvinį išsidėstymą. Turint omenyje, kad į mus dominančią MK sritį patenka vos kelios dešimtys fono objektų (mažiau nei 4%), jokio valymo daryti neverta.

Kitokia situacija yra su RMS žvaigždėmis. Šioje srityje yra daugiau objektų, nepriklausančių Leo A, bet juos galima atpažinti ir pašalinti. Mūsų Galaktikos žvaigždes galima pašalinti naudojant Q parametą. Šį parametą apibrėžiame kaip $Q = (B - V) - (V - I) * C$, ir jis yra proporcingas žvaigždžių metalingumui. Paprastai konstanta C yra lygi spalvos ekscesų santykiui, tačiau kadangi tarpžvaigždinė ekstinkcija labai maža, mes C pasirinkome tokį (1,3), kad Q priklausomybės nuo V grafike, Leo A RMS būtų vertikali. 6 pav. pavaizduota 10 mlrd. m. amžiaus izochronų Q parametro priklausomybė nuo metalingumo: $Z = 0,0001$; $0,0004$ ir $0,001$. Taškai atrinkti iš RMS žemiausios darbe naudojamos srities, t.y. $V = 23^m,6$. Kaip matome iki $Z = 0,001$ Q parametras iš tiesų proporcingas sekos metalingumui. Kadangi Leo A yra labai nemetalinga (žiūr. 2 skyrių), tai Q parametras yra tinkamas Leo A žvaigždžių metalingumo indikatorius. Tačiau Q parametras gali būti naudojamas tik santykiniam žvaigždžių metalingumui nustatyti, tikrąsias žvaigždžių metalingumo reikšmes nustatyti neįmanoma.

Q parametro pagalba gerai atskiriamos Galaktikos žvaigždės, kadangi pastarųjų metalingumas gerokai skiriasi. Įvertinus sekos plotį, atrinktos tik tos žvaigždės, kurios patenka į sritį $-0,68 < Q < -0,44$.

Kita problema – MKG. Šioje vietoje mus gelbsti tai, jog jų spektras šiek tiek skiriasi nuo RMS žvaigždžių. Todėl naudojome dvispalvę diagramą ($B-V$) nuo ($V-I$) ir atrinkome tik tas žvaigždes, kurios patenka į sritį $0,73 < (V-I) < 1,66$ ir $0,54 < (B-V) < 1,47$.

4.3. Seniausios Leo A žvaigždės

Mūsų darbe ypatingai svarbios seniausios Leo A žvaigždės. Šios žvaigždės gimė Leo A jaunystėje, kai galaktika tik formavosi. Senosios žvaigždės teikia daug informacijos apie sąlygas, kuriomis susidarė galaktika. Šią populiaciją reprezentuoja RMS, kurią sudaro senesnės nei 2 mlrd. m. žvaigždės. Kaip jau anksčiau buvo minėta (skyrius 4.1), jos plotis sąlygotas skirtingo amžiaus ir skirtingo metalingumo žvaigždžių.

Radialinių profilių matavimams naudojome elipsės parametrus, kurie nustatyti Vansevičiaus ir kt. (2004): didžiosios ir mažosios pusašių santykiai $0,60 \pm 0,03$, o pozicinis kampas $114^\circ \pm 5^\circ$. Integravimo žiedo plotis $\Delta a = 1'$, jei nenurodyta kitaip.

Patikrinome žvaigždžių kiekio pasiskirstymą statmena sekai kryptimi. Tam reikėjo seką ištiesinti, t.y. padaryti ją vertikalia (7, 8 pav.). Sekos išlinkimui aprašyti užteko antros eilės polinomo: $(B-V) = a + b_1V + b_2V^2$, kurio koeficientai $a = 69,45$ ir $69,81$ mėlynajam ir raudonajam sekos kraštui atitinkamai, $b_1 = 5,749$ ir $b_2 = 0,12$. Ištiesintus spalvos rodiklius žymėsime $V_{\text{išt}}$ ir $(B-V)_{\text{išt}}$. Šios sekos histograma pavaizduota 9 pav. Joje naudojamos tik žvaigždės ryškesnės negu $V = 23$, kadangi žemiau šios ribos matomas įstrižai einantis sutankėjimas, kurį tikriausiai suformuoja kita žvaigždžių seka (8 pav.). Pagal RMS sekos $(B-V)_{\text{išt}}$ histogramą (9 pav.) išskyrėme tokias struktūrines sekos dalis: mėlynąją RMS dalį $(B-V)_{\text{išt}} < 0,75$, diską $(B-V)_{\text{išt}} \in (0,75; 0,84)$ ir $(0,87; 0,915)$, vieno amžiaus populiaciją (VAP) $0,84 < (B-V)_{\text{išt}} < 0,87$, raudonąją dalį $(B-V)_{\text{išt}} > 0,915$. Pagal Q parametą atskyrėme pačias nemetalingiausias žvaigždes, kurios sudaro sferoidą (10 pav.). Kiekvienas iš šių struktūrinių elementų paaiškintas atitinkamuose skyriuose.

4.3.1. Sferoidinė komponentė

Q parametro histograma atrinktoms RMS žvaigždėms parodyta 10 pav. Neigiamesnės Q reikšmės reiškia nemetalingesnes žvaigždes. Patikrinome šių žvaigždžių išsidėstymą diske ir aptikome, kad pačių nemetalingiausių pasiskirstymas yra sferoidinis. 11 pav. parodytas šio sferoido, o 12 pav. disko (disko atrinkimo kriterijus žiūr. 4.3.2 skyriuje)

žvaigždžių pasiskirstymas galaktikoje. Sferoide esančių narių $Q < -0,62$ (vertikali linija 10 pav.). Iš jo taip pat atimtos VAP žvaigždės (VAP atrinkimą žiūr. 4.3.3 skyriuje). Sferoido spindulys yra gerokai didesnis už disko spindulį. Jo žvaigždžių, esančių toliau negu $4'$ nuo centro, santykinai yra 50% daugiau negu disko žvaigždžių. Taigi, žvaigždės dideliais atstumais nuo centro yra ne fono objektai, bet priklauso sferoidui.

Sferoido Q histograma pateikiama 13 pav. Matyti, kad daugiausia žvaigždžių patenka į sritį ties $Q = -0,63$.

4.3.2. Diskas

Disko žvaigždės sudaro didžiąją RMS žvaigždžių dalį. Jos labai aiškiai išryškėja ($B-V$)_{ist} histogramoje. Diskas apibrėžtas tokiais kriterijais: $(B-V)_{ist} \in (0,75; 0,84)$ ir $(0,87; 0,915)$ ir $Q > -0,62$. Dalis $(B-V)_{ist}$ histogramos, t.y. nuo 0,84 iki 0,87, išimta kadangi čia dominuoja VAP žvaigždės (žiūr. 4.3.3 skyrių). Taip pat, remiantis Q parametru, iš disko atimtos sferoido žvaigždės.

Disko žvaigždžių išsidėstymas stebėjimo plokštumoje pavaizduotas 12 pav., o radialinis profilis 14 pav. Nustatytas disko skalės ilgis yra $1',14 \pm 0',06$.

Daugiausia disko žvaigždžių turi metalingumą, kuris Q parametro histogramoje atitinka sritį ties $Q = -0,61$ (13 pav.).

4.3.3. Vieno amžiaus populiacija (VAP)

RMS $(B-V)_{ist}$ histogramoje labai aiškiai išsiskiria $0,03^m$ pločio smailė ties $(B-V)_{ist} = 0,855$. Šis žvaigždžių skaičiaus padidėjimas galėjo atsirasti tik dėl žvaigždėdaros žybsnio, t.y. vieno amžiaus žvaigždžių populiacijos, kurių formavimosi tempas gerokai viršijo disko žvaigždžių formavimosi tempą per visą jo istoriją. VAP radialinis profilis pateiktas 15 pav. Iš jo matyti, kad žvaigždėdaros žybsnis įvyko tik iki $4'$ spindulio, toliau išryškėja kitos populiacijos žvaigždės, kurių skalės ilgis toks pat kaip ir disko žvaigždžių (4.3.2 skyrius). Taigi aptinkame labai plokščią (skalės ilgis $7' \pm 4'$), nedidelio spindulio sritį, kurioje įvyko žvaigždėdaros žybsnis.

VAP Q parametro histogramoje (13 pav.) matome labai aiškų piką ties $Q = -0,605$. Kadangi sferoido bei disko žvaigždžių išrinkti iš VAP dalies neįmanoma, tai histogramoje patenka daug nemetalingų ($Q < -0,62$) bei gerokai metalingesnių už piką

žvaigždžių. Tai matyti ir 15 pav., kur ties didesniu nei 4' galaktikos spinduliu pasimato diskas.

4.3.4. Mėlynoji bei raudonoji RMS dalys

Patikrinus raudonąją, $(B-V)_{\text{išt}} < 0,75$, RMS dalį paaiškėjo, kad joje daugiausia yra nemetalingų sferoido bei disko žvaigždžių. 16 pav. pavaizduota Q parametro histograma šiai daliai. Matome, kad joje išryškėja tie patys pikai, kurie pastebimi sferoido bei disko Q parametro histogramose (13 pav.).

Panašiai yra ir su raudonąja $((B-V)_{\text{išt}} > 0,915)$ RMS dalimi, tik čia išryškėja metalingiausioji disko populiacija.

4.4. Jaunosios Leo A žvaigždės

Jaunosios galaktikos populiacijos leidžia nustatyti žvaigždėdaros formavimosi bei plitimo sąlygas per pastaruosius 600 mln. m. Pirmiausia patikrinome skirtingo amžiaus žvaigždžių populiacijų išsidėstymą diske. 17 pav. pavaizduotas RMS ir MK, o 18 pav. pagrindinės sekos (PS) žvaigždžių išsidėstymas. MK seka buvo suskaidyta į dvi dalis ties $V = 22^m$ (žiūr. 5 pav. MK sekos padalinimą). Matome, kad žvaigždėdara po kiekvieno žybsnio vyko vis arčiau centro. Tačiau kinta ne tik žvaigždėdaros srities dydis, bet ir disko skalės ilgis. MK žvaigždės išsidėsčiusios dviejų skalės ilgių diskuose. Suskirsčius MK žvaigždes į skirtingo amžiaus dalis atradome, kad populiacijų, kurių amžius nuo 600 mln. m. iki 400 mln. m., disko skalės ilgis $0'.79 \pm 0'.01$, o jaunesnių negu 400 mln. m. disko skalės ilgis $0'.51 \pm 0'.05$. Šių diskų radialiniai profiliai pavaizduoti 19 ir 20 pav. Radialinių profilių skaičiavimams naudojami tokie patys elipsės parametrai kaip ir RMS žvaigždėms. Žiedo, kuriame integruojama, plotis taip pat $\Delta a = 1'$. MK žvaigždžių amžiaus nustatymo tikslumas yra apie 100 mln. m..

Kadangi RMS amžius daugiau nei 2 mlrd. m., tai per tokį ilgą laiką azimutine kryptimi žvaigždės išsimaišė ir jokios struktūros pastebėti neįmanoma. Visai kitaip yra su jaunomis MK populiacijomis. Kadangi Leo A sukimosi greitis labai mažas, iki kelių km s^{-1} (Young ir Lo 1996), tai saugu tarti, kad jaunos MK žvaigždės išlikusios savo gimimo vietoje. Todėl galima atstatyti žvaigždėdaros plitimą diske. Tam pasinaudojome ir PS populiacijomis. Tačiau šios sekos blogybė ta, kad skirtingo amžiaus PS žvaigždės

persikloja (žiūr. 5 pav. izochronas). Todėl kiekvienai sričiai galime nusakyti tik seniausio amžiaus ribą. Kad MK labai tiksliai atkartoja PS žvaigždžių išsidėstymą aiškiai matyti iš 21 pav. Čia atidėtos 100 mln. m. MK ir iki 100 mln. m. PS populiacijos.

Pačią jauniausiąją, iki 200 mln. m. žvaigždėdaros evoliuciją galima atsekti iš 22 pav. Jame atidėtos trys populiacijos, tai seniausios MK žvaigždės, kurioms apie 200 mln. m., jaunosios 100 mln. m. MK žvaigždės ir pačios jaunosios PS, kurioms mažiau nei 100 mln. m. Pirmoje pažymėtoje dalyje matyti tik senoji populiacija. Šioje vietoje prieš 200 mln. m. gimė didžioji dauguma žvaigždžių. Vėliau žvaigždėdaros rajonas plito ir persikėlė į antrąją sritį, kaip matome joje yra tik 100 mln. m. amžiaus žvaigždės. Pačios jaunosios, t.y. tos kurioms ne daugiau nei 50 mln. m. išsižiebė trečioje srityje. Toks žvaigždėdaros plitimas, tai saviindukuojančios žvaigždėdaros pasekmė (Seiden & Gerola 1982). Šis mechanizmas numato, kad išsižiebusi žvaigždėdara vienoje disko vietoje, dėl sukeltos smūginės bangos pakeičia sąlygas aplinkiniuose rajonuose, kuriuose taip pat išsižiebia žvaigždėdara. Iš 22 pav. matome, kad Leo A galaktikos jaunosios žvaigždėdaros zonos plitimas vyko žiede aplink centrą.

5. Diskusija

5.1. Leo A galaktikos susidarymas

Formuojantis galaktikai vyksta du pagrindiniai konkuruojantys procesai: tai įkrentantys į besiformuojančią galaktiką šalti debesys ir priešingą efektą turinti žvaigždėdara, kurios metu atsiradusios supernovos (maždaug po 1-3 mln. m.) įkaitina dujų debesis ir išpučia iš galaktikos (Low ir Ferrara 1998). Nykštukinės netaisyklingos galaktikos formuojasi penkiais etapais (Rieschick ir Hensler 2000). Sumodeliuotos galaktikos žvaigždėdaros istorija atvaizduota 23 pav. Ji suskirstyta į keturis didėjančius diskus, t.y. skaičiuojant žvaigždėdaros spartą (ŽS), į didesnįjį diską įtraukiama ir mažesniojo ŽS. Paveiksle kiekviena vertikali linija žymi etapo pabaigą. Pirmasis etapas, tęsiasi apie 0.3 mlrd. m., šiuo metu vyksta pirminis, centrinis dujų kolapsas. Šiame etape susiformuoja centrinė galaktikos dalis. ŽS pastoviai auga kol pasiekia maksimumą. Didžiausias žvaigždėdaros aktyvumas vyksta centrinėje dalyje. Pasiekus žvaigždėdaros maksimumą prasideda antrasis etapas, kuris tęsiasi apie 0,5 mlrd. m. Šio etapo metu supernovų pagaminama energija tokia didelė ir jos gerokai praretina bei įkaitina dujas,

todėl ŽS greitai mažėja. Trečiajame etape, kuris trunka apie 1 mlrd. m., šaltų dujų įkritimas į diską sumažėja, todėl dujų pašalinimas iš disko vyrauja. Tai sąlygoja nuoseklų ŽS mažėjimą. Ketvirtajame etape galutinai susiformuoja centrinė galaktikos dalis bei diskas. Žvaigždėdara išplečia į diską kur ŽS padidėja net iki 70%. Paskutiniajame etape pasiekama globali kvazi-stabili būseną.

Pagal šį scenarijų evoliucionuoja galaktikos po rejonizacijos epochos, kai dujos pakankamai atšąla ir gali kolapsuoti. Tačiau, kad paaiškintume sferinės Leo A komponentės atsiradimą reikalingas nykštukinių galaktikų formavimosi scenarijus iki rejonizacijos. Ši galaktikų etapą modeliavo Susa ir Umemura (2004). Atsiskyrus pradinei medžiagos fliktuacijai, iš kurios vėliau susiformuos galaktika, nuo bendro kosmologinio plėtimosi, ji pradeda kolapsuoti. Tai tęsiasi tol kol visata pasiekia rejonizacijos epochą arba pasiekia pusiausvyrą, kuriai galioja Virialo teorema. Rejonizacijos epochoje ultravioletinių spindulių fonas gerokai padidėja (apie 10^{-21} erg cm⁻² s⁻¹ Hz⁻¹ sr⁻¹, Umemura ir kt. 2001) ir dujų temperatūra pakyla iki 10^4 - 10^5 K. Todėl bet kokios struktūros, sudarytos iš dujų, kurių virialinė temperatūra žemesnė negu 10^4 K, išgaruoja dėl padidėjusio terminio slėgio. Tačiau tose vietose, kur optinis gylis didesnis negu 2.4, dėl savi-ekranavimo nuo ultravioletinės spinduliuotės gali formotis žvaigždės. Susa ir Umemura (2004) parodė, kad tose sistemose, kurios galutinai kolapsuoja tik po rejonizacijos epochos, dėl savi-ekranavimo gali susidaryti atskiri žvaigždėdaros rajonai, tuo tarpu kai likusios dujos įkaitinamos ir išsklaidomos. Šiuose rajonuose susiformuoja žvaigždžių spiečiai, kurie toliau be energijos disipacijos judėdami link sistemos centro susiduria taip suformuodami sferoidą. Tuo tarpu kitos dujos turi atšalti ir tik vėliau kolapsuoja sudarydamos galaktikos diską.

Kiekvieno RMS struktūrinio elemento evoliucinę seką galime atkurti suderinę žvaigždžių metalingumus, kuriuos atitinka Q parametras, bei išsidėstymą SŠD. 13 pav. parodytas sferoido, VAP, ir disko histogramos. Sferoidas, kurio didžioji dalis žvaigždžių yra ties $Q = -0,635$, nemetalingesnis ir už diską, ir už VAP. Tai leidžia spręsti, kad sferoidas susiformavo ankščiau. Disko ir VAP metalingumų maksimumas sutampa, tačiau diske yra daug daugiau metalingesnių žvaigždžių negu VAP. Tai pastebima bendroje žvaigždžių pasiskirstymo diagramoje (24 pav.). Jame atidėtos disko žvaigždės ir tik tos VAP žvaigždės, kurių $Q > -0,62$. Pastarųjų kreivė yra statesnė už disko kreivę, o tai reiškia, kad VAP žvaigždžių skaičius didesnis ties mažom Q vertėm (mažesnis metalingumas). Iš to galima spręsti, kad ir VAP, ir diskas formavosi iš tos pačios pradinės medžiagos tačiau dėl diske vykstančios žvaigždėdaros jis buvo turtinamas

metalais. Disko nemetalingiausios žvaigždės galėjo susiformuoti keliais būdais. Dalis jų gimė tuo metu kai susidarė diskas iš pradinės medžiagos. Kitos nemetalingiausios žvaigždės galėjo gimti iš vis dar įkrentančios nemetalingų dujų, gaubiančių galaktikos diską. Tai patvirtina ir aptiktas masyvus HI apvalkalas (Young ir Lo 1996). Taigi, disko evoliucija prasidėjo nuo nemetalingų žvaigždžių ($Q \approx -0,61$) susiformavimo ir laikui bėgant jis vis buvo turtinamas metalais iš naujai susiformavusių populiacijų. Daugmaž tolygus disko žvaigždžių kiekio pasiskirstymas $(B-V)_{ist}$ histogramoje (9 pav.) rodo, kad žvaigždėdara vyko be didesnių žybsnių, o naujų populiacijų $(B-V)$ spalvos indeksas vis raudonesnis.

Tuo tarpu sferoidinė Leo A komponentė nors ir yra nemetalingesnė už diską, tačiau dauguma jos žvaigždžių $(B-V)_{ist}$ histogramoje (25 pav.) išsidėsčiusios gerokai raudonesnėje pusėje negu mėlynasis disko kraštas, $(B-V)_{ist} \approx 0,75$. Tai rodo, kad tarp sferoido ir disko susiformavimų praėjo daugiau nei 6 mlrd. m. Deja, kadangi disko ir sferoido metalingumai skirtingi, tai dėl amžiaus-metalingumo išsigimimo, šio laiko tarpo tiksliai nustatyti neįmanoma. Čia pateikti metai tariant, kad sferoidas susiformavo tuo pačiu metu kada įvyko pirmasis VAP žvaigždėdaros žybsnis (žiūr. žemiau). Tai leidžia nustatyti tik apatinę laiko intervalo ribą. Turint omeny, kad sferoido metalingumas mažesnis už VAP, ši laiko vertė turėtų būti didesnė.

Analogiška situacija yra su VAP žvaigždėdaros žybsniu. Jo žvaigždžių metalingumas yra toks pats kaip disko nemetalingiausių žvaigždžių, tačiau jos $(B-V)_{ist}$ diagramoje guli raudonesnėje pusėje negu disko žvaigždžių riba. Tariant, kad jų metalingumai vienodi (naudojom $Z = 0,0004$) galima nustatyti, kad žvaigždėdaros žybsnis įvyko ~6 mlrd. m. prieš susiformuojant diskui. 23 pav. tai atitinka paskutinįjį žvaigždėdaros etapą, kai ŽS diske gerokai išauga.

Taigi mes siūlome tokį Leo A susiformavimo scenarijų. Leo A yra ties mažais z (raudonasis poslinkis) kolapsavusi galaktika (pagal Susa ir Umemura (2004) žymėjimus, mažas z_C). Susa ir Umemura (2004) modeliavimai rodo, kad tokioje galaktikoje turi susiformuoti žvaigždžių spiečiai prieš rejonizaciją, kurie tolesnio kolapso metu be energijos disipacijos susiduria ir suformuoja sferoidą. Sferoido žvaigždės praturtino aplinką metalais, todėl VAP metalingesnė. Leo A sferoido žvaigždžių išsidėstymas pavaizduotas 11 pav. Pasibaigus rejonizacijos epochai tamsiosios medžiagos sferoide išlikusios dujos atšalo ir galėjo kolapsuoti. Pradinėje stadijoje kolapsas buvo centrinis, kurio pasėkoje susiformavo centrinė, mažo spindulio Leo A dalis. Joje įvykęs

žvaigždėdaros žybsnis sulėtino tolesnį žvaigždžių susidarymą. Šio žybsnio žvaigždės atrastos Leo A, o jų radialinis tankio profilis pavaizduotas 15 pav. Matome, kad pirminė populiacija išsižiebė $4'$ spinduliu, kas atitinka apie 900 pc. Populiacija gimė diske, kurio skalės ilgis lygus $7' \pm 4'$. Po 6 mlrd. m. galutinai susiformuoja išorinis galaktikos diskas, kurio skalės ilgis $1',14 \pm 0',06$ (14 pav.). Jo žvaigždžių projekcija regėjimo plokštumoje pavaizduota 12 pav.

5.2. Jauniausioji žvaigždžių populiacija

Pagal jauniausiąją žvaigždžių populiaciją negalima nieko pasakyti apie galaktikos formavimąsi, tačiau ji nusako dabartinės žvaigždėdaros sąlygas. Pirmiausia pastebėsime, kad jaunesnės nei 400 mln. m. žvaigždės gimsta labiau centruotame link centro diske negu senesnės žvaigždės. Senojo disko skalės ilgis $0',79 \pm 0',01$, tuo tarpu jaunojo tikrai $0',51 \pm 0',05$. Disko skalės ilgis galėjo sumažėti dėl į centrą judančių dujų, mat dujų debesys dėl tarpusavio susidūrimų praranda judesio kiekio momentą. Kai centre dujos atšąla bei susikaupia pakankama jų koncentracija, išsižiebia žvaigždėdara. Tokiu būdu naujai gimusios žvaigždės dar labiau centruotos link centro.

Iš turimų duomenų labai grubiai galima įvertinti žvaigždėdaros plitimo greitį. 22 pav. pavaizduota elipsė, kurios spindulys $1',7$ (~ 400 pc). Elipsės centras, pozicinis kampas bei ašių ilgių santykiai nustatyti iš RMS žvaigždžių, tie patys kurie buvo naudojami radialiniams profilams skaičiuoti. Jeigu tarsime, kad žvaigždėdara sklido šiuo žiedu, tai jos plitimo greitis apie 10 km s^{-1} .

6. Išvados

Galaktikų formavimosi ir evoliucijos klausimai yra patys aktualiausi šiandieninei astrofizikai. Norint į juos atsakyti, reikia suprasti kaip susiformavo pačios pirmosios struktūros visatoje. Pagal dabartinius kosmologinius modelius, tai turėjo būti nykštukinės galaktikos, kurios susidarė iš pradinių medžiagos tankio fliuktuacijų. Šie modeliai numato, kad tokios nykštukinės galaktikos yra pirminiai „bloakai“ sudėtingesnių ir didesnių galaktikų statybai, ir kad jų pačių sandara turi būti labai paprasta. Šiame darbe parodėme, kad taip nėra.

Tyrimui pasirinkome netaisyklingą nykštukinę galaktiką Leo A, kuri yra labai toli nuo kitų kaimynių, o tai leidžia tikėtis, kad ji yra nesąveikavusi ir „natūraliu“ būdu evoliucionavusi pirminė visatos galaktika. Šią nuomonę patvirtina ir stebėjimai $H\alpha$ bei raudonojo kontinuumo srityje (Heller ir kt. 2000). Šioje galaktikoje aptikome ankščiau nykštukinėse galaktikose nestebėtus struktūrinius elementus. Pirmiausia, tai labai nemetalingą sferoidinę žvaigždžių komponentę. Taip pat arti centro išsidėsčiusias žvaigždes, susiformavusias po pirminio žvaigždėdaros žybsnio, bei senąjį diską. Šie atradimai leido atkurti netaisyklingos nykštukinės Leo A galaktikos susiformavimo istoriją. Mes pasiūlėme scenarijų, kuriame numatytas sferoido susiformavimas prieš rejonizacijos epochą, pirminio žvaigždėdaros žybsnio centre atsiradimas bei tolesnė, po 6 mlrd. m. disko evoliucija.

Darbe taip pat buvo tyrinėtos jaunosios žvaigždžių populiacijos. Aptikome žvaigždžių disko sumažėjimą prieš 400 mln. m. Šiuo laikotarpiu disko skalės ilgis sumažėjo nuo $0'.79 \pm 0'.01$ iki $0'.51 \pm 0'.05$. Naudodami mėlynosios kilpos bei pagrindinės sekos žvaigždes atradome žvaigždėdaros plitimo kelią ir nustatėme plitimo greitį (~ 10 km/s) per pastaruosius 200 mln. m.

Padėka. Norėčiau išreikšti nuoširdžią padėką savo vadovui dr. Vladui Vansevičiui už jo kantrybę, supratingumą bei labai reikalingą pagalbą ne tik mokslo reikaluose nuo pat studijų pradžios. Jo dėka šešių metų kelias tapo vaisingų ieškojimų keliu.

Santrumpos

AMS	Asimptotinė Milžinių Seka
MK	Mėlynoji Kilpa
MKG	Mėlynos Kompaktiškos Galaktikos
NDG	Netaisyklingos Nykštukinės Galaktikos
NG	Nykštukinės Galaktikos
PS	Pagrindinė Seka
RMS	Raudonųjų Milžinių Seka
SŠD	Spalvos-Šviesio Diagrama
VAP	Vieno Amžiaus Populiacija
ŽS	Žvaigždėdaros Sparta

Mindaugas Karčiauskas

Dwarf Irregular Galaxy Leo A. Star Formation History

Summary

The dwarf irregular galaxy Leo A is one of the most isolated galaxies in the Local Group. Therefore, it is well suitable object for the study of self-regulated star formation. The observation data were taken with the Subaru telescope Prime Focus Camera (Suprime-Cam) (Vansevičius et al. 2004). *B*, *V* and *I* magnitudes were employed to construct color-magnitude diagrams and to study star formation history of the galaxy.

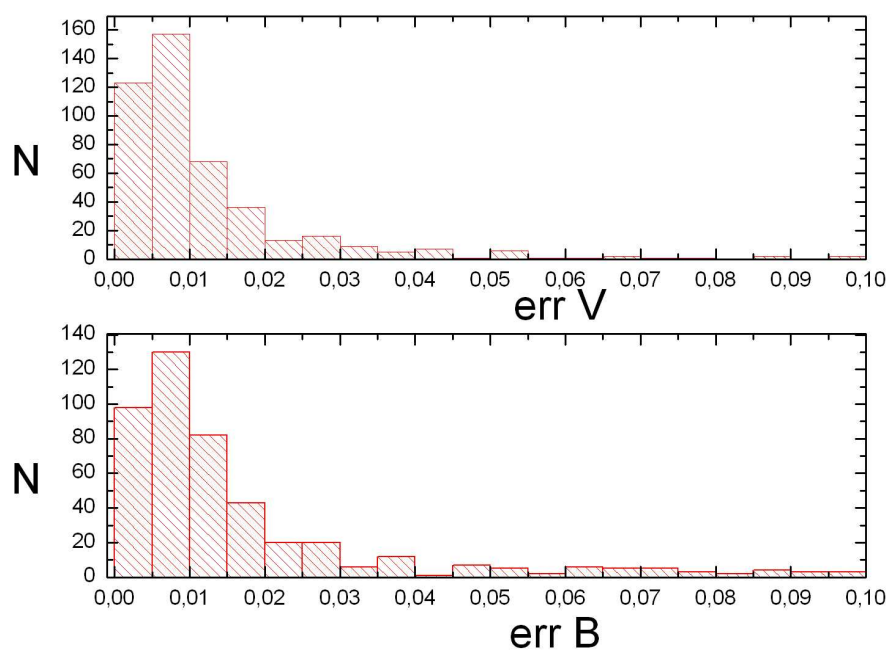
We discovered new structural elements in dwarf galaxies. Leo A possesses: the metal poor spherical stellar component (halo); the very old star formation burst population; the old disk. These discoveries led us to propose a new scenario for the Leo A galaxy formation.

Recent star formation was investigated by employing blue-loop and main sequence stars. We found some evidence of jump-shrinking of the young stellar disk ~ 400 Myr ago. We were able to reveal a propagation path and velocity of the very recent (less than 200 Myr old) self-regulated star formation.

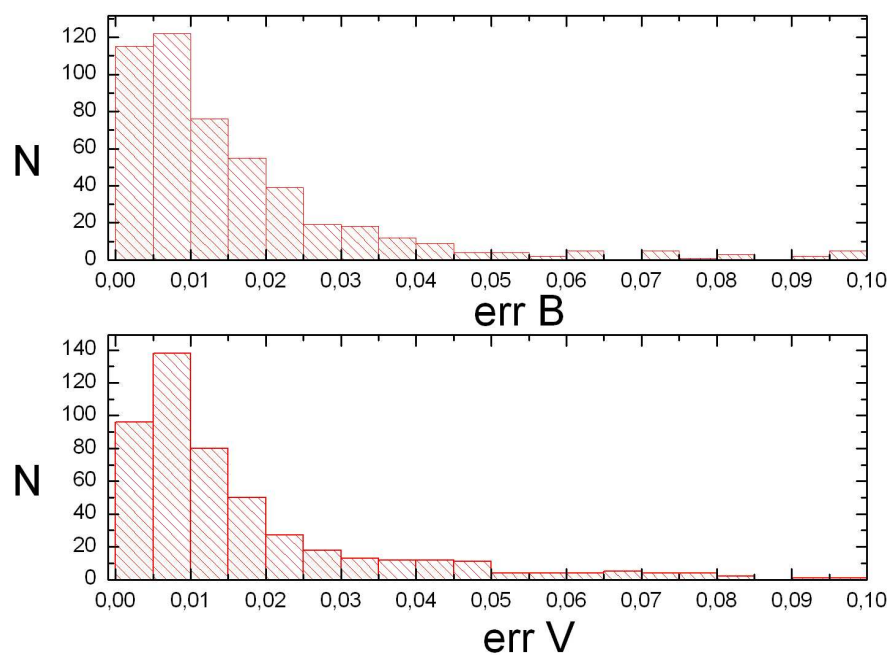
Literatūra

- Babul, A., Ferguson, H. C., 1996, ApJ, **458**, 100
Bode, P., Ostriker, J. P., Turok, N., 2000, AAS, **197**, 720
Dekel, A., Silk, J. 1986, ApJ, **303**, 39
Demers, S., Kibblewhite, E. J., Irwin, M. J., Bunclar, P. S., Bridgeland, M. T. 1984, ApJ, **89**, 1160
Dolphin, A. E., ir kt., 2002, ApJ, **123**, 3154
Fitzpatrick, E. L. 1985, ApJS, **59**, 77
Heller, A. B., Brosch, N., Almoznino, E., van Zee, L., Salzer, J. J. 2000, MNRAS, **316**, 569
Kravtsov, A. V., Gnedin, O. Y., Klypin, A. A. 2004, ApJ, **609**, 482
Low, M. M., Ferrara, A., 1998, LNP, **506**, 559
Mateo, M. 1998, ARA&A, **36**, 435
Rieschick, A., Hensler, G., 2000, ASP Conference Series, , **215**, 130
Schulte-Ladbeck, R. E., Hopp, U. Drozdovsky, I. O., Greggio, L., Crone, M. M.. 2002, ApJ, **124**, 896
Seiden, P. E., Gerola, H. 1982, *Fundamentals of Cosmic Physics*, Vol 7., 241
Seljak, U., Makarov, A., McDonald, P. ir kt., 2005, PhysRevD, **71**, 3515
Skillman, E. D., Kennicutt, R. C., Hodge, P. 1989, ApJ, **347**, 875
Spergel, D. N., Verde, L., Peiris, H. V. ir kt., 2003, ApJS, **148**, 175
Susa, H., Umemura, M. 2004, ApJ, **600**, 1
Tegmark, M., Strauss, M. A., Blanton, M. R. ir kt., 2004, PhRvD, **69**, 3501
Tolstoy, E., Gallagher, J. S., Cole, A. A. ir kt. 1998, ApJ, **116**, 1244
Vansevičius, V., Arimoto, N., Hasegawa, T. ir kt. 2004, ApJL, **611**, L93
Umemura, M., Nakamoto, T., Susa, H., 2001, Proc. of the 4th RESCEU Symp., 297
Young, L. M., Lo, K. Y. 1996, ApJ, **462**, 203
Zwicky, F. 1942, Phys. Rev. II, **61**, 489

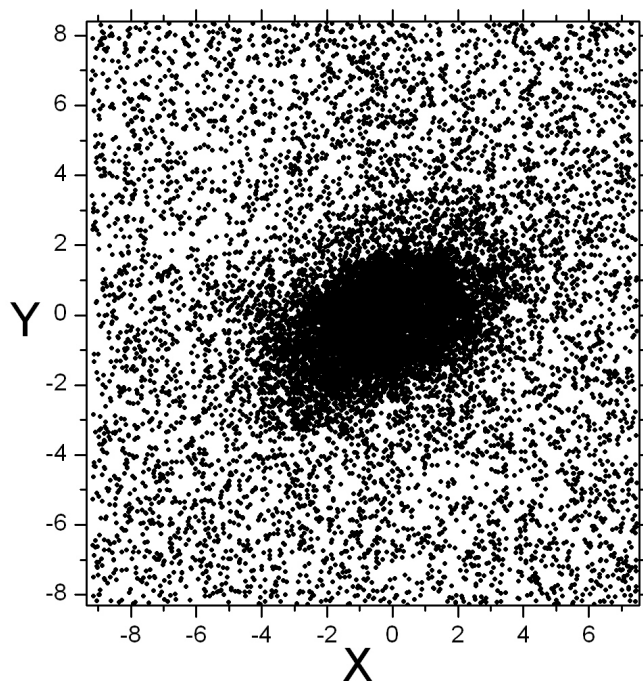
Grafikai



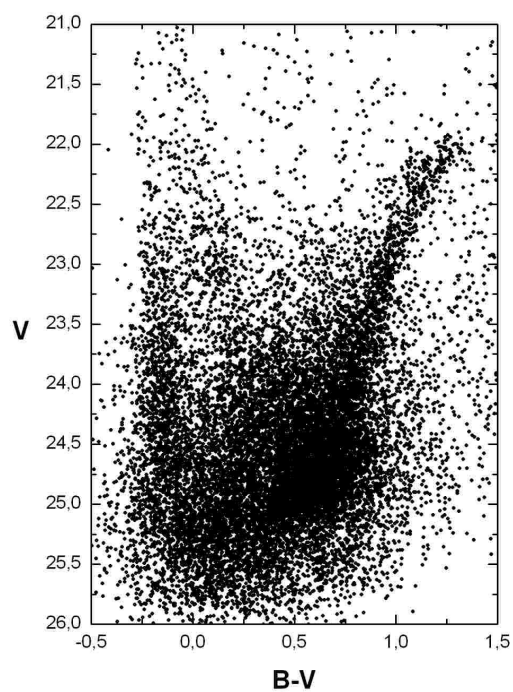
1 pav. Tyrimui naudotų RMS žvaigždžių (žiūr. 4.1 skyrių) paklaidų histogramos V ir B filtruose.



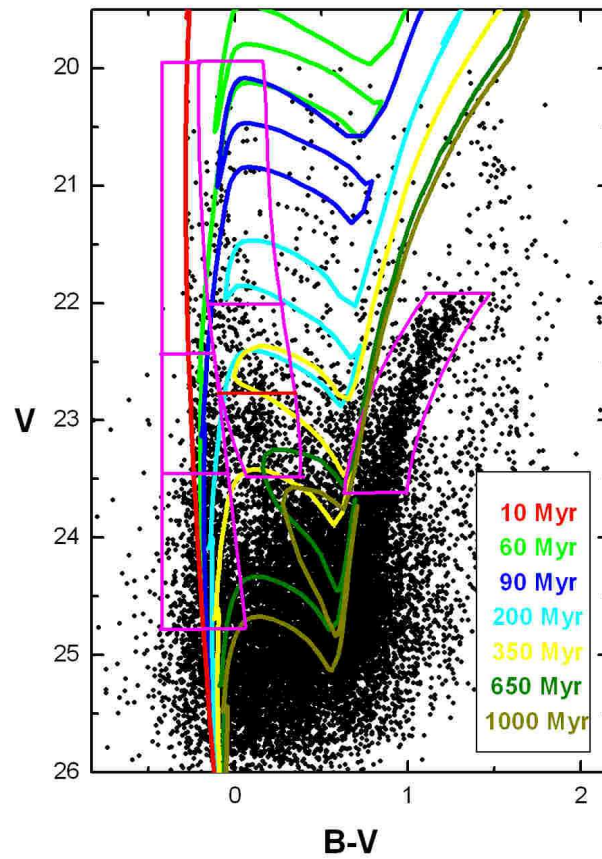
2 pav. Tyrimui naudotų MK žvaigždžių (žiūr. 4.1 skyrių) paklaidų histogramos V ir B filtruose.



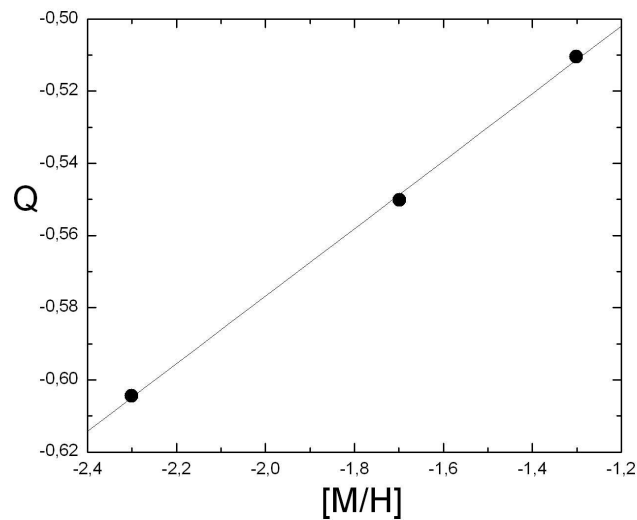
3 pav. Stebėta Leo A galaktikos sritis.



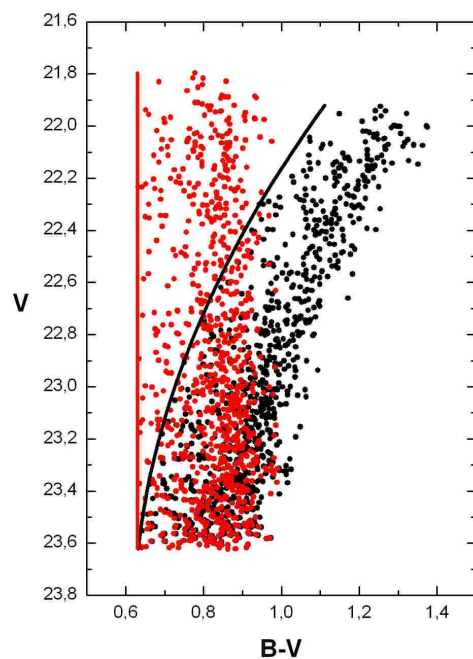
4 pav. Išmatuotos Leo A galaktikos žvaigždės.



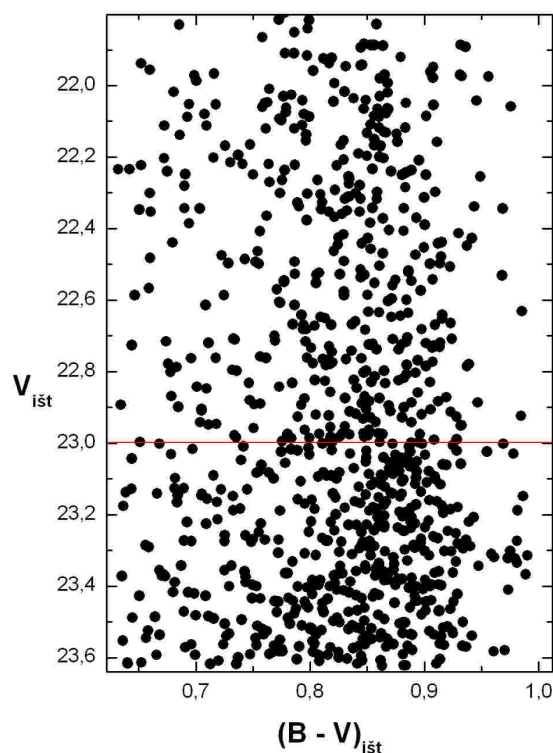
5 pav. Leo A žvaigždės su pažymėtomis nagrinėjamomis sritimis. PS suskirstyta į tris dalis ties $V = 23,45^m$ ir $22,43^m$, MK į dvi dalis ties $V = 22^m$. Parodytų izochronų $Z = 0,0004$. Raudona linija MK sekose atskiria žvaigždes, išsidėsčiusias skirtingo dydžio diskuose. Ši linija atitinka 400 mln. m. MK populiacijos amžių.



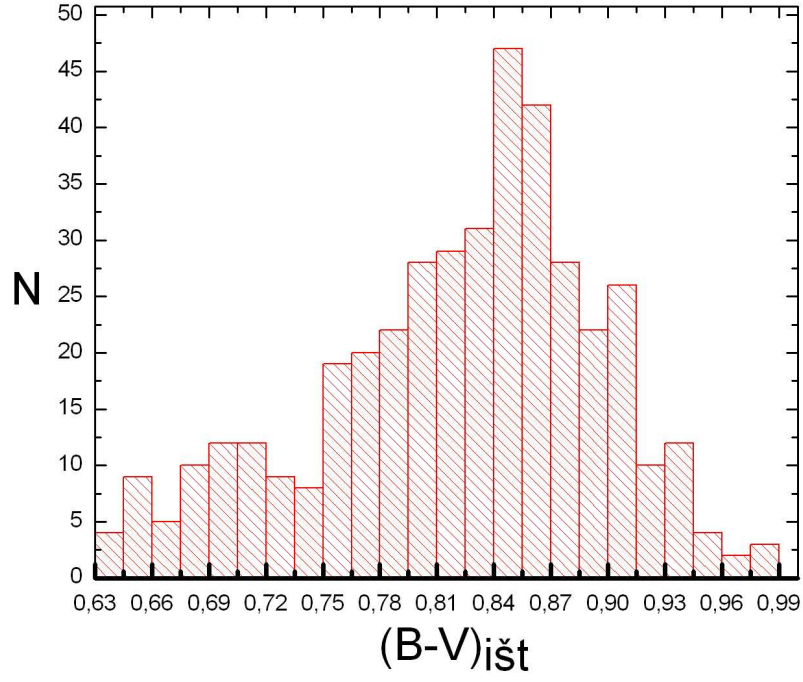
6 pav. Q parametro priklausomybė nuo žvaigždžių metalingumo. Atidėti tris taškai pagal 10 mlrd. metų ir skirtingo metalingumo izochronas, $Z = 0,0001; 0,0004; 0,001$.



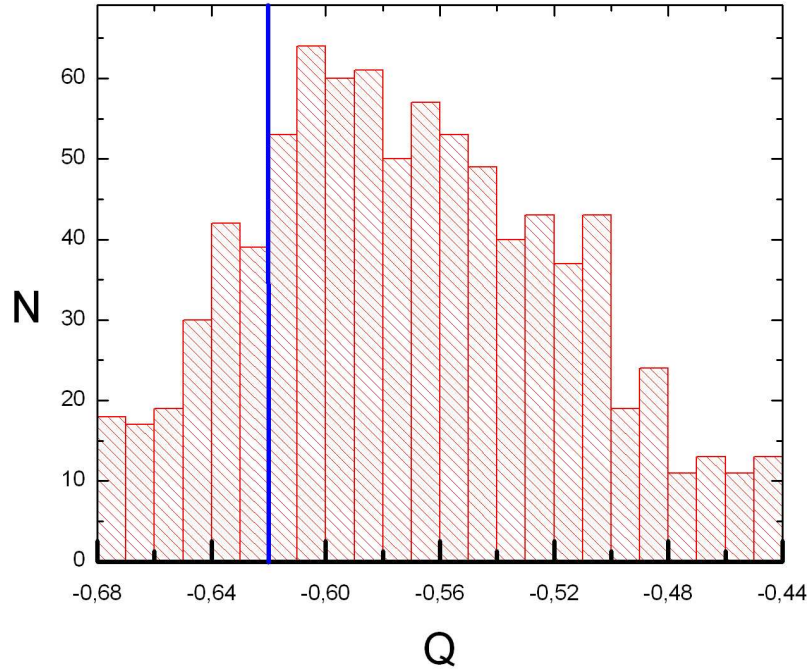
7 pav. Ištiesinta RMS. Sekos išlinkimas aprašytas polinomu: $(B - V) = a + b_1 V + b_2 V^2$, kurio koeficientas a kinta nuo 69,45 iki 69,81 mėlynajam ir raudonajam sekos kraštui atitinkamai, $b_1 = 5,749$ ir $b_2 = 0,12$.



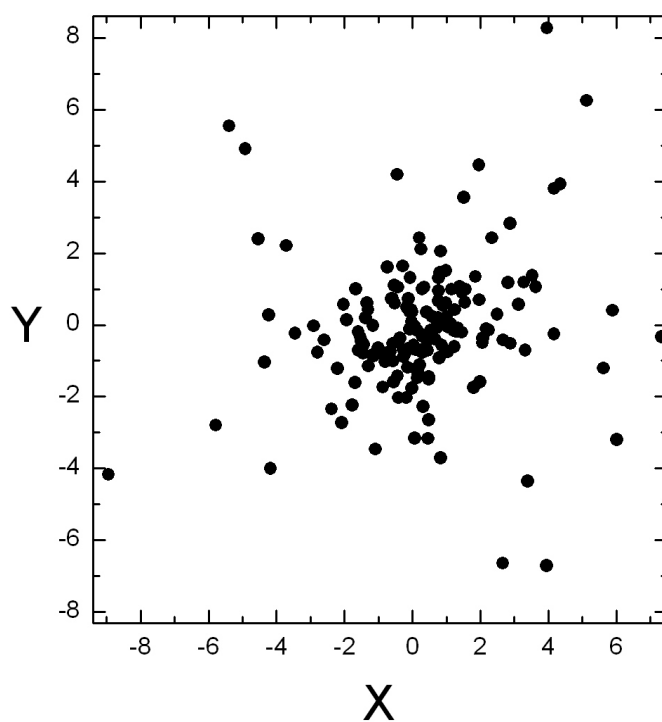
8 pav. Ištiesinta RMS. Kadangi diagramoje žemiau $V > 23^m$ matoma įstrižai einanti struktūra, kuri užsibaigia sutankėjimu ties $((B - V)_{ist}; V_{ist}) = (0,85; 23,05)$, tyrimui naudojome tik žvaigždes $V < 23^m$.



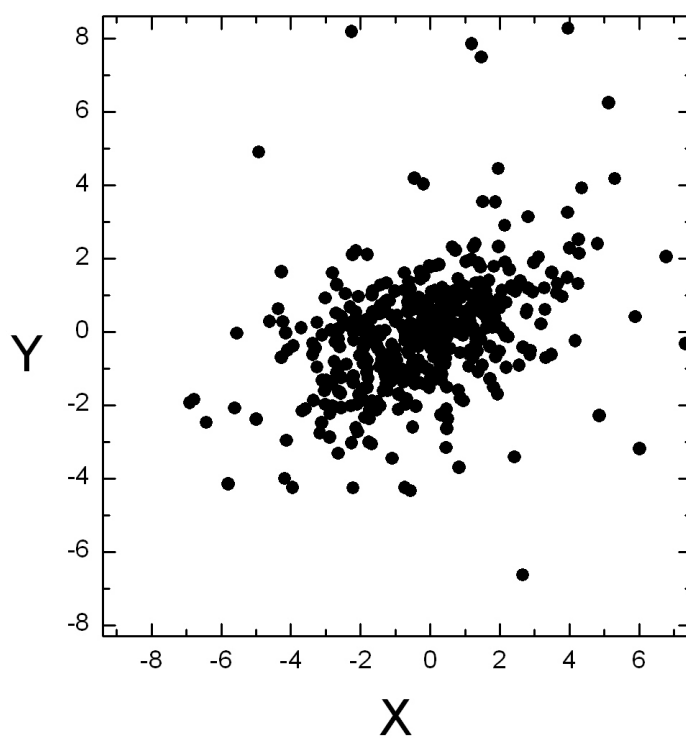
9 pav. RMS žvaigždžių pasiskirstymas statmena ištiesintai sekai kryptimi. Pagal šią histogramą išskyrėme tokius struktūrinius elementus: mėlynąją RMS dalį $(B-V)_{\text{įst}} < 0,75$, diską $(B-V)_{\text{įst}} \in (0,75; 0,84)$ ir $(0,87; 0,915)$, vieno amžiaus populiaciją (VAP) $0,84 < (B-V)_{\text{įst}} < 0,87$, raudonąją dalį $(B-V)_{\text{įst}} > 0,915$. Histograma sukonstruota žvaigždėms, kurių $V < 23^m$.



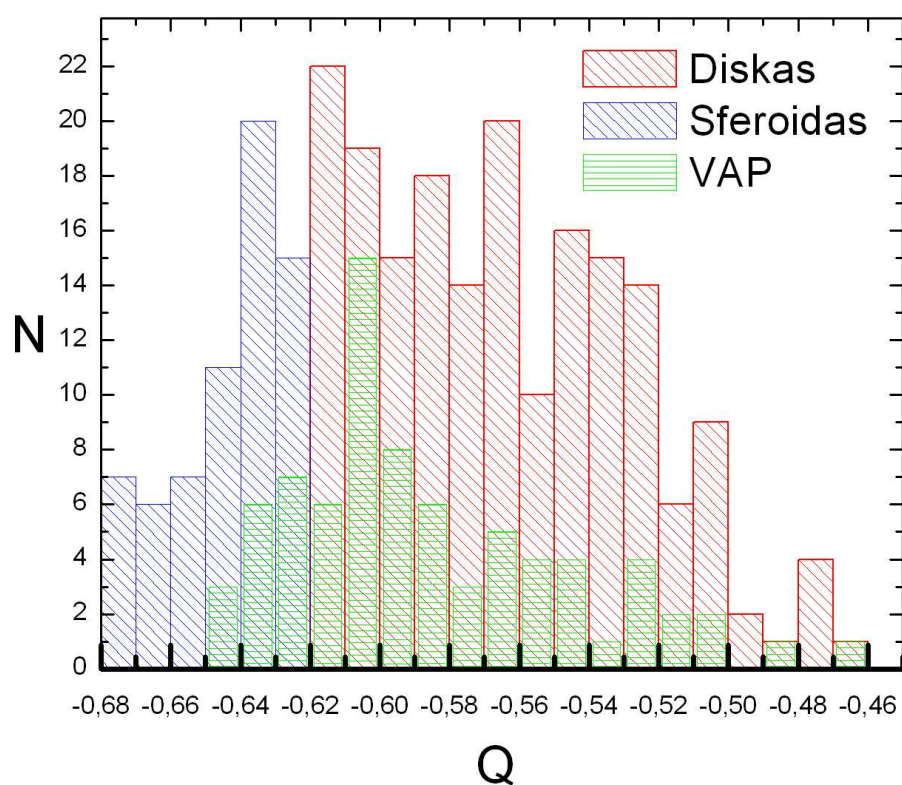
10 pav. RMS žvaigždžių Q parametras ($Q = (B - V) - (V - I) \cdot C$, kur $C = 1,3$). Žvaigždės $Q < -0,62$ priklauso atrastam sferoidui (žiūr. tekste), o žvaigždės, kurių $Q > -0,62$ išsidėsčiusios diske.



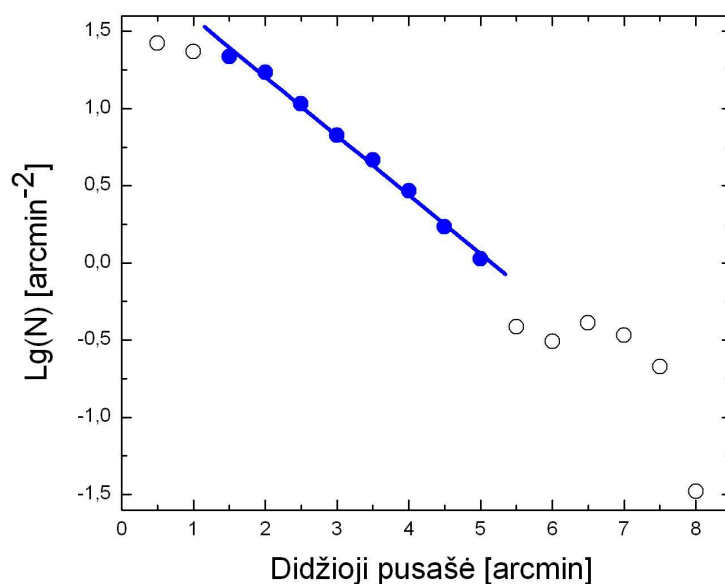
11 pav. Sferoido žvaigždžių, kurių $Q < -0,62$ išsidėstymas stebėjimo plokštumoje.



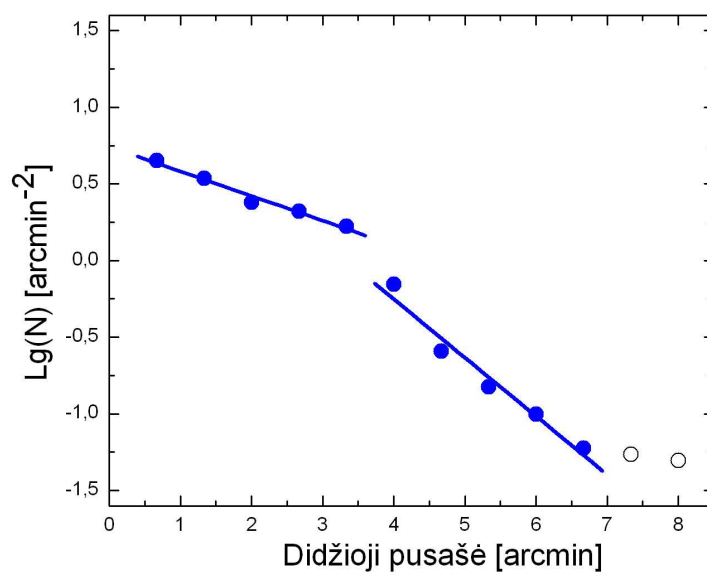
12 pav. Tas pats kaip ir 11 pav. tik disko žvaigždėms, kurių $Q > -0,62$.



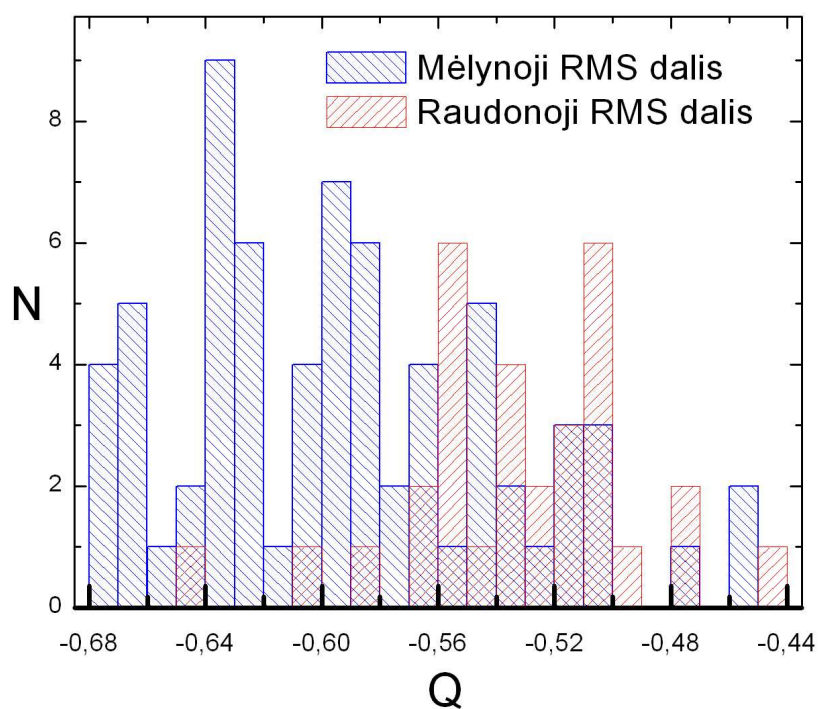
13 pav. Kiekvienos RMS komponentės Q histograma. Pastebėtina, kad sferoido žvaigždžių maksimumas yra ties $Q = -0,635$; disko ir VAP žvaigždžių maksimumai beveik sutampa ties $Q \sim -0,61$.



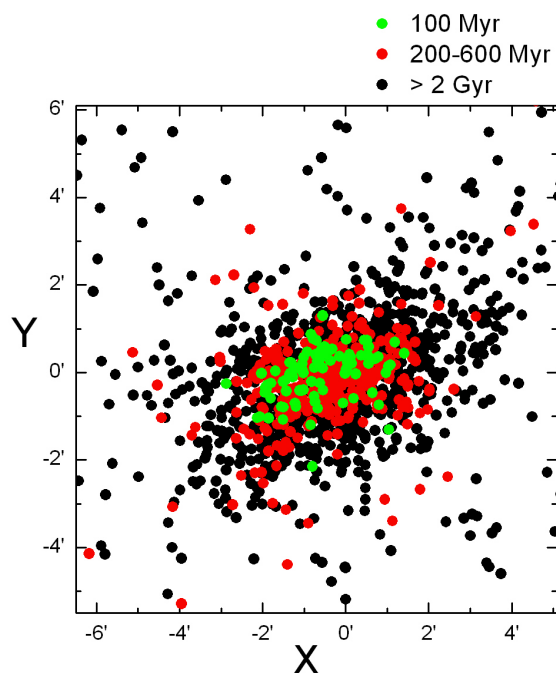
14 pav. Disko žvaigždžių tankio radialinis profilis. Mėlynai pažymėti skalės ilgio nustatymui naudoti taškai. Nustatytas disko skalės ilgis $1',14 \pm 0',06$.



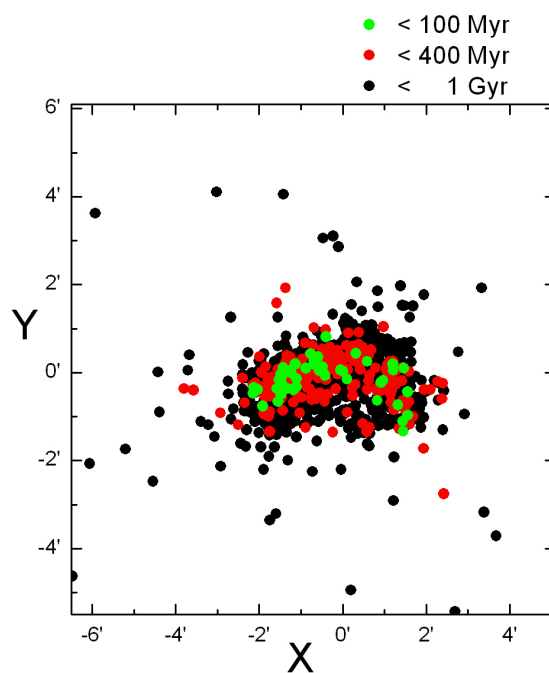
15 pav. VAP radialinis profilis. Jame išryškėja du eksponentiniai diskai, vienas su labai dideliu skalės ilgiu ($7' \pm 4'$), tačiau mažo spindulio. Šis priklauso VAP. Kitas diskas matomas dėl į VAP seką patekusių disko žvaigždžių, kurių radialinis profilis pavaizduotas 14 pav.



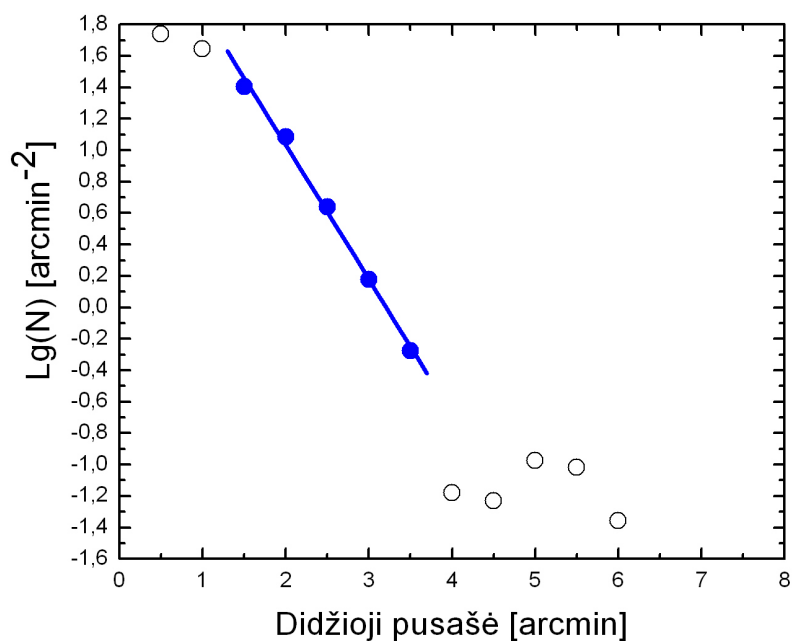
16 pav. Mėlynosios bei raudonosios RMS dalių Q . Mėlynojoje dalyje dominuoja nemetalingiausios, o raudonojoje metalingiausios RMS sekos žvaigždės.



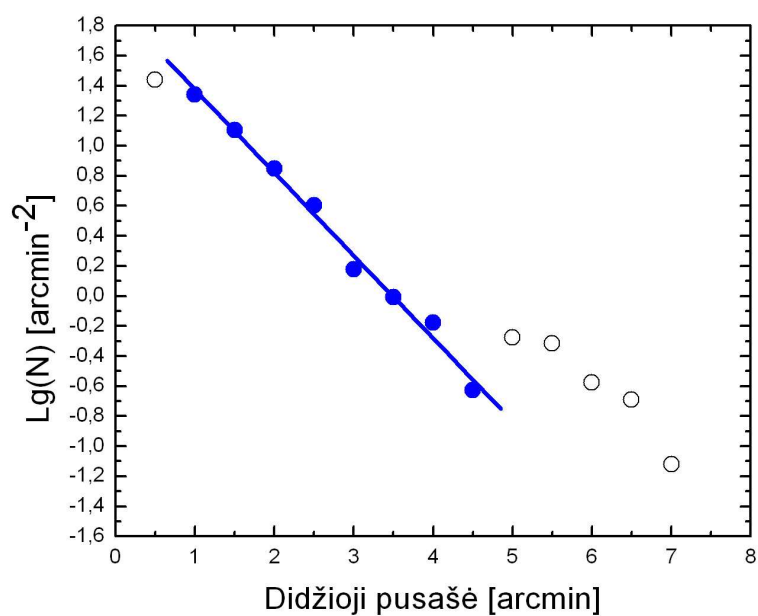
17 pav. Skirtingo amžiaus žvaigždžių pasiskirstymas diske. Juoda spalva pažymėtos RMS žvaigždės senesnės nei 2 mlrd. m., raudona spalva nuo 200 iki 600 mln. m. ir žalia spalva 100 mln. m. MK žvaigždės.



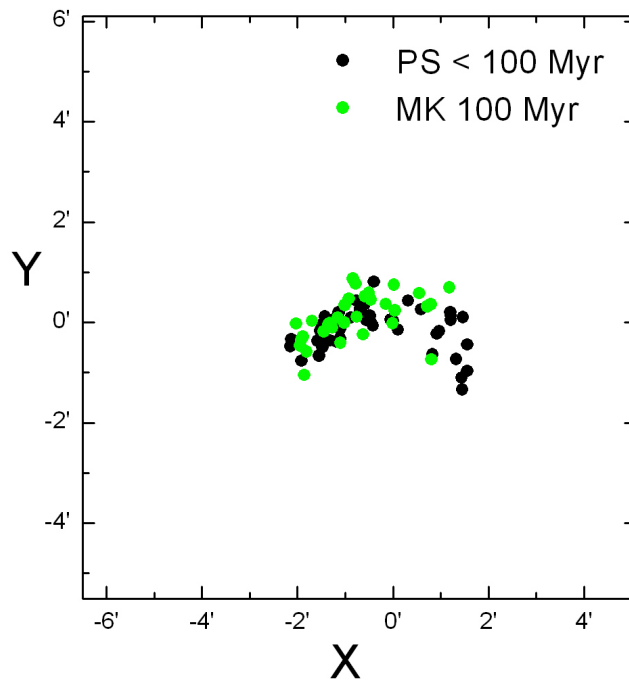
18 pav. Skirtingo amžiaus PS žvaigždžių pasiskirstymas diske. Kadangi pagrindinės sekos žvaigždės SŠD persikloja, todėl galima nurodyti tik viršutinę žvaigždžių amžiaus ribą. Juoda spalva atidėtos jaunesnės nei 1 mlrd. m. žvaigždės, raudona - jaunesnės nei 400 mln. m., žalia pačios jauniausios - iki 100 mln. m.



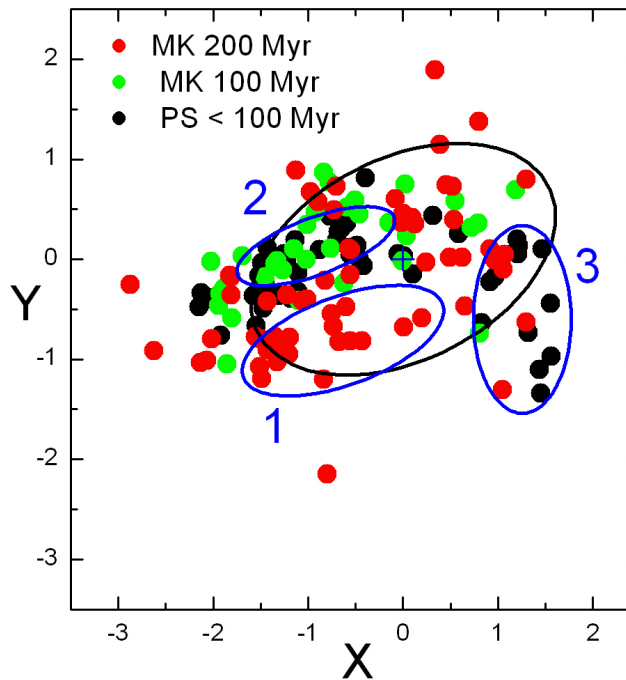
19 pav. Nuo 400 iki 600 mln. m. amžiaus disko žvaigždžių tankio radialinis profilis. Disko skalės ilgis $0'.79 \pm 0'.01$.



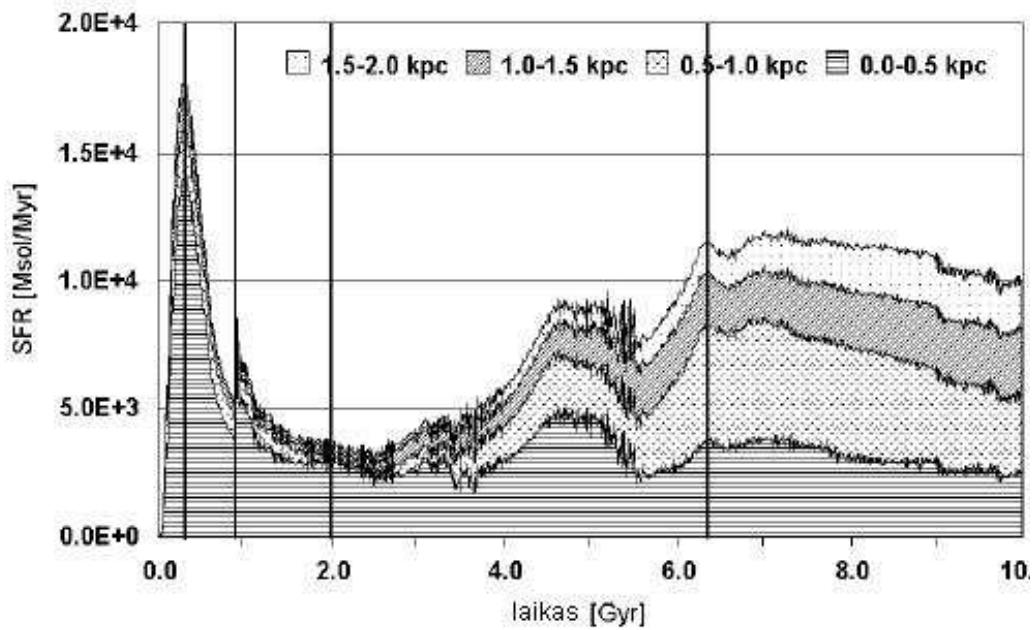
20 pav Jaunesnių nei 400 mln. m. amžiaus žvaigždžių disko radialinis profilis. Disko skalės ilgis $0'.51 \pm 0'.05$.



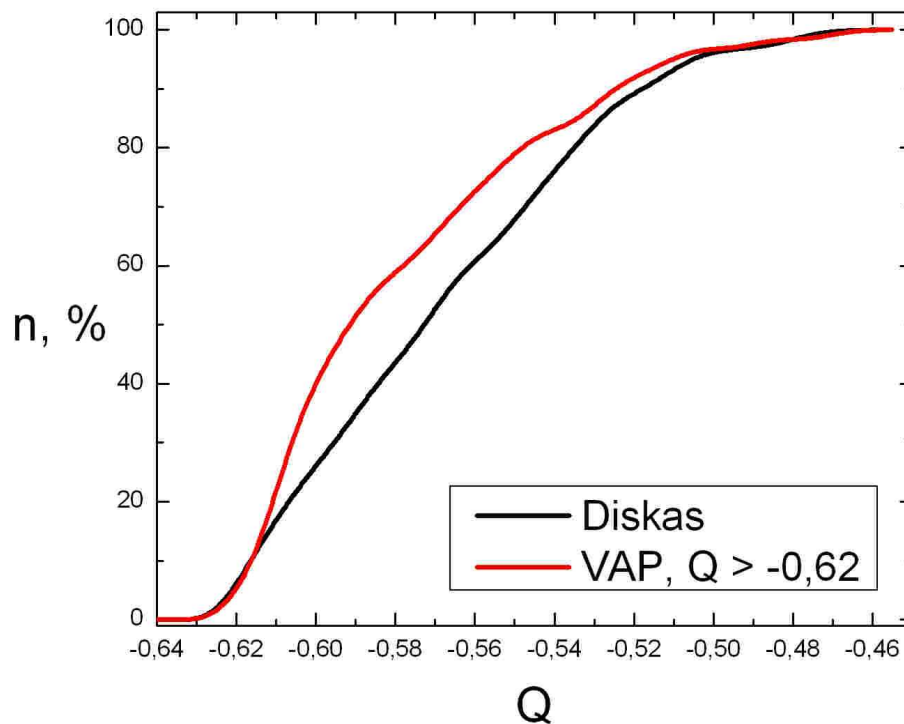
21 pav. Pačios jauniausios Leo A žvaigždės. Žalia spalva atidėtos apie 100 mln. m. MK, o juoda spalva jaunesnės nei 100 mln. m. PS žvaigždės.



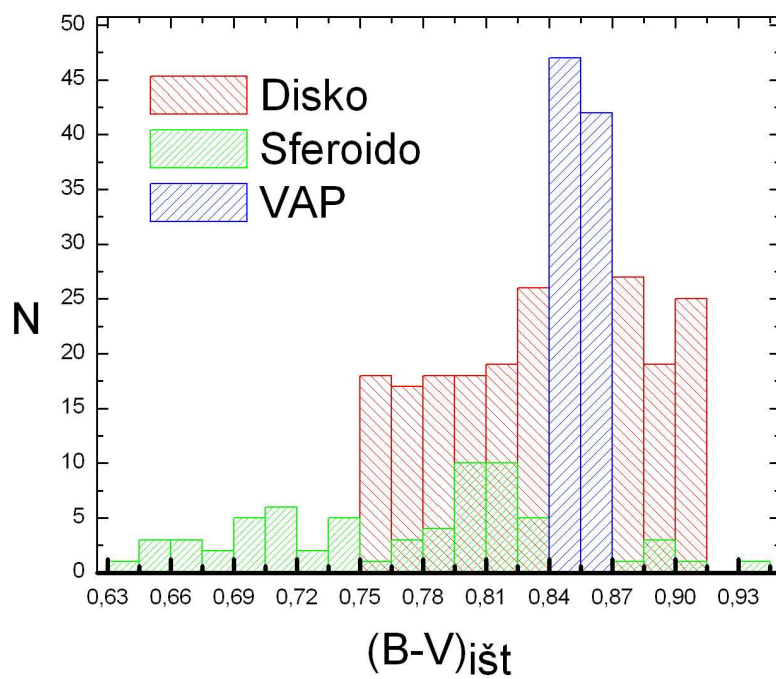
22 pav. Iki 200 mln. m. amžiaus žvaigždžių pasiskirstymas Leo A diske. Raudona spalva pavaizduota 200 mln. m. metų senumo MK populiacija, žalia spalva 100 mln. m. MK populiacija, o juoda iki 100 PS populiacija. Mėlynu kryžiu pažymėtas disko centras, nustatytas iš RMS žvaigždžių. Jaunų žvaigždžių centras atrodo pasislinkęs dėl netaisyklingo žvaigždėdaros rajonų pasiskirstymo. Mėlynomis elipsėmis pažymėtos sritys, kuriose dominuoja skirtingo amžiaus populiacijos. Juoda elipsė naudojama žvaigždėdaros plitimo greičiui nustatyti (žiūr. tekstą).



23 pav. Netaisyklingos nykštukinės galaktikos formavimosi ir evoliucijos modelis, t.y. žvaigždėdaros spartos priklausomybė nuo galaktikos amžiaus. Skirtingai užstričiuotos zonos rodo ŽS atitinkamo dydžio diskuose. Vertikalūs brūkšniai žymi kiekvieno iš penkių etapų pabaigą (žiūr. tekstą). Paimta iš Rieschick ir Hensler (2000).



24 pav. VAP bei disko žvaigždžių kiekio integralinis pasiskirstymas priklausomai nuo Q . Įtrauktos tik tos VAP žvaigždės, kurių $Q > -0.62$. VAP kreivė statesnė, tai reiškia, kad joje santykinai daugiau nemetalingų žvaigždžių negu diske.



25 pav. Sferoido, disko ir VAP žvaigždžių pasiskirstymas statmena ištiesintos RMS kryptimi.