

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
TEORINĖS FIZIKOS IR ASTRONOMIJOS INSTITUTAS

Eimantas Kriščiūnas
**DAUGIASPALVĖ ANDROMEDOS GALAKTIKOS
ŽVAIGŽDŽIŲ SPIEČIŲ FOTOMETRIJA**

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas
Teorinės fizikos ir astrofizikos
studijų programa

Studentas:	Eimantas Kriščiūnas
Leista ginti:	2021-05-20
Darbo vadovas:	prof. dr. Vladas Vansevičius
Instituto atstovas:	prof. dr. Egidijus Anisimovas

Vilnius 2021

Turinys

Įvadas.....	3
1. Stebėjimų duomenys.....	5
1.1. PHAT apžvalga	5
1.2. Spiečių imtis.....	7
1.3. Alternatyvių laukelių paieška.....	10
2. Spiečių fotometrija.....	14
2.1. Centro koordinacių ir apertūrų parinkimas	14
2.2. Apertūrinė fotometrija.....	15
2.3. Fono lygio nustatymas	18
2.4. Ryškių nustatymas.....	20
3. Katalogo nagrinėjimas	22
3.1. Žvaigždėdaros žiedas radialine kryptimi.....	22
3.2. Žvaigždėdaros žiedas azimutine kryptimi.....	26
Išvados.....	29
Literatūros sąrašas	30
Priedas Nr. 1	31
Priedas Nr. 2	34
Santrumpų sąrašas	35
Santrauka.....	36
Summary	37

Įvadas

Aukštos kokybės duomenys apie žvaigždžių spiečius suteikia galimybę nagrinėti svarbias astrofizikines problemas, kuriomis bandoma aiškinti spiečių, žvaigždžių, galaktikų formavimąsi ir evoliuciją. Paukščių Tako žvaigždžių spiečių katalogai nėra pilni ir tikslūs, nes spiečių aptikimą Galaktikos plokštumoje komplikuoja didelė tarpžvaigždinė ekstinkcija. Patikimi duomenys apie spiečius Paukščių Take gaunami tik iki ~1 kpc atstumo. Norint analizuoti panašios į Paukščių Taką galaktikos žvaigždžių spiečių savybes, stebima Andromedos galaktika (M31). Pagrindiniai šios galaktikos parametrai yra pateikiami 1.1 lentelėje. Tai masyviausia vietinės grupės spiralinė galaktika. Andromedos galaktikos disko plokštuma nepatogiai atsukta į mus (kampas tarp regėjimo krypties ir galaktikos poliaus yra ~77 laipsniai¹), tad sudėtinga stebėti spiralinėse vijose ir tarp jų esančius žvaigždžių spiečius. Didžioji dalis žvaigždžių gimsta vijose esančiuose žvaigždėdaros regionuose, kur susiformuoja spiečiai ir žvaigždžių asociacijos. Todėl turint kuo tikslesnę Andromedos galaktikos žvaigždžių spiečių fotometrijos katalogą galima modeliuoti kaip žvaigždžių spiečių ypatybės (amžius, masė, metalingumas) priklauso nuo jų formavimosi aplinkos (Johnson ir kt. 2012). Šios galaktikos stebėjimais remiantis sukurti teoriniai modeliai, vėliau gali būti pritaikyti kitoms spiralinėms galaktikoms tirti.

Šiame darbe bus analizuojami PHAT² (Panchromatic Hubble Andromeda Treasury) apžvalgos duomenys, kurie gauti Hablo kosminio teleskopo (HST – Hubble Space Telescope) ACS (Advance Camera for Surveys) ir WFC3 (Wide Field Camera 3) kameromis. Šių kamerų aukšta erdvinė skyra leidžia ne tik aptikti žvaigždžių spiečius Andromedos galaktikoje, bet ir išskirti juos į atskiras žvaigždes (Fouesneau ir kt. 2014). Naudodami publikuotą Johnson ir kt. (2015) PHAT apžvalgos žvaigždžių spiečių katalogą, siekdami sumažinti foninių žvaigždžių įtaką matavimams, mes atsirinktai žvaigždžių spiečių imčiai nustatysime naujas centrų koordinates, parinksime naujas apertūros spindulio vertes integruotai fotometrijai, bei interaktyviu būdu nustatysime fono lygio vertes. Atlikę daugiaspalvę apertūrinę fotometriją, gautus rezultatus palyginsime su Johnson ir kt. (2015) duomenimis.

Kadangi Andromedos galaktika yra pakankamai arti, spiečių amžiaus, masės ir tarpžvaigždinės ekstinkcijos parametrai leidžia tirti joje vykstančius evoliucinius procesus. Todėl panaudoję Naujalis ir kt. (2020) katalogą, panagrinėsime galaktikos žiedą radialine ir azimutine kryptimi.

¹ <https://ned.ipac.caltech.edu/>

² <https://archive.stsci.edu/prepds/phat/>

1.1 lentelė. Pagrindiniai Andromedos galaktikos parametrai

Parametras	Vertė	Literatūra
Numeris Charles Messier kataloge	MESSIER 031 (M31)	1
Pusiaujinės koordinatės: α (J2000), δ (2000)	00h 42m 44,3s +41° 16' 9"	1
Disko diametras	~67,5 kpc	1
Atstumas	785 kpc	2
Padėties kampas	37,7 deg	1
Polinkio kampas	77,5 deg	1
Atstumo modulis, m - M	24,47 mag	2
Absolūtus ryškis, M_V	-21,78 mag	1
Regimasis ryškis, V	2,68 mag	1
Dinaminė masė	$1,5-5,5 \times 10^{12} M_{\text{solar}}$	3

Pastaba. Duomenys paimti iš literatūros šaltinių: (1) [NASA/NED](https://ned.ipac.caltech.edu/)³ užgalaktinių duomenų bazė; (2) [McConnachie ir kt. \(2005\)](#); (3) [Phelps ir kt. \(2013\)](#).

Darbo tikslas: atlikti naują Andromedos galaktikos PHAT apžvalgos žvaigždžių spiečių fotometriją ir nustatyti žvaigždžių spiečių parametrų skirstinius galaktikos diske.

Uždaviniai:

1. Nustatyti žvaigždžių spiečių centrų koordinates, matavimo apertūras ir fono lygius.
2. Atlikti žvaigždžių spiečių daugiaspalvę apertūrinę fotometriją ir parengti katalogą.
3. Ištirti žvaigždžių spiečių populiacijų parametrų kitimo pobūdį M31 galaktikos diske.

³ <https://ned.ipac.caltech.edu/>

1. Stebėjimų duomenys

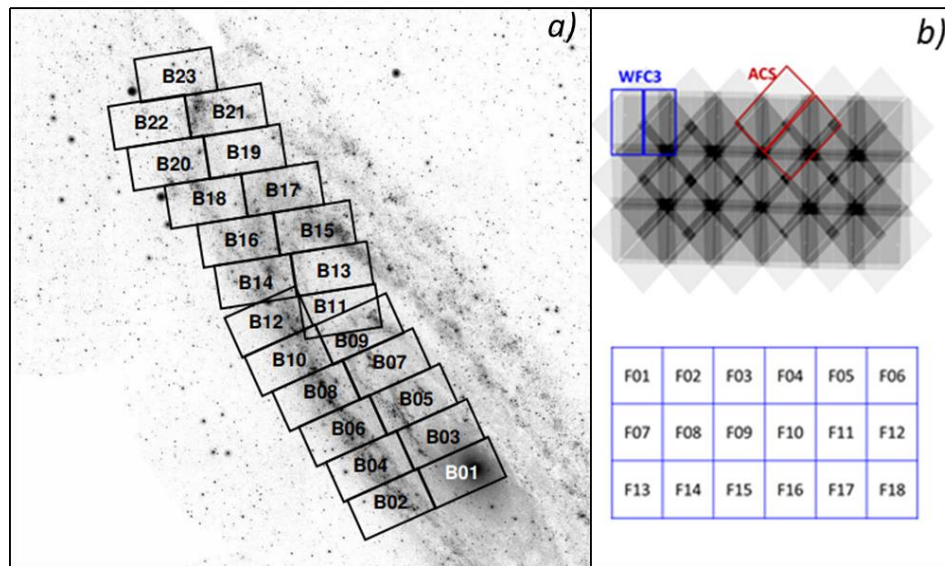
Šiame skyriuje pristatomi PHAT apžvalgos stebėjimų duomenys ir darbe naudojamas žvaigždžių spiečių katalogas. Skyrius paruoštas remiantis ankstesniais autoriaus darbais.

1.1. PHAT apžvalga

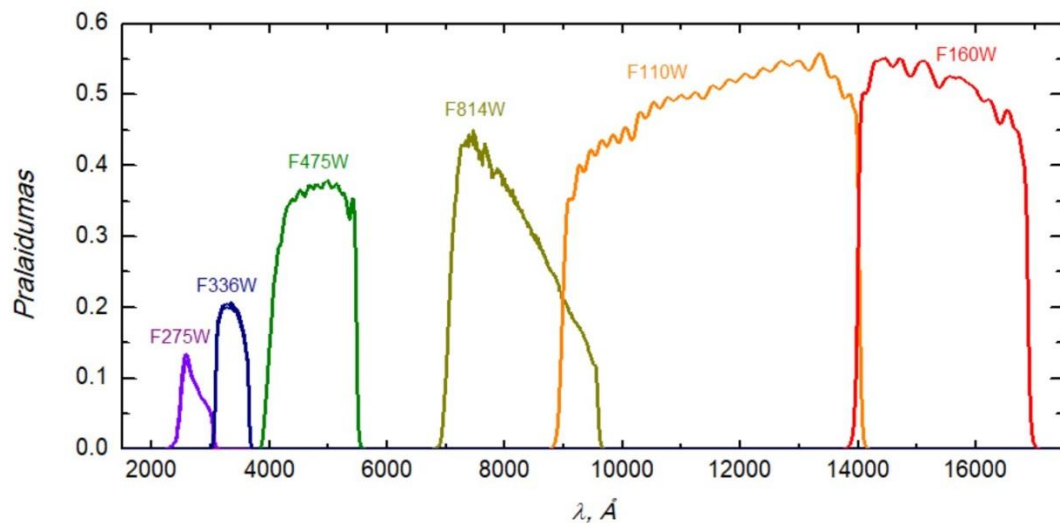
Nuo 2010 liepos 12 d. iki 2013 spalio 12 d. Hablo kosminio teleskopo ACS ir WFC3 kameromis atliktos „Panchromatic Hubble Andromeda Treasury“ (PHAT) apžvalgos metu buvo nufotografuota ~1/3 Andromedos disko dalis (1.1 pav.). Stebėjimai atlikti plačiame spektro ruože – nuo NUV (Near Ultraviolet) iki NIR (Near Infrared). Nuotraukos optinėje srityje gautos ACS kamera naudojant *F475W* ir *F814W* filtrus, o artimoje ultravioletinėje ir artimoje infraraudonoje spektro srityje – WFC3 kamera naudojant *F275W*, *F336W*, *F110W* ir *F160W* filtrus. Pagrindiniai PHAT apžvalgos parametrai pateikiami 1.2 lentelėje, o naudotų filtrų reakcijos kreivės parodytos 1.2 pav. Stebėjimams pasirinkta šiaurės rytinė Andromedos galaktikos dalis, nes šioje dalyje yra mažesnė vidinė ekstinkcija, ir ji nepaveikta M32 nykštukinės galaktikos įtakos. Šios Andromedos galaktikos dalies suskirstymas į atskirus 23 blokus parodytas 1.1 pav. „Nelyginiai“ blokai išdėstyti išilgai didžiosios ašies nuo centro (B01) iki pat žvaigždes formuojančio disko krašto (B23), o „lyginių“ blokų eilė dengia dalį žvaigždžių formavimosi žiedo.

Kiekvienas blokas sudarytas iš 18-os laukelių, kurių vieno dydis – tai viena WFC3 (IR) ekspozicija padengiamas dangaus plotas. Šių laukelių išsidėstymas viename bloke parodytas 1.1b pav. Vienos ekspozicijos metu buvo stebima 1/18-oji bloko dalis su ACS kamera (*F475W*, *F814W* filtrais), o tuo pat metu kita 1/18-oji – su WFC3 kamera (*F275W* ir *F336W*, arba *F110W* ir *F160W* filtrais). Po to Hablo kosminis teleskopas buvo pasuktas 180 laipsnių kampu apie savo ašį, taip su WFC3 kamera buvo stebimas plotas, kurį prieš tai stebėjo ACS kamera, ir atvirkščiai. Vienas blokas danguje padengia 12' x 6',5 dydžio lauką. Visų blokų astrometriškai sukalibruotos ir nuo kosminių spindulių išvalytos mozaikos yra laisvai prieinamos MAST (*Mikulski Archive for Space Telescopes*) archyve⁴. Iš ten ir paimti šiame darbe tyrinėjamų B01–B23 blokų duomenys.

⁴ <https://archive.stsci.edu/prepds/phat/datalist.html>



1.1 pav. a) GALEX NUV+FUV M31 galaktikos nuotrauka su visais PHAT apžvalgos laukais (23 blokai); b) apatinėje dalyje – mėlynais stačiakampiais parodytas 18-os HST WFC3 kamera gautų ekspozicijų išsidėstymas viename PHAT bloke, o viršutinėje dalyje – WFC3 ir ACS kamerų tarpusavio padėtys vienos ekspozicijos metu (informacija apie blokų ir atskirų WFC3 bei ACS ekspozicijų išsidėstymą paimta iš Williams ir kt. 2014).



1.2 pav. M31 PHAT apžvalgoje naudotų HST filtrų reakcijos kreivės.

1.2 lentelė. Pagrindiniai M31 PHAT apžvalgos duomenys (Dalcanton ir kt. 2012)

Aprėpiamas dangaus plotas	0,5 deg ² (visas PHAT apžvalgos laukas) 12' x 6',5 (vienas blokas)					
Astrometrinis tikslumas, mas	5					
Hablo kamera	WFC3/UVIS		ACS/WFC		WFC3/IR	
Filtrai	<i>F275W</i> (<i>UV</i>)	<i>F336W</i> (<i>U</i>)	<i>F475W</i> (<i>g</i>)	<i>F814W</i> (<i>I</i>)	<i>F110W</i> (<i>J</i>)	<i>F160W</i> (<i>H</i>)
Ribinis ryškis, mag	25,1	24,8	27,9	27,1	25,0	24,0
Erdvinė skyra (FWHM), arcsec	0,08	0,08	0,1	0,1	0,25	0,25
Tarpžvaigždinė ekstinkcija M31 kryptimi (A_{λ}), mag ⁵	0,340	0,276	0,203	0,095	0,055	0,032
Aprėpiamas dangaus plotas (1 eksp.)	162" x 162"		202" x 202"		136" x 123"	

1.2. Spiečių imtis

PHAT apžvalgos metu buvo atliekama detali spiečių paieška. Johnson ir kt. (2015) pagal įvestus statistinius kriterijus sudarė 2748 žvaigždžių spiečių fotometrijos katalogą, kur kiekviename filtre yra pateikiama konkretaus objekto ryškio vertė. Toliau spiečių katalogą žymėsime simboliu – **S**. Fotometrija buvo atliekama automatiniu metodu, kur dangaus fonas buvo įvertinamas žiede, kurio vidinis spindulys lygus $1,2 R_J$, o išorinis – $3,4 R_J$. Dydis R_J – Johnson ir kt. (2015) nustatytas apertūros spindulys konkrečiam objektui. To paties dydžio apertūra bei dangaus fono įvertinimo žiedas taikyti atliekant objekto fotometriją visų šešių filtrų nuotraukose.

Ne visų objektų ryškiai buvo išmatuoti visuose 6-iuose filtruose. Viena ACS kameros ekspozicija danguje padengiamas didesnis plotas nei WFC3 kamera (žr. 1.1b pav.), tad ir visas PHAT apžvalgos laukas ACS *F475W* ir *F814W* filtruose yra šiek tiek platesnis nei WFC3 filtruose. Be to, dalies objektų ryškių nebuvo įmanoma išmatuoti, nes jie pateko ant CCD kamerų vietų su defektais. **S** katalogo objektų, turinčių fotometrinius matavimus konkrečiame filtre, skaičius pateikiamas 1.3 lentelėje. Ten suskaičiuoti tik objektai, kurių gauta ryškio paklaida $\sigma_{\lambda} \leq 0,4$ mag, nes jei objektui išmatuojama didesnė σ_{λ} , tada paklaida kataloge visai nenurodoma ir laikoma, kad tas objektas atitinkamame filtre išmatuotas labai netiksliai. Dauguma **S** katalogo objektų yra išmatuoti *F336W*, *F475W* ir *F814W* filtruose (90%, 99% ir 68%). *F110W* ir *F160W* filtruose ryškio paklaidos didesnės dėl aukštesnio dangaus fono. Raudonoje spektro srityje dėl į dangaus fono įvertinimo žiedą

⁵ <https://ned.ipac.caltech.edu/>

patenkančių raudonųjų milžinių yra aukštas dangaus fonas. To pasekmė – *F110W* ir *F160W* filtruose priskaičiuojama mažiau **S** katalogo objektų (atitinkamai 44%, 38%). *F275W* filtre gerus fotometrinius matavimus turi 63% **S** katalogo objektų. Šis filtras tinkamas jaunų, mėlynų objektų aptikimui, tačiau mažos masės ir/arba seni spiečiai tokių žvaigždžių neturi ir šioje spektro srityje yra blausūs. Taigi dėl mažo signalo–triukšmo (S/N) santykio NUV srityje šių spiečių paklaidos dažnai viršijo 1.3 lentelės skaičiavimui naudotą $\sigma_\lambda = 0,4$ ribinę vertę.

1.3 lentelė. Objektų skaičius Johnson ir kt. (2015) publikuotame spiečių (**S**) kataloge, Naujalis ir kt. (2020) kataloge (**N**) ir šiame darbe tyrinėjamų spiečių (**E**)

Objektų skaičius kataloge	<i>F275W</i>	<i>F336W</i>	<i>F475W</i>	<i>F814W</i>	<i>F110W</i>	<i>F160W</i>	<i>F475W, F814W</i>	<i>F336W, F475W, F814W</i>	Visuose filtruose
S (N=2748)	1732 (63%)	2480 (90%)	2714 (99%)	1869 (68%)	1209 (44%)	1035 (38%)	1865 (68%)	1700 (62%)	616 (22%)
N (N=1181)	929 (79%)	1181 (100%)	1181 (100%)	1181 (100%)	877 (74%)	766 (65%)	1181 (100%)	1181 (100%)	498 (42%)
E (N=1471)	800 (54%)	1287 (87%)	1445 (98%)	627 (43%)	327 (22%)	266 (18%)	623 (42%)	512 (35%)	118 (8%)

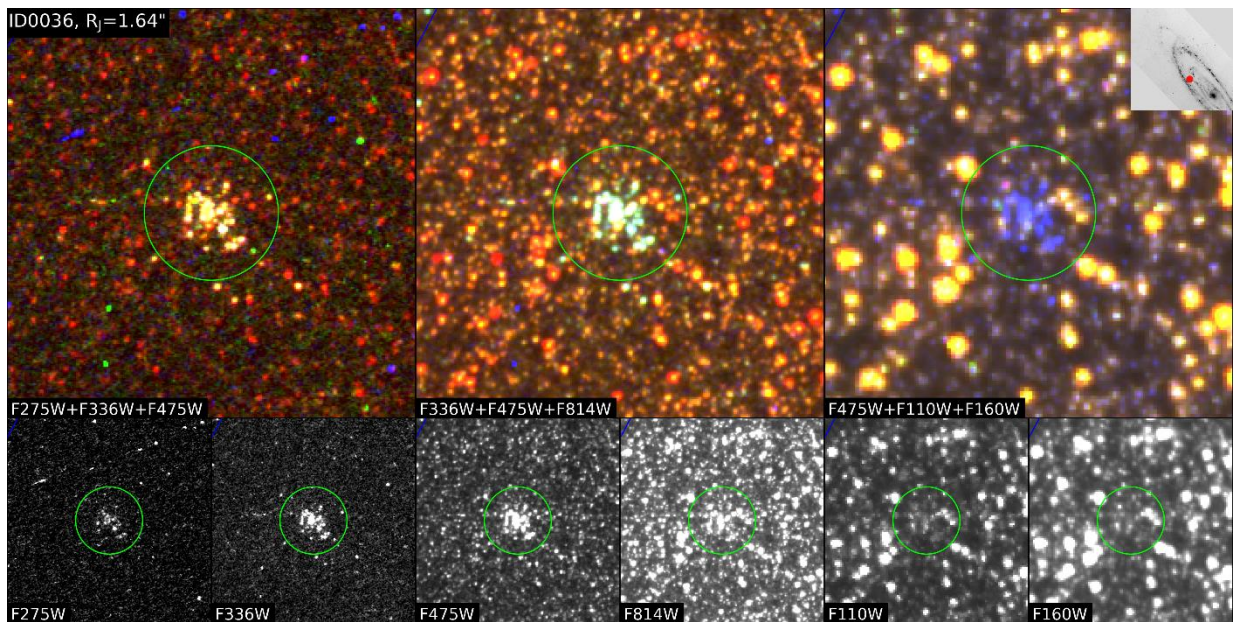
Pastaba. Pateikiamas objektų skaičius, kurie turi fotometrinius duomenis, kai $\sigma_\lambda \leq 0,4$ mag (skliaustuose nurodyta procentinė dalis nuo visame kataloge esančių objektų skaičiaus).

Ne visi **S** katalogo objektai buvo tinkami apertūrinei fotometrijai. Dėl šios priežasties Naujalis ir kt. (2020) atmetė objektus pagal fotometrines paklaidas, bei 4 arčiausiai galaktikos centro esančius PHAT apžvalgos blokus (B01, B03, B05, B07), nes dėl labai didelio žvaigždžių tankio juose sudėtinga atlikti patikimus matavimus. Taip pat buvo pastebėta keli papildomi fotometrijai netinkantys spiečiai. Objektas ID4132 turėjo daug defektų (tuščių pikselių) *F475W* fotometrinėje juostoje, kuri atlieka pagrindinį vaidmenį spiečiaus ryškio nustatyme. Tuo tarpu objektams ID147 ir ID3779 trūko WFC3 kameros duomenų. Pašalinus šiuos objektus Naujalis ir kt. (2020) detaliam ištyrinėjo ir atliko apertūrinę fotometriją 1181 spiečiui. Visi tyrinėti objektai turėjo duomenis *F336W*, *F475W*, *F814W* filtruose, kur ryškio paklaida $\sigma_\lambda < 0,4$ (žr. 1.3 lentelę). Toliau Naujalis ir kt. (2020) katalogą žymėsime simboliu – **N**.

Siekdami pagerinti stebėjimų duomenų matavimų kokybę, šiame darbe tęsiame **S** katalogo tyrinėjimus likusiems 1567 objektams. Pirma sutvarkėme savo spiečių imties katalogą – **E**. Kadangi negalime atlikti tikslios fotometrijos kai nėra duomenų pagrindiniuose *F336W*, *F475W*, *F814W* arba likusiuose *F275W*, *F336W*, *F110W*, *F160W* filtruose imtinai, panaudojome vizualią objektų atranką išmetant spiečius kurie atitinka šiuos kriterijus. Tam tikslui sudarėme 1.3 pav. parodytas spiečių nuotraukas, kurių viršutinėje dalyje patalpinome objekto spalvotas iš trijų filtrų kombinacijų sudarytas

nuotraukas, o apatinėje dalyje išrikiavome objektų nuotraukas individualiuose filtruose ($F275W$, $F336W$, $F475W$, $F814W$, $F110W$, $F160W$). Visose $10'' \times 10''$ dydžio nuotraukose pažymėjome apvalias [Johnson ir kt. \(2015\)](#) naudotas R_J apertūras. Paveiksluke taip pat įrašėme objekto ID numerį, o viršutiniame jo kampe raudonu tašku pažymėjome objekto vietą M31 galaktikoje. Filtrų kombinacijas $F275W+F336W+F475W$, $F336W+F475W+F814W$, $F475W+F110W+F160W$ toliau atitinkamai žymėsime RGB1, RGB2 ir RGB3 simboliais.

Peržiūrėjus 1567 objektų nuotraukas, atmetėme 88 spiečius kuriems trūko duomenų (1.4a pav.) pagal nurodytus kriterijus. Jiems alternatyvių laukelių kur būtų tinkamos fotometrines juostos taip pat neradome. Tuo tarpu 8 objektus, kurie nuotraukose pasižymėjo tuščiais pikseliais $F475W$ filtre (1.4b pav.), arba nepataisomais defektais (1.4c pav.) taip pat atskyrėme nuo **E** katalogo. Galutinis 1471 nagrinėjamo spiečiaus pasiskirstymas pateikiamas ant Spitzer/MIPS $70 \mu\text{m}$ nuotraukos 1.5 pav., kur spiečiai pažymėti raudonais taškais, o juoda spalva matomos M31 galaktikos žvaigždėdaros sritys. 1.3 lentelėje galime pamatyti, kad didžioji dalis **E** katalogo spiečių pasižymi aukštomis fotometrinėmis paklaidomis, todėl jie nebuvo įtraukti į **N** katalogą.



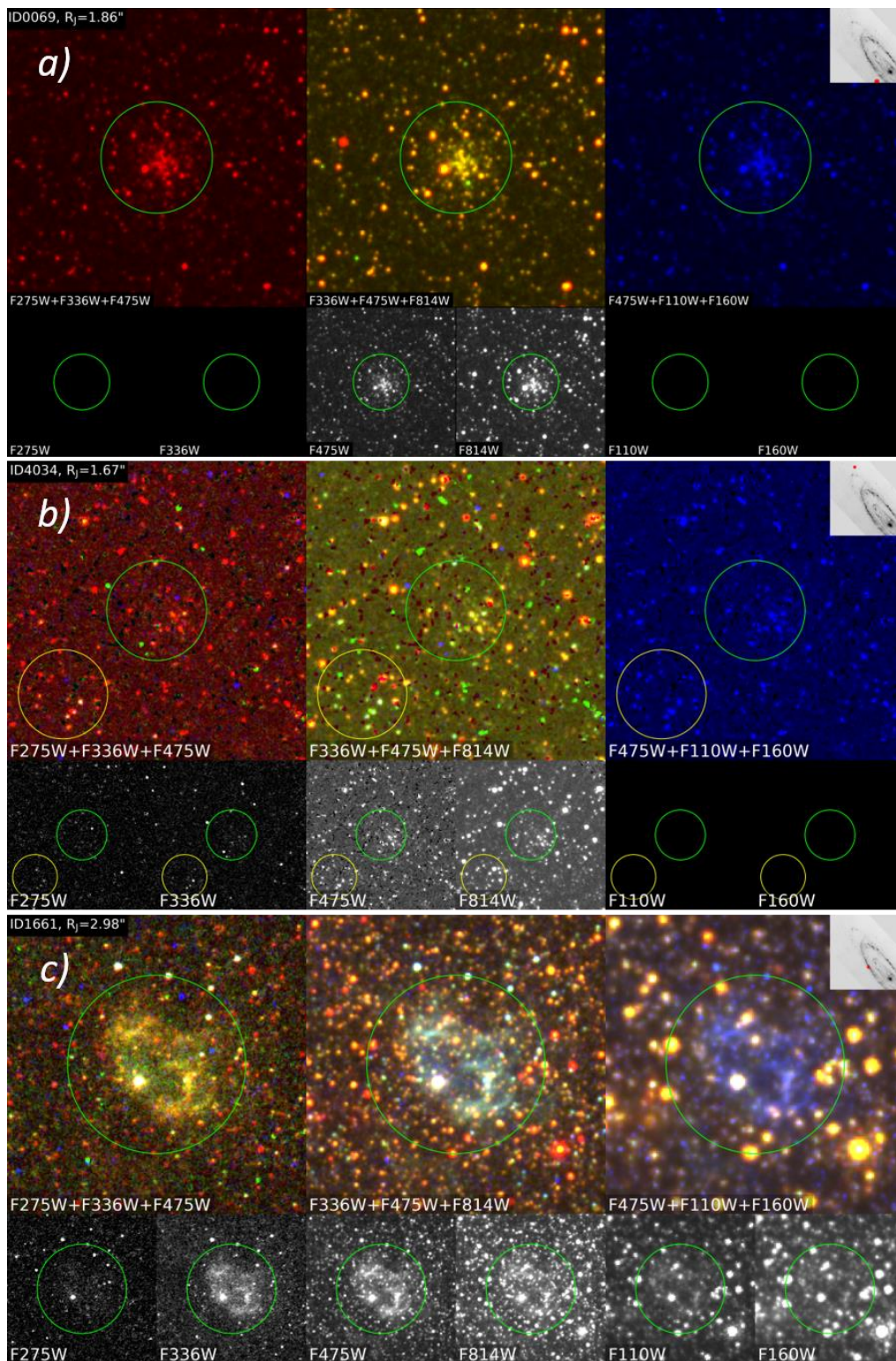
1.3 pav. Spiečiaus ID36 nuotraukos: viršutinėje eilėje spalvotos, apatinėje – individualiuose filtruose. Filtrų ir jų kombinacijų pavadinimai nurodyti kiekvienos $10'' \times 10''$ dydžio nuotraukos apačioje. Individualių filtrų mozaikos paimtos iš MAST⁶ archyvo. Žaliu apskritimu parodyta [Johnson ir kt. \(2015\)](#) kiekvienam objektui taikyta individuali R_J apertūra. Viršutiniame kampe – raudonu tašku pažymėta objekto padėtis M31 galaktikoje.

⁶ <https://archive.stsci.edu/prepds/phat/datalist.html>

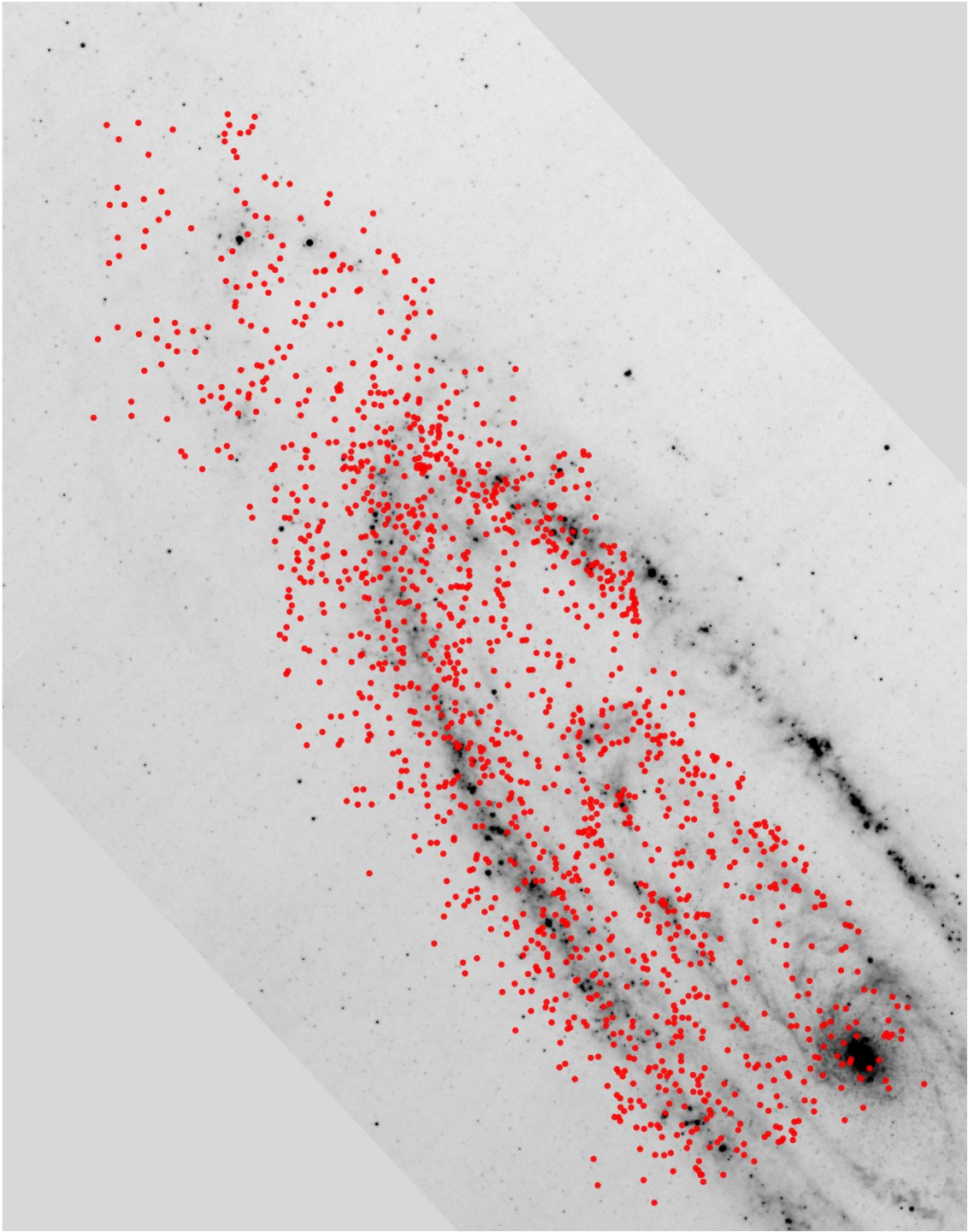
1.3. Alternatyvių laukelių paieška

Nagrinėdami **E** katalogo nuotraukas pastebėjome, kad nuotraukose yra išlikę defektų *F275W*, *F336W* (NUV) ir *F110W*, *F160W* (NIR) filtruose. NUV filtruose defektus sukelia kosminiai spinduliai, kurie atsiranda dėl aukštos energijos dalelių. Šios dalelės atsitrenkia į CCD detektorių ir pikseliams perduoda dalį savo energijos. Kosminių spindulių paveiktas spiečius yra pateikiamas [1.6a](#) pav., kur defektai žalia ir mėlyna spalva yra matomi RGB1 filtruose. Nuotraukoje esantis objektas pateko į tarpą tarp dviejų WFC3/UVIS kameros detektorių, kur gauti duomenys yra tik iš vienos ekspozicijos. Dėl mažo pasikartojančių ekspozicijų skaičiaus yra padidėjęs kosminių spindulių triukšmo lygis. Taip pat kosminiai spinduliai yra panašūs į žvaigždinius šaltinius, todėl automatiniiais metodais juos yra sunkiau pastebėti ir išvalyti. Norėdami sumažinti objektų skaičių, kurie yra paveikti kosminių spindulių, nusprendėme ieškoti alternatyvių laukelių *F275W* ir *F336W* filtrams. Keisdami laukus ir iš naujo peržiūrėdami nuotraukas, defektų kiekį sumažinome 289 objektams. Nuo kosminių spindulių išvalytos nuotraukos pavyzdys pateikiamas [1.6b](#) pav. Kaip matyti RGB1 filtruose, kosminių spindulių, kertančių objekto apertūrą, kiekis sumažėjo.

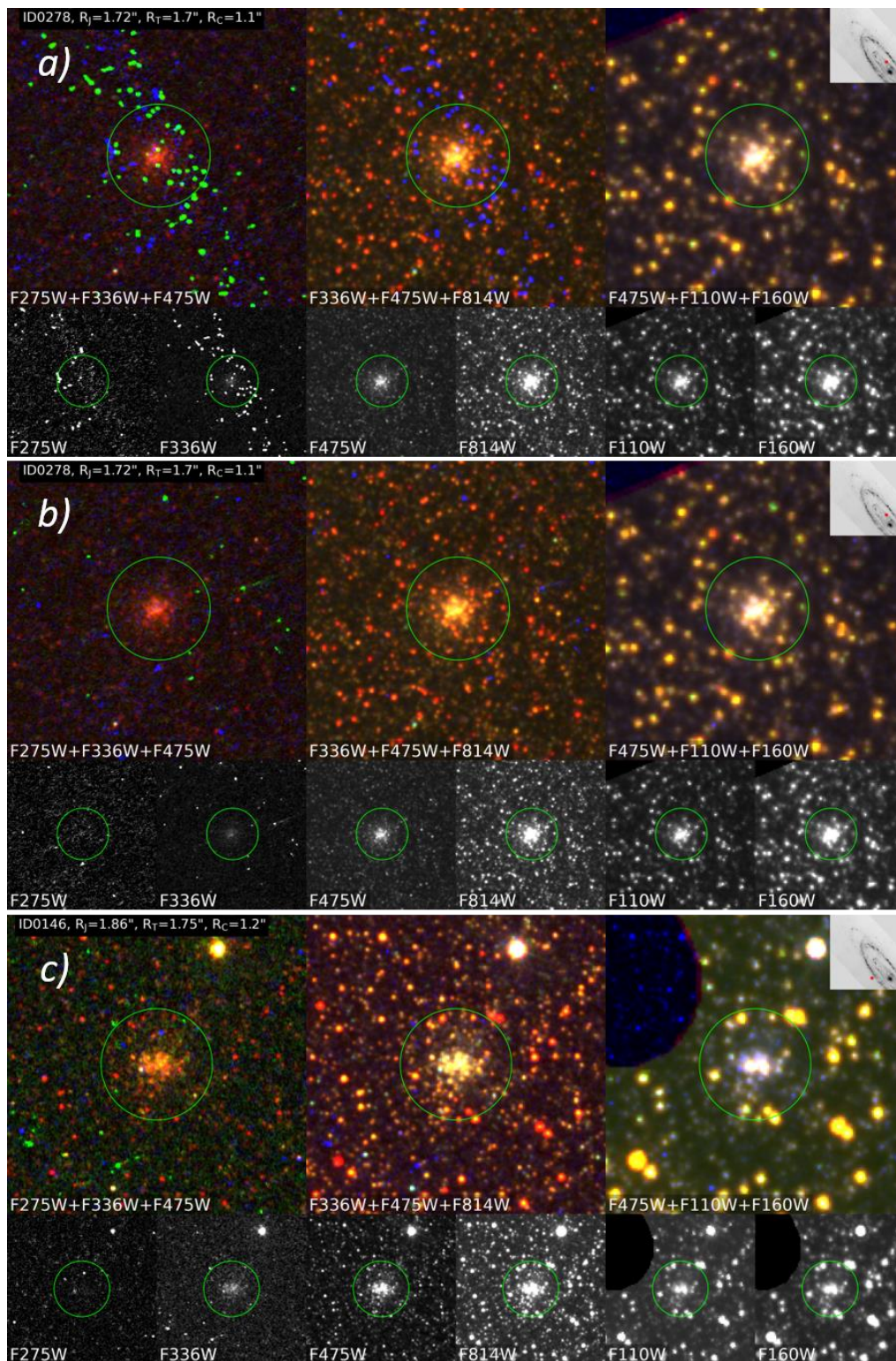
Nuotraukose taip pat pasitaikė neaktyvių detektoriaus pikselių, kurie būdingi *F110W*, *F160W* filtrams ([1.6c](#) pav.). Jeigu tokie defektai patenka į matuojamos apertūros plotą, tada NIR filtrai atliekant fotometriją nėra naudojami.



1.4 pav. Tas pats kas 1.3 pav., tik objektams: a) ID69; b) ID4034; c) ID1661. Šie objektai netinkami tolimesnei analizei, nes neturi duomenų $F275W$, $F336W$, $F110W$, $F160W$ fotometrinėse juostose arba yra su nepataisomais defektais.



1.5 pav. Šiame darbe tiriamų spiečių (N=1471) pasiskirstymas M31 galaktikoje ant Spitzer/MIPS 70 μm nuotraukos. Šiaurė nukreipta į viršų, rytai į kairę.



1.6 pav. Tas pats kas 1.3 pav., tik objektams: a), b) ID278 prieš ir po kosminių spindulių išvalymą $F275W$, $F336W$ filtruose; c) ID146 pasižymi tuščia pikselių sritimi $F110W$, $F160W$ filtruose.

2. Spiečių fotometrija

Šiame skyriuje pristatysime nagrinėjamo spiečių katalogo (**E**) paruošimą apertūrinei fotometrijai, bei jos atlikimo algoritmą. Pagrindinė paruošimo procedūra susideda iš trijų dalių: spiečiaus centro, apertūrų parinkimo ir fono nustatymo. Detalus šių parametų aprašymas pateikiamas 2.1 ir 2.3 dalyje, tuo tarpu fotometrijos atlikimo algoritmas pateikiamas 2.2 dalyje. Nustatytus ryškius palyginsime su [Johnson ir kt. \(2015\)](#) duomenimis 2.4 skyrelyje.

2.1. Centro koordinacių ir apertūrų parinkimas

Norint kuo tiksliau atlikti apertūrinę fotometriją tiriamiems objektams, pirma turime parinkti naujas centro koordinates. Naudojantis nuotraukomis ir pastebėjus, kad spiečius yra blogai sucentruotas (2.2a pav.), naujas centras yra parenkamas atsižvelgiant į žvaigždžių pasiskirstymą RGB1, RGB2, RGB3 filtrų kombinacijose. Aiškiausiai spiečiaus struktūra išsiskiria RGB2 filtruose, todėl jie naudojami kaip atskaitos taškas. Jeigu spiečiuje dominuoja jaunos, mėlynos žvaigždės (2.2c pav.), tada centrą parenkame pagal RGB1 filtrus. Kartais spiečius gali būti paveiktas tarpžvaigždinės ekstinkcijos arba jame vyrauja vėlyvesnio tipo žvaigždės, tokiu atveju parinkti objekto centro vietą padeda RGB3 filtrai. Spiečiaus centro koordinacių ir apertūrų parinkimui naudojame interaktyvią nuotraukų peržiūros programą „SAOImageDS9“⁷ ([Joye ir Mandel 2003](#)). Spartesniai objektų apdirbimui pasitelkėme [Naujalis ir kt. \(2020\)](#) sukurtą automatinę nuotraukų įkėlimo į DS9 programą. Ši programa atrenka reikiamus apžvalgos laukelius, nubraižo fotometrinių juostų spalvų rinkinius ir pažymi spiečiaus vietą, apertūras. Taip pat interaktyviai galime keisti kontrasto lygį, kas išskirtiniais atvejais palengvina centro koordinacių parinkimą. Iš 1471 tyrinėto spiečiaus centrai buvo pakoreguoti 1317 objektams (90%). Kadangi nuo centro koordinacių priklauso ir apertūrinės fotometrijos tikslumas, galime daryti išvadą, kad [Johnson ir kt. \(2015\)](#) atlikta fotometrija (žr. 1.2 skyrelį) nebuvo su aukštu tikslumu.

Nagrinėjant kiekvieną spiečių individualiai taip pat parenkame dvi naujas apertūras. 2.2 pav. mėlyna apertūra (R_T) skirta matuoti pilnutinį ryškį $F475W$ filtre. Pagrindinis šios apertūros parinkimo kriterijus, kad ji nekirstų ryškių, spiečiui nepriklausančių žvaigždžių, kurios gali paveikti fotometrinius spiečiaus matavimus. 2.2b pav. parodytas objektas, kur [Johnson ir kt. \(2015\)](#) parinkta R_J apertūra kerta ryškią žvaigždę. Tuo tarpu mes parinkome R_T spindulio apertūrą, kad ryški žvaigždė

⁷ <https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saoimageds9/home>

būtų už jos ribų. Atlikus visus matavimus, mūsų parinkti R_T apertūrų spinduliai kinta nuo 0,8" mažesniems ir kompaktiškiems spiečiams iki 3,7" kamuoliniams spiečiams, bei žvaigždžių asociacijoms. Mūsų parinktas R_T palyginame su [Johnson ir kt. \(2015\)](#) apertūromis 2.1 pav. R_T didžiajai daliai objektų išliko labai panaši į R_J . Neigiamos vertės rodo, kad apertūrą sumažinome objektams, norėdami atimesti ryškias, fonui priklausančias žvaigždes. Tuo tarpu teigiamos vertės atspindi, kad apertūrą padidinome žvaigždžių spiečiams, kurie yra tankesniuose regionuose, kamuoliniams spiečiams ir žvaigždžių asociacijoms. Tuo tarpu 2.2 pav. raudona apertūra (R_c) skirta pamatuoti spiečiaus spalvą ir parenkama taip, kad į ją nepakliūtų ryškių lauko žvaigždžių. 2.2c pav. spiečiaus ID18 R_c apertūra buvo parenkama atsižvelgiant į žvaigždes NIR spektriniame diapazone, kurios pasižymi geltona spalva RGB3 filtruose. Dažnu atveju tai vienas iš pagrindinių kriterijų, kad R_c nekirstų tokio tipo žvaigždžių. Tankesniuose M31 galaktikos regionuose, kur foninių žvaigždžių skaičius išauga einant link centro, R_c parenkama kuo mažesnė, kad pavyktų pagauti spiečiaus spalvą. Tuo tarpu galaktikos pakraščiuose, kur nėra didelio kiekio fone esančių žvaigždžių, R_c apertūros spindulys dažnai sutapdavo su R_T .

Iš nagrinėtos 1471 objektų imties galime išskirti tris spiečius – ID239, ID1782 ir ID3306, kurie pasižymėjo skirtingo amžiaus žvaigždžių populiacijomis. Šiems objektams mes priskyreme du skirtingus centrus, bei atitinkamas apertūras. Šių spiečių nuotraukos pateikiamos [Priedas Nr. 1](#).

2.2. Apertūrinė fotometrija

Išmatavus naujas spiečių koordinates ir apertūrų dydžius, toliau atliekame spiečių fotometriją. Nagrinėjamos nuotraukose objektų signalas yra pateikiamas elektronais per sekundę, todėl norėdami juos suvesti į standartinę ryškių sistemą pasinaudojome HST kameromis nustatytais nuliniiais punktais. ACS kamerai reikšmes skaičiavome su ACS nulinio punkto skaičiuotuvu⁸. Tuo tarpu WFC3 kamerų nuliniai punktai paimti iš STScI internetinės svetainės⁹ ([Naujalis ir kt. 2020](#)). Naudojamų nulinių punktų reikšmės pateikiamos 2.1 lentelėje. Absoliutiniai ryškiai gaunami laikant, kad M31 galaktikos atstumo modulis $m - M = 24,47$ ([McConnachie ir kt. 2005](#)).

Didžioji dalis apertūrinės fotometrijos matavimų yra automatizuota. Tam tikslui naudojame [Naujalis ir kt. \(2020\)](#) sukurtas programas, kurios atrenka reikiamus apžvalgos laukelius, parenka reikiamo dydžio nustatytas apertūras ir atlikus fotometriją visose 6 fotometriniuose juostose išveda spiečių augimo kreives tinkamas tolimesnei analizei. Astrometriniai skaičiavimai ir *fits* formato failų

⁸ <https://www.stsci.edu/hst/instrumentation/acs/data-analysis/zeropoints>

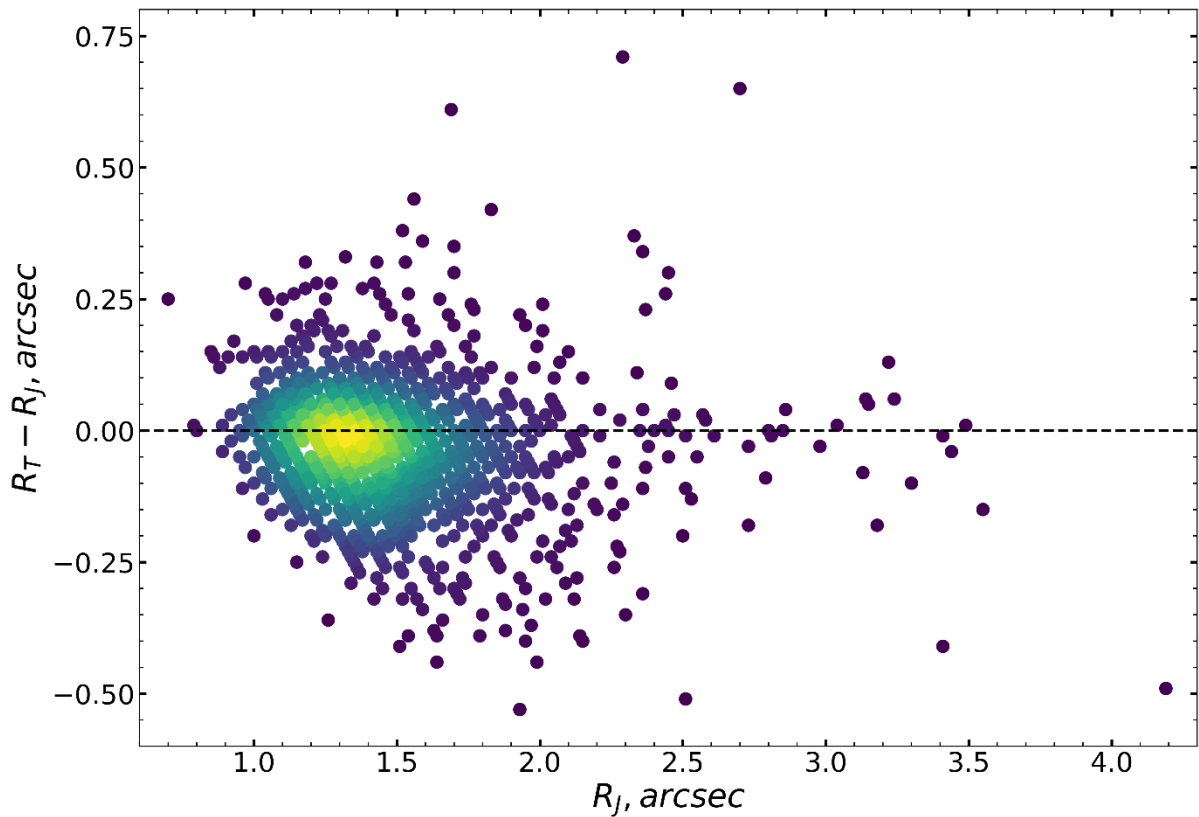
⁹ <https://www.stsci.edu/hst/instrumentation/wfc3/data-analysis/photometric-calibration>

apdorėjimai atliekami naudojantis AstroPy paketu (Astropy Collaboration ir kt. 2018). Apertūrinė fotometrija atliekama naudojantis *photutils* pakete esančia *aperture_photometry* funkcija. Galimų tuščių pikselių valymas vykdomas matavimų metu, kai nuotrauka yra įkeliama į kompiuterio atmintį.

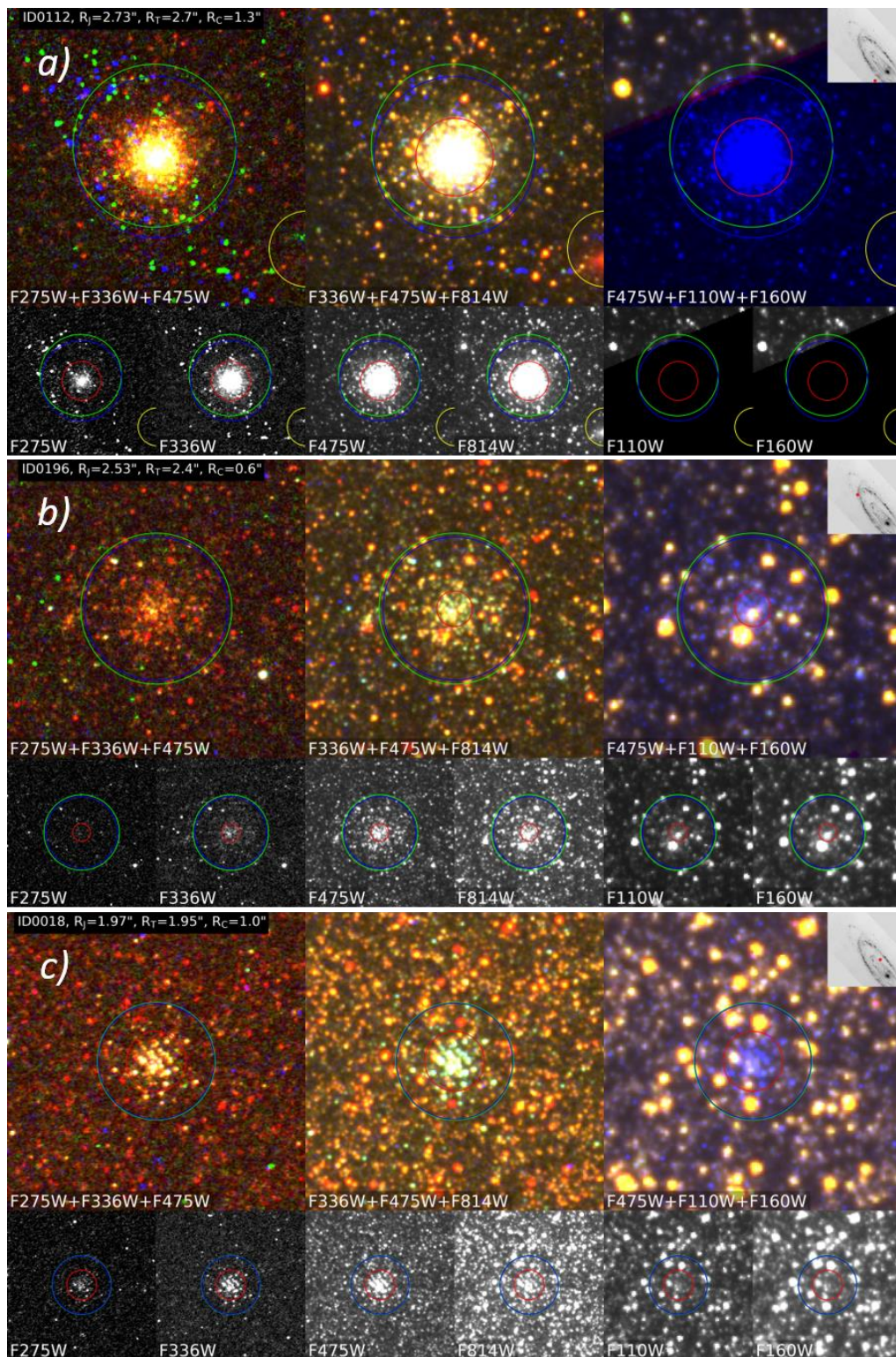
2.1 lentelė. Fotometrinių juostų nuliniai punktai

<i>F275W</i>	<i>F336W</i>	<i>F475W</i>	<i>F814W</i>	<i>F110W</i>	<i>F160W</i>
22,67	23,52	26,15	25,52	26,06	24,70

Pastaba. Fotometrinių juostų nuliniai punktai yra naudojami suvesti gautus instrumentinius ryškius į standartinę sistemą



2.1 pav. Nagrinėjamo spiečių katalogo (E) pilnutinių apertūrų (R_T) palyginimas su Johnson ir kt. (2015) apertūromis R_J . Objektų skaičius – 1468. Spiečiai ID239, ID1782 ir ID3306 nebuvo paimti, nes jie pasižymėjo dviem skirtingomis žvaigždžių populiacijomis (Priedas Nr. 1).



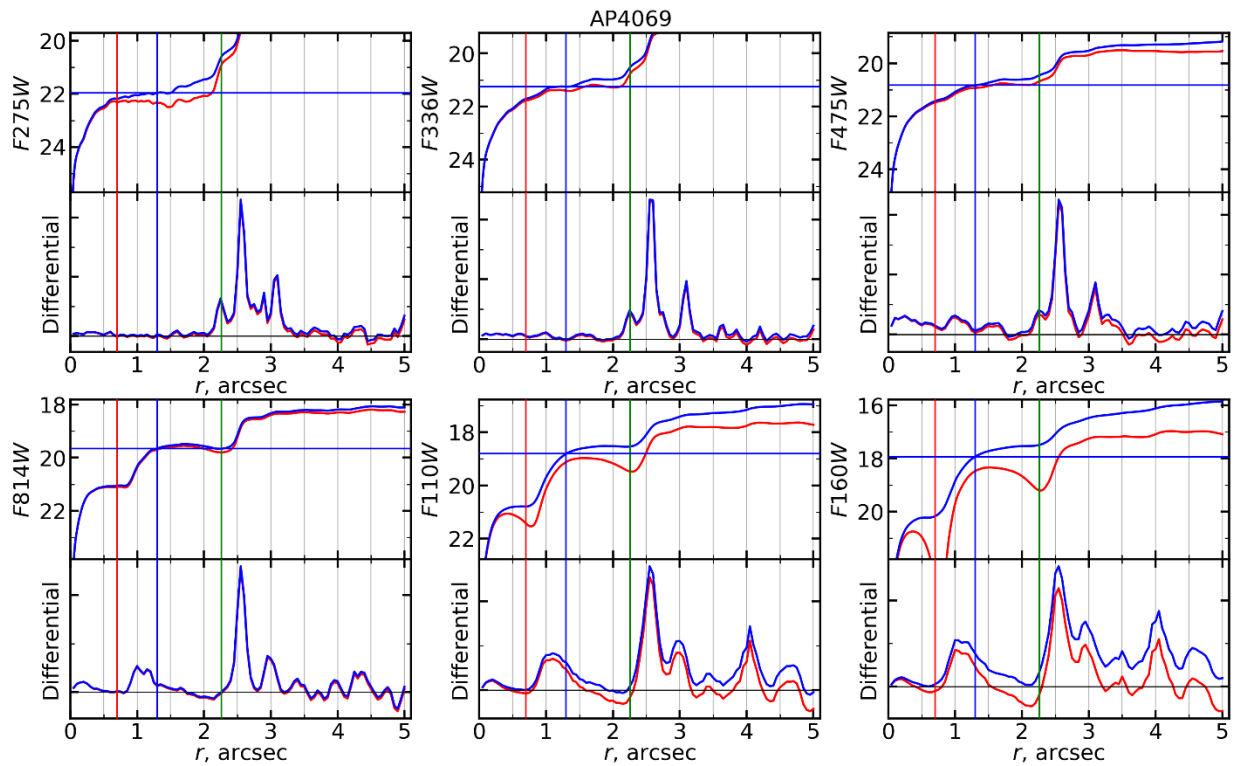
2.2 pav. Tas pats kas 1.3 pav., tik objektams: a) ID112; b) ID196; c) ID18. Raudonas apskritimas žymi mūsų parinktą spalvinę apertūrą (R_c) naudojamą spiečiaus spalvos nustatymui, mėlynas apskritimas – spiečiaus apertūra (R_T) pilnutinio ryškio matavimui, žalias apskritimas žymi Johnson ir kt. (2015) spiečių kataloge publikuotą apertūrą (R_j).

Naudojantis apertūrinės fotometrijos paketais, suskaičiuojame kiekvieno ištirto objekto profilius tekstiniame formate. Failuose kiekvienam filtrui yra surašytos integruotos pikselių vertės, [Johnson ir kt. \(2012\)](#) metodu gautos fono vertės (žr. 1.2 skyrelį) ir apertūros plotas pikseliais naudojant mūsų nustatytas R_T spindulio apertūras. Turimus duomenis panaudojame nubraižyti augimo kreives ir diferencialinius profilius, kurie leidžia nustatyti spiečių ryškius bei jų struktūrinius parametrus. Augimo kreivių matavimai atlikti nuo 0,01" iki $2 \cdot R_T$ arba 5", priklausomai kuris dydis bus didesnis, naudojant 0,01" žingsnį. 2.3 pav. viršutinėje dalyje pateikiame augimo kreivę, apačioje diferencialinį profilį kuris rodo kiekviename apertūros žiede išmatuoto signalo dydį. Neigiamos vertės atitinka išmatuotą signalą, kur toje srityje fono lygis yra mažesnis už atimtą vidutinį fono lygį. Mėlyna vertikali ir horizontali tiesė žymi R_T apertūrą ir ties ja išmatuotą spiečiaus ryškį. Vertikalios raudonos ir žalios tiesės atitinkamai spiečiaus apertūrų R_c , R_j spinduliai. Nagrinėdami diferencialinius profilius taip pat galime aiškiau apibrėžti, ties kuria vieta yra ryškios fono žvaigždės su dideliu triukšmu, tai gali pagelbėti papildomai pakoreguoti R_c , R_T apertūras.

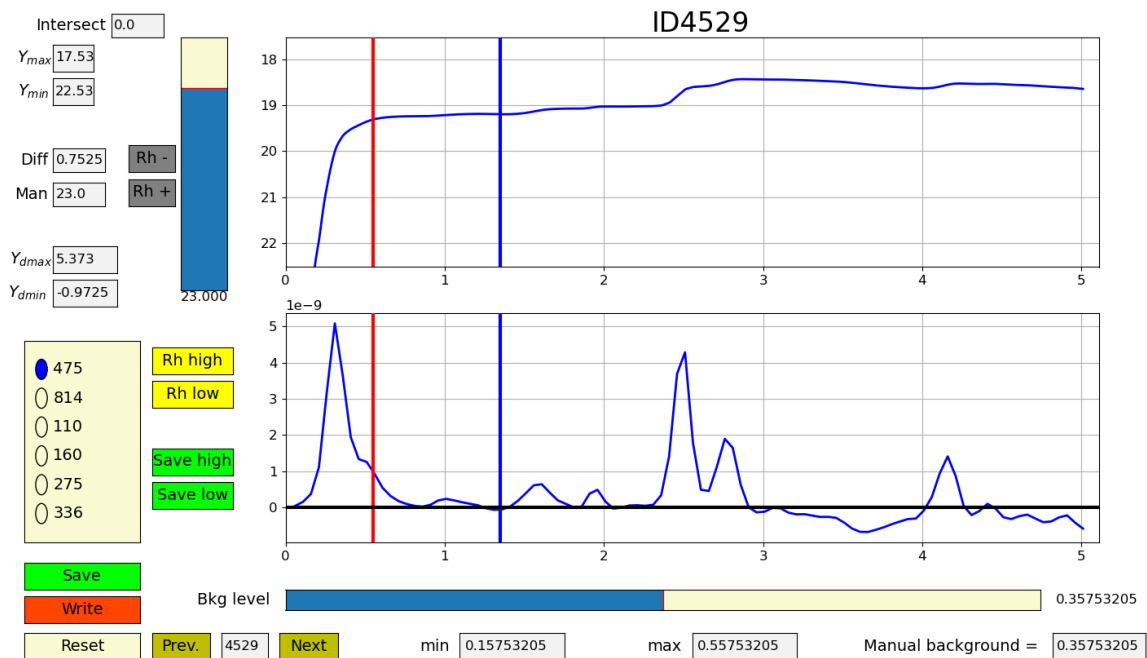
2.3. Fono lygio nustatymas

Turėdami kiekvieno objekto profilius, toliau interaktyviu būdu nustatome fono lygius, kas yra didžiausias neapibrėžtumas apertūrinėje fotometrijoje. Foną sudaro spiečiui nepriklausančios M31 galaktikos disko žvaigždės, tolimos galaktikos ir besiprojektuojančios Paukščių Tako žvaigždės. Fono lygio nustatymui pasitelkėme [Naujalis ir kt. \(2020\)](#) sukurtą interaktyvią sąsają, kurios pavyzdys pateikiamas 2.4 pav. Skydelio viršuje yra pateikiama augimo kreivė, apačioje diferencialinis profilis, bei nustatytos R_c , R_T apertūros. Analizės metu galime pasirinkti filtrą kurį nagrinėsime, bei apačioje esančiu slankikliu parinkti tinkamą fono lygio reikšmę. Augimo kreivė naudojama kaip pagrindinis šaltinis fono nustatymui. Idealiu atveju kreivė turi didėti per visą intervalą ir išplokštėti, tačiau dėl netolygaus žvaigždžių pasiskirstymo M31 galaktikoje tokio vaizdo visame intervale matyti negalime. Todėl stengėmės parinkti tokią fono lygio reikšmę, kad augimo kreivė išplokštėtų ties R_T apertūra (2.3 ir 2.4 pav.). Tuo tarpu diferencialinės kreivės naudojamos orientacijai, kad pamatytume kurioje vietoje yra ryškesnės, fonui priklausančios žvaigždės arba kosminių spindulių defektai.

Interaktyvus fono lygio nustatymo metodas, kiekvienam objektui individualiai, reikalauja daugiau laiko nei automatiniai, tačiau jis padeda gauti tikslesnius spiečių matavimus. Automatiniai metodai dažnu atveju nepatikimai įvertina fono lygį, ypač kai turime sudėtingą lauko žvaigždžių pasiskirstymą.



2.3 pav. Spiečiaus ID4069 augimo kreivės visose šešiose fotometrinėse juostose (viršutinė dalis), bei jų diferencialiniai profiliai (apatinė dalis). Vertikali ir horizontali mėlyna linija rodo pilnutinę spiečiaus apertūrą (R_T) ir ties ją gautą ryškį; vertikali raudona, žalia linijos atitinkamai žymi spalvinę (R_c) ir Johnson ir kt. (2015) parinktą R_J apertūrą.



2.4 pav. Fono lygio nustatymui, naudojamos interaktyvios sąsajos pavyzdys spiečiui ID4529. Viršutiniame skydelyje yra pateikiama augimo kreivė, apatiniame diferencialinis profilis. Vertikalios linijos atitinka nustatytas spalvinę (R_c) ir pilnutinę (R_T) apertūras (žr. 2.1 skyrelį).

2.4. Ryškių nustatymas

Turėdami išmatuotas R_c ir R_T apertūras, bei įskaičius interaktyviai išmatuotas fono lygio reikšmes, naudodamiesi augimo kreivėmis suskaičiuojame kiekvieno spiečiaus ryškį dviem metodais. Pirmuoju metodu ryškį skaičiuojame naudodamiesi tik R_T apertūra, ties kuria yra išmatuotas ryškis nuo augimo kreivės, t.y. mėlyna horizontali linija 2.3 pav. Tokio paties dydžio apertūra kaip ir [Johnson ir kt. \(2015\)](#) atveju taikoma visoms fotometriniams juostoms vienoda (2.2 pav.). Naudojant tik R_T apertūrą yra tikimybė, kad į ją pateks lauko žvaigždės, kurios gali iškraipyti spiečiaus spalvą. Todėl siekiant gauti tikslesnes spiečiaus spalvas, antru metodu naudojame R_c ir R_T apertūras kartu. Šiuo metodu ryškius skaičiuojame pagal žemiau pateiktą išraišką ([Naujalis ir kt. 2020](#)):

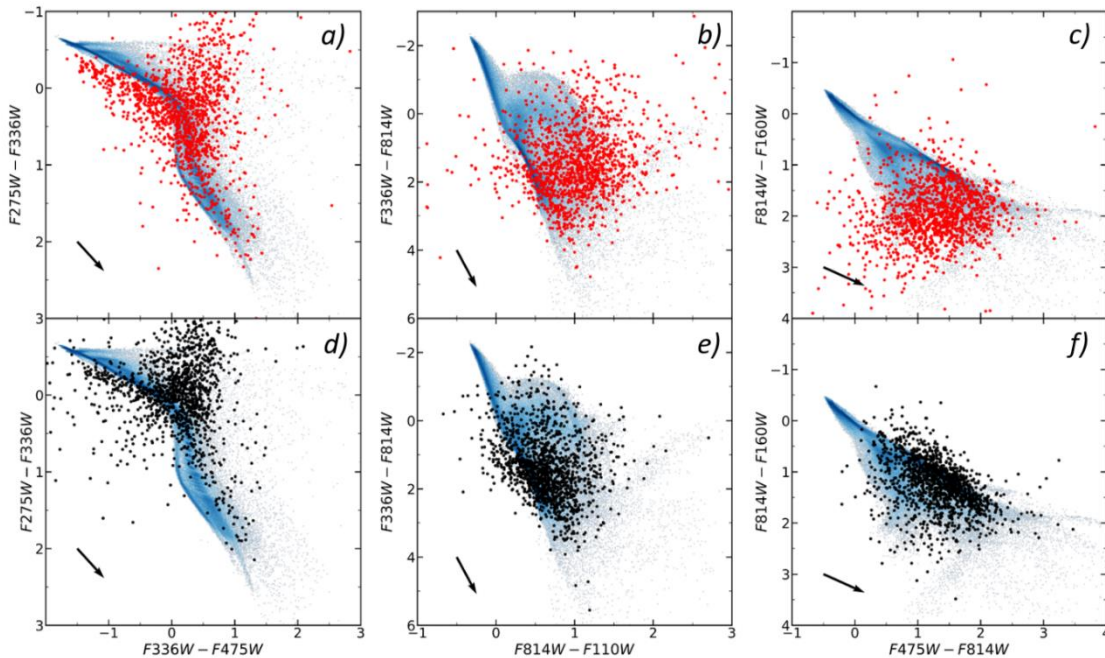
$$m_{F*W} = m_{c,F*W} + (m_{T,F475W} - m_{c,F475W}) \quad (2.1)$$

Dydis $F*W$ atitinka fotometrines juostos pavadinimą, m_{F*W} – pilnutinis ryškis perskaičiuotas pagal R_c apertūras, $m_{c,F*W}$ – ryškiai R_c apertūroje, $m_{T,F475W}$ ir $m_{c,F475W}$ – spiečiaus ryškiai $F475W$ filtre R_T , R_c apertūrose. Taikant tokią ryškių skaičiavimų metodiką mes darome prielaidą, kad spiečiaus spalvos profilis už matuojamos R_c apertūros yra tolygus ir nekintantis. Pilnutinio ryškio matavimui parinkome $F475W$ filtrą, nes jis turi aukštą S/N santykį, bei nėra stipriai paveiktas raudonų žvaigždžių.

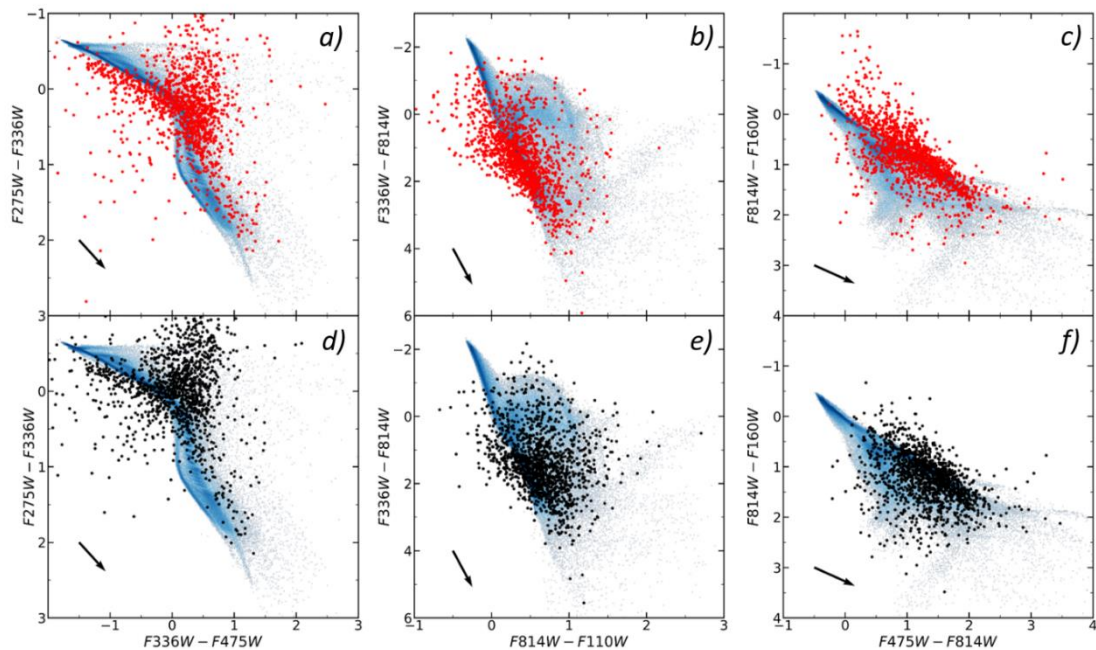
Nustačius ryškių vertes, turime **E** katalogo fotometrinius duomenis, kurių dalis yra pateikiama [Priedas Nr. 2](#) 1 lentelėje. Gautus spiečių ryškius, naudojant R_T apertūrą, palyginame su [Johnson ir kt. \(2015\)](#) nustatytais ryškiais 2.5 pav., kur fone mėlyna spalva pavaizduoti stochastiniai spiečių modeliai gauti pagal [de Meulenaer ir kt. \(2017\)](#) pateiktą metodiką. Naudojamų stochastinių spiečių masė – 10^2 , 10^3 , $10^4 M_{\text{solar}}$, amžius kinta intervale $\log_{10}(t/\text{yr}) = 6,6-10,1$, metalingumas lygus Saulės $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$. 2.5a,d pav. galime pastebėti, kad nors ir sumažinome ryškių, foninių žvaigždžių skaičių, kurios patenka į R_T apertūrą, objektų sklaida ant stochastinių modelių yra labai panaši į [Johnson ir kt. \(2015\)](#) spiečius. Taip yra dėl to, nes **E** katalogo spiečiai pasižymi aukštomis fotometriniams paklaidomis (1.3 lentelė), bei turi kosminių spindulių defektus $F275W$, $F336W$ filtruose (2.2a pav.). Taip pat dalis mūsų spiečių yra pasiskirstę link mažesnių $F336W-F475W < -1$ spalvos rodiklio verčių. Toks skirtumas atsiranda, nes mes parinkome skirtingo spindulio apertūras nei R_J , bei skiriasi fono lygio skaičiavimo metodika. Einant link NIR spektrinio diapazono rezultatai išsiskiria. Mūsų matuoti spiečiai pasižymi mažesnėmis $F814W-F110W$ spalvos rodiklio vertėmis ir didesne koncentracija ant stochastinių modelių (2.5b,e pav.). [Johnson ir kt. \(2015\)](#) R_J apertūros yra parinktos automatiškai, nenagrinėjant

kiekvieno objekto individualiai. Todėl į spiečiaus apertūrą patenka ryškios, raudonųjų milžinių sekos žvaigždės, dėl kurių gali būti stipriai pervertintas fono lygis. Tuo tarpu mūsų R_c ir R_T apertūros buvo parenkamos nagrinėjant kiekvieną spiečių individualiai, stengiantis apertūras parinkti taip, kad jose nebūtų ryškių lauko žvaigždžių RGB3 filtruose. Fono lygis taip pat buvo koreguotas atsižvelgiant į tokio tipo žvaigždės. Tai ir lėmė mažesnę sklaidą mūsų nustatytuose ryškiuose, bei mažesnes spalvos rodiklio vertes. Tas pats galioja ir 2.5c,f pav. atveju, todėl galime teigti, kad mūsų spiečiai yra geriau išvalyti nuo ryškių lauko žvaigždžių NIR spektriniame diapazone. O naujai gauti fotometriniai duomenys yra tikslesni $F475W$, $F814W$, $F110W$ ir $F160W$ filtruose.

Kadangi ryškius skaičiavome dviem skirtingais metodais, gautas spalvas palyginame 2.6 pav. Viršuje išdėstytos spalvos–spalvos diagramos, kur ryškių vertės skaičiuotos naudojant R_c ir R_T apertūras kartu, apatinėje dalyje naudojant tik R_T . Objektų sklaida 2.6a,d pav. yra panaši, nes į R_c ir R_T apertūras patenka tie patys kosminių spindulių defektai. Rezultatai išsiskiria 2.6b,c,e,f pav., kur spalvos išmatuotos R_c apertūra pasižymi didesne sklaida nuo stochastinių modelių. Taip yra dėl to, nes spalvinės apertūros jautrumas ryškiems objektams yra didesnis. Neįskaičius ryškios, spiečiui priklausančios žvaigždės, spalvų reikšmės gali įgyti skirtingas vertes bei iškraipyti rezultatus. Siekiant sumažinti objektų sklaidą, tolimesniuose darbuose R_c apertūros ir fono lygiai bus koreguojami.



2.5 pav. Dvispalvės diagramos, kuriose raudona spalva pažymėti Johnson ir kt. (2015) publikuoto žvaigždžių spiečių katalogo objektai, juoda spalva nagrinėjami objektai (E) šiame darbe su nustatytomis ryškių vertėmis naudojant pilnutinę apertūrą (R_T). Mėlyna spalva fone parodyti stochastiniai modeliai, kurių masės lygios – 10^2 , 10^3 , $10^4 M_{\text{solar}}$. Modelių metalingumas visur $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$. Rodyklė atitinka ekstinkcijos vektorių $A_V = 1$.



2.6 pav. Tas pats kas 2.5 pav., tik viršutinėje dalyje pažymėti nagrinėjami **E** katalogo objektai su nustatytomis ryškių vertėmis naudojant spalvinę (R_c) ir pilnutinę (R_T) apertūras kartu.

3. Katalogo nagrinėjimas

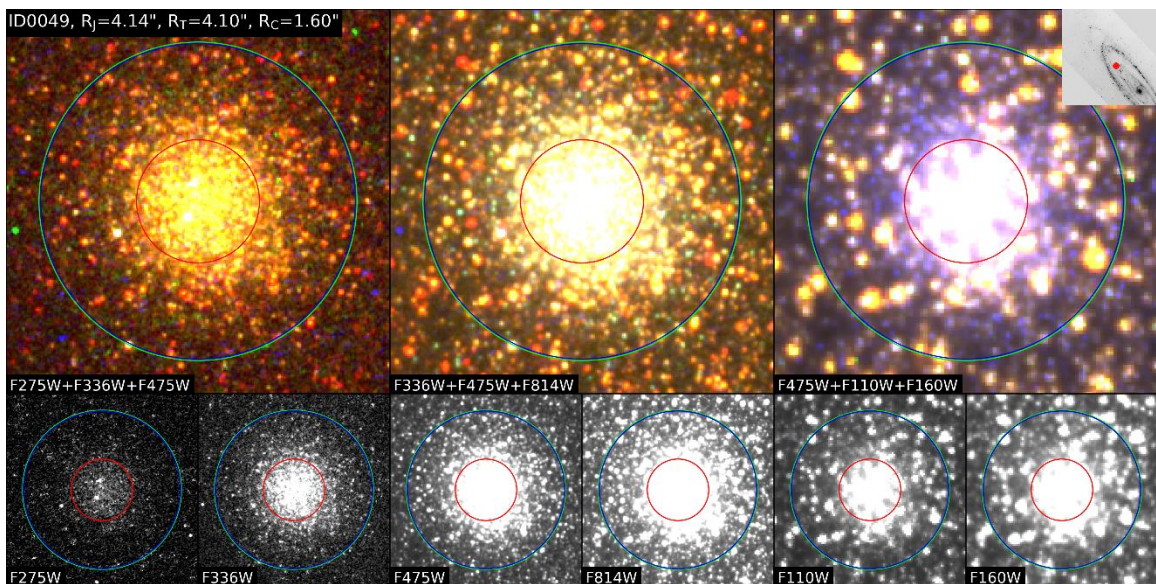
Šiame skyriuje panaudosime [Naujalis ir kt. \(2020\)](#) sudarytą katalogą (**N**) (žr. 1.2 skyrelį), kuris turi nustatytus amžiaus, masės ir tarpžvaigždinės ekstinkcijos parametrus. Šiuos duomenis panaudosime M31 galaktikos struktūros nagrinėjimui. Iš pradžių nustatysime vijų padėtis ir pločius, bei panagrinėsime žvaigždžių populiacijų pasiskirstymą radialine kryptimi žiedui (3.1 skyrelis). 3.2 dalyje analizuosime žvaigždžių populiacijų išsidėstymą azimutine kryptimi žiedui ir kaip tai gali koreliuoti su aplinka.

3.1. Žvaigždėdaros žiedas radialine kryptimi

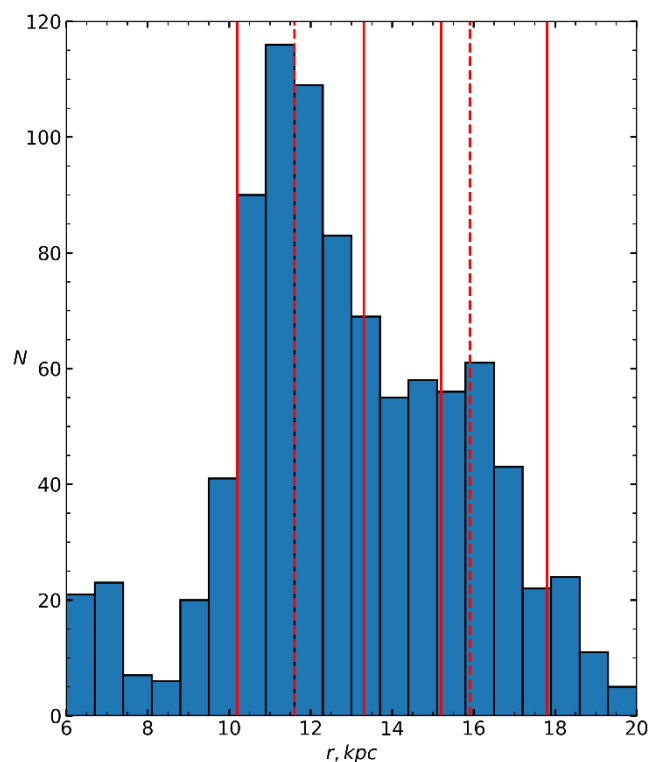
Andromedos galaktikos disko plokštuma nėra patogiai atsukta į mus, tad yra sudėtinga išskirti žvaigždėdaros žiedo padėtį ir plotį. Kad galėtume nagrinėti objektų pasiskirstymą galaktikos diske, pirma turime pasirinkti nagrinėjamą **N** katalogo žvaigždžių spiečių imtį ir tada deprojekuoti spiečių koordinates, t. y. atsukti galaktiką. Atlikę **N** katalogo vizualinę nuotrauką atranką, atmetėme 252 objektus, kurie yra kamuoliniai spiečiai arba diskui nepriklausantys objektai (3.1 pav.). Toliau laikysime, kad likę 929 spiečiai yra pasiskirstę galaktikos plokštumoje. Sutvarkę **N** katalogo imtį, bei

naudojantis 1.1 lentelės padėties ir polinkio kampų duomenimis, deprojektavome spiečių koordinates ir apskaičiavome kiekvieno objekto atstumą (r) iki galaktikos centro. Visų objektų pasiskirstymas radialine kryptimi žiedui yra pateikiamas 3.2 pav.

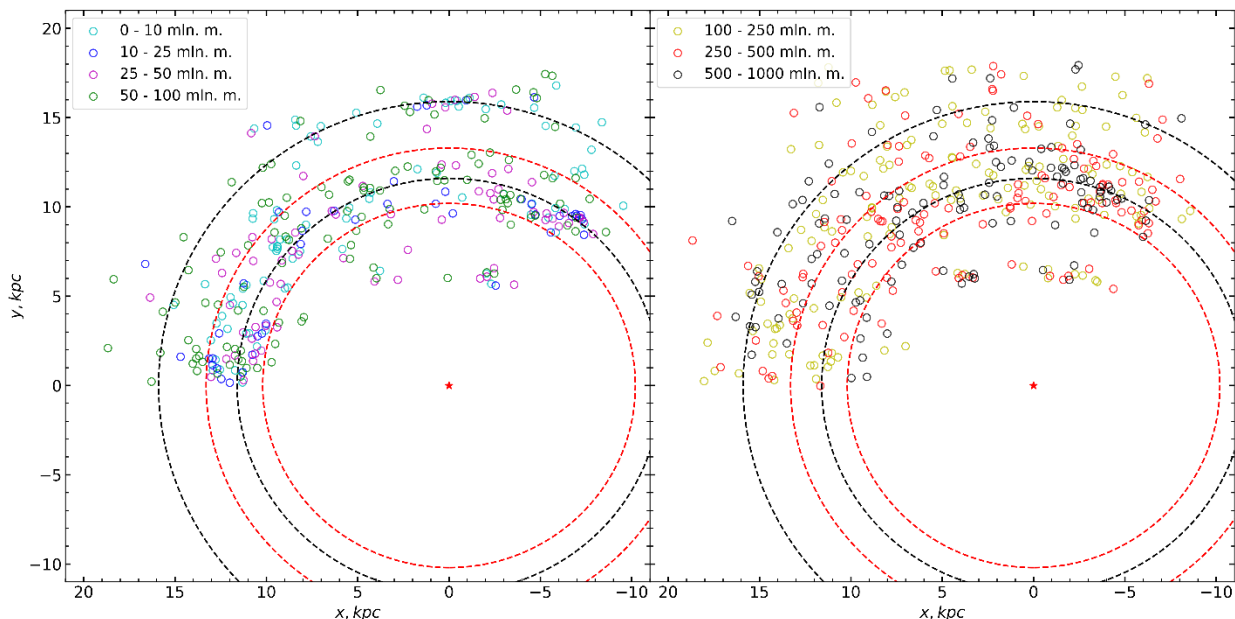
Toliau ieškome optimalių amžiaus intervalų, kurie parodytų žvaigždžių populiacijų išsidėstymą M31 galaktikos diske. Atsižvelgę į žvaigždžių evoliucijos laikus, išskyrėme 4 intervalus jauniems spiečiams: 0–10, 10–25, 25–50 ir 50–100 mln. m. Šie intervalai padeda konkrečiau pamatyti jaunų spiečių pasiskirstymą diske. Taip pat išskyrėme 3 amžiaus intervalus vyresniems spiečiams: 100–250, 250–500, 500–1000 mln. m. Žvaigždžių populiacijų išsidėstymas deprojektuotoje erdvėje pateikiamas 3.3 pav., kur galime matyti, kad jauni spiečiai yra labiau susikcentravę ir padeda ištyti atskiras galaktikos struktūras. Tuo tarpu vyresni spiečiai erdvėje pasiskirsto gan tolygiai.



3.1 pav. Tas pats kas 2.2 pav., tik objektui ID49. Šis objektas buvo atskirtas nuo tolimesnės katalogo analizės, nes tai yra kamuolinis spiečius, kuris nepriklauso M31 galaktikos disko plokštumai.



3.2 pav. Nagrinėjamų spiečių ($N=929$) pasiskirstymas radialine kryptimi žiedui. Raudonos išsitiesinės linijos žymi nustatytus vijų pločius, atitinkamai 10,2–13,3 kpc ir 15,2–17,8 kpc; punktyrinės linijos – vijose esančius 0–10 mln. m. amžiaus spiečių maksimumus (11,6 ir 15,9 kpc).



3.3 pav. Skirtingo amžiaus žvaigždžių spiečių ($N=929$) pasiskirstymas deprojekuotoje M31 galaktikos erdvėje. Raudoni apskritimai žymi nustatytą 10 kpc žvaigždėdaros žiedo plotį, spinduliai: 10,2 ir 13,3 kpc. Juodi apskritimai žymi vijose esančius 0–10 mln. m. amžiaus spiečių maksimumus, spinduliai 11,6 ir 15,9 kpc.

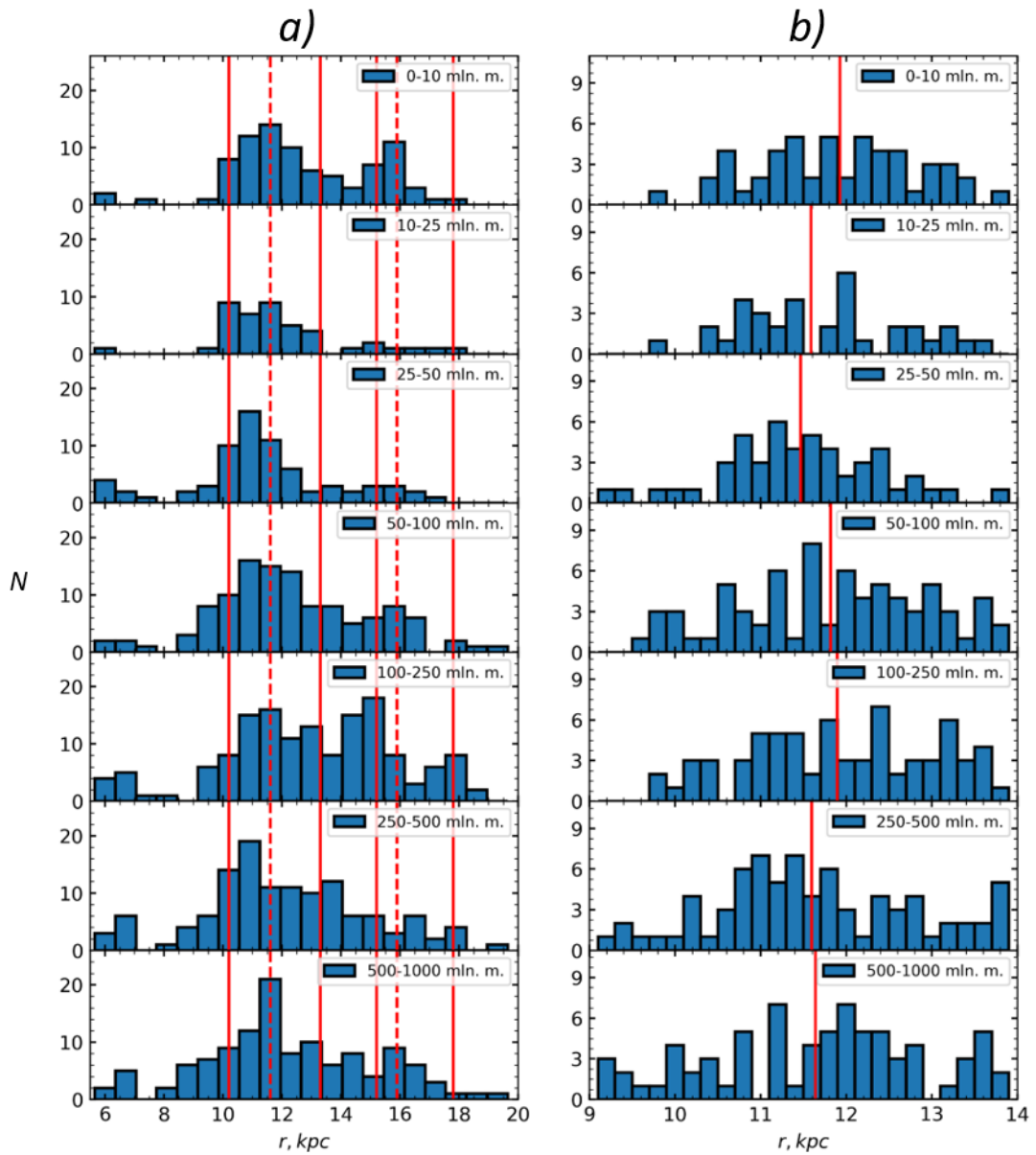
Suskirstę spiečius į amžiaus intervalus, toliau nustatome M31 galaktikos vijų padėtis ir pločius. Kadangi jaunų populiacijų formavimasis aktyviai vyksta tankesnėse galaktikos srityse, vijų padėtims nustatyti naudojame 0–10 mln. m. amžiaus spiečius. Nagrinėdami šios populiacijos pasiskirstymą radialine kryptimi, varijuodami histogramos stulpelių plotį 0,1 ir 0,2 kpc žingsniu, nustatėme du histogramos maksimumus. Pirmasis maksimumas yra 11,6 kpc atstumu nuo galaktikos centro. Taip pat pastebėjome, kad spiečių skaičius pradeda didėti nuo 10,2 kpc ir sumažėja ties 13,3 kpc. Šios ribos atitinka pirmojo galaktikos žiedo plotį, jas taip pat pažymėjome 3.2, 3.3 pav. Antrasis spiečių maksimumas išsiskiria, kai $r = 15,9$ kpc, antrosios vijos pozicija 15,2–17,8 kpc. Tai rodo, kad galaktikos žvaigždėdara suaktyvėja ir jauni spiečiai yra formuojami už 10 kpc žiedo ribų. Nustatytų padėčių paklaidos pirmajai vijai $\pm 0,1$ kpc, antrajai $\pm 0,2$ kpc. Tad turime pirmą žiedą, kuris prasideda ~ 10 kpc atstumu nuo galaktikos centro. Tokia pati žiedo pozicija buvo nustatyta naudojant Spitzer infraraudonųjų spindulių kamerą (Barmby ir kt. 2006), bei Spitzer fotometrą (Gordon ir kt. 2006). Tada antroji vija prasideda ties ~ 15 kpc, kuri dalinai susilieja su 10 kpc žiedu (Lewis ir kt. 2015). Šios dvi vijos juoda spalva taip pat matosi 1.5 pav.

Toliau nagrinėjame spiečių pasiskirstymą radialine kryptimi 6–20 kpc regione, einant 0,7 kpc pločio žiedais (3.4a pav.). Jauni spiečiai, iki 50 mln. m., yra susitelkę ~ 10 –13 kpc žiede. Taip yra dėl to, nes šis regionas tankesnis ir jame aktyviau formuojamos jaunos populiacijos. Vyresni spiečiai kurių amžius > 50 mln. m., taip pat yra susitelkę ~ 10 –13 kpc srityje, tai parodo, kad 10 kpc žiedas išsiskiria savo ilgaamžiškumu, kadangi pasirinktų amžiaus intervalų maksimumai patenka į šį regioną. Taip pat galime pastebėti, kad 100–250 mln. m. amžiaus spiečiai pasiskirsto gan tolygiai erdvėje (3.3 pav.) ir neturi išreikšto, akivaizdaus maksimumo (3.4a pav.). Tai rodo, kad spiečiui pasiekus 100 mln. m. amžiaus ribą, jam užtenka laiko išeiti už žiedo ribų. Jeigu spiečiai, didėjant amžiaus vertėms, išeina už žiedo ribų, mes tada turėtume stebėti poslinkį tarp histogramos maksimumo verčių. Norint tai patikrinti, mes pasirinkome 9–14 kpc ribą (3.4b pav.), kadangi nagrinėjame 10 kpc žiedą ir nenorime įtraukti antros vijos, kuri prasideda ties ~ 15 kpc. Pasirinktoje srityje apskaičiavome konkretaus amžiaus intervalo Gauso profilio parametrus, t.y. spiečių vidurkį (μ) ir standartinę nuokrypį (σ) r vertėms. Toliau laikome, kad spiečių r_{max} , atstumas nuo galaktikos centro ties kuriuo yra daugiausia spiečių, yra lygus μ . Nustatytas maksimumo vertes 3.4b pav. pažymėjome raudona linija. Paklaidas dydžiui r_{max} apskaičiavome, padalindami σ iš \sqrt{N} , kur N – atitinkamos populiacijos spiečių skaičius. Žvaigždžių populiacijų r_{max} padėties priklausomybė nuo amžiaus pateikiama 3.5 pav., kur amžiaus vertės parinktos iš atitinkamo intervalo vidurio, o paklaidos žymi amžiaus intervalo ribas. 3.5 pav. galime išskirti 0,46 kpc poslinkį tarp 0–50 mln. m. populiacijų. Didėjant amžiui populiacijų

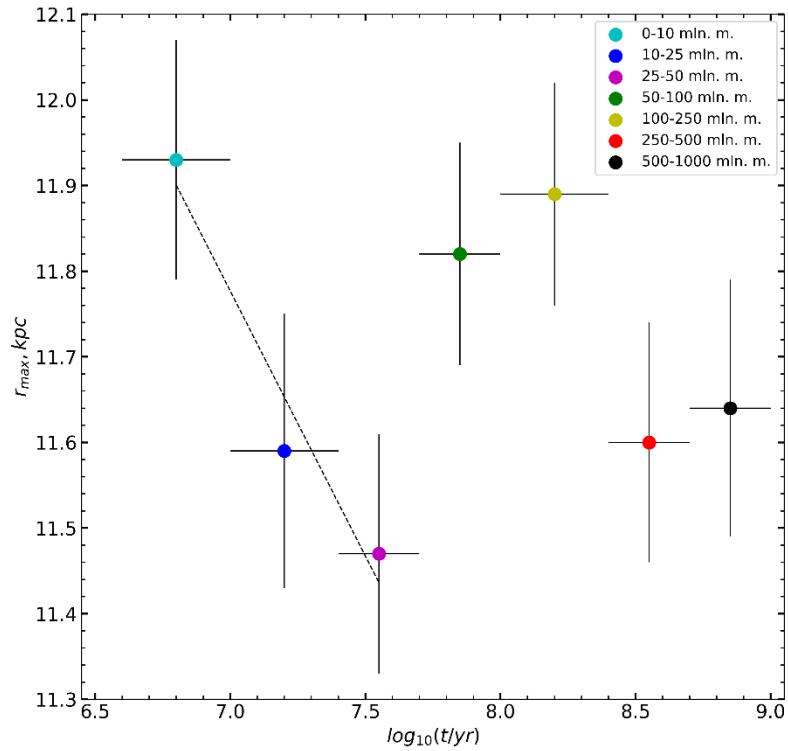
maksimumai slenkasi link galaktikos centro. Likusių populiacijų (50–100, 100–250, 250–500, 500–1000 mln. m.) r_{max} atitinkamai yra: 11,82, 11,89, 11,60 ir 11,64 kpc. Galime išskirti 50–250 ir 250–1000 mln. m. populiacijas, kurios tarpusavyje siejasi, t.y. jų r_{max} vertės yra arti viena kitos. Tai rodo, kad spiečiams judant galaktikos diske, jiems ilgiau užtrunka pereiti ~10–13 kpc žvaigždėdaros žiedą dėl tankių skirtumo galaktikoje.

3.2. Žvaigždėdaros žiedas azimutine kryptimi

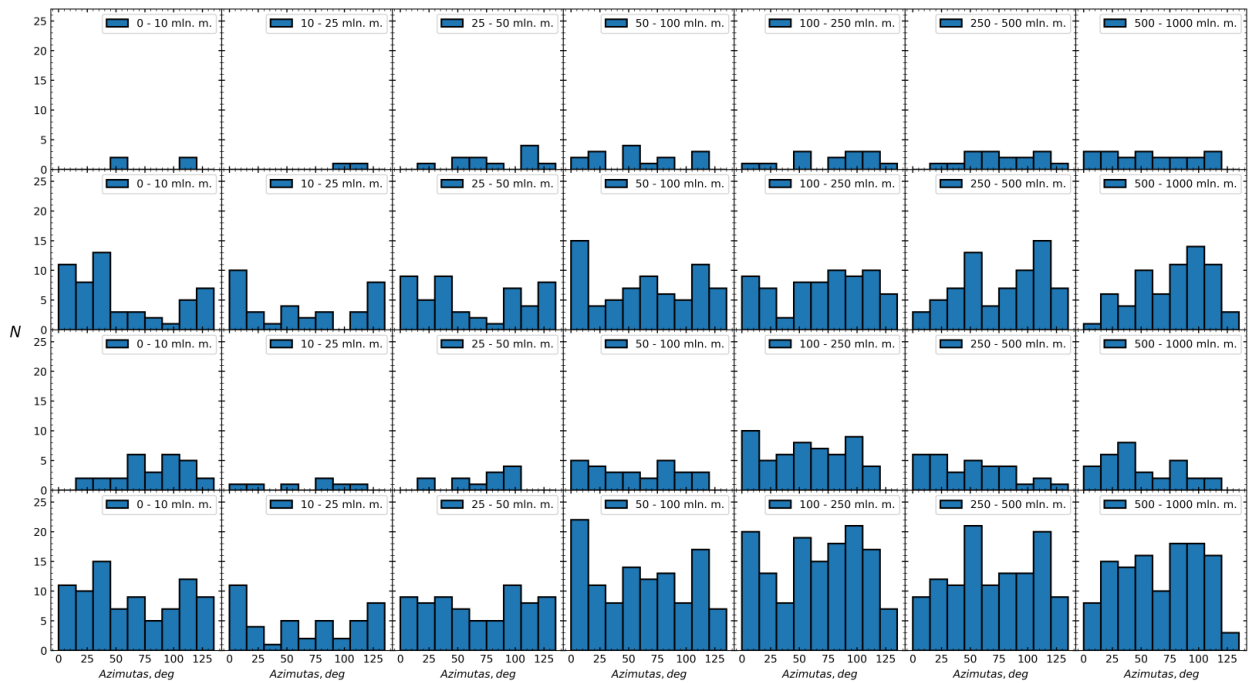
Turėdami deprojektuotą galaktikos vaizdą, toliau jį suskaidome į 9 regionus, kas 15 laipsnių azimutine kryptimi pagal laikrodžio rodyklę (3.3 pav.). Kadangi turime nustatytą atstumą ties kuriuo prasideda žvaigždėdaros žiedas, galaktiką padaliname į 3 lygius žiedus, kurių vidiniai ir išoriniai spinduliai atitinkamai yra: 6–10, 10–14, 14–18 kpc. Tokį žingsnį pasirinkome, nes norime atskirai išskirti 10 kpc žvaigždėdaros žiedą, bei likusias tokio paties pločio sritis. Pagal apibrėžtus kriterijus, žvaigždžių populiacijų pasiskirstymas pateikiamas 3.6 pav. Objektų kiekis 6–10 kpc srityje yra mažas, nėra išsiskiriančių aktyvesnės žvaigždėdaros sričių. Spiečiai, kurių amžius >250 mln. m., erdvėje pasiskirsto gan tolygiai. 10–14 kpc žiede galime pastebėti, kad skirtingos M31 galaktikos vietos turėjo skirtingą žvaigždžių populiacijų formavimosi aktyvumą. Iki 15° azimutine kryptimi staigiai išauga spiečių skaičius, kurių amžius <100 mln. m. Tankesnis šių spiečių pasiskirstymas erdvėje taip pat matosi 3.3 pav. 0–10 ir 25–50 mln. m. populiacijos išsiskiria, nes jų žvaigždėdaros aktyvumas išsiplečia iki 45°. Panaši objektų sanaupa susitelkusi ir 105–135° srityje (3.3 pav.). Priklausomai nuo populiacijos amžiaus skiriasi ir srities dydžiai, tačiau jauniausi spiečiai (<10 mln. m.) rodo, kad jie aktyviai formuojami išskirtose ribose. 100–250 mln. m. spiečiai žiede išsidėsto tolygiai su sumažėjusia žvaigždėdara 30–45° dalyje. Tuo tarpu didžioji dalis 250–1000 mln. m. amžiaus spiečių, yra susitelkusi 75–120° galaktikos srityje. Jų kiekis išauga nuo 45°, tai rodo, kad 0–45° žiedo sritis pasižymi jaunesnėmis populiacijomis. Galime daryti išvadą, kad M31 galaktika išsiskiria dviem sritimis, kur yra suaktyvėjęs žvaigždžių formavimasis. 14–18 kpc žiede išsiskiria spiečiai iki 10 mln. m., jų kiekis išauga 60–120° srityje. Taip yra dėl to, nes ties ~15 kpc atsiranda antroji galaktikos vija (3.2 pav.), kurioje taip pat yra padidėjęs žvaigždžių formavimosi aktyvumas. Tuo tarpu 250–1000 mln. m. populiacijų maksimumai yra pasislinkę link žemesnių azimuto verčių lyginant su 10–14 kpc žiedu. Taip yra dėl to, nes jaunesnių spiečių formavimasis vyksta 60–120° srityje.



3.4 pav. Skirtingo amžiaus žvaigždžių populiacijų pasiskirstymas radialine kryptimi M31 galaktikos žiedui *a)* 6–20, *b)* 9–14 kpc srityje. Raudonos išsitiesinės linijos *a)* dalyje žymi nustatytus vijų plocius, atitinkamai 10,2–13,3 kpc ir 15,2–17,8 kpc; punktyrinės linijos – vijose esančius 0–10 mln. m. amžiaus spiečių maksimumus (11,6 ir 15,9 kpc); raudonos linijos *b)* dalyje žymi nustatytas r_{max} padėtis iš Gauso profilio, kur spiečių kiekis yra didžiausias (žr. 3.1 skyrelį).



3.5 pav. Žvaigždžių populiacijų maksimumo (r_{max}) padėties priklausomybė nuo amžiaus 9–14 kpc srityje.



3.6 pav. Skirtingo amžiaus žvaigždžių populiacijų pasiskirstymas azimutine kryptimi, nuo viršaus į apačią: 6–10, 10–14, 14–18, 6–18 kpc žiedams.

Išvados

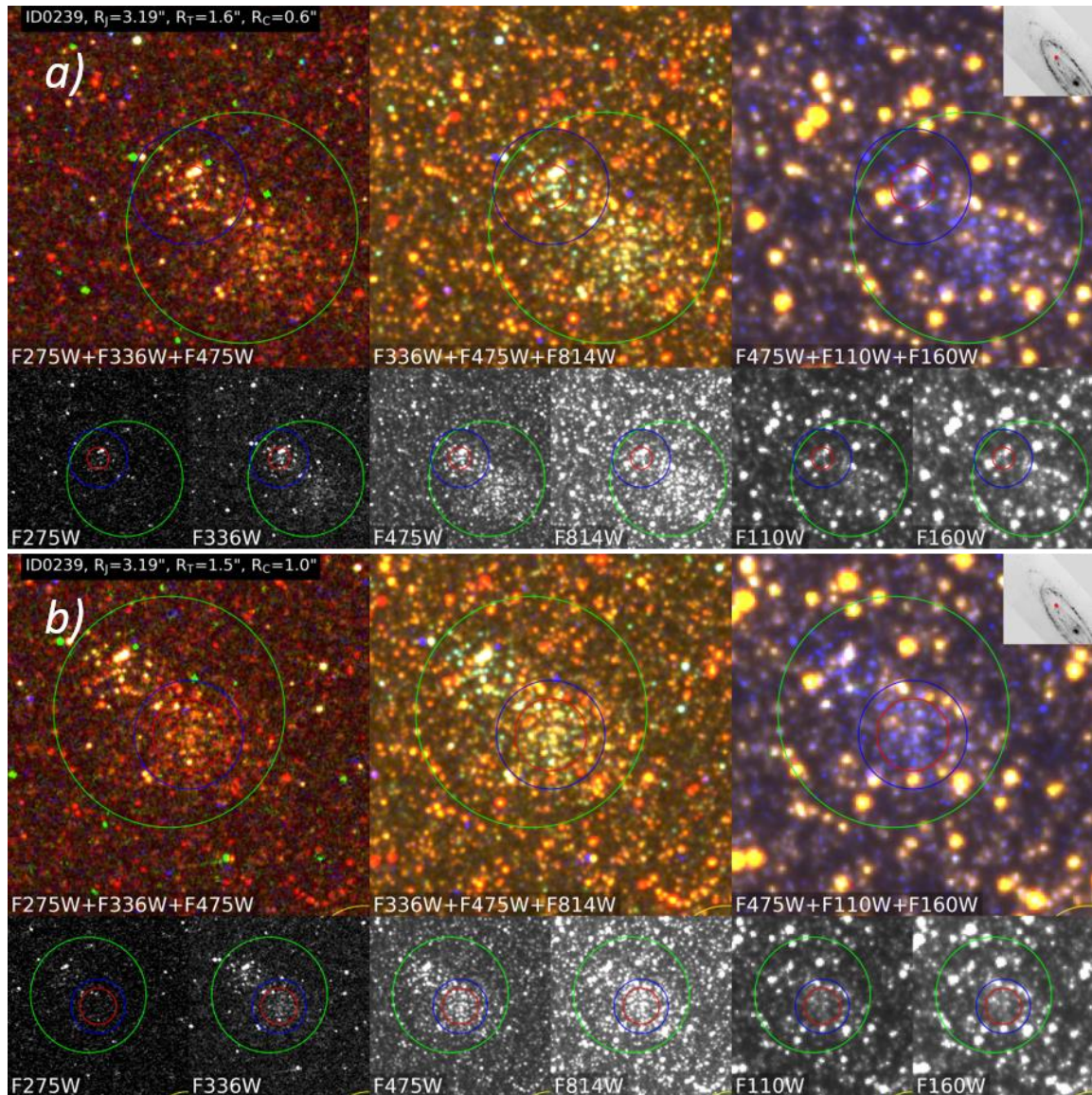
Šiame darbe pristatome naują M31 PHAT apžvalgos žvaigždžių spiečių fotometrijos katalogą. Kiekvienam spiečiui nustatėme: centro koordinatas, spalvos ir pilnutinės apertūrų dydžius, fono lygius ir ryškius 6 fotometrines juostose. Naudodami [Naujalis ir kt. \(2020\)](#) spiečių katalogą (N) tyrėme žvaigždžių populiacijų pasiskirstymą galaktikos diske.

1. Žvaigždžių spiečių centro koordinatės buvo pakoreguotos 90 % (1317/1471) objektų; fono lygiai ir apertūrų dydžiai buvo nustatyti visiems (1471) spiečiams.
2. Atlikta daugiaspalvė apertūrinė 1471 objekto fotometrija, kurią sujungus su N katalogu, buvo parengtas naujas Andromedos galaktikos žvaigždžių spiečių fotometrijos PHAT katalogas.
3. Remiantis jaunesnių nei 10 mln. m. žvaigždžių populiacijų pasiskirstymu, nustatyti M31 galaktikos dviejų vijų (žvaigždėdaros žiedų) parametrai. Pirmosios vijos radialinis atstumas nuo galaktikos centro ir plotis 10,2–13,3 kpc, antrosios – 15,2–17,8 kpc.
4. M31 galaktikos 10 kpc žvaigždėdaros žiede jauniausių spiečių skirstinių maksimumai per 50 mln. m. sistemingai pasislenka $\sim 0,5$ kpc centro link.
5. M31 galaktikos 10 kpc žvaigždėdaros žiede nustatytos dvi sritys, kuriose vyksta aktyvesnė žvaigždėdara, jų azimutai: $0\text{--}45^\circ$ ir $105\text{--}135^\circ$.

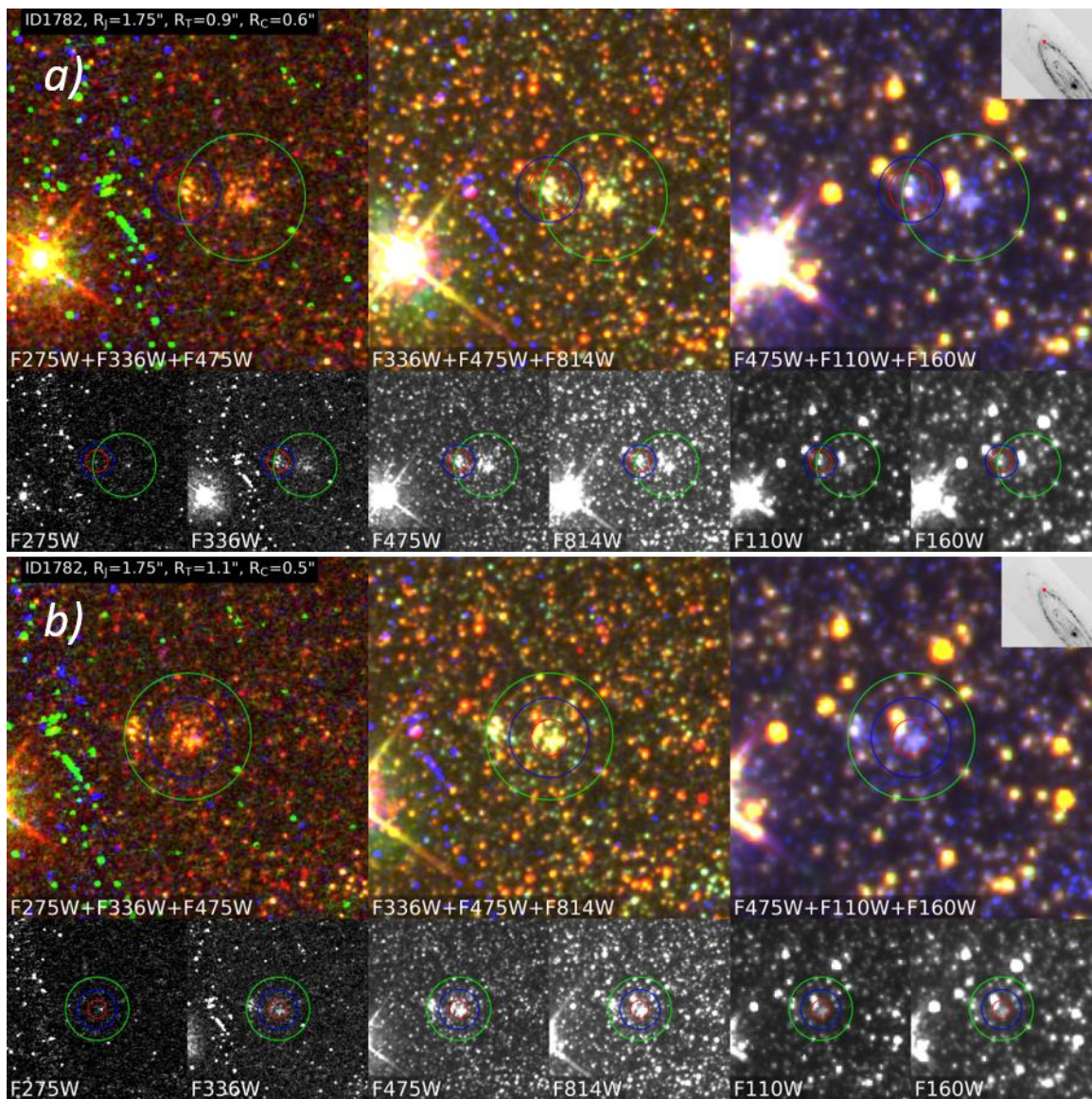
Literatūros sąrašas

- Astropy Collaboration, Price-Whelan A. M., Sipocz M. B. ir kt., The Astropy Project: Building an Open-science Project and Status of the v2.0 Core Package, *The Astronomical Journal*, 156, id. 123, (19 pp), 2018.
- Barnby P., Ashby M. L., Bianchi L. ir kt., Dusty Waves on a Starry Sea: The Mid-Infrared View of M31, *The Astrophysical Journal*, 650, L45-L49, 2006.
- Dalcanton J. J., Williams B. J., Lang D. ir kt., The Panchromatic Hubble Andromeda Treasury, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 200, 18 (37 pp), 2012.
- Fouesneau M., Johnson L. C., Weisz D. R. ir kt., The Panchromatic Hubble Andromeda Treasury V. Ages and masses of the year 1 stellar clusters, *The Astrophysical Journal*, 786, 117 (17 pp), 2014.
- Gordon K. D., Bailin J., Engelbracht C. W. ir kt., Spitzer MIPS Infrared Imaging of M31: Further Evidence for a Spiral-Ring Composite Structure, *The Astrophysical Journal*, 638, L87-L92, 2006.
- Johnson L. C., Seth A. C., Dalcanton J. J. ir kt., PHAT stellar cluster survey I. YEAR 1 catalog and integrated photometry, *The Astrophysical Journal*, 752, 95 (23 pp), 2012.
- Johnson L. C., Seth A. C., Dalcanton J. J. ir kt., PHAT stellar cluster survey II. Andromeda Project cluster catalog, *The Astrophysical Journal*, 802, 127 (22 pp), 2015.
- Joye W. A., Mandel E., New Features of SAOImage DS9, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XII ASP Conference Series*, 295, 2003.
- Lewis A. R., Dolphin A. E., Dalcanton J. J. ir kt., The Panchromatic Hubble Andromeda Treasury XI: The Spatially-Resolved Recent Star Formation History of M31, *The Astrophysical Journal*, 805 (21 pp), 2015.
- McConnachie A. W., Irwin M. J., Ferguson A. M. ir kt., Distances and Metallicities for 17 Local Group Galaxies, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 356, 979-997, 2005.
- de Meulenaer P., Stonkutė R., Vansevičius V., Deriving physical parameters of unresolved star clusters V. M 31 PHAT star clusters, *Astronomy and Astrophysics*, 602, A112, 2017.
- Naujalis R., Stonkutė R., Vansevičius V., Star Clusters of the Andromeda Galaxy. Multicolour HST Photometry, *Star Clusters: From the Milky Way to the Early Universe. Proceedings of the International Astronomical Union, Vol. 351*, 131-134, 2020.
- Phelps S., Nusser A., Desjacques V., The mass of the Milky Way and M31 using the method of least action, *The Astrophysical Journal*, 775, 102 (12 pp), 2013.
- Williams B. J., Lang D., Dalcanton J. J. ir kt., The Panchromatic Hubble Andromeda Treasury. X. Ultraviolet to infrared photometry of 117 million equidistant stars, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 215, 9 (34 pp), 2014.

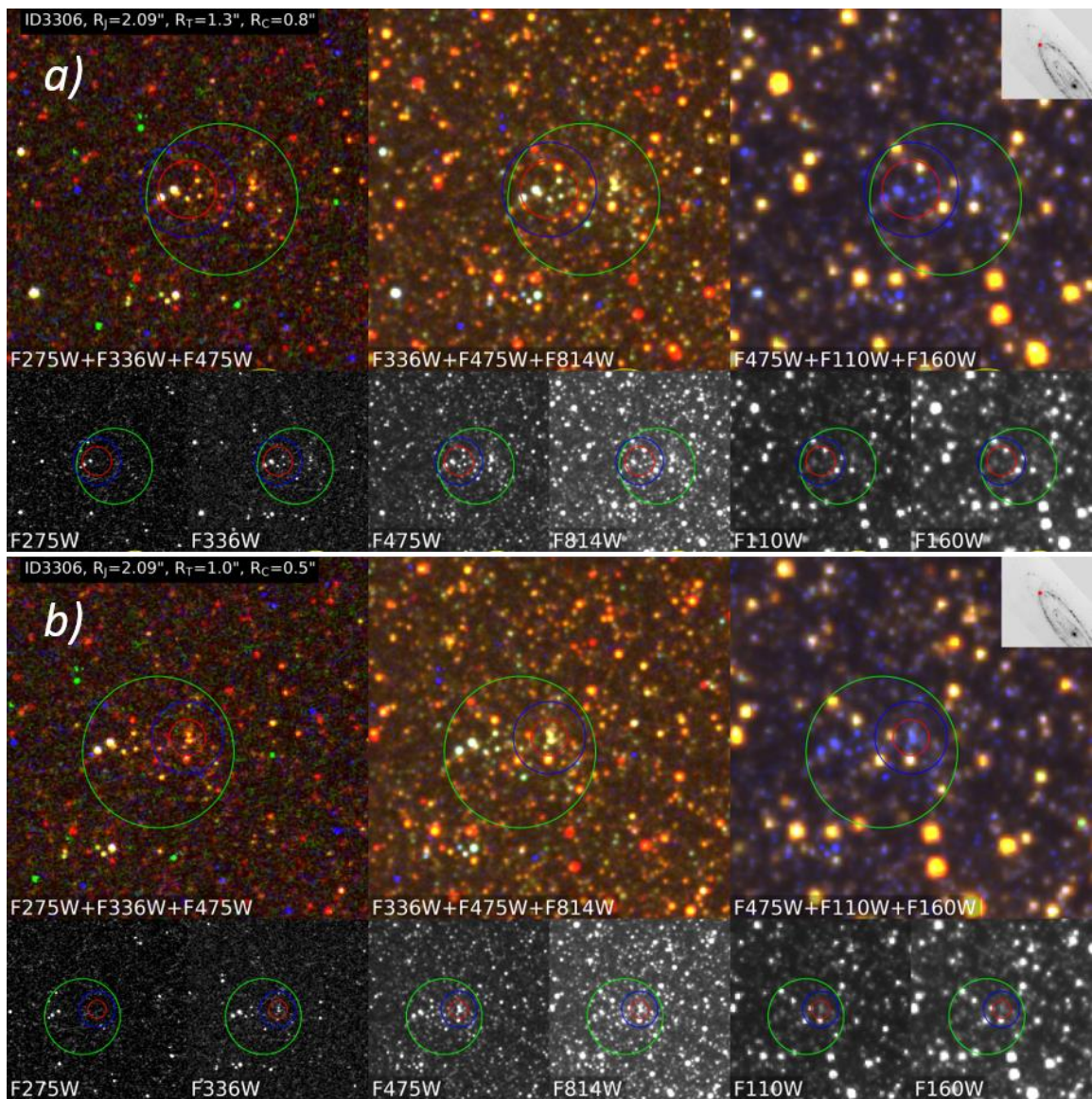
Priedas Nr. 1



1 pav. Tas pats kas 1.3 pav., tik objektui ID239. Raudonas apskritimas žymi mūsų parinktą spalvinę apertūrą (R_C) naudojamą spiečiaus spalvos nustatymui, mėlynas apskritimas – spiečiaus apertūra (R_T) pilnutinio ryškio matavimui, žalias apskritimas žymi Johnson ir kt. (2015) spiečių kataloge publikuotą apertūrą (R_J). Spiečius pasižymi dviem skirtingomis žvaigždžių populiacijomis.



2 pav. Tas pats kas 1 pav., tik objektui ID1782.



3 pav. Tas pats kas 1 pav., tik objektui ID3306.

Priedas Nr. 2

1 lentelė. Žvaigždžių spiečių imties (E) fotometrijos katalogas

<i>ID</i>	<i>RA</i>	<i>DEC</i>	<i>R_c</i>	<i>R_T</i>	<i>275_T</i>	<i>336_T</i>	<i>475_T</i>	<i>814_T</i>	<i>110_T</i>	<i>160_T</i>
12	11,456	41,657	0,7	2	20,669	20,446	19,888	18,435	17,949	17,103
17	11,490	42,027	1,25	1,8	20,827	20,755	20,364	19,436	19,443	19,215
...
15121	10,799	41,396	2,8	1,25	19,792	20,018	20,335	18,841	17,082	16,287

1 stulpelis: spiečiaus identifikacijos numeris

2–3 stulpeliai: spiečiaus koordinatės (deg)

4–5 stulpeliai: nustatytos spalvinės (*R_c*) ir pilnutinės (*R_T*) apertūros (arcsec)

6–11 stulpeliai: nustatytos ryškių vertės konkrečiame filtre, naudojant tik *R_T* apertūrą (mag)

Santrumpų sąrašas

ACS	Advanced Camera for Surveys – moderni HST CCD kamera apžvalgoms
CCD	Charge Coupled Device – krūvio sąsajos įtaisas
E	Šiame darbe nagrinėjamų spiečių katalogas – visi PHAT apžvalgos blokai
FUV	Far Ultraviolet – tolimoji ultravioletinė sritis, 122–200 nm
GALEX	The Galaxy Evolution Explorer (GALEX) – kosminis teleskopas skirtas galaktikų stebėjimams UV spektriniame diapazone
HST	Hubble Space Telescope (HST) – Hablo kosminis teleskopas
MAST	Mikulski Archive for Space Telescopes – archyvas, kuriame kaupiami kosminių teleskopų stebėjimų duomenys (https://archive.stsci.edu/index.html)
N	Naujalis ir kt. (2020) spiečių katalogas (išskyrus B01, B02, B03, B05 blokus)
NIR	Near Infrared – artimoji infraraudonoji sritis, 750–1400 nm
NUV	Near Ultraviolet – artimoji ultravioletinė sritis, 200–400 nm
RGB1	<i>F275W, F336W, F475W</i> filtrų kombinacija (1.3 pav.)
RGB2	<i>F336W, F475W, F814W</i> filtrų kombinacija (1.3 pav.)
RGB3	<i>F475W, F110W, F160W</i> filtrų kombinacija (1.3 pav.)
PHAT	Panchromatic Andromeda Treasury Program – Andromedos galaktikos fotometrinių apžvalga (https://archive.stsci.edu/prepds/phat/)
S	Johnson ir kt. (2015) spiečių katalogas – visi PHAT apžvalgos blokai
S/N	Signal to Noise ratio – signalo ir triukšmo santykis
WFC3	Wide Field Camera 3 – plataus lauko HST CCD kamera apžvalgoms

Daugiaspalvė Andromedos galaktikos žvaigždžių spiečių fotometrija

Santrauka

Šiame darbe pristatome naują M31 PHAT apžvalgos žvaigždžių spiečių fotometrijos katalogą. Kiekvienam spiečiui nustatėme: centro koordinatės, spalvos ir pilnutinės apertūrų dydžius, fono lygius ir ryškius 6 fotometrines juostose. Naudodami [Naujalis ir kt. \(2020\)](#) spiečių katalogą (N) tyrėme žvaigždžių populiacijų pasiskirstymą galaktikos diske.

DARBO TIKSLAS: atlikti naują Andromedos galaktikos PHAT apžvalgos žvaigždžių spiečių fotometriją ir nustatyti žvaigždžių spiečių parametrų skirstinius galaktikos diske.

UŽDAVINIAI:

1. Nustatyti žvaigždžių spiečių centrų koordinatės, matavimo apertūras ir fono lygius.
2. Atlikti žvaigždžių spiečių daugiaspalvę apertūrinę fotometriją ir parengti katalogą.
3. Ištirti žvaigždžių spiečių populiacijų parametrų kitimo pobūdį M31 galaktikos diske.

IŠVADOS:

1. Žvaigždžių spiečių centro koordinatės buvo pakoreguotos 90 % (1317/1471) objektų; fono lygiai ir apertūrų dydžiai buvo nustatyti visiems (1471) spiečiams.
2. Atlikta daugiaspalvė apertūrinė 1471 objekto fotometrija, kurią sujungus su N katalogu, buvo parengtas naujas Andromedos galaktikos žvaigždžių spiečių fotometrijos PHAT katalogas.
3. Remiantis jaunesnių nei 10 mln. m. žvaigždžių populiacijų pasiskirstymu, nustatyti M31 galaktikos dviejų vijų (žvaigždėdaros žiedų) parametrai. Pirmosios vijos radialinis atstumas nuo galaktikos centro ir plotis 10,2–13,3 kpc, antrosios – 15,2–17,8 kpc.
4. M31 galaktikos 10 kpc žvaigždėdaros žiede jauniausių spiečių skirstinių maksimumai per 50 mln. m. sistemingai pasislenka ~0,5 kpc centro link.
5. M31 galaktikos 10 kpc žvaigždėdaros žiede nustatytos dvi sritys, kuriose vyksta aktyvesnė žvaigždėdara, jų azimutai: 0–45° ir 105–135°.

Multicolour Photometry of the Andromeda Galaxy

Star Clusters

Summary

In this study we present new PHAT survey star cluster photometry catalogue of the Andromeda galaxy. For each cluster we measured: centre coordinates, colour and total apertures, background levels and magnitudes for 6 photometric passbands. Using [Naujalis et al. \(2020\)](#) star cluster catalogue (**N**), we analyse distribution of stellar populations in the galactic disk.

Main objective: to perform new photometry for M31 PHAT survey star clusters and determine parameter distributions in the galactic disk.

Main tasks:

1. Measure centre coordinates, apertures and background levels for star clusters.
2. Perform multicolour aperture photometry for star clusters and prepare catalogue.
3. Analyse stellar population parameter changes in the Andromeda galaxy disk.

Conclusions

1. We measured new centre coordinates for 90% (1317/1471) of star clusters; background levels and apertures were determined for all (1471) clusters.
2. By performing multicolour aperture photometry for 1471 objects, and adding results to **N** catalogue, we prepared new photometry catalogue for star clusters in the Andromeda galaxy.
3. Young (<10 Myr) stellar population distribution reveals that Andromeda galaxy have two star forming rings. Radial distance from the galaxy centre and width for the first ring is 10.2–13.3 kpc, second 15.2–17.8 kpc.
4. Stellar populations over 50 Myr have ~0.5 kpc radial shift in 10 kpc star forming ring of the Andromeda galaxy.
5. 10 kpc star forming ring of the Andromeda galaxy have two regions of increased star formation rate. Azimuths of these regions are: 0–45° and 105–135°.