

VILNIAUS UNIVERSITETAS

Donatas Narbutis

ŽVAIGŽDŽIŲ SPIEČIAI
M31 GALAKTIKOS PIETVAKARINĖJE DALYJE.
FOTOMETRINĖ APŽVALGA IR POPULIACIJOS SAVYBĖS

Daktaro disertacijos santrauka

Fiziniai mokslai, fizika (02 P)

Vilnius, 2010

Disertacija rengta 2006–2010 metais Vilniaus universitete.

Mokslinis vadovas:

Dr. Vladas Vansevičius (Vilniaus universitetas, Fizinių ir technologijos mokslų centro Fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Disertacija ginama Vilniaus universiteto Fizikos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas:

Habil. dr. Žilvinas Andrius Kancleris (Fizinių ir technologijos mokslų centro Puslaidininkių fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Nariai:

Dr. Rimvydas Janulis (Vilniaus universiteto Teorinės fizikos ir astronomijos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Dr. Algirdas Kazlauskas (Vilniaus universiteto Teorinės fizikos ir astronomijos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Prof. habil. dr. Arūnas Krotkus (Fizinių ir technologijos mokslų centro Puslaidininkių fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Dr. Julius Sperauskas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Oponentai:

Dr. Arūnas Kučinskas (Vilniaus universiteto Teorinės fizikos ir astronomijos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Doc. dr. Romualda Lazauskaitė (Vilniaus pedagoginis universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Disertacija bus ginama viešame Fizikos mokslo krypties tarybos posėdyje 2010 m. rugsėjo mėn. 30 d. 15:00 Vilniaus universiteto Astronomijos observatorijoje.

Adresas: M. K. Čiurlionio 29, LT-03100, Vilnius, Lietuva

Telefonas: (+370-5) 239 8760; Faksas: (+370-5) 239 8767

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2010 m. rugpjūčio mėn. 27 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto ir Fizinių ir technologijos mokslų centro Fizikos instituto bibliotekose.

VILNIUS UNIVERSITY

Donatas Narbutis

STAR CLUSTERS
IN THE M31 GALAXY SOUTHWEST FIELD.
PHOTOMETRIC SURVEY AND POPULATION PROPERTIES

Summary of Doctoral Dissertation

Physical sciences, Physics (02 P)

Vilnius, 2010

Doctoral Dissertation was completed during 2006–2010 at Vilnius University.

Scientific supervisor:

Dr. Vladas Vansevicius (Vilnius University, Institute of Physics of Center for Physical Sciences and Technology, Physical sciences, Physics – 02 P)

Council of the Doctoral Dissertation defense:

Chairman:

Habil. dr. Žilvinas Andrius Kancleris (Semiconductor Physics Institute of Center for Physical Sciences and Technology, Physical sciences, Physics – 02 P)

Members:

Dr. Rimvydas Janulis (Institute of Theoretical Physics and Astronomy of Vilnius University, Physical sciences, Physics – 02 P)

Dr. Algirdas Kazlauskas (Institute of Theoretical Physics and Astronomy of Vilnius University, Physical sciences, Physics – 02 P)

Prof. habil. dr. Arūnas Krotkus (Semiconductor Physics Institute of Center for Physical Sciences and Technology, Physical sciences, Physics – 02 P)

Dr. Julius Sperauskas (Vilnius University, Physical sciences, Physics – 02 P)

Opponents:

Dr. Arūnas Kučinskas (Institute of Theoretical Physics and Astronomy of Vilnius University, Physical sciences, Physics – 02 P)

Doc. dr. Romualda Lazauskaitė (Vilnius pedagogical university, Physical sciences, Physics – 02 P)

Doctoral Dissertation will be defended at the public meeting of the Physical Sciences Council held at Vilnius University Observatory at 3:00 p.m. on 30 September, 2010.

Address: M. K. Čiurlionio 29, LT–03100, Vilnius, Lithuania

Tel.: (+370–5) 239 8760; Fax.: (+370–5) 239 8767

Summary of the Doctoral Dissertation was mailed on 27 August 2010.

The Dissertation is available at the libraries of Vilnius University and Institute of Physics of Center for Physical Sciences and Technology.

Tyrimo motyvacija ir mokslinis naujumas

Galaktikų formavimasis ir evoliucija – viena svarbiausių šiuolaikinės astrofizikos problemų, į kurią atsakymų ieškoma tolimų ir artimų objektų kosmogonijoje. Patikimos teorijos sukūrimas neįmanomas be fizikinių procesų, sukeliančių ir sustabdančių žvaigždžių formavimąsi, supratimo, nes būtent žvaigždėdaros sparta lemia galaktikų šviesio, cheminę ir struktūrinę evoliuciją.

Šiuo metu detaliam išnagrinėti tik pavieniai Paukščių Tako galaktikos (toliau – Galaktika) žvaigždėdaros židiniai, nes disko globalinių struktūrų tyrimams trukdo Saulės sistemos padėtis netoli disko (sąlyginai didelio optinio tankio) plokštumos bei tik apytiksliai žinomi atstumai iki tolimesnių Galaktikos objektų. Todėl siekiant detalesnės globalios žvaigždėdaros procesų dėsningumą sampratos būtina pasitelkti artimų morfologiškai panašių į mūsų Galaktiką žvaigždžių sistemų tyrimus. Šiam tikslui puikiai tinka artimiausia spiralinė galaktika M31. Atskirų šios galaktikos struktūrų – spiralinių vijų ir jose esančių žvaigždėdaros sričių – stebėjimai leidžia nustatyti žvaigždžių formavimosi procesų priežastis, pasekmes ir jų įtaką visos galaktikos žvaigždžių populiacijų evoliucijai.

Išsamūs žvaigždžių spiečių tyrimai visos galaktikos mastu daugiausia buvo atliekami artimose diskinėse ir nykštukinėse galaktikose. Mūsų tiriamasis objektas – spiralinė galaktika, savo savybėmis gali būti mūsų Galaktikos analogu. Žvaigždžių spiečiai – puiki žvaigždėdaros proceso tyrimo priemonė. Daugėjant įrodymų, kad visos žvaigždės formuojasi spiečiuose, keičiasi ir pačių spiečių evoliucinio statuso samprata. Pastaraisiais metais sukurta integruotos galaktinės pradinių masių funkcijos teorija remiasi empirinėmis prielaidomis, kurių viena svarbiausių – žvaigždžių spiečių masių funkcija ir ją lemiantys veiksniai. Į pagrindinį klausimą, ar spiečių masių funkcija yra universali, šiuo metu atsakyti galima tik remiantis stebėjimais.

Daug žvaigždžių spiečių tyrimų M31 galaktikoje buvo skirti jų struktūros ir evoliucijos analizei; žr. Kodaira (2002) ir Caldwell et al. (2009) apžvalgas bei darbus cituotus jose. Spiečių stebėjimų programos Hubble kosminiu teleskopu (*HST*) M31 galaktikoje buvo neseniai atliktos Barmby et al. (2002, 2007), Williams & Hodge (2001b,a). Išsamiai *HST* WFPC2/ACS archyvų analizė ieškant spiečių buvo atlikta Krienke & Hodge (2007, 2008).

Nors M31 galaktika labai patogus objektas tokio pobūdžio tyrimams, dėl danguje užimamo didelio ploto ir tankaus žvaigždžių lauko iki šiol nebuvo atlikta homogenišku žvaigždžių spiečių populiacijos tyrimų. Tačiau plataus lauko CCD kamera Suprime-

Cam, veikianti 8 m skersmens Subaru teleskopo pagrindiniame židinyje ir geros stebėjimo sąlygos leido užregistruoti aukštos kokybės M31 galaktikos pietvakarinės srities nuotraukas. Papildžius mūsų gautus duomenis publikuotais kitų antžeminių teleskopų stebėjimų rezultatais bei *HST*, *Spitzer* ir *GALEX* kosminių observatorijų duomenimis, pirmą kartą buvo nustatyti žvaigždžių spiečių evoliuciniai parametrai reprezentatyviai M31 galaktikos disko spiečių imčiai ir jų savybės palygintos su kitų galaktikų spiečių savybėmis.

Tyrimo tikslai

1. Ištirti M31 galaktikos pietvakarinės srities žvaigždžių spiečių populiacijos savybes.
2. Sukurti žvaigždžių spiečių analizės metodus plataus lauko CCD fotometrijai ir struktūrinių bei evoliucinių parametru nustatymui.

Uždaviniai

1. Sukurti metodą ir programą plataus lauko mozaikinių CCD nuotraukų, skirtų tiksliai fotometrijai, redukcijoms.
2. Sukurti metodą ir programą pusiau išskiriamų žvaigždžių spiečių struktūrinių parametru nustatymui.
3. Sukurti metodą žvaigždžių spiečių evoliucinių parametru nustatymui, remiantis daugiaspalve plačiajuoste fotometrija.
4. Atlikti homogenišką žvaigždžių spiečių paiešką pietvakarinėje M31 galaktikos srityje, parengti spiečių daugiabangių stebėjimų nuotraukas (bangų ilgių diapazone nuo 150 nm iki 21 cm) struktūrinių ir evoliucinių parametru analizei.
5. Ištirti spiečių populiacijos pietvakarinėje M31 galaktikos srityje savybes, nustatyti spiečių formavimosi istoriją, masių funkciją ir suardymo spartą, palyginti rezultatus su spiečių savybėmis kitose galaktikose.

Ginami teiginiai

1. M31 galaktikos pietvakarinės srities 285 žvaigždžių spiečių daugiaspalvių fotometrinių matavimų rezultatai ir jų pagrindu nustatyti struktūriniai bei evoliuciniai spiečių parametrai.

2. Sukurti žvaigždžių spiečių analizės metodai ir programos jų taikymui: (a) plataus lauko mozaikinėmis CCD kameromis gautų nuotraukų redukavimui; (b) pusiau išskiriamų žvaigždžių spiečių struktūrinių parametrų nustatymui; (c) žvaigždžių spiečių klasifikavimui remiantis daugiaspalvės plačiajuostės fotometrijos duomenimis.
3. Galaktikos M31 pietvakarinės srities žvaigždžių spiečių populiacijos parametrai: (a) spiečių formavimosi spartos maksimumas prieš ~ 70 mln. m.; (b) žvaigždžių dalis, išliekanti spiečiuose iki 100 mln. m. amžiaus yra $\sim 10\%$; (c) vidutiniškai $10^4 M_{\odot}$ masės spiečius išlieka nesuardytas iki ~ 300 mln. m.; (d) masyvių spiečių ($\gtrsim 3000 M_{\odot}$) masių skirstinys gerai aprašomas Schechter funkcija su charakteringąja mase $m^* = 2 \times 10^5 M_{\odot}$.

Publikacijos disertacijos tema ISI WoS žurnaluose

1. Kodaira K., Vansevičius V., Bridžius A., Komiyama Y., Miyazaki S., Stonkutė R., Šablevičiūtė I., **Narbutis D.** 2004, *A Survey of Compact Star Clusters in the South-West Field of the M31 Disk* // Publications of the Astronomical Society of Japan, 56, 1025–1040.
2. **Narbutis D.**, Vansevičius V., Kodaira K., Šablevičiūtė I., Stonkutė R., Bridžius A. 2006, *A Survey of Compact Star Clusters in the South-West Field of the M31 Disk. UBVRI Photometry* // Baltic Astronomy, 15, 461–469.
3. **Narbutis D.**, Stonkutė R., Vansevičius V. 2006, *A Comparison of the Published Stellar Photometry Data in the South-West Field of the Galaxy M31 Disk* // Baltic Astronomy, 15, 471–480.
4. Šablevičiūtė I., Vansevičius V., Kodaira K., **Narbutis D.**, Stonkutė R., Bridžius A. 2006, *A Survey of Compact Star Clusters in the South-West Field of the M31 Disk. Structural Parameters* // Baltic Astronomy, 15, 547–560.
5. **Narbutis D.**, Vansevičius V., Kodaira K., Bridžius A., Stonkutė R. 2007, *Photometry of Star Clusters in the M31 Galaxy. Aperture Size Effects* // Baltic Astronomy, 16, 409–420.
6. **Narbutis D.**, Bridžius A., Stonkutė R., Vansevičius V. 2007, *Accuracy of Star Cluster Parameters from Integrated UBVRI Photometry* // Baltic Astronomy, 16, 421–429.
7. Šablevičiūtė I., Vansevičius V., Kodaira K., **Narbutis D.**, Stonkutė R., Bridžius A. 2007, *A Survey of Compact Star Clusters in the S-W Field of*

- the M31 Disk. Structural Parameters II* // *Baltic Astronomy*, 16, 397–408.
8. **Narbutis D.**, Vansevičius V., Kodaira K., Bridžius A., Stonkutė R. 2008, *A Survey of Star Clusters in the M31 South-West Field. UBVRI Photometry and Multi-Band Maps* // *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 177, 174–180.
 9. Bridžius A., **Narbutis D.**, Stonkutė R., Deveikis V., Vansevičius V. 2008, *Accuracy of Star Cluster Parameters from Integrated UBVRIJHK Photometry* // *Baltic Astronomy*, 17, 337–349.
 10. Deveikis V., **Narbutis D.**, Stonkutė R., Bridžius A., Vansevičius V. 2008, *SIMCLUST – a Program to Simulate Star Clusters* // *Baltic Astronomy*, 17, 351–361.
 11. Kodaira K., Vansevičius V., Stonkutė R., **Narbutis D.**, Bridžius A. 2008, *Compact Star Clusters in M31 Disk* // *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 399, 431–438.
 12. Vansevičius V., Kodaira K., **Narbutis D.**, Stonkutė R., Bridžius A., Deveikis V., Semionov D. 2009, *Compact Star Clusters in the M31 Disk* // *The Astrophysical Journal*, 703, 1872–1883.
 13. **Narbutis D.**, Vanagas R., Vansevičius V. 2009, *STARL – a Program to Correct CCD Image Defects* // *Baltic Astronomy*, 18, 219–224.

Kitos publikacijos ISI WoS žurnaluose

1. Kidger M., Martin-Luis F., **Narbutis D.**, Perez-Garcia A. 2003, *The Atmospheric Extinction Profile in the Canary Islands: I – The Visible Extinction* // *The Observatory*, 123, 145–150.
2. Kidger M., Martin-Luis F., Nicolas Gonzalez-Perez J., **Narbutis D.** 2004, *A Resource for Multifrequency Campaigns: a Revised Catalogue of UBVRIJHK Calibration Stars in AGN/blazar Fields* // *New Astronomy Reviews*, 48, 505–507.
3. Kidger M., Martin-Luis F., **Narbutis D.** 2004, *A Search for Rapid Optical Spectral Variability in Blazars* // *New Astronomy Reviews*, 48, 509–512.
4. Vansevičius V., Arimoto N., Hasegawa T., Ikuta C., Jablonka P., **Narbutis D.**, Ohta K., Stonkutė R., Tamura N., Vansevičius V., Yamada Y. 2004, *The Full-fledged Dwarf Irregular Galaxy Leo A* // *The Astrophysical Journal Letters*, 611, L93–L96.
5. Pignata G., Patat F., Benetti S., Blinnikov S., Hillebrandt W., Kotak R.,

- Leibundgut B., Mazzali P., Meikle P., Qiu Y., Ruiz-Lapuente P., Smartt S., Sorokina E., Stritzinger M., Stehle M., Turatto M., Marsh T., Martin-Luis F., McBride N., Mendez J., Morales-Rueda L., **Narbutis D.**, Street R. 2004, *Photometric Observations of the Type Ia SN 2002er in UGC 10743* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 355, 178–190.
6. Kidger M., Martin-Luis F., Artigue F., Gonzalez-Perez J., Perez-Garcia A., **Narbutis D.** 2006, *The Visible and Near-Infrared Extinction at the Canary Islands International Observatories – Paper II* // The Observatory, 126, 166–176.
7. Stonkutė R., Vansevičius V., Arimoto N., Hasegawa T., **Narbutis D.**, Jablonka P., Ohta K., Tamura N., Yamada Y. 2008, *An Extended Star Cluster at the Outer Edge of the Spiral Galaxy M33* // The Astronomical Journal, 135, 1482–1487.

Pranešimai konferencijose disertacijos tema

1. **Narbutis D.**, Vansevičius V., Kodaira K., Bridžius A., Šablevičiūtė I., Stonkutė R., *Star Clusters in the Andromeda Galaxy* // „12 Questions on Star and Massive Star Cluster Formation” (red. T. Wilson ir M. Kissler-Patig), Garching (Vokietija) 2007 liepos 3–6 d. (žodinis pranešimas).
2. Kodaira K., Vansevičius V., Stonkutė R., **Narbutis D.**, Bridžius A., *Compact Star Clusters in M31 Disk* // „The 1st Subaru International Conference: Panoramic Views of Galaxy Formation and Evolution” (red. T. Kodama, T. Yamada, K. Aoki), Shonan Village Center, Hayama (Japonija) 2007 gruodžio 11–16 d. (žodinis pranešimas).
3. **Narbutis D.**, Vansevičius V., Kodaira K., Stonkutė R., Bridžius A., Semionov D., Deveikis V., *Properties of Star Clusters in the M31 Disk* // „From Taurus to the Antennae” (red. S. Goodwin), University of Sheffield (Anglija) 2008 rugpjūčio 4–8 d. (žodinis pranešimas).
4. **Narbutis D.**, Vansevičius V., Kodaira K., Stonkutė R., Bridžius A., Semionov D., Deveikis V., *Properties of Star Clusters in the M31* // „XX Canary Islands Winter School of Astrophysics” (red. D. Martinez-Delgado), Kanarų astrofizikos institutas (Ispanija) 2008 lapkričio 17–28 d. (stendinis pranešimas).
5. Deveikis V., **Narbutis D.**, Vansevičius V., Bridžius A., Stonkutė R., *Stochastinis žvaigždžių spiečių modeliavimas* // „38-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija” (red. J. Požela, J. Vaitkus), Vilniaus universitetas, 2009 birželio 8–10 d. (stendinis pranešimas).
6. **Narbutis D.**, Deveikis V., Stonkutė R., Semionov D., Bridžius A., Kodaira K.,

Vansevičius V., *Andromedos galaktikos disko kompaktiškieji žvaigždžių spiečiai* // „38-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija” (red. J. Požela, J. Vaitkus), Vilniaus universitetas, 2009 birželio 8–10 d. (žodinis pranešimas).

Asmeninis indėlis

Sukūriau metodą ir didžiąją dalį programų aukštos kokybės plataus lauko mozaikinių CCD nuotraukų, skirtų tiksliai fotometrijai, redukcijoms. Sukūriau metodą ir prisidėjau kuriant programą pusiau išskiriamų žvaigždžių spiečių struktūrinių parametrų nustatymui. Atlikau spiečių evoliucinių parametrų nustatymo remiantis daugiaspalve plačiajuoste fotometrija metodo galimybių tyrimą. Prisidėjau atliekant homogenišką žvaigždžių spiečių paiešką pietvakarinėje M31 galaktikos srityje. Parengiau spiečių daugiabangių stebėjimų nuotraukas ir atlikau jų fotometriją. Nustačiau spiečių struktūrinius parametrus ir prisidėjau nustatant jų evoliucinius parametrus. Ištiriaiu M31 galaktikos spiečių populiacijos savybes ir atlikau jų evoliucijos analizę.

Disertacijos struktūra

Daktaro disertacija susideda iš įvado, kuriame pateikiama trumpa žvaigždžių spiečių, kaip priemonės žvaigždėdaros procesui galaktikų diskuose tirti, apžvalga, trijų skyrių, išvadų ir literatūros sąrašo.

1 skyrius: apibūdinami stebėjimų duomenys ir jų redukcijos, homogeniška žvaigždžių spiečių paieška pietvakarinėje M31 galaktikos srityje, fotometrijos duomenys, struktūriniai parametrai, identifikavimas nuotraukose, gautose bangos ilgių diapazone nuo 150 nm iki 21 cm.

2 skyrius: aprašomi sukurti žvaigždžių spiečių analizės metodai ir programinė įranga skirta: (a) plataus lauko mozaikinėmis CCD kameromis gautų nuotraukų redukavimui; (b) pusiau išskiriamų žvaigždžių spiečių struktūrinių parametrų nustatymui; (c) žvaigždžių spiečių klasifikavimui remiantis daugiaspalvės plačiajuostės fotometrijos duomenimis.

3 skyrius: pateikiami spiečių populiacijos pietvakarinėje M31 galaktikos srityje savybių tyrimo rezultatai: (a) nustatyta spiečių formavimosi istorija; (b) masių funkcija; (c) suardymo sparta. Nustatyti parametrai palyginti su spiečių savybėmis kitose galaktikose.

Tyrimo metodai ir rezultatai

M31 galaktikos kompaktiškųjų žvaigždžių spiečių apžvalga pietvakarinėje srityje buvo atlikta naudojant Suprime-Cam (Miyazaki et al. 2002) mozaikines nuotraukas, kurios apima $17.5' \times 28.5'$ plotą (Kodaira et al. 2004).

Pradžioje buvo atlikti 50 ryškių ($17.0 \lesssim V \lesssim 19.0$) M31 galaktikos spiečių tyrimai (Narbutis et al. 2006) – buvo nustatyti jų struktūriniai parametrai iš radialinių paviršinio šviesio profilių naudojant King (King 1962) ir EFF (Elson et al. 1987) modelius. Pusės šviesio spindulio nuo absoliutinio V ryškio diagrama rodo, kad kompaktiškieji M31 galaktikos spiečiai užima tą pačią sritį, kaip ir mažo šviesio mūsų Galaktikos kamuoliniai spiečiai (Šablevičiūtė et al. 2007). King modelio parametrų erdvėje M31 galaktikos spiečiai panašūs į Galaktikos kamuolinius spiečius (Šablevičiūtė et al. 2006), o EFF modelio parametrų erdvėje – į masyvius Didžiojo (Mackey & Gilmore 2003) ir Mažojo (Hill & Zaritsky 2006) Magelano debesų spiečius (Šablevičiūtė et al. 2006).

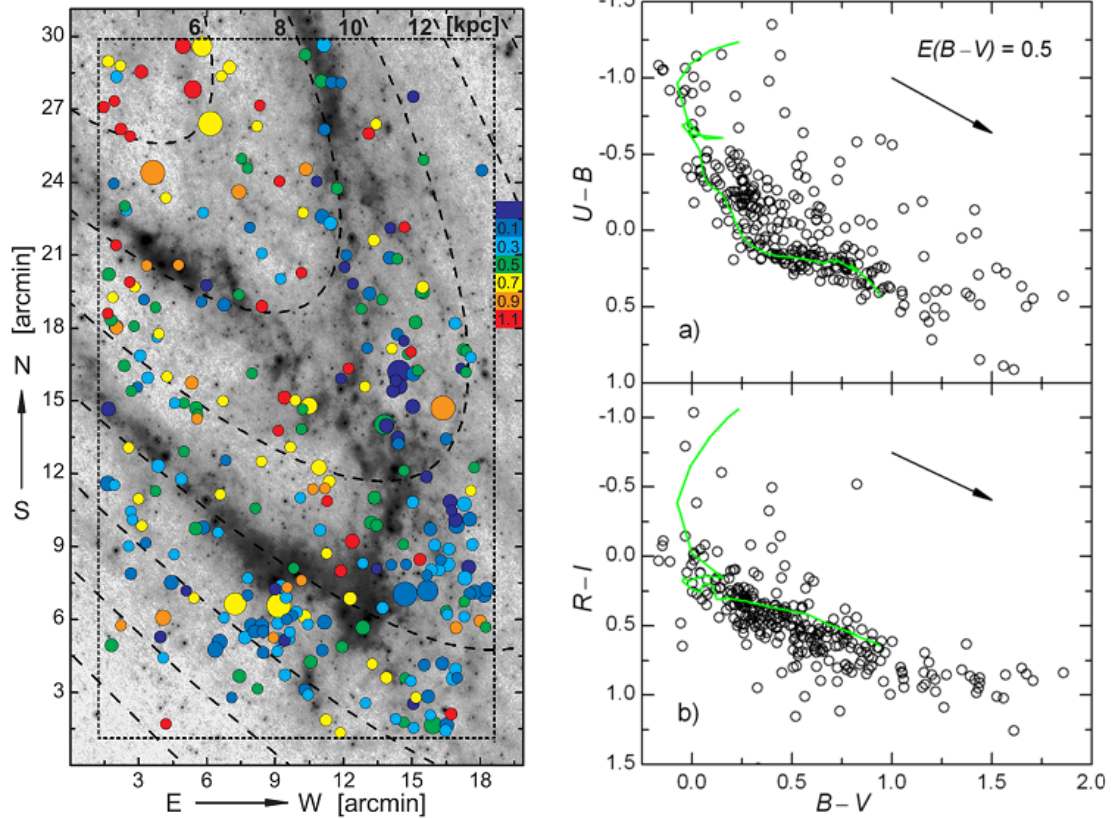
Šie rezultatai paskatino pagilinti spiečių apžvalgą iki $V \lesssim 20.5$ integralinio ryškio. Tuo tikslu buvo atlikta tiksli 285 spiečių integralinė $UBVRI$ fotometrija ir homogenizuoti daugiabangių stebėjimų duomenys, įgalinę atlikti detalią M31 galaktikos žvaigždžių spiečių analizę iki $M_V \lesssim -4$ absoliutinio ryškio (Narbutis et al. 2008).

Spiečių imtis

Žvaigždžių spiečių paieška Subaru teleskopo Suprime-Cam kamera gautose mozaikinėse M31 galaktikos pietvakarinės srities nuotraukose (1 pav.) buvo atlikta vizualiai. *HST* duomenų archyvo skaitmeninių nuotraukų analizė parodė, kad savo nuotraukose mes patikimai galime atpažinti žvaigždžių spiečius iki $V \sim 20.5$ ryškio, todėl į katalogą buvo įtraukti tik ryškesni objektai (2 pav.). Lyginant su Caldwell et al. (2009) viso M31 galaktikos disko masyviausių spiečių tyrimo rezultatais, dauguma mūsų tirtų M31 spiečių yra mažesnės masės dėl didesnio fotometrinių duomenų gilumo.

Žvaigždžių spiečių apertūrinę $UBVRI$ fotometriją atlikome Massey et al. (2006) publikuotose mozaikinėse nuotraukose, kurios buvo apdorotos pašalinant CCD nuotraukų defektus ir suvienodinant vaizdų skiriamąją gebą. Kiekvieno objekto padėtis tiriamojoje srityje ir išmatuoti žvaigždžių spiečių spalvų rodikliai pavaizduoti 1 pav. Į katalogą yra įtraukti 285 M31 galaktikos žvaigždžių spiečiai, kuriems pateikiami $UBVRI$ fotometrijos rezultatai (Narbutis et al. 2008).

Kiekvienam spiečiui buvo sukurtas daugiabangių nuotraukų bankas, leidžiantis

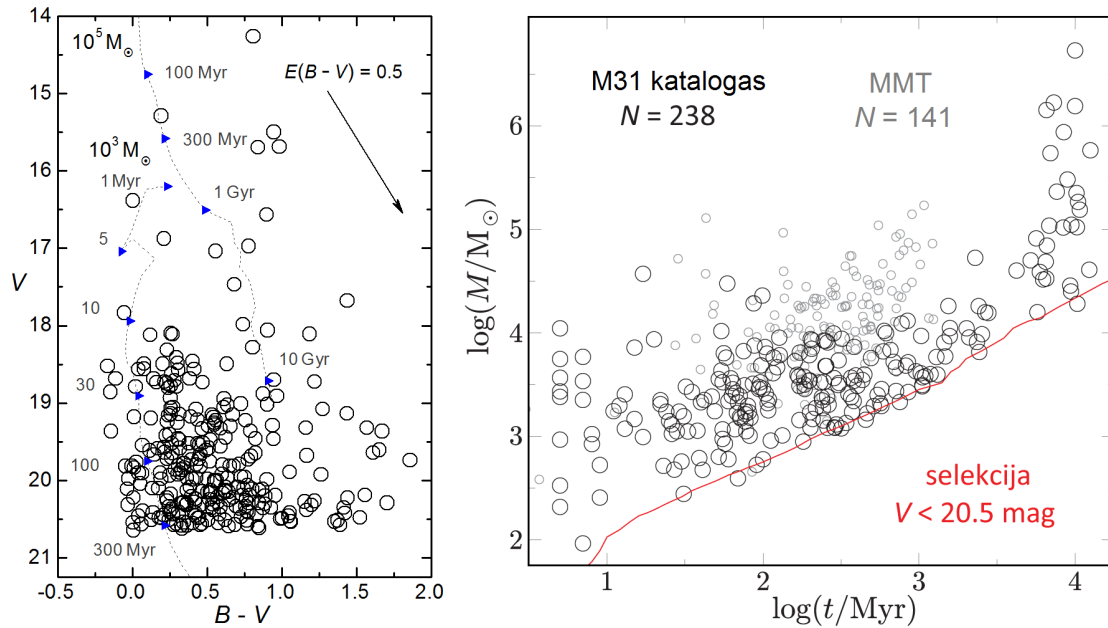


1 pav. Kairėje – M31 galaktikos pietvakarinės srities nuotrauka gauta *Spitzer* teleskopu (bangos ilgis $24\ \mu\text{m}$). Skrituliukai rodo 285 žvaigždžių spiečių padėtis; spalva atitinka $B - V$ spalvos rodiklį, dydis – objekto šviesį. Elipsių segmentai (brūkšninės linijos) žymi vienodą atstumą nuo galaktikos centro. Dešinėje – žvaigždžių spiečių spalvos – spalvos diagramos. Ištininė linija – spiečiaus evoliucijos modelis, rodyklė – tarpžvaigždinės ekstinkcijos vektorius.

įvertinti objekto šviesį ir jo aplinkos savybes ultravioletinėje (*GALEX* kosminis teleskopas), optinėje (Massey et al. 2006) bei infraraudonojoje (2MASS apžvalga ir *Spitzer* kosminis teleskopas) spektro srityse, bei leidžiantis nustatyti neutralaus vandenilio pasiskirstymą spiečiaus aplinkoje (21 cm radijo bangos; WSRT radijo teleskopas) (Narbutis et al. 2008).

Pagal $B - V$ spalvos rodiklį suskirsčius spiečius į grupes (1 pav.) matome, kad mėlynesni (jaunesni) spiečiai yra išsidėstę aplink $24\ \mu\text{m}$ srityje spinduliuojančių karštų tarpžvaigždinių dulkių žiedą, o raudonesni (senesni) spiečiai telkiasi arčiau galaktikos centro.

UBVRI fotometrijos ir daugiabangių nuotraukų duomenys buvo panaudoti žvaigždžių spiečių evoliucinių parametrų (amžiaus, masės, metalingumo) ir ekstinkcijos nustatymui.



2 pav. Kairėje – 285 žvaigždžių spiečių V nuo $B - V$ diagrama su pavaizduotais tarpžvaigždinės ekstinkcijos vektoriumi ir 10^3 bei $10^5 M_{\odot}$ masės spiečių evoliucijos modeliais. Dešinėje – amžiaus ir masės diagrama, didesniais skrituliukais pažymėti M31 galaktikos pietvakarinės srities spiečiai, mažesniais – M31 galaktikos spiečiai iš Caldwell et al. (2009) (MMT). Linija vaizduoja katalogo fotometrines ($V = 20.5$) selekcijos ribą.

Analizės metodai ir programinė įranga

Atliekant dangaus apžvalgas plataus lauko kameromis ryškios žvaigždės pablogina tyrimams naudojamų mozaikinių nuotraukų kokybę. Iki šiol nebuvo programinės įrangos, galinčios šiuos trūkumus ištaisyti korektiškai. Vienas svarbiausių mūsų išspręstų uždavinių yra objektų atpažinimas panaudojant genetinį algoritmą. Programa veikia praktiškai be vartotojo įsikišimo sutaupydama daug interaktyvaus darbo laiko ir atkurdamą sugadintus vaizdus (Narbutis et al. 2009).

Buvo ištirta fotometrijos apertūros dydžio įtaka žvaigždžių spiečių matavimų tikslumui (Narbutis et al. 2007b). Žvaigždžių spiečiai projektuojasi ant galaktikos disko, todėl atliekant jų fotometriją į matavimo apertūrą patenka atsitiktinės žvaigždės ir išmatuoti spiečių spalvos rodikliai gali būti sistemingai paveikti. Tai gali iškreipti spiečių amžiaus ir masės įverčius, nustatomus lyginant stebėjimų duomenis su teoriniais modeliais.

Tyrimą atlikome su visa 285 M31 žvaigždžių spiečių imtimi, matuodami juos pro skirtingo dydžio apertūras. Nustatėme, kad jautriausias apertūros dydžio parinkimui yra $V - I$ spalvos rodiklis dėl raudonųjų milžinių žvaigždžių atsitiktinio išsidėstymo matavimo apertūros atžvilgiu. Raudoniems spiečiams $U - B$ spalvos rodiklis yra sistemingai sumažinamas dėl mėlynų kaimyninių žvaigždžių. Todėl būtina atsižvelgti

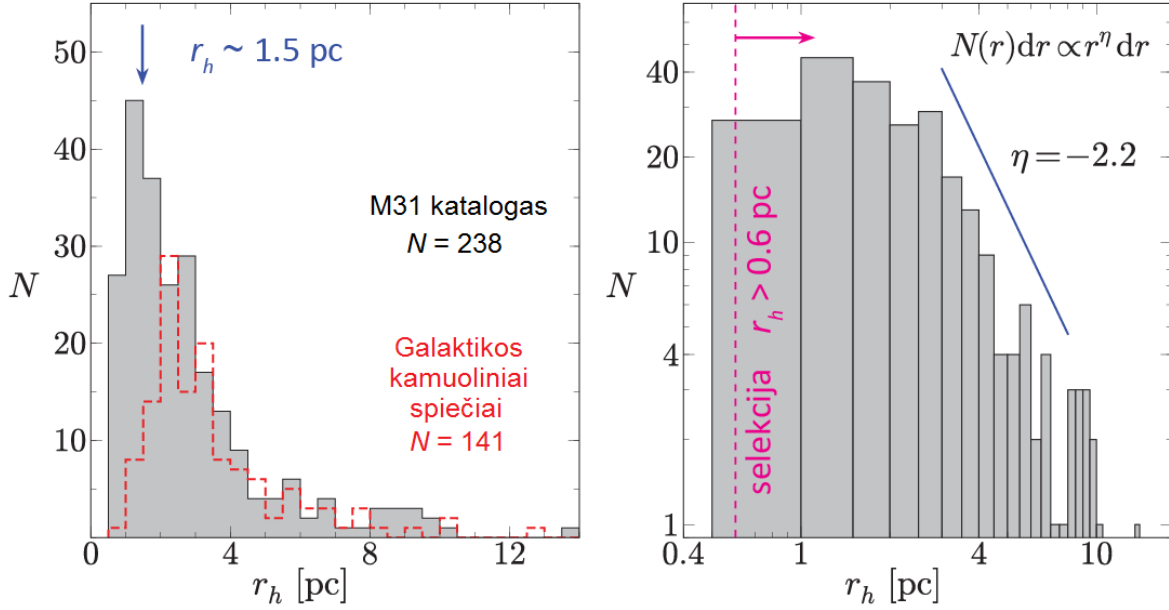
į kaimyninių žvaigždžių poveikį išmatuotiems žvaigždžių spiečių spalvų rodikliams prieš lyginant juos su teoriniais spiečių evoliuciniais modeliais. Palyginę mūsų išmatuotus žvaigždžių spiečių ryškius su *HST* matavimais (Krienke & Hodge 2007) gavome gerą fotometrijos rezultatų sutapimą.

Žvaigždžių spiečių evoliuciniai parametrai buvo nustatyti naudojant SSP (angl. *simple stellar population*) modelių banką, suskaičiuotą su PEGASE (Fioc & Rocca-Volmerange 1997) programine įranga. Spiečių fotometrijos rezultatai buvo lyginami su modelių banko, suskaičiuoto plačiuose spiečių amžiaus, ekstinkcijos ir metalingumo diapazonuose, duomenimis. Atsižvelgiant į objekto fotometrijos tikslumą, modelio parametrų erdvėje išskiriama sritis, kuri atitinka objekto fotometrijos duomenis. Tokiu būdu nustatomi spiečiaus evoliuciniai parametrai (amžius, masė bei metalingumas), ekstinkcija ir jų neapibrėžtumas.

Buvo ištirtos žvaigždžių spiečių parametrų (amžiaus, metalingumo, ekstinkcijos) nustatymo iš plačiajuostės fotometrijos galimybės. Tyrėme plačiai naudojamų *UBVRI* ir *UBVRIJHK* fotometrinių sistemų tinkamumą žvaigždžių spiečių evoliucinių parametrų nustatymui (Narbutis et al. 2007a; Bridžius et al. 2008). Pagrindinė problema – parametrų išsigimimas – buvo išnagrinėta įvairioms žvaigždžių spiečių amžiaus, metalingumo ir ekstinkcijos vertėms ir pasiūlytas būdas jai spręsti pasinaudojant daugiabangių stebėjimų nuotraukomis. Nustatyta, kad M31 galaktikos žvaigždžių spiečių fotometrijos tikslumo, kurį mes pasiekėme, pakanka patikimai spiečių evoliucinei analizei.

Žvaigždžių spiečių struktūrinių parametrų matavimui buvo sukurtas metodas ir genetinio algoritmo pagrindu veikianti programinė įranga (Vansevičius et al. 2009). Žvaigždžių spiečių struktūrinių parametrų nustatymas yra daugiaparametrinis minimizavimo uždavinys, kuomet ieškoma geriausiai stebimą spiečiaus paviršinio šviesio skirstinį nuotraukoje atitinkančio struktūros modelio, tuo pat metu įskaitant taškinio šviesos šaltinio vaizdo išplitimo funkciją. Iki šiol plačiai naudojama programinė įranga (Larsen 1999) šį minimizavimo uždavinį sprendžia „down-hill simplex” metodu, nors yra žinoma, kad šis metodas patenka į lokalius minimumus.

Ypač aktuali lokalių minimumų problema buvo mūsų atliktame M31 galaktikos spiečių tyrime, kur daugumos spiečių vaizdai yra pusiau išskirti (t.y. paviršinio šviesio profilis turi kelis pikus). Genetinio algoritmo, kuris suranda globalų minimumą, pagrindu buvo sukurta ir sėkmingai panaudota programinė įranga žvaigždžių spiečių struktūrinių parametrų matavimui. Ji leidžia automatiškai įskaityti kaimyninių ryškių žvaigždžių įtaką, aprašant jas taškinio šaltinio išplitimo funkcija, ko neatlieka



3 pav. Abiejose diagramose pilka spalva pavaizduotas tas pats M31 galaktikos spiečių pusės šviesio spindulio skirstinys. Mažesnių nei 1.5 pc objektų trūksta dėl selekcijos efektų – riboja naudotų nuotraukų skiriamoji geba. Kairėje pavaizduotas mūsų Galaktikos kamuolinių spiečių skirstinys; dešinėje – $\eta = -2.2$ linija, atitinkanti M51 galaktikos spiečių dydžių skirstinį.

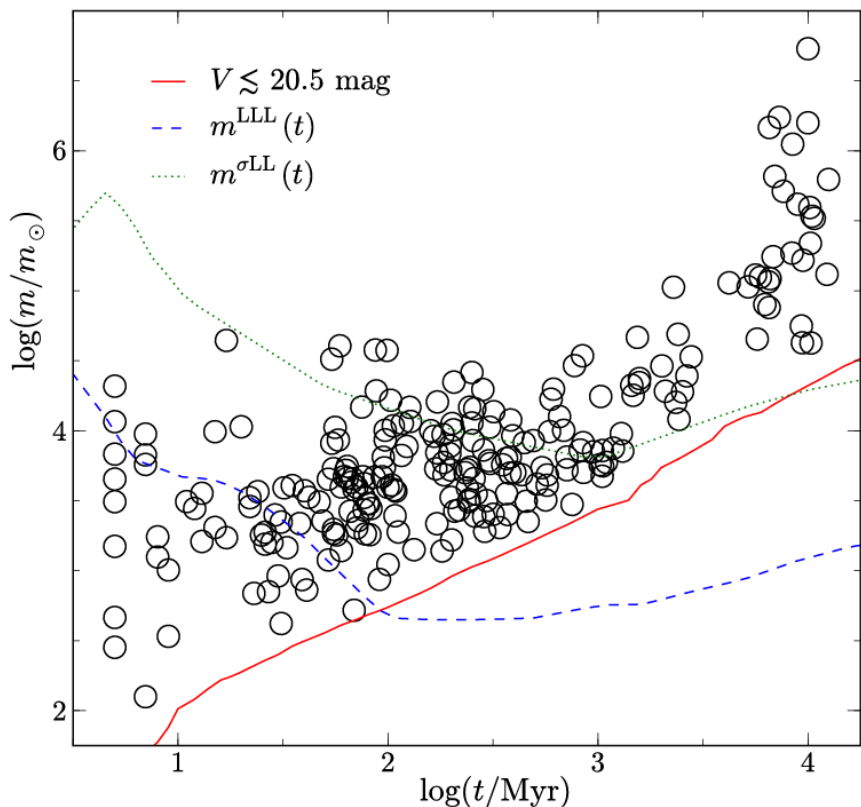
kitos tokiam uždaviniui spręsti skirtos programos.

Žvaigždžių spiečių pusės šviesio spinduliai buvo nustatyti pritaikant King (King 1962) ir EFF (Elson et al. 1987) modelius, aprašančius stebimą spiečiaus šviesio pasiskirstymą. M31 galaktikos žvaigždžių spiečių dydžių skirstinys yra panašus į Scheepmaker et al. (2007) nustatytą M51 galaktikoje (3 pav.). Iki šiol nėra suprantama, koku būdu keičiasi žvaigždžių spiečių dydžiai jiems išnyrant iš molekulinėse debesų, tačiau stebėjimų rezultatai leidžia kelti hipotezę, kad šis procesas galaktikos mastu yra universalus ir nepriklauso nuo pačios diskinės galaktikos žvaigždėdaros spartos ar spiralinių vijų struktūros. Pažymėtina, kad M31 galaktikos spiečiai yra kompaktiškesni už mūsų Galaktikos kamuolinius žvaigždžių spiečius.

Spiečių populiacijos savybės

Atlikus 285 žvaigždžių spiečių stebėjimų duomenų analizę, 238-iems buvo nustatyti parametrai (amžius, masė, metalingumas, ekstinkcija) (4 pav.) (Vansevičius et al. 2009). Apibendrintos spiečių evoliucinių ir struktūrinių parametrų diagramos buvo panaudotos nagrinėjant M31 galaktikos spiečių populiacijos globalias savybes (5 pav.). Nustatyta, kad skirtingų amžiaus grupių spiečių pasiskirstymas M31 galaktikoje yra glaudžiai susijęs su masės pasiskirstymu galaktikoje (seni spiečiai) ir šiuo

4 pav. 238 spiečių masės ir amžiaus diagrama. Pažymėta: imties selekcijos riba $V \lesssim 20.5$ (raudona išsitiesinė linija); mažiausio šviesio riba (the Lowest Luminosity Limit) $m^{\text{LLL}}(t)$ (mėlyna brūkšninė linija); spiečių V ryškio 10% stochastinių fluktuacijų riba $m^{\sigma\text{LL}}(t)$ (taškinė linija).

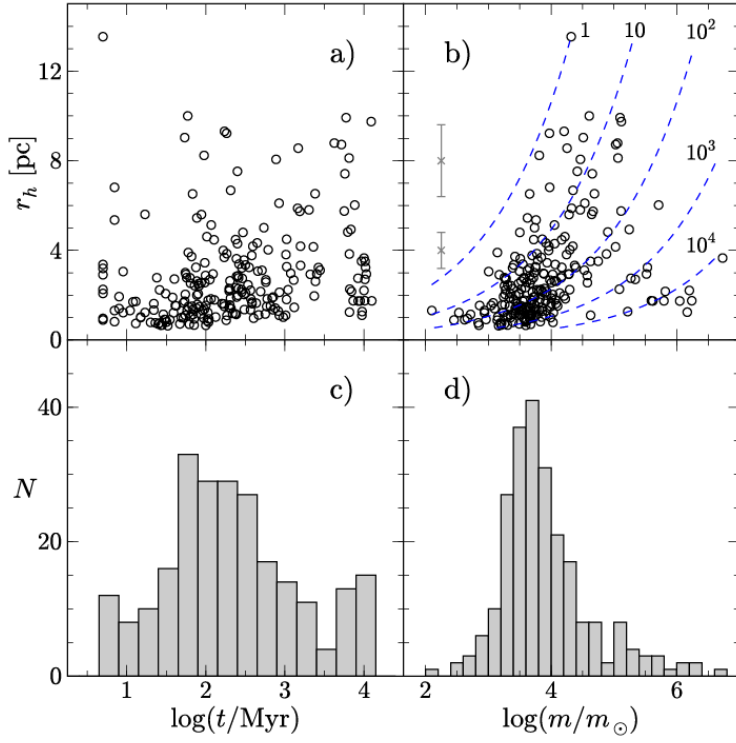


metu vykstančios žvaigždėdaros lokalizacija diske (jauni spiečiai) (6 pav.).

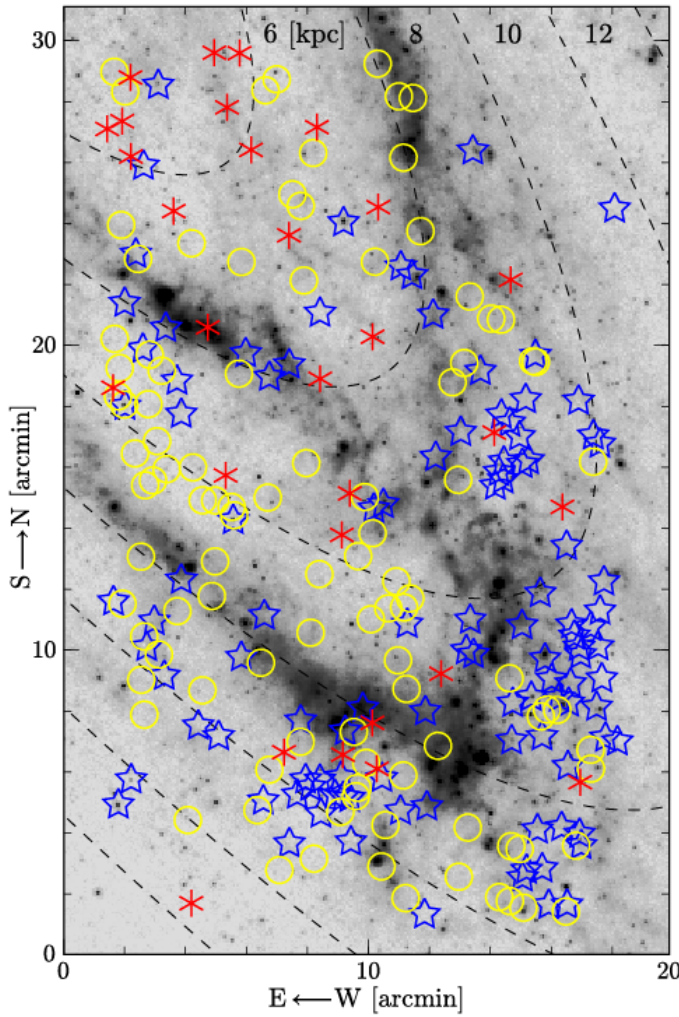
Buvo nustatyta, kad: (1) žvaigždėdaros spartos prieš ~ 70 mln. m. sustiprėjimas (7 pav.) gali būti susijęs su M32 galaktikos praėjimu pro M31 diską; (2) M31 galaktikos disko spiečių masių skirstinys aprašomas Schechter funkcija (7 pav.), universaliai tinkančia neaktyvia žvaigždėdara pasižyminčioms galaktikoms.

Gordon et al. (2006) pasiūlė hipotezę, kad M32 galaktika kirto M31 diską ~ 10 kpc nuotoliu nuo centro prieš ~ 20 mln. m. ir indukavo žvaigždėdarą zonoje aplink M32 praskriejimo per diską tašką, kuris yra mūsų tiriamojo lauko centre. Kitą hipotezę išklė Block et al. (2006), kad M32 galaktika prieš ~ 210 mln. m. praskriejo per M31 centrą ir indukavo žiedinę žvaigždėdaros bangą, simetriškai plintančią į galaktikos disko pakraščius. Mūsų atrastas žvaigždžių spiečių formavimosi suintensyvėjimas prieš ~ 70 mln. m. sunkiai suderinamas su pirmąja hipoteze – įvykis prieš ~ 20 mln. m., kita vertus, antrąją hipotezę galima patvirtinti tik esant nerealistškai dideliame (~ 70 pc/mln. m.) žvaigždėdaros plitimo greičiui M31 diske.

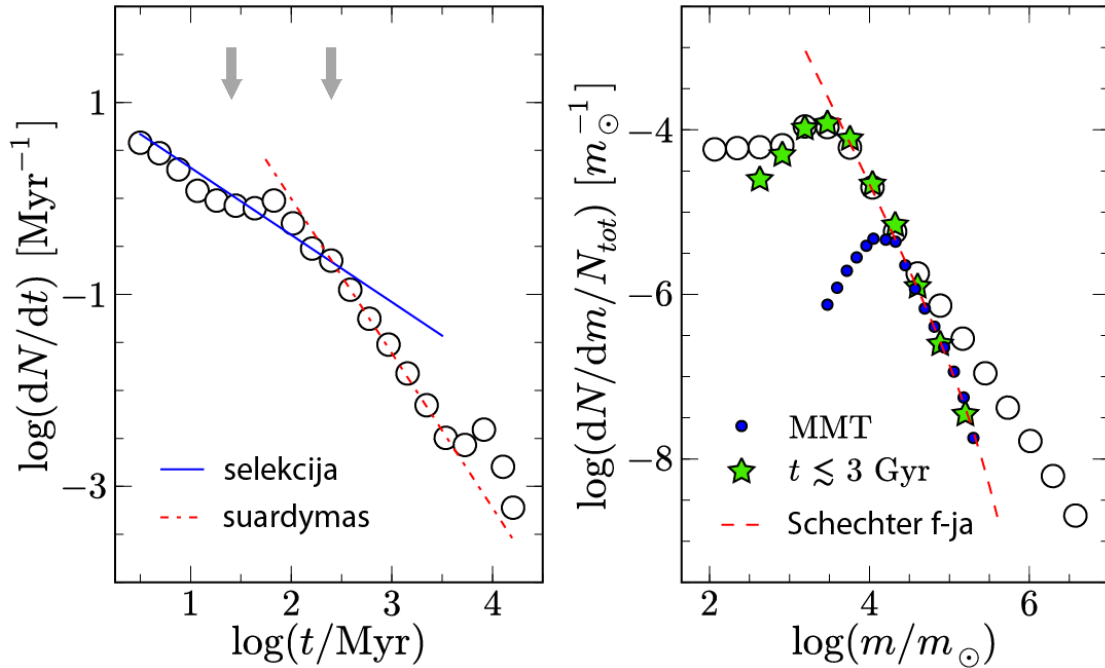
Tiriant globalias M31 galaktikos spiečių populiacijos savybes nustatyta, kad 10 tūkst. saulės masių žvaigždžių spiečiaus gyvavimo trukmė yra ~ 300 mln. m. Ši reikšmė yra artima tokių žvaigždžių spiečių gyvavimo trukmei mūsų Galaktikoje (8 pav.). Perėjimas per galaktikos spiralines vijas yra pagrindinis veiksnys, pagreiti-



5 pav. 238 žvaigždžių spiečių parametrai: (a) pusės šviesio spindulys, r_h , nuo amžiaus, $\log(t/\text{Myr})$; (b) pusės šviesio spindulys, r_h , nuo masės $\log(m/M_\odot)$, kartu parodytos vienodo tankio linijos $\rho_h = 1, 10, 10^2, 10^3, 10^4 M_\odot \text{pc}^{-3}$ ir tipinės r_h matavimo paklaidos; (c) spiečių amžiaus, $\log(t/\text{Myr})$, skirstinys; (d) spiečių masės, $\log(m/M_\odot)$, skirstinys.

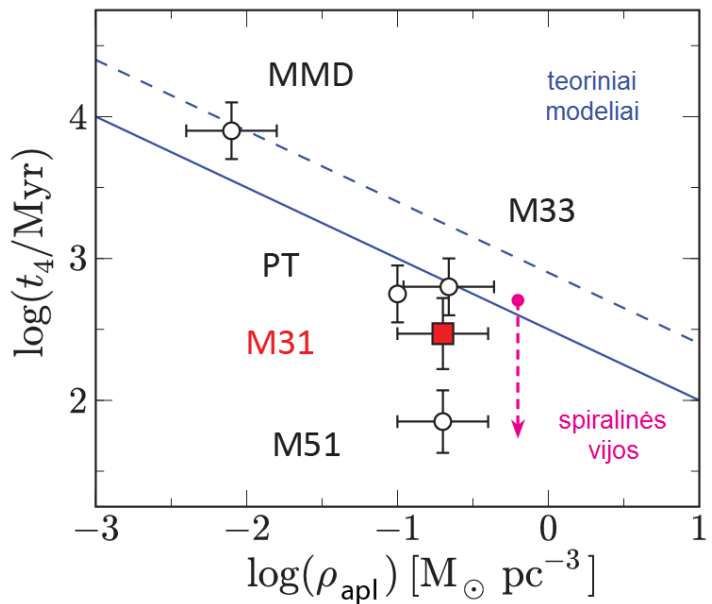


6 pav. 238 spiečių pasiskirstymas M31 galaktikoje (nuotrauka gauta *Spitzer* teleskopu, bangos ilgis $24 \mu\text{m}$). Mėlynos žvaigždutės žymi jauniausius spiečius $t \lesssim 150$ mln. m.; geltoni apskritimai – 150 mln. m. $\lesssim t \lesssim 3$ mlrd. m. amžiaus spiečius; raudoni asteriskai – seniausius spiečius $t \gtrsim 3$ mlrd. m. Elipsių segmentai (brūkšninės linijos) žymi vienodą atstumą nuo galaktikos centro $R_{\text{M31}} = 6\text{--}18$ kpc.



7 pav. Kairėje pavaizduotas žvaigždžių spiečių amžių skirstinys (apskritimais). Spiečiams jaunesniems negu ~ 300 mln. m. žymus selekcijos pagal ryškį efektas (mėlyna ištisinė linija). Senesnių spiečių amžių skirstinys yra nulemtas spiečių suardymo (raudona brūkšninė linija). Vertikalios rodyklės žymi diskutuojamus M32 galaktikos praėjimo pro M31 diską laiko momentus (~ 20 ir ~ 210 mln. m.); spiečių formavimosi sustiprėjimas yra ties ~ 70 mln. m. Dešinėje pavaizduotas spiečių masės skirstinys (apskritimai). Žalios žvaigždutės žymi spiečius jaunesnius nei 3 mlrd. m, o mėlyni skrituliukai – viso M31 disko jaunas žvaigždžių spiečius iš Caldwell et al. (2009) (MMT). M31 galaktikos disko spiečių masių skirstinys gerai aprašomas Schechter funkcija (raudona brūkšninė linija).

8 pav. 10 tūkst. saulės masių žvaigždžių spiečiaus gyvavimo trukmės priklausomybė nuo vidutinio medžiagos tankio galaktikoje. Linijos vaizduoja teorinių modelių rezultatus, apskritimai spiečių gyvavimo amžių Mažojo Magelano debesies (MMD), Paukščių Tako (PT; Saulės aplinkoje), M33 ir M51 galaktikose (Lamers et al. 2005). Nustatyta 10 tūkst. saulės masių žvaigždžių spiečiaus gyvavimo trukmė M31 galaktikoje – 300 mln. m.



nantis spiečių iširimą, tačiau M31 galaktikoje spiralinių vijų įtaka nėra tokia stipri kaip, pavyzdžiui, M51 galaktikoje. Žvaigždžių spiečių gyvavimo trukmės M31 galaktikoje palyginimas su teoriniais skaičiavimais ir stebėjimų rezultatais kitose galaktikose pateiktas 8 pav.

Pagrindiniai disertacijos rezultatai

- Atlikta homogeniška žvaigždžių spiečių paieška pietvakarinėje M31 galaktikos srityje, parengtos spiečių daugiabangių stebėjimų nuotraukos bangų ilgių diapazone nuo 150 nm iki 21 cm struktūrinių ir evoliucinių parametrų analizei.
- Sukurti žvaigždžių spiečių analizės metodai ir programos jų taikymui: (a) plataus lauko mozaikinėmis CCD kameromis gautų nuotraukų redukavimui; (b) pusiau išskiriamų žvaigždžių spiečių struktūrinių parametrų nustatymui; (c) žvaigždžių spiečių klasifikavimui remiantis daugiaspalvės plačiajuostės fotometrijos duomenimis.
- Nustatyti M31 galaktikos pietvakarinės srities žvaigždžių spiečių populiacijos parametrai: (a) spiečių formavimosi spartos maksimumas prieš ~ 70 mln. m.; (b) žvaigždžių dalis išliekanti spiečiuose iki 100 mln. m. amžiaus $\sim 10\%$; (c) vidutiniškai $10^4 M_{\odot}$ masės spiečius išlieka nesuardytas iki ~ 300 mln. m.; (d) masyvių spiečių ($\gtrsim 3000 M_{\odot}$) masių skirstinys gerai aprašomas Schechter funkcija su charakteringąja mase $m^* = 2 \times 10^5 M_{\odot}$.

Literatūra

- Barmby P., Holland S., Huchra J.P. 2002, AJ, 123, 1937
- Barmby P., McLaughlin D.E., Harris W.E., et al. 2007, AJ, 133, 2764
- Block D.L., Bournaud F., Combes F., et al. 2006, Nature, 443, 832
- Bridžius A., Narbutis D., Stonkutė R., et al. 2008, Baltic Astronomy, 17, 337
- Caldwell N., Harding P., Morrison H., et al. 2009, AJ, 137, 94
- Elson R.A.W., Fall S.M., Freeman K.C. 1987, ApJ, 323, 54
- Fioc M., Rocca-Volmerange B. 1997, A&A, 326, 950
- Gordon K.D., Bailin J., Engelbracht C.W., et al. 2006, ApJ, 638, L87
- Hill A., Zaritsky D. 2006, AJ, 131, 414
- King I. 1962, AJ, 67, 471
- Kodaira K. 2002, vol. 15 of Reviews in Modern Astronomy, 1–26
- Kodaira K., Vansevičius V., Bridžius A., et al. 2004, PASJ, 56, 1025
- Krienke O.K., Hodge P.W. 2007, PASP, 119, 7
- . 2008, PASP, 120, 1
- Lamers H.J.G.L.M., Gieles M., Portegies Zwart S.F. 2005, A&A, 429, 173
- Larsen S.S. 1999, A&AS, 139, 393
- Mackey A.D., Gilmore G.F. 2003, MNRAS, 338, 85
- Massey P., Olsen K.A.G., Hodge P.W., et al. 2006, AJ, 131, 2478
- Miyazaki S., Komiyama Y., Sekiguchi M., et al. 2002, PASJ, 54, 833
- Narbutis D., Bridžius A., Stonkutė R., et al. 2007a, Baltic Astronomy, 16, 421
- Narbutis D., Vanagas R., Vansevičius V. 2009, Baltic Astronomy, 18, 219
- Narbutis D., Vansevičius V., Kodaira K., et al. 2006, Baltic Astronomy, 15, 461

—. 2007b, *Baltic Astronomy*, 16, 409

—. 2008, *ApJS*, 177, 174

Scheepmaker R.A., Haas M.R., Gieles M., et al. 2007, *A&A*, 469, 925

Šablevičiūtė I., Vansevičius V., Kodaira K., et al. 2006, *Baltic Astronomy*, 15, 547

—. 2007, *Baltic Astronomy*, 16, 397

Vansevičius V., Kodaira K., Narbutis D., et al. 2009, *ApJ*, 703, 1872

Williams B.F., Hodge P.W. 2001a, *ApJ*, 559, 851

—. 2001b, *ApJ*, 548, 190

Summary

Observational evidence that star formation proceeds in a clustered manner raise a question on the mass function of star clusters and their evolution. However, we have a limited scope of these processes in the Milky Way galaxy (MW). The M31 galaxy is the nearest stellar system similar to MW, therefore, it is the most suitable one to provide clues for understanding evolution of the star cluster population and galaxy structures. However, detailed study of stellar populations and star clusters is a challenging task for ground-based observations due to crowded stellar fields.

Star clusters normally are represented by simple stellar populations and are good tracers of star formation events in galaxy disks. We have carried out a survey of compact star clusters in the southwest field of the M31 galaxy, based on the high-resolution Suprime-Cam images ($17.5' \times 28.5'$), covering $\sim 15\%$ of the galaxy disk area. The *UBVRI* photometry of 285 cluster candidates ($V \leq 20.5$) was performed using frames of the Local Group Galaxies Survey (Massey et al. 2006).

Data analysis methods and programs were developed, tested, and applied for: reduction of wide-field images registered with mosaic CCD cameras; determination of structural parameters of semi-resolved star clusters; quantification of evolutionary parameters of star clusters based on integrated broadband multicolor photometry.

The sample, containing 238 high-probability star cluster candidates (typical half-light radius, $r_h \sim 1.5$ pc), was selected by specifying a lower limit of $r_h \gtrsim 0.15''$ ($\gtrsim 0.6$ pc). We derived cluster parameters based on the photometric data and multi-band images by employing simple stellar population models.

Clusters are in a wide range of ages from ~ 5 Myr (young objects, associated with warm dust and/or $H\alpha$ emission) to ~ 10 Gyr (globular cluster candidates), and show a mass distribution concentrating around $3.0 \leq \log(m/M_\odot) \leq 4.3$, peaking at $m \sim 4000 M_\odot$. Typical ages of these intermediate-mass clusters are in the range of $30 \text{ Myr} \leq t \leq 3 \text{ Gyr}$, with a prominent peak at ~ 70 Myr.

The age peak is located in between of the suspected M32 galaxy passages through the central region of our survey field ~ 20 Myr ago (Gordon et al. 2006) and the center of the M31 galaxy ~ 210 Myr ago (Block et al. 2006).

The derived lifetime of the $10^4 M_\odot$ mass cluster in M31 galaxy before disruption is of ~ 300 Myr, which is in between of those of MW and M51 galaxies (Lamers et al. 2005). The derived cluster formation rate is $\sim 5 \times 10^4 M_\odot/\text{Myr}$, while star formation rate is $\sim 4 \times 10^5 M_\odot/\text{Myr}$, i.e., only $\sim 10\%$ of stars remain in clusters at the age of

~ 100 Myr.

The mass function of star clusters is similar to that in other low star formation activity galaxies and is best described by the Schechter's function with a characteristic mass of $\sim 2 \times 10^5$ solar masses. These findings suggest a rich intermediate-mass cluster population in M31 galaxy, which appears to be scarce or hidden by dust clouds and still to be uncovered in MW. The global follow-up survey of the entire M31 galaxy disk cluster population is of great importance.

The developed methods and software are applicable for the forthcoming surveys of distant galaxies up to ~ 20 Mpc, e.g., with James Webb Space Telescope, where high-resolution imaging will enable to achieve resolution similar to that in this Suprime-Cam study of the M31 disk.

Donatas Narbutis

Curriculum Vitae

Date and place of birth: 23 November 1981, Lithuania
E-mail: donatas.narbutis@ff.vu.lt

Education:

<i>B.S.</i>	in Physics at Vilnius University	2004
<i>M.S.</i>	in Physics, Theoretical Physics and Astronomy at Vilnius University	2006
<i>Ph.D. studies</i>	in Physical Sciences, Physics (02 P) at Vilnius University	2006–2010

Professional improvement:

- *IAC Summer Research: Support to the Flux Calibration of CanariCam*, supervisor dr. M. Kidger, Spain, 2002
- *International Physics School: The New Cosmology*, Australia, 2003
- *Conference: Stellar Photometry: Past, Present and Future*, Lithuania, 2003
- *Science Communication Workshop*, Lithuania, 2004.
- *Conference: Mass and Mystery in the Local Group*, England, 2005
- *Nordic Winter School on Astrobiology*, Finland, 2006
- *Saas-Fee Course: Origin of the Galaxy and Local Group*, Switzerland, 2007
- *ESO Workshop: 12 Questions on Star and Massive Star Cluster Formation*, Germany, 2007
- *IMPRS School: Milky Way Galaxy*, Germany, 2007
- *Conference: From Taurus to the Antennae*, England, 2008
- *Canary Islands Winter School: Local Group Cosmology*, Spain, 2008
- *EstSpace School: Future Cosmic Surveys and Huge Databases*, Estonia, 2009
- *IMPRS School: Statistical Inferences from Astrophysical Data*, Germany, 2009
- *Astrobiology Graduate Student Conference*, Sweden, 2010