VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
TEORINĖS FIZIKOS IR ASTRONOMIJOS INSTITUTAS

Eimantas Kriščiūnas

ANDROMEDOS GALAKTIKOS ŽVAIGŽDŽIŲ SPIEČIŲ FOTOMETRINĖS SAVYBĖS

Bakalauro studijų baigiamasis darbas
Kompiuterinės fizikos ir modeliavimo
studijų programa

Studentas:	Eimantas Kriščiūnas
Leista ginti:	2019-06-06
Darbo vadovas:	dr. Rima Stonkutė
Instituto atstovas:	prof. dr. Egidijus Anisimovas

Vilnius 2019

Turinys

Įvadas ... 3

1. PHAT katalogai ... 5

1.1. Stebėjimų duomenys ... 5

1.2. Objektų identifikavimas ... 7

1.3. Papildomų kandidatų į spiečius atranka ... 13

1.4. Katalogų palyginimas ... 19

1.5. Apertūrinė objektų fotometrija ... 21

2. Žvaigždžių spiečių parametrai ... 24

2.1. Žvaigždžių spiečių parametrų nustatymo metodai ... 24

2.2. Žvaigždžių spiečių savybės ... 31

2.3. Parametrų palyginimas su kitų autorių rezultatais ... 38

Išvados ... 41

Literatūros sąrašas ... 42

Santrumpų sąrašas ... 43

Priedas Nr. 1 ... 44

Santrauka ... 45

Summary ... 46

Įvadas

Aukštos kokybės duomenys apie žvaigždžių spiečius suteikia galimybę nagrinėti svarbias astrofizikines problemas, kuriomis bandoma aiškinti spiečių, žvaigždžių, galaktikų formavimąsi ir evoliuciją. Paukščių Tako (PT) žvaigždžių spiečių katalogai nėra pilni ir tikslūs, nes spiečių aptikimą Galaktikos plokštumoje komplikuoja aukšta dulkių ir dujų ekstinkcija. Tikslūs duomenys apie spiečius PT gaunami tik ≈1 kpc spindulio regione aplink Saulę. Norint analizuoti masyvios 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 patogiai atsukta į mus (kampas tarp regėjimo krypties ir galaktikos poliaus yra 72 laipsniai[1]), tad įmanoma stebėti jos spiralinėse vijose ir tarp jų esančius žvaigždžių spiečius. Didžioji dalis žvaigždžių gimsta vijų žvaigždėdaros regionuose, kur susiformuoja spiečiai ir žvaigždžių asociacijos. Tad turint Andromedos galaktikos žvaigždžių spiečių 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 didelės masės spiralinėms galaktikoms.

Šiame darbe bus analizuojami PHAT[2] (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 masyviausius iš jų išskirti į atskiras žvaigždes (Fouesneau ir kt. 2014). Darbe naudojantis stochastinių modelių metodu bus nustatomi mūsų sudaryto spiečių katalogo ir Johnson ir kt. (2015) spiečių parametrai, kuriais remiantis bus analizuojamos žvaigždžių spiečių savybės.

[1] http://leda.univ-lyon1.fr/ledacat.cgi?o=M31
[2] https://archive.stsci.edu/prepds/phat/

1.1 lentelė. Pagrindiniai Andromedos galaktikos parametrai

Parametras	Vertė	Liter.
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
Atstumo modulis, m - M	24,47 mag	2
Absoliutus ryškis, M_V	-21,78 mag	1
Regimasis ryškis, V	2,68 mag	1
Dinaminė masė	$1,5\text{-}5,5 \times 10^{12}\ M_\odot$	3

Pastaba. Duomenys paimti iš literatūros šaltinių: (1) NASA/NED[3] užgalaktinių duomenų bazė; (2) Johnson ir kt. (2012); (3) Phelps ir kt. (2013).

Darbo tikslas: ištirti Andromedos (M31) galaktikos žvaigždžių spiečių savybes.

Uždaviniai:

1. Sukurti PHAT apžvalgos žvaigždžių spiečių klasifikavimo metodiką.
2. Nustatyti Andromedos galaktikos žvaigždžių spiečių fotometrines savybes.
3. Ištirti Andromedos galaktikos žvaigždžių spiečių parametrų skirstinius.

[3] https://ned.ipac.caltech.edu/

1. PHAT katalogai

Šiame skyriuje apžvelgiami PHAT apžvalgos stebėjimų duomenys, aptariami metodai, kuriais naudojantis Johnson ir kt. (2015) sudarė Andromedos spiečių, galaktikų ir papildomų objektų katalogus. Taip pat nagrinėjamas mūsų sudaryto katalogo algoritmas ir palyginti duomenys su Johnson ir kt. (2015) spiečių duomenimis. Šis skyrius parengtas remiantis kursiniu darbu.

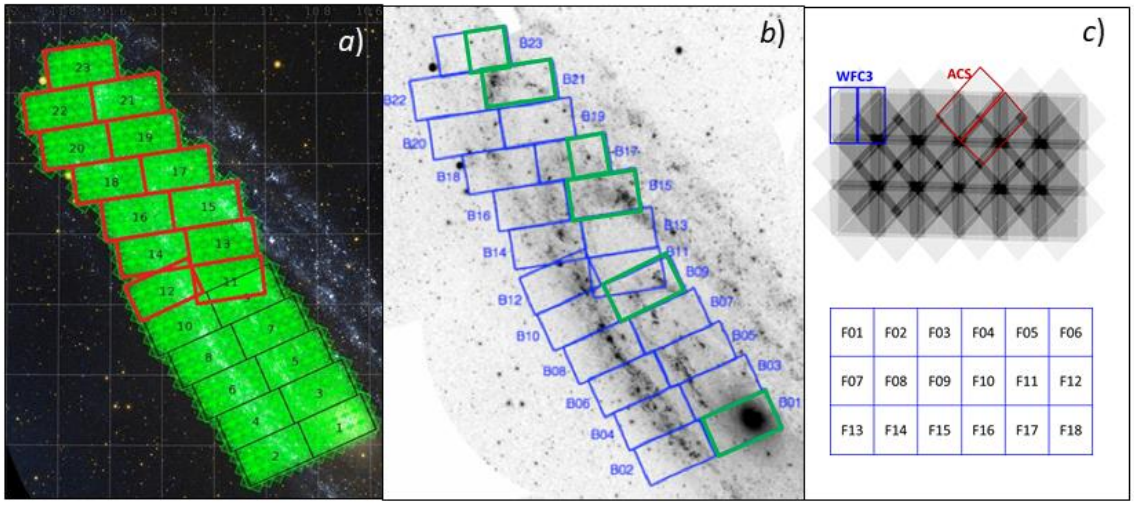
1.1. Stebėjimų duomenys

Nuo 2010 birželio 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 spektro srityje ir artimoje infraraudonoje spektro srityje – WFC3 kamera naudojant *F275W*, *F336W*, *F110W* ir *F160W* filtrus. Pagrindiniai PHAT apžvalgos parametrai pateikiami 1.2 lentelėje, o naudotų Hablo filtrų pralaidumo 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 baldžo (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 1.1c 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) archyve[4]. Iš ten ir paimti šiame darbe tyrinėjamų B11-B23 (žr. 1.1c pav.) blokų duomenys. Arčiau galaktikos centro esantys blokai į analizę nebuvo įtraukti, nes ten spiečių paiešką apsunkina didelis žvaigždžių tankis.

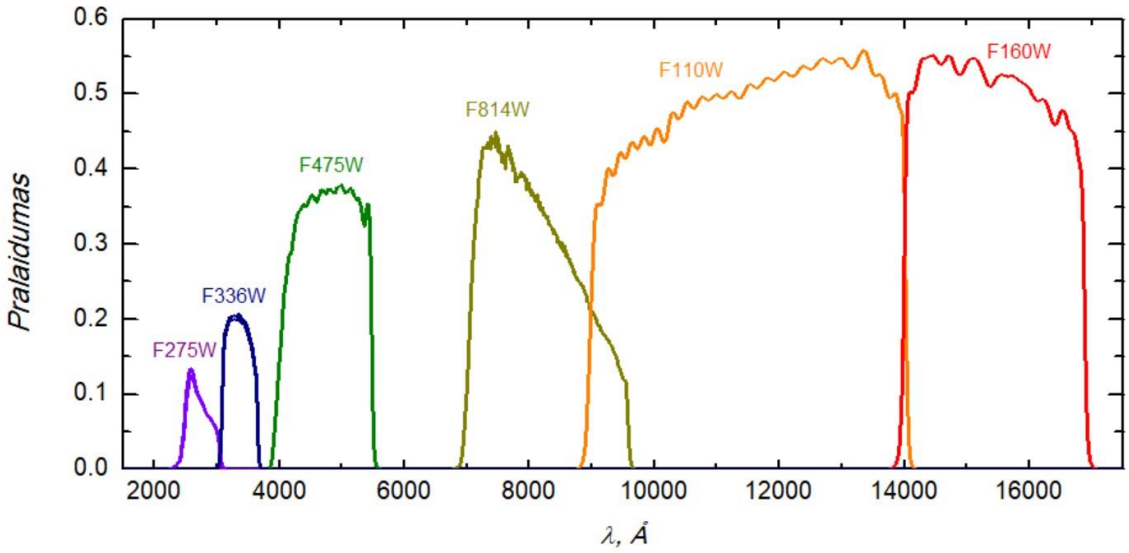


1.1 pav. *a)* GALEX NUV+FUV Andromedos nuotraukoje žalia zona tai – visas PHAT apžvalgos laukas (23 blokai)[5]. Joje raudonais stačiakampiais pažymėti šiame darbe nagrinėjami B11-B23 blokai; *b)* GALEX NUV Andromedos nuotraukoje mėlynais stačiakampiais parodytos visų 23 blokų padėtys[6], o žaliais stačiakampiais *„Year 1"* katalogo straipsnyje (Johnson ir kt. 2012) nagrinėta PHAT apžvalgos dalis; *c)* 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 lentelė. Pagrindiniai 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, arcsec	≈0,005					
Hablo kamera	**WFC3/UVIS**		**ACS/WFC**		**WFC3/IR**	
Filtrai	*F275W (UV)*	*F336W (U)*	*F475W (g)*	*F814W (I)*	*F110W (J)*	*F160W (H)*
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
Ekstinkcija Andromedos kryptimi (A_λ), mag[7]	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''	

[4] https://archive.stsci.edu/prepds/phat/datalist.html
[5] https://datalab.noao.edu/phat/index.php
[6] https://archive.stsci.edu/prepds/phat/datalist.html
[7] https://ned.ipac.caltech.edu/



1.2 pav. PHAT apžvalgoje naudotų HST filtrų pralaidumo kreivės.

1.2. Objektų identifikavimas

Pirmaisiais stebėjimų metais (2011) buvo padengtas maždaug ketvirtis viso PHAT apžvalgos lauko (1.1b pav. parodyti B01, B09, B15 ir B21 blokai, bei B17, B23 blokų vakarinės dalys). Astronomai (nepriklausomai vienas nuo kito) atliko vizualinę spiečių paiešką šios dalies nuotraukose. Objektų paiešką jie vykdė naudodamiesi interaktyvia programa, kuri jiems leido vienu metu kompiuterio ekrane matyti ir analizuoti konkretų 23‘ x 21‘ dydžio PHAT apžvalgos lauką visų šešių PHAT apžvalgos filtrų nuotraukose, spalvotoje nuotraukoje (*F475W+F814W*) bei nuotraukoje, kurioje yra atimtos identifikuotos žvaigždės. Nuotraukų signalo intensyvumo skalę ir kontrastą jie galėjo keisti. Kiekvieną nuotrauką pažiūrėjo 3-4 astronomai. Jų sudaryti spiečių katalogai buvo apjungti į vieną kandidatų katalogą. Turėdami kandidatų koordinates ir naudodamiesi aukščiau minėta interaktyviąja programa visas nuotraukas nepriklausomai vienas nuo kito peržiūrėjo 8 astronomai. Šiame etape, naujų kandidatų nebuvo ieškoma, o tik jau esantieji sąraše skirstomi į atskiras grupes: „*Spiečių*“ grupė – parametras $\boldsymbol{S_{by\text{-}eye}}$ = 1, „*Galbūt spiečių*“ grupė – parametras $\boldsymbol{S_{by\text{-}eye}}$ = 2, „*Ne spiečių*“ grupė – parametras $\boldsymbol{S_{by\text{-}eye}}$ = 3. Astronomų individualūs katalogai buvo sutapatinti, kiekvienam kandidatui į spiečius suskaičiuotas parametro $\boldsymbol{S_{by\text{-}eye}}$ vidurkis. Remiantis juo objektai suskirstyti į „*Spiečių*“ ($\boldsymbol{S_{by\text{-}eye}} < 2$), „*Galbūt spiečių*“ ($2{,}0 < \boldsymbol{S_{by\text{-}eye}} < 2{,}5$) ir „*Ne spiečių*“ ($\boldsymbol{S_{by\text{-}eye}} > 2{,}5$) katalogus (Johnson ir kt. 2012). Toliau darbe šie katalogai bus vadinami išlaikant originalius autorių

pavadinimus: „*Year 1 Spiečių*“ (601 obj.), „*Year 1 Galbūt spiečių*“ (237 obj.) ir „*Year 1 Ne spiečių*“ (370 obj.) katalogais.

Vizualinė spiečių paieška – daug laiko atimantis darbas. Sudarant „*Year 1*“ katalogą kiekvienas profesionalus astronomas spiečių paieškai sugaišo apie mėnesį (Johnson ir kt. 2015). Todėl išaugus turimų PHAT apžvalgos duomenų skaičiui bandyta objektų identifikavimui nuotraukose pritaikyti automatinį algoritmą, kuris pats aptiktų spiečius panaudodamas „*Year 1*“ katalogo duomenis kaip mokymosi rinkinį. Tinkamo algoritmo sukurti nepavyko, nes visi testuoti metodai aptikdavo tiek pat nereikalingų, netinkamų objektų kiek ir tikrų spiečių (Johnson ir kt. 2015). Todėl nuspręsta pasitelkti į pagalbą savanorius. Sukurta „Andromeda Project“ (AP) internetinė svetainė[8], kurioje savanoriai galėjo interaktyviu būdu ieškoti spiečių ir galaktikų jiems atsitiktiniu būdų pasiūlytose HST ACS *F475W* ir *F814W* 36‘‘,25 x 25‘‘ (≈6,8 x 4,8 pc) dydžio nuotraukose. AP svetainėje savanoriams parodomas trumpas filmukas, kuriame paaiškinama kaip jiems pateiktoje nuotraukoje pasirinkto dydžio apskritimu pažymėti surasto spiečiaus centrą ir ribas. Taip pat, jie galėjo pažymėti ir nuotraukose pasitaikančias galaktikas. Kad būtų lengviau spiečius ir galaktikas atskirti nuo foninių šalia esančiu žvaigždžių, savanoriams buvo pateikiamos ir spalvotos (filtrai *F475W*+*F814W*), ir baltai/juodos (negatyvinės) nuotraukos (*F475W*, *F814W*). Nuotraukų signalo intensyvumo skalę, bei kontrastų jie keisti negalėjo.

Pirmuoju etapu (2012 metų gruodžio 5-21 d.) savanoriams AP svetainėje buvo pateiktos nuotraukos, kurios sudaro 72% PHAT apžvalgos, o antruoju etapu (2013 metų spalio 22-30 d.) – likusios nuotraukos. 29 262 savanoriai atliko 1,82 milijonų individualių klasifikacijų (vidutiniškai 70 000 klasifikacijų per dieną). Kiekviena nuotrauka buvo peržiūrėta vidutiniškai 88 kartus. Savanoriai suidentifikavo >2 milijonus spiečių ir galaktikų (Johnson ir kt. 2015).

Individualūs visų savanorių identifikuotų objektų katalogai buvo apjungiami ieškant juose sutampančių objektų. Laikyta, kad du savanoriai pažymėjo tą patį objektą, jei tarp jų pažymėtų centrų buvo mažesnis nei 20 pikselių (1‘‘ arba 3,81 pc) atstumas. Objektai, kuriuos pažymėjo tik vienas savanoris iškart atmesti. Galutiniame „*AP savanorių*“ kataloge[9] liko ≈54 000 objektų (spiečių ir galaktikų). Kiekvienoje atsitiktinai pateiktoje HST nuotraukoje rastus objektus savanoriai skirstė į dvi kategorijas: „spiečius“ arba „galaktika“. Todėl kiekvienam „*AP Savanorių*“ katalogo objektui buvo galima suskaičiuoti:

[8] https://www.andromedaproject.org/

[9] Toliau šis katalogas tekste bus vadinamas „*AP Savanorių*“ katalogu.

- kiek savanorių pažiūrėjo konkrečią nuotrauką[10] – $\boldsymbol{N}$,
- kiek savanorių tos nuotraukos konkrečioje vietoje atrado objektą ir jį pažymėjo kaip spiečių – $\boldsymbol{N_{cl}}$,
- kiek savanorių tos nuotraukos konkrečioje vietoje atrado objektą ir jį pažymėjo kaip galaktiką – $\boldsymbol{N_g}$,
- kiek savanorių tos nuotraukos konkrečioje vietoje atrado kokį nors objektą (galaktiką arba spiečių), t. y. $\boldsymbol{N_{found}} = \boldsymbol{N_{cl}} + \boldsymbol{N_g}$.

Buvo suskaičiuoti ir šių dydžių santykiai:

- $\boldsymbol{f_{clg}} = \boldsymbol{N_{found}}/\boldsymbol{N}$ – savanorių dalis, kurie konkrečioje vietoje atrado objektą, t.y. jį pažymėjo (ir pavadino jį spiečiumi arba galaktika),
- $\boldsymbol{f_{cl}} = \boldsymbol{N_{cl}}/\boldsymbol{N}$ – savanorių dalis, kurie konkrečioje vietoje atrado objektą ir jį pažymėjo kaip spiečių,
- $\boldsymbol{f_g} = \boldsymbol{N_g}/\boldsymbol{N_{found}}$ – savanorių dalis, kurie atrastąjį objektą pažymėjo kaip galaktiką.

Šie santykiniai dydžiai tarpusavyje siejasi išraiška: $\boldsymbol{f_{cl}} = \boldsymbol{f_{clg}} \times (1 - \boldsymbol{f_g})$ (Johnson ir kt. 2015).

Suskaičiuota $\boldsymbol{f_{clg}}$ = 0,1 vertė reiškia, kad konkretų „*AP Savanorių*“ katalogo objektą surado tik 10% tą konkrečią nuotrauką žiūrėjusių savanorių. Todėl Johnson ir kt. (2015) iš analizės iškart išmetė visus objektus, kurių $\boldsymbol{f_{clg}} \leq 0{,}1$. Detaliau nagrinėjamame „*AP savanorių*“ kataloge liko 13 801 objektai, kurių $\boldsymbol{f_{clg}} > 0{,}1$.

Šio katalogo objektų $\boldsymbol{f_{cl}}$, $\boldsymbol{f_g}$ parametrų histogramos parodytos 1.3a,b pav. Du pikai $\boldsymbol{f_g}$ parametro histogramoje rodo, kad savanorių nuomonės dėl jau rasto ir pažymėto objekto priskyrimo spiečių (žr. 1.3a pav. parodytos $\boldsymbol{f_g}$ histogramos kairioji dalis) arba galaktikų grupei ($\boldsymbol{f_g}$ histogramos dešinioji dalis) dažniausiai sutapdavo. Tačiau žiūrint į gana plokščią $\boldsymbol{f_{cl}}$ parametro histogramą nėra aišku, kokia šio parametro vertė turėtų būti ribinė, kad iš viso „*AP Savanorių*“ katalogo būtų galima atsirinkti spiečius. Todėl „*AP Savanorių*“ katalogą Johnson ir kt. (2015) palygino su anksčiau profesionalių astronomų sudarytais „*Year 1*“ katalogais (Johnson ir kt. 2012). Šiuos katalogus sutapatinus gaunamos 1.3c,d pav. parodytos $\boldsymbol{f_{cl}}$, $\boldsymbol{f_g}$ parametrų histogramos. Ten „*AP Savanorių*“ katalogo objektai sutampantys su „*Year 1 Spiečių*“ katalogu parodyti raudona histograma, o sutampantys su „*Year 1 Ne Spiečių*“ katalogu – juoda linija. Žiūrint 1.3c pav. parodytas histogramas

[10] Konkreti nuotrauka – t.y. nuotrauka kurioje yra nagrinėjamas „*AP savanorių*“ katalogo objektas.

pastebėta, kad vos kelių spiečių f_g yra didesnis nei 0,3. Todėl Johnson ir kt. (2015) šią f_g parametro vertę pasirinko kaip ribinę tolimesnei spiečių atrankai.

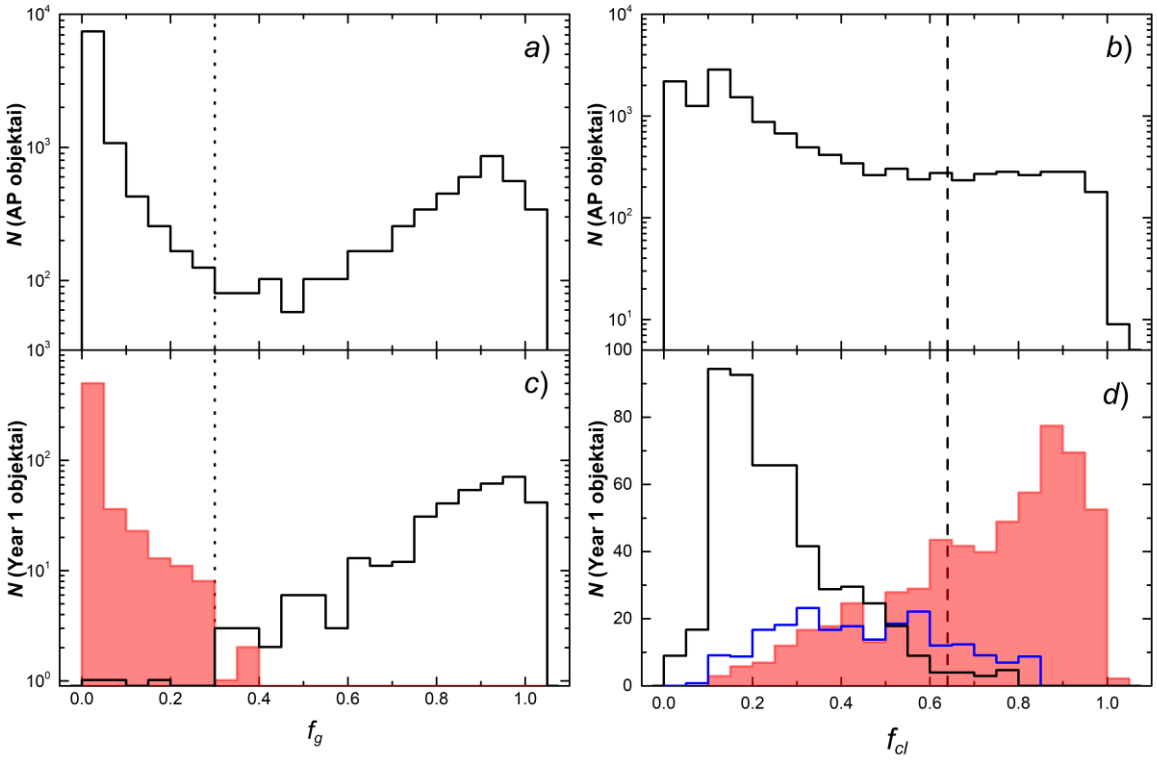
1.3d pav. parodytos visos histogramos persikloja, tad ribinė f_{cl} parametro vertė neaiški. Siekiant nusistatyti optimalią šio parametro ribinę vertę buvo suskaičiuojamas *„Year 1 Spiečių“* katalogo pilnumas ir užterštumas pasirenkant įvairias f_{cl} parametro ribines vertes:

$$\textbf{pilnumas} = N_{cl}/N_{match} \cdot 100\% ,$$

$$\textbf{užterštumas} = N_{new_cl}/N_{match} \cdot 100\%.$$

Čia N_{match} – visas tarp *„Year 1 Spiečių“* ir *„AP Savanorių“* katalogų sutampančių objektų skaičius (visa 1.3d pav. raudona histograma); N_{cl} – tik tų sutampančių objektų skaičius, kurių f_{cl} didesnis nei pasirinkta parametro ribinė reikšmė (nuo 1.3d pav. parodytos punktyrinės linijos į dešinę); N_{new_cl} – tiriamajame lauke savanorių surastų papildomų objektų turinčių f_{cl} vertę didesnę nei ribinė vertė skaičius (jų tiriamame lauke profesionalūs astronomai nerado, arba nepriskyrė *„Year 1 Spiečių“* katalogui). Katalogo pilnumas parodo, kiek procentų *„Year 1 Spiečių“* objektų liktų kataloge, jei būtų griežtai atsižvelgta į savanorių nuomonę (panaudojus kokią nors f_{cl} ribą). O užterštumas parodo, kiek procentų *„Year 1 Spiečių“* katalogas užsiterštų galbūt blogais objektais, jei jis būtų papildytas savanorių naujai atrinktais objektais. Idealiu atveju, jei visi savanoriai identifikuotų objektus taip pat gerai kaip ir profesionalūs astronomai, *„Year 1 Spiečių“* katalogo pilnumas būtų 100%, o užterštumas 0% (tokiu atveju 1.3d pav. parodytos histogramos nepersiklotų). Mažinant f_{cl} parametrą, t. y. slenkant punktyrinę liniją 1.3 pav. į dešinę, auga *„Year 1 Spiečių“* katalogo pilnumas, tuo pačių auga ir jo užterštumas. Atlikę pilnumo ir užterštumo priklausomybės nuo f_{cl} vertės analizę, Johnson ir kt. (2015) nustatė, kad optimaliausia ribinė f_{cl} vertė yra 0,64 (pilnumas beveik 90%, o užterštumas < 10%).

Analogiškai buvo atlikta ir *„Year 1 Ne spiečių“* katalogo pilnumo priklausomybės nuo pasirinktos ribinės f_{clg} vertės analizė. Johnson ir kt. (2015) nustatyta optimali f_{clg} vertė – 0,37 (pilnumas ≈67%). *„AP Savanorių“* katalogo objektai, kurie nepateko nei į spiečių, nei į galaktikų katalogą, ir kurių $f_{clg} \geq 0{,}1$ buvo priskirti papildomų objektų katalogui.



1.3 pav. Parametrų f_g (*a*, *c*) ir f_{cl} (*b*, *d*) histogramos. Viršuje – *„AP Savanorių“* katalogo objektai, kurių $f_{clg} \geq 0{,}1$ (13 801 obj.) Apačioje *„Year 1“* katalogai (Johnson ir kt. 2012). turintys atitikmenis *„AP savanorių“* kataloge: *„Year 1 Spiečiai“* – raudona histograma, *„Year 1 Galbūt spiečiai“* – mėlyna linija, *„Year 1 Ne spiečiai“* – juoda linija. Vertikaliomis linijomis parodytos spiečių atrinkimui pritaikytos parametrų ribos (taškinė – $f_g = 0{,}3$; punktyrinė – $f_{cl} = 0{,}64$). Duomenys paimti iš Johnson ir kt. (2015).

Johnson ir kt. (2015) publikavo tris katalogus:

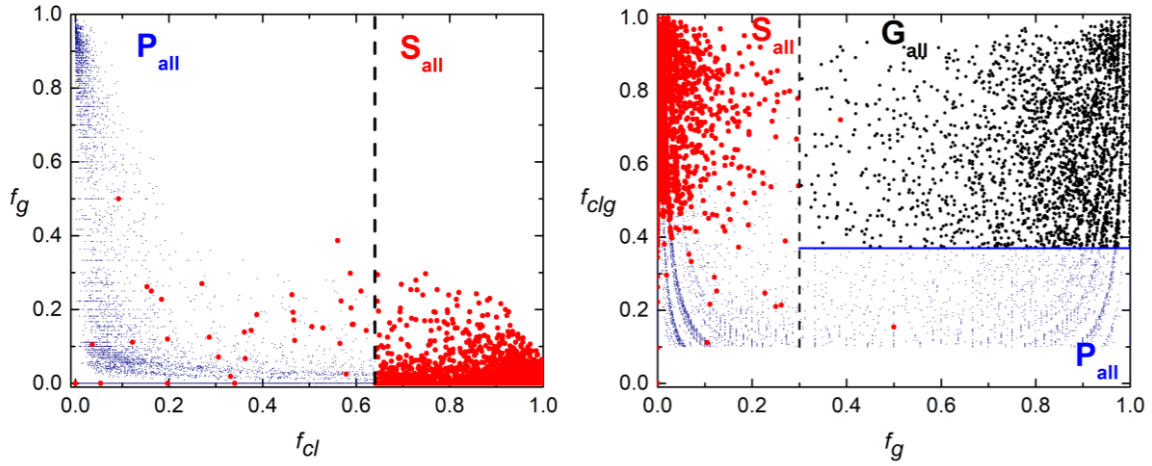
- *„Spiečių“* (**S**$_{\mathbf{all}}$) katalogas, kuriame objektai su parametrais: $f_{cl} > 0{,}64$; $f_g < 0{,}3$,
- *„Galaktikų“* (**G**$_{\mathbf{all}}$) katalogas, kuriame objektai su parametrais: $f_g \geq 0{,}3$; $f_{clg} > 0{,}37$,
- *„Papildomų objektų“* (**P**$_{\mathbf{all}}$**)** katalogas, kuriame visi objektai nepatekę į **S**$_{\mathbf{all}}$, **G**$_{\mathbf{all}}$ katalogus ir su parametru $f_{clg} \geq 0{,}1$.

„AP Savanorių“ katalogo objektai, kurių $f_{clg} < 0{,}1$ nebuvo publikuoti. Publikuotų į atskirus katalogus patekusių objektų skaičius pateikiamas 1.3 lentelėje. Žiūrėdami į publikuotų Johnson ir kt. (2015) spiečių f_{cl}, f_g, f_{clg} parametrų pasiskirstymą 1.4 pav. pastebime, kad keli spiečiai išeina už pasirinktųjų ribinių f parametrų ribų (parodytų linijomis). Tai dalis iš 39-ių spiečių, kuriuos autoriai įtraukė į spiečių **S**$_{\mathbf{all}}$ katalogą, nes tai ankstesnėse žvaigždžių spiečių apžvalgose aptikti masyvūs spiečiai. Šie spiečiai yra centriniame Andromedos galaktikos regione ($R < 3$ kpc), todėl dėl ten esančio didelio žvaigždžių tankio AP savanoriams buvo sunku juos identifikuoti (jų $f_{cl} < 0{,}64$).

1.3 lentelė. Objektų skaičius Johnson ir kt. (2015) publikuotuose $\mathbf{S_{all}}$, $\mathbf{G_{all}}$, $\mathbf{P_{all}}$ kataloguose ir mūsų sudarytame *„Atrinktų spiečių“* (**A**) kataloge

	Spiečių kat.		**Galaktikų kat.**		**Papildomas kat.**		**Atrinktų objektų kat.**
Objektų atrinkimo kriterijai	$f_{cl} > 0{,}64$, $f_g < 0{,}3$		$f_g \geq 0{,}3$, $f_{clg} > 0{,}37$		$f_{clg} \geq 0{,}1$ ir kurių nėra S_{all} arba G_{all} kat.		atrinkti iš P katalogo
PHAT apžvalgos blokai	**B01-B23 (S_{all})**	**B11-B23 (S)**	**B01-B23 (G_{all})**	**B11-B23 (G)**	**B01-B23 (P_{all})**	**B11-B23 (P)**	**B11-B23 (A)**
Objektų skaičius	**2753**	**1628**	**2270**	**1782**	**8775**	**5332**	**876**
F275W	1720 (62%)	942 (58%)			4121 (47%)	2299 (43%)	572 (65%)
F336W	2449 (89%)	1419 (87%)			5814 (66%)	3340 (63%)	753 (86%)
F475W	2686 (98%)	1599 (98%)			6813 (78%)	3914 (73%)	825 (94%)
F814W	1859 (68%)	1131 (69%)	1661 (73%)	1329 (75%)	5115 (58%)	3031 (57%)	450 (51%)
F110W	1181 (43%)	717 (44%)			3805 (43%)	2319 (43%)	306 (35%)
F160W	1030 (37%)	608 (37%)			3546 (40%)	2190 (41%)	271 (31%)
F475W ir *F814W*	1831 (67%)	1122 (69%)			4409 (50%)	2528 (47%)	433 (49%)
F336W, *F475W* ir *F814W*	1646 (60%)	988 (61%)			3295 (38%)	1868 (35%)	392 (45%)
F275W, *F336W*, *F475W*, *F814W*, *F110W*, ir *F160W*	562 (20%)	308 (19%)			1051 (12%)	594 (11%)	145 (17%)

Pastaba. Pilkai nuspalvintuose stulpeliuose esantys skaičiai parodo, kiek iš jų patenka į šiame darbe nagrinėjamus B11-B23 blokus (**S**, **G**, **P** katalogai). Blokų išsidėstymas parodytas 1.1 pav. Taip pat pateikiama kiek objektų turi fotometrinius duomenis konkrečiame filtre/filtruose, kai $\sigma_\lambda \leq 0{,}4$ mag (skliaustuose nurodyta procentinė dalis nuo visame kataloge esančių objektų skaičiaus).



1.4 pav. Johnson ir kt. (2015) publikuotuose kataloguose esančių objektų f_{cl}, f_g, f_{clg} parametrų pasiskirstymas. *„Spiečių“* $\mathbf{S_{all}}$ katalogo objektai pažymėti raudonai (N = 2753), *„Galaktikų“* $\mathbf{G_{all}}$ katalogo – juodai (N = 2270), *„Papildomų objektų“* $\mathbf{P_{all}}$ katalogo – mėlynai (N = 8775). Iš *„AP Savanorių“* katalogo atsirenkant spiečius pritaikytos f parametrų ribinės vertės ($f_{cl} > 0{,}64$; $f_g < 0{,}3$) parodytos juodomis punktyrinėmis linijomis, o iš likusio katalogo atsirenkant galaktikas pritaikyta f_{clg} parametro ribinė vertė parodyta mėlyna ištisine linija ($f_{clg} > 0{,}37$).

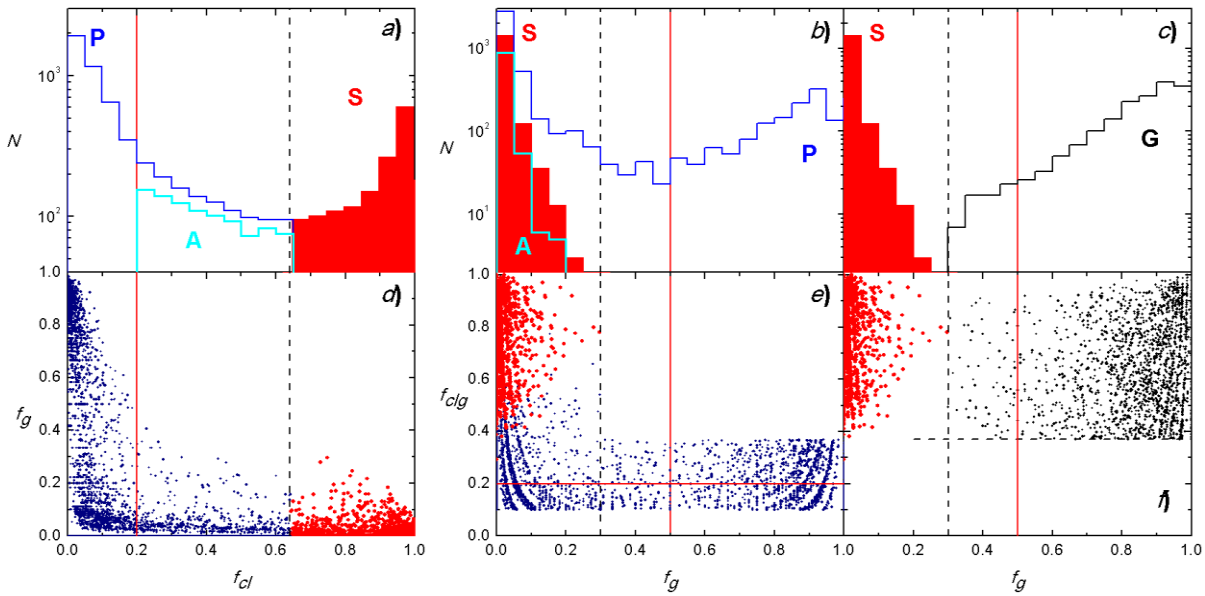
1.3. Papildomų kandidatų į spiečius atranka

Iš MAST archyvo atsisiuntėme PHAT apžvalgos B11-B23 blokų (1.1 pav.) mozaikines nuotraukas, o iš Johnson ir kt. (2015) straipsnio – jų sudarytuosius *„Spiečių“* ($\mathbf{S_{all}}$), *„Galaktikų“* ($\mathbf{G_{all}}$) ir *„Papildomų objektų“* ($\mathbf{P_{all}}$) fotometrinius katalogus. Iš šių katalogų išrinkome objektus, kurie patenka į B11-B23 blokų zoną. Naujai sudarytieji katalogai toliau bus vadinami *„Spiečių“* (**S**), *„Galaktikų“* (**G**) ir *„Papildomų objektų“* (**P**) katalogais. Suskaičiavę juose esančius objektus (1.3 lentelė) pastebėjome, kad į mūsų nagrinėjimui pasirinktą Andromedos zoną (1.1 pav.) patenka maždaug po tiek pat objektų ir iš *„Spiečių“* (**S, 1628**), ir iš *„Galaktikų“* (**G, 1782**) katalogų. Tačiau *„Spiečių“* (**S**) kataloge yra ≈3 kartus mažiau objektų, nei *„Papildomų objektų“* (**P, 5332**) kataloge. Toliau bus aprašoma metodika kaip iš **P** ir **G** katalogų buvo atrenkami spiečių kandidatai, kurie galėtų papildyti Johnson ir kt. (2015) publikuotąjį žvaigždžių spiečių ($\mathbf{S_{all}}$) katalogą.

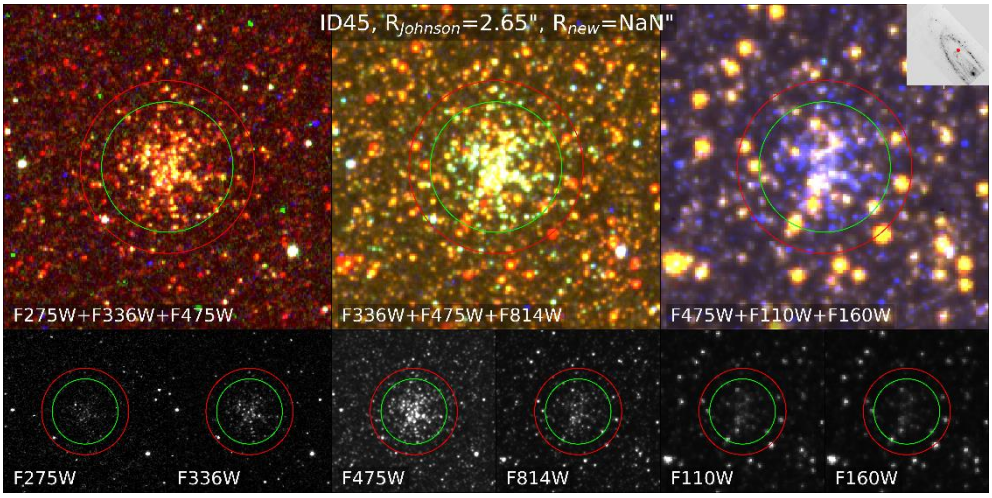
Pirmiausia pasinaudojome Johnson ir kt. (2015) įvestais f parametrais (žr. 1.2 poskyrį). Į B11-B23 blokų zoną patenkančių (**S**, **G**, **P** katalogų) objektų parametrų f_{cl}, f_g, f_{clg} histogramos parodytos 1.5 pav. Plečiant Johnson ir kt. (2015) nustatytas f parametrų ribines vertes (jos 1.5 pav. parodytos juodomis punktyrinėmis linijomis) tiek **G,** tiek **P** kataloge įmanoma dar rasti spiečių. Iki kurių f parametrų ribinių verčių verta vykdyti

vizualinę spiečių paiešką nusprendėme peržiūrėję atsitiktinai pasirinktas ***G*** ir ***P*** katalogo objektų su skirtingais ***f*** parametrais nuotraukas.

Johnson ir kt. (2015) „*Spiečių*“ (**S**$_{\mathbf{all}}$) katalogas sudarytas remiantis AP savanorių, kurie peržiūrinėjo tik *F475W* ir *F814W* nuotraukas, nuomone. Mes nutarėme analizuoti objektus visų šešių PHAT apžvalgos filtrų nuotraukose, kad galėtume palyginti jų išvaizdą visuose bangų ilgiuose. Tuo tikslu, visiems **S**, **G**, **P** katalogų objektams sudarėme 1.6 pav. parodytus paveiksliukus, 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 ≈9‘‘,3 x 9‘‘,3 dydžio nuotraukose pažymėjome apvalias Johnson ir kt. (2015) naudotas ***R***$_{\boldsymbol{Johnson}}$ ir ***R*** apertūras (žr. 1.5 poskyrį). Paveiksliuke taip pat įrašėme objekto ID numerį, o viršutiniame jo kampe raudonu tašku pažymėjome objekto vietą Andromedos galaktikoje.



1.5 pav. „*Spiečių*“ (**S**, raudona spalva, N = 1628), „*Papildomų objektų*“ (**P**, mėlyna spalva, N = 5332) ir „*Galaktikų*“ (**G**, juoda spalva, N = 1782) kataloguose esančių objektų $\boldsymbol{f_{cl}}$, $\boldsymbol{f_g}$, $\boldsymbol{f_{clg}}$ parametrų histogramos (atitinkamai *a*, *b*, *c*) bei tarpusavio sąryšiai (*d-f*). Juodos punktyrinės linijos parodo Johnson ir kt. (2015) taikytas parametrų $\boldsymbol{f_{cl}}$, $\boldsymbol{f_g}$, $\boldsymbol{f_{clg}}$ ribines vertes, o raudonos linijos parodo kiek praplėtėme spiečiams tinkamų ***f*** parametrų erdvę siekdami rasti į Johnson ir kt. (2015) „*Spiečių*“ (**S**$_{\mathbf{all}}$) katalogą neįtrauktus spiečius. Sudaryto „*Atrinktų spiečių*“ (**A**) katalogo parametrų $\boldsymbol{f_{cl}}$ ir $\boldsymbol{f_g}$ histogramos parodytos *a* ir *b* dalyse žydra linija.



1.6 pav. Spiečiaus ID45 nuotraukos: viršutinėje eilėje spalvotos, apatinėje – individualiuose filtruose. Filtrų ir jų kombinacijų pavadinimai nurodyti kiekvienos ≈9‘‘,3 x 9‘‘,3 dydžio nuotraukos apačioje. Individualių filtrų mozaikos paimtos iš MAST[11] archyvo, kur jos yra laisvai prieinamos. Apskritimais parodytos Johnson ir kt. (2015) naudotos apertūros: visiems objektams identiška ***R*** = 2‘‘ dydžio apertūra (žalia spalva) ir kiekvienam objektui taikyta individuali $R_{Johnson}$ apertūra (raudona spalva). Viršutiniame kampe –raudonu tašku pažymėta objekto padėtis Andromedos galaktikoje.

Žiūrint skirtingus f_{cl}, f_g, f_{clg} parametrų rinkinius (1.5d,e,f pav.) turinčių objektų nuotraukas (1.6 pav.) buvo ieškoma kaip objekto išvaizda įtakoja f parametrų vertes. Kadangi iš Johnson ir kt. (2015) jau turime apibrėžtą f_{cl} parametro ribinę vertę (0,64), tai peržiūra pradėta nuo objektų, kurių $f_{cl} < 0{,}64$ ir nagrinėti vis mažesnę šio parametro vertę turintys **P** katalogo objektai. Pastebėjome, kad pasiekus $f_{cl} = 0{,}2$ vertę, visi atsitiktinai pasirenkami objektai yra arba ryškios žvaigždės (1.7a pav.), arba ūkai, arba neaiškūs blankūs objektai neturintys duomenų daugiau nei vienam filtre. Daliai tokių objektų buvo blogai parinkta $R_{Johnson}$ apertūrą, tad jų fotometrija nėra gera. Vadinasi jei net 80% *„AP savanorių“* objekto nepavadino spiečiumi ($f_{cl} < 0{,}2$), tai jis tikrai negali būti priskirtas spiečių grupei.

Siekiant rasti spiečių kandidatus **G** (**1782 obj.**) kataloge buvo peržiūrėtos visų jame esančių objektų nuotraukos. Pastebėjome, kad pasiekus $f_g = 0{,}5$ vertę neberandamas joks nors kiek į spiečių panašus objektas. Todėl buvo apsispręsta iš **G** katalogo atidžiau peržiūrėti tik objektus, kurių $f_g < 0{,}5$. Objektų pavyzdžiai su $f_g < 0{,}5$ ir $f_g > 0{,}5$ vertėmis pateikiami 1.7b,c pav. Parametro f_{clg} ribinė vertė praplėsta iki 0,2, kas reiškia, kad paimsime iš **P** katalogo tik objektus, kuriuos nuotraukose rado bent 20% jas žiūrėjusių AP savanorių. Taigi toliau buvo nutarta atidžiai peržiūrėti:

[11] https://archive.stsci.edu/prepds/phat/datalist.html

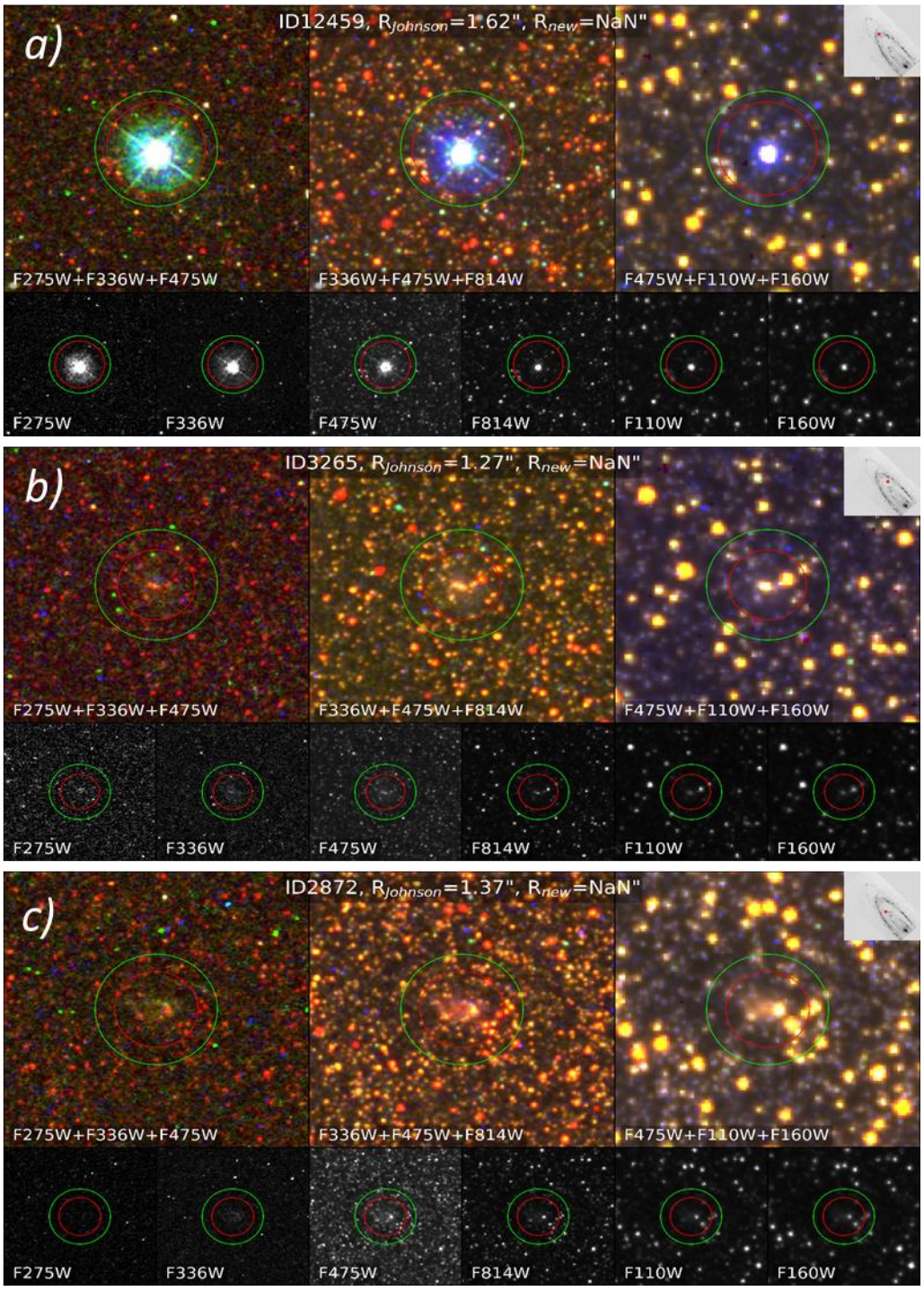
- visus **P** katalogo objektus, kurių $f_{cl} > 0{,}2$, $f_{clg} > 0{,}2$ (1224 obj.),
- visus **G** katalogo objektus, kurių $f_g \leq 0{,}5$ (67 obj.).

Mūsų parinktos f parametrų ribinės vertės palygintos su Johnson ir kt. (2015) naudotomis vertėmis 1.5 pav., kur raudonomis linijomis pažymėjome kiek praplėtėme spiečiams tinkamų f parametrų erdvę siekdami rasti į Johnson ir kt. (2015) „*Spiečių*“ ($\mathbf{S_{all}}$) katalogą neįtrauktus ir B11-B23 blokų zonoje esančius žvaigždžių spiečius.

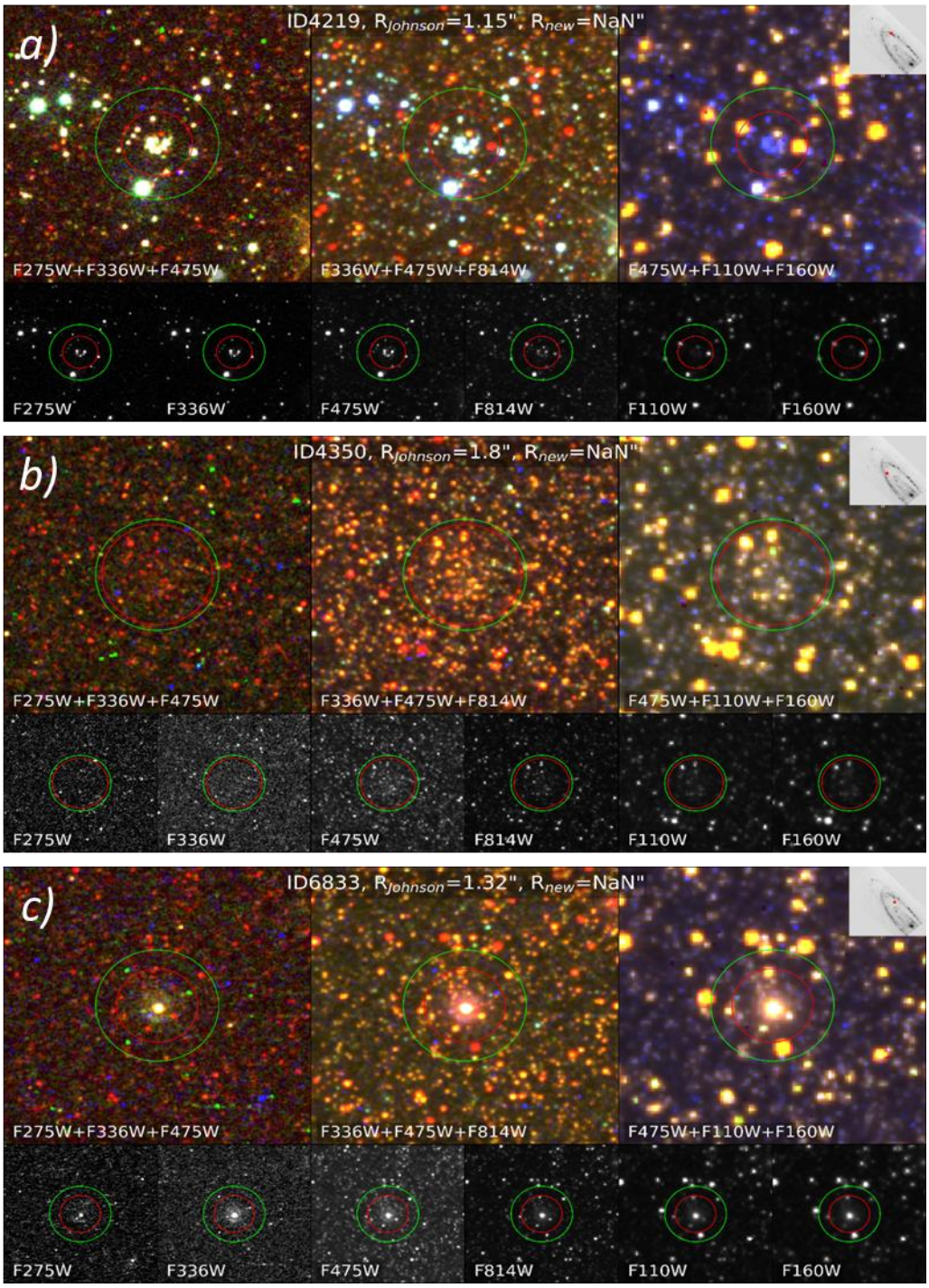
Atidžiai peržiūrėtos visų į naujas parametrų f ribas patenkančių objektų nuotraukos (1291). Remiantis objektų morfologija jie buvo suskirstyti į tris katalogus.

- „*Atrinktų spiečių*“ (**A**) katalogui priskirtas 876 objektai. Jų morfologija gana aiški (objekto pavyzdys pateikiamas 1.8a pav.), tad juos reiktų prijungti prie Johnson ir kt. (2015) „*Spiečių*“ (**S**) katalogo norint detaliai analizuoti pasirinktos Andromedos dalies (B11-B23) žvaigždžių spiečių dalies populiaciją. Visi šio katalogo objektai rasti **P** kataloge.
- „*Turbūt ne spiečių*“ katalogui priskirti 320 objektai. Pagal jų išvaizdą nebuvo įmanoma apsispręsti ar tai spiečius. Daugiau nei pusė jų (55%) – blankūs (*F475W* filtro ryškis >22 mag). Į šią grupę taip pat pateko objektai, kuriuose aiškiai dominuoja kelios žvaigždės, ir nesimato į centrą koncentruotos jokios silpnesnių žvaigždžių sankaupos (1.8b pav.). Į šią grupę priskirti 304 objektai iš „*Papildomų objektų*“ (**P**), 16 objektų – iš „*Galaktikų*“ (**G**) katalogo.
- „*Ne spiečių*“ katalogui priskirti 95 objektai. Tai pavienės žvaigždės, ūkai ir galaktikos (1.8c pav.). Dauguma jų (70%) – blankūs (*F475W* filtro ryškis >22 mag). Į šią grupę priskirti 44 objektai iš „*Papildomų objektų*“ (**P**) katalogo, 51 objektas – iš „*Galaktikų*“ (**G**) katalogo.

Norint papildyti Johnson ir kt. (2015) publikuotą „*Spiečių*“ (**S**) katalogą, pasirinkę skirtingas f parametrų ribines vertes ($f_{cl} > 0{,}2$, $f_{clg} > 0{,}2$, $f_g \leq 0{,}5$), buvo vizualiai peržiūrėta 1291 PHAT apžvalgos objekto nuotraukos (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*). Remdamiesi aprašytu metodu sudarėme „*Atrinktų spiečių*“ (**A**) katalogą su 876 objektais. Į tą pačią, mūsų darbe tiriamą (1.1a pav.), Andromedos galaktikos zoną patenka 1628 Johnson ir kt. (2015) publikuoto „*Spiečių*“ (**S**) katalogo objektai.



1.7 pav. Tas pats kas 1.6 pav., tik objektui *a)* ID12459 (f_{clg} = 0,13, f_{cl} = 0,05, f_g = 0, *F475W* = 18,14, σ_{F475W} = 0,01). Šis objektas atmetamas, nes jo f_{cl} < 0,2. Tai pavienė *F336W*, *F475W* ir *F814W* filtruose perlaikyta žvaigždė; *b)* ID3265 (f_{clg} = 0,64, f_g = 0,49, *F814W* = 20,03, σ_{F475W} = 0,27). Nors šio objekto f_g < 0,5, tačiau negalime aiškiai išskirti fone esančios galaktikos; *c)* ID2872 (f_{clg} = 0,68, f_g = 0,51, *F814W* = 19,85, σ_{F475W} = nėra duomenų). Šis objektas yra atmetamas, kadangi jo f_g > 0,5. Fone aiškiai matoma galaktika.



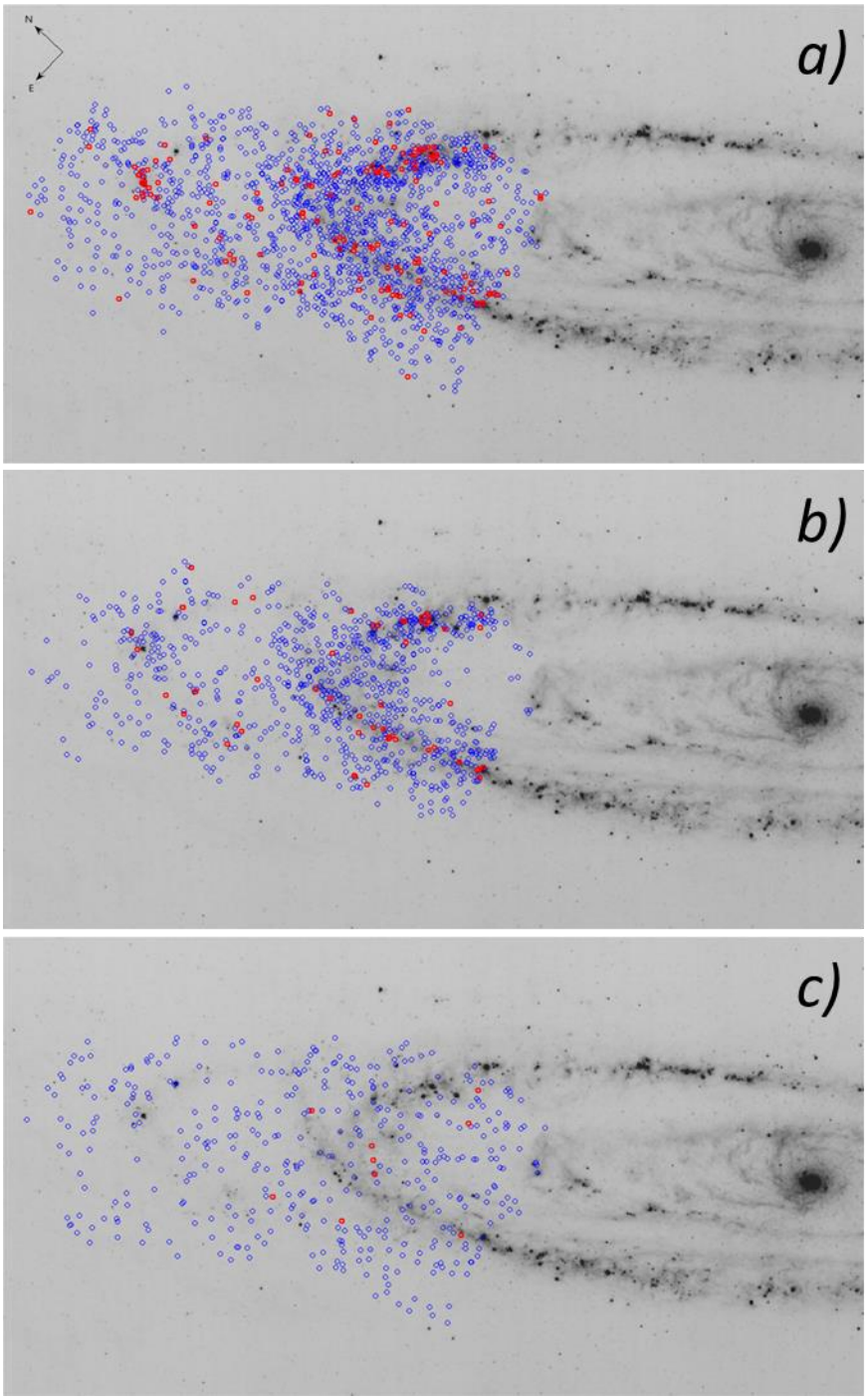
1.8 pav. Tas pats kas 1.6 pav., tik objektui *a)* ID4219 (f_{clg} = 0,54, f_{cl} = 0,63, f_g = 0, *F475W* = 20,8, σ_{F475W} = 0,05). Objektas priskirtas „*Atrinktų spiečių*“ (**A**) katalogui; *b)* ID4350 (f_{clg} = 0,48, f_{cl} = 0,54, f_g = 0,07, *F475W* = 21,31, σ_{F475W} = 0,18). Objektas priskirtas kategorijai „*Turbūt ne spiečius*“, nes jame nesimato į centrą koncentruotos jokios silpnesnių žvaigždžių sankaupos; *c)* ID6833 (f_{clg} = 0,31, f_{cl} = 0,39, f_g = 0, *F475W* = 21,17, σ_{F475W} = 0,15). Objektas priskirtas kategorijai „*Ne spiečius*“. Tai ryški pavienė žvaigždė arba foninės galaktikos centras.

1.4. Katalogų palyginimas

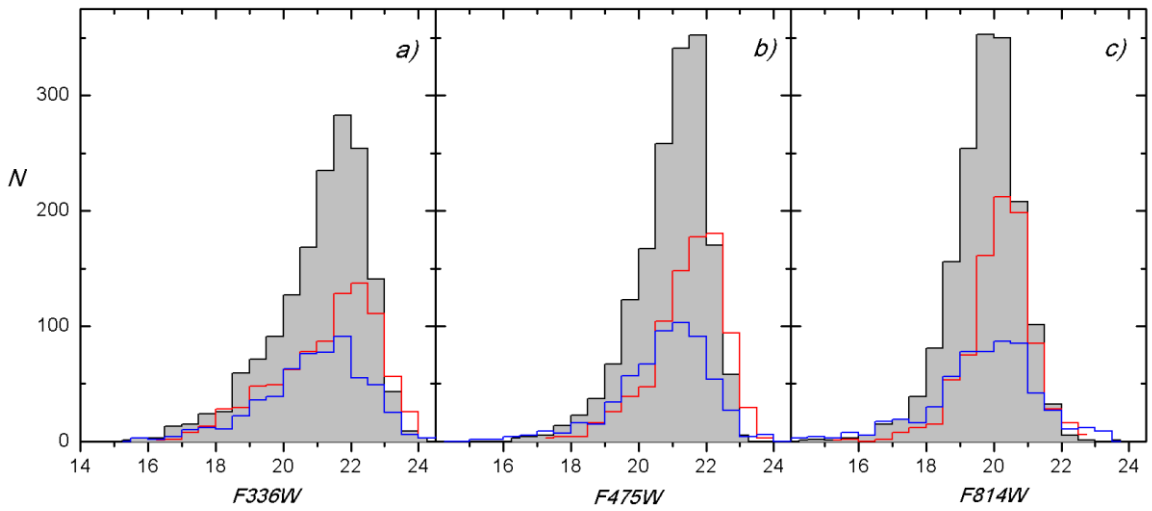
Sudarius „*Atrinktų spiečių*“ (**A**) katalogą, jį palyginame su Johnson ir kt. (2015) publikuotu „*Spiečių*“ (**S**) katalogu. Lyginant šių katalogų objektų pasiskirstymą Andromedos galaktikos diske (1.9 pav.) iškart išsiskiria, kad **S** katalogo objektų tankis visur – tiek ant vijų, tiek tarpuose tarp vijų, yra didesnis nei **A** katalogo objektų. Tai natūralu, nes **S** kataloge yra 53% daugiau objektų nei **A** kataloge. **S** katalogo objektų pasiskirstyme akivaizdžiai išsiskiria didesnio spiečių tankio zonos, kurios sutampa su GALEX NUV srityje gerai matomu Andromedos galaktikos žvaigždėdaros žiedu (1.9a pav.). **A** katalogo objektų tankio išaugimas ties žvaigždėdaros zonomis taip pat matomas, nors ir ne taip akivaizdžiai. Pastebėjome, kad ryškiausi **A** katalogo objektai, kurių *F475W* < 19,5 išsidėsto beveik išskirtinai ant žvaigždėdaros zonų (1.9b pav.). Tai, kad mes papildomų spiečių radome daugiau ten, kur jų daugiau ir turėtų būti reiškia, jog mūsų atlikta vizualinė objektų atranka nebuvo selektyvi. T.y. mes vienodai gerai atskyrėme spiečius nuo foninių objektų tiek vijose tiek tarpuose tarp vijų. Po aprašytos objektų atrankos, į **A** katalogą neįtrauktų 415 objektų[12] pasiskirstymas tirtoje zonoje gana tolygus, o visi 9 objektai, kurių ryškis *F475W* < 19,5 (1.9c pav. pavyzdyje parodyti raudonais apskritimais) yra ryškios, kai kuriuose filtruose perlaikytos žvaigždės.

„*Atrinktų spiečių*“ (**A**), „*Spiečių*“ (**S**) ir „*Year 1 Spiečių*“ (Johnson ir kt. 2012) katalogų objektų *F336W*, *F475W* ir *F814W* ryškių histogramos palygintos 1.10 pav. Pastebėjome, kad profesionalių astronomų sudaryto „*Year 1 Spiečių*“ katalogo histogramų maksimumas yra maždaug ties tuo pačiu ryškiu kaip ir **S** katalogo: *F336W*, *F475W* ties ≈21,5 mag, *F814W* ryškyje ties ≈19,5 mag. Mūsų sudaryto **A** katalogo histogramų maksimumai pasislinkę į dešinę, *F336W*, *F475W* ryškiuose maksimumas yra ties ≈22,5 mag, *F814W* ryškyje ties ≈20 mag. Taigi mūsų kataloge silpnų spiečių procentas yra didesnis nei **S** kataloge. Pavyzdžiui, mūsų **A** kataloge 72% spiečių *F475W* filtre ryškiai yra >21 mag, o **S** kataloge tokių objektų yra 56%. Blausesnius objektus AP savanoriams buvo sunkiau aptikti, o aptikus – priskirti spiečių grupei. Todėl „*AP Savanorių*“ kataloge jų f_{cl} < 0,64, o f_g > 0,3, ko pasėkoje jie nepateko į **S** katalogą ir liko **P** kataloge, iš kurio mes ir atrinkome **A** katalogo spiečius.

[12] Iš „*Turbūt ne spiečiai*“ – 320 objektai, iš „*Ne spiečiai*“ katalogo – 95 objektai.



1.9 pav. Andromedos galaktikos šiaurinės dalies GALEX NUV mozaika, kur mėlynais apskritimais parodyti *a)* Johnson ir kt. (2015) publikuoto *„Spiečių“* (**S**) katalogo 1628 obj.; *b) „Atrinktų spiečių“* (**A**) katalogo 876 obj.; *c) „Turbūt ne spiečius“* ir *„Ne spiečius“* katalogų objektai (viso 415). Raudoni apskritimai – objektai, kurių *F475W* < 19,5 mag ir $\sigma_\lambda \leq 0{,}4$ mag (*F336W*, *F475W* ir *F814* filtruose). Rodyklėmis parodyta šiaurės (N) ir rytų (E) kryptys.



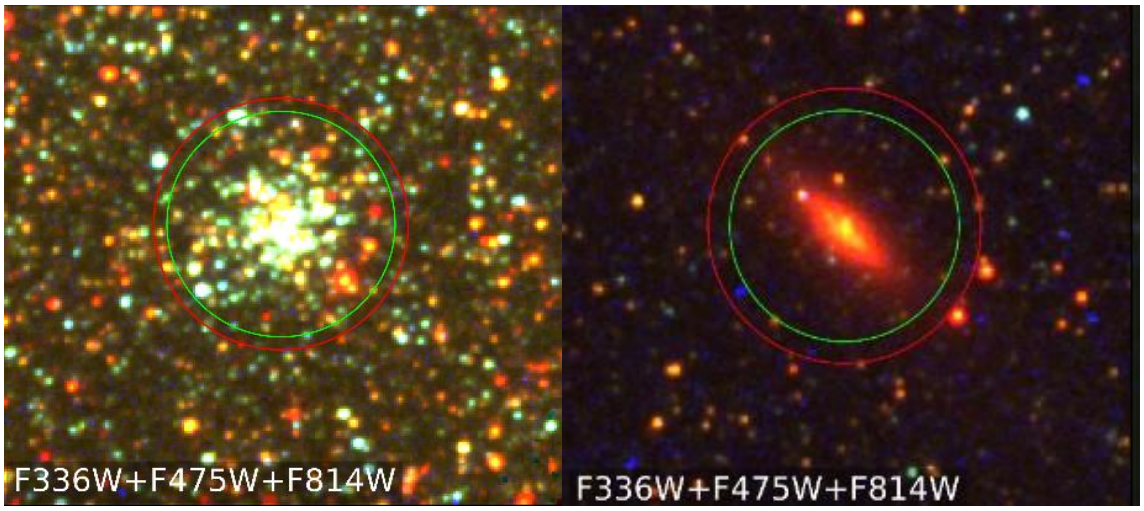
1.10 pav. *F336W*, *F475W* ir *F814W* ryškių histogramos – atitinkamai *a)*, *b)*, *c)*. *„Spiečių“* (**S**) katalogas – pilka histograma (Johnson ir kt. 2015), *„Atrinktų spiečių“* (**A**) katalogas – raudona linija, *„Year 1 Spiečių“* katalogas – mėlyna linija (Johnson ir kt. 2012).

1.5. Apertūrinė objektų fotometrija

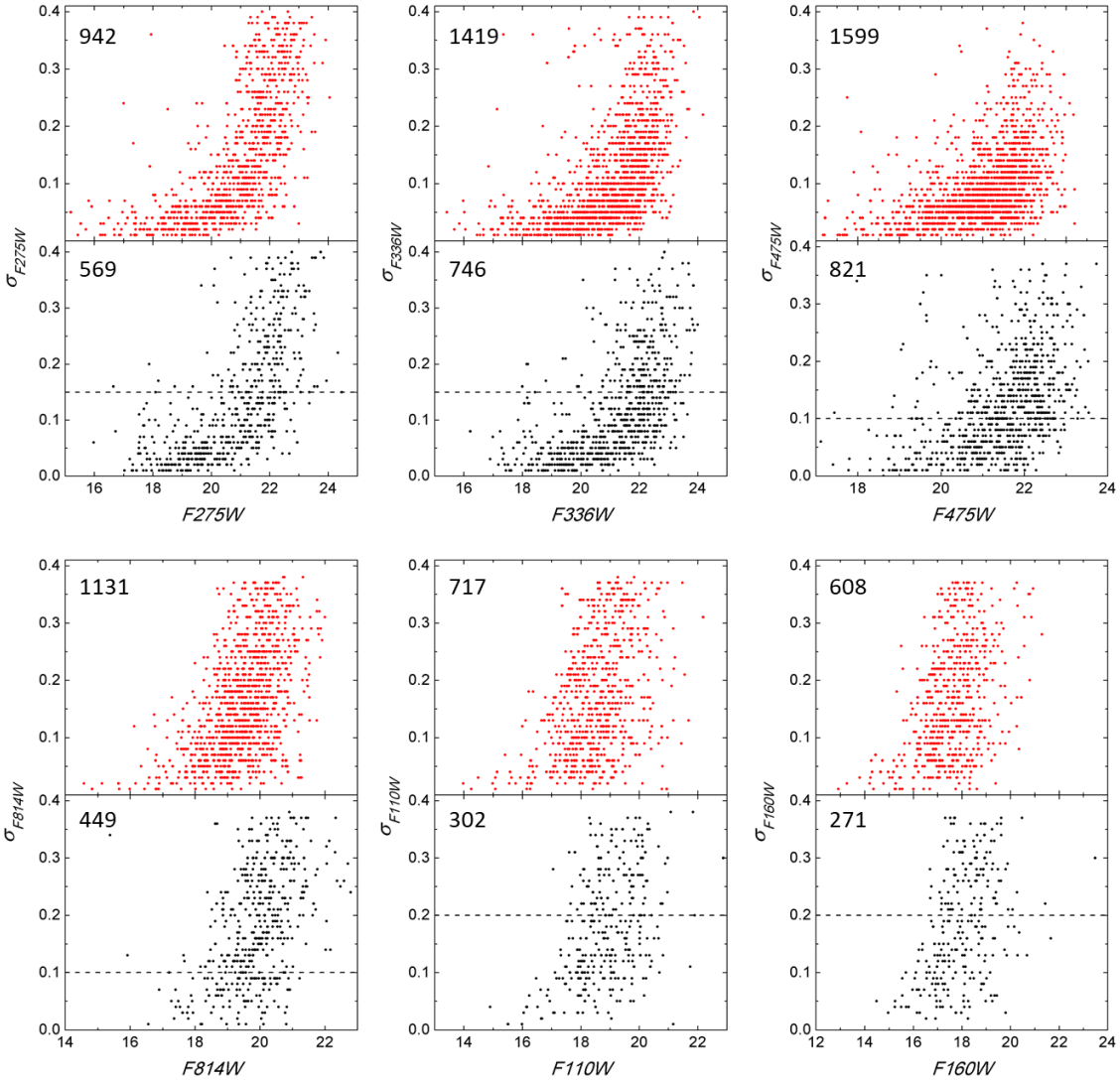
Suskirstę objektus į *„Spiečių“* ($\mathbf{S_{all}}$), *„Galaktikų“* ($\mathbf{G_{all}}$) ir *„Papildomų objektų“* ($\mathbf{P_{all}}$) katalogus Johnson ir kt. 2015 atliko apertūrinę fotometriją. Konkretaus objekto centras – tai AP savanorių pažymėtų objekto centrų koordinačių vidurkis, o naudotos apertūros dydis – tai jų pažymėtų objekto dydį nusakančių apskritimų spindulių mediana (toliau žymima $\boldsymbol{R_{Johnson}}$). Dangaus fonas buvo įvertinamas žiede, kurio vidinis spindulis lygus 1,2 $\boldsymbol{R_{Johnson}}$, o išorinis – 3,4 $\boldsymbol{R_{Johnson}}$. Tokio paties dydžio apertūra bei dangaus fono įvertinimo žiedas taikyti atliekant objekto fotometriją visų šešių filtrų nuotraukose. Palyginimo tikslais visi objektai turi tokią pačią $\boldsymbol{R}$ = 2‘‘ dydžio apertūrą. Taikytų apertūrų pavyzdžiai parodyti 1.11 pav.

Ne visų objektų ryškiai buvo išmatuoti visuose 6-iuose filtruose. Viena ACS kameros ekspozicija danguje padengiamas didesnis plotas nei WFC3 kamera (žr. 1.2 lentelę), 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. Objektų skaičius turinčių fotometrinius matavimus konkrečiame filtre pateikimas 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 *„Spiečių“* ($\mathbf{S_{all}}$) katalogo objektų yra išmatuoti *F336W* ir *F475W*

filtruose (89% ir 98%). *F814W*, *F110W* ir *F160W* filtruose ryškio paklaidos didesnės dėl aukštesnio dangaus fono. Raudonoje spektro srityje dėl į dangaus fono įvertinimo žiedą patenkančių raudonųjų milžinių yra aukštas dangaus fonas. To pasekmė – *F814W*, *F110W* ir *F160W* filtruose priskaičiuojama gerokai mažiau $\mathbf{S_{all}}$ katalogo objektų (atitinkamai 68%, 43%, 37%). *F275W* filtre gerus fotometrinius matavimus turi tik 62% $\mathbf{S_{all}}$ 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. *„Spiečių“* (**S**) ir *„Atrinktų spiečių“* (**A**) katalogų fotometrinių paklaidų grafikai pateikiami 1.12 pav.



1.11 pav. Spiečiaus (kairėje) ir galaktikos (dešinėje) spalvotos ≈9‘‘,3 x 9‘‘,3 dydžio nuotraukos (mėlyna spalva – *F336W*, žalia spalva – *F475W*, raudona spalva – *F814W* filtras). Apskritimais parodytos Johnson ir kt. (2015) naudotos apertūros: visiems objektams identiška ***R*** = 2‘‘ dydžio apertūra (žalia spalva) ir kiekvienam objektui taikyta individuali $\boldsymbol{R_{Johnson}}$ apertūra (raudona spalva).



1.12 pav. „*Spiečių*“ (**S**) (1628 obj.) raudona spalva ir „*Atrinktų spiečių*“ (**A**) (876 obj.) juoda spalva katalogų fotometrinės paklaidos kiekviename iš PHAT apžvalgos filtrų. Kairiajame viršutiniame kampe nurodytas objektų, turinčių paklaidas atitinkamame filtre, skaičius. Punktyrinės linijos žymi viršutinę fotometrinių paklaidų ribą naudojamą atrenkant „*1 grupės*“ spiečius (riba parinkta pagal de Meulenaer ir kt. (2017) straipsnį, plačiau žr. 2.2 poskyrį).

2. Žvaigždžių spiečių parametrai

Šiame skyriuje aprašomi žvaigždžių spiečių parametrų nustatymo metodai, didžiausią dėmesį skiriant stebėjimo duomenų palyginimo su stochastinių spiečių modelių metodui (2.1 poskyris). Pastarąjį metodą panaudojus gauti „*Spiečių*“ (**S**) ir „*Atrinktų spiečių*“ (**A**) katalogų objektų amžiaus, masės ir ekstinkcijos skirstiniai aptariami 2.2 poskyryje. Gautos vertės palyginamos su kitų autorių duomenimis 2.3 poskyryje.

2.1. Žvaigždžių spiečių parametrų nustatymo metodai

Žvaigždžių spiečius – tai vienu metu tame pačiame tarpžvaigždiniame debesyje gimusių gravitacijos jėgomis susietų žvaigždžių grupė. Spiečiaus masė, foninių objektų tankis, atstumas iki jo bei stebėjimams naudojama teleskopo kamera apsprendžia, ar spiečius bus išskiriamas į atskiras žvaigždes, ar ne. Tiksliausias spiečių amžiaus ir metalingumo nustatymo metodas remiasi atskirų spiečiaus žvaigždžių aukštos skiriamosios gebos spektrais. Jis taikomas tada, kai įmanoma identifikuoti atskirus spiečiaus narius ir gauti tinkamos skyros spektrus. Kai spektrų nėra, tačiau yra įmanoma išskirti ir fotometriškai išmatuoti atskiras spiečiaus žvaigždes, spiečiaus parametrų nustatymui naudojamas kitas metodas. Tada spiečiaus narių pasiskirstymą spalvos rodiklio-ryškio diagramoje (CMD – color magnitude diagram) palyginus su izochronomis (vienodo amžiaus ir metalingumo žvaigždžių populiacijos modeliu) gaunamas spiečiaus amžius, metalingumas, masė ir ekstinkcija spiečiaus kryptimi. Tokį parametrų nustatymo metodą PHAT apžvalgos spiečiams panaudojo Johnson ir kt. (2016). Jų pritaikytas algoritmas detaliau aprašomas 2.3 poskyryje.

Į atskiras žvaigždes neišskiriamų spiečių fizikiniai parametrai nustatomi jų integralinius fotometrinius parametrus lyginant su SSP (SSP – Single Stellar Population) modeliais. SSP – vienu metu iš to paties molekulinio debesies gimusių (taigi tos pat cheminės sudėties) žvaigždžių populiacija. Kuriant SSP modelius naudojamos izochronos, kurios pagal pasirinktą pradinių masių funkciją (IMF – Initial Mass Function) užpildomos žvaigždėmis, o suintegravus jų ryškius gaunamas vienas SSP modelis, t. y. integralinis modelinio spiečiaus ryškis. Įvairių amžių ir metalingumų SSP modelių integralinius ryškius ir spalvas lyginant su stebimų spiečių ryškiais ir spalvomis nustatomi pastarųjų parametrai. SSP metodas pasižymi dviem trūkumais, kurie aptariami de Meulenaer ir kt.

(2013) straipsnyje. Pirmas trūkumas – jų pagalba neįmanoma išspręsti amžiaus-ekstinkcijos išsigimimo, t. y. jaunas spiečius su didele ekstinkcija gali turėti tą pačią spalvą, kaip senas objektas be ekstinkcijos. Antrasis trūkumas – spiečiuje esančių masyviausių žvaigždžių stochastinio masių pasiskirstymo neįskaitymas. Atsitiktinai pasitaikiusi viena masyvi (taigi ir šviesi) mėlyna arba raudona supermilžinė gali nulemti viso spiečiaus spalvą, todėl naudojant SSP metodą jauniems spiečiams gali būti klaidingai įvertinamas amžius (de Meulenaer ir kt. 2013).

Stochastiniai efektai įskaitomi lyginant fotometrinius spiečių duomenis su stochastiniais spiečių modeliais. Šių modelių sudarymo principas yra panašus kaip SSP, kadangi žvaigždės taip pat paskirstomos izochronoje, tačiau generuojamų žvaigždžių masės nėra tolygiai pasiskirsčiusios pagal IMF, o diskretiškai naudojant „atsitiktinio paskirstymo“ (random sampling) metodą (Deveikis ir kt. 2008). Pasirinkta IMF naudojama kaip tikimybės funkcija, kuria remiantis imant atsitiktines diskretines žvaigždžių masių vertes iš užduoto masių intervalo sugeneruojamos norimos masės spiečiaus modelis (de Meulenaer (2015) 1.2 skyrelis). Mūsų stochastiniuose modeliuose naudojama Kroupa (2001) pradinių masių funkcija:

$$\varphi(m) = k \cdot C_i \cdot m^{-\alpha_i} \begin{cases} \alpha_0 = 0{,}3, kai\ m \in [m_0, m_1] \\ \alpha_1 = 1{,}3, kai\ m \in [m_1, m_2] \\ \alpha_2 = 2{,}3, kai\ m \in [m_2, m_3] \\ \alpha_3 = 2{,}3, kai\ m \in [m_3, m_4] \end{cases}$$

kur $\boldsymbol{m_0}$ = 0,01 $M_\odot$, $\boldsymbol{m_1}$ = 0,08 $M_\odot$, $\boldsymbol{m_2}$ = 0,5 $M_\odot$, $\boldsymbol{m_3}$ = 1 $M_\odot$, $\boldsymbol{m_4}$ = 150 $M_\odot$, $\boldsymbol{k}$ ir $\boldsymbol{C_i}$ – normalizavimo konstantos, $\boldsymbol{\alpha}$ – tiesės polinkio reikšmė. Atskirų žvaigždžių ryškiai yra suintegruojami, taip gauname integralinį spiečiaus ryškį. Žvaigždės ant izochronos pasiskirsto stochastiškai, todėl kiekvieną kartą generuojant tokius pačius fizikinius parametrus (amžių, masę, metalingumą) turintį spiečiaus modelį gaunami skirtingi jo integraliniai fotometriniai parametrai (ryškiai, spalvos). Kiek plačiai ryškiai ir spalvos skiriasi priklauso nuo masyviausių žvaigždžių skaičiaus, taigi ir nuo visos spiečiaus masės.

Šiame darbe parametrų nustatymui naudojamas Saulės metalingumo [Fe/H] = 0 stochastinių spiečių modelių bankas, kuriame yra įvairias amžiaus, masės ir ekstinkcijos vertes atitinkantys spiečiai. Pasirinktas fiksuotas metalingumas, nes jis dažniau pritaikomas objektams, kurie pasižymi didesnėmis fotometrinėmis paklaidomis. Taip pat de Meulenaer ir kt. (2015) parodė, kad naudojant fiksuotą metalingumą nustatyti „*Year 1 Spiečių*“ katalogo parametrai atitinka paskelbtus Fouesneau ir kt. (2014) straipsnyje, kurie

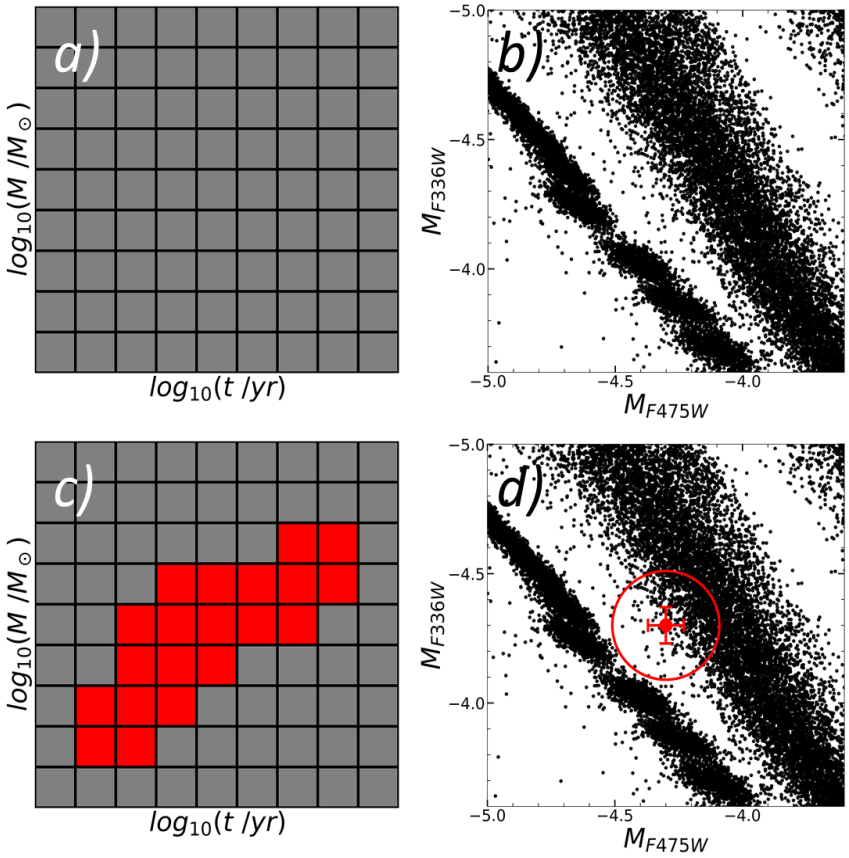
naudojo kintamą [Fe/H] = [-0,7, +0,4] metalingumą. Skaičiavimams naudojamas 3D modelių tinklelis susidaro iš mazgų, kur kiekviename iš jų yra po 1000 stochastinių spiečių modelių su vienodomis amžiaus ***t***, masės ***M***, ekstinkcijos ***E(B-V)*** vertėmis. Amžius $\log_{10}$(t/yr) keičiasi intervale nuo 6,6 iki 10,1 žingsniu 0,05, masė $\log_{10}(M/M_{\odot})$ nuo 2 iki 6 žingsniu 0,05, ekstinkcija nuo 0 iki 2 žingsniu 0,01. Taigi turėjome – 71 amžiaus, 81 masės, 201 ekstinkcijos vertes. O tai yra daugiau nei 1 mln. skirtingą parametrų rinkinį turinčių 3D modelio tinklelio mazgų, kurių kiekviename po 1000 skirtingų stochastinių modelių su suskaičiuotais ryškiais – *F275W*, *F336W*, *F475W*, *F814W*, *F110W*, *F160W*. Atskiro vieno stochastinio modelio tikimybė apskaičiuojama pagal šią formulę:

$$L_{model} = \prod_{f=1}^{F} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} exp\left[-\frac{\left(mag_{f,obs} - mag_{f,model}\right)^2}{2\sigma_f^2}\right]$$

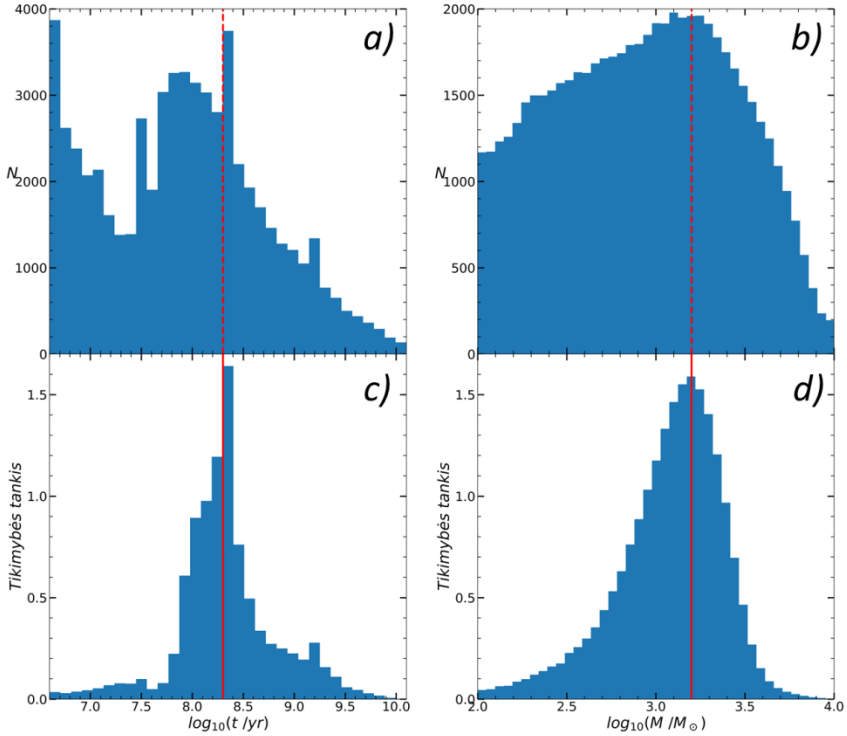
kur ***f*** žymi atskirą individualų filtrą, ***F*** – filtrų skaičių, σ_f – paklaida atitinkamame filtre ***f***, $mag_{f,\,obs}$ – stebėto objekto ryškis, $mag_{f,\,model}$ – nagrinėjamo modelio ryškis. Tada visų tuos pačius fizikinius parametrus (amžių, masę, ekstinkciją) turinčių spiečių bendra tikimybė, t.y. 3D modelių tinklelio atskiro mazgo tikimybė, lygi atskirų to mazgo modelių tikimybių sumai:

$$L_{mazgas}\left(t, M, E(B-V)\right) = \sum_{n=1}^{N} L_{model,n}$$

Čia ***N*** = 1000, modelių skaičius viename mazge. Viso teorinių modelių tinklelio schema amžiaus-masės parametrų erdvėje parodyta 2.1a pav. Tų pačių modelių fotometrinių parametrų (*F336W* ir *F475W* ryškių), pasiskirstymas atvaizduotas 2.1b pav. Lyginant stochastinių spiečių modelių ir stebėtų spiečių atitinkamus fotometrinius duomenis (ryškius) yra įskaitomos fotometrinės ryškio paklaidos σ_λ. Nagrinėjant konkretų spiečių atrenkami tik modeliai 3-σ ribose (2.1d pav. raudonas apskritimas), ir tikimybės skaičiuojamos tik nedidelei daliai stochastinių modelių (2.1c pav.), kas sumažina skaičiavimo trukmę. Į 3-σ ribas patekusiems modeliams yra sudaromos tikimybės tankio histogramos, kur labiausiai tikėtina vertė suskaičiuojama iš normuotos su svoriu histogramos piko. Svoris – konkretaus mazgo suminė tikimybė. 2.2c,d pav. dalyse raudona ištisinė linija parodyti tokiu metodu nustatyti spiečiaus ID2073 amžius ir masė (de Meulenear ir kt. 2013).

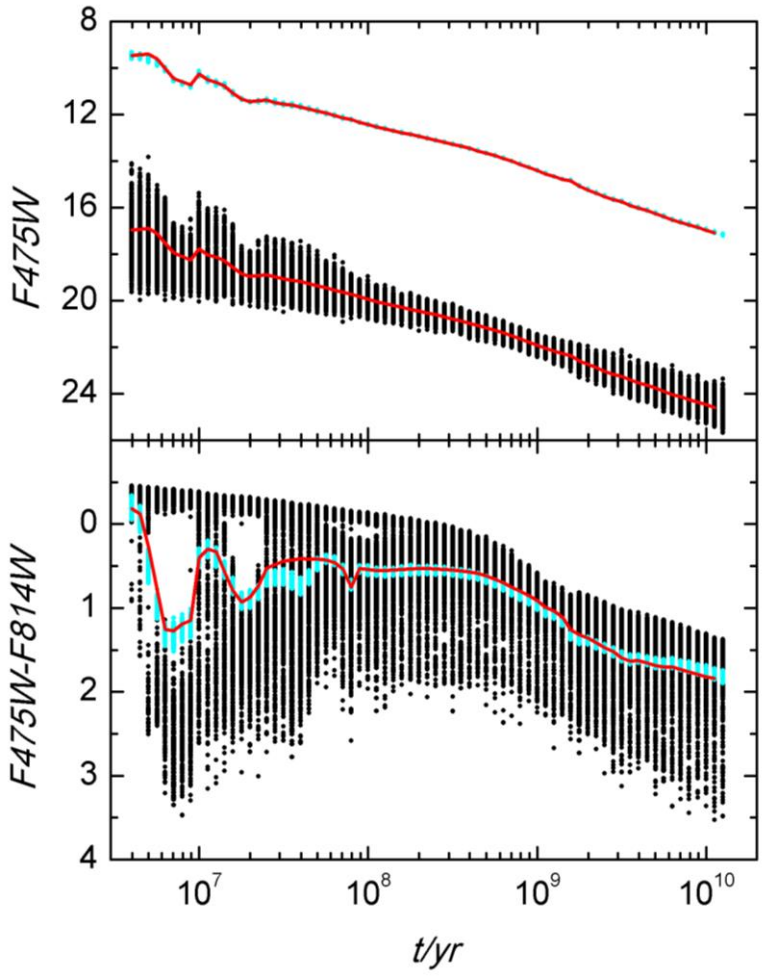


2.1 pav. Žvaigždžių spiečių parametrų nustatymo schema naudojant stochastinių modelių metodą. *a)* modelių tinklelio pavyzdys su pilkai pažymėtais mazgais, *b)* fotometrinė *F336W* ir *F475W* absoliučių ryškių erdvė, *c)* raudonai pažymėti mazgai, kurie patenka į 3-σ ribas, *d)* fotometrinė *F336W* ir *F475W* absoliučių ryškių erdvė su išskirtu raudonu apskritimu, kuris žymi 3-σ ribas.



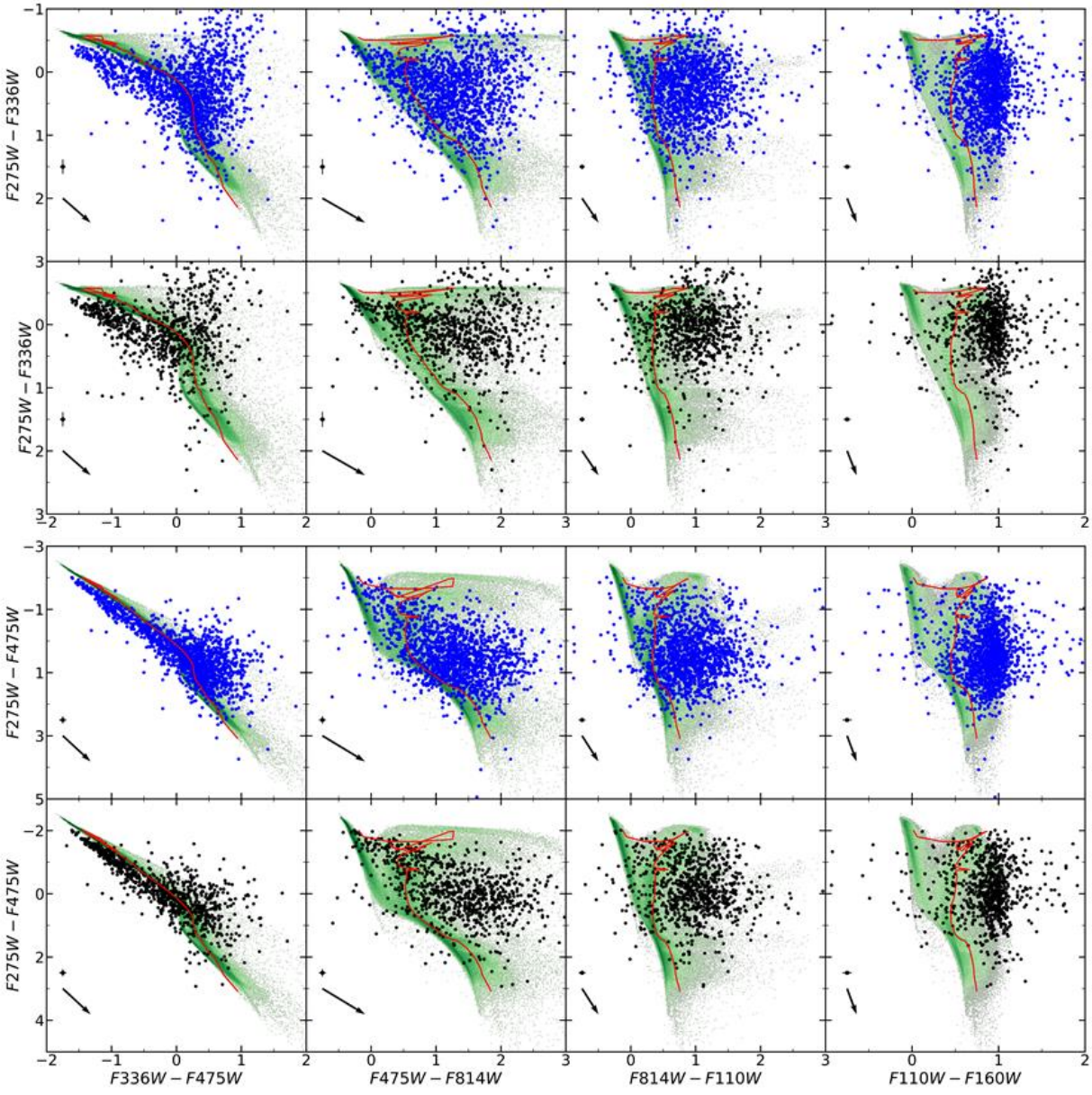
2.2 pav. Histogramų pavyzdžiai amžiaus ir masės nustatymui. *a)* ir *b)* nenormuotos, be svorio histogramos; *c)* ir *d)* normuotos histogramos su svoriu. Raudona linija žymi spiečiaus ID2073 labiausiai tikėtinas parametrų vertes.

SSP ir stochastinių modelių palyginimas pateikiamas 2.3 pav., kur parodytos *F475W* ryškio ir *F475W-F814W* spalvos priklausomybės nuo amžiaus. Esant 10^3 $M_\odot$ spiečių masei vyrauja didesnė stochastika, tuo tarpu kai masė lygi 10^6 $M_\odot$ abudu modeliai beveik sutampa. Tai rodo, kad tiriant masyvius objektus (pvz. galaktikas) patogiau naudoti SSP modelius, nes lyginimas su jais reikalauja mažiau kompiuterio resursų nei stochastinis metodas. Ties 10 mln. metų 2.3a pav. matomas pikas. Ties šiuo amžiumi spiečiaus ryškį *F475W* filtre dominuoja mėlynos arba raudonos supermilžinės. 2.3b pav. matomos tuščios sritys į kurias nepatenka nei vienas stochastinis modelis, vadinasi ties atitinkamais amžiais negali būti objektų pasižyminčių tokiu spalvos rodikliu. Nagrinėdami 285 Andromedos pietvakarinės dalies spiečius Vansevičius ir kt. (2009) naudojo SSP metodą. O taikant stochastinių modelių metodą yra nustatyti parametrai 601 PHAT apžvalgos „*Year 1 Spiečių*“ katalogo objektui (Fouesneau ir kt. 2014), bei 1363 $\mathbf{S_{all}}$ katalogo objektams (de Meulenear ir kt. 2017).

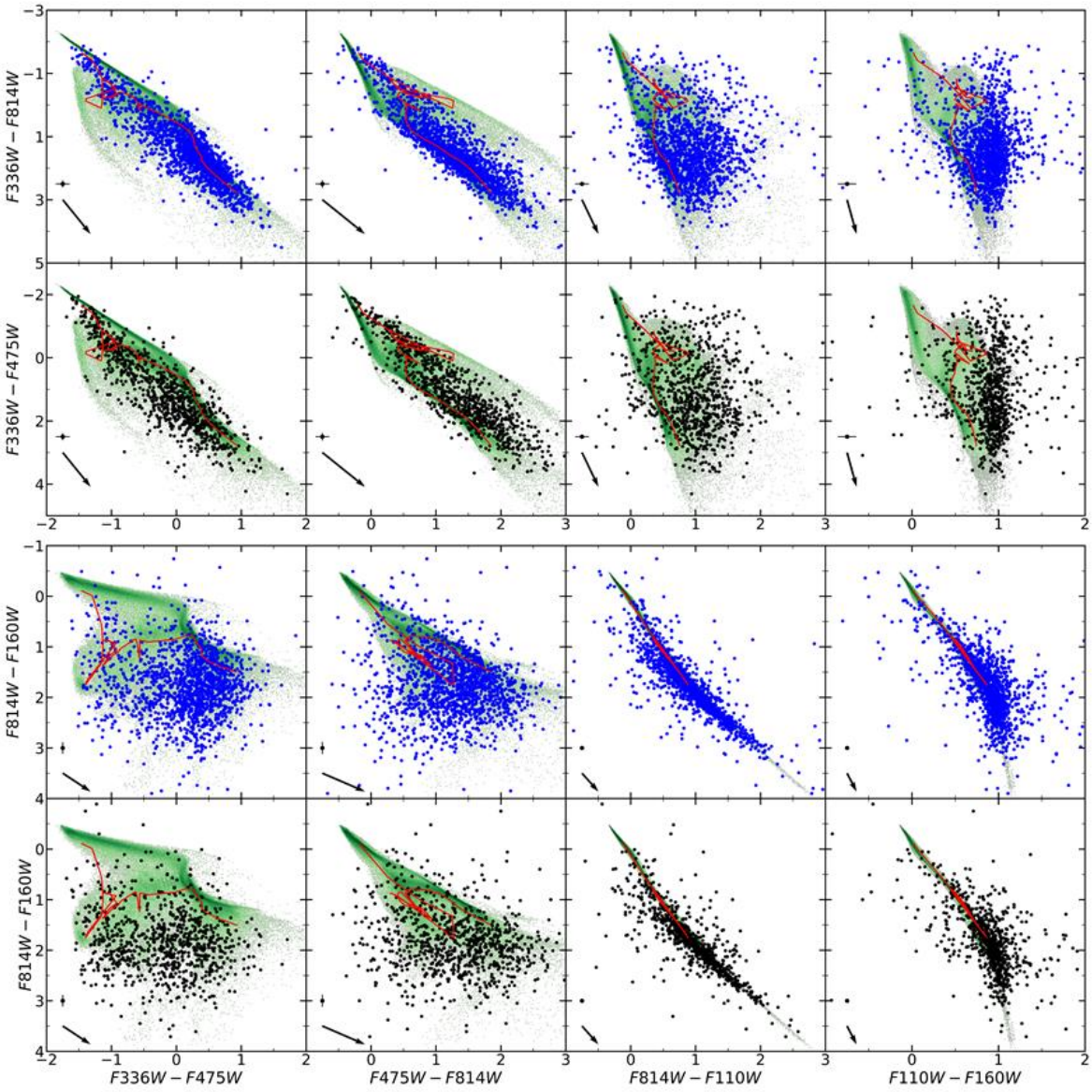


2.3 pav. SSP ir stochastinių modelių palyginimas, *a)* amžiaus – ryškio, *b)* spalvos rodiklio – amžiaus diagramose. Raudona linija žymi SSP modelius, juodais taškais pažymėti 10^3 $M_\odot$, žydrais 10^6 $M_\odot$ stochastiniai modeliai, kai [Fe/H] = 0.

„Atrinktų spiečių“ (**A**) ir *„Spiečių“* (**S**) katalogų objektų pasiskirstymas stochastinių 10^2, 10^3, 10^4 $M_\odot$ masės modelių įvairių fotometrinių parametrų erdvėse parodytas 2.4 ir 2.5 pav. Ten pat raudona kreive atidėti SSP modeliai. Nors **S** kataloge objektų yra dvigubai daugiau (1.3 lentelė), nei mūsų sudarytame **A** kataloge, tačiau abiejų katalogų objektų pasiskirstymas pagal spalvą yra panašus, t. y. jų fotometrinių parametrų skirstiniai yra panašūs.



2.4 pav. Dvispalvės diagramos, kuriose *„Spiečių“* (**S**) katalogo objektai pažymėti mėlyna spalva, o *„Atrinktų spiečių“* (**A**) katalogo – juoda spalva. Žalia spalva fone parodyti stochastiniai modeliai, kurių masės lygios 10^2, 10^3, 10^4 $M_\odot$. Raudona kreive palyginimui atidėti SSP modeliai. Metalingumas visur [Fe/H] = 0. Rodyklė atitinka ekstinkcijos vektorių $\boldsymbol{A_V} = 1$.



2.5 pav. Tas pats kas 2.4 pav., tik kitiems spalvos rodikliams.

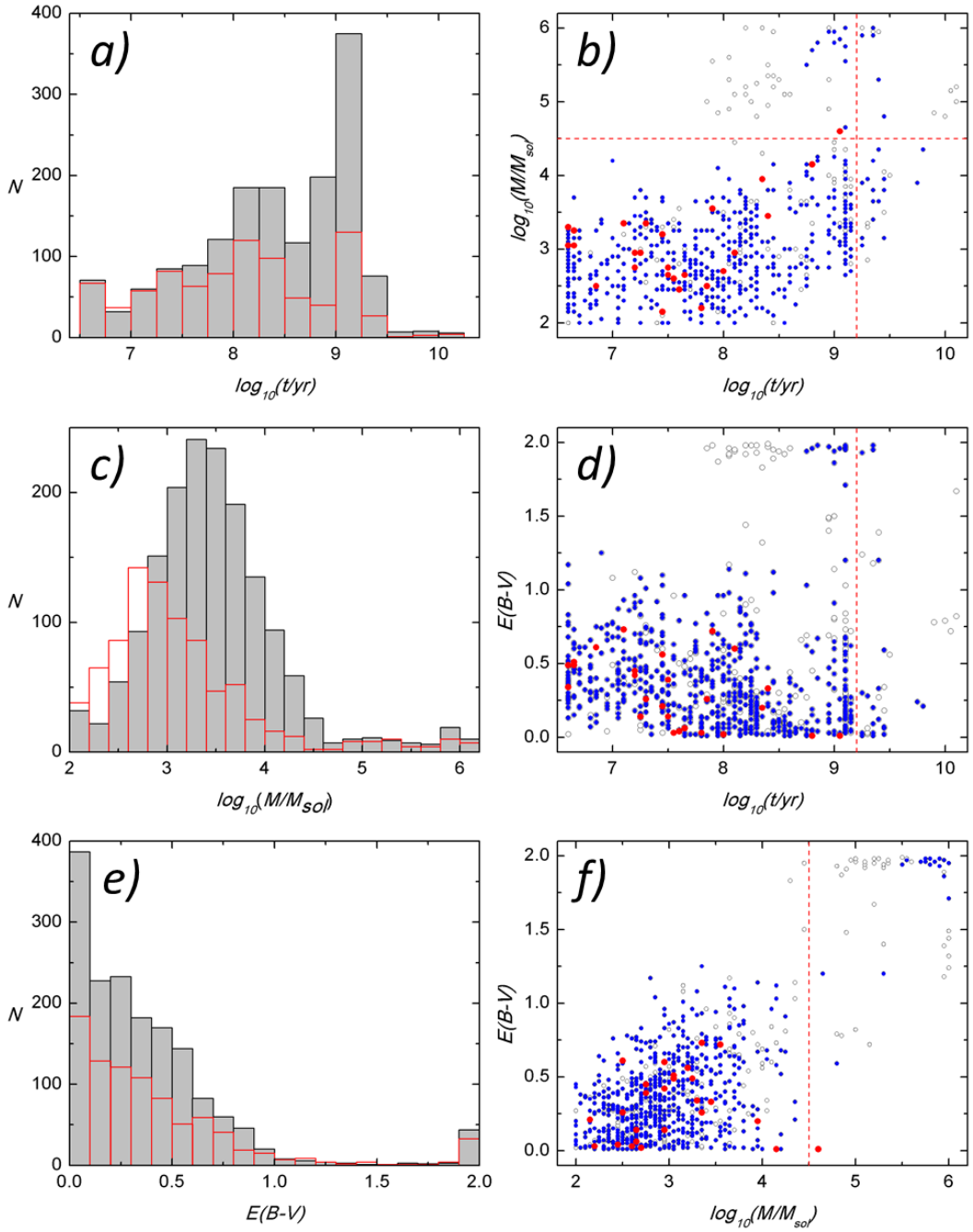
2.2. Žvaigždžių spiečių savybės

Remiantis stochastinių modelių metodu (žr. 2.1 skyrelį) nustatėme amžiaus, masės ir ekstinkcijos parametrų vertes 856 „*Atrinktų spiečių*“ (**A**) ir 1612 „*Spiečių*“ (**S**) katalogų objektams (atitinkamai Priedas Nr.1 1.1 ir 1.2 lentelė). Daliai objektų parametrai neįvertinti, kadangi stochastinių modelių metodas veikia tik kai turimi fotometriniai matavimai bent trijuose ryškiuose.

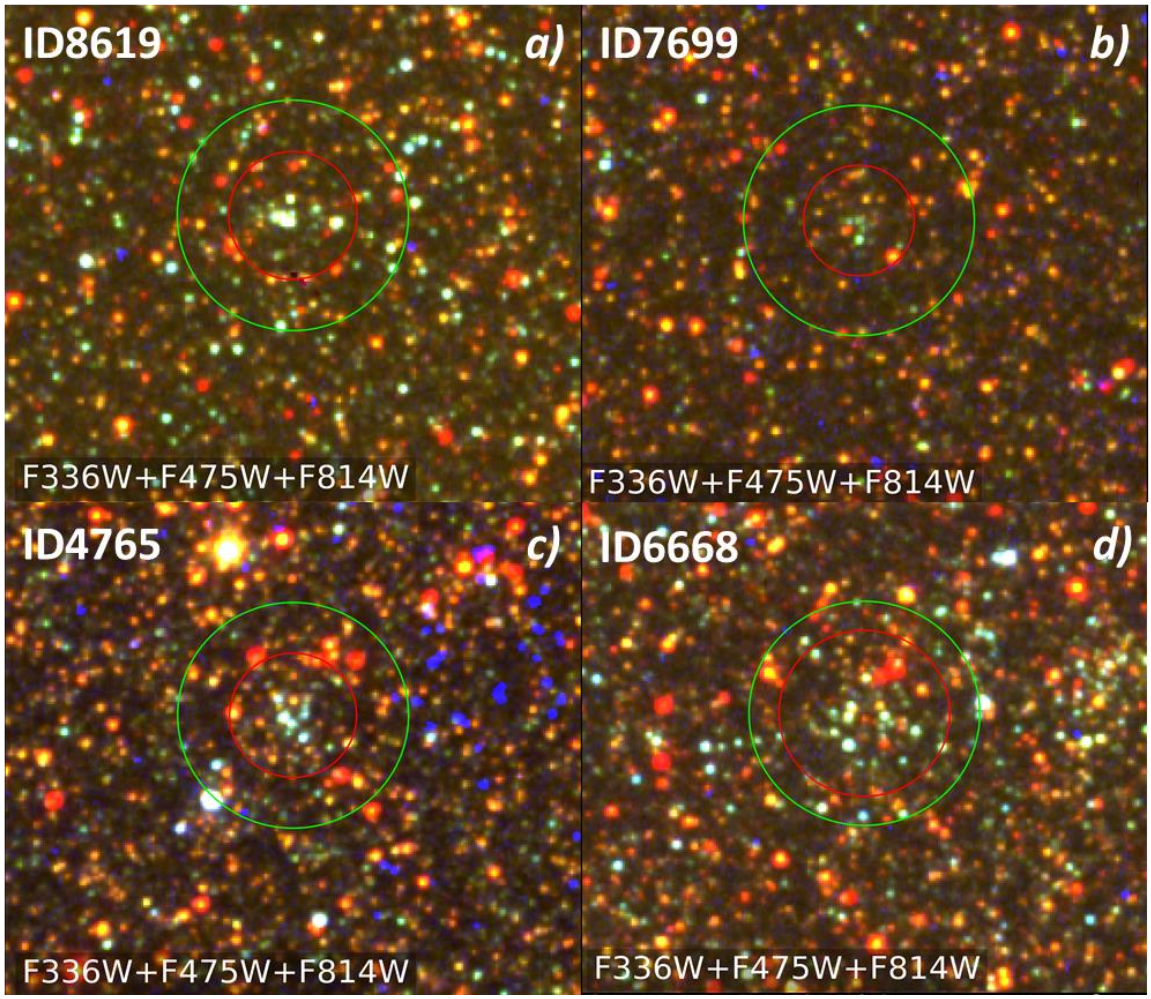
Siekiant ištirti Andromedos galaktikos žvaigždžių spiečių parametrų skirstinius buvo sudarytos **A** ir **S** katalogų objektų amžiaus, masės ir ekstinkcijos histogramos, bei šių parametrų tarpusavio sąryšius parodančios diagramos – 2.6 pav. Iš amžiaus histogramų (2.6a pav.) matome, kad abiejuose kataloguose beveik vienodas jaunų spiečių, kurių amžius iki ≈32 mln. m. ($\log_{10}\boldsymbol{t} < 7{,}5$) skaičius. O amžiaus skirstinių maksimumų sutapimas rodo, kad tiek **A**, tiek **S** kataloguose daugiausia spiečių yra ties 100 mln. ir 1 mlrd. metų. **S** ir **A** katalogo objektų masių skirstinių maksimumai nesutampa (2.6c pav.). **S** kataloge daugumos spiečių masė $\approx 1{,}8 \cdot 10^3\ M_\odot$ (histogramos maksimumas ties $\log_{10}\boldsymbol{M} = 3{,}25$), o **A** kataloge daugumos spiečių masė $\approx 0{,}6 \cdot 10^3\ M_\odot$ (histogramos maksimumas ties $\log_{10}\boldsymbol{M} = 2{,}75$). Didžiosios dalies (91%) **A** katalogo spiečių masės $<10^4\ M_\odot$. Johnson ir kt. (2015) sudarant **S** katalogą buvo išrinkti masyvesni, tuo pačiu ir ryškesni Andromedos spiečiai. Mes jų katalogą papildome mažesnės masės spiečiais, kurių parametrus nustatėme naudodami stochastinių modelių metodą. 2.3 pav. buvo parodyta, kad mažos masės spiečiai, kuriems būdingas stochastinis žvaigždžių masių pasiskirstymas, akivaizdžiai perdengia kelių ryškių intervalą, tad jiems taikant SSP metodą galima ženkliai suklysti nustatant parametrus.

Daugumos **A** (92%) ir **S** (95%) katalogų objektų ekstinkcija $\boldsymbol{E(B\text{-}V)} < 1$ mag. Tačiau abiejuose kataloguose yra grupė objektų, kurių $\boldsymbol{E(B\text{-}V)}$ apie 2 mag (2.6e pav.). **A** katalogo objektų pasiskirstymas amžiaus-ekstinkcijos (2.6d pav) ir masės-ekstinkcijos (2.6f pav.) parametrų erdvėse rodo, kad šie objektai yra tarp ≈0,1 – 3,2 mlrd. m. ($\log_{10}\boldsymbol{t} = 8 – 9{,}5$), o jų masė didesnė nei $\approx 32 \cdot 10^3\ M_\odot$ ($\log_{10}\boldsymbol{M} > 4{,}5$). Panašu, kad šių spiečių parametrų stochastiniu metodu nepavyko nustatyti. Galbūt į fotometravimo apertūrą pateko ryški raudona Andromedos disko žvaigždė ir spiečius tapo „raudonesnis“, tarsi stipriai paveiktas ekstinkcijos. Ne visiems spiečiams buvo išspręstas amžiaus-ekstinkcijos išsigimimas, t. y. jauni spiečiai su didele ekstinkcija galėjo „apsimesti“ senais spiečiais su maža ekstinkcija

(de Meulenaer ir kt. 2013). 2.7a,b pav. parodyti spiečių pavyzdžiai, kurie pasižymi amžiaus-ekstinkcijos išsigimimu. **A** kataloge objektų, kurių ***E(B-V)*** > 1,5 mag, yra tik 39.



2.6 pav. Amžiaus, masės ir ekstinkcijos parametrų histogramos – atitinkamai *a), c), e)*. *„Spiečių“* (**S**) (1612 obj.) katalogas – pilka histograma (Johnson ir kt. 2015), *„Atrinktų spiečių“* (**A**) (856 obj.) katalogas – raudona linija. *b), d), f)* dalyse – *„Atrinktų spiečių“* (**A**) katalogo amžiaus, masės ir ekstinkcijos parametrų tarpusavio sąryšiai. Raudonais apskritimais pažymėti *„1 grupės“* 26 obj. (jų fotometrinės paklaidos filtruose *F275W*, *F336W* <0,15 mag, *F475W*, *F814W* <0,1 mag, *F110W*, *F160W* <0,2 mag), mėlynais apskritimais – *„2 grupės“* 665 obj. (jų paklaidos *F475W* filtre <0,2 mag), tuščiaviduriais apskritimais – *„3 grupės“* 165 obj. (likę obj.). Raudonos punktyrinės linijos žymi $\log_{10}\boldsymbol{M} > 4{,}5$ $M_\odot$ ($\approx 32 \cdot 10^3$ $M_\odot$) masę ir $\log_{10}\boldsymbol{t} > 9{,}2$ (≈1,6 mlrd. m.) amžių.



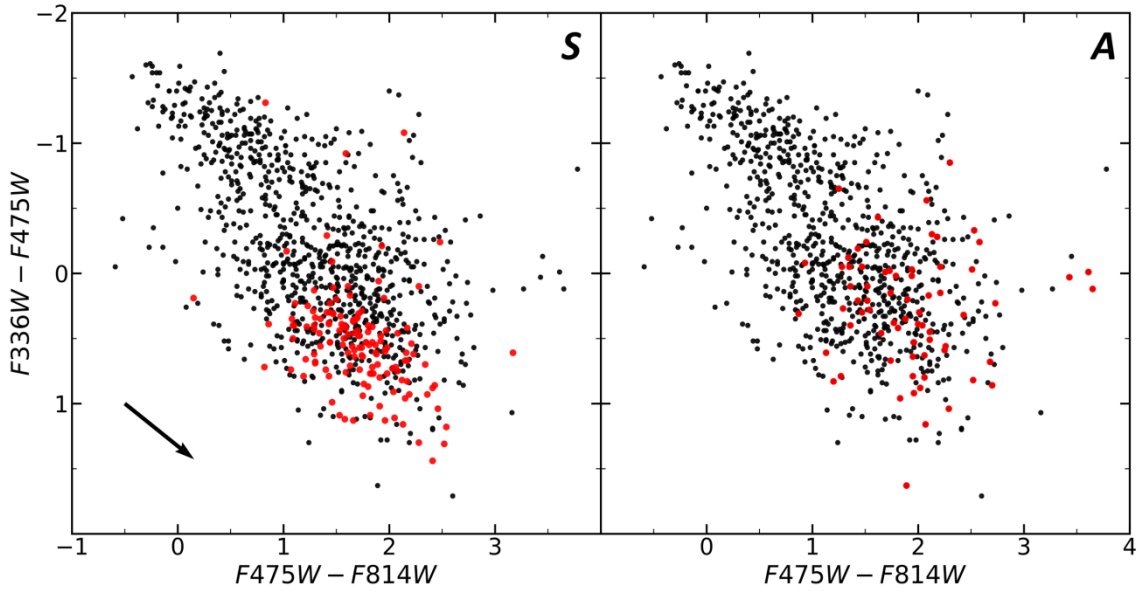
2.7 pav. Netiksliai nustatytų parametrų spiečių spalvotos ≈9‘‘,3 x 9‘‘,3 dydžio nuotraukos (mėlyna spalva – *F336W*, žalia spalva – *F475W*, raudona spalva – *F814W* filtras). Apskritimais parodytos Johnson ir kt. (2015) naudotos apertūros: visiems objektams identiška ***R*** = 2‘‘ dydžio apertūra (žalia spalva) ir kiekvienam objektui taikyta individuali $R_{Johnson}$ apertūra (raudona spalva). *a)* spiečiaus ID8619 amžius ≈0,2 mlrd. m., masė ≈0,2 mln. $M_{\odot}$, ***E(B-V)*** = 1,98 mag; *b)* spiečiaus ID7699 amžius ≈1,3 mlrd. m., masė ≈0,4 mln. $M_{\odot}$, ***E(B-V)*** = 1,97 mag; *c)* spiečiaus ID4765 amžius ≈2,2 mlrd. m., masė ≈0,9 mln. $M_{\odot}$, ***E(B-V)*** = 1,18 mag; *d)* spiečiaus ID6668 amžius ≈11,2 mlrd. m., masė ≈0,14 mln. $M_{\odot}$, ***E(B-V)*** = 0,72 mag.

Siekdami įsitikinti, kad naudojant stochastinių spiečių modelių metodą įmanoma patikimai įvertinti tikslius fotometrinius duomenis turinčių spiečių parametrus, **A** katalogo objektus, atsižvelgdami į fotometrines paklaidas, suskirstėme į tris grupes:

- *„1 grupė“* – 26-ių tiksliai išmatuotų objektų grupė, kurių fotometrinės paklaidos: $\sigma_{F275W} < 0{,}15$ mag, $\sigma_{F336W} < 0{,}15$ mag, $\sigma_{F475W} < 0{,}1$ mag, $\sigma_{F814W} < 0{,}1$ mag, $\sigma_{F110W} < 0{,}2$ mag, $\sigma_{F160W} < 0{,}2$ mag. Paklaidų ribos parinktos remiantis de Meulenaer ir kt. (2017). Jos parodytos 1.12 pav.
- *„2 grupė“* – 665 objektai, kurių fotometrinė paklaida $\sigma_{F475W} < 0{,}2$ mag.
- *„3 grupė“* – likę 165 objektai.

Amžiaus, masės, ekstinkcijos parametrų tarpusavio sąryšius rodančiose diagramose (2.6b,d,f pav.) *„1 grupės“* objektai pažymėti raudonos spalvos, *„2 grupės“* – mėlynos spalvos, *„3 grupės“* – tuščiaviduriais apskritimais. Pastebėjome, kad nė vienas *„1 grupės“*, t. y. tiksliai išmatuotas objektas nepapuola tarp anksčiau minėtų ***E(B-V)*** > 1,5 mag turinčių objektų. Visų 26-ių gerai pamatuotų spiečių ***E(B-V)*** < 1,0 mag.

Amžiaus, masės ir ekstinkcijos tarpusavio sąryšius parodančiose diagramose (2.6b,d,f pav.) raudonomis brūkšninėmis linijomis išskyrėme jaunesnius nei ≈1,6 mlrd. m. ($\log_{10}\boldsymbol{t}$ < 9,2) spiečius, kurių masė mažesnė nei ≈32 · 10^3 $M_\odot$ ($\log_{10}\mathbf{M}$ < 4,5). Beveik visi *„1 grupės“* ir dauguma *„2 grupės“* spiečių patenka į šią zoną. Tai, kad stochastinių spiečių metodu nustatyti *„1 grupės“* spiečiai apima platų amžiaus ir masės verčių intervalą (2.6b pav.), įrodo, kad šis metodas tinka įvairių spiečių parametrų nustatymui, kai turimi geri fotometriniai duomenys. Atrinkus tik jaunesnius nei ≈1,6 mlrd. m. ($\log_{10}\boldsymbol{t}$ < 9,2) spiečius, kurių masė mažesnė nei ≈32 · 10^3 $M_\odot$ ($\log_{10}\mathbf{M}$ < 4,5) **A** kataloge liko – 781, **S** kataloge – 1453 objektai. Likusių ir atmestų spiečių pasiskirstymas dvispalvėje diagramoje parodytas 2.8 pav. Atmestų spiečių pavyzdžiai pateikti 2.7c,d pav. Jiems mūsų naudotas stochastinių modelių metodas priskyrė didelius amžius: ≈2,2 mlrd. ir ≈11,2 mlrd. m.



2.8 pav. Dvispalvės Johnson ir kt. (2015) publikuoto *„Spiečių“* (**S**) (juodų 1453, raudonų 159 obj.) ir mūsų sudaryto *„Atrinktų spiečių“* (**A**) (juodų 781, raudonų 75 obj.) katalogų objektų diagramos. Raudonai išskirti atmetami objektai, kurių masė $\log_{10}\mathbf{M}$ > 4,5 (≈32 · 10^3 $M_\odot$), amžius $\log_{10}\boldsymbol{t}$ < 9,2 (≈1,6 mlrd. m.). Rodyklė atitinka ekstinkcijos vektorių $\boldsymbol{A_V}$ = 1.

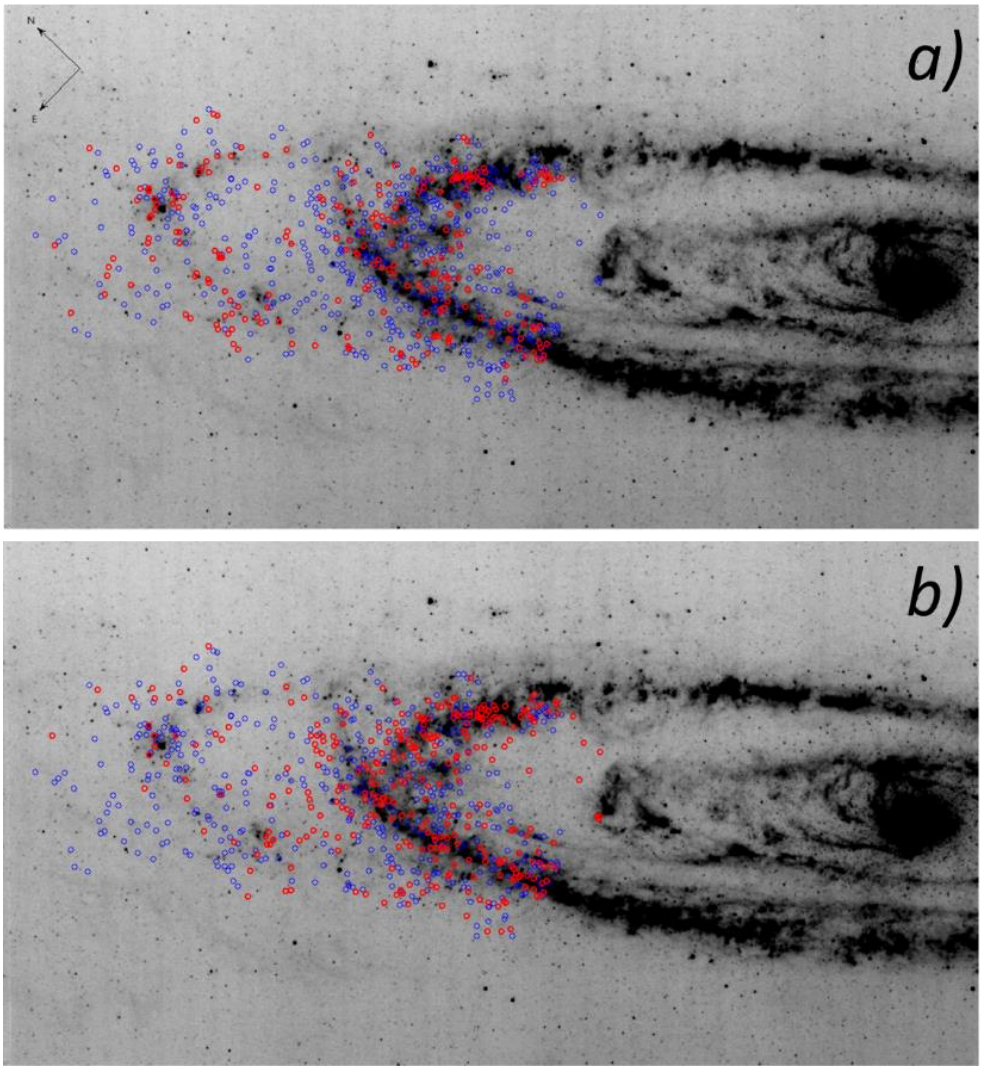
Likusius **A** (781) ir **S** (1453) katalogų spiečius suskirstėme į du intervalus pagal amžių ***t*** (kai masė $\log_{10}\boldsymbol{M} < 4{,}5$ ($\approx 32 \cdot 10^3\,M_\odot$)):

- $\log_{10}\boldsymbol{t} < 7{,}5$ (≈32 mln. m.) (**A** kat. – 244 obj., **S** kat. – 248 obj.),
- $\log_{10}7{,}5$ (≈32 mln. m.) ≤ $\boldsymbol{t} < \log_{10}9{,}2$ (≈1,6 mlrd. m.) (**A** kat. – 537 obj., **S** kat. – 1202 obj.);

ir pagal masę ***M*** (kai amžius $\log_{10}\boldsymbol{t} < 9{,}2$ (≈1,6 mlrd. m.)):

- $\log_{10}\boldsymbol{M} < 3$ (**A** kat. – 460 obj., **S** kat. – 350 obj.),
- $\log_{10}3 \le \boldsymbol{M} < \log_{10}4{,}5$ ($\approx 32 \cdot 10^3\,M_\odot$) (**A** kat. – 321 obj., **S** kat. – 1100 obj.).

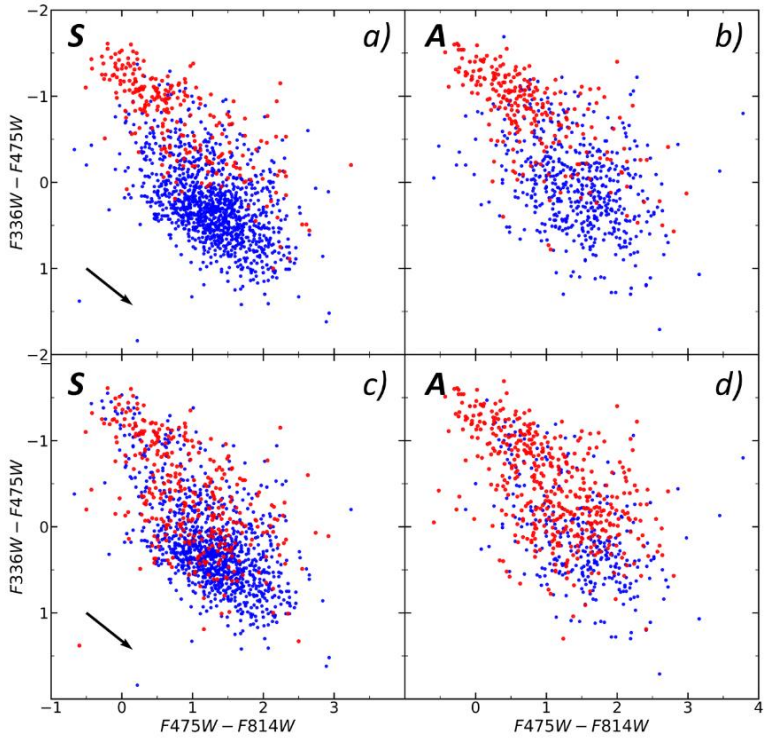
Spiečių patenkančių į šiuos intervalus pasiskirstymas Andromedos diske parodytas (2.9 pav.).



2.9 pav. Andromedos galaktikos šiaurinės dalies GALEX NUV nuotrauka. *a) „Atrinktų spiečių“* (**A**) katalogo 244 objektai $\log_{10}\boldsymbol{t} < 7{,}5$ (≈32 mln. m.) (raudoni) ir 537 obj. $\log_{10}7{,}5$ (≈32 mln. m.) ≤ $\boldsymbol{t} < \log_{10}9{,}2$ (≈1,6 mlrd. m.) (mėlyni), kai spiečių masė $\log_{10}\boldsymbol{M} < 4{,}5$ ($\approx 32 \cdot 10^3\,M_\odot$); *b) „Atrinktų spiečių“* (**A**) katalogo 460 objektai $\log_{10}\boldsymbol{M} < 3$ (mėlyni), 321 obj. $\log_{10}3 \le \boldsymbol{M} < \log_{10}4{,}5$ (raudoni), kai spiečių amžius $\log_{10}\boldsymbol{t} < 9{,}2$ (≈1,6 mlrd. m.). Rodyklėmis parodytos šiaurės (N) ir rytų (E) kryptys.

Didžioji dalis **A** kat. jaunų spiečių, kurių amžius $\log_{10}\boldsymbol{t} \leq 7{,}5$ (≈32 mln. m.) metų (244 obj.), koncentruojasi Andromedos žvaigždžių formavimosi regionuose – vijose (žr. 2.9a pav. – raudoni taškai). Senesni spiečiai, tarp $\log_{10}\boldsymbol{t} = 7{,}5 - 9{,}2$ (≈32 mln. – 1,6 mlrd. m.) metų (537 obj.), yra labiau išsisklaidę ir dalis objektų pasklidę vijų šonuose arba tarp jų (2.9a pav. mėlynai pažymėti taškai). Į skirtingus intervalus suskirstytų **S** ir **A** katalogų objektų pasiskirstymas dvispalvėje diagramoje pateikiamas 2.10a,b pav. Abiejuose kataloguose jaunesni spiečiai atsiskiria ir yra labiau koncentruoti mėlynoje spektro dalyje.

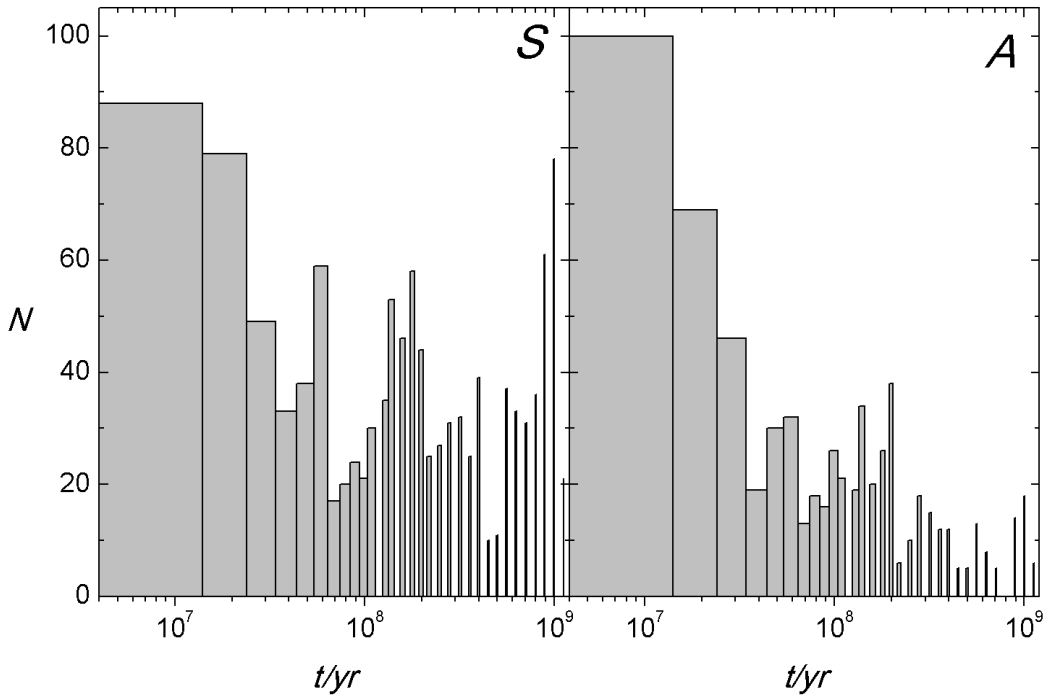
A katalogo objektų pasiskirstymas pagal masę Andromedos diske pateikiamas 2.9b pav. Beveik visi objektai, masių intervale $\log_{10}\boldsymbol{M} = 3 - 4{,}5$ ($\approx 1 - 32 \cdot 10^3\ M_\odot$) (321 obj. raudona spalva), yra išsidėstę ant vijų. Mažesnės masės, $\log_{10}\boldsymbol{M} \leq 3$ (460 obj. mėlyna spalva), spiečiai pasižymi didesne sklaida. Dvispalvėse diagramose (2.10c,d pav.) **S** ir **A** katalogų objektai pasklidę tolygiai. **A** kat. abiejų masės intervalų objektų skaičius pagal masę yra panašus, **S** kat. masyvesnių spiečių yra daugiau nei mažesnės masės, tai patvirtina išvadą, kad **S** katalogas (Johnson ir kt. 2015) buvo sudaromas iš masyvesnių ir ryškesnių objektų.



2.10 pav. Dvispalvės *„Spiečių“* (**S**) ir *„Atrinktų spiečių“* (**A**) katalogų objektų diagramos. *a)* ir *b)* raudonai išskirti objektai kurių $\log_{10}\boldsymbol{t} < 7{,}5$ (≈32 mln. m.), mėlynai $\log_{10}7{,}5$ (≈32 mln. m.) $\leq \boldsymbol{t} < \log_{10}9{,}2$ (≈1,6 mlrd. m.). *a)* **S** kat. 248 (raudoni), 1202 (mėlyni) obj., *b)* **A** kat. 244 (raudoni), 537 (mėlyni) obj. *c)* ir *d)* raudonai pažymėti objektai kurių $\log_{10}\boldsymbol{M} < 3$, mėlynai $\log_{10}3 \leq \boldsymbol{M} < \log_{10}4{,}5$ ($\approx 32 \cdot 10^3\ M_\odot$). *c)* **S** kat. 350 (raudoni), 1100 (mėlyni) obj., *d)* **A** kat. 460 (raudoni), 321 (mėlyni) obj. Rodyklė – ekstinkcijos vektorius $\boldsymbol{A_V} = 1$.

Panaudoję visus „*Spiečių*“ (**S**) ir „*Atrinktų spiečių*“ (**A**) katalogų objektų amžius (atitinkamai 856 ir 1612 obj., t. y. be anksčiau minėtų amžiaus ar masės apribojimų) sudarėme 2.11 pav. parodytas histogramas, kuriose parodyta kiek spiečių susiformavo kas 10 mln. m. Sparčiausiai spiečiai formavosi per paskutinius 10 mln. m. Tuo laikotarpiu susiformavo 84 **S** ir 100 **A** katalogo spiečių. Kitas reikšmingas spiečių formavimosi aktyvumo periodas buvo maždaug prieš 200 mln. m. Šis spiečių formavimosi spartos (CFR – Cluster Formation Rate) padidėjimas galėjo atsirasti dėl Andromedos sąveikos su kaimynine M32 galaktika. Block ir kt. (2006) Andromedos ir M32 sąveikos modeliuose numato, kad būtent prieš ≈200 mln. m. M32 kirto Andromedos diską. Jie nurodo, kad tos sąveikos pasekmė – Andromedoje matomos žiedų struktūros, kuriose yra matoma daugiau žvaigždėdaros židinių.

Kadangi susiformavusių spiečių skaičius nėra vienodas skirtingu laikotarpiu, galime teigti, kad CFR Andromedos galaktikoje yra kintama ir žvaigždėdaros padidėjimas, per kurį suformuojama daugiau spiečių, yra epizodinis reiškinys.



2.11 pav. Žvaigždžių spiečių formavimosi spartos priklausomybė nuo amžiaus. Kairėje „*Spiečių*“ (**S**) katalogui, dešinėje „*Atrinktų spiečių*“ (**A**) katalogui. Histogramos stulpelio intervalas – 10 mln. m.

2.3. Parametrų palyginimas su kitų autorių rezultatais

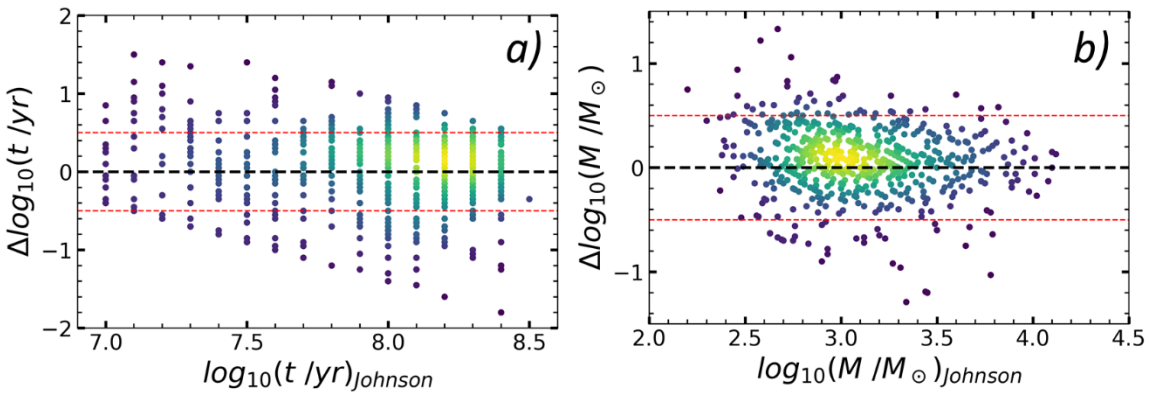
Norėdami įsitikinti savo naudoto stochastinių spiečių modelių metodo patikimumu, nustatytus „*Spiečių*“ (**S**) katalogo parametrus palyginame su Johnson ir kt. (2016) ir de Meulenaer ir kt. (2017) straipsnių duomenimis, kur nagrinėjami tie patys spiečiai. Johnson ir kt. (2016) nagrinėjo tik į žvaigždes išskirtus 1249 PHAT apžvalgos spiečius, kurių parametrus įvertino lygindami spiečiaus narių CMD diagramas su dirbtinėmis CMD. Amžių, masę, metalingumą ir ekstinkciją jie nustatė MATCH programiniu paketu (Dolphin 2002), kuris lygina sugeneruotą CMD diagramą su stebima, ieškant geriausio atitikmens. Kuriant dirbtinę CMD pasirenkama norimo amžiaus ir metalingumo izochrona, įskaitoma objekto masė (IMF), dvinarių skaičius, atstumas iki objekto, ekstinkcija objekto kryptimi. Modeliuose autoriai naudojo: atstumo modulį – 24,47, dvinarių žvaigždžių dalį – 0,35, pradinių masių funkciją – Kroupa (2001), masių intervalą – nuo 0,15 iki 120 $M_\odot$, standartinį ekstinkcijos dėsnį, kur $\boldsymbol{R_V}$ = 3,1, bei PADOVA evoliucinius žvaigždžių modelius. Metalingumas galėjo kisti intervale, -0,2 < [Fe/H] < 0,1, kuris nedaug skiriasi nuo Saulės metalingumo.

Pagal objektų ID numerius sutapatinus „*Spiečių*“ (**S**) ir Johnson ir kt. (2016) duomenis, mūsų nagrinėjamuose B11-B23 PHAT apžvalgos blokuose (1.1 pav.), gauname 582 objektus. Mūsų ir jų nustatytas amžiaus bei masės vertes palyginome 2.12 pav., kur:

$\Delta\log_{10}(t/yr) = \log_{10}(t/yr) - \log_{10}(t/yr)_{Johnson}$, o

$\Delta\log_{10}(M/M_\odot) = \log_{10}(M/M_\odot) - a\log_{10}(M/M_\odot)_{Johnson}$.

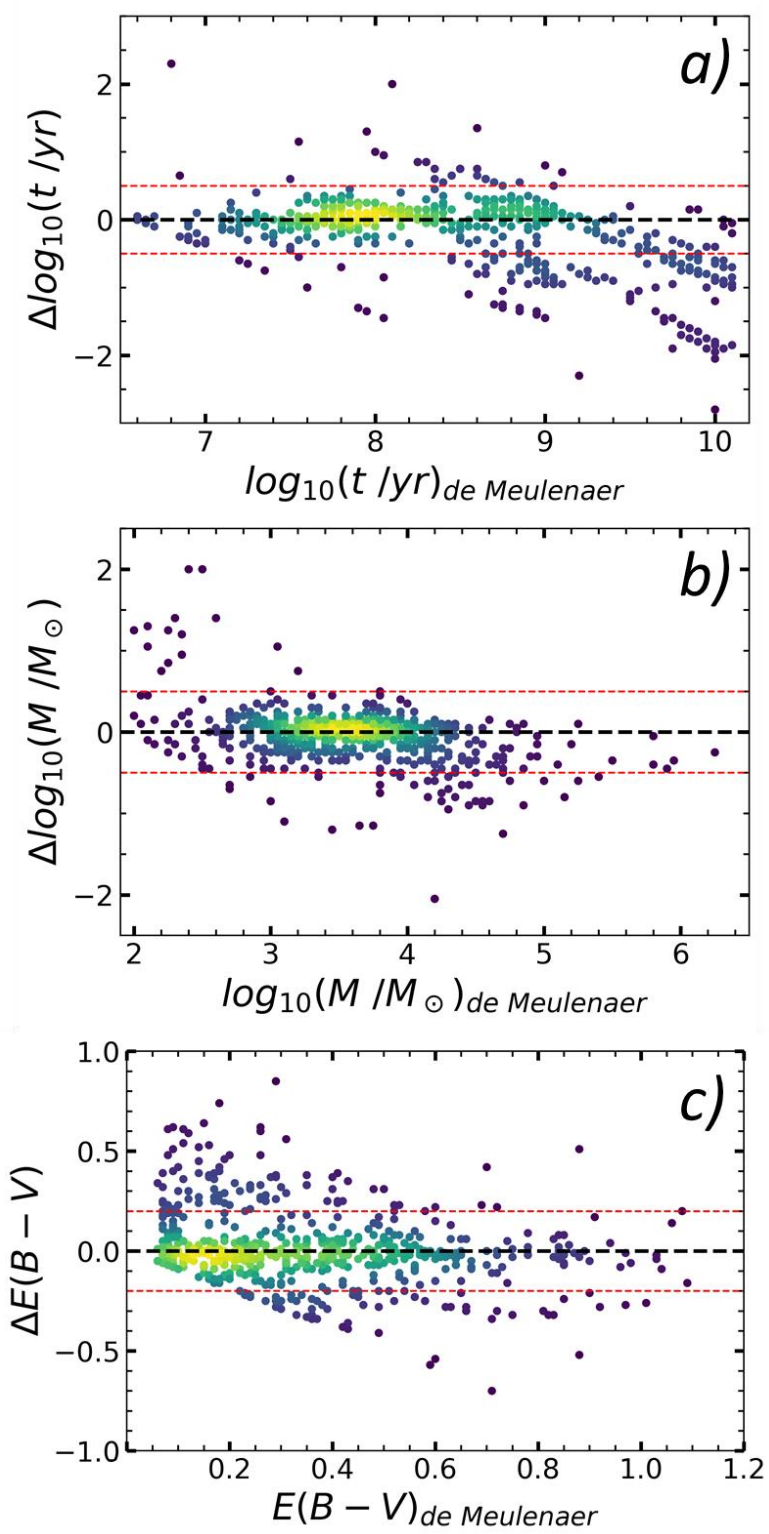
Lyginant skirtingais metodais nustatytas amžiaus vertes daugiau nei pusė (63%) spiečių patenka į amžiaus -0,5 dex < $\Delta\log_{10}(t/yr)$ < 0,5 dex intervalą (2.12a pav.). Amžiaus nustatymo skirtumams įtaka daro tai, kad mūsų stochastiniai spiečių modeliai apima amžių intervalą nuo $\log_{10}\boldsymbol{t}$ = 6,6 (≈4 mln. m.), iki $\log_{10}\boldsymbol{t}$ = 10,1 (≈12,6 mlrd. m.), o Johnson ir kt. (2016) naudotas intervalas – siauresnis, t. y. nuo $\log_{10}\boldsymbol{t}$ = 7,0 (10 mln. m.), iki $\log_{10}\boldsymbol{t}$ = 8,5 (≈316 mln. m.). Spiečių masių skirtumai (2.12b pav.) nėra dideli ir apie nulinę vertę visame nagrinėtame masių intervale pasiskirsto simetriškai. Daugumos (87%) spiečių masių verčių skirtumai patenka į -0,5 dex < $\Delta\log_{10}(M/M_\odot)$ < 0,5 dex intervalą.



2.12 pav. *„Spiečių“* (**S**) katalogo ir Johnson ir kt. (2016) spiečių palyginimas pagal: *a)* amžių ir *b)* masę. Objektų skaičius – 582. Raudonos punktyrinės linijos *a)*, *b)* atveju žymi kiek spiečių patenka į -0,5 dex < $\Delta\log_{10}$(t/yr) < 0,5 dex ir -0,5 dex < $\Delta\log_{10}$(M/M$_\odot$) < 0,5 dex intervalą, atitinkamai po 63% ir 87%.

Sutapatinus *„Spiečių“* (**S**) ir de Meulenaer ir kt. (2017) katalogų duomenis radome 603 atitikmenis. de Meulenaer ir kt. (2017) taikė stochastinių modelių metodą kaip ir mes, tačiau mūsų atveju visiems spiečiams naudotas fiksuotas (Saulės) metalingumas, o jie metalingumui [Fe/H] leido kisti nuo -2,2 iki +0,2. Stochastiniams modeliams kurti jie naudojo senesnę izochronų versiją. Tai matyt ir lemia 2.13a pav. matomus didesnius nustatytų amžiaus verčių skirtumus. Pagal masę (2.13b pav.) duomenys pasiskirsto gan simetriškai intervale ≈0,3 – 32 tūkst. M$_\odot$ ($\log_{10}\boldsymbol{M}$ = 2,5 – 4,5). Didesnė sklaida matoma nagrinėjant ekstinkcijos ***ΔE(B-V)*** skirtumus (2.13c pav.). Jos įvertinimą galėjo įtakoti mūsų naudotas fiksuotas metalingumas. Kaip matėme 2.6e pav., mūsų atveju dalis objektų pasižymi didesne ekstinkcija kurios vertė siekia 2 mag, o de Meulenaer ir kt. (2017) didžiausia ekstinkcijos vertė – 1,1 mag.

Tačiau lyginant parametrų vertes, net 73% spiečių patenka į -0,5 dex < $\Delta\log_{10}$(t/yr) < 0,5 dex intervalą, 90% į 0,5 dex < $\Delta\log_{10}$(M/M$_\odot$) < 0,5 dex intervalą, 73% į -0,2 dex < ΔE(B-V) < 0,2 dex intervalą. Todėl galime daryti išvadą, kad mūsų nustatyti parametrai stochastinių modelių metodu gan tiksliai sutampa su kitų autorių nustatytais duomenimis.



2.13 pav. *„Spiečių“* (**S**) katalogo ir de Meulenaer ir kt. (2017) spiečių palyginimas pagal: *a)* amžių, *b)* masę ir *c)* ekstinkciją. Objektų skaičius – 603. Raudonos punktyrinės linijos *a)*, *b)* atveju žymi kiek spiečių patenka į -0,5 dex < $\Delta\log_{10}$(t/yr) < 0,5 dex ir -0,5 dex < $\Delta\log_{10}$(M/M$_\odot$) < 0,5 dex intervalą, atitinkamai po 73% ir 90%; *c)* kiek spiečių patenka į -0,2 dex < ΔE(B-V) < 0,2 dex intervalą (73%).

Išvados

Šiame darbe nagrinėjami stochastinių modelių metodu nustatyti PHAT apžvalgos „*Spiečių*“ (**S**) ir „*Atrinktų spiečių*“ (**A**) katalogų objektų parametrai.

1. Pagal šiame darbe nustatytas $\boldsymbol{f}$ parametrų ribines vertes ($\boldsymbol{f_{cl}} > 0{,}2$, $\boldsymbol{f_{clg}} > 0{,}2$, $\boldsymbol{f_g} \leq 0{,}5$) iš Johnson ir kt. (2015) „*Galaktikų*“ ir „*Papildomų objektų*“ katalogų objektų, sudarytas 876 objektus turintis „*Atrinktų spiečių*“ (**A**) katalogas.
2. Mūsų nustatytos „*Spiečių*“ (**S**) ir „*Atrinktų spiečių*“ (**A**) katalogų amžiaus, masės, ekstinkcijos parametrų vertės parodė, kad **A** katalogas papildo **S** katalogą mažesnės masės, blyškesniais objektais. Amžiaus skirstinių maksimumų sutapimas rodo, kad tiek **A**, tiek **S** kataloguose daugiausia spiečių yra ties 100 mln. ir 1 mlrd. metų.
3. **A** katalogo spiečiai, kurių amžius $\log_{10}\boldsymbol{t} < 7{,}5$ (≈32 mln. m.) metų, masė $\log_{10}3 \leq \boldsymbol{M_\odot} < \log_{10}4{,}5$ ($\approx 32 \cdot 10^3\ M_\odot$) išsidėsto išskirtinai žvaigždėdaros srityse.
4. Stochastinių spiečių metodu nustatyti „*1 grupės*“ spiečiai (kurių paklaidos $\boldsymbol{\sigma_{F275W}}$, $\boldsymbol{\sigma_{F336W}} < 0{,}15$ mag, $\boldsymbol{\sigma_{F475W}}$, $\boldsymbol{\sigma_{F814W}} < 0{,}1$ mag, $\boldsymbol{\sigma_{F110W}}$, $\boldsymbol{\sigma_{F160W}} < 0{,}2$ mag) apima platų amžiaus ir masės verčių intervalą. Tai įrodo, kad šis metodas tinka įvairių spiečių parametrų nustatymui, kai turimi tikslūs fotometriniai duomenys.
5. Lyginant nustatytus **S** katalogo parametrus su de Meulenaer ir kt. (2017) duomenimis PHAT apžvalgos B11-B23 blokuose, galime teigti, kad mūsų nustatyti žvaigždžių spiečių parametrai gan tiksliai sutampa su kitų autorių duomenimis.

Literatūros sąrašas

1. L. C. Johnson, A. C. Seth, J. J. Dalcanton ir kt., PHAT stellar cluster survey I. YEAR 1 catalog and integrated photometry, The Astrophysical Journal, 752:95 (23pp), 2012.
2. L. C. Johnson, A. C. Seth, J. J. Dalcanton ir kt., PHAT stellar cluster survey II. Andromeda Project cluster catalog, The Astrophysical Journal, 802:127 (22pp), 2015.
3. L. C. Johnson, A. C. Seth, J. J. Dalcanton ir kt., Panchromatic Hubble Andromeda Treasury. XVI. Star cluster formation efficiency and the clustered fraction of young stars, The Astrophysical Journal, 827:33 (24pp), 2016.
4. M. Fouesneau, L. C. Johnson, D. R. Weisz ir kt., The Panchromatic Hubble Andromeda Treasury V. Ages and masses of the year 1 stellar clusters, The Astrophysical Journal, 786:117 (17pp), 2014.
5. P. de Meulenaer, D. Narbutis, T. Mineikis, V. Vansevičius, Deriving physical parameters of unresolved star clusters I. Age, mass, and extinction degeneracies, A&A 550, A20, 2013.
6. P. de Meulenaer, D. Narbutis, T. Mineikis, V. Vansevičius, Deriving physical parameters of unresolved star clusters III. Application to M31 PHAT clusters, A&A 574, A66, 2015.
7. P. de Meulenaer, R. Stonkutė, V. Vansevičius, Deriving physical parameters of unresolved star clusters V. M 31 PHAT star clusters, A&A 602, A112, 2017.
8. P. de Meulenaer, Doctoral Dissertation: The Accuracy of Integrated Star Clusters Parameters – The Effects of Stochasticity, Vilnius University, 2015.
9. V. Deveikis, D. Narbutis, R. Stonkutė, A. Bridžius, V. Vansevičius, SIMCLUST – A program to simulate star clusters, Baltic Astronomy, vol. 17, 351-361, 2008.
10. S. Phelps, A. Nusser, V. Desjacques, The mass of the Milky Way and M31 using the method of least action, The Astrophysical Journal, 775:102 (12pp), 2013.
11. J. J. Dalcanton, B. J. Williams, D. Lang ir kt., The Panchromatic Hubble Andromeda Treasury, The Astrophysical Journal Supplement Series, 200:18 (37pp), 2012.
12. B. J. Williams, D. Lang, J. J. Dalcanton ir kt., The Panchromatic Hubble Andromeda Treasury. X. Ultraviolet to infrared photometry of 117 million equidistant stars, The Astrophysical Journal Supplement Series, 215:9 (34pp), 2014.
13. P. Kroupa, On the variation of the initial mass function, MNRAS, vol. 332, 231-246, 2001.
14. V. Vansevičius, K. Kodaira, D. Narbutis ir kt., Compact star clusters in the M31 disk, The Astrophysical Journal, 703:1872-1883, 2009.
15. A. E. Dolphin, Numerical methods of star formation history measurement and applications to seven dwarf spheroidals, MNRAS, vol. 332, 91-108, 2002.
16. D. L. Block, F. Bournaud, F. Combes ir kt., An almost head-on collision as the origin of two off-centre rings in the Andromeda galaxy, Nature Journal, 443:882-834, 2006.

Santrumpų sąrašas

A	Atrinktų spiečių katalogas (PHAT apžvalgos B11-B23 blokai)
ACS	Advanced Camera for Surveys – moderni HST CCD kamera apžvalgoms
AP	Andromeda Project – Andromedos projektas (https://www.andromedaproject.org/)
CCD	Charge Coupled Device – krūvio sąsajos įtaisas
CFR	Cluster Formation Rate – žvaigždžių spiečių formavimosi sparta
CMD	Color Magnitude Diagram – spalvos rodiklio-ryškio diagrama
FUV	Far Ultraviolet – tolimi ultravioletiniai spinduliai, bangos ilgių 122–200 nm intervale
G	Johnson ir kt. (2015) publikuotas „*Galaktikų*“ katalogas – PHAT apžvalgos B11-B23 blokai
G_{all}	Johnson ir kt. (2015) publikuotas „*Galaktikų*“ katalogas – visi PHAT apžvalgos blokai
GALEX	The Galaxy Evolution Explorer (GALEX) – kosminis teleskopas skirtas galaktikų stebėjimams UV spektriniam diapazone
HST	Hubble Space Telescope – Hablo kosminis teleskopas
IMF	Initial Mass Function – žvaigždžių pradinių masių funkcija
MAST	Mikulski Archive for Space Telescopes – Mikulski archyvas, kuriame kaupiami kosminių teleskopų stebėjimų duomenys (https://archive.stsci.edu/index.html)
NIR	Near Infrared – artimi infraraudonieji spinduliai, bangos ilgių 750–1400 nm intervale
NUV	Near Ultraviolet – artimi ultravioletiniai spinduliai, bangos ilgių 300–400 nm intervale
P	Johnson ir kt. (2015) publikuotas „*Papildomų objektų*“ katalogas – PHAT apžvalgos B11-B23 blokai
P_{all}	Johnson ir kt. (2015) publikuotas „*Papildomų objektų*“ katalogas – visi PHAT apžvalgos blokai
PHAT	Panchromatic Andromeda Treasury Program – plataus spektrinio diapazono Andromedos galaktikos apžvalga (https://archive.stsci.edu/prepds/phat/)
PT	Paukščių Takas
S	Johnson ir kt. (2015) publikuotas „*Spiečių*“ katalogas – PHAT apžvalgos B11-B23 blokai
S_{all}	Johnson ir kt. (2015) publikuotas „*Spiečių*“ katalogas – visi PHAT apžvalgos blokai
SSP	Simple Stellar Population – paprasta žvaigždžių populiacija, tai vienu metu iš to paties molekulinio debesies gimusių žvaigždžių populiacija
S/N	Signal to Noise ratio – signalo ir triukšmo santykis
WFC3	Wide Field Camera 3 – moderni plataus lauko HST CCD kamera apžvalgoms

Priedas Nr. 1

1.1 lentelė. Nustatyti *„Atrinktų spiečių“* (**A**) (856 obj.) katalogo amžius, masė ir ekstinkcija, kai metalingumas [Fe/H] = 0

ID	RA, °	DEC, °	Amžius, $\log_{10}$(t/yr)	Masė, $\log_{10}(M/M_{\odot})$	E(B-V) , mag
1706	11,39349	41,77498	8,15	3,2	0,4
2073	11,70179	41,96352	8,3	3,2	0,7
2956	11,10299	41,9198	9	3,8	0,6
3164	11,26775	41,63517	7,9	3,25	0,34
3270	11,32236	41,85462	9,1	3,75	0,45
3397	11,34408	41,6507	8,5	2,9	0,17
3460	11,40369	41,80894	7,8	2	0,06
3468	11,35278	41,68071	8,4	3,1	0,47
3548	11,33977	41,70738	7,4	2,25	0,27
3556	11,27197	41,93697	7,7	2,8	0,42
3621	11,16166	41,90742	7,65	2,55	0,07
3638	11,41056	41,89813	7,2	3,25	0,96
…	…	…	…	…	…
9189	11,46097	41,73917	8,05	3,4	0,62
9214	11,24532	41,89961	7,75	3,15	0,58
9225	11,31545	42,02186	7,7	2,35	0,42

Pastaba. ID, RA, DEC vertės paimtos iš Johnson ir kt. (2015) straipsnio.

1.2 lentelė. Nustatyti *„Spiečių“* (**S**) (1612 obj.) katalogo amžius, masė ir ekstinkcija, kai metalingumas [Fe/H] = 0

ID	RA, °	DEC, °	Amžius, $\log_{10}$(t/yr)	Masė, $\log_{10}(M/M_{\odot})$	E(B-V) , mag
1	11,43552	41,69856	9,1	4,45	0,07
2	11,36651	41,70101	8,95	3,75	0,02
3	11,47129	42,04925	8,8	3,35	0,01
4	11,47466	42,03835	9,15	4,45	0,03
6	11,12445	41,8556	8,55	3,8	0,09
7	11,58366	42,25498	8,3	3,3	0,17
9	11,3631	41,72914	8,9	4,4	0,1
11	11,81412	42,10899	8,35	3,6	0,39
12	11,45697	41,65734	8,9	4,2	0,32
13	11,43977	41,76456	8,9	4,3	0,03
14	11,14083	41,88189	8,3	3,95	0,21
17	11,4904	42,02752	8,55	3,7	0,32
…	…	…	…	…	…
5575	11,30116	41,91398	8	3,05	0,46
5579	11,08535	41,81275	9,1	3,3	0,06
5823	11,43648	41,88822	8,2	4,9	1,91

Pastaba. ID, RA, DEC vertės paimtos iš Johnson ir kt. (2015) straipsnio.

Eimantas Kriščiūnas

Andromedos galaktikos žvaigždžių spiečių fotometrinės savybės

Santrauka

Šiame darbe pristatyti PHAT apžvalgos stebėjimų duomenys ir aptariami metodai, kuriais naudojantis Johnson ir kt. (2015) sudarė Andromedos galaktikos spiečių, galaktikų ir papildomų objektų katalogus. Iš šių katalogų pagal parinktus kriterijus, buvo atrinkti objektai, iš kurių sudarytas „*Atrinktų spiečių*“ katalogas. Nustatyti šių objektų parametrai, aptartos jų savybės.

DARBO TIKSLAS: ištirti Andromedos (M31) galaktikos žvaigždžių spiečių savybes.

UŽDAVINIAI:

1. Sukurti PHAT apžvalgos žvaigždžių spiečių klasifikavimo metodiką.
2. Nustatyti Andromedos galaktikos žvaigždžių spiečių fotometrines savybes.
3. Ištirti Andromedos galaktikos žvaigždžių spiečių parametrų skirstinius.

IŠVADOS:

1. Pagal šiame darbe nustatytas f parametrų ribines vertes ($f_{cl} > 0{,}2$, $f_{clg} > 0{,}2$, $f_g \leq 0{,}5$) iš Johnson ir kt. (2015) „*Galaktikų*“ ir „*Papildomų objektų*“ katalogų objektų, sudarytas 876 objektus turintis „*Atrinktų spiečių*“ (**A**) katalogas.
2. Mūsų nustatytos „*Spiečių*“ (**S**) ir „*Atrinktų spiečių*“ (**A**) katalogų amžiaus, masės, ekstinkcijos parametrų vertės parodė, kad **A** katalogas papildo **S** katalogą mažesnės masės, blyškesniais objektais. Amžiaus skirstinių maksimumų sutapimas rodo, kad tiek **A**, tiek **S** kataloguose daugiausia spiečių yra ties 100 mln. ir 1 mlrd. metų.
3. **A** katalogo spiečiai, kurių amžius $\log_{10} t < 7{,}5$ (≈32 mln. m.) metų, masė $\log_{10} 3 \leq M_o < \log_{10} 4{,}5$ ($\approx 32 \cdot 10^3\ M_\odot$) išsidėsto išskirtinai žvaigždėdaros srityse.
4. Stochastinių spiečių metodu nustatyti „*1 grupės*“ spiečiai (kurių paklaidos σ_{F275W}, $\sigma_{F336W} < 0{,}15$ mag, σ_{F475W}, $\sigma_{F814W} < 0{,}1$ mag, σ_{F110W}, $\sigma_{F160W} < 0{,}2$ mag) apima platų amžiaus ir masės verčių intervalą. Tai įrodo, kad šis metodas tinka įvairių spiečių parametrų nustatymui, kai turimi tikslūs fotometriniai duomenys.
5. Lyginant nustatytus **S** katalogo parametrus su de Meulenaer ir kt. (2017) duomenimis PHAT apžvalgos B11-B23 blokuose, galime teigti, kad mūsų nustatyti žvaigždžių spiečių parametrai gan tiksliai sutampa su kitų autorių duomenimis.

Eimantas Kriščiūnas

Photometric Properties of Star Clusters in the Andromeda Galaxy

Summary

In this study we discuss PHAT survey data and catalogue construction methods applied by Johnson et al. (2015) in order to produce star, galaxy, and ancillary object catalogues for the northern part of the Andromeda galaxy. By analysing these catalogues we derive new criteria and select objects for a new star cluster catalogue. Derived object parameters and properties are discussed.

Main objective: to analyse the properties of star clusters in Andromeda (M31) galaxy.

Main tasks:

1. Develop a method for the PHAT survey object classification.
2. Perform photometric properties analysis of star clusters in Andromeda galaxy.
3. Investigate object parameter distributions of star clusters in Andromeda galaxy.

Conclusions

1. In order to improve star cluster catalogue **S** published by Johnson et al. (2015), we determined new limits of the parameter validity: $f_{cl} > 0.2$, $f_{clg} > 0.2$, $f_g \leq 0.5$, visually analysed 1291 object images, and compiled a new catalogue (**A**) containing 876 star clusters.
2. From derived **S** and **A** catalogue parameters, we improve **S** catalogue with low mass star clusters. Age distribution shows that both catalogues have most objects at the age of 100 Myr and 1 Gyr.
3. Young **A** catalogue star clusters with age $\log_{10}t < 7.5$ (≈32 Myr), mass $\log_{10}3 \leq M_{\odot} < \log_{10}4.5$ ($\approx 32 \cdot 10^3$ $M_{\odot}$) have a distinctive distribution in the star forming ring of Andromeda galaxy.
4. *„Group 1“* objects of **A** catalogue (with photometric errors σ_{F275W}, $\sigma_{F336W} < 0.15$ mag, σ_{F475W}, $\sigma_{F814W} < 0.1$ mag, σ_{F110W}, $\sigma_{F160W} < 0.2$ mag) have a wide parameter distribution in age and mass intervals, which proves that our stochastic model method works with various clusters, when we use accurate photometric data.
5. By comparing **S** catalogue star cluster parameters with de Meulenaer et al. (2017) data, we conclude that age and mass parameters are in agreement with other studies.