

<https://doi.org/10.15388/vu.thesis.253>

<https://orcid.org/0000-0003-4707-5424>

VILNIUS UNIVERSITY

CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

Alina

LEŠČINSKAITĖ

Stellar populations
in the dwarf irregular galaxy Leo A

DOCTORAL DISSERTATION

Natural Sciences,
Physics (N 002)

VILNIUS 2021

This dissertation was written between 2017 and 2021 at Center for Physical Sciences and Technology. The research was supported by the Research Council of Lithuania.

Academic supervisor:

Prof. Dr. Vladas Vansevičius (Center for Physical Sciences and Technology, Natural Sciences, Physics – N 002)

Dissertation Defense Panel:

Chairman – Prof. Dr. Arūnas Kučinskas (Vilnius University, Natural Sciences, Physics – N 002)

Members:

Dr. Jonas Klevas (Vilnius University, Natural Sciences, Physics – N 002),

Prof. Habil. Dr. Kęstutis Pyragas (Center for Physical Sciences and Technology, Natural Sciences, Physics – N 002),

Dr. Julius Sperauskas (Vilnius University, Natural Sciences, Physics – N 002),

Dr. Kastytis Zubovas (Center for Physical Sciences and Technology, Natural Sciences, Physics – N 002).

The dissertation shall be defended at a public meeting of the Dissertation Defense Panel at 1 p.m. on 26th November 2021 in Room D401 of the Center for Physical Sciences and Technology.

Address: Saulėtekio av. 3, Vilnius, Lithuania.

Tel. +37052648884; e-mail: office@ftmc.lt.

The text of this dissertation can be accessed at the Vilnius University Library, as well as on the website of Vilnius University:

<https://www.vu.lt/naujienos/ivykiu-kalendorius>.

<https://doi.org/10.15388/vu.thesis.253>

<https://orcid.org/0000-0003-4707-5424>

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Alina
LEŠČINSKAITĖ

Žvaigždžių populiacijos netaisyklingoje
nykštukinėje galaktikoje Leo A

DAKTARO DISERTACIJA

Gamtos mokslai,
Fizika (N 002)

VILNIUS 2021

Disertacija rengta 2017–2021 metais Fizinių ir technologijos mokslų centre.
Mokslinius tyrimus rėmė Lietuvos mokslo taryba.

Mokslinis vadovas:

prof. dr. Vladas Vansevičius (Fizinių ir technologijos mokslų centras,
gamtos mokslai, fizika – N 002)

Gynimo taryba:

Pirmininkas – prof. dr. Arūnas Kučinskas (Vilniaus universitetas,
gamtos mokslai, fizika – N 002)

Nariai:

dr. Jonas Klevas (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, fizika – N 002),

prof. habil. dr. Kęstutis Pyragas (Fizinių ir technologijos mokslų
centras, gamtos mokslai, fizika – N 002),

dr. Julius Sperauskas (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, fizika –
N 002),

dr. Kastytis Zubovas (Fizinių ir technologijos mokslų centras, gamtos
mokslai, fizika – N 002).

Disertacija ginama viešame Gynimo tarybos posėdyje 2021 m. lapkričio mėn.
26 d. 13:00 val. Fizinių ir technologijos mokslų centro D401 auditorijoje.

Adresas: Saulėtekio al. 3, Vilnius, Lietuva.

Tel. +37052648884; el. paštas: office@ftmc.lt.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto bibliotekoje ir VU interneto
svetainėje adresu: <https://www.vu.lt/naujienos/ivykiu-kalendorius>

Contents

Contents	7
List of abbreviations	8
Introduction	9
Motivation	9
The objective of the thesis	11
The main tasks of the thesis	11
Statements to be defended	11
Publications included in the thesis	12
Other publications	12
Presentations at conferences	12
Contribution of the author	13
1 Dwarf Irregular Galaxy Leo A	14
2 Observational Data	17
2.1 Subaru/Suprime-Cam	17
2.2 HST/ACS	23
2.3 HST/WFC3	23
3 Old stellar populations in the Leo A galaxy	27
3.1 AGB stars in the Leo A galaxy	29
3.1.1 Variable AGB stars	29
3.1.2 Dust-enshrouded AGB stars	29
3.2 RGB stars in the Leo A galaxy	31
3.2.1 TRGB distance to the Leo A galaxy	33
3.2.2 Peculiar sequence of RGB stars	33
3.3 Radial distributions of the AGB and RGB stars	37
3.4 Stellar populations at the outskirts of the Leo A galaxy	45

3.5	Summary	49
4	Young stellar populations in the Leo A galaxy	50
4.1	Data reduction	51
4.2	MS and BHeB stars in the Leo A galaxy	56
4.2.1	Age dating of the BHeB stars	58
4.2.2	Spatial distribution of MS and BHeB stars	63
4.3	$H\alpha$ emission stars	66
4.4	Star clusters	70
4.5	H I hole and star formation history	75
4.6	Summary	81
	Appendix: Identification charts	84
	Bibliography	89
	Santrauka	94
	Įvadas	94
	Darbo tikslas	96
	Darbo uždaviniai	96
	Svarbiausieji rezultatai ir ginamieji teiginiai	96
1	Netaisyklingoji nykštukinė galaktika Leo A	97
2	Stebėjimų duomenys	100
2.1	Subaru/Suprime-Cam	100
2.2	HST/ACS	101
2.3	HST/WFC3	101
3	Senų žvaigždžių populiacijos Leo A galaktikoje	103
3.1	AGB žvaigždės Leo A galaktikoje	104
3.2	RGB žvaigždės Leo A galaktikoje	107
3.2.1	Leo A galaktikos atstumas	107
3.2.2	Anomali RGB žvaigždžių seka	108
3.3	Radialinis AGB ir RGB žvaigždžių pasiskirstymas	111
3.4	Žvaigždžių populiacijos Leo A pakraštyje	113
3.5	Apibendrinimas	115
4	Jaunų žvaigždžių populiacijos Leo A galaktikoje	117
4.1	Duomenų redukcija	118
4.2	MS ir BHeB žvaigždės	118

4.2.1	BHeB žvaigždžių amžius	119
4.2.2	MS ir BHeB žvaigždžių erdvinis pasiskirstymas	123
4.3	$H\alpha$ emisinės žvaigždės	125
4.4	Žvaigždžių spiečiai	127
4.5	H I skylė	130
4.6	Apibendrinimas	133
	Padėka	137
	Gyvenimo aprašymas	138
	Curriculum Vitae	139

List of abbreviations

ACS – Advanced Camera for Surveys

AGB – asymptotic giant branch

AST – artificial star test

BHeB – blue helium-burning

cAGB – AGB candidates

CMD – colour-magnitude diagram

CN – cyanide

DPR – dust production rate

dSph – dwarf spheroidal galaxy

HST – Hubble Space Telescope

ISM – interstellar medium

MS – main sequence

MW – Milky Way Galaxy

Myr, Gyr – megayear (a million years), gigayear (a billion years), respectively

NOAO – National Optical Astronomy Observatory

pRGB – peculiar RGB

PSF – point spread function

RGB – red giant branch

SFR – star formation rate

TRGB – tip of the RGB

WFC3 – Wide Field Camera 3

WHIRC – WIYN High-resolution Infrared Camera

WIYN – Wisconsin-Indiana-Yale-NOAO Observatory

Introduction

Motivation

As the most numerous and ubiquitous type of galaxy, dwarf galaxies play a significant role in the study of galaxy formation and evolution. The currently prevalent cosmological scenario predicts a hierarchical structure formation, where dwarf galaxies are the first gravitationally bound structures that formed in the Universe (e.g., Kauffmann et al. 1993), while the more massive galaxies, like the Milky Way (MW), formed gradually over time via mergers and accretion of the lower-mass systems (White & Rees 1978; Unavane et al. 1996). The dwarf galaxies of the Local Group are of particular importance, since their proximity allows them to be resolved into individual stars, and thus their properties can be studied in more detail, which can as a result provide constraints on galaxy evolution models (Mateo 1998; Tolstoy et al. 2009; McConnachie 2012).

Low masses, shallow gravitational potential wells and low escape velocities of dwarf galaxies make them highly susceptible to internal (stellar feedback) and external (tidal disruption, ram-pressure stripping) processes, both of which can dramatically impact the dynamical and morphological evolution of a small system (e.g., Haines et al. 2007). Star formation events result in intense stellar feedback (i.e., radiation pressure, photoionization, stellar winds, supernovae, etc.) providing energy and momentum that affects and reshapes the surrounding interstellar medium. In the case of low-mass systems, galactic winds created by such feedback can eject significant amounts of the interstellar medium out of the galaxy or into its halo (Larson 1974; van Eymeren et al. 2007) which diminishes or halts the star formation until the gas cools down and accretes back into the galaxy. The resulting bursty and stochastic star formation within dwarf galaxies (Stinson et al. 2007; McQuinn et al. 2010; Weisz et al. 2011; van der Wel et al. 2011; Shen et al. 2014) alters their structure and morphology making it challenging to disentangle the complex interplay between initial structure and the internal and external processes that shaped the present-day dwarf galaxies.

Simulations of dwarf galaxy evolution (Stinson et al. 2009; El-Badry et al.

2016; Graus et al. 2019) show that stellar feedback-induced fluctuations in the spatial distribution of stellar populations within a galaxy could eventually lead to the formation of gradients in the mean stellar age and metallicity, where younger objects reside in the central regions of higher gas density, and the older stars are found to dominate the outer regions. Galactocentric stellar population gradients of this kind have been observationally detected in a number of dwarf galaxies (e.g., Aparicio & Tikhonov 2000; Battaglia et al. 2006; Faria et al. 2007; de Boer et al. 2012; Beccari et al. 2014; McMonigal et al. 2014; del Pino et al. 2015; Santana et al. 2016; Kacharov et al. 2017; Okamoto et al. 2017). Such gradients could be altered by external interactions; however, well-mixed intermediate-age and old stellar populations were also found in some dwarf galaxies that are unlikely to have experienced any external influences (Skillman et al. 2014; McQuinn et al. 2017).

A large variety of morphologies provided by the ubiquitous dwarf galaxies makes it highly challenging to understand how stellar mass builds up in these systems, how the stellar structures evolve over time, and how different types of dwarf galaxies are related. For these reasons, detailed studies of stellar populations in the resolved nearby dwarf galaxies are of vital importance. In this thesis we analysed stellar populations within the dwarf irregular galaxy Leo A. This largely isolated galaxy is a perfect candidate to study morphological intricacies of a primordial system that was shaped entirely by the internal processes. Observational details about a galaxy like the Leo A, which is showing high gas content (Young & Lo 1996; Hunter et al. 2012), yet low stellar mass and metallicity (Kirby et al. 2017; Ruiz-Escobedo et al. 2018), are also valuable when setting constraints on theoretical models of galaxy evolution.

The objective of the thesis

Determine the properties of stellar populations in the dwarf irregular galaxy Leo A.

The main tasks of the thesis

- Develop methods to decontaminate stellar photometry catalogues of foreground/background objects and stellar blends.
- Identify luminous asymptotic giant branch stars, emission stars and other peculiar objects in Leo A.
- Determine the extent of the Leo A galaxy based on the distribution of the old stellar populations at its outskirts.
- Identify structural components of the Leo A galaxy, traced by red giant branch and asymptotic giant branch stars, and examine their radial variations.
- Evaluate the age of young stellar populations by using main sequence stars, blue core-helium-burning stars and young star clusters; investigate the evolution of stellar structures in Leo A over the past ~ 300 Myr.

Statements to be defended

1. A group of 26 peculiar RGB stars was discovered in the Leo A galaxy. It is likely that these stars have a strong CN-band in their spectra at $\sim 380\text{-}390$ nm.
2. Twelve new luminous AGB stars and three candidate AGB stars were identified in the Leo A galaxy. Previously, only 20 luminous AGB stars were known in Leo A.
3. In total, 16 supergiant emission-line stars of spectral types B-A (younger than $\lesssim 300$ Myr) were discovered in the Leo A galaxy. Enhanced $H\alpha$ emission ($H\alpha - R < -0.06$) was measured in $\sim 15\%$ of Leo A supergiants.
4. It was determined that stellar feedback from young stellar populations created a prominent hole in the H I gas disk, formed an ionized front along the edge of the hole, and triggered star formation ahead of this front. Young star clusters and H II zones mark ongoing star formation processes.
5. It was found that the blue-RGB and luminous AGB stars are concentrated in the central part of Leo A ($a < 4'$), while the red-RGB stars have a significantly more extended distribution ($a < 10'$). These results support the outside-in star formation scenario in Leo A.

Publications included in the thesis

1. **A. Leščinskaitė**, R. Stonkutė, V. Vansevicius, AGB and RGB stars in the dwarf irregular galaxy Leo A, 2021, *Astronomy and Astrophysics*, **647**, A170.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037967>
2. R. Stonkutė, R. Naujalis, M. Čeponis, **A. Leščinskaitė**, V. Vansevicius, Star clusters in the dwarf irregular galaxy Leo A, 2019, *Astronomy and Astrophysics*, **627**, A7.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833236>
3. R. Stonkutė, M. Čeponis, **A. Leščinskaitė**, R. Naujalis, V. Vansevicius, Dwarf irregular galaxy Leo A extends even farther, according to HST WFC3 photometry, 2018, *Astronomy and Astrophysics*, **614**, A144.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731840>
4. **A. Leščinskaitė**, R. Stonkutė, V. Vansevicius, Bright-red stars in the dwarf irregular galaxy Leo A, 2018, *Proceedings of the International Astronomical Union*, **14(S344)**, 99.
<https://doi.org/10.1017/S1743921318006427>
5. R. Stonkutė, M. Čeponis, **A. Leščinskaitė**, V. Vansevicius, Star clusters and young populations in the dwarf irregular galaxy Leo A, 2018, *Proceedings of the International Astronomical Union*, **14(S344)**, 139.
<https://doi.org/10.1017/S1743921318006920>
6. R. Stonkutė, D. Narbutis, A. Bridžius, **A. Leščinskaitė**, V. Vansevicius, A young star cluster in the Leo A galaxy, 2015, *Baltic Astronomy*, **24**, 293. <https://doi.org/10.1515/astro-2017-0229>
7. **A. Leščinskaitė**, R. Stonkutė, V. Vansevicius, Recent star formation history of the dwarf irregular galaxy Leo A, 2021, *Astronomy and Astrophysics*, submitted.

Other publications

1. **A. Leščinskaitė**, R. Stonkutė, V. Vansevicius, Supershells in the M33 galaxy, 2015, *Baltic Astronomy*, **24**, 298.

Presentations at conferences

1. **A. Leščinskaitė** (presented), R. Stonkutė, V. Vansevicius, AGB and RGB Stars in the Dwarf Irregular Galaxy Leo A, *The Art of Measuring Galaxy Physical Properties*, Milan, Italy, 2019. Poster presentation.

2. **A. Leščinskaitė** (presented), R. Stonkutė, V. Vansevičius, AGB ir RGB žvaigždės netaisyklingoje nykštukinėje galaktikoje Leo A, 43-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija, Kaunas, Lithuania, 2019. Oral presentation.
3. R. Stonkutė (presented), M. Čeponis, **A. Leščinskaitė**, V. Vansevičius, Star clusters and young populations in the dwarf irregular galaxy Leo A, The XXXth General Assembly of the International Astronomical Union, Symposium 344: Dwarf Galaxies: From the Deep Universe to the Present, Vienna, Austria, 2018. Poster presentation.
4. **A. Leščinskaitė** (presented), R. Stonkutė, V. Vansevičius, Bright-red stars in the dwarf irregular galaxy Leo A, The XXXth General Assembly of the International Astronomical Union, Symposium 344: Dwarf Galaxies: From the Deep Universe to the Present, Vienna, Austria, 2018. Poster presentation.
5. **A. Leščinskaitė** (presented), R. Stonkutė, V. Vansevičius, Bright-red star populations in the Leo A galaxy, Interstellar Medium in the Nearby Universe, Bamberg, Germany, 2018. Poster presentation.
6. **A. Leščinskaitė** (presented), R. Stonkutė, V. Vansevičius, Netaisyklinosios nykštukinės galaktikos Leo A senoji žvaigždžių populiacija, 42-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija, Vilnius, Lithuania, 2017. Poster presentation.

Contribution of the author

The author developed methods of decontamination of the Subaru/Suprime-Cam catalogue and, additionally, performed visual inspection of the objects within the subsets of this catalogue that were used in this thesis. The author performed the analysis of structural components of the Leo A galaxy (traced by old stellar populations) and investigated their radial variations. The author also performed age dating of the blue core-helium-burning stars and examined the evolution of stellar structures over the recent times. The author, together with colleagues, searched for young star clusters in the Leo A, analysed their properties, and studied old stellar populations in the outskirts of the galaxy.

Chapter 1

Dwarf Irregular Galaxy

Leo A

Leo A is one of the most isolated galaxies of the Local Group, located at a distance of ~ 800 kpc (at this distance, $1' \sim 230$ pc; Dolphin et al. 2003; Bernard et al. 2013). It is a gas-rich (Young & Lo 1996; Hunter et al. 2012), dark-matter-dominated ($\sim 80\%$; Brown et al. 2007; Kirby et al. 2017) dwarf irregular galaxy of low stellar mass (Kirby et al. 2017) (see Table 1.1 for parameters of Leo A). The galaxy is very metal poor (van Zee et al. 2006; Kirby et al. 2017; Ruiz-Escobedo et al. 2018), which might explain lower star formation efficiency and thus its low overall stellar mass. Furthermore, Leo A has a significantly delayed star formation that became more active only ~ 5 Gyr ago (Cole et al. 2007; Skillman et al. 2014). Such postponed activity in the galaxy is unlikely to have been triggered by external mechanisms, since previous interactions seem improbable due to its isolation. Interestingly, Aquarius is the only other isolated dwarf irregular galaxy in our near vicinity with a similar delay in star formation (Cole et al. 2014). However, despite the delay in the onset of active star formation, multiple stellar populations spanning a broad age range (~ 0.01 -10 Gyr) are present in Leo A: rather prominent H II regions indicate recent star formation activity, while RR Lyrae stars (Dolphin et al. 2002; Bernard et al. 2013) confirm the existence of an ancient ($\gtrsim 10$ Gyr) stellar population.

Dwarf irregular galaxies are presumably simple gas-rich stellar systems that are likely to be the closest analogues to the primordial structures of the early Universe – the “building blocks” of large galaxies (Tosi 2003). A detail study of such systems, that likely formed and evolved entirely through self-enrichment, could provide insight into the early star formation history in the Universe. The clearly isolated Leo A dwarf irregular galaxy (Fig. 1.1) serves as a great example of a primordial system. We made a detailed study of stellar populations and

Table 1.1. Parameters of the Leo A galaxy.

Parameter	Value	Reference
$\alpha(\text{J2000}); \delta(\text{J2000})$	$9^{\text{h}}59^{\text{m}}24.5^{\text{s}}; +30^{\circ}44'47''$	Vansevičius et al. (2004)
P.A.	114°	Vansevičius et al. (2004)
b/a	0.6	Vansevičius et al. (2004)
Holmberg radius	3'5	Mateo (1998)
A_B, A_V, A_I	0.075, 0.057, 0.031	Schlafly & Finkbeiner (2011)
A_{F475W}, A_{F814W}	0.067, 0.032	Schlafly & Finkbeiner (2011)
$(m - M)_0$	24.58 ± 0.03 (824 \pm 12 kpc)	Lešcinskaitė et al. (2021)
M_{STARS}	$3.3 \cdot 10^6 M_{\odot}$	Kirby et al. (2017)
$M_{\text{H I}}$	$6.9 \cdot 10^6 M_{\odot}$	Hunter et al. (2012)
M/L_V	$20 \pm 6 M_{\odot}/L_{\odot}$	Brown et al. (2007)
$\langle [\text{Fe}/\text{H}] \rangle$	$-1.67^{+0.09}_{-0.08}$	Kirby et al. (2017)
$12 + \log(\text{O}/\text{H})$	7.38 ± 0.1	van Zee et al. (2006)
$12 + \log(\text{O}/\text{H})$	7.4 ± 0.2	Ruiz-Escobedo et al. (2018)

$\alpha(\text{J2000})$ and $\delta(\text{J2000})$ – equatorial coordinates of the galaxy centre; P.A. – position angle of the major axis; b/a – ratio of minor to major axis; Holmberg radius – radius equivalent to a surface brightness isophote of $B = 26.5$ mag arcsec $^{-2}$; $\langle [\text{Fe}/\text{H}] \rangle$ – average metallicity of RGB stars; A_B, A_V, A_I, A_{F475W} , and A_{F814W} – foreground extinction in $B, V, I, F475W$, and $F814W$ passbands; $(m - M)_0$ – distance modulus; M_{STARS} – the stellar mass; $M_{\text{H I}}$ – the mass of neutral hydrogen; M/L_V – the lower limit of the mass-to-luminosity ratio; $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ – the oxygen abundance.

structural properties of Leo A by making use of the wide-field Subaru/Suprime-Cam observations (Stonkutė et al. 2014), as well as the high-resolution data obtained with the Hubble Space Telescope (HST) Advanced Camera for Surveys (ACS) and Wide Field Camera 3 (WFC3). Parameters of the Leo A galaxy adopted in this study are provided in Table 1.1. Note, however, that based on a decontaminated sample of Leo A stars (see Ch. 2) an adjusted galaxy’s centre position was applied in RA (a shift by $+0.5^{\text{s}}$), compared to the value provided by Vansevičius et al. (2004).

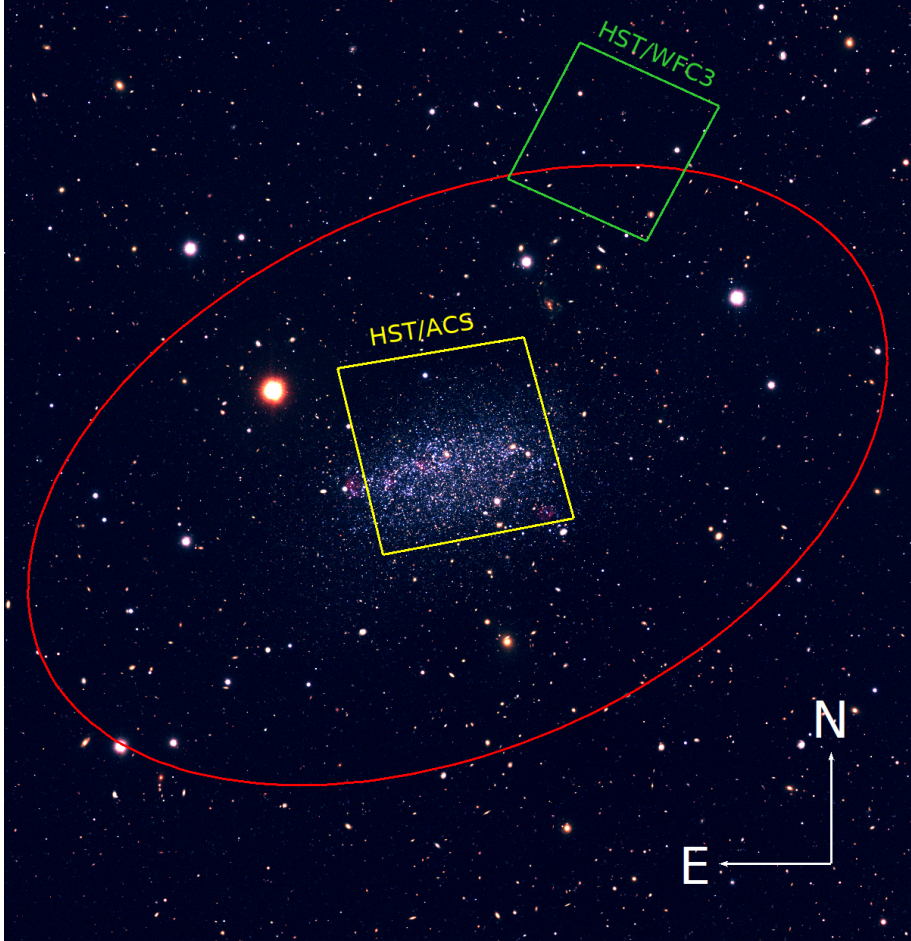


Figure 1.1 Subaru/Suprime-Cam composite image of the Leo A galaxy (Stonkutė et al. 2014) comprised of the following passbands: $H\alpha$ (red), V (green) and B (blue). An ellipse of the semi-major axis $a = 8'$ ($b/a = 0.6$; P.A. = 114°) and centred at $\alpha = 9^h59^m24.5^s$, $\delta = +30^\circ44'47''$ (J2000) is shown in red. The HST/ACS field is marked in yellow and the HST/WFC3 field is outlined in green. North is up, east is left.

Chapter 2

Observational Data

2.1 Subaru/Suprime-Cam

Wide-field Subaru/Suprime-Cam observations provide a full coverage of the Leo A field, thus we used stellar photometry data from Stonkutė et al. (2014) (B , V , I) and from Stonkutė et al. (in preparation) (R , $H\alpha$; crowded-field point spread function (PSF) stellar photometry in these two passbands was performed in the same way as described by Stonkutė et al. 2014) to study structural properties of this galaxy. The stellar photometry catalogue provided by Stonkutė et al. (2014) is decontaminated of extended sources based on PSF model fitting results and a visual inspection of optical images, however, numerous contaminants, such as stellar blends, foreground Milky Way (MW) stars, and seemingly more compact background galaxies, are still present in the catalogue. In order to minimize the impact of such objects on our results, we applied additional criteria to further decontaminate the data.

We limited the catalogue to only those objects falling within an ellipse of $a < 10'$ and having $V < 24$ (in the Subaru stellar photometry catalogue many distant background galaxies are hardly distinguishable from stellar sources at fainter magnitudes, thus they start to heavily contaminate the diagrams). The decontamination methods and their results are shown in Figs. 2.1-2.4. Initially, we compared selected objects in the high-resolution HST/ACS images (HST programme 10590) to the ones from Subaru/Suprime-Cam and visually identified stellar blends and background galaxies, which we excluded from the catalogue (panels a and b in Figs. 2.1 and 2.2). We did, however, cross-identify only the objects within the central ellipse of $1'.6$ (the largest ellipse centred on Leo A that fits entirely within the HST/ACS field; see Fig. 2.2b), in order to keep decontamination radially consistent. To decontaminate the rest of the Subaru catalogue, we constrained the values of *sharpness* and χ^2 , both of which indicate the quality of a stellar PSF fit to an object's image: *sharpness* describes the 'pointiness' of an object's profile as compared to the PSF (Stet-

son 1987) and χ^2 indicates how well a profile of an object is fit by the PSF. Our selected limits for the two parameters are marked by red lines in Fig. 2.3 ($a < 3'.5$, the crowded inner region of the galaxy) and Fig. 2.4 ($a > 3'.5$, the outer region). We chose different limits for the objects within and outside an ellipse of $a = 3'.5$, as from this point outward the photometry completeness limit barely changes and the crowding effects are minimal allowing for tighter constraints on the *sharpness* parameter. Objects falling outside the selected limits in at least three different passbands were excluded from further analysis (black points in Figs. 2.3 and 2.4, as well as panels c and d in Figs. 2.1 and 2.2). In Fig. 2.3, *sharpness* and χ^2 parameters are additionally shown for the visually identified contaminants (cyan points).

Additionally, the catalogue was decontaminated of the foreground MW dwarf stars of K-M spectral types based on the stellar distributions in a two-colour diagram, $V - I$ vs. $B - V$. In panel e of Fig. 2.2, black points mark a prominent sequence of stars that matches well the isochrones with metallicities corresponding to the stellar populations of MW ($0.001 \lesssim Z \lesssim 0.015$). The colour-magnitude diagrams (CMDs) of the foreground stars are presented in panels e and f of Fig. 2.1, and the spatial distribution is provided in panel f of Fig. 2.2.

Within the Leo A field ($a < 10'$) $\sim 22\%$ of objects were excluded from the Subaru catalogue as contaminants. The different decontamination criteria resulted in the following percentages: interactively removed objects $\sim 13\%$, extended objects with poor image quality $\sim 6\%$, MW dwarfs $\sim 3\%$.

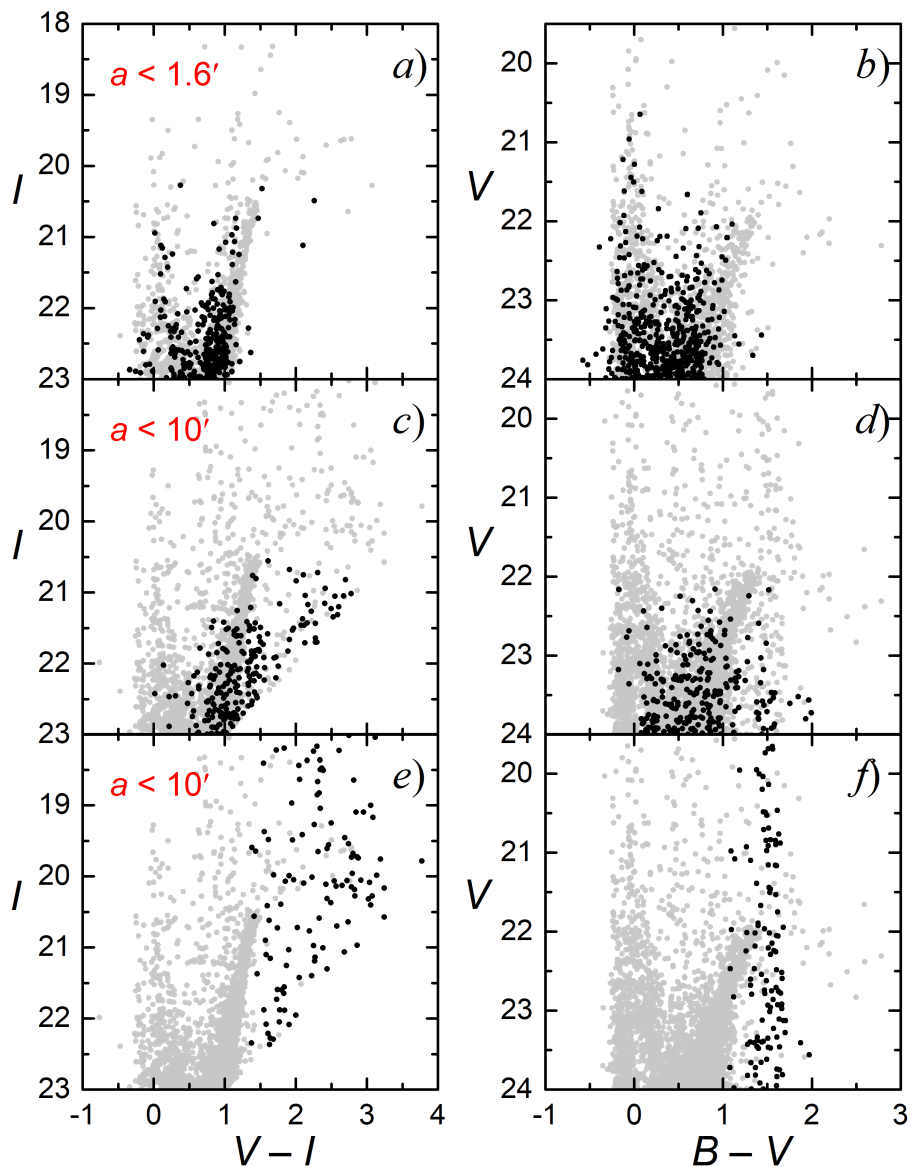


Figure 2.1 CMDs from the Subaru/Suprime-Cam photometry ($V < 24$). *Panels a and b*: objects within the central ellipse of $a = 1.6'$, limited by the extent of the HST/ACS field (see the innermost ellipse and the blue outline of the HST/ACS field in *panel b* of Fig. 2.2). Visually identified contaminants are marked by black points. *Panels c and d*: objects excluded from further analysis based on constraints imposed on the *sharpness* and χ^2 parameters (black points; see Figs. 2.3 and 2.4). *Panels e and f*: MW dwarf stars of K-M spectral types selected from $V - I$ vs. $B - V$ diagram, as shown in *panel e* of Fig. 2.2 (black points).

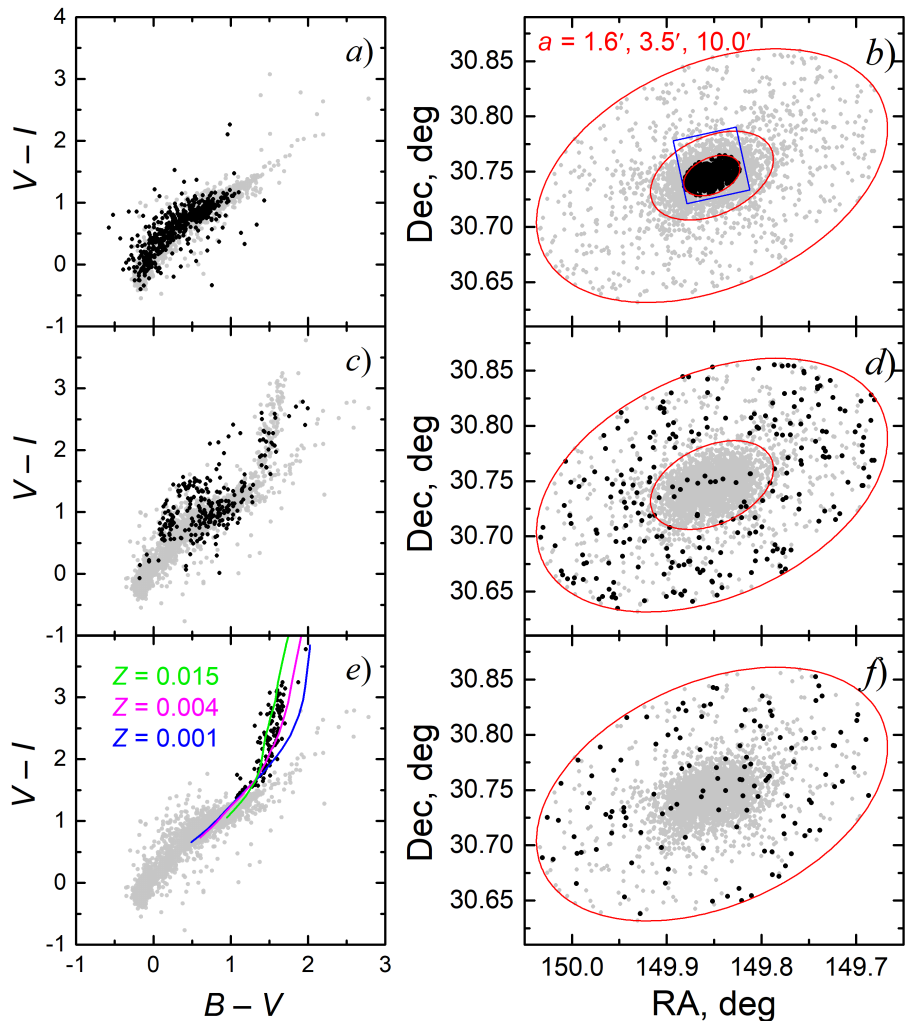


Figure 2.2 Two-colour diagrams and spatial distributions from the Subaru/Suprime-Cam photometry ($V < 24$). *Panel a*: objects within the central ellipse ($a = 1.6'$; *panel b*) limited by the extent of the HST/ACS field (blue outline in *panel b*). Visually identified contaminants are marked by black points. *Panel b*: spatial distribution of objects in the initial catalogue. Parameters of the overplotted ellipses are as follows: semi-major axis, a (indicated in the top left corner); ellipticity, $b/a = 0.6$; position angle of the major axis, P.A. = 114° . *Panels c* and *d*: objects excluded from further analysis based on constrains imposed on the *sharpness* and χ^2 parameters (black points; see Figs. 2.3 and 2.4). *Panels e* and *f*: MW dwarf stars of K-M spectral types (black points). The isochrones (Bressan et al. 2012) for main-sequence stars of masses $0.09\text{-}0.80 M_\odot$ and of $Z = 0.015, 0.004, 0.001$ metallicity (green, magenta, and blue, respectively) are overplotted in *panel e*.

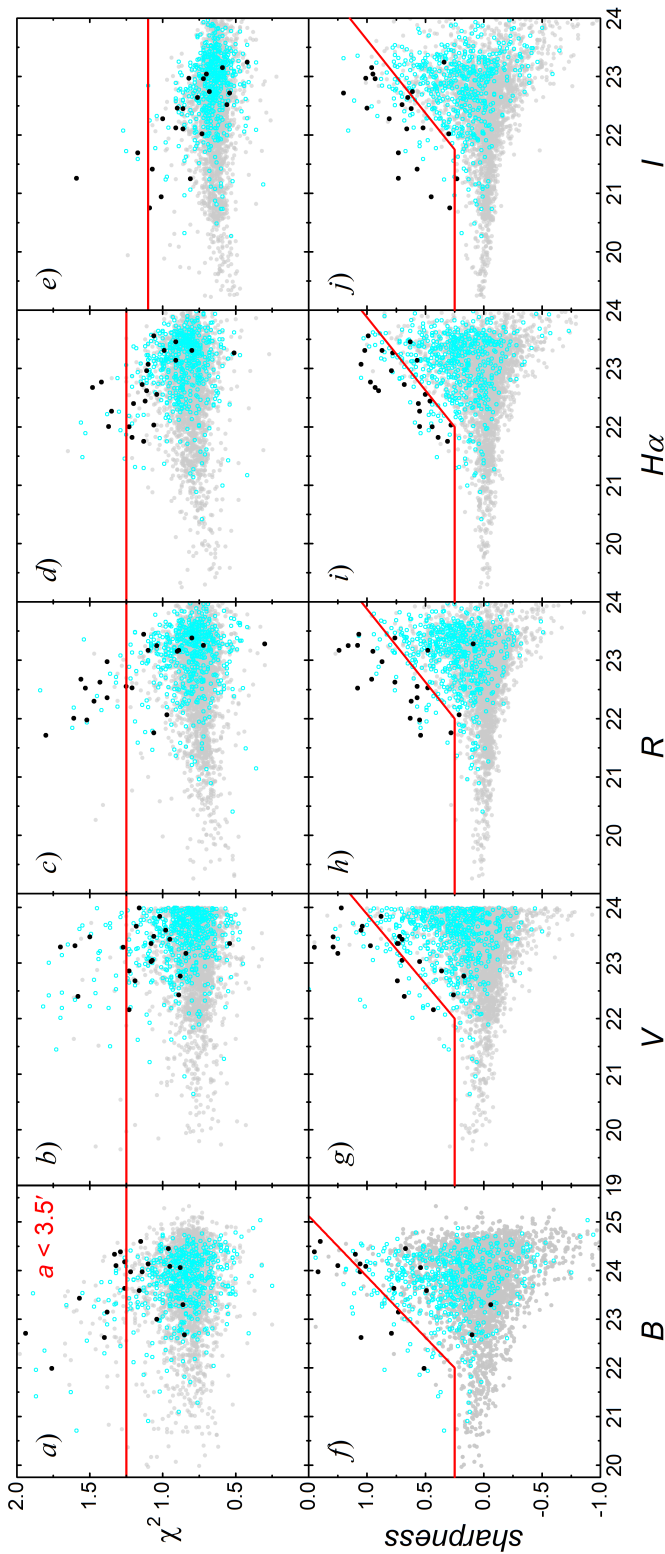


Figure 2.3 Photometry quality parameters as a function of magnitude (in B , V , R , $H\alpha$, and I passbands) in the crowded field ($a < 3.5'$, see Fig. 2.2d). *Panels a-e*: χ^2 – a goodness-of-fit parameter that indicates how well a profile of an object is fit by the PSF; *panels f-j*: *sharpness* – an object profile’s sharpness with respect to the PSF. Grey points are stellar objects; cyan circles – contaminants (background galaxies, stellar blends; $a < 1.6$) excluded from the catalogue based on a visual inspection of HST/ACS images; black points – extended sources excluded from further analysis based on their χ^2 and *sharpness*. Red lines indicate the constraining limits selected for decontamination – objects falling outside the limits in at least three passbands were excluded. The gradient of the sloping lines is the same in all passbands.

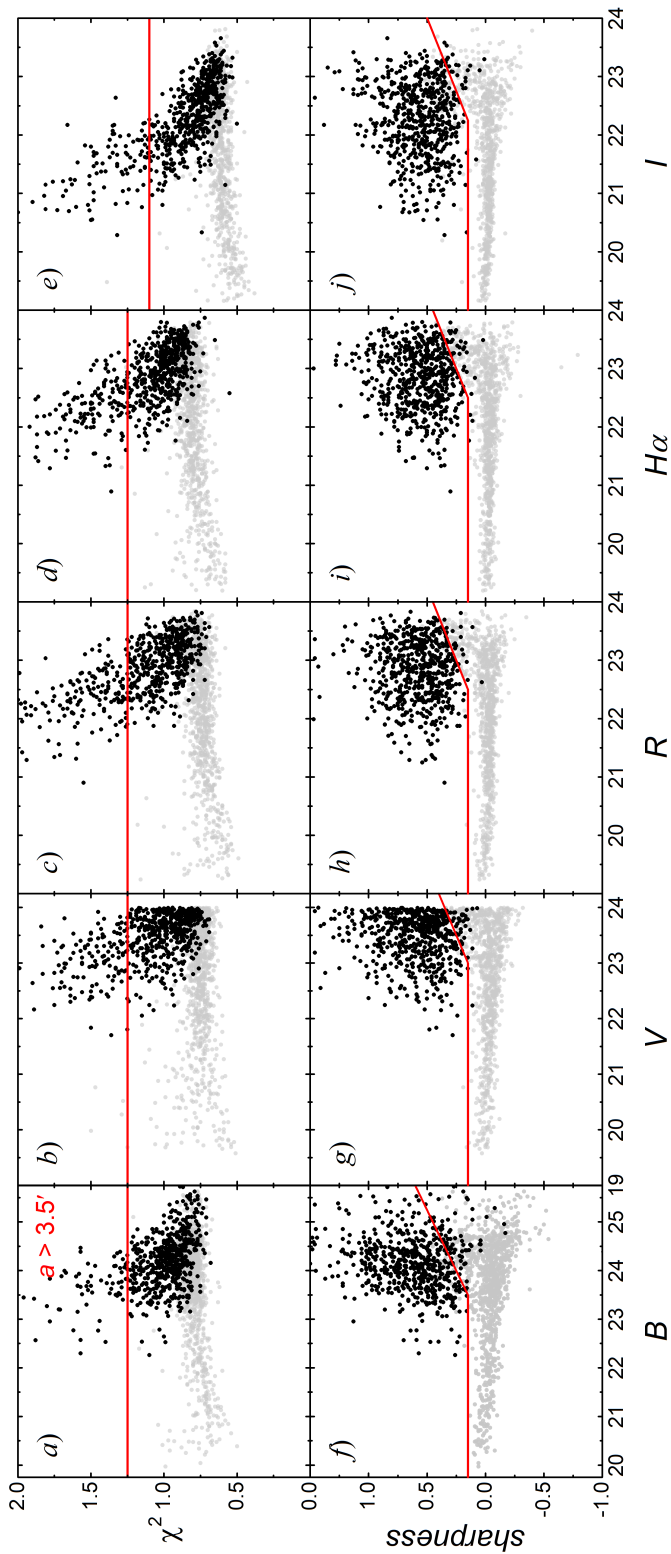


Figure 2.4 Same as in Fig. 2.3, but for the outer, less crowded field ($a > 3'.5$, see Fig. 2.2d).

2.2 HST/ACS

The Leo A galaxy was observed with the HST/ACS in the $F475W$ and $F814W$ passbands as a part of the Local Cosmology from Isolated Dwarfs (LCID¹) project (Cole et al. 2007). We retrieved the available automatically processed (bias-subtracted, flat-fielded and charge transfer efficiency corrected) HST/ACS flic images from the Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST²). The field covered by the HST/ACS observations is outlined in yellow in Fig. 1.1.

We used AstroDrizzle 1.1.16 software (default parameter values) to align and combine images from 16 exposures to produce cosmic-ray-free frames for both $F475W$ and $F814W$ passbands. We performed stellar photometry using the software package DOLPHOT 2.0 (Dolphin 2000) and following the recommended preprocessing steps and photometry method provided in the manual for the HST/ACS module.

The primary catalogue comprised of 189 947 objects with measurements in two photometric passbands. Since automated search for stellar objects also includes other light sources, such as distant background galaxies, foreground MW stars and image artefacts, we visually inspected the mosaic images, in order to identify and exclude the obvious contaminants, as well as objects residing close (8 pixels) to the edge of the frame. Additionally, extended sources were removed by restricting the *sharpness* parameter ($0.2 < \textit{sharpness} < -0.2$) in both $F475W$ and $F814W$ passbands. The decontaminated catalogue contained 151 146 objects.

2.3 HST/WFC3

A portion of an outer region ($\sim 6'$ north-west of the centre) of the Leo A galaxy was observed with the HST Wide Field Camera 3 (WFC3) in the $F475W$ and $F814W$ passbands as a part of the High-resolution Space Telescope Proper Motion Collaboration (HSTPROMO) program – Mass of the Local Group from Proper Motions of Distant Dwarf Galaxies (the HST proposal GO 12273). We retrieved archival bias-subtracted, flat-fielded, charge transfer efficiency corrected WFC3/UVIS flic images from the MAST. The field covered by the HST/WFC3 observations is outlined in green in Fig. 1.1.

We used DrizzlePac 2.1.6 software (default parameter values) to align and combine images from four sub-exposures to produce cosmic-ray-free frames for the $F475W$ and $F814W$ passbands. Stellar photometry was performed using the software package DOLPHOT 2.0 (Dolphin 2000) and following the recommended preprocessing steps and photometry method provided in the manual for the HST/WFC3 module.

¹<http://www.iac.es/proyecto/LCID>

²<http://archive.stsci.edu>

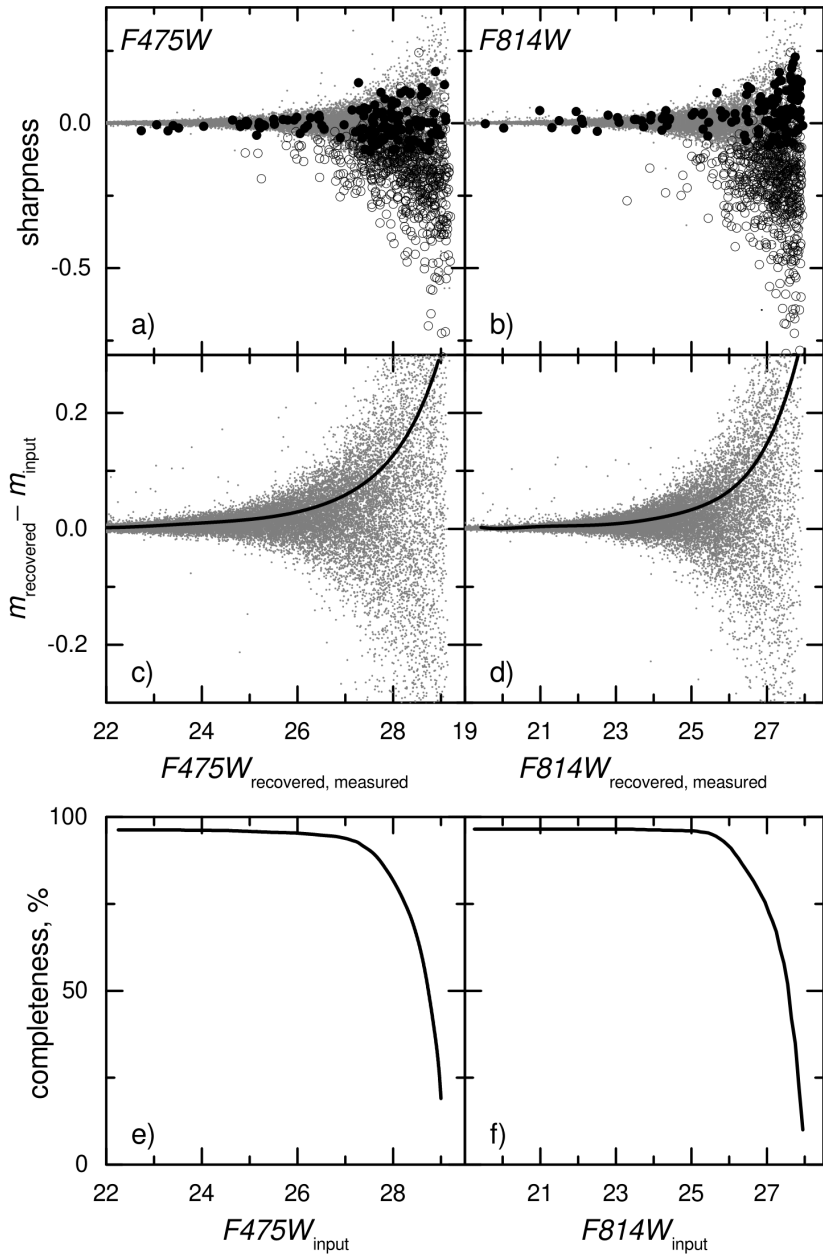


Figure 2.5 AST results in the HST/WFC3 $F475W$ and $F814W$ passbands. *Panels a* and *b*: *sharpness* as a function of magnitude for the AST stars (grey dots) and the real measured objects (filled and open circles for star-like and extended objects, respectively). *Panels c* and *d*: the difference of recovered and input magnitudes of the AST stars (grey dots); black lines indicate average photometric errors of the real objects. *Panels e* and *f*: derived photometry completeness as a function input magnitude in $F475W$ and $F814W$ passbands.

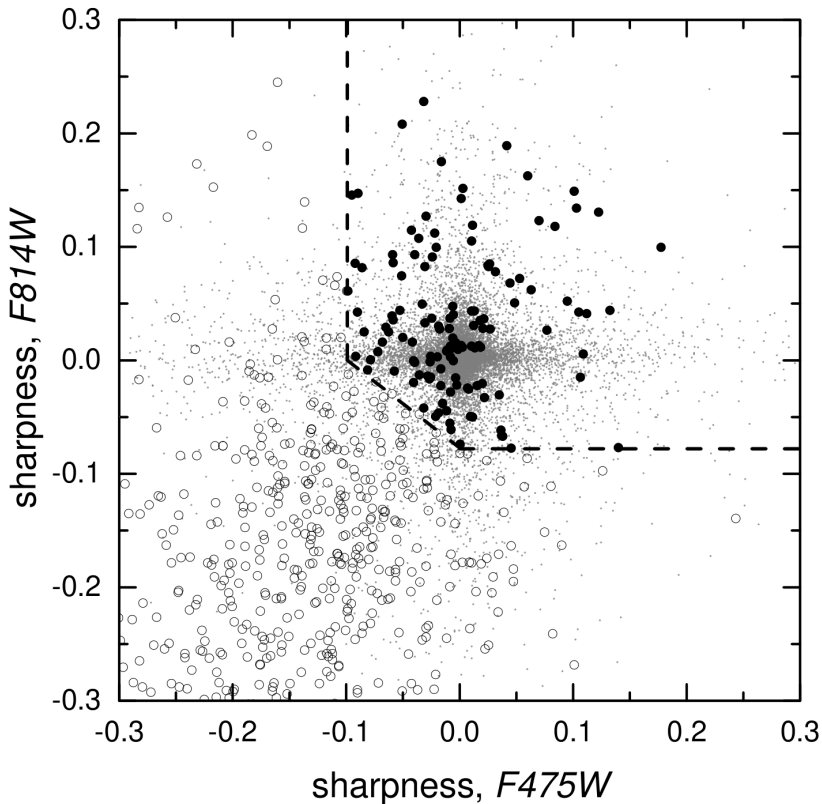


Figure 2.6 *Sharpness* of the measured point-like objects (filled and open circles) and AST stars (grey dots) in the $F475W$ and $F814W$ HST/WFC3 passbands. Dashed lines mark the limits selected to define star-like objects (black filled circles) used for the analysis of the outskirts of Leo A.

The initial catalogue contained more than 60 000 objects. In order to eliminate extended sources and artefacts, we, firstly, excluded objects with measurements in only one filter or a DOLPHOT photometry magnitude error (in either filter) larger than 0.3 mag, and then visually inspected the images to identify the remaining obvious contaminants. This resulted in a catalogue of 756 objects. Their sharpness and photometric errors as a function of magnitude in the two HST/WFC3 passbands are presented in Fig. 2.5a-d.

In order to evaluate photometric errors and observation completeness, and thus assure a reliable interpretation of the CMD of sparsely populated outskirts of the Leo A, an artificial star test (AST) was performed. In total, 35 000 artificial stars (distributed uniformly throughout the field) were generated using the DOLPHOT fake star program. The colours and magnitudes of the artificial stars were set to fall within the ranges of the observed values, namely,

$-1 < (F475W - F814W) < 5$ and $22 < F475W < 32$. In Fig. 2.5, grey dots indicate sharpness (panels a and b) and the difference of recovered and input magnitudes (panels c and d) of the AST stars as a function of magnitude in the two HST/WFC3 passbands. In panels e and f of Fig. 2.5, the estimates of photometric completeness ($N_r/N_i \times 100\%$, where N_r and N_i are numbers of input and recovered artificial stars, respectively) are shown as a function of the input magnitudes in $F475W$ and $F814W$ passbands.

In order to select star-like objects from the roughly decontaminated catalogue of 756 objects, we used the $sharpness_{F814W}$ vs. $sharpness_{F457W}$ diagram (Fig. 2.6) of the AST and observed objects. Extended sources, such as background galaxies or unresolved stellar blends, have negative sharpness values (Dolphin 2000, see Eq. (14)). To exclude objects with overly negative sharpness we determined appropriate limits based on diagrams of sharpness as a function of magnitude (Fig. 2.5a and b) for the observed and AST stars by taking a 3σ criterion of sharpness scatter of the measured objects at $F475W = 27.0$ and $F814W = 25.5$, where the scatter of the AST star sharpness starts to overlap with the sharpness of observed objects ($sharpness_{F457W} > -0.099$; $sharpness_{F814W} > -0.078$). Additionally, we connect the two limits at the points where $sharpness = 0$ in both of the passbands (see Fig. 2.6), thus rejecting more of the likely contaminants and leaving us with 128 probable star-like objects. However, some of the remaining objects could still be unresolved background galaxies (mainly the so-called “faint blue galaxies” that are abundant at magnitudes fainter than $F814W \sim 25$; Ellis 1997), or MW white dwarfs.

Chapter 3

Old stellar populations in the Leo A galaxy

Low- and intermediate-mass ($0.5\text{-}8 M_{\odot}$) stars are the most numerous stars in the Universe, thus they play a significant role in the chemical evolution of galaxies. After hydrogen is exhausted in their core, these stars leave the main sequence and enter a phase of shell hydrogen burning where they evolve up the red giant branch (RGB) until the core helium burning begins and they move down to the horizontal branch. Once the helium is exhausted in the core the stars enter a phase where helium burning occurs in the shell surrounding the core and hydrogen burning takes place outside the He-burning shell. At this point stars are evolving up the asymptotic giant branch (AGB) where they experience recurring mixing events due to the instability of their He-burning shell. During the AGB phase stellar outflows and winds cause a significant mass loss, leading to the enrichment of the interstellar medium with chemical elements synthesized by these stars (e.g., Herwig 2005; Karakas & Lattanzio 2014).

Thermally unstable AGB stars represent intermediate-age ($\sim 1\text{-}3$ Gyr) stellar populations that provide insight into the structural features of galaxies (McQuinn et al. 2017; Jones et al. 2018). RGB stars represent old ($\sim 2\text{-}13$ Gyr) stellar populations that often have an extended distribution and dominate the outskirts of dwarf irregular galaxies, making them ideal tracers of the extent and global structure of dwarf galaxies (e.g., Vansevičius et al. 2004; Hidalgo et al. 2009; Sanna et al. 2010; Bellazzini et al. 2014). Since AGB and RGB stars are excellent tracers of both morphology and chemical evolution of galaxies, we study these stars in Leo A to better understand its structural properties.

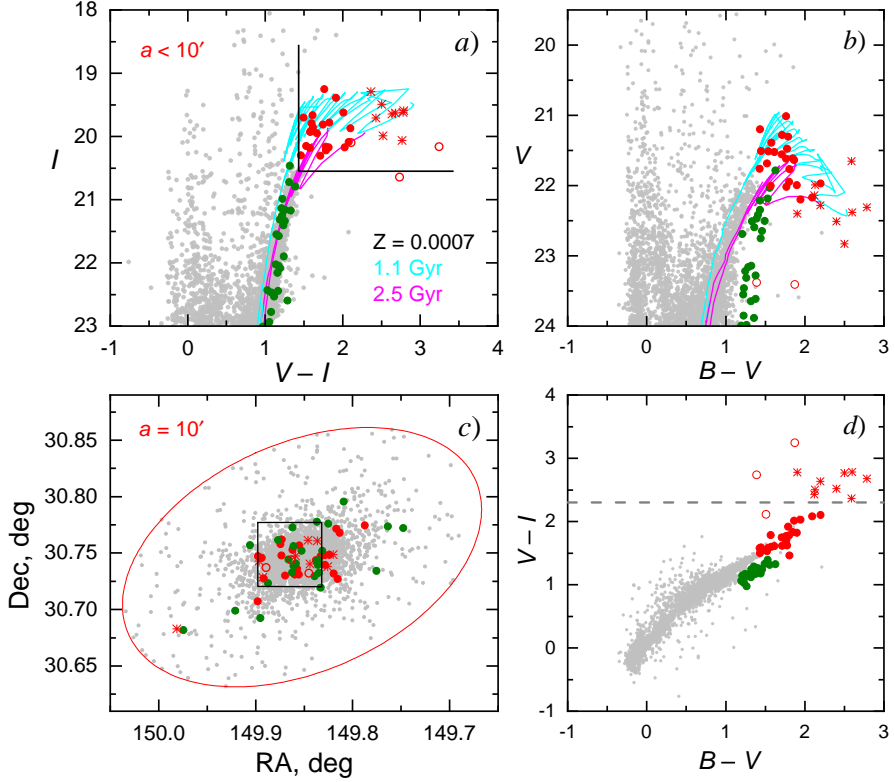


Figure 3.1 Diagrams of decontaminated Subaru Suprime-Cam photometry data. *Panel a*: I vs. $V - I$ diagram. Red symbols depict AGB stars (selection limits for the luminous AGB stars are indicated by black lines): dots – AGB stars; asterisks – AGB stars with circumstellar dusty envelopes (see Sect 3.1.2); open circles – cAGB stars. Green dots mark peculiar RGB stars (see Sect 3.2.2). Grey dots are the remaining objects in the decontaminated catalogue. Symbols and colours correspond to the same objects in all panels. PARSEC release v1.2S isochrones (Bressan et al. 2012) of 1.1 Gyr (cyan) and 2.5 Gyr (magenta) ages and of $Z = 0.0007$ metallicity are overlaid in *panels a* and *b*. The isochrones are shifted in magnitude and colour, adopting a true distance modulus of 24.58 (see Sect 3.2.1), using foreground MW extinction derived from Schlafly & Finkbeiner (2011) data, and assuming the Fitzpatrick (1999) reddening law $R_V = 3.1$ ($A_B = 0.075$, $A_V = 0.057$, $A_I = 0.031$). *Panel b*: V vs. $B - V$ diagram. *Panel c*: spatial distribution of objects within the $a = 10'$ ellipse centred on the Leo A galaxy. Ellipticity of the depicted ellipse is $b/a = 0.6$ and the position angle of the major axis is P.A. = 114° . A black square shows the area ($3'.4 \times 3'.4$) of NIR observations by Jones et al. (2018) (see Sect 3.1.2). *Panel d*: two-colour diagram, $V - I$ vs. $B - V$. A horizontal dashed line marks the lower limit ($V - I = 2.3$) of the region occupied by luminous AGB and cAGB stars that possess circumstellar dusty envelopes (see Sect 3.1.2).

3.1 AGB stars in the Leo A galaxy

We define luminous AGB stars to be brighter and redder than the tip of the RGB (TRGB, $I = 20.55$, $V - I = 1.43$). The selection limits for these stars are indicated by the black lines in an I vs. $V - I$ diagram shown in Fig. 3.1a. The selected sample of luminous AGB stars consist of 32 objects (red symbols in Fig. 3.1), however, we additionally select three candidate AGB stars (cAGB; red open circles). The cAGB stars are known to be variable (see Sect. 3.1.1) and thus might have somewhat distinct photometry causing them to lie in unusual positions when compared to other AGB stars in various CMDs. PARSEC isochrones (Bressan et al. 2012) of ages 1.1 Gyr (cyan) and 2.5 Gyr (magenta) and of $Z = 0.0007$ metallicity are overlaid in panels a and b of Fig. 3.1 to roughly indicate the approximate age range of the luminous AGB stars in Leo A.

3.1.1 Variable AGB stars

We have cross-identified luminous AGB stars with the variable star catalogues available in the literature. We find that our selected AGB and cAGB stars have counterparts among the long-period variables (LPVs) previously identified in the works of Snigula (2005), Gössl (2007), and Jones et al. (2018) (Table 3.2). AGB13, AGB15 and AGB16 are also identified as counterparts to candidate LPVs listed in Bernard et al. (2013), namely, VC05, VC09, and VC12. Additionally, we cross-matched our subset of AGB stars to the variable star catalogue of the DUST in Nearby Galaxies with Spitzer (DUSTiNGS) survey (Boyer et al. 2015) and found AGB27 and cAGB02 to be the only stars with counterparts among variables detected in IR.

3.1.2 Dust-enshrouded AGB stars

Jones et al. (2018) used the WIYN High-resolution Infrared Camera (WHIRC) at Kitt Peak to obtain near-infrared (NIR) observations of the Leo A and Sextans A dwarf irregular galaxies with the intent to study their dusty evolved stellar populations. The WHIRC camera field of view ($3'4 \times 3'4$) covered the central part of Leo A (see the black outline in Fig. 3.1), where 32 dust-producing stars were identified by the authors, confirming that evolved stars in metal-poor galaxies can form substantial amounts of dust. Some of the luminous AGB stars studied in this thesis may in fact be evolved, dusty AGB stars, thus we cross-identified them with the ones catalogued by Jones et al. (2018) in order to identify the photometric properties of such objects in the optical passbands, which could help expand the list of possibly dusty stars in Leo A, as data covering the entire extent of the galaxy is available.

We find that the three cAGB stars, as well as all 20 AGB stars that fall within the WHIRC's field of view, (Fig. 3.1c) have NIR counterparts. Jones et al. (2018) determined the dust production rate (DPR) for 162 NIR objects detected in the Leo A and assumed the ones with $\text{DPR} > 10^{-11} \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ to

Table 3.1. AGB stars in the Leo A galaxy

ID	RA(J2000)	Dec(J2000)	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>I</i>	<i>R</i>	<i>H</i> α	DPR	flag
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
AGB01	149.7874	30.7744	23.575	22.006	20.222	21.071	21.148	–	0
AGB02	149.8133	30.7679	23.251	21.476	19.857	20.549	20.630	–	0
AGB03	149.8155	30.7269	23.894	21.994	20.174	20.909	20.993	–	0
AGB04	149.8168	30.7715	22.991	21.279	19.668	20.276	20.343	–	0
AGB05	149.8195	30.7319	23.788	22.020	20.308	20.934	21.011	–	0
AGB06	149.8200	30.7485	24.119	21.990	19.490	20.678	20.836	–	1
AGB07	149.8240	30.7483	23.193	21.761	20.184	20.880	20.928	–	0
AGB08	149.8255	30.7379	24.977	22.380	19.595	20.720	20.853	–	1
AGB09	149.8285	30.7396	23.750	21.946	20.166	20.693	20.755	–	0
AGB10	149.8288	30.7480	22.782	21.017	19.252	20.158	20.242	–	0
AGB11	149.8331	30.7473	23.504	21.638	19.627	20.721	20.798	4.2E-11	0
AGB12	149.8364	30.7608	24.256	22.138	19.709	20.678	20.831	6.4E-12	1
AGB13	149.8377	30.7437	24.170	21.971	19.871	20.787	20.850	2.8E-12	0
AGB14	149.8440	30.7405	24.478	22.281	19.646	20.784	20.921	1.0E-10	1
AGB15	149.8460	30.7614	25.094	22.309	19.630	20.602	20.733	6.1E-11	1
AGB16	149.8551	30.7566	23.096	21.307	19.392	20.015	20.096	4.0E-12	0
AGB17	149.8554	30.7310	22.953	21.508	19.923	20.551	20.608	4.5E-13	0
AGB18	149.8572	30.7359	24.149	22.202	20.174	21.122	21.236	–	0
AGB19	149.8589	30.7476	24.306	22.401	19.621	20.823	20.965	2.1E-10	1
AGB20	149.8596	30.7310	23.267	21.558	19.812	20.647	20.720	–	0
AGB21	149.8619	30.7527	24.264	22.169	20.089	21.182	21.295	2.1E-12	0
AGB22	149.8696	30.7300	23.139	21.522	19.911	20.640	20.707	4.0E-13	0
AGB23	149.8731	30.7621	22.633	21.198	19.702	20.342	20.392	5.9E-13	0
AGB24	149.8732	30.7479	23.208	21.686	20.155	20.871	20.940	3.2E-13	0
AGB25	149.8744	30.7578	23.385	21.619	19.951	20.672	20.750	2.4E-12	0
AGB26	149.8915	30.7274	22.966	21.388	19.791	20.482	20.546	–	0
AGB27	149.8928	30.7286	25.329	22.829	20.064	19.937	19.994	1.3E-09	1
AGB28	149.8937	30.7456	23.572	21.765	20.303	20.955	21.024	3.3E-13	0
AGB29	149.8965	30.7431	24.908	22.508	19.991	21.326	21.457	6.0E-12	1
AGB30	149.8974	30.7473	23.462	21.613	19.784	20.474	20.547	3.0E-12	0
AGB31	149.8977	30.7072	23.054	21.516	19.932	20.617	20.673	–	0
AGB32	149.9815	30.6830	24.246	21.654	19.290	20.251	20.360	–	1
cAGB01	149.8450	30.7320	23.718	22.209	20.098	21.190	21.094	1.8E-12	0
cAGB02	149.8633	30.7440	24.769	23.379	20.644	22.918	22.875	1.2E-09	1
cAGB03	149.8891	30.7372	25.286	23.411	20.166	22.217	22.009	4.5E-12	1

Notes. (1) ID is the identification number of a star (AGB/cAGB); (2) and (3) are the equatorial coordinates in degrees; (4)-(8) are magnitudes obtained in the Subaru/Suprime-Cam *B*, *V*, *I*, *R* and *H* α photometric passbands; (9) DPR is the dust production rate (measured in $M_{\odot} \text{yr}^{-1}$) taken from Jones et al. (2018); (10) flag: 0 for objects with no dust and 1 for objects with possible circumstellar dusty envelopes, as based on the colour ($V - I > 2.3$) of the AGB stars in the CMD.

be dust-producing stars. Cross-identification revealed that 6 of our selected objects (5 AGB stars and 1 cAGB star) are classified as dust-producing stars by Jones et al. (2018). Five of these dusty stars belong to a conspicuous group of the 11 reddest ($V - I > 2.3$) AGB and cAGB stars (Fig. 3.1). It is likely that all stars in this group (9 AGB and 2 cAGB stars) have prominent dust envelopes. Stars possibly surrounded by dusty envelopes are flagged with a value of 1 in the last column of Table 3.1. Stars at $V - I \sim 2$ also show some distinction in their colour and magnitude when compared to other AGB stars, yet it is not as pronounced.

Table 3.2. Cross-identification of the AGB, cAGB, and peculiar RGB stars in the Leo A galaxy with known variable stars.

ID	ID _{S05}	Period _{S05}	ID _{G07}	Period _{G07}	ID _{B13}	ID _{B15}	ID _{J18}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
AGB06	LeoA-19	537.99	–	–	–	–	–
AGB08	LeoA-18	299.05	–	–	–	–	–
AGB09	–	–	LL03	60.23	–	–	–
AGB13	LeoA-14	170.70	–	–	VC05	–	–
AGB14	LeoA-13	283.64	–	–	–	–	59
AGB15	LeoA-12	268.42	–	–	VC09	–	164
AGB16	LeoA-10	919.28	–	–	VC12	–	138
AGB17	–	–	–	–	–	–	18
AGB18	–	–	–	–	–	–	36
AGB19	LeoA-8	331.04	–	–	–	–	90
AGB21	–	–	–	–	–	–	116
AGB22	–	–	–	–	–	–	12
AGB23	–	–	–	–	–	–	169
AGB24	–	–	–	–	–	–	93
AGB25	LeoA-4	182.45	–	–	–	–	145
AGB27	LeoA-2	432.91	–	–	–	39467	7
AGB29	LeoA-1	268.62	–	–	–	–	–
AGB31	–	–	LL04	27.83	–	–	–
cAGB01	–	–	–	–	–	–	20
cAGB02	LeoA-6	311.06	–	–	–	53394	75
cAGB03	–	–	–	–	–	–	41
pRGB05	–	–	–	–	–	–	60

Notes. (1) ID is the identification number of a star (AGB, cAGB or pRGB) used in this work; ID_{S05} is the variable identification number from Snigula (2005); Period_{S05} is the variability period in days (Snigula 2005); ID_{G07} is the variable identification number from Gössl (2007); Period_{G07} is the variability period in days (Gössl 2007); ID_{B13} is the variable identification number from Bernard et al. (2013); ID_{B15} is the variable identification number from Boyer et al. (2015); ID_{J18} is the variable identification number from Jones et al. (2018).

3.2 RGB stars in the Leo A galaxy

The selected limits for the RGB star sample, as well as consecutive steps of the sample’s reduction, are shown in Fig. 3.2. We limit the RGB sample to only include stars up to two magnitudes fainter than the TRGB in order to avoid contamination by the red clump stars and the foreground/background objects that tend to gradually increase in number with fainter magnitudes. The initial boundaries for the RGB sample are set in the I versus $V - I$ diagram as indicated by the red lines in panels a and d of Fig. 3.2, however, additional restrictions are needed to exclude objects with distinct features in their spectra emerging due to $H\alpha$ emission or peculiar chemical composition. Such unusual objects do not remain within the RGB when plotted in various multicolour photometry diagrams, thus we employ the parameter $Q_{BVI} = (B - V) - (V - I) \cdot (E_{B-V}/E_{V-I})$ (Fig. 3.2b) and the colour index $H\alpha - R$ (Fig. 3.2c) in order

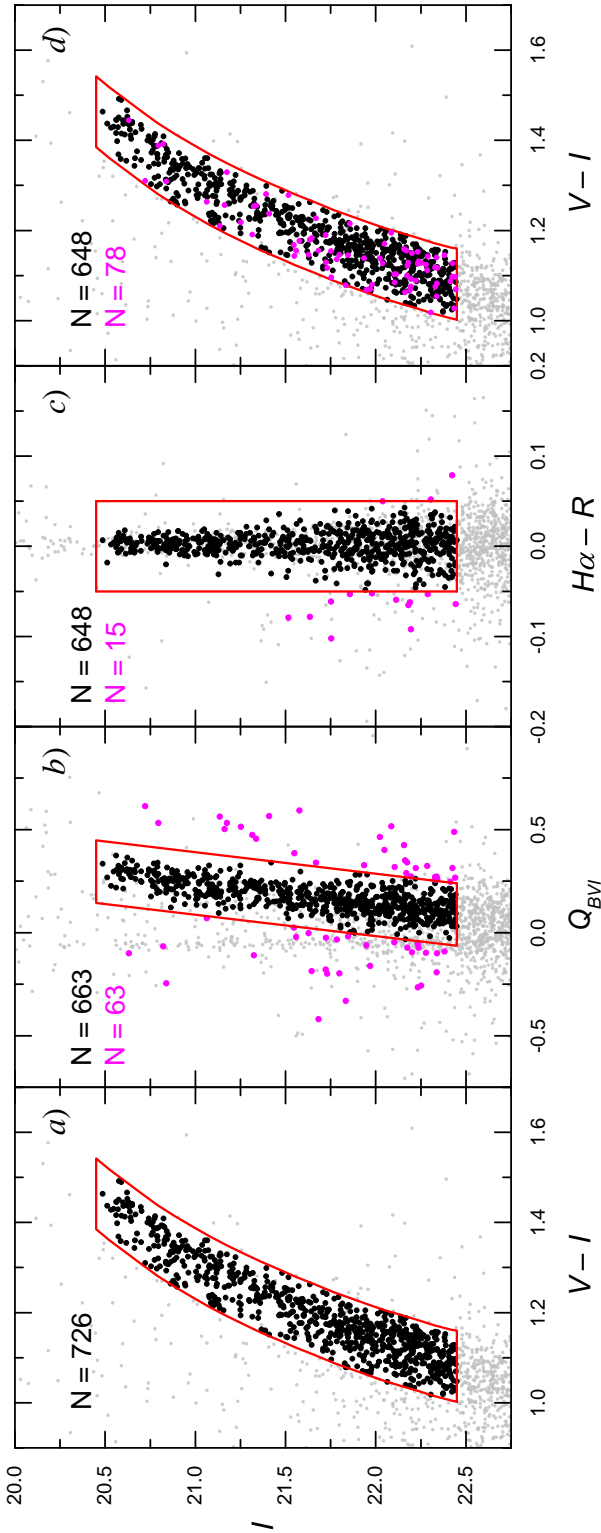


Figure 3.2 Decontaminated (based on criteria presented in Sect. 2) CMDs from Subaru/Suprime-Cam photometry ($B, V, I - \text{Stonkuté et al. 2014}; R, H\alpha - R$, $H\alpha - R$ in preparation) showing selection and additional reduction of the RGB sample. *Panel a:* I vs. $V - I$ diagram with the initial limits of the RGB outlined in red and the RGB sample stars ($N = 726$; $a = 8'$) marked by black points. *Panel b:* I vs. Q_{BVI} diagram used to exclude objects with unusual spectra (magenta points; $N = 63$) from the RGB sample. *Panel c:* I vs. $H\alpha - R$ diagram showing objects that were additionally excluded according to the criterion $|H\alpha - R| > 0.05$ (magenta points; $N = 15$). *Panel d:* CMD of the decontaminated sample of RGB stars (black dots; $N = 648$) and objects that were removed from the sample (magenta points; $N = 78$) according to requirements depicted in *panels b* and *c*.

to make the distinction between genuine and non-genuine members (black and magenta points in Fig. 3.2b-d, respectively). Starting with a sample size of 726 objects, we applied the following criteria: $(24.73 - I)/9.52 < Q_{BVI} < (21.83 - I)/9.52$, where we used $E_{B-V}/E_{V-I} = 0.72$ calculated for the characteristic colour index $V - I \sim 1.3$ of RGB stars (Taylor 1986), and $|H\alpha - R| > 0.05$. The former constraint reduced the sample by 63 objects while the latter excluded another 15 leaving the final sample with 648 RGB stars.

3.2.1 TRGB distance to the Leo A galaxy

The high quality of the RGB star photometry data (Fig. 3.2) suggested that we apply the TRGB method for distance determination to the Leo A galaxy independently from previous studies. We used the method’s prescriptions presented by Rizzi et al. (2007) and the TRGB M_I calibration versus $[M/H]$ from Bellazzini et al. (2004). Taking into account a metallicity range of the bulk of RGB stars, $[Fe/H] \sim -1.3 \div -1.7$, and a normal α -element abundance, $[\alpha/Fe] = 0.04 \pm 0.05$, estimated based on data by Kirby et al. (2017), we derived the absolute magnitude of the RGB tip to be equal to $M_I = -4.06 \pm 0.03$. We also determined the TRGB magnitude and colour index: $I = 20.55 \pm 0.01$; $V - I = 1.43 \pm 0.03$ (based on stars residing in the upper part ($I \lesssim 21$) of the RGB sequence). Therefore, the true distance modulus, $(m - M)_0$, of the Leo A galaxy, assuming an extinction of $A_I = 0.031$ (Schlafly & Finkbeiner 2011), is equal to 24.58 ± 0.04 (824 ± 15 kpc). We note, however, that here we sum up only statistical uncertainties, and any systematic calibration errors are not taken into account; the systematic error of the used method is estimated to be ± 0.12 mag (Bellazzini et al. 2004).

Our estimate of the true distance modulus is in perfect agreement with previous determinations based on the TRGB method: 24.59 ± 0.06 (corrected taking into account $M_I = -4.06$; Dolphin et al. 2003) and 24.57 ± 0.13 (Bernard et al. 2013), and with the value based on Cepheids 24.59 ± 0.03 (Tammann et al. 2011). Also, the true distance modulus derived in this paper is in reasonable agreement with those based on RR Lyrae stars (24.51 ± 0.12 , Dolphin et al. 2002; 24.48 ± 0.12 , Bernard et al. 2013) and Cepheids (24.70 ± 0.10 , Bernard et al. 2013).

3.2.2 Peculiar sequence of RGB stars

The I vs. Q_{BVI} diagram (Fig. 3.3a) reveals a prominent sequence of 26 stars that lay well separated from the RGB. The unusual sequence, that we hereafter refer to as peculiar RGB (pRGB), is conspicuous in various other CMDs as well (see green symbols in Figs. 3.1 and 3.3). We limit the pRGB sample to $I \lesssim 23$, since larger photometric errors (Fig. 3.1b) at fainter magnitudes lead to greater spread in colour making distinction between pRGB and RGB stars more complicated. A catalogue of the pRGB stars is provided in Table 3.3.

In Fig. 3.3 pRGB stars are indicated as green symbols in CMDs from both

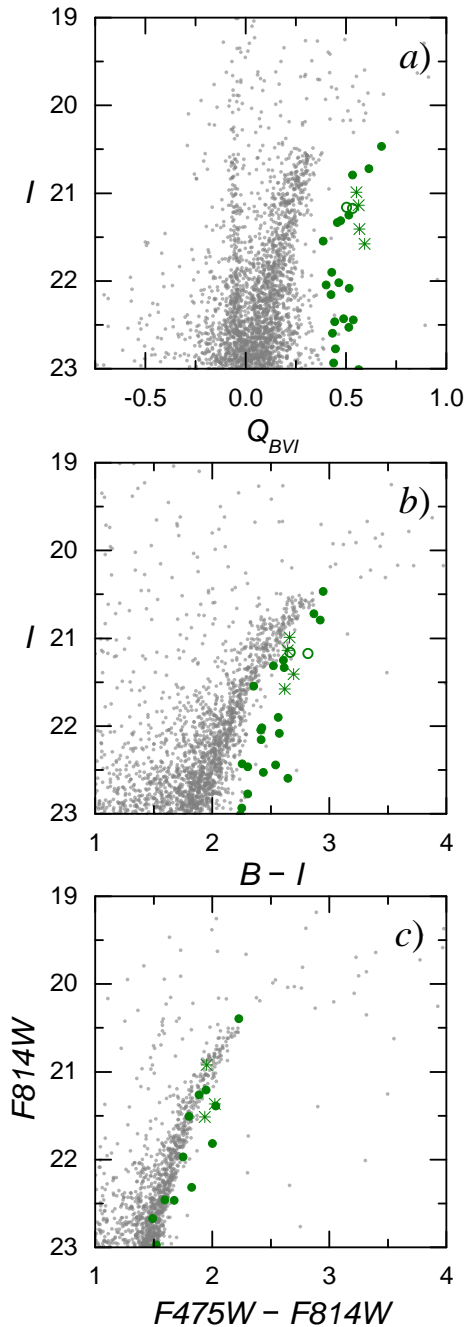


Figure 3.3 CMDs of pRGB stars. The green symbols mark pRGB stars: open circles – stars with metallicity significantly larger than average (Kirby et al. 2017); asterisks – stars with enhanced CN-band absorption (Kirby et al. 2017); dots – stars without spectroscopic measurements. *Panels a* and *b*: decontaminated CMDs from Subaru/Suprime-Cam photometry (Stonkutė et al. 2014). *Panel c*: CMD from HST/ACS photometry (Stonkutė et al. 2018).

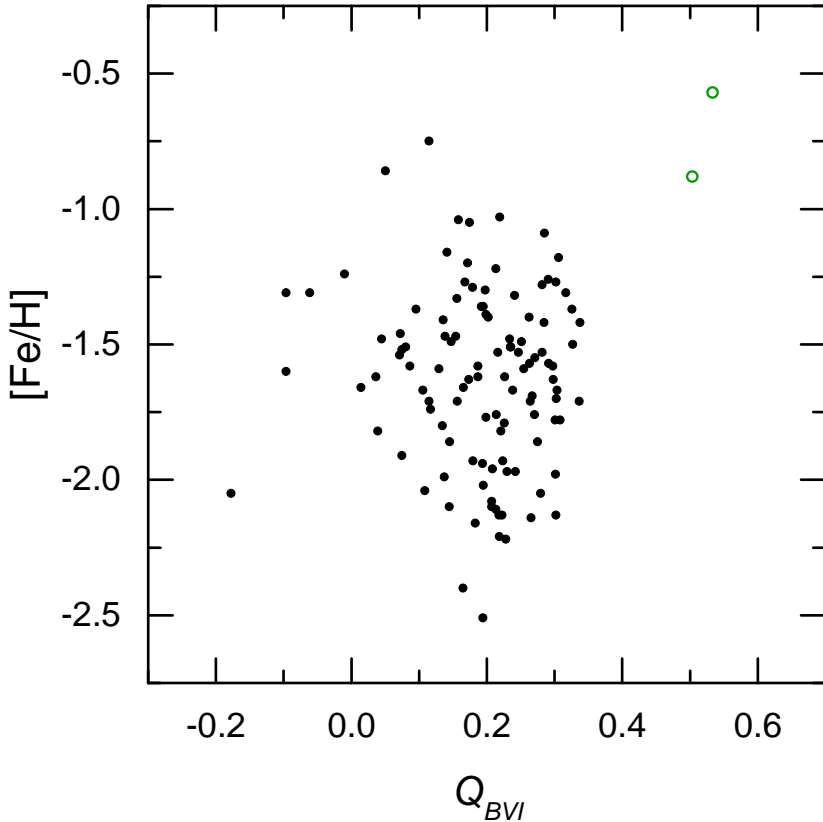


Figure 3.4 Metallicity (Kirby et al. 2017) as a function of Q_{BVI} parameter. Open green circles mark the pRGB stars with relatively large metallicity (pRGB01 and pRGB24) and filled black circles are the member stars (mainly RGB) of the Leo A galaxy as classified by Kirby et al. (2017).

the Subaru/Suprime-Cam (panels a and b; Stonkutė et al. 2014) and the HST/ACS (panel c; Stonkutė et al. 2018) photometry. Dots are stars with no available spectroscopic data, while open circles and asterisks mark the six stars, which are spectroscopically confirmed members of the Leo A galaxy (Kirby et al. 2017). Open circles indicate stars with a significantly larger metallicity than the average of the RGB stars in Leo A and asterisks – stars with CN-band absorption.

It is seen in Fig. 3.1c that an observed spatial distribution of pRGB stars (green points) is rather concentrated instead of being uniform as would be characteristic to foreground objects, thus leading to assume that these stars are genuine members of the Leo A. Additionally, the photometry data of pRGB stars are not affected by neighbouring objects or defects (see Figs. A5-A7 in the Appendix), which increases the likelihood that the divergences in the CMDs

Table 3.3. The pRGB stars in the Leo A galaxy

ID	RA(J2000)	Dec(J2000)	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>I</i>	<i>R</i>	<i>Hα</i>
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
pRGB01	149.7478	30.7721	23.995	22.504	21.175	21.688	21.707
pRGB02	149.7635	30.7736	25.245	23.885	22.598	23.169	23.198
pRGB03	149.7754	30.7340	23.718	22.185	20.796	21.333	21.354
pRGB04	149.8091	30.7955	24.692	23.463	22.435	22.842	22.881
pRGB05	149.8251	30.7760	23.592	22.033	20.723	21.223	21.259
pRGB06	149.8313	30.7519	24.969	23.650	22.532	23.007	23.022
pRGB07	149.8330	30.7195	24.465	23.220	22.049	22.520	22.498
pRGB08	149.8347	30.7325	25.253	23.987	23.013	23.398	23.439
pRGB09	149.8349	30.7436	24.989	23.613	22.445	22.908	22.888
pRGB10	149.8358	30.7396	24.448	23.163	22.024	22.485	22.517
pRGB11	149.8368	30.7776	23.650	22.215	20.989	21.480	21.505
pRGB12	149.8369	30.7426	23.841	22.508	21.317	21.799	21.806
pRGB13	149.8393	30.7293	23.955	22.594	21.338	21.837	21.854
pRGB14	149.8525	30.7520	24.773	23.551	22.469	22.895	22.879
pRGB15	149.8585	30.7406	23.417	21.788	20.467	20.963	20.964
pRGB16	149.8607	30.7561	24.467	23.144	21.902	22.382	22.397
pRGB17	149.8609	30.7387	25.079	23.854	22.776	23.237	23.248
pRGB18	149.8619	30.7726	24.196	22.755	21.578	22.032	22.073
pRGB19	149.8624	30.7326	23.903	22.692	21.549	22.030	22.043
pRGB20	149.8659	30.7443	23.864	22.472	21.253	21.759	21.770
pRGB21	149.8766	30.7614	24.105	22.647	21.410	21.905	21.912
pRGB22	149.8872	30.7233	25.193	23.994	22.939	23.372	23.393
pRGB23	149.8950	30.6924	24.577	23.317	22.158	22.644	22.663
pRGB24	149.9059	30.7570	23.828	22.419	21.162	21.667	21.678
pRGB25	149.9209	30.6988	23.782	22.347	21.136	21.651	21.687
pRGB26	149.9743	30.6818	24.660	23.281	22.086	22.509	22.517

Notes. (1) ID is the identification number of a star; (2) and (3) are the equatorial coordinates in degrees; (4)-(8) are magnitudes obtained in the Subaru/Suprime-Cam *B*, *V*, *I*, *R* and *H α* photometric passbands.

are caused by distinct physical properties of the pRGB stars rather than photometric errors.

In order to gain better insight into the nature of the pRGB stars, we cross-identified them with the spectroscopic measurements obtained by Kirby et al. (2017). A sample of 168 objects was measured in the Leo A field by Kirby et al. (2017) using the Keck/Deep Imaging Multiobject Spectrograph (DEIMOS; Faber et al. 2003). Out of these objects, 127 stars (mainly RGB) are members of Leo A, and the other objects were excluded by the authors as background galaxies or MW dwarf stars based on their specific spectral features, radial velocities or positions in the CMD. We find that six stars of our pRGB sequence have counterparts in the Kirby et al. (2017) spectroscopic catalogue and all of them show rather distinct properties. For instance, it is evident from Fig. 3.4 that metallicity of pRGB01 and pRGB24 stars (green open circles; same as in Fig. 3.3) is considerably larger ($[\text{Fe}/\text{H}] = -0.88 \pm 0.11$ and -0.57 ± 0.11 , respectively) compared to the average derived for the sample of RGB stars ($-1.67^{+0.09}_{-0.08}$). Furthermore, CN-band absorption is evident in the spectra of

the other four pRGB stars (pRGB11, pRGB18, pRGB21, and pRGB25; green asterisks in Fig. 3.3). Interestingly, even though objects with obvious CN features were excluded by Kirby et al. (2017) from the measurement of chemical abundances preventing a comparison to the regular RGB stars, out of their 168 objects only six were found to show CN absorption in their spectra and four of them belong to the pRGB, indicating that the pRGB might be comprised of carbon-enhanced stars. From the other two objects with CN-band absorption, one is a regular RGB star (not showing unusual behavior in various CMDs) and another one is classified by Kirby et al. (2017) as a non-member of Leo A.

In the HST/ACS CMD (Fig. 3.3c) the pRGB is not as prominent as in the CMDs of Subaru/Suprime-Cam (Fig. 3.3 panels a and b) due to somewhat different shapes of the $F475W$ and B passbands in the range of $\sim 380\text{-}390$ nm. However, about half of the pRGB stars located within the HST/ACS field of view are noticeably separated from a narrow and well-pronounced RGB. Such differences, as well as known presence of CN-band absorption (Kirby et al. 2017) in several pRGB stars, indicate that molecular absorption might be responsible for the conspicuous split between RGB and pRGB. Measurements in broad photometric bands can be noticeably affected, if strong molecular absorption features are present in certain regions of stellar spectra, thus resulting in distinct photometry and unusual positioning in CMDs of affected objects (Battinelli & Demers 2006).

Presence of CN absorption indicates that objects forming the pRGB sequence might be carbon stars (i.e. stars with more carbon than oxygen in their atmospheres). Transition from oxygen to carbon dominated atmospheres typically occurs in the region above the TRGB, where thermally pulsating AGB stars reside. However, for instance, Hamren et al. (2016) have identified 41 carbon stars in the satellites and halo of the M31 galaxy, but similarly to our pRGB stars, the bulk of their faint carbon stars are bluer in $V-I$ colour (with a distribution more like that of the non-carbon stars) than luminous carbon-rich thermally pulsating AGB stars. Hamren et al. (2016) assume that the unusual objects could be extrinsic carbon stars (i.e. RGB stars that have been enriched with carbon by mass transfer from their carbon-rich AGB companions in close binary systems; (Izzard & Tout 2004)). The pRGB stars in Leo A could potentially be extrinsic carbon stars as well, however, a more in-depth spectroscopic analysis of these stars is required in order to determine their origin.

3.3 Radial distributions of the AGB and RGB stars

As intermediate-age and old stellar populations can be traced by luminous AGB and RGB stars, respectively, a study of their radial distribution is of great value when determining the structural properties of a galaxy. The RGB

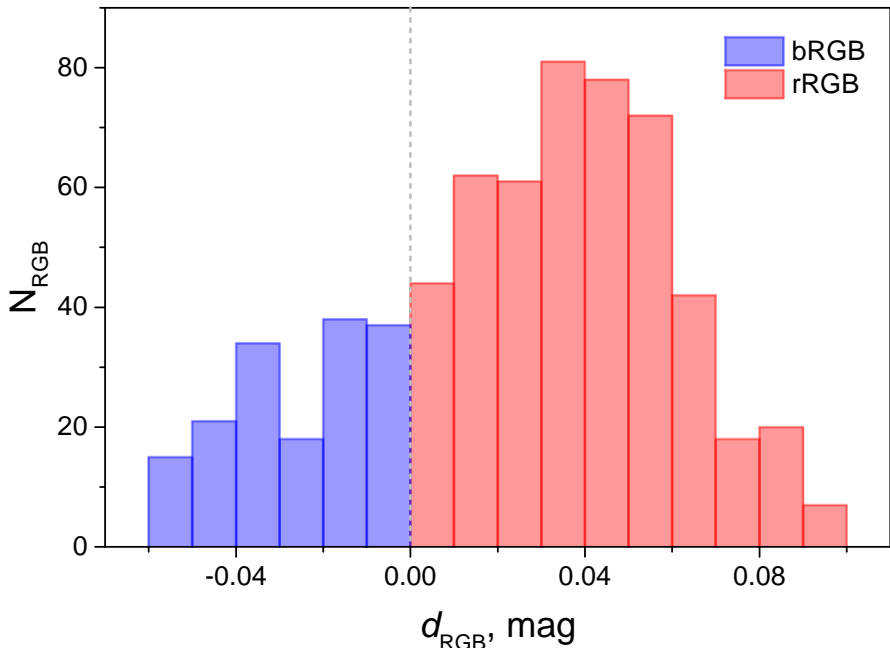


Figure 3.5 Histogram of the RGB star perpendicular distance (in magnitudes) from the dividing line in I vs. $V - I$ CMD (see Fig. 3.6). The grey dashed line marks the position of the dividing line and the resulting subsets of bRGB and rRGB stars are shown in blue and red, respectively.

stars of Leo A have a noticeably different concentration along the colour axis in the I vs. $V - I$ diagram (Fig. 3.2d), which lead us to split the sequence into two parts, in order to see whether these differences are an indication of distinct populations. We interactively analysed the variations of the number of stars within different bins along the colour axis (following the shape of the limits, which corresponds to that of a segment of an isochrone (Bressan et al. 2012) of 2.8 Gyr and $Z = 0.0006$, when adjusted assuming the Leo A distance modulus of 24.51 (Dolphin et al. 2002) and a foreground MW extinction of $A_I = 0.031$ and $A_V = 0.057$; Schlafly & Finkbeiner 2011). In Fig. 3.5 we show a histogram of the perpendicular distance of the blue (bRGB) and red (rRGB) RGB samples from the selected dividing line (indicated by the grey dashed line at $d_{\text{RGB}} = 0$). The resulting samples ended up being of the following widths: $\Delta(V - I) = 0.06$ (bRGB) and $\Delta(V - I) = 0.1$ (rRGB). The sparsely populated bRGB sample is three times smaller than the rRGB one ($N_{\text{bRGB}} / N_{\text{rRGB}} = 0.34$). The CMD of the two samples is shown in Fig. 3.6a, where they are marked by the blue (bRGB) and red (rRGB) outlines.

A study of the relations between colour, metallicity, and spatial distribution of the RGB stars could provide some valuable insight into the structural patterns in Leo A. We cross-identified our RGB sample with the stars from

Kirby et al. (2017) to supplement our data with the available spectroscopic information. In Fig. 3.6b, the resulting counterparts are plotted within our selected limits for bRGB and rRGB samples (black outlines) and colour-coded by their metallicity. No clear relation is visible between metallicity and colour of the RGB stars in the CMD. The histograms showing metallicity distributions of bRGB (blue) and rRGB (red) stars (Fig. 3.7) also appear to be similar in the metallicity range of $-1.8 \lesssim [\text{Fe}/\text{H}] \lesssim -1.3$; however, some excess (~ 1.5 times) of the rRGB stars of the lowest metallicity ($[\text{Fe}/\text{H}] \lesssim -1.8$) compared to the corresponding stars in the bRGB sample is noticeable. We note that the sample of rRGB stars with available spectroscopic measurements (Kirby et al. 2017) is 3.15 times larger than that of bRGB stars (63 and 20, respectively).

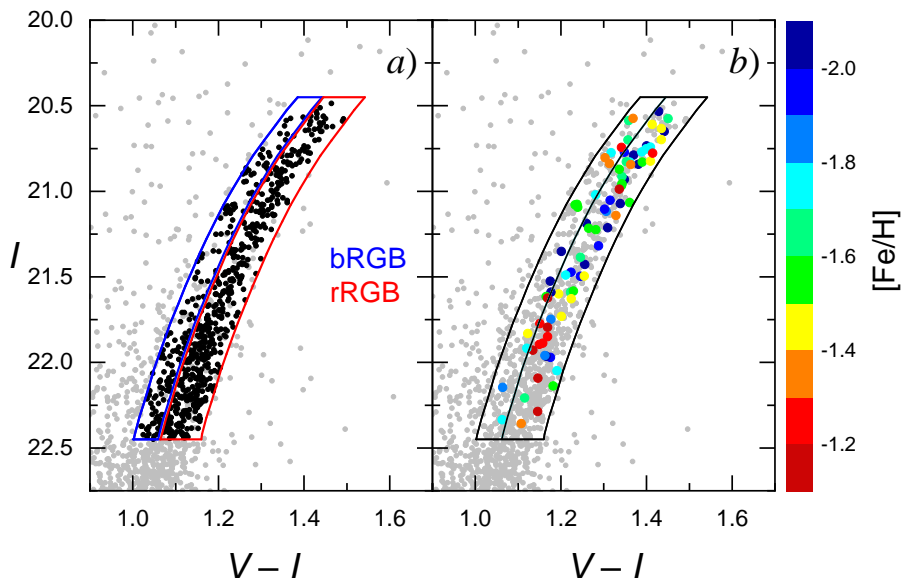


Figure 3.6 *Panel a:* I vs. $V - I$ CMD of decontaminated RGB stars (black dots). Selected zones for the bRGB and rRGB stars are outlined in blue and red, respectively. *Panel b:* RGB stars with available spectroscopic measurements (Kirby et al. 2017) colour-coded by their $[\text{Fe}/\text{H}]$ values. Selected zones (same as in *panel a*) for bRGB and rRGB stars are outlined with black lines.

It is expected that there are multiple generations of stars with ages $\gtrsim 1$ Gyr currently going through the RGB evolutionary stage within Leo A, since this galaxy is known to have an extended star forming history (Cole et al. 2007; Skillman et al. 2014). Various generations of stars contribute to the spread of the RGB sequence, as the colour of a star greatly depends on its age and metallicity. However, the two parameters have an opposite effect on the stars' colour, as older stars are redder and younger ones are bluer, while the more metal-poor stars (typically older) tend to be bluer than the more metal-rich ones (younger). Such counteracting effects of age and metallicity might be just

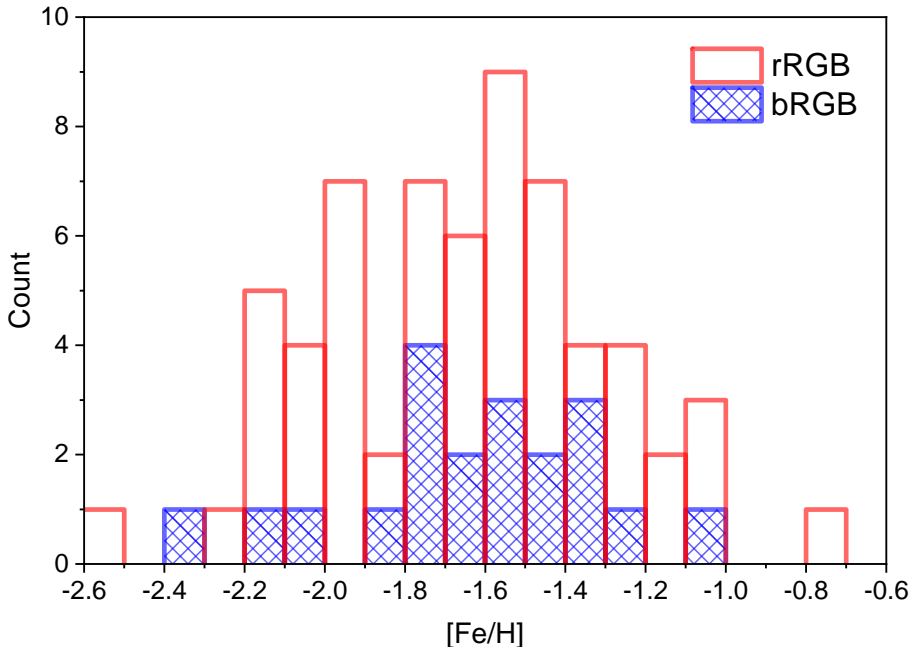


Figure 3.7 Metallicity distributions for bRGB (blue) and rRGB (red) stars from the spectroscopic sample of Kirby et al. (2017).

large enough in Leo A to compensate for each other and result in a relatively narrow RGB ($\Delta(V - I) \sim 0.2$), similarly to a very narrow RGB clearly caused by the age-metallicity degeneracy in the Carina dwarf spheroidal (dSph) galaxy, where multiple populations of distinct ages are known to reside (Koch et al. 2006; Venn et al. 2012).

According to the findings of Kirby et al. (2017), Leo A has a rather shallow age-metallicity relation that turns upwards only during the past 5 Gyr. Confirming results were also found by Skillman et al. (2014), who showed that metallicity started to progressively increase with time ~ 5 Gyr ago, when star formation in Leo A became more active (Cole et al. 2007). This indicates that age might be a dominant factor causing the spread in colour of the oldest ($\gtrsim 5$ Gyr) stars, while larger metallicity might additionally redden the younger stars (~ 2 -5 Gyr). In Fig. 3.6b, the I vs. $V - I$ CMD shows the presence of an age-metallicity degeneracy in Leo A, as RGB stars of various metallicities clearly overlap.

Despite the fact that no clear distinction between different populations of RGB stars is visible in the CMD (Fig. 3.6), substantial differences are present in the spatial distribution of bRGB and rRGB stars, as can be seen in panels a and c of Fig. 3.8 (see also the surface number density profiles in Fig. 3.9). The rRGB stars have an extended and rather uniform distribution, while the bRGB stars are considerably more centrally concentrated and appear to be confined

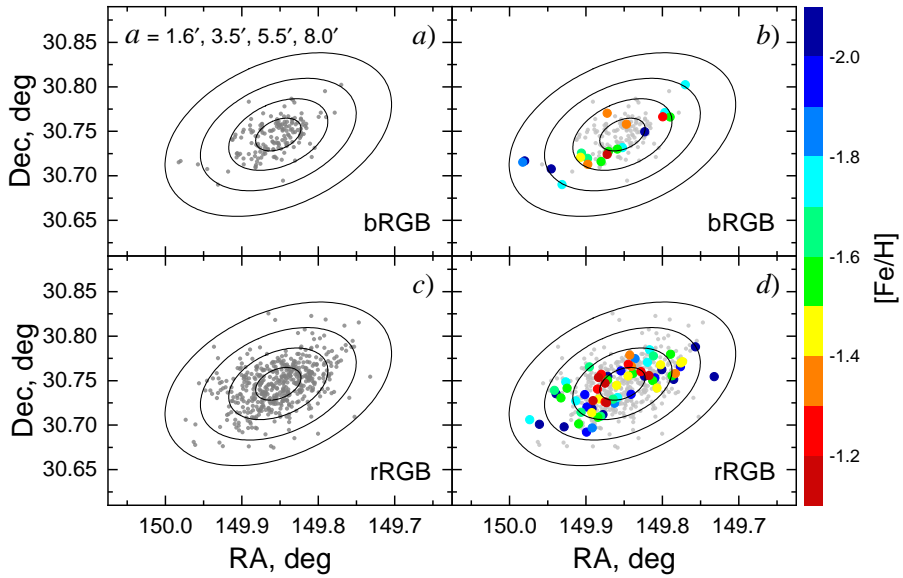


Figure 3.8 Spatial distribution of bRGB (*panels a and b*) and rRGB (*panels c and d*) stars. The bRGB and rRGB stars with available spectroscopic data (Kirby et al. 2017) are overplotted in *panels b and d*, respectively, and colour coded by their $[\text{Fe}/\text{H}]$ values (same as in Fig. 3.6). Parameters of the depicted ellipses are as follows: semi-major axis, a (indicated in *panel a*); ellipticity, $b/a = 0.6$; position angle of the major axis, $\text{P.A.} = 114^\circ$.

to $a < 3'.5$, the Holmberg radius ($B = 26.5 \text{ mag arcsec}^{-2}$) of the Leo A galaxy (Mateo 1998). Interestingly, the opposite effect was reported by Taibi et al. (2018) for the Cetus dSph galaxy, where the red RGB stars were found to be more concentrated than the blue RGB stars. However, this can be explained by the fact that most of the stars in the Cetus formed in the early stages of its evolution and virtually no star formation happened in the past ~ 8 Gyr. Such star formation history leads to the spread of RGB being primarily determined by stellar metallicity, thus there is a clear colour-metallicity relation in the RGB sequence of the Cetus dSph galaxy: red stars are metal-rich and blue stars are metal-poor. On the contrary, stars have been continuously forming with varying degrees of efficiency throughout the entire lifetime of Leo A, which resulted in a wide range of stellar ages and metallicities that caused RGB stars from various generations to overlap in the CMD. These properties indicate some possible variance between different types of galaxies: dwarf spheroidal (Cetus) and dwarf irregular (Leo A).

Additionally, in Fig. 3.8, distributions of bRGB and rRGB stars possessing spectroscopic measurements (Kirby et al. 2017) are shown in panels b and d, respectively, with colour-coding of metallicity matching the one depicted in Fig. 3.6b. While no obvious distinction can be made between the two subsets

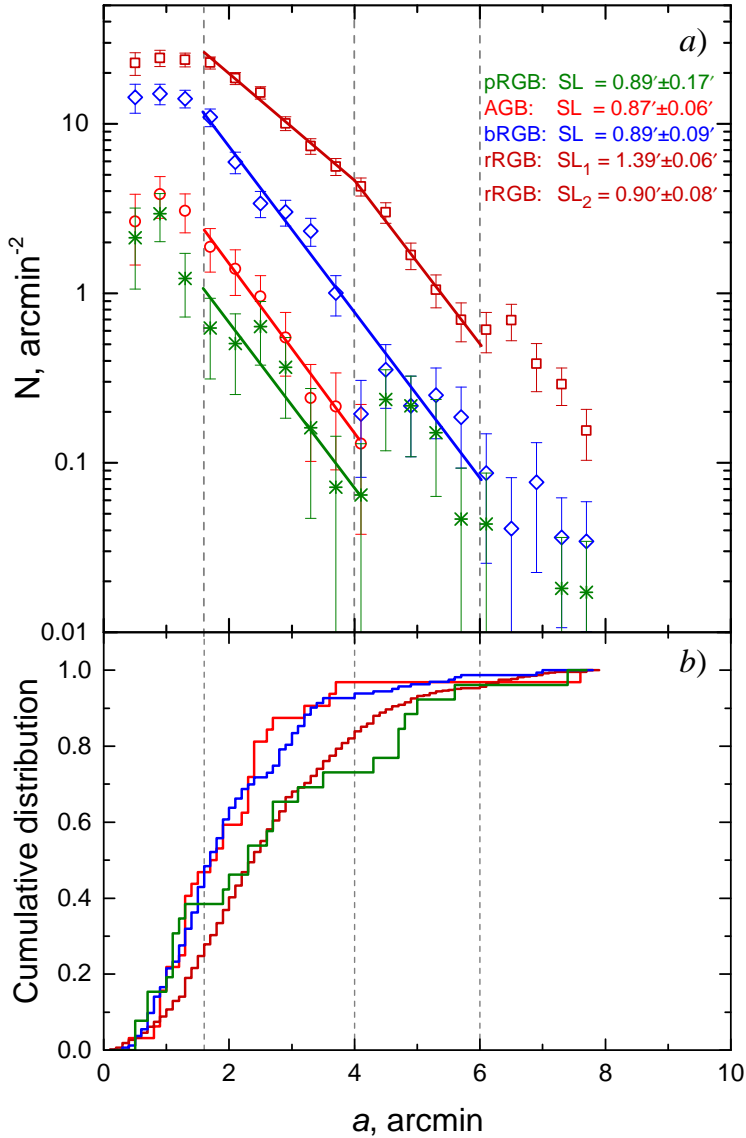


Figure 3.9 *Panel a*: surface number density profiles of RGB (bRGB – blue diamonds, rRGB – dark red squares), AGB (red circles), and pRGB (green asterisks) stars measured in elliptical annuli. Linear fits are shown for different segments of the profiles and corresponding SL values are indicated in the legend (subscripted numbers indicate segments going from the central parts outward). Vertical dashed lines indicate: a limit for a crowded central part of the galaxy ($a = 1.6'$, completeness at $I = 22.5$ is $\sim 80\%$), an edge of the distribution of bright AGB stars ($a \sim 4'$), and a position of a prominent break in the rRGB profile ($a \sim 6'$). *Panel b*: normalized cumulative distributions of AGB, pRGB, bRGB and rRGB stars (colours are the same as in *panel a*).

of stars based on their metallicities in the CMD, their spatial distributions do reveal that more metal-rich stars are concentrated in the central part of the galaxy and the outskirts are clearly dominated by the metal-poor stars.

In panels a and b of Fig. 3.9, we show the surface number density profiles and cumulative distributions of RGB stars, respectively. The surface number density is defined as $N = N_0 \exp(-a/\text{SL})$, where SL is the scale length and a is the distance along the semi-major axis. A high concentration of bRGB stars (blue symbols) in the inner part of the galaxy ($1.6 < a < 4.0$) is clearly evident from a considerably steeper radial profile than that of the rRGB stars (dark red) with scale lengths of 0.89 ± 0.09 and 1.39 ± 0.06 for the two populations, respectively. Luminous AGB stars (red) are centrally concentrated similarly to bRGB stars ($\text{SL}_{\text{AGB}} = 0.87 \pm 0.06$). Nearly the same SLs of the two populations indicate that they likely represent the same generation of stars. Additionally, cumulative distributions (panel b) also show similarities between the luminous AGB and bRGB populations, as 90% of stars in both of them are located within the Holmberg radius ($a < 3.5$), as opposed to more extended populations of pRGB and rRGB stars that contain 90% of their stars within an ellipse of $a \sim 5'$. The surface number density profile of pRGB stars (green) has a SL similar to those of AGB and bRGB stars (0.89 ± 0.17 ; $a < 4'$). However, a complex form of the entire pRGB radial profile (Fig. 3.9a), as well as the uncertain nature of these objects, makes it impossible to assume them to belong to any single population, as they might actually represent various generations of stars.

In panels b and d of Fig. 3.8, we see that the majority of metal-rich stars in both bRGB and rRGB samples are located in the inner part of Leo A. If bRGB and luminous AGB stars do indeed belong to the same generation, as implied from their surface number density profiles and cumulative distributions (Fig. 3.9), we could assume that bRGB stars are rather young and likely more metal-rich than the old RGB stars, since luminous AGB stars (i.e., stars undergoing the phase of thermal pulsations) represent an intermediate-age population ($\sim 1\text{-}3$ Gyr). Therefore, it seems reasonable to assume that the majority of metal-rich RGB stars (including the ones without available spectroscopic measurements) are located within the Holmberg radius (see also the metallicity gradient of RGB stars in Leo A shown in Fig. 11 by Kirby et al. 2017). The spatial distributions of bRGB and rRGB stars (panels a and c of Fig. 3.8), as well as their radial profiles (Fig. 3.9), also imply that the two populations have significantly different SLs in the inner part of the galaxy. Both these results indicate an apparently shrinking star-forming disk of Leo A, which is in agreement with the outside-in star formation scenario of dwarf galaxy evolution (see e.g., Bernard et al. 2007; Zhang et al. 2012; Hidalgo et al. 2013; Benítez-Llambay et al. 2016).

Additionally, to test the outside-in star formation scenario, we looked into

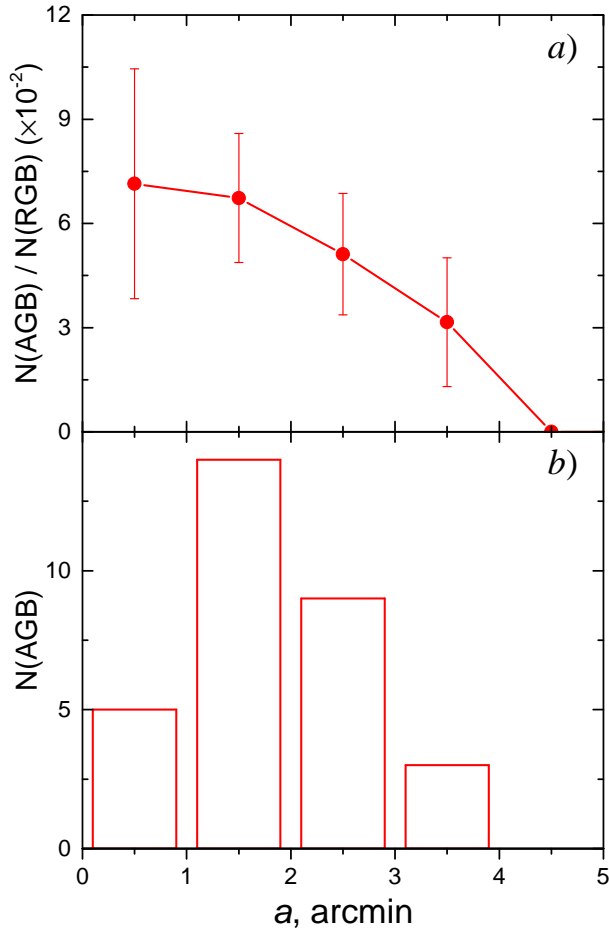


Figure 3.10 *Panel a*: ratios of luminous AGB to RGB stars in elliptical annuli. *Panel b*: number of luminous AGB stars in elliptical annuli.

the ratios of a number of luminous AGB to RGB stars as a function of radial distance along the major axis of Leo A, as provided in Fig. 3.10a. In Fig. 3.10b the number of luminous AGB stars in elliptical annuli is also shown. Similar analysis was reported by McQuinn et al. (2017) for nine dwarf galaxies residing in the distant parts of the Local Group. The authors used IR (3.6 and 4.5 μm) data from the DUSTiNGS survey (Boyer et al. 2015), as well as the archival HST optical imaging data, to identify thermally pulsating AGB stars (tracing intermediate-age populations) and RGB stars (old populations), which they then used to test different theories of evolution and structure formation in dwarf galaxies by comparing their radial distributions in the studied galaxy sample. McQuinn et al. (2017) found that six galaxies in their sample have well-mixed intermediate-age and old populations, while the IC 10 shows evidence of a more centrally concentrated intermediate-age population and other

two galaxies, NGC 147 and NGC 185, also show intermediate-age radial gradients (a higher ratio of AGB to RGB stars) in their inner regions, however, well-mixed populations (relatively constant AGB/RGB ratio) are evident in their outer regions. Similarly to the three latter galaxies, Leo A also shows a prominent decline in the ratio of AGB to RGB stars with increasing radius (Fig. 3.10a). These are four different types of galaxies with unique structure and evolutionary properties, however, they all seem to have fairly young populations concentrated in their central regions: all stars of ages $\lesssim 300$ Myr in Leo A are confined to $a < 4'$ (see the analysis of young populations in Ch. 4); IC 10 is a starburst galaxy with significant star formation over the last few Myr happening predominantly within the inner regions (Sanna et al. 2010); NGC 147 and NGC 185 are dwarf spheroidal galaxies with no current star formation activity, but with populations as young as ~ 200 -300 Myr present in their central regions (Hamedani Golshan et al. 2017). Dwarf galaxy evolution models indicate that the star-forming disk of a galaxy shrinks with the ever reducing supply of gas, while the older stars, additionally, experience a stronger systematic outward migration, which leads to a possible formation of prominent population gradients, if no external interactions occur (Stinson et al. 2009; El-Badry et al. 2016). Thus the noticeable intermediate-age radial gradients in these four galaxies might be an indication of outside-in star formation scenario. Additionally, it is seen in Fig. 3.10b that in Leo A luminous AGB stars are traced to just a little over the Holmberg radius (with an exception of a single outlier, AGB32, at $a \sim 8'$), while thermally pulsating AGB stars are detected well beyond this radius in the entire galaxy sample of McQuinn et al. (2017) (see the last column in their Table 5 for the values of Holmberg radii of each galaxy), which further confirms the outside-in star formation scenario in Leo A.

3.4 Stellar populations at the outskirts of the Leo A galaxy

Wide-field observations with the Subaru/Suprime-Cam (Stonkutė et al. 2014) covered the field of Leo A in its entirety enabling analysis of the extent and structural characteristics of the galaxy presented above. However, the RGB stars are not numerous enough at the very outskirts of the galaxy to strictly define its edge. Furthermore, ground-based observations have limited resolution making it difficult to clean the RGB sample of foreground and background contaminants in order to get a highly reliable sample of member stars at the edge of the galaxy. To get a better insight into what is happening at the outskirts of the Leo A, we made use of the available archive HST/WFC3 observations that enabled us to study stellar populations below the horizontal branch. For the details of the observations and data reduction, refer to Sect. 2.3.

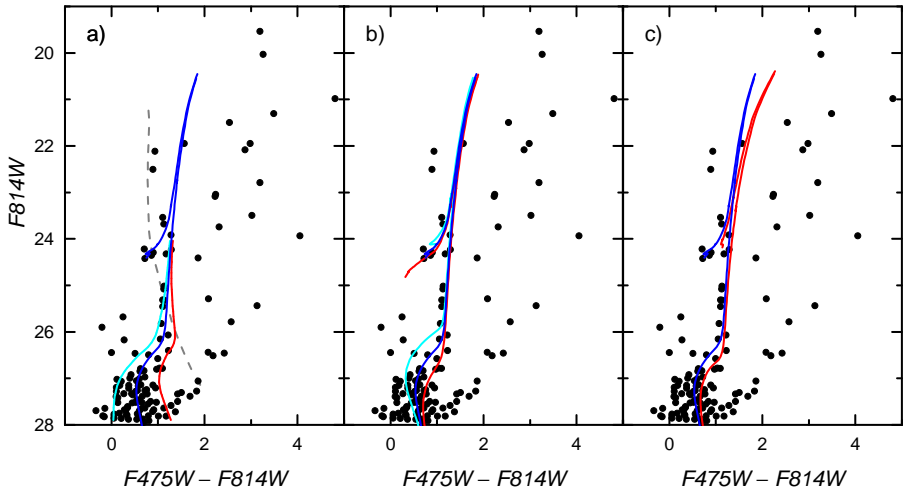


Figure 3.11 CMDs of star-like objects in the HST/WFC3 field. A PARSEC isochrone (Bressan et al. 2012) of 7 Gyr and $Z = 0.0001$ (blue line) is plotted in all panels. Additionally, the following information is shown in the CMDs: *panel a*: photometric scatter limits of the AST stars (cyan and red lines; based on *panels c* and *d* of Fig. 2.5) and the lower limit of the MW foreground star distribution derived from the Besançon models (grey dashed line); *panel b*: isochrones of 5 and 10 Gyr age and $Z = 0.0001$ metallicity (cyan and red lines, respectively); *panel c*: an isochrone of 7 Gyr and $Z = 0.0006$ (red line).

The CMDs of the star-like objects ($N = 128$; see Sect. 2.3 for the applied data reduction procedures) in the HST/WFC3 field are shown in Fig. 3.11. The PARSEC isochrones (Bressan et al. 2012) overplotted in the CMDs are shifted in colour and magnitude assuming the distance modulus of the Leo A to be 24.51 (Dolphin et al. 2002) and adopting the foreground MW extinction of $A_{F475W} = 0.067$ and $A_{F814W} = 0.032$ (Schlafly & Finkbeiner 2011). An isochrone of 7 Gyr age and $Z = 0.0001$ metallicity (blue) is shown in all panels. In panel a of Fig. 3.11, cyan and red lines indicate the photometric scatter limits determined from the AST star distributions. In panel b, however, cyan and red lines demonstrate the shift in isochrone positions at ages of 5 and 10 Gyr ($Z = 0.0001$), respectively, while a shift due to effects of metallicity is shown by the red isochrone of 7 Gyr and $Z = 0.0006$ in panel c.

The sparsely populated outer field of Leo A is inevitably contaminated by the foreground MW stars, thus we used the Besançon MW stellar population synthesis model (Robin et al. 2003) to obtain the expected distribution of foreground stars in the direction of the Leo A. The MW halo was assumed to extend out to a distance of 100 kpc (extremely large). In the CMD in Fig. 3.11a, the resulting lower limit of the MW foreground star distribution is marked by the grey dashed line. Considering the results of the synthetic CMD of foreground stars, we assume star-like objects redward of $F475W - F814W \sim$

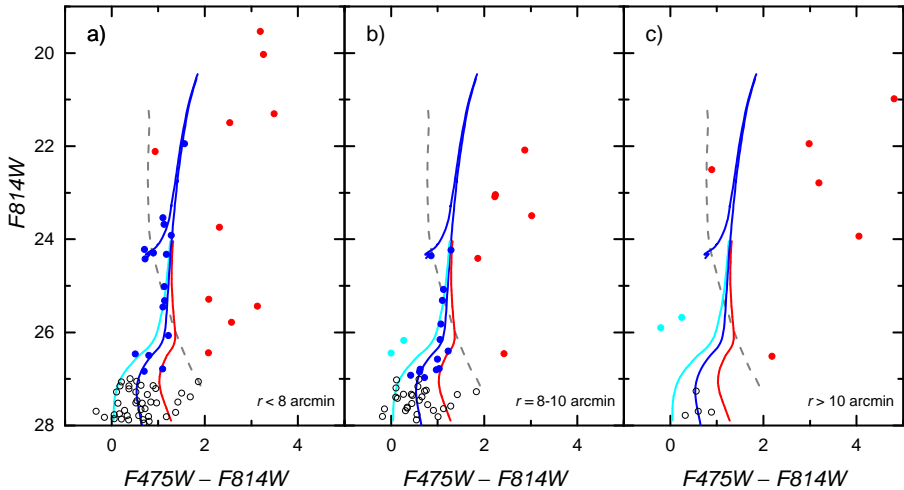


Figure 3.12 CMDs of star-like objects in the HST/WFC3 field. An isochrone of 7 Gyr and $Z = 0.0001$ (blue line), the limit of the MW foreground star distribution (grey dashed line; same as in Fig. 3.11), and photometric scatter limits (cyan and red lines; same as in Fig. 3.11) are plotted in all panels. The objects shown in the CMDs fall within the following radial distances: $r < 8'$ (a); $8' < r < 10'$ (b); $r > 10'$ (c). The coloured filled circles mark objects: close to the isochrone that are likely members of the Leo A galaxy (blue); far from the isochrone and within the CMD region occupied by MW stars (red); far from the isochrone and outside the limit of the MW foreground star distribution (cyan; these objects are probable compact faint blue galaxies, Leo A blue stragglers (Momany 2015), or MW white dwarfs). Grey open circles are faint star-like objects not included in the analysis.

2.0 (Fig. 3.11) to mainly belong to the MW galaxy.

In order to trace stellar populations at the outskirts of the Leo A galaxy, we focused on RGB, horizontal and subgiant branch stars, limiting our data to objects with a high photometric accuracy, $F814W < 27$. In Fig. 3.12 probable Leo A members are marked as blue points, objects most likely to be MW stars are shown as red point, while cyan points could be blue stragglers of the Leo A, faint compact blue galaxies, or MW white dwarfs. Open grey circles are the faint star-like objects we excluded from the analysis due to lower photometric accuracy. An isochrone of 7 Gyr age and $Z = 0.0001$ metallicity (blue line), photometric scatter limits (cyan and red lines), and the lower limit of the MW stars (gray dashed line) are plotted in all panels of Fig. 3.12. The star-like objects within the following radial distances from the galaxy centre are plotted in the three panels of Fig. 3.12: $r < 8'$ (a), $8' < r < 10'$ (b), and $r > 10'$ (c). In Fig. 3.13, a Subaru/Suprime-Cam B -passband image of the Leo A galaxy is presented, where the HST/WFC3 field (black outline) and the two ellipses ($a = 8'$ and $10'$) dividing it into the sections indicated in Fig. 3.12 are marked.

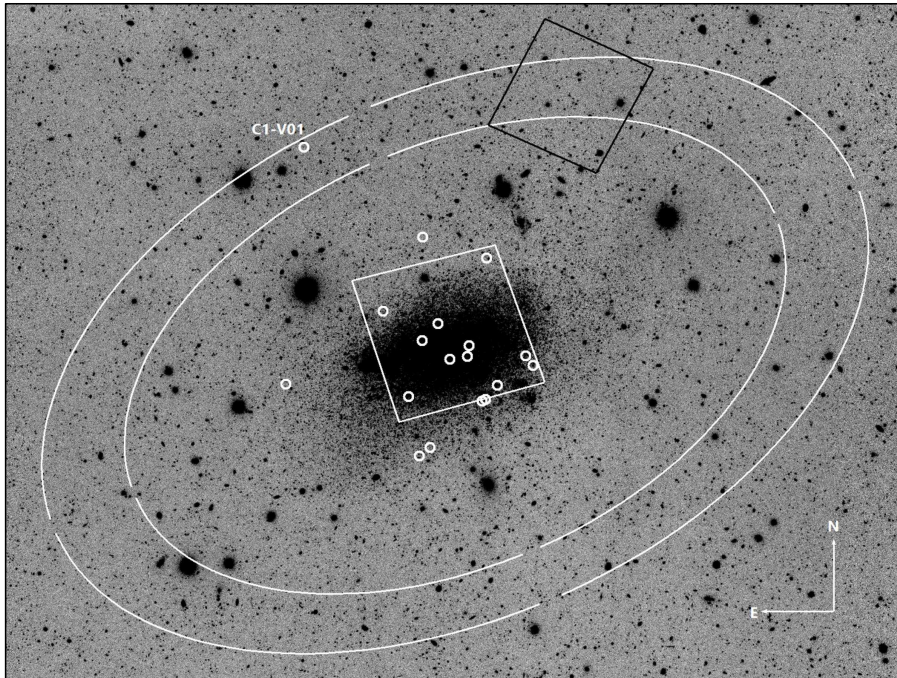


Figure 3.13 Subaru/Suprime-Cam B -passband image of the Leo A galaxy (Stonkutė et al. 2014). The two ellipses ($b/a = 0.6$; P.A. = 114°) have semi-major axes (a) of $8'$ and $10'$. The outlined HST fields observed with the ACS (white) and WFC3 (black) cameras are taken from the HST Proposal 12273 by Roeland van der Marel (https://archive.stsci.edu/proposal_search.php?mission=hst&id=12273). The RR Lyrae stars discovered by Dolphin et al. (2002) and Bernard et al. (2013) are marked by white open circles. North is up, east is left.

In order to make a rough estimate of the age of stellar populations in the outer part of the Leo A, we used the PARSEC isochrones, release v1.2S (Bressan et al. 2012) within the metallicity range of $Z = 0.0001$ – 0.001 . We find the isochrones of the lowest metallicity ($Z = 0.0001$) to be the best match to the distribution of star-like objects in the CMD. Isochrone fitting also indicates old stellar populations with ages greater than 5 Gyr.

Distinguishing between star-like objects at different radial distances revealed that the distribution of probable members of the Leo A galaxy extend at least up to $a = 10'$ (see blue points in Fig. 3.12). This result supports the finding by Dolphin et al. (2002), who reported the presence of the RR Lyr C1-V01 star close to the ellipse of $a = 10'$ (Fig. 3.13). The discovered presence of stars at the very outskirts of the Leo A substantially extended the previously established limit of the galaxies' halo (Vansevičius et al. 2004). It is important to note that this extended distribution of stellar populations in Leo A is wider than that of the H I gas (Young & Lo 1996; Hunter et al. 2012). This finding

provides valuable insight into possible evolution scenarios of a gas-rich dwarf galaxy: inside-out, or outside-in.

3.5 Summary

We studied old stellar populations by making use of multicolour photometric data obtained with Subaru Suprime-Cam and HST ACS/WFC3. We identified a previously unknown sequence of 26 peculiar RGB stars. Cross-identification with the catalogue by Kirby et al. (2017) provided spectroscopic measurements for 6 out of the 26 pRGB stars and revealed that all of them show distinct features (a CN-band absorption or relatively high metallicity) implying that the whole pRGB sequence might actually be populated with carbon-enhanced or metal-peculiar stars.

We also identified 32 luminous AGB stars and 3 candidate AGB stars. We cross-identified these stars with the available NIR measurements obtained by Jones et al. (2018), which helped us determine characteristic photometric properties of the dusty evolved stars. As a result, we assume that 9 AGB and 2 cAGB stars ($V - I > 2.3$) of our sample are likely to be enshrouded by dust. Twelve luminous AGB stars (three of them might have dusty envelopes) from our sample are newly identified, as they fall outside the field of the available NIR observations (Jones et al. 2018). Our results expanded the list of dusty stars in the Leo A galaxy mapping them throughout the entire extent of the galaxy.

Splitting the RGB into blue and red parts revealed fundamentally different spatial distributions of the two subsets: the former population is centrally concentrated and has a nearly clear cut at the Holmberg radius ($a = 3'.5$; Mateo 1998), the latter, however, is considerably more extended (to at least $8'$). Adding spectroscopic data from Kirby et al. (2017) revealed that bRGB and rRGB stars have similar metallicity distributions, however, the rRGB stars might have an excess of metal-poor ($[Fe/H] \lesssim -1.8$) stars. Additionally, we found the distributions of AGB and bRGB stars to have nearly equal scale-lengths ($0'.87 \pm 0'.06$ and $0'.89 \pm 0'.09$, respectively), indicating that they could belong to the same generation. Furthermore, cumulative distributions also show similarities between the AGB and bRGB stars, as they both are considerably more centrally concentrated as compared to the pRGB and rRGB stars. Available spectroscopic information (Kirby et al. 2017) also revealed that the most metal-rich (presumably younger) stars in bRGB and rRGB samples reside in the inner part of the galaxy, while stellar population analysis employing HST/WFC3 data at the very outskirts of the Leo A revealed an extended ($a \sim 10'$) halo of old ($\gtrsim 5$ Gyr), metal-poor ($Z \sim 0.0001$) populations, all indicating a possible outside-in star formation scenario.

Chapter 4

Young stellar populations in the Leo A galaxy

Within star forming regions intense collective feedback (e.g., stellar winds, supernova explosions, ultraviolet radiation) from young massive stars can drastically change the morphology and dynamics of the ambient interstellar medium. Such high energy feedback can disperse or sweep up the surrounding gas leading to the formation of H I holes and shells (Weaver et al. 1977; McCray & Kafatos 1987; Tenorio-Tagle & Bodenheimer 1988; Weisz et al. 2009b,a; Cannon et al. 2011; Warren et al. 2011; Pokhrel et al. 2020). The clumped-up gas at the walls of the shell-like structures can become dense enough for new star forming events to start taking place. In gas-rich galaxies, where the environment is largely suitable for self-propagating star formation, the morphology of stellar structures and interstellar medium can change dramatically over a period of just a few hundred Myr (Weisz et al. 2009b; Bastian et al. 2011; Cannon et al. 2011). Luckily, age dating of young stellar populations alongside a careful analysis of their distributions in relation to the neutral and ionized interstellar medium, allows us to trace back the recent star formation history of a galaxy, and understand how stellar structures evolve.

Age dating is of particular importance when studying the morphology of stellar structures. However, assigning ages to individual stars by utilizing photometric data and theoretical models is rather challenging. Only the brightest main sequence (MS) stars can be age-dated with some certainty by comparing them to stellar isochrones in a CMD, as closely-spaced isochrones and large photometric errors at fainter magnitudes make unambiguous age determination impossible. Fortunately, unambiguous age dating is possible for the intermediate-mass ($\sim 2\text{-}15 M_{\odot}$) stars undergoing the post-MS evolutionary phase of core He-burning (HeB). Due to an increase in temperature during the HeB phase, stars move to the blue side of the CMD before moving back to the red side, thus

forming a “blue loop” in the diagram. When undergoing this phase, stars spend the majority of time at the blue end of the blue loop leading to a prominent sequence forming in the CMD red-ward of the MS (Dohm-Palmer et al. 1997; Weisz et al. 2008). Due to the brevity of the HeB phase, these blue (BHeB) stars are fewer in number compared to the MS stars, however, they have some important advantages, when studying recent ($\lesssim 500$ Myr) star formation history: (a) they are ~ 2 mag brighter than the MS turn-off stars of the same age; (b) they have a one-to-one age-luminosity relation, as BHeB stars of different ages do not overlap (Dohm-Palmer et al. 1997; Gallart et al. 2005; Weisz et al. 2008).

In order to trace star formation patterns in the Leo A galaxy over the last ~ 300 Myr, we used both the brightest MS and BHeB stars. In addition, we searched for young star clusters in the central regions of the galaxy (covered by HST observations), and analysed distributions of H I and H II gas in relation to the young stellar populations.

4.1 Data reduction

For the analysis of young stellar objects we used star photometry catalogues obtained from the Subaru/Suprime-Cam and HST/ACS observations (see Ch. 2). Differently from the old stars, catalogues of the selected young objects were decontaminated only by visually inspecting and comparing the images acquired by the two telescopes, since little contamination from the background galaxies and foreground MW stars is present in the CMD region occupied by the bright blue stars. However, stellar blends are a big problem in a crowded central region of the galaxy, where young populations reside.

Since no star-forming regions are observed outside an ellipse of $a = 4'$ ($b/a = 0.6$, P.A. = 114°), we limited our analysis to this region. The CMD, two-colour diagram and spatial distribution of the selected sample of young, blue stars (MS and BHeB; see Sec. 4.2) and its decontamination results for the Subaru photometry are shown in Fig. 4.1. The limit defining the sample, namely, the PARSEC isochrone (Bressan et al. 2012) of 320 Myr age and $Z = 0.0005$ metallicity is marked by a blue line in the panel a (isochrone of 320 Myr and $Z = 0.0001$ is marked by a dashed blue line and was used to define the limit of the sample on the bluer end of the blue loop). Additionally, a set of isochrones of ages 15, 30, 55, 100, 160, and 220 Myr and $Z = 0.0005$ metallicity are plotted as grey lines. The isochrones are corrected assuming the distance modulus of 24.58 (Lešćinskaitė et al. 2021) and reddened taking into account MW foreground extinction, $A_V = 0.057$, $A_I = 0.031$ (Schlafly & Finkbeiner 2011).

Red points in Fig. 4.1a-c mark stellar blends identified in the Subaru catalogue after visual inspection of the HST/ACS images (blends comprise $\sim 14\%$ of the Subaru sample). It is apparent from the two-colour diagram presented

in panel b that many of these objects show considerably affected colours rendering them unsuitable for our CMD-based analysis of stellar populations. It is visible from the spatial distribution of the excluded stellar blends (panel c) that they are mainly located in regions of the highest surface number density, where crowding effects are the strongest. The HST/ACS field is outlined in blue in panel c, while the black ellipse ($a = 4'$) marks our selected limit for the Subaru data.

Additionally, blue stars in the Subaru catalogue that have HST/ACS counterparts falling beyond the limiting isochrone (320 Myr, $Z = 0.0005$) in the HST/ACS CMD (Fig. 4.2a) were also excluded (red points in all panels). The isochrones in Fig. 4.2a are the same as in Fig. 4.1a (for the HST/ACS passbands we applied MW foreground extinction $A_{F475W} = 0.068$ and $A_{F814W} = 0.032$; Schlafly & Finkbeiner 2011). The two-colour diagram (panel b) reveals that many of the additionally excluded stars also have unusual colours which might be due to intrinsic variability of the stars (four of them are known variables) or inaccurate photometry results of the ground-based observations at fainter magnitudes. However, spatial distribution of these objects is rather uniform (Fig. 4.2c), thus excluding them should not have significant impact on the results of our study.

Fig. 4.3a shows a sample of young stars that were selected from the HST/ACS catalogue using the same limiting criteria (isochrones of 320 Myr and $Z = 0.0001, 0.0005$) as in the case of Subaru data (Fig. 4.1a). Additionally, HST/ACS data was limited to $F814W < 25$, to coincide with the limiting magnitude of the ground-based Subaru observations ($I \sim 25$; Stonkutė et al. 2014). A handful of red points in Fig. 4.3 mark the stellar blends that were identified while visually examining the HST/ACS images (blends comprise only $\sim 1\%$ of the HST/ACS sample). Spatial distribution of the sample stars and stellar blends is presented in panel b.

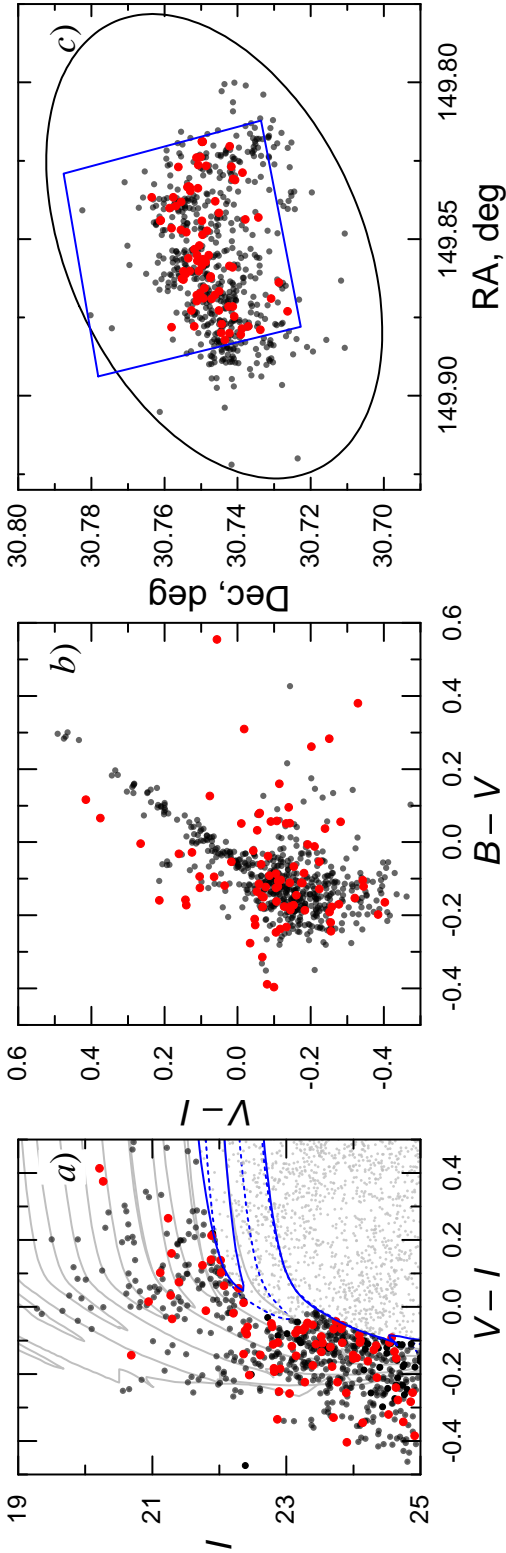


Figure 4.1 Decontamination result for a sample of young stars selected from the Subaru/Suprime-Cam stellar photometry catalogue (Stonkutė et al. 2014). *Panel a*: the initial I vs. $V-I$ diagram of the sample stars (black points). The selected sample limit is indicated by the solid blue PARSEC isochrone (Bressan et al. 2012) of 320 Myr and $Z = 0.0005$ ($Z = 0.0001$ for the dashed isochrone); additional isochrones of 15, 30, 55, 100, 160 and 220 Myr ($Z = 0.0005$) are plotted as grey lines. The isochrones are corrected for the distance modulus of 24.58 (determined by the TRGB method described in Sect. 3.2.1) and reddened taking into account the MW foreground extinction, $A_V = 0.057$ and $A_I = 0.031$ (Schlafly & Finkbeiner 2011). Red points mark the visually identified stellar blends that were excluded from further analysis. *Panels b* and *c*: two-colour diagram and spatial distribution of the sample stars and stellar blends (black and red, respectively; same as in *panel a*). Additionally, in *panel c*, a black ellipse marks the spatial limit imposed on the Subaru/Suprime-Cam catalogue for the analysis of young blue stars and a blue outline is the size of the HST/ACS field. The parameters of the ellipse are the following: semi-major axis, $a = 4'$; ellipticity, $b/a = 0.6$; position angle of the major axis, P.A. = 114° .

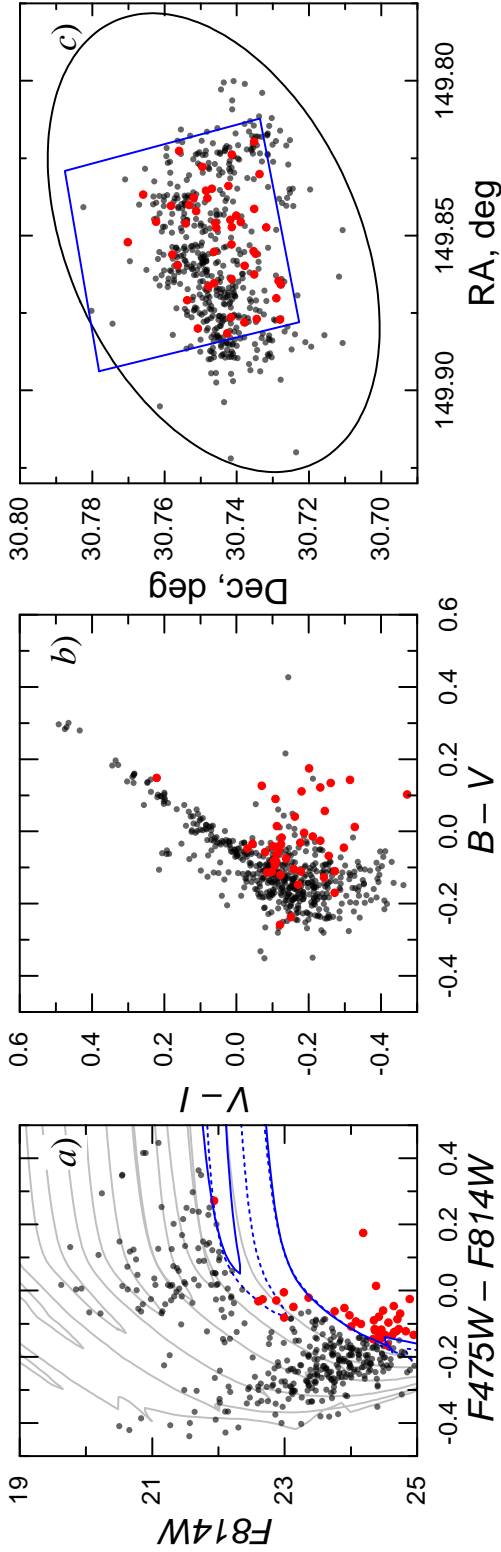


Figure 4.2 Decontamination result for a sample of young stars selected from the Subaru/Suprime-Cam stellar photometry catalogue (Stonkutė et al. 2014). *Panel a:* $F814W$ vs. $F475W - F814W$ diagram of the decontaminated set of the Subaru objects (black points in *panel a* of Fig. 4.1) that have counterparts in the HST/ACS catalogue. Red points mark objects falling outside the blue isochrone of 320 Myr and $Z = 0.0005$ ($Z = 0.0001$ for the dashed isochrone) in the HST/ACS photometry, which were also excluded from the further analysis. The grey isochrones correspond to the ones in Fig. 4.1 and are corrected for the distance modulus of 24.58 (Leščiņskaitė et al. 2021) and reddened taking into account the MW foreground extinction, $A_{475} = 0.068$, and $A_{814} = 0.032$ (Schlafly & Finkbeiner 2011). *Panels b* and *c* show the two-colour diagram and spatial distribution of the objects depicted in *panel a*.

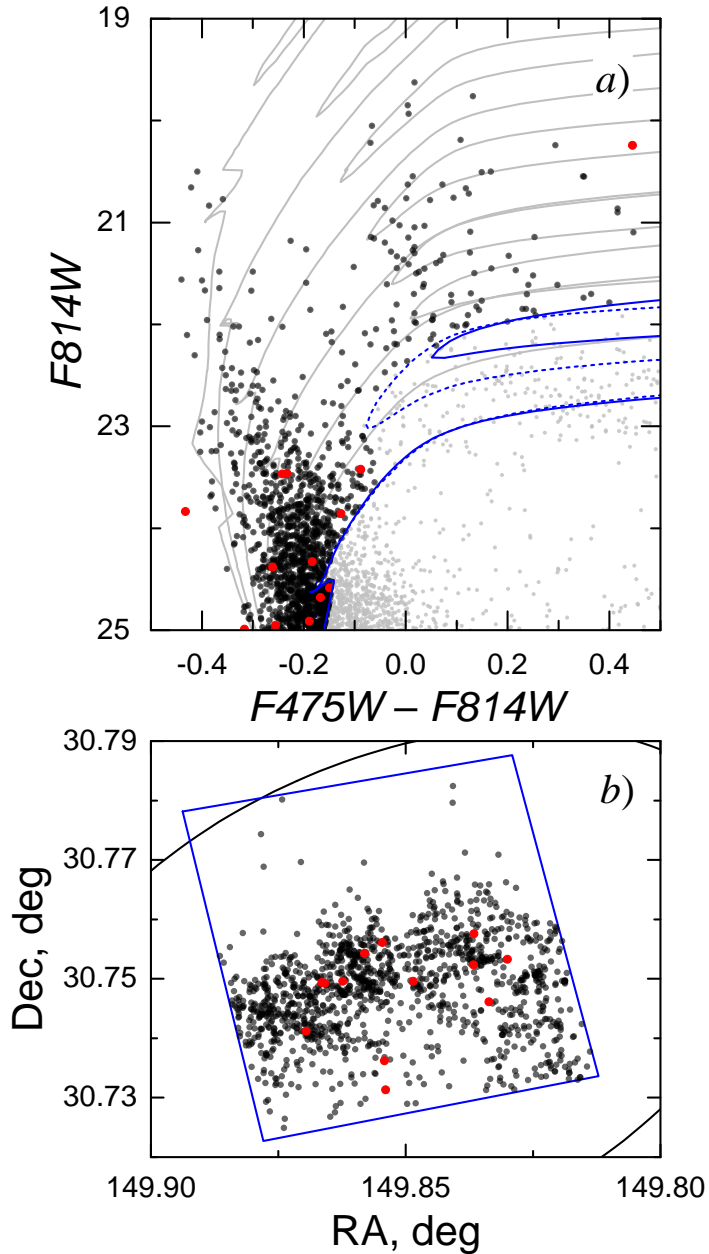


Figure 4.3 Decontamination result for a sample of young blue stars selected from the HST/ACS stellar photometry catalogue. *Panel a*: $F814W$ vs. $F475W - F814W$ diagram of the sample stars (black) and stellar blends (red), which were removed from further analysis. The isochrones are the same as in *panel a* of Fig. 4.2. *Panel b*: spatial distribution of objects from *panel a*. The HST/ACS field is outlined in blue; black line marks an ellipse of $a = 4'$ (same as in *panels c* of Figs. 4.1 and 4.2).

4.2 MS and BHeB stars in the Leo A galaxy

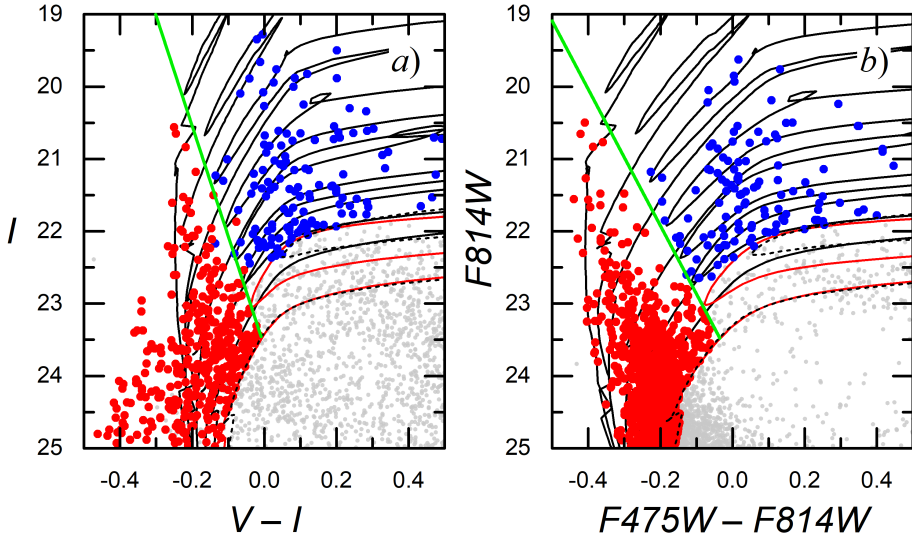


Figure 4.4 Samples of the MS (red) and BHeB (blue) stars in the Leo A galaxy, selected from the Subaru/Suprime-Cam (a) and the HST/ACS (b) stellar photometry catalogues. In both CMDs, PARSEC isochrones (Bressan et al. 2012) of 15, 30, 55, 100, 160, and 220 Myr ($Z = 0.0001$) are plotted as black lines; red line marks an isochrone of 320 Myr and $Z = 0.0001$; black dashed line is an isochrone of 320 Myr and $Z = 0.0005$, which was used as the selection limit for the young populations. The separation limits between MS and BHeB stars are marked by the green diagonal lines: $I = 23.6 + 15.2(V - I)$ and $F814W = 23.8 + 9.4(F475W - F814W)$. We note that some adjustments were made to the samples of MS and BHeB stars from the Subaru catalogue by comparing them to the data in the HST/ACS catalogue: stars that could be affected by nearby objects of different colour were moved to a different subset to correspond to the positions of MS and BHeB stars in the CMD of HST/ACS data (panel b).

Since distinct parts of the CMD are occupied by MS and BHeB stars, the two can be analysed independently. In panels a and b of Fig. 4.4, the CMDs of MS (red) and BHeB (blue) stars are shown for the Subaru and HST/ACS data, respectively. The separation limits (green lines in both CMDs) between the two subsets of young, blue stars were chosen to roughly align with points at the tip of the blue loop of a set of isochrones with fixed metallicity, $Z = 0.0001$. In order to avoid contamination by foreground MW stars, the BHeB subset was additionally limited to $V - I < 0.5$. Lower resolution of the ground-based observations leads to larger photometric uncertainties and thus larger scatter in the CMD making the separation limit between MS and BSG stars less apparent. Since we study young populations by combining Subaru and HST/ACS data, minor modifications to the MS and BHeB subsets were made

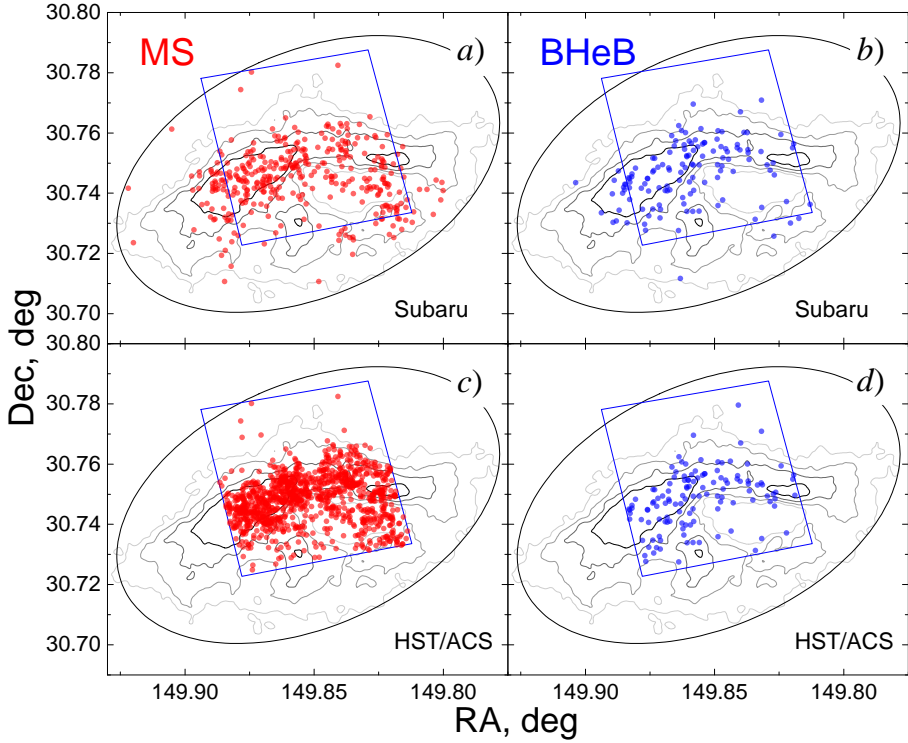


Figure 4.5 Spatial distributions of the MS (red) and BHeB (blue) stars in the Leo A galaxy, selected from the Subaru/Suprime-Cam (*panels a* and *b*) and the HST/ACS (*panels c* and *d*) stellar photometry catalogues, as shown in Fig. 4.4. All panels contain the following information: an ellipse (black) of $a = 4'$ ($b/a = 0.6$; P.A. = 114°); an outline the HST/ACS field (blue); contours of H I column density (from faintest to darkest: 3×10^{20} , 5×10^{20} , 7×10^{20} , 10^{21} atoms/cm 2).

around the uncertain separation limit in the Subaru data, based on the available counterparts in the HST/ACS CMD. If the Subaru star has any nearby objects that could affect its colour, HST/ACS photometry was used to classify the star as MS or BHeB. Three stars falling to the right of the dividing line in the Subaru CMD were categorized as MS based on HST/ACS data and one star falling to the left of the dividing line was moved to the BHeB sample (Fig. 4.4a).

Spatial distributions of the MS and BHeB stars are shown, respectively, in panels a and b (Subaru), and panels c and d (HST/ACS) of Fig. 4.5. In all of the latter panels the following information is also shown: the outline of the HST/ACS field (blue); an ellipse of $a = 4'$ (black); contours of H I column density (darker contours correspond to higher column density). We note that a higher surface number density of MS stars in the HST/ACS sample compared to that of the Subaru results from a higher spatial resolution of the HST which leads to fewer stellar blends in the catalogue.

4.2.1 Age dating of the BHeB stars

Accurate age evaluation is crucial when studying the morphology of stellar structures in a galaxy. Luminous BHeB stars have a big advantage over stars undergoing other evolutionary stages, since their positions in the CMD correspond to a one-to-one age-luminosity relation (e.g., Bertelli et al. 1994). This allows for unambiguous age dating by comparing the positions of these stars in the CMD to theoretical models. In our case, we used a set of PARSEC release v1.2S isochrones (Bressan et al. 2012) to assign ages to the BHeB stars.

In Fig. 4.6 CMDs used for age dating the BHeB stars in case of both HST/ACS ($F814W$ vs. $F475W - F814W$; panels a and b) and Subaru/Suprime-Cam (I vs. $B - I$; panels c and d) photometry are shown. The photometric passbands used in the Subaru CMD were chosen to closely match those of the HST/ACS. In order to determine the ages of the BHeB stars, we used a set of isochrones within the metallicity range of $Z = 0.0001-0.0021$ (a step of 0.0002 was used between the consecutive isochrones) and the age range of $\log t = 6.95-8.6$ (with a step of 0.05). From each isochrone in the set, we took the point representing the tip of the blue loop (i.e., the bluest point of the loop) and constructed a 2-D grid of reference age values in the CMDs, as indicated by the colour-coded points in panels a and c of Fig. 4.6. In order to assign ages to individual BHeB stars, we used a quintic spline interpolation (`interp2d`¹) between the points within the constructed 2-D grids (Fig. 4.6a,c). The resulting interpolated grids are shown in panels b and d of Fig. 4.6. A lack of reference points resulted in an erroneous age evaluation in some areas of the CMDs (as is especially obvious from several oddly shaped red areas in Fig. 4.6d), however, this did not affect the results of our study, since only areas between the two parallel lines were used to assign ages to BHeB stars (no objects from the Subaru catalogue fall within the incorrectly dated zones at the top of the CMD in Fig. 4.6d).

In Fig. 4.7, the results of age dating are shown by the colour-coded points in the HST/ACS (panel a) and Subaru/Suprime-Cam (panel b) CMDs. The isochrones of ages 15, 30, 55, 100, 160, 220 Myr and metallicities of $Z = 0.0001$ (solid black line) and $Z = 0.0015$ (dashed black line) are also plotted in both panels of Fig. 4.7. The isochrones of 320 Myr and $Z = 0.0001$ metallicity (solid red lines) show the selection limit for the BHeB stars. The two parallel lines (blue and red; same as the black parallel lines in Fig. 4.6) indicate the region where age dating was performed. We note that only the CMD sections between the two parallel lines were used for age dating, because there is a consistent shortening of the blue loop with increasing metallicity in this region up to around the largest value of metallicity we selected for our subset of isochrones,

¹<http://pageperso.lif.univ-mrs.fr/~francois.denis/IAAM1/scipy-html-1.0.0/generated/scipy.interpolate.interp2d.html>

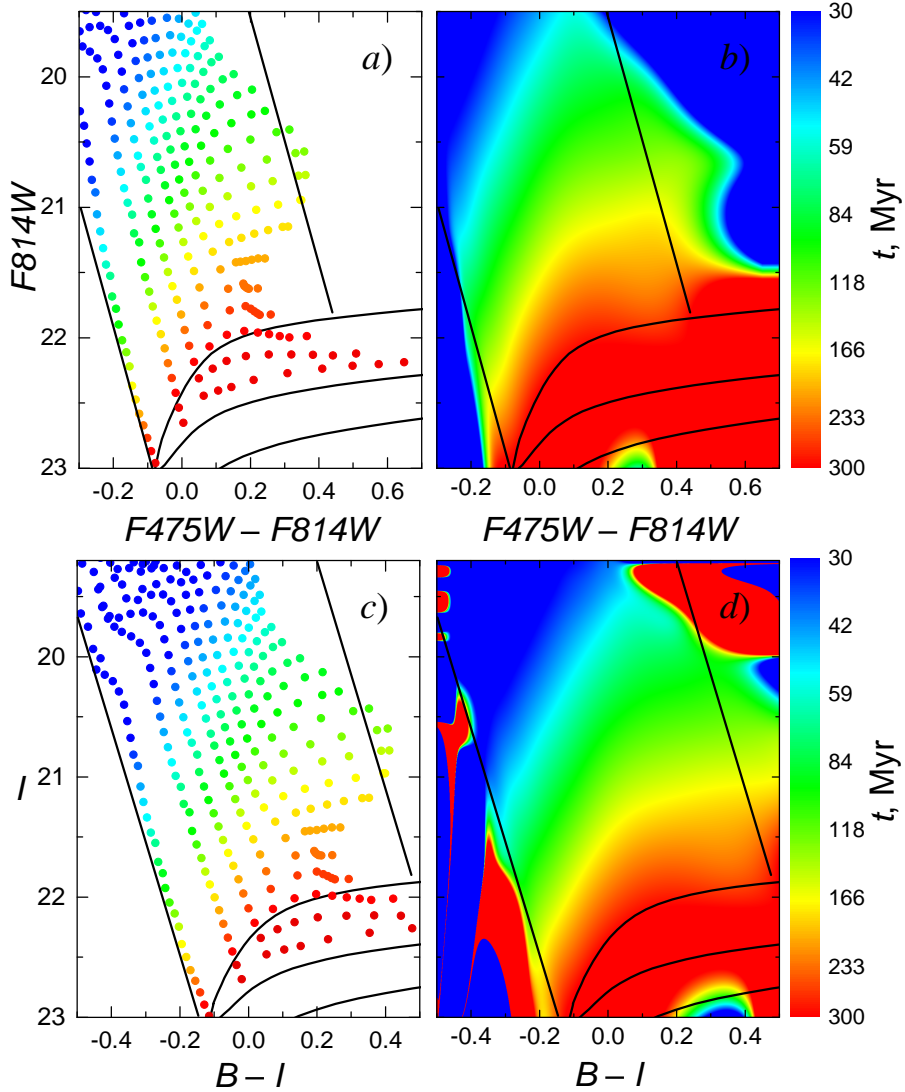


Figure 4.6 *Panels a and c*: CMDs of the bluest points of the blue loop (colour coded by age) taken from a set of PARSEC isochrones (Bressan et al. 2012) of $Z = 0.0001-0.0021$ (with a step of 0.0002) metallicities and ages of $\log t = 6.95-8.6$ (with a step of 0.05). *Panels b and d*: results of the quintic spline interpolation between the points shown in the respective diagrams of *panels a* and *c*. The top panels are the diagrams for the HST/ACS photometry and the bottom panels are the diagrams for the Subaru/Suprime-Cam photometry. An isochrone of 320 Myr and $Z = 0.0001$ (black) is plotted in all panels, as well as the two black parallel lines that mark the limits within which interpolation method was used to assign ages for the individual BHeB stars.

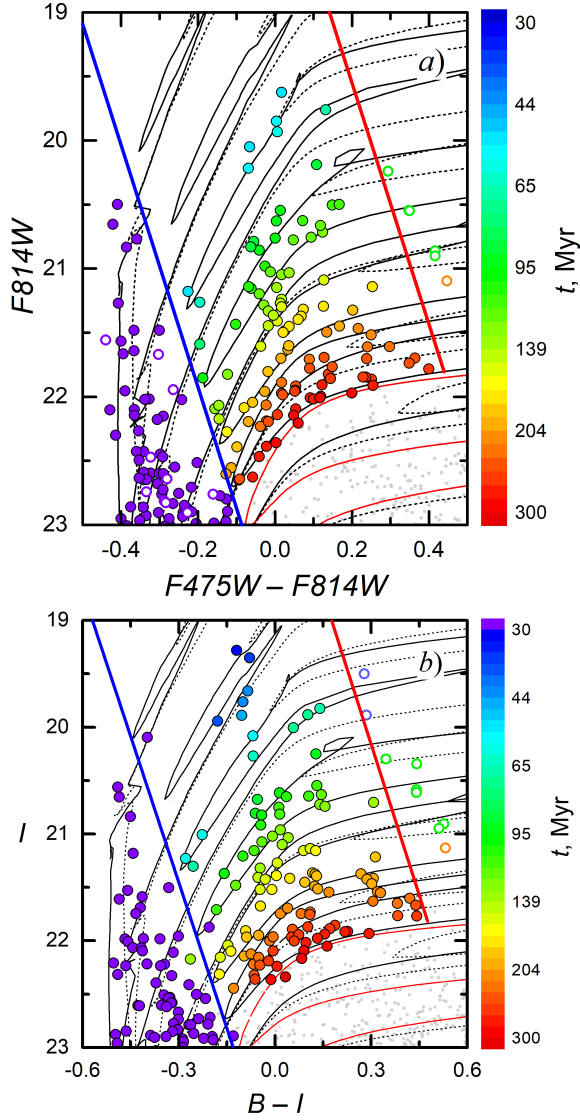


Figure 4.7 CMDs of the bright MS and BHeB stars in Leo A. *Panel a*: $F814W$ vs. $F475W - F814W$ diagram (HST/ACS). *Panel b*: I vs. $B - I$ diagram (Subaru/Suprime-Cam). The two parallel lines (blue and red) confine BHeB stars for which individual ages (colour coded) were determined by interpolation between isochrones of various ages and metallicities (see Sect. 4.2.1). The PARSEC isochrones (Bressan et al. 2012) of ages of 15, 30, 55, 100, 160, and 220 Myr and metallicities of $Z = 0.0001$ (black solid lines) and $Z = 0.0015$ (black dashed lines) are plotted for reference (an isochrone of 320 Myr and $Z = 0.0001$ is marked by the red line). The MS stars are marked by violet points (in *panel a*: open circles – MS stars located inside the H I hole; filled circles – MS stars outside the H I hole; see Fig. 4.10a). The BHeB stars outside the diagonal red line are marked by open circles and colour coded by the following age groups (manually assigned): 30-80 Myr (blue), 80-180 Myr (green) and 180-300 Myr (orange).

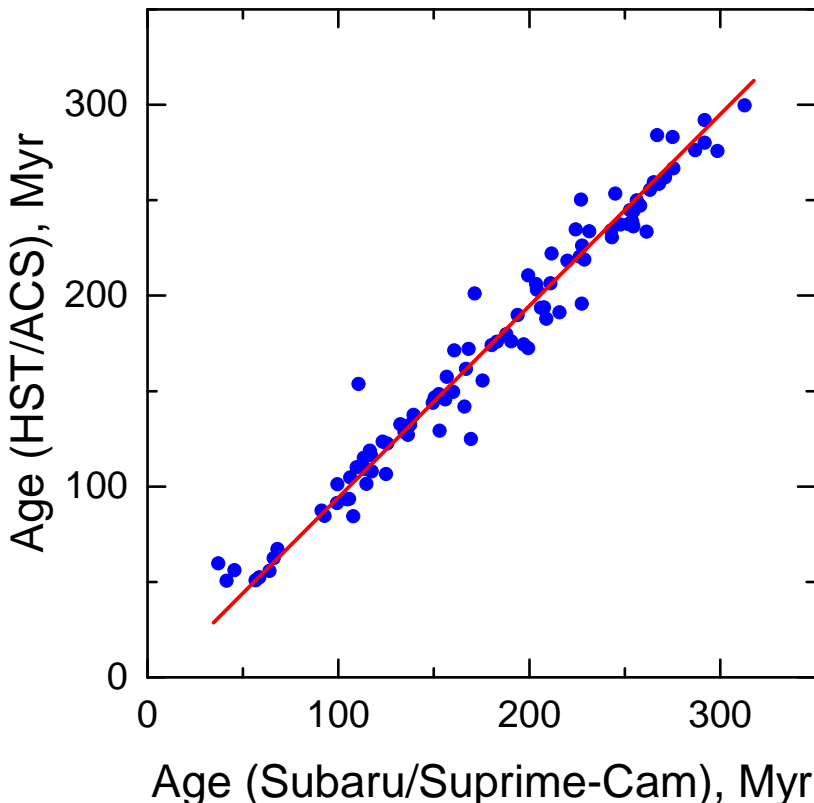


Figure 4.8 Ages of the BHeB stars as determined from the HST/ACS photometry versus the ones from the Subaru/Suprime-Cam photometry. The red line is a linear fit to the data.

while considerable inconsistencies occur in the isochrones of various ages at larger metallicities. The shortening of the blue loop is well illustrated by the subset of isochrones plotted in Fig. 4.7.

As can be seen in Fig. 4.7, there are several objects red-ward of the blue line that appear to be moving along the blue loop either before settling at the bluest point or after that. We make this assumption based on the fact that Leo A is a galaxy of very low metallicity (van Zee et al. 2006; Kirby et al. 2017; Ruiz-Escobedo et al. 2018) making it unlikely that these stars are residing at the tip of a blue loop at such large colour values; moreover, these stars are few in number, which is to be expected of stars moving along the loop, given that the timescale of moving along the loop is substantially shorter (~ 10 times; see, e.g., Iben 1967) than that of residing at or near the tip of the loop. Since we limited our interpolation method to only the region between the parallel diagonal lines, we could not assign individual ages for these stars, however, we did manually assign them (by extrapolating from the positions of the age-dated BHeB stars) to belong to one of the following age bins: 30-80 Myr (blue), 80-

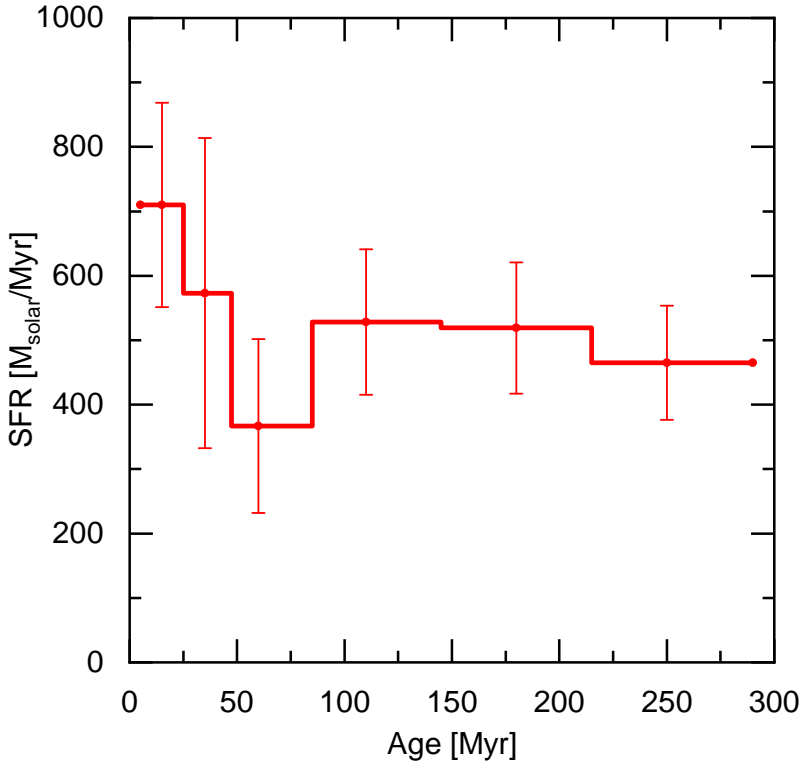


Figure 4.9 A recent star formation history in the Leo A galaxy based on the BHeB stars. SFR for the youngest ages (<30 Myr) was derived based on the MS stars.

180 Myr (green), 180-300 Myr (orange). Also in Fig. 4.7a, violet circles mark the brightest MS stars: open circles are the MS stars residing within the H I hole (see Fig. 4.10a; the H I hole and its properties are discussed in Sect. 4.5) and filled circles are the MS stars elsewhere in the galaxy.

A comparison between the ages assigned from the interpolated grids to the 94 BHeB stars with both HST/ACS and Subaru/Suprime-Cam photometry are shown in Fig. 4.8. The Subaru-based ages are systematically older by 6.9 Myr with the root-mean-square (r.m.s.) scatter of 6.4 Myr. The well-matching results from the two datasets suggest that determined ages are reliable. Therefore, to derive a recent ($\lesssim 300$ Myr) star formation history of the Leo A galaxy, ages estimated for the 115 BHeB stars from the Subaru/Suprime-Cam catalogue were used, considering that this data consistently covers the entire region of interest.

In Fig. 4.9 we show derived evolution of star formation rate (SFR; in solar masses per Myr) based on the BHeB stars considering photometric complete-

ness estimates provided by Stonkutė et al. (2014) and a number of removed stellar image blends. The most recent (<30 Myr) SFR was estimated considering only the brightest ($I < 22.5$) MS stars based on the isochrone of 15 Myr.

As is evident from Fig. 4.9, SFR was rather constant in Leo A over the last 300 Myr with a short dip ~ 50 -80 Myr ago. Somewhat lower SFR was also seen over three shorter time periods (~ 10 -15 Myr), however, the small number of available BHeB stars prevents a reliable derivation of SFR at such high age resolution.

An average SFR during the last 300 Myr is equal to (561 ± 60) M_{\odot}/Myr , while the most recent (<30 Myr) SFR is (616 ± 56) M_{\odot}/Myr . The latter result is in perfect agreement with the estimated 603 M_{\odot}/Myr SFR that was derived by Karachentsev & Kaisina (2013) based on far ultraviolet (FUV) flux. However, it is noteworthy that their SFR estimate based on the $H\alpha$ flux is much lower, only 93 M_{\odot}/Myr . A discrepancy of this kind observed in dwarf galaxies was discussed in detail by Lee et al. (2009), who concluded that the effect could potentially be caused by a deficiency of high-mass stars in the stellar initial mass function.

4.2.2 Spatial distribution of MS and BHeB stars

Being relatively simple systems, dwarf irregular galaxies have an advantage over highly complex, massive, star-forming galaxies, namely, the dwarfs tend to show either solid-body rotation or no conspicuous rotation at all (Young & Lo 1997). A lack of shear within a galaxy prolongs the time window needed for the morphology of young stellar structures to change from their original distribution. This simpler dynamics of the dwarf galaxies together with age dating of individual stars allows for a better understanding of the inherent structure and evolution of stellar populations within these systems.

Age dating of the BHeB stars enabled us to study patterns of star formation in the Leo A over the last ~ 300 Myr. In Fig. 4.10, spatial distributions of MS (panel a) and BHeB (panels b-d) stars from Fig. 4.7 are presented. The distributions are shown for the combined Subaru/Suprime-Cam and HST/ACS catalogues. Apart from the objects present in both catalogues, the HST/ACS data supplements our sample with the measurements lost in the Subaru catalogue due to the exclusion of stellar blends, whereas the Subaru observations provide stars located outside the HST/ACS field of view, as well as several objects that do reside within this field, yet do not have available HST/ACS photometry (cosmic-ray damage makes it hard to obtain photometric information of certain stars). For the objects that are brighter than 23 mag in both I and $F814W$ passbands, there are 151 stars with counterparts in both catalogues, 43 – with only HST/ACS photometry and 44 – with only Subaru photometry. The colours of the BHeB stars now show the average age of the two values determined in the CMDs of Fig. 4.7, if the star is present in both

catalogues, and the same value as in one of the CMDs, if it is only present in one respective catalogue. In order to better see the differences in stellar patterns over time, we divided our subset of young, blue stars into four age bins (indicated in the lower-right corner of each panel): $\lesssim 30$ Myr (the youngest population represented by the MS stars), 30-80 Myr, 80-180 Myr and 180-300 Myr (older populations represented by the BHeB stars). Additionally, in Fig. 4.10, we plot the contours of H I column density (same as in Fig. 4.5), which allows us to compare the morphology of stellar structures to the current distribution of neutral gas in Leo A.

In Fig. 4.10, the BHeB stars of ages ~ 180 -300 Myr (panel d) show a more extended and uniform distribution compared to younger populations, which is to be expected, as these stars had more time to migrate away from their place of origin, thus making the latter difficult to determine. The somewhat younger BHeB stars (~ 80 -180 Myr; panel c) have a considerably more concentrated distribution and appear to mainly be residing in the regions of higher H I column density. The youngest BHeB stars (~ 30 -80 Myr; panel b) are few in number, however, their positions seem to coincide well with the areas occupied by the youngest populations represented by the MS stars (panel a). This is true even for the south-western part of Leo A, which appears to have been quiescent for a prolonged period of time, since no evidence of star forming activity in this region is traced by the older stars in our sample (apart from a couple of outliers).

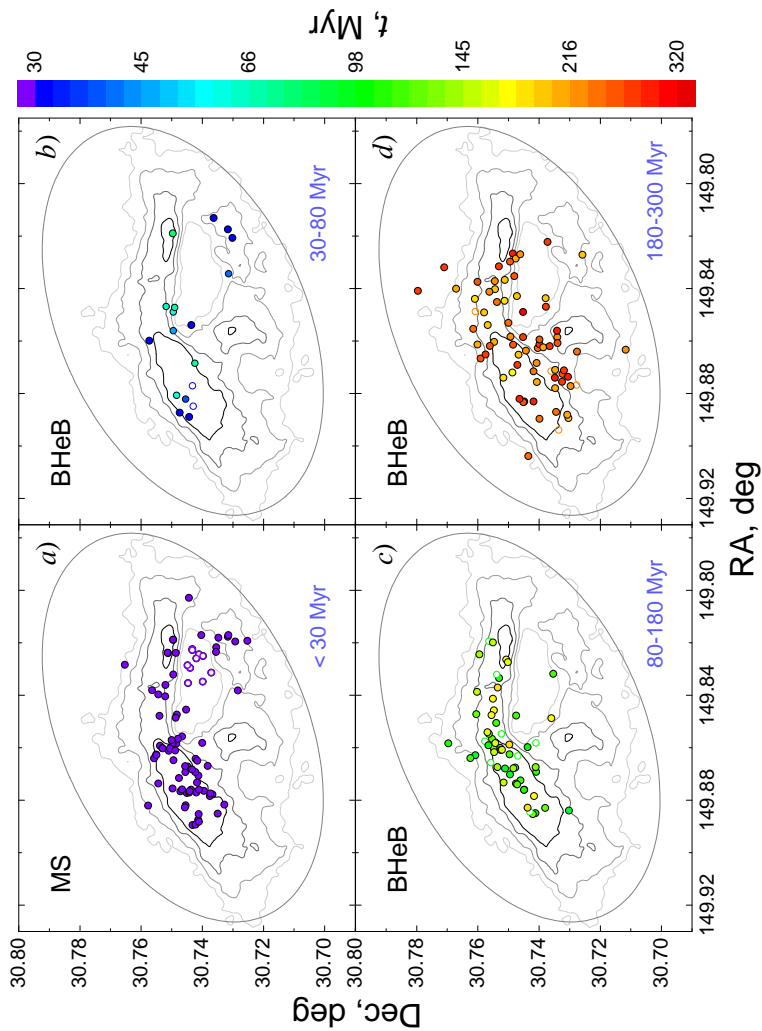


Figure 4.10 Spatial distribution of the MS (*a*) and BHeB (*b-d*) stars from the combined HST/ACS and Subaru/Suprime-Cam photometry. Symbols and colour coding of MS and BHeB stars are the same as in Fig. 4.7 (however, the age-dated BHeB stars with photometry available in both HST/ACS and Subaru catalogues are colour coded by the average age value from the two CMDs in Fig. 4.7). The age range of the plotted stars is indicated in the bottom right corner of each panel. Parameters of the ellipse and contours of H I column density are the same as in Fig. 4.5.

4.3 $H\alpha$ emission stars

Table 4.1. The $H\alpha$ emission stars in the Leo A galaxy.

RA(J2000)	Dec(J2000)	B	V	I	R	$H\alpha - R$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
149.8270	30.7258	21.899	22.013	21.950	21.878	-0.135
149.8318	30.7353	20.778	20.839	20.633	20.633	-0.123
149.8413	30.7551	21.512	21.621	21.522	21.468	-0.091
149.8446	30.7512	21.503	21.564	21.378	21.359	-0.092
149.8538	30.7568	21.614	21.615	21.490	21.454	-0.108
149.8553	30.7615	22.256	22.371	22.321	22.163	-0.069
149.8566	30.7554	20.866	20.919	20.726	20.731	-0.157
149.8617	30.7561	22.018	22.084	21.966	21.929	-0.115
149.8624	30.7496	21.034	21.119	21.074	21.012	-0.062
149.8691	30.7409	20.679	20.742	20.548	20.525	-0.172
149.8759	30.7448	20.761	20.827	20.749	20.810	-0.088
149.8827	30.7437	21.482	21.516	21.364	21.379	-0.105
149.8849	30.7411	21.213	21.343	21.370	21.255	-0.088
149.8888	30.7443	19.664	19.798	19.764	19.650	-0.066
149.8896	30.7398	21.865	21.971	21.756	21.791	-0.081
149.9037	30.7435	21.947	22.023	21.892	21.891	-0.116

Notes. (1) and (2) are the equatorial coordinates in degrees; (3)-(6) are magnitudes obtained in the Subaru/Suprime-Cam B , V , I and R photometric passbands; (7) is the colour index $H\alpha - R$.

The Subaru/Suprime-Cam photometry in $H\alpha$ and R passbands (Stonkutė et al. 2021, in preparation) enabled the identification of stars with enhanced $H\alpha$ emission, which indicates presence of emission line stars of spectral types B-A in the Leo A galaxy. In Fig. 4.11, we show two-colour diagrams of MS (red) and BHeB (blue) stars. In panel a, 16 stars with enhanced $H\alpha$ emission ($H\alpha - R \leq -0.06$) are marked by blue circles. The emission stars were selected from the $H\alpha - R$ vs. $V - I$ diagram (panel b) as indicated by the dashed magenta lines. As can be seen from the I vs. $V - I$ diagram in Fig. 4.12, $H\alpha$ emission stars appear to be scattered almost throughout the entire age range of our selected star sample (~ 50 -300 Myr). Also, we see that emission line stars make up $\sim 15\%$ of our BHeB sample. It is worth noting that 15% of fast-rotating ($v \cdot \sin i > 150$ km/s) A-type stars in MW also show emission or circumstellar shell features (Bohlender 2016).

Additionally, $V - I$ vs. $B - V$ diagram reveals that $H\alpha$ emission stars lie distinctly separated from the rest of the BHeB stars (Fig. 4.11a). This suggests an enhanced continuum or presence of strong emission lines in the spectral ranges of the B and/or I passbands. However, spectroscopic observations are needed in order to reveal the nature of these objects, i.e. whether they are Be, B[e], or A-shell stars (Slettebak 1982). In Fig. 4.11 approximate spectral type ranges corresponding to the $B - V$ and $V - I$ colour indices of normal MW

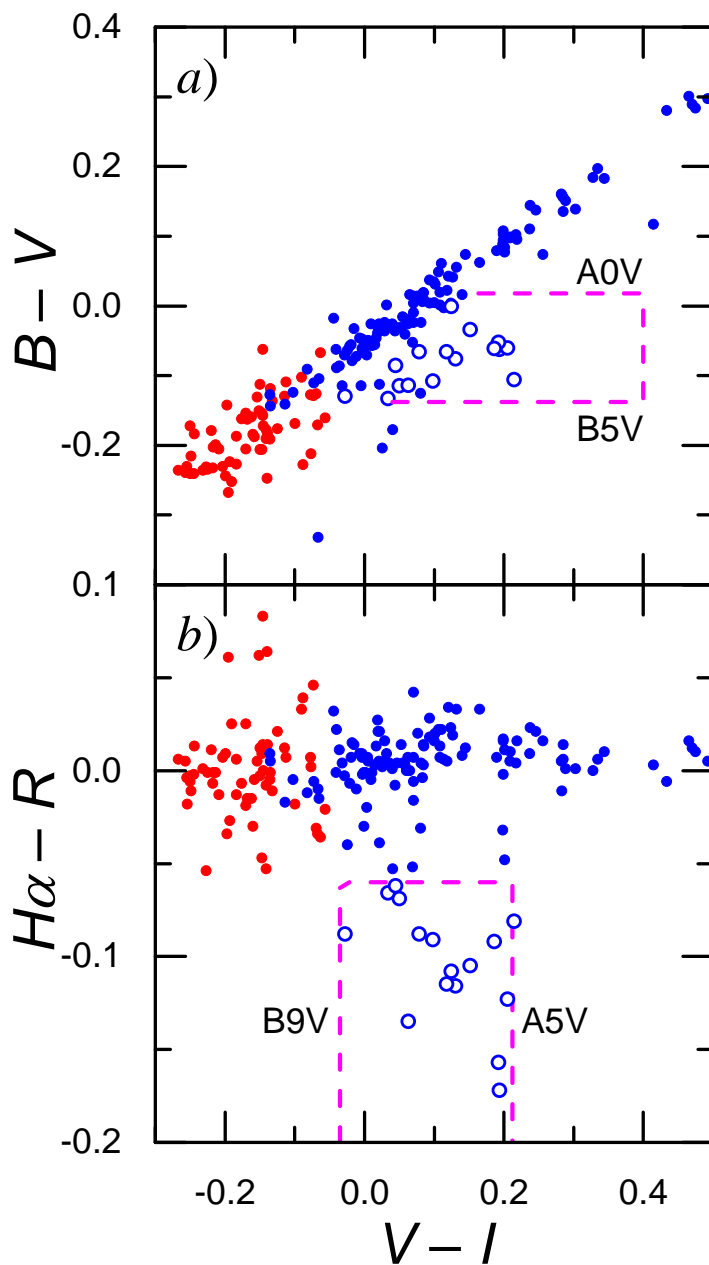


Figure 4.11 Two-colour diagrams of the bright ($I < 23$) Leo A stars (MS – red, BHeB – blue). *Panel a*: $B - V$ vs. $V - I$ diagram; $H\alpha$ emission stars selected in *panel b* are marked by blue circles. *Panel b*: $H\alpha - R$ vs. $V - I$ diagram; selection limits for the emission stars (blue circles) are marked by dashed magenta lines. Spectral type ranges corresponding to colour indices of normal MW stars are indicated for reference (Pecaut & Mamajek 2013).

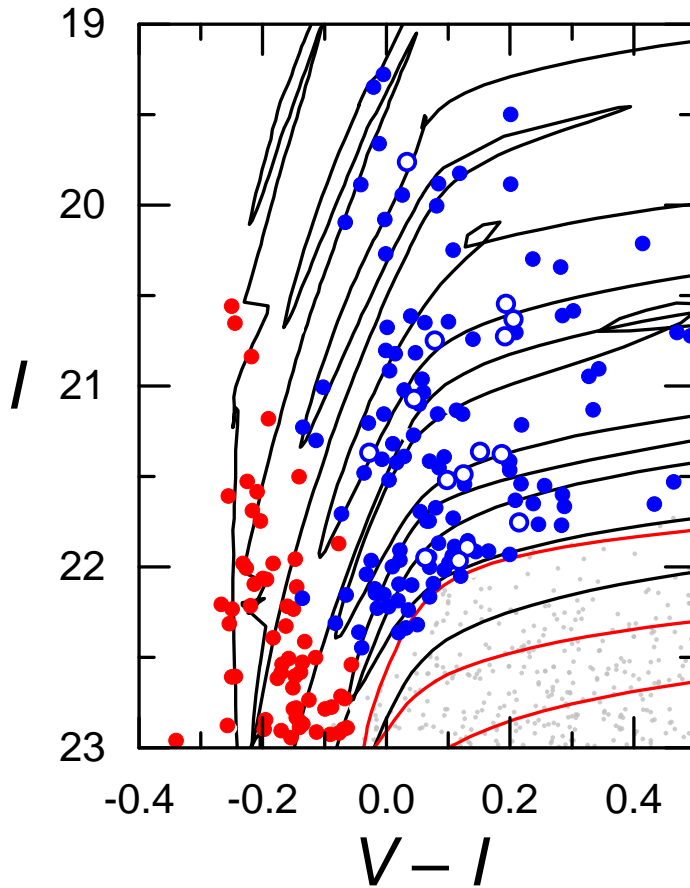


Figure 4.12 I vs. $V - I$ diagram of the bright ($I < 23$) Leo A stars (MS – red, BHeB – blue). BHeB stars showing enhanced $H\alpha$ emission are marked by blue circles. PARSEC isochrones (Bressan et al. 2012) of 15, 30, 55, 100, 160, and 220 Myr ($Z = 0.0001$) are plotted as black lines; an isochrone of 320 Myr ($Z = 0.0001$) is marked by the red line.

stars are indicated for reference (Pecaut & Mamajek 2013).

In Fig. 4.13, the $H\alpha$ map is shown for the Leo A galaxy. The map is a residual image produced by subtracting a reference frame obtained in the R passband from the narrow-band (with a width of ~ 14 nm) $H\alpha$ image. Darker areas of the map indicate enhanced $H\alpha$ emission, thus highlighting the H II zones in the star-forming regions, as well as compact sources like our identified emission stars (blue open circles). We note, however, that 7 out of 16 emission stars are located within or close to the H II zones, thus making it possible that their $H\alpha$ photometry is contaminated by the diffuse emission.

Since our identified $H\alpha$ emission stars cover a wide range of ages (Fig. 4.12), we, additionally, looked at their distributions in different age bins. In Fig. 4.14,

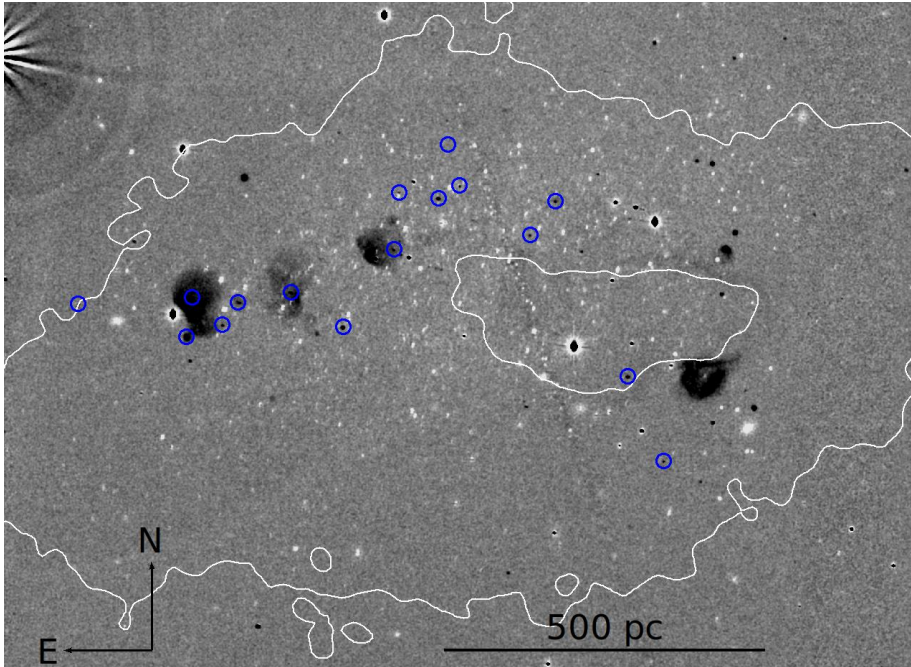


Figure 4.13 The Subaru/Suprime-Cam $H\alpha$ image of the Leo A galaxy. Darker areas correspond to enhanced $H\alpha$ emission (e.g. H II zones, emission stars). Blue open circles mark $H\alpha$ emission stars; white contours mark the H I column density of 3×10^{20} atoms/cm².

we plot the stars with enhanced $H\alpha$ emission as blue circles in the same age bins as in Fig. 4.10. Additionally, we plot the MS (panel a) and BHeB stars (panels b-d) with the same colour coding by age as in Fig. 4.10, but in muted colours. The contours of the brightest H II zones (red outlines representing the dark regions in Fig. 4.13) and the lowest H I column density (3×10^{20} atoms/cm²) from Figs. 4.5 and 4.10 (grey outlines) are also shown for reference, as well as the ellipse of $a = 4'$, indicating the limit imposed on the star photometry catalogue for the analysis of young, blue stars. The distinction of the $H\alpha$ emission stars by age revealed that the stars located closest to the H II zones are the younger BHeB stars (30-180 Myr), while emission stars within the oldest age range (180-320 Myr) appear to be more dispersed, which is in agreement with the distributions of their respective samples of all BHeB stars. This result suggests that the $H\alpha$ emission stars likely do not experience significant variability that could largely misplace them in the CMDs. However, it is difficult to categorize such objects based on photometric data alone, as their spectroscopic information is needed to better understand their nature and intrinsic properties.

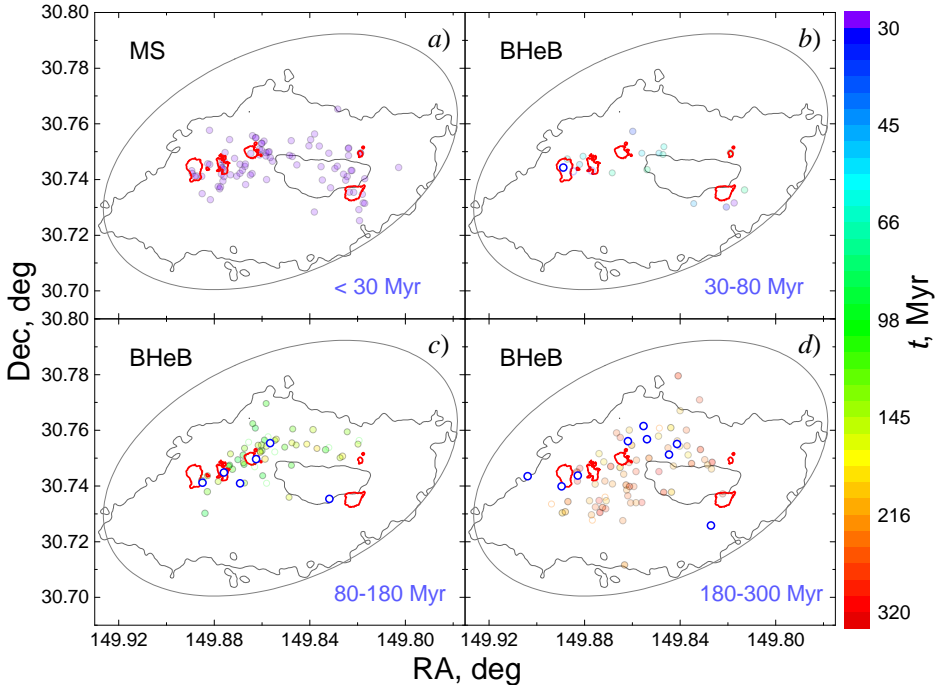


Figure 4.14 Spatial distribution of $H\alpha$ emission stars (blue circles) in different age bins. The red contours mark the largest H II regions; the grey contours mark the H I distribution of low column density (3×10^{20} atoms/cm²); an ellipse of $a = 4'$ is also plotted for reference. The MS (a) and BHeB (b-d) stars are plotted in muted colours (colour coding by age is the same as in Fig. 4.10).

4.4 Star clusters

A search for low-mass star clusters in Leo A was performed by using the archival HST/ACS images ($F475W$ and $F814W$ passbands) and the stellar photometry data obtained from these images (see Sect. 2.2). In order to identify any clustering of stars, we limited the catalogue to $F814W < 28$ leaving only the most reliable measurements. Additionally, we set a limit on the colour value ($F475W - F814W < 2$), to avoiding contamination by the MW stars. These restrictions left us with 98 525 stars within the HST/ACS field. In order to identify star clusterings, we used a circular kernel of $0.5''$ radius, while an annulus from $1''$ to $2''$ around the kernel was used to determine the background number density in each kernel position. Subtracting the background number density from the one within the kernel and then leaving only the clusterings where the star number density within a $0.5''$ radius is 5 times larger than in a respective background annulus, resulted in 76 stellar overdensities that were used in further analysis. A careful inspection of the well-resolved populations in the HST/ACS images reduced this number to 5 most prominent star cluster candidates (including the already discovered cluster LeoA-C1; Stonkutė et al.

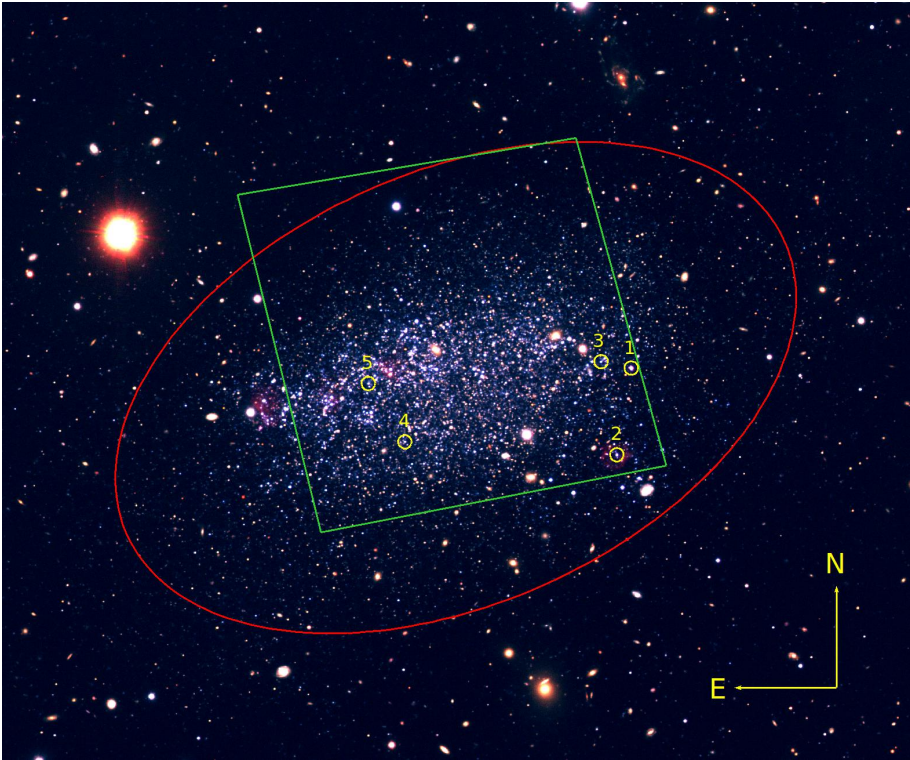


Figure 4.15 A composite colour image of the Leo A: $H\alpha$ (red), V (green) and B Subaru/Suprime-Cam passbands (Stonkutė et al. 2014). An ellipse ($b/a = 0.6$; P.A. = 114°) of $a = 3''.5$ (Holmberg radius; Mateo 1998), centred at $\alpha = 9^h59^m24.5^s$, $\delta = +30^\circ44'47''$ (J2000) is shown in red. The HST/ACS field is outlined in green. Positions of the discovered clusters are indicated by yellow circles. North is up, east is left.

2015).

We assumed the centre positions of the clusters to correspond to the peaks on the spatially smoothed star number density map at their locations. In order to estimate the size (R) of the clusters, an integrated growing circular aperture photometry was performed around the determined centres by increasing the aperture radius with a step of $0.1''$ up to a $2.5''$ radius. The size was assumed to correspond to the value of the first sudden flattening of the growth curves. The half-light radii of the clusters (R_h) were determined by adding 0.75 to the magnitudes derived at radii R and then finding the point of intersection on the photometric growth curves. The estimates of R and R_h in the $F475W$ and $F814W$ passbands agree within $0.05''$ (i.e., half of the aperture growth step). The determined values of the two radii are provided in columns 4 and 5 of Table 4.2.

In Fig. 4.17, images of the 5 clusters of Leo A and their corresponding CMDs

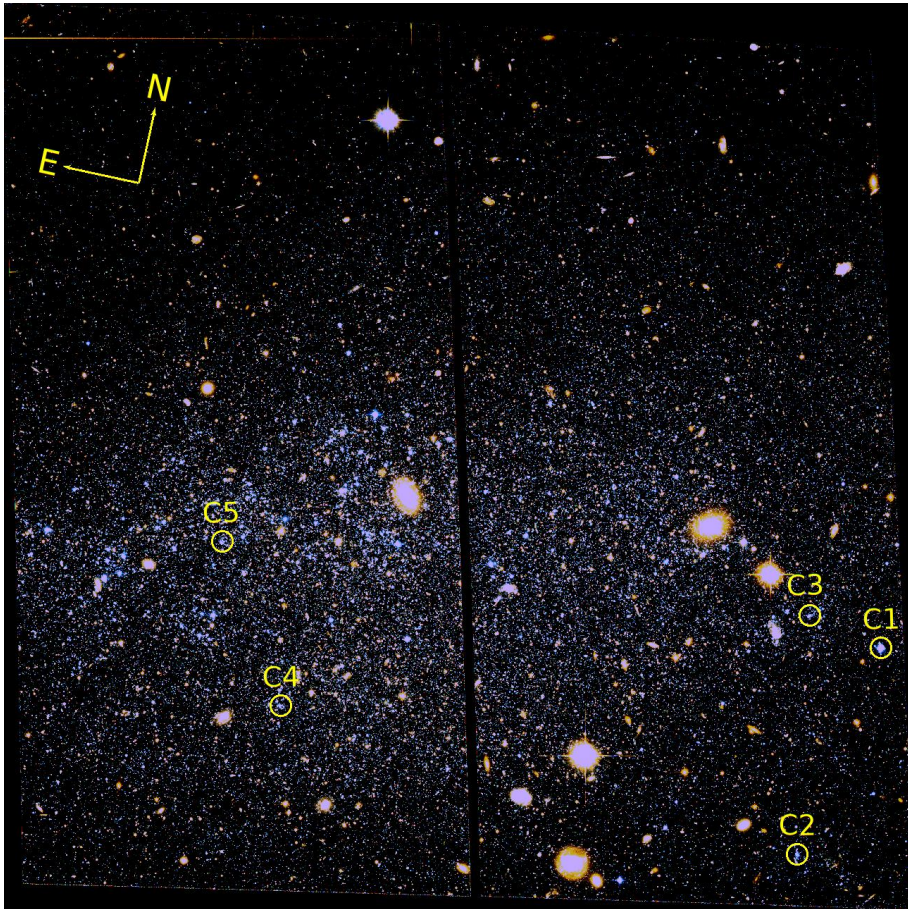


Figure 4.16 A composite HST/ACS image of the central part of the Leo A galaxy: $F814W$ (red), $(F475W + F814W)/2$ (green) and $F475W$ (blue). Positions of the discovered star clusters (C1 from Stonkutė et al. 2015 and C2-C5 from the present study) are indicated by yellow circles.

are presented. The colour images are composed of $F814W$ (red), $(F475W + F814W)/2$ (green) and $F475W$ (blue) photometric passbands. The black filled circles in the CMDs mark star-like objects residing within the green circles shown in the cluster images (the circles indicate estimated cluster sizes, R), while open circles mark star-like objects within the circle of a fixed radius of $2.5''$. We used the PARSEC isochrones (release v1.2S; Bressan et al. 2012) of $Z = 0.0007$ metallicity (chosen based on results from the chemical abundance analysis of the H II regions in Leo A; van Zee et al. 2006; Ruiz-Escobedo et al. 2018) to estimate ages of the clusters, which we indicate in the upper right corner of each CMD. Isochrones corresponding to ages of 20 Myr (cyan), 100 Myr (blue), and 500 Myr (red) are plotted in all panels of Fig. 4.17 for reference. The isochrones are shifted assuming the Leo A distance modulus of

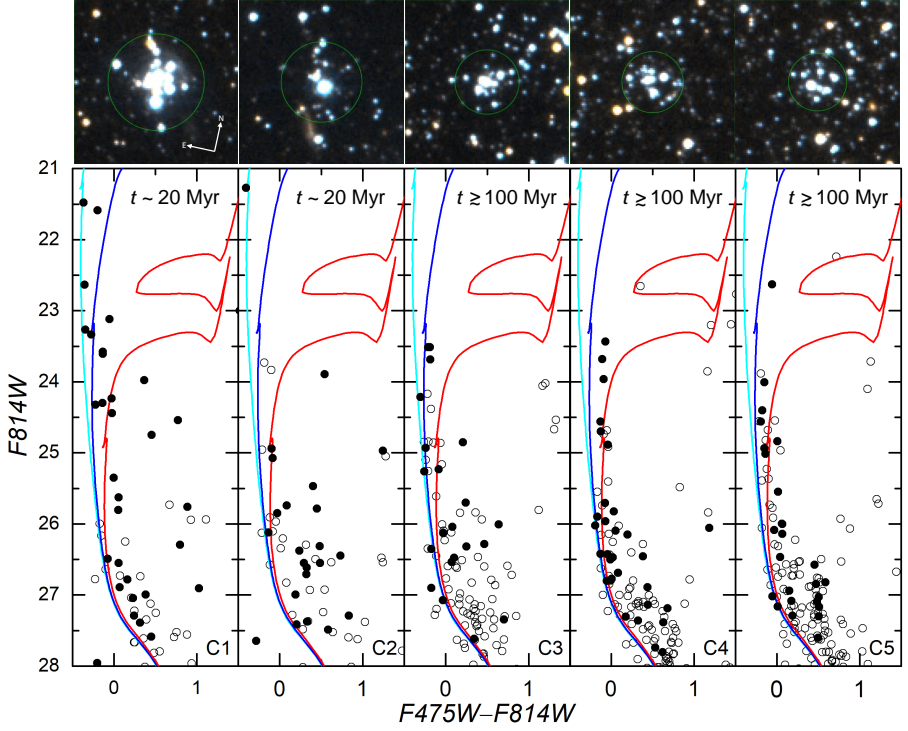


Figure 4.17 *Upper panels:* composite HST/ACS colour images ($5'' \times 5''$) of the clusters in the Leo A galaxy. The images are composed of $F814W$ (red), $(F475W + F814W)/2$ (green), and $F475W$ (blue) passbands. Green circles mark the estimated size of the clusters (the radii, R , of the circles are provided in Table 4.2). *Lower panels:* cluster CMDs showing the star-like objects residing within the green circle (filled black circles) and within the circle of $2.5''$ radius (open circles). The PARSEC isochrones (Bressan et al. 2012), of $Z = 0.0007$ metallicity and of 20 Myr (cyan), 100 Myr (blue), and 500 Myr (red) ages are overplotted in all CMDs. The isochrones are adjusted assuming the distance modulus of 24.51 and MW foreground extinction, $A_{F475W} = 0.068$ and $A_{F814W} = 0.032$.

24.51 (Dolphin et al. 2002) and MW foreground extinction, $A_{F475W} = 0.068$ and $A_{F814W} = 0.032$ (Schlafly & Finkbeiner 2011). Cluster ages are estimated based on the CMD positions of the brightest MS stars (which have the highest photometric accuracy and are rather insensitive to the assumed metallicity). The young ages of clusters LeoA-C1 and LeoA-C2 are independently reaffirmed by the fact that the two are embedded in prominent H II zones (Fig. 4.21).

We selected bright blue ($F475W - F814W < 0.5$ and $F814W < 26$) stars in each cluster and based on the assigned age estimated their approximate mass. We used the initial mass function by Kroupa (2002) in the mass range from 0.08 to $120 M_{\odot}$ and as a result got the cluster mass range of 200 - $500 M_{\odot}$ (refer to the last two columns of Table 4.2 for the estimates of cluster age and mass).

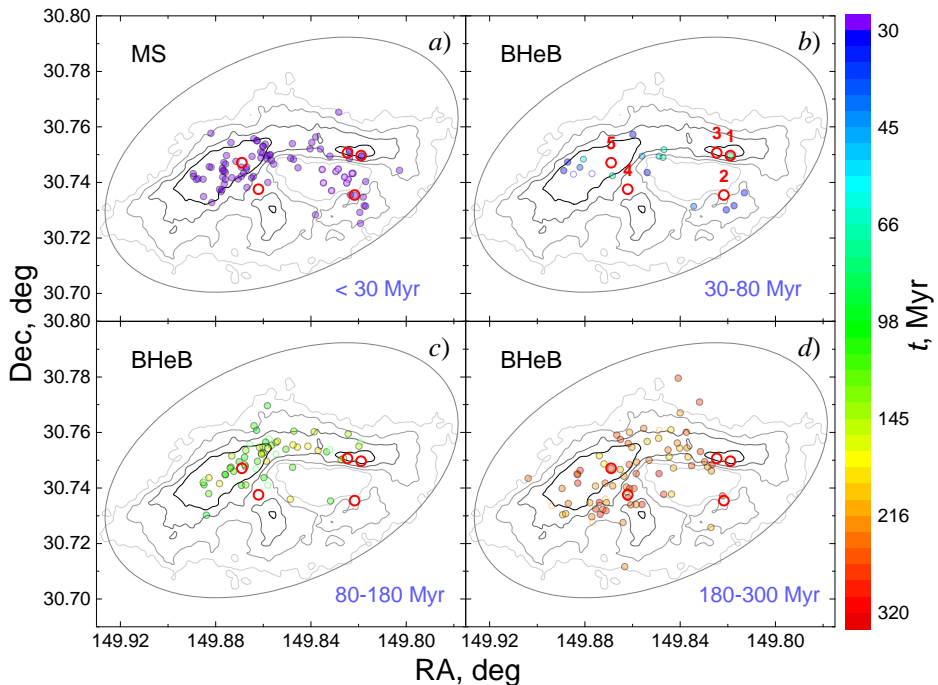


Figure 4.18 Cluster positions with respect to the spatial distributions of the MS (*a*) and BHeB (*b-d*) stars of different ages. The diagrams are the same as in Fig. 4.10. The colours of MS and BHeB stars are muted and clusters are marked as red open circles (cluster identification numbers are shown in *panel b*). All clusters are shown in all panels for comparison, however, based on the cluster age estimates (see Table 4.2), clusters LeoA-C1 and LeoA-C2 would belong in *panel a*, while clusters LeoA-C3, LeoA-C4 and LeoA-C5 would belong in *panel c*.

Table 4.2. Cluster parameters of the Leo A galaxy.

ID (1)	α (J2000) (2)	δ (J2000) (3)	R (4)	R_h (5)	F_{814W} (6)	CI (7)	Age (Myr) (8)	Mass (M_\odot) (9)
LeoA-C1	9:59:16.5	+30:44:59	1.50	0.55	19.85	-0.11	~ 20	$\gtrsim 400$
LeoA-C2	9:59:17.2	+30:44:08	1.25	0.7*	20.82	-0.24	~ 20	$\gtrsim 150$
LeoA-C3	9:59:17.9	+30:45:02	1.00	0.31	21.69	-0.15	$\gtrsim 100$	$\gtrsim 300$
LeoA-C4	9:59:26.9	+30:44:15	0.95	0.37	21.68	0.02	$\gtrsim 100$	$\gtrsim 300$
LeoA-C5	9:59:28.5	+30:44:50	0.90	0.34	21.78	-0.14	$\gtrsim 100$	$\gtrsim 300$

Notes. (1) ID is the cluster identification number; (2) and (3) are the cluster equatorial coordinates, α (J2000) and δ (J2000), respectively; (4) R is the radius of the cluster in arcsec (green circles in Fig. 4.17); (5) R_h is the half-light radius of the cluster derived from the photometric growth curve in arcsec (the asterisk marks the half-light radius of the cluster LeoA-C2 estimated from the star number count); (6) F_{814W} is the magnitude measured through the aperture of radius R ; (7) CI is the colour index $F_{475W} - F_{814W}$ measured through the aperture of radius R ; (8) age (Myr) is a rough estimate of cluster age; (9) Mass (M_\odot) is a rough estimate of the cluster mass in solar masses.

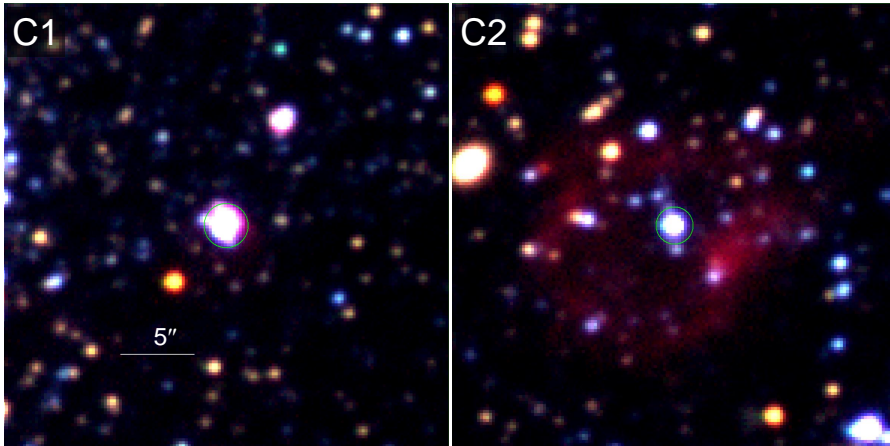


Figure 4.19 Composite Subaru/Suprime-Cam colour images ($30'' \times 30''$) of the star clusters LeoA-C1 and LeoA-C2. The images are composed of $H\alpha$ (red), V (green), and B (blue) passbands. Green circles mark the estimated size of the clusters (same as in Fig. 4.17). North is up, east is left.

4.5 H I hole and star formation history

In Fig. 4.20, we show a composite image of the Leo A galaxy comprised of Subaru/Suprime-Cam $H\alpha$ (red) and B (green) passbands (Stonkutė et al. 2014) and the H I column density map (blue; Hunter et al. 2012). Additionally, white contours of the H I column density (the same as in Figs. 4.5, 4.10 and 4.14) are superimposed on the image. Upon inspection of the integrated H I column density map (Hunter et al. 2012), we found the column density inside the hole to be ~ 10 times smaller than that of the bordering regions. This low density area measures ~ 500 pc in diameter (Fig. 4.21). Assuming that the average gas velocity dispersion is ~ 7 km/s (Hunter et al. 2012), it would take ~ 40 Myr to create a hole of this size from a single centre, therefore, we assume this value to be an upper age limit of the H I hole in Leo A.

Images in the optical passbands (Fig. 4.20) reveal a remarkable difference between the surface number density of stars in the eastern and western parts of the H I hole with the former seemingly more populated than the latter. As is evident from Fig. 4.10, the BHeB stars trace populations of ages between about 30 to 300 Myr mainly just in the eastern and northern parts of Leo A, implying that, over this period of time, star formation was predominantly active in these particular regions of the galaxy. As a result, relatively young blue stars stand out in optical images highlighting the populations distributed throughout this region, which happens to include the eastern part of the H I hole. Interestingly, there is an unusual lack of the BHeB stars within the entire H I hole (Fig. 4.10), despite the fact that their general distribution fairly well traces the

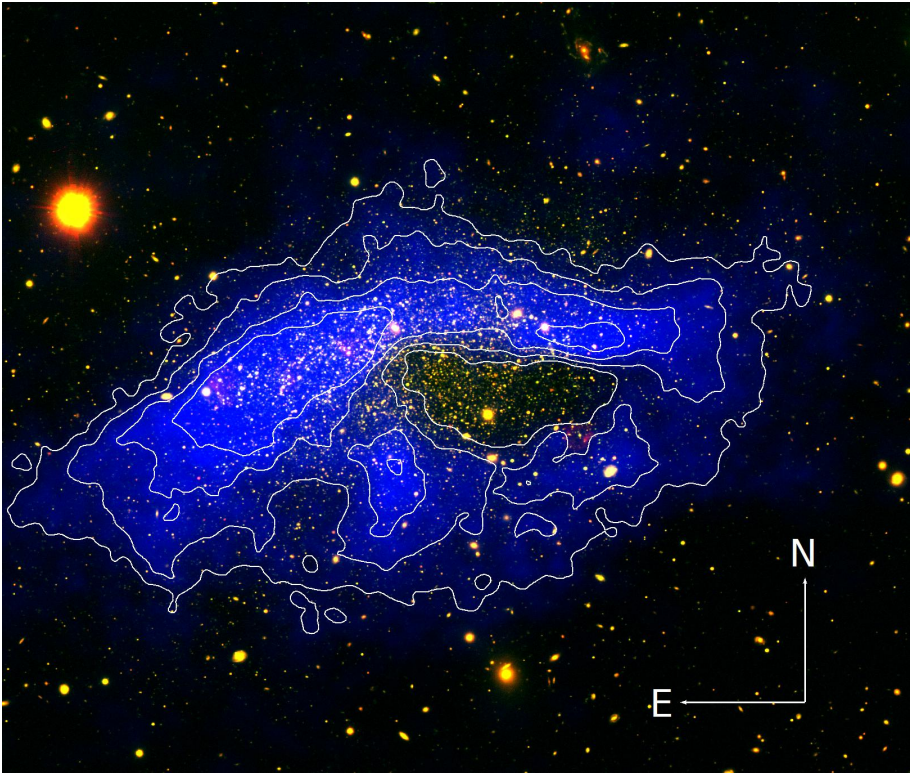


Figure 4.20 A composite image of the Leo A galaxy: Subaru/Suprime-Cam $H\alpha$ (red) and B (green) passbands (Stonkutė et al. 2014) and H I column density map (blue with white contours indicating the following column density levels (atoms/cm²): 3×10^{20} , 5×10^{20} , 7×10^{20} , 10^{21} ; Hunter et al. 2012).

conspicuous blue populations seen in the optical image in Fig. 4.20, including the area coinciding with the eastern half of the hole. We note that the old rRGB populations discussed in Ch. 3 have a fairly uniform distribution out to $a \sim 4'$, however, the bRGB stars appear to be somewhat lacking in the eastern part of Leo A from $a \sim 2'$ outwards (see Fig. 4.10). Since the bRGB population might presumably represent a younger generation of stars, their distribution supports the assumption that little star formation happened in the eastern part of the galaxy during the relatively recent history.

On the contrary, there is a prominent population of the brightest ($I < 23$) MS stars in the western part of the H I hole (see violet open circles in Figs. 4.7 and 4.10a). In Fig. 4.21 the same $H\alpha$ map (same as in Fig. 4.13) is presented with the overplotted H I column density contours (white), MS stars residing within the H I hole (red open circles) and the five young star clusters (open yellow circles; see Sect. 4.4). It is possible that stellar feedback from the young MS stars ($\lesssim 30$ Myr) swept up the gas in the western part of the hole and created a shock front seen in the $H\alpha$ map (see also Fig. 4.13 for a clearer view of the

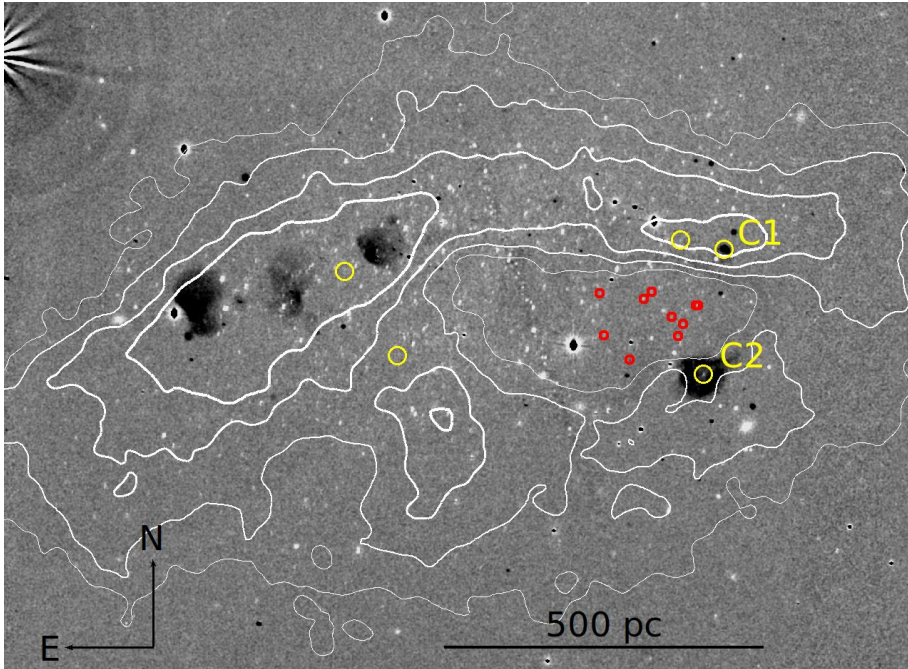


Figure 4.21 The Subaru Suprime-Cam $H\alpha$ image of the Leo A galaxy (same as Fig.4.13). Red open circles are bright ($I < 23$) MS stars and yellow circles – young star clusters (Stonkutė et al. 2019). White contours correspond to the following H I column densities (from thinnest to thickest): 3×10^{20} , 5×10^{20} , 7×10^{20} , 10^{21} atoms/cm².

shock front). Furthermore, such feedback might have triggered star formation ahead of the shock front, as conspicuous H II zones and a couple of young star clusters (LeoA-C1 and LeoA-C2; Stonkutė et al. 2019) clearly indicate a very recent star formation activity in this region.

Lower spatial resolution of the Subaru/Suprime-Cam observations limits the reliable sample of MS stars to just the brightest objects ($I < 23$), as large photometric scatter at fainter magnitudes deems it impossible to differentiate between the distinct stellar populations (see Fig. 4.4a). However, high photometric accuracy of the HST/ACS data does allow for such a distinction. Small photometric errors are likely to cause only minimal overlap between the closely spaced MS populations in the CMD (Fig. 4.4b), thus sectioning the data sample into different age bins based on theoretical isochrones can give a rough estimate of the spatial distribution of different populations of MS stars. In panel a of Fig. 4.22, the CMD of MS stars residing in the H I hole is presented (other stars in our sample ($\lesssim 300$ Myr) are marked as grey points). The PARSEC isochrones (Bressan et al. 2012) of 30, 80, 180 and 300 Myr ($Z = 0.0005$) are overplotted as black lines. Based on the isochrones, MS stars are divided into three age groups: $\lesssim 80$ Myr (red), 80-180 Myr (green) and 180-300 Myr (blue).

In panel b of Fig. 4.22, the corresponding spatial distribution for MS stars is shown. The H I column density contours are plotted in grey colour scale (lighter colour corresponds to lower column density) and the limits of the HST/ACS field are marked by green lines. Obvious differences in the spatial distribution are evident between the MS populations within different age bins.

In order to better see the morphological properties of each age group, we plotted them separately in Fig. 4.23. Positions of clusters C1, C2 and C3 are indicated by magenta open circles in all panels of Fig. 4.23. The three panels all reveal that there seems to have been no significant star formation events in the south-eastern part of the hole (and the nearby area outside the hole), as even the oldest well-dispersed ($\gtrsim 200$ Myr; panel c) populations appear to be somewhat sparser in this region. The younger stars ($\lesssim 200$ Myr, panels a and b) appear to form two distinct groups in the north-eastern and western parts of the H I hole. The separation is particularly noticeable for the youngest stars in panel a. If we look at the positions of the four stars from the north-eastern part of the hole (red open circles) in the CMD (Fig. 4.22a), it seems that this population is younger than the western one (red filled circles). This could mean that the eastern part of the hole was blown out a bit later, while the shock front caused earlier in the western part could have triggered new star formation just outside the hole, where young star clusters and larger numbers of younger stars (grey points in panel a) are visible.

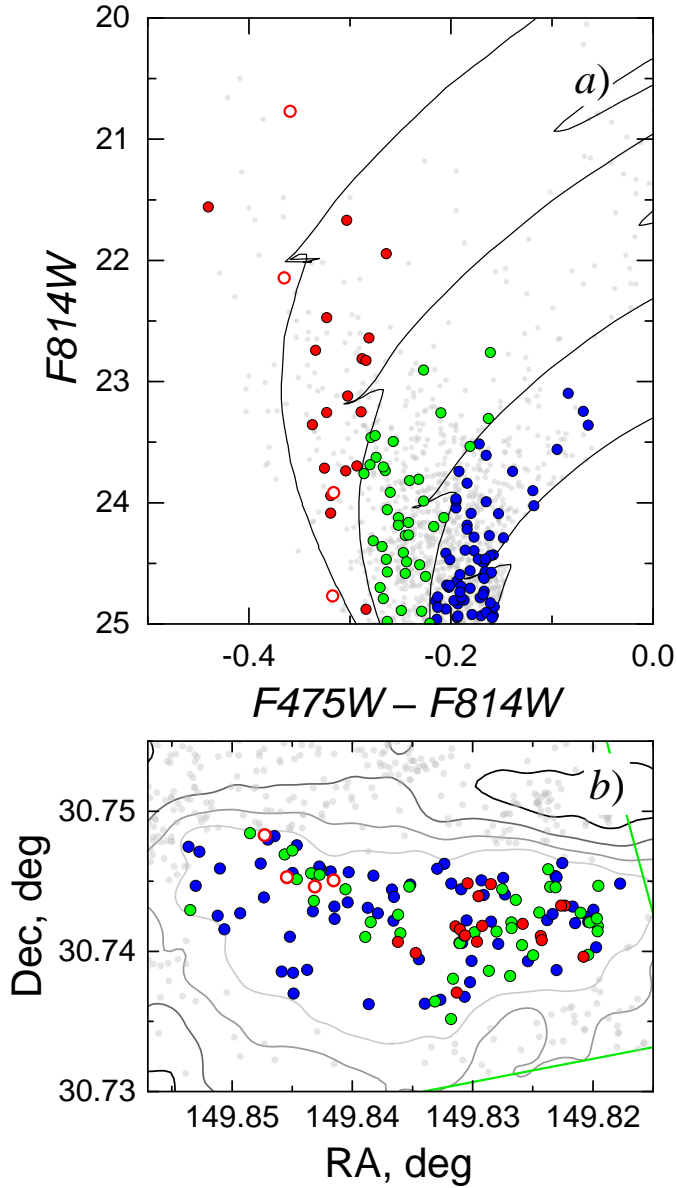


Figure 4.22 The CMD (*a*) and spatial distribution (*b*) of MS stars (HST/ACS). In *panel a*, PARSEC isochrones (Bressan et al. 2012) of 30, 80, 180 and 320 Myr and $Z = 0.0005$ are shown. The coloured points in both panels mark MS stars residing inside the H I hole. Different colours of the MS stars correspond to the age bins selected based on the plotted isochrones: <80 Myr (red; open circles are objects located on the north-eastern part of the H I hole and filled circles are the objects residing on the western side of the hole), 80-180 Myr (green), and 180-300 Myr (blue). Grey points are the MS stars outside the H I hole. In *panel b*, different levels of H I column density are shown by the grey/black contours (same as in Figs. 4.5 and 4.10), and the green outline is the HST/ACS field.

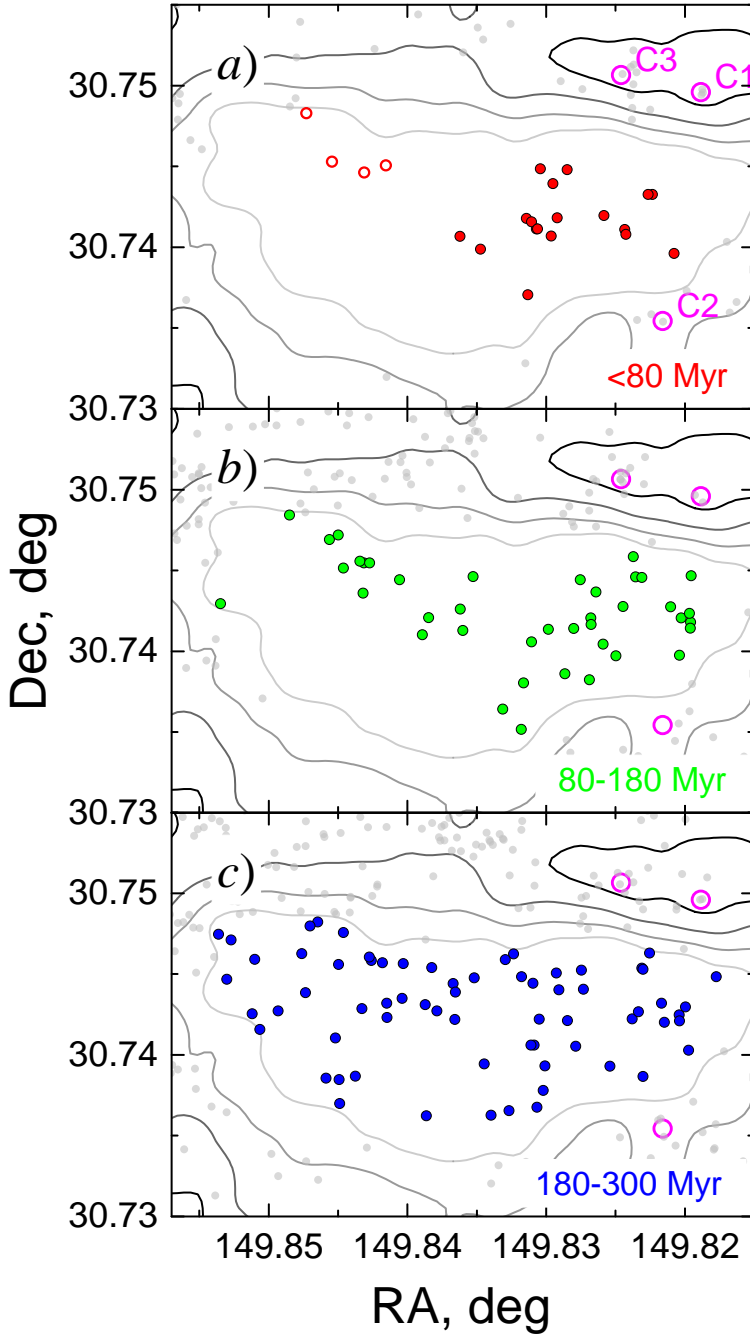


Figure 4.23 Spatial distributions of the MS stars (from the HST/ACS catalogue) residing in the H I hole. The following age bins are represented in different panels: <80 Myr (a), 80-180 Myr (b), and 180-300 Myr (c). Symbols are the same as in Fig. 4.22. Positions of three young star clusters (LeoA-C1, LeoA-C2 and LeoA-C3; Stonkutė et al. 2019) are marked by magenta open circles (cluster identification numbers are provided in *panel a*).

4.6 Summary

We studied recent morphological evolution of stellar structures in the Leo A galaxy by utilizing multicolour photometry data from the Subaru/Suprime-Cam and the HST/ACS. A convenient one-to-one age-luminosity relation of the BHeB stars enabled age dating of individual stars by interpolation between a set of theoretical isochrones. Age-dated stars allowed for an analysis of stellar patterns over the past ~ 300 Myr. We found that the oldest BHeB stars (~ 180 -300 Myr) are distributed fairly uniformly, somewhat younger stars (~ 80 -180 Myr) are more concentrated in the regions of high H I column density, and the youngest BHeB stars (~ 30 -80 Myr) and bright MS stars ($\lesssim 30$ Myr), while also concentrated in the regions of high H I column density, additionally reveal a prominent recently formed stellar population in the south-western part of the Leo A galaxy. Remarkably, no older BHeB stars are residing in this region, indicating that it has likely been quiescent for the past ~ 300 Myr.

The derived recent star formation history of Leo A revealed that the star formation rate was rather constant over the last 300 Myr with a short dip ~ 50 -80 Myr ago. The average SFR during the last 300 Myr is equal to $(561 \pm 60) M_{\odot}/\text{Myr}$, while the SFR of the last 30 Myr is $(616 \pm 56) M_{\odot}/\text{Myr}$.

An analysis of the Subaru/Suprime-Cam photometry in $H\alpha$ and R passbands enabled us to identify 16 stars (15% of the BHeB sample) with enhanced $H\alpha$ emission ($H\alpha - R \lesssim -0.06$). The enhanced emission in these objects indicates that they could be Be, B[e], or A-shell stars, however, spectroscopic observations are needed to reveal their true nature. It is noteworthy that 7 out of 16 emission stars are located close to the H II regions, which suggests that their photometry might be contaminated by the diffuse emission.

By inspecting a prominent (~ 500 pc) hole in the H I gas distribution, we estimated its upper age limit to be ~ 40 Myr (assuming it was created from a single centre with an average gas velocity dispersion of ~ 7 km/s). Optical images revealed a seemingly larger star surface number density in the eastern part of the H I hole, which might be due to more active star formation in the eastern part of the Leo A over the last ~ 300 Myr (as indicated by the BHeB stars). However, there is an unusual lack of BHeB stars of ages $\lesssim 200$ Myr over the entire area of the hole. The presence of prominent populations of young MS stars in the north-eastern and western parts of the H I hole, with the former potentially being somewhat younger, suggests that the hole was shaped by the feedback of multiple stellar populations. Furthermore, stellar feedback from the young MS populations might have created the $H\alpha$ shock front (highly resembling the shape of the western edge of the H I hole) and triggered star formation ahead of the $H\alpha$ shock front, where apparently recent star formation is evident from the H II regions and young star clusters.

Results and conclusions

We studied old ($\gtrsim 1$ Gyr) and young ($\lesssim 300$ Myr) stellar populations in the dwarf irregular galaxy Leo A by utilizing multicolour photometry data obtained with the Subaru Suprime-Cam and the HST ACS/WFC3. Decontamination of stellar photometry catalogues based on photometry quality parameters, the two-colour diagram and visual inspection left us with a reliable sample of member stars of the Leo A galaxy, which enabled us to study its structural properties.

By examining the decontaminated optical CMDs, we identified 32 luminous AGB and 3 candidate AGB stars in Leo A (20 stars in the central part of the galaxy were already presented in the literature and the 12 stars somewhat farther out are newly identified). The CMD analysis also led to the identification of a previously unknown sequence of 26 peculiar RGB stars that possibly show a strong CN band absorption in their spectra (~ 380 - 390 nm), as implied by the CN absorption features identified in the spectra of four of the peculiar RGB stars with spectroscopic data available in the literature.

The division of the RGB into blue and red subsets (prompted by somewhat different star densities along the colour axis in the CMD) revealed that the blue RGB stars have similar spatial distribution to that of the luminous AGB stars, and both have nearly equal scale lengths (0.89 ± 0.09 and 0.87 ± 0.06 , respectively), indicating that the two might represent the same generation of stars. Both AGB and blue RGB stars are considerably more centrally concentrated than the ones in the red RGB sample. Additionally, deep photometry of the archival HST/WFC3 observation data showed that the old stellar halo populations in Leo A extend up to $\sim 10'$ along the semi-major axis of the galaxy, which is significantly more than the extent of $\sim 4'$ of the luminous AGB stars representing populations of an intermediate age. These results imply that the star-forming disk of Leo A is shrinking, which is in agreement with the outside-in star formation scenario of dwarf galaxy evolution.

We age dated the blue core-helium-burning stars (showing one-to-one age-luminosity relation) by interpolation between a set of theoretical isochrones and investigated the changes in stellar patterns over the past ~ 300 Myr. We found that the oldest BHeB stars (~ 180 - 300 Myr) have a rather uniform distribution, and younger stars (~ 30 - 180 Myr) are more concentrated and resides in the

regions of higher H I column density.

The recent star formation history derived for the Leo A galaxy revealed that the star formation rate (SFR) was rather constant over the last 300 Myr with a short dip ~ 50 -80 Myr ago. The average SFR during the last 300 Myr is equal to $(561 \pm 60) M_{\odot}/\text{Myr}$, while the most recent (< 30 Myr) SFR is $(616 \pm 56) M_{\odot}/\text{Myr}$.

By inspecting the H I column density map, we estimated an upper age limit of a prominent (~ 500 pc) hole in the H I distribution to be ~ 40 Myr, if the feedback originating from a single centre and an average gas velocity dispersion of ~ 7 km/s are assumed. However, analysis of the main sequence stars from the HST/ACS catalogue revealed that multiple young stellar populations are present within the H I hole. Stellar feedback from a prominent population of young stars in the western half of the hole might have formed a shock front (visible in $H\alpha$), which closely resembles the shape of the western outline of the hole itself, and triggered star formation ahead of the front, where very recent star formation events are traced by H II regions and young (~ 20 Myr) star clusters. A smaller, but seemingly younger, population of stars is located in the north-eastern part of the H I hole, indicating that it might have contributed to the formation of the hole somewhat later. These results imply that feedback from multiple stellar populations is likely responsible for the creation of a large hole in the H I distribution of Leo A.

By analyzing the Subaru/Suprime-Cam photometry in $H\alpha$ and R passbands, 16 stars with enhanced $H\alpha$ emission ($H\alpha - R \lesssim -0.06$) were identified. This feature indicates that these might be Be, B[e], or A-shell stars, however, spectroscopic observations are needed to reveal their true nature. Identified emission stars comprise 15% of the BHeB sample, however, 7 out of 16 of them are located close to the H II regions, which means that their photometry could be contaminated by the diffuse emission.

Appendix: Identification charts

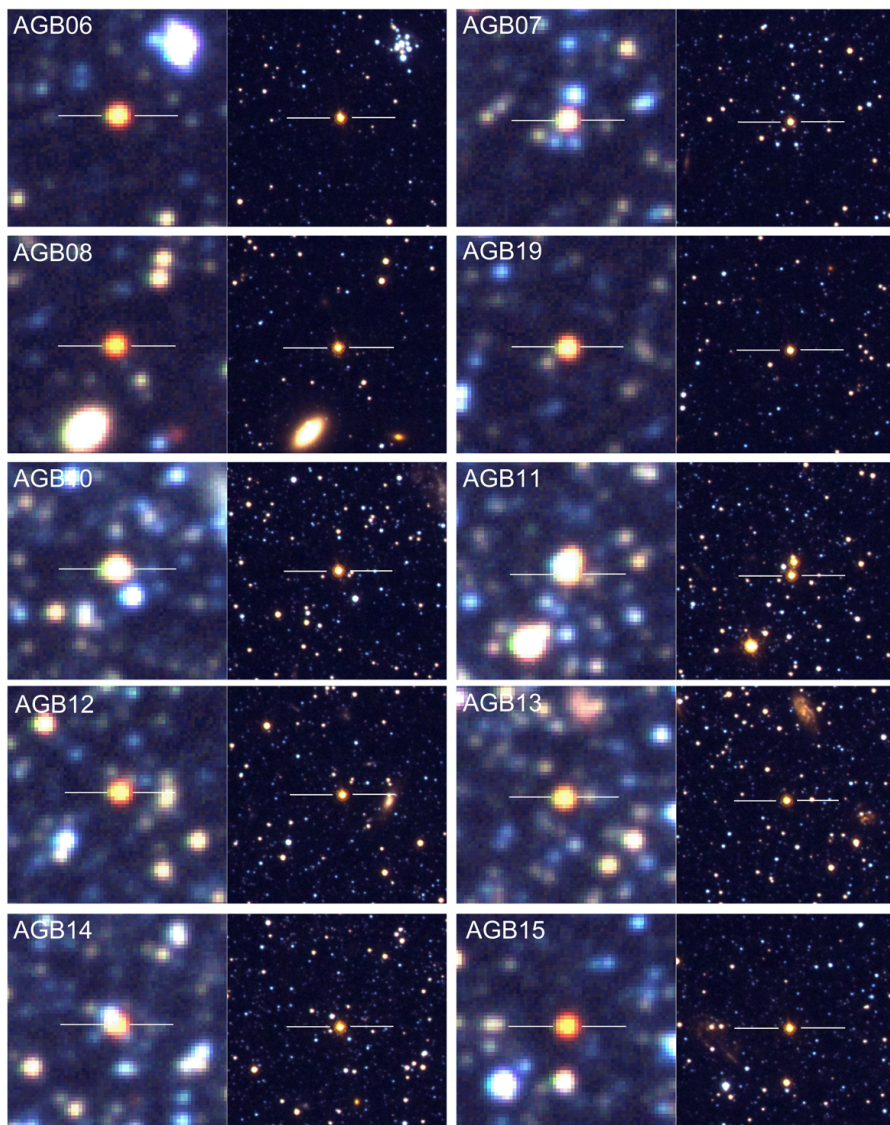


Figure A1 Identification charts for the AGB stars within the HST ACS field. Subaru Suprime-Cam images (R – red, V – green, B – blue) are displayed on the left, HST ACS – on the right; all images are $12'' \times 12''$; North is up, East is left. IDs of the AGB stars are indicated in the top left corner of each image.

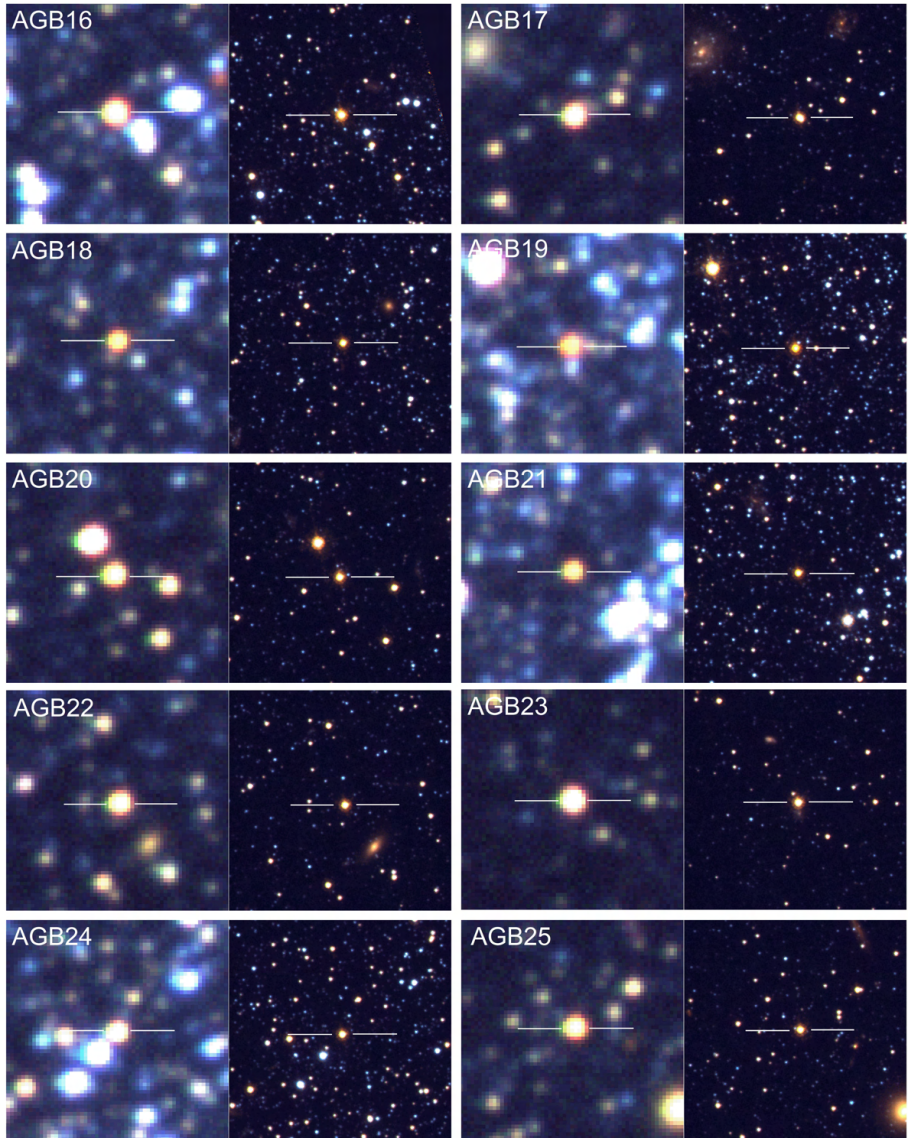


Figure A2 Identification charts for the AGB stars within the HST ACS field. Same as Fig. A1.



Figure A3 Identification charts for the AGB stars outside the HST ACS field. The displayed Subaru Suprime-Cam images are of the same size and orientation as in Fig. A1.

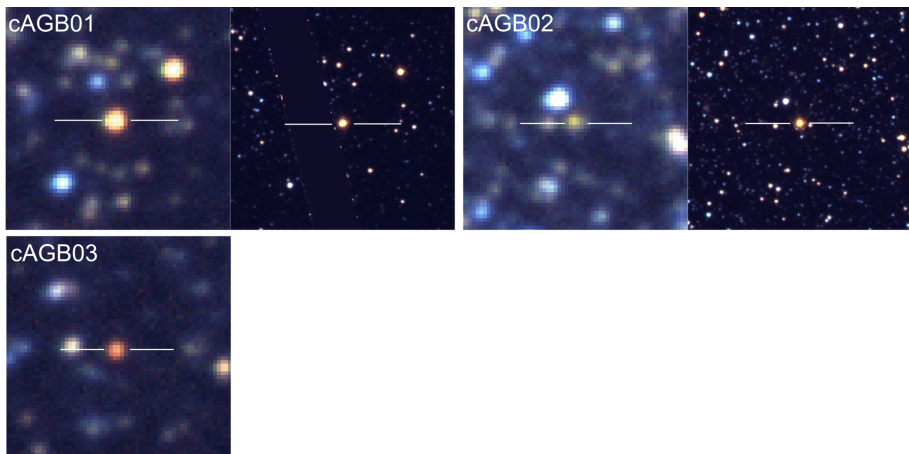


Figure A4 Identification charts for the cAGB stars. Subaru Suprime-Cam and HST ACS images (same as Fig. A1) are shown for cAGB01 & cAGB02 stars; Subaru Suprime-Cam image is shown for the cAGB03, which is located outside the HST ACS field.

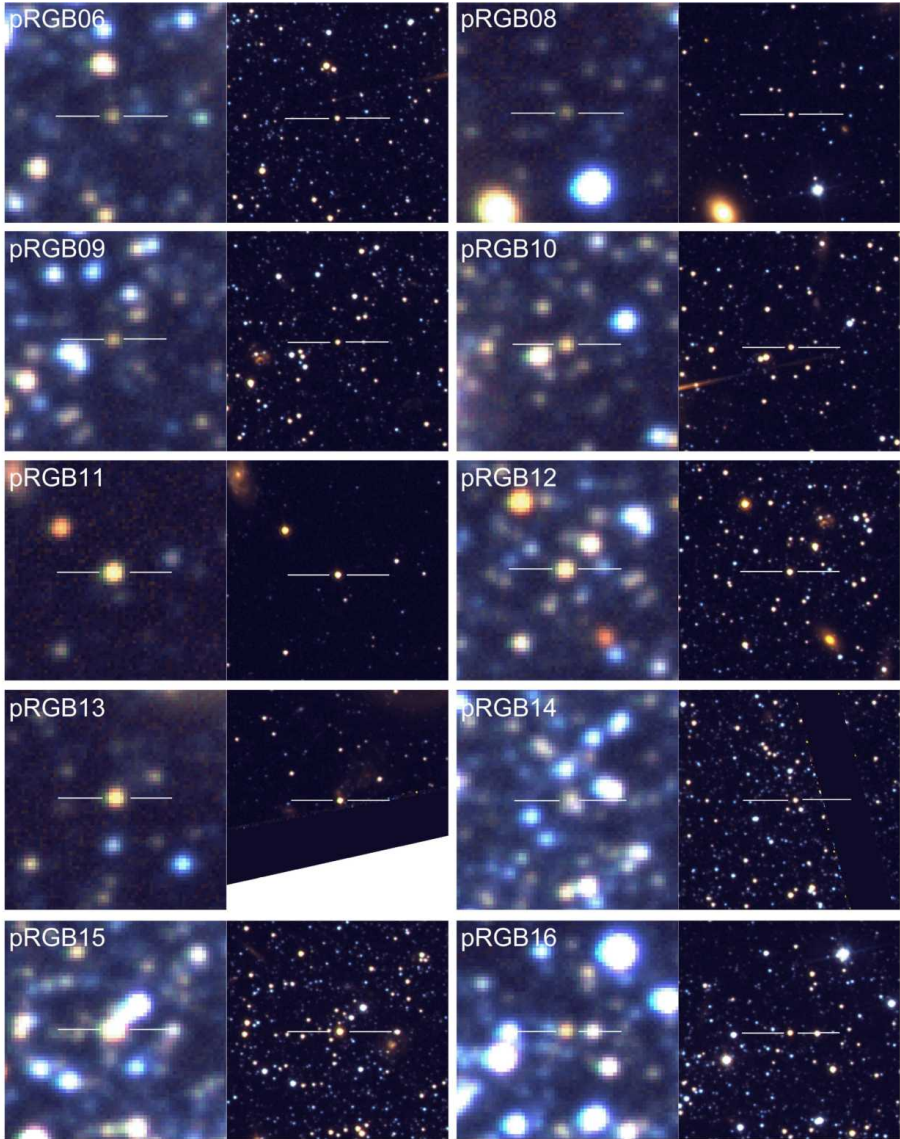


Figure A5 Identification charts for the pRGB stars within the HST ACS field (same as Fig. A1).

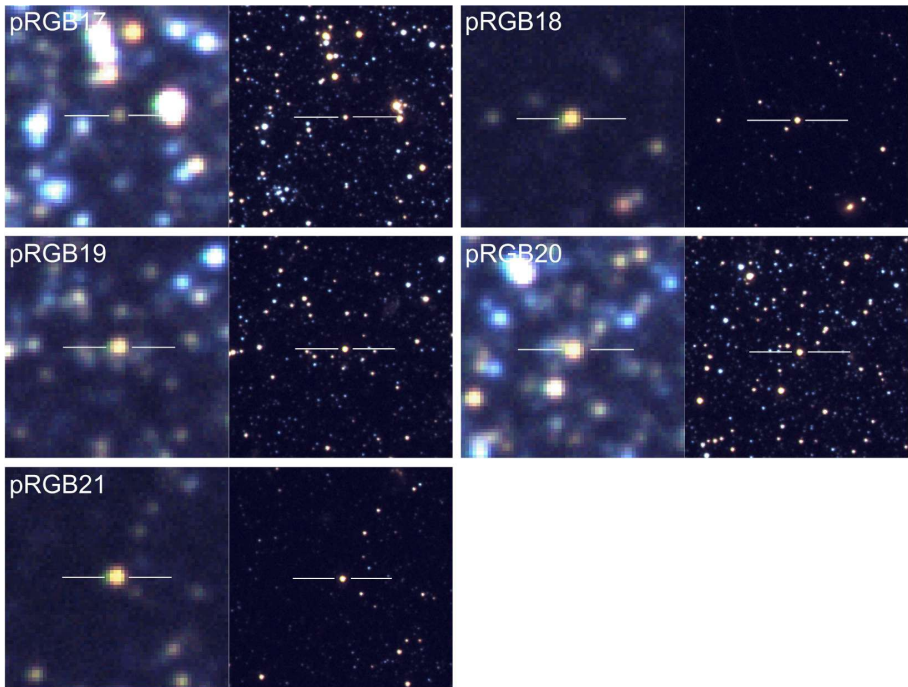


Figure A6 Identification charts for the pRGB stars within the HST ACS field (same as Fig. A1).

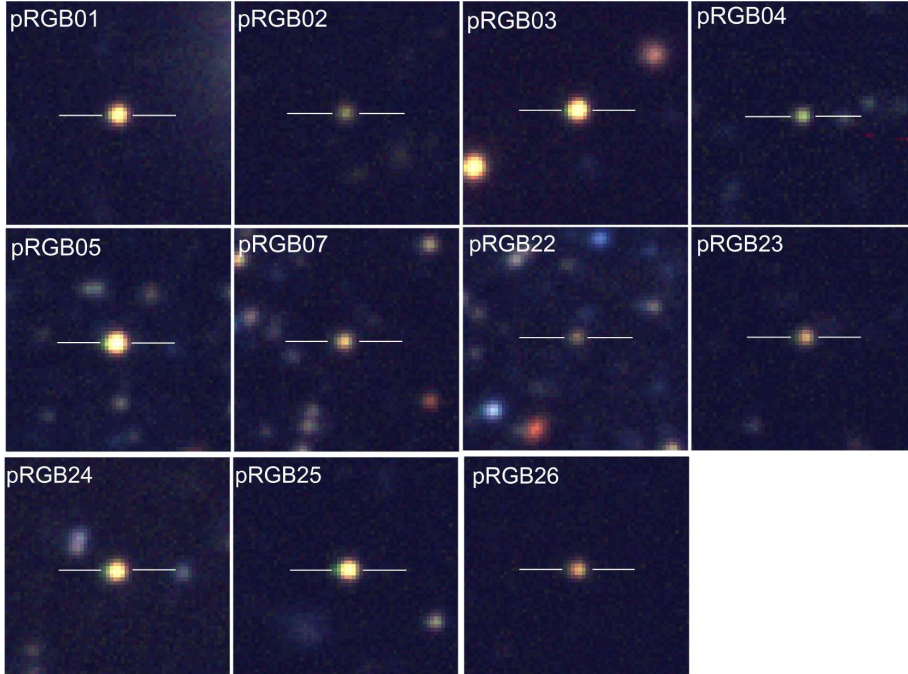


Figure A7 Identification charts for the pRGB stars outside the HST ACS field (same as Fig. A3).

Bibliography

- Aparicio, A. & Tikhonov, N. 2000, *AJ*, 119, 2183
- Bastian, N., Weisz, D. R., Skillman, E. D., et al. 2011, *MNRAS*, 412, 1539
- Battaglia, G., Tolstoy, E., Helmi, A., et al. 2006, *A&A*, 459, 423
- Battinelli, P. & Demers, S. 2006, *A&A*, 447, 473
- Beccari, G., Bellazzini, M., Fraternali, F., et al. 2014, *A&A*, 570, A78
- Bellazzini, M., Beccari, G., Fraternali, F., et al. 2014, *A&A*, 566, A44
- Bellazzini, M., Ferraro, F. R., Sollima, A., Pancino, E., & Origlia, L. 2004, *A&A*, 424, 199
- Benítez-Llambay, A., Navarro, J. F., Abadi, M. G., et al. 2016, *MNRAS*, 456, 1185
- Bernard, E. J., Aparicio, A., Gallart, C., Padilla-Torres, C. P., & Panniello, M. 2007, *AJ*, 134, 1124
- Bernard, E. J., Monelli, M., Gallart, C., et al. 2013, *MNRAS*, 432, 3047
- Bertelli, G., Bressan, A., Chiosi, C., Fagotto, F., & Nasi, E. 1994, *A&AS*, 106, 275
- Bohlender, D. 2016, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 506, *Bright Emissaries: Be Stars as Messengers of Star-Disk Physics*, ed. T. A. A. Sigut & C. E. Jones, 275
- Boyer, M. L., McQuinn, K. B. W., Barmby, P., et al. 2015, *ApJ*, 800, 51
- Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L., et al. 2012, *MNRAS*, 427, 127
- Brown, W. R., Geller, M. J., Kenyon, S. J., & Kurtz, M. J. 2007, *ApJ*, 666, 231
- Cannon, J. M., Most, H. P., Skillman, E. D., et al. 2011, *ApJ*, 735, 36

Cole, A. A., Skillman, E. D., Tolstoy, E., et al. 2007, *ApJ*, 659, L17

Cole, A. A., Weisz, D. R., Dolphin, A. E., et al. 2014, *ApJ*, 795, 54

de Boer, T. J. L., Tolstoy, E., Hill, V., et al. 2012, *A&A*, 539, A103

del Pino, A., Aparicio, A., & Hidalgo, S. L. 2015, *MNRAS*, 454, 3996

Dohm-Palmer, R. C., Skillman, E. D., Saha, A., et al. 1997, *AJ*, 114, 2527

Dolphin, A. E. 2000, *PASP*, 112, 1383

Dolphin, A. E., Saha, A., Claver, J., et al. 2002, *AJ*, 123, 3154

Dolphin, A. E., Saha, A., Skillman, E. D., et al. 2003, *AJ*, 125, 1261

El-Badry, K., Wetzell, A., Geha, M., et al. 2016, *ApJ*, 820, 131

Ellis, R. S. 1997, *ARA&A*, 35, 389

Faber, S. M., Phillips, A. C., Kibrick, R. I., et al. 2003, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 4841, *Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes*, ed. M. Iye & A. F. M. Moorwood, 1657–1669

Faria, D., Feltzing, S., Lundström, I., et al. 2007, *A&A*, 465, 357

Fitzpatrick, E. L. 1999, *PASP*, 111, 63

Gallart, C., Zoccali, M., & Aparicio, A. 2005, *ARA&A*, 43, 387

Gössl, C. A. 2007, PhD thesis, Ludwig-Maximilian University Munich

Graus, A. S., Bullock, J. S., Fitts, A., et al. 2019, *MNRAS*, 490, 1186

Haines, C. P., Gargiulo, A., La Barbera, F., et al. 2007, *MNRAS*, 381, 7

Hamedani Golshan, R., Javadi, A., van Loon, J. T., Khosroshahi, H., & Saremi, E. 2017, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 466, 1764

Hamren, K., Beaton, R. L., Guhathakurta, P., et al. 2016, *ApJ*, 828, 15

Herwig, F. 2005, *ARA&A*, 43, 435

Hidalgo, S. L., Aparicio, A., Martínez-Delgado, D., & Gallart, C. 2009, *ApJ*, 705, 704

Hidalgo, S. L., Monelli, M., Aparicio, A., et al. 2013, *ApJ*, 778, 103

Hunter, D. A., Ficuci-Vicas, D., Ashley, T., et al. 2012, *AJ*, 144, 134

Iben, Icko, J. 1967, *ARA&A*, 5, 571

- Izzard, R. G. & Tout, C. A. 2004, MNRAS, 350, L1
- Jones, O. C., Maclay, M. T., Boyer, M. L., et al. 2018, ApJ, 854, 117
- Kacharov, N., Battaglia, G., Rejkuba, M., et al. 2017, MNRAS, 466, 2006
- Karachentsev, I. D. & Kaisina, E. I. 2013, AJ, 146, 46
- Karakas, A. I. & Lattanzio, J. C. 2014, PASA, 31, e030
- Kauffmann, G., White, S. D. M., & Guiderdoni, B. 1993, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 264, 201
- Kirby, E. N., Rizzi, L., Held, E. V., et al. 2017, ApJ, 834, 9
- Koch, A., Grebel, E. K., Wyse, R. F. G., et al. 2006, AJ, 131, 895
- Kroupa, P. 2002, Science, 295, 82
- Larson, R. B. 1974, MNRAS, 169, 229
- Lee, J. C., Gil de Paz, A., Tremonti, C., et al. 2009, ApJ, 706, 599
- Leščinskaitė, A., Stonkutė, R., & Vansevicius, V. 2021, A&A, 647, A170
- Mateo, M. L. 1998, ARA&A, 36, 435
- McConnachie, A. W. 2012, AJ, 144, 4
- McCray, R. & Kafatos, M. 1987, ApJ, 317, 190
- McMonigal, B., Bate, N. F., Lewis, G. F., et al. 2014, MNRAS, 444, 3139
- McQuinn, K. B. W., Boyer, M. L., Mitchell, M. B., et al. 2017, ApJ, 834, 78
- McQuinn, K. B. W., Skillman, E. D., Cannon, J. M., et al. 2010, ApJ, 724, 49
- Momany, Y. 2015, The Blue Straggler Population in Dwarf Galaxies, ed. H. M. J. Boffin, G. Carraro, & G. Beccari, Vol. 413, 129
- Okamoto, S., Arimoto, N., Tolstoy, E., et al. 2017, MNRAS, 467, 208
- Pecaut, M. J. & Mamajek, E. E. 2013, ApJS, 208, 9
- Pokhrel, N. R., Simpson, C. E., & Bagetakos, I. 2020, AJ, 160, 66
- Rizzi, L., Tully, R. B., Makarov, D., et al. 2007, ApJ, 661, 815
- Robin, A. C., Reylé, C., Derrière, S., & Picaud, S. 2003, A&A, 409, 523
- Ruiz-Escobedo, F., Peña, M., Hernández-Martínez, L., & García-Rojas, J. 2018, MNRAS, 481, 396

- Sanna, N., Bono, G., Stetson, P. B., et al. 2010, *ApJ*, 722, L244
- Santana, F. A., Muñoz, R. R., de Boer, T. J. L., et al. 2016, *ApJ*, 829, 86
- Schlafly, E. F. & Finkbeiner, D. P. 2011, *ApJ*, 737, 103
- Shen, S., Madau, P., Conroy, C., Governato, F., & Mayer, L. 2014, *ApJ*, 792, 99
- Skillman, E. D., Hidalgo, S. L., Weisz, D. R., et al. 2014, *ApJ*, 786, 44
- Slettebak, A. 1982, *ApJS*, 50, 55
- Snigula, J. M. 2005, PhD thesis, Ludwig-Maximilian University Munich
- Stetson, P. B. 1987, *PASP*, 99, 191
- Stinson, G. S., Dalcanton, J. J., Quinn, T., et al. 2009, *MNRAS*, 395, 1455
- Stinson, G. S., Dalcanton, J. J., Quinn, T., Kaufmann, T., & Wadsley, J. 2007, *ApJ*, 667, 170
- Stonkutė, R., Arimoto, N., Hasegawa, T., et al. 2014, *ApJS*, 214, 19
- Stonkutė, R., Narbutis, D., Bridžius, A., Leščinskaitė, A., & Vansevičius, V. 2015, *Baltic Astronomy*, 24, 293
- Stonkutė, R., Naujalis, R., Čeponis, M., Leščinskaitė, A., & Vansevičius, V. 2019, *A&A*, 627, A7
- Stonkutė, R., Čeponis, M., Leščinskaitė, A., Naujalis, R., & Vansevičius, V. 2018, *A&A*, 614, A144
- Taibi, S., Battaglia, G., Kacharov, N., et al. 2018, *A&A*, 618, A122
- Tammann, G. A., Reindl, B., & Sandage, A. 2011, *A&A*, 531, A134
- Taylor, B. J. 1986, *ApJS*, 60, 577
- Tenorio-Tagle, G. & Bodenheimer, P. 1988, *ARA&A*, 26, 145
- Tolstoy, E., Hill, V., & Tosi, M. 2009, *ARA&A*, 47, 371
- Tosi, M. 2003, *Ap&SS*, 284, 651
- Unavane, M., Wyse, R. F. G., & Gilmore, G. 1996, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 278, 727
- van der Wel, A., Straughn, A. N., Rix, H. W., et al. 2011, *ApJ*, 742, 111
- van Eymeren, J., Bomans, D. J., Weis, K., & Dettmar, R. J. 2007, *A&A*, 474, 67

- van Zee, L., Skillman, E. D., & Haynes, M. P. 2006, *ApJ*, 637, 269
- Vansevičius, V., Arimoto, N., Hasegawa, T., et al. 2004, *ApJ*, 611, L93
- Venn, K. A., Shetrone, M. D., Irwin, M. J., et al. 2012, *ApJ*, 751, 102
- Warren, S. R., Weisz, D. R., Skillman, E. D., et al. 2011, *ApJ*, 738, 10
- Weaver, R., McCray, R., Castor, J., Shapiro, P., & Moore, R. 1977, *ApJ*, 218, 377
- Weisz, D. R., Dalcanton, J. J., Williams, B. F., et al. 2011, *ApJ*, 739, 5
- Weisz, D. R., Skillman, E. D., Cannon, J. M., et al. 2008, *ApJ*, 689, 160
- Weisz, D. R., Skillman, E. D., Cannon, J. M., et al. 2009a, *ApJ*, 704, 1538
- Weisz, D. R., Skillman, E. D., Cannon, J. M., et al. 2009b, *ApJ*, 691, L59
- White, S. D. M. & Rees, M. J. 1978, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 183, 341
- Young, L. M. & Lo, K. Y. 1996, *ApJ*, 462, 203
- Young, L. M. & Lo, K. Y. 1997, *ApJ*, 490, 710
- Zhang, H.-X., Hunter, D. A., Elmegreen, B. G., Gao, Y., & Schruba, A. 2012, *AJ*, 143, 47

Santrauka

Įvadas

Nykštukinės galaktikos yra dominuojantis galaktikų tipas Visatoje, todėl jos vaidina itin reikšmingą vaidmenį galaktikų formavimosi ir evoliucijos kontekste. Pagal šiuo metu vyraujančią kosmologinį scenarijų galaktikų formavimasis vyksta pagal hierarchinį principą, t. y., nykštukinės galaktikos yra pirmosios Visatoje susiformavusios, gravitaciškai susietos struktūros (Kauffmann et al. 1993), o masyvios galaktikos (pvz., Paukščių Takas) susiformavo vėliau kaip mažesnės masės galaktikų susidūrimų ir akrecijos pasekmė (White & Rees 1978; Unavane et al. 1996). Galaktikų formavimosi sampratai itin svarbios yra Vietinei grupei priklausančios galaktikos, kadangi santykinai nedidelis atstumas iki jų leidžia jose išskirti atskiras žvaigždes ir detaliau ištirti galaktikų struktūrą, o tai suteikia galimybę apriboti galaktikų evoliucijos modelius (Mateo 1998; Tolstoy et al. 2009; McConnachie 2012).

Nedidelė nykštukinių galaktikų masė, silpnas gravitacinis potencialas bei mažas pabėgimo greitis lemia reikšmingą tiek išorinių (potvyniniai sutrikdymai), tiek vidinių (žvaigždžių grįžtamasis ryšys) procesų įtaką dinaminei bei morfologinei šių sistemų evoliucijai (pvz., Haines et al. 2007). Žvaigždžių grįžtamojo ryšio (pvz., spinduliuotės slėgio, fotojonizacijos, žvaigždinių vėjų, supernovų sprogimų) skleidžiama energija paveikia aplinkinę tarpžvaigždinę terpę suteikdama jai judesio kiekį bei ją kaitindama. Vykstant intensyviems žvaigždėdaros procesams žvaigždžių grįžtamojo ryšio sukurtas galaktinis vėjas gali išstumti didelį dujų kiekį į galaktikos halą (tokiu būdu sumažindamas žvaigždėdaros efektyvumą iki kol dujos sukrenta atgal į galaktiką), arba visiškai išpūsti jas iš galaktikos, galutinai nutraukdamas žvaigždėdaros procesus joje (Larson 1974; van Eymeren et al. 2007). Dėl tokio dujų išstūmimo ir sukritimo atgal nykštukinėse galaktikose stochastiniai žvaigždėdaros procesai vyksta su pertraukomis (Stinson et al. 2007; McQuinn et al. 2010; Weisz et al. 2011; van der Wel et al. 2011; Shen et al. 2014) ir kiekvienas iš jų prisideda prie galaktikos struktūros bei morfologijos pokyčių, tad perprasti ryšį tarp pradinės struktūros ir vidinių/išorinių procesų poveikio jai stebint dabartinę galaktikos būseną yra sudėtinga.

Pasak nykštukinių galaktikų evoliucijos modelių (Stinson et al. 2009; El-Badry et al. 2016; Graus et al. 2019), žvaigždžių populiacijų pasiskirstymo svyravimai, atsirandantys dėl žvaigždžių grįžtamojo ryšio poveikio, ilgainiui gali suformuoti radialinius amžiaus bei metalingumo gradientus: jaunesni (metalingesni) objektai yra susitelkę centrinėse galaktikos srityse, kurios pasižymi didesniu dujų tankiu, o senesnės (mažiau metalingos) žvaigždės

dominuoja išorinėse srityse. Yra daug nykštukinių galaktikų, kuriose tokių galaktocentrinių žvaigždžių populiacijų gradientų egzistavimą patvirtino ir stebėjimų rezultatai (e.g., Aparicio & Tikhonov 2000; Battaglia et al. 2006; Faria et al. 2007; de Boer et al. 2012; Beccari et al. 2014; McMonigal et al. 2014; del Pino et al. 2015; Santana et al. 2016; Kacharov et al. 2017; Okamoto et al. 2017). Išorinė sąveika su kitais objektais gali būti efektyvus būdas sušvelninti arba panaikinti populiacijų gradientą, tačiau gerai susimaišiusios vidutinio ir seno amžiaus populiacijos yra aptinkamos ir kai kuriose izoliuotose galaktikose (Skillman et al. 2014; McQuinn et al. 2017), tad nykštukinių galaktikų struktūra ir ją formuojantys mechanizmai vis dar kelia daug klausimų.

Didelė morfologinė nykštukinių galaktikų įvairovė apsunkina bandymus suprasti, kokie procesai lemia žvaigždžių formavimąsi šiose sistemose, kaip jose evoliucionuoja žvaigždinės struktūros bei koks ryšys sieja skirtingų tipų nykštukines galaktikas. Dėl šių priežasčių, itin svarbūs yra detalūs populiacijų tyrimai artimose galaktikose. Šiame darbe buvo atliktas žvaigždžių populiacijų tyrimas netaisyklingoje nykštukinėje galaktikoje Leo A. Ši izoliuota galaktika yra pirminių Visatos struktūrų atitikmuo, todėl tai puiki kandidatė išskirtinai vidinių procesų nulemtų morfologinių ypatybių nykštukinėje galaktikoje tyrimui.

Darbo tikslas

Nustatyti žvaigždžių populiacijų savybes netaisyklingoje nykštukinėje galaktikoje Leo A.

Darbo uždaviniai

- Sukurti foninių ir neišskirtų objektų pašalinimo iš žvaigždžių fotometrijos katalogų metodiką.
- Identifikuoti šviesias asimptotinės milžinių sekos žvaigždes, emisines žvaigždes ir kitus pekuliarus objektus Leo A galaktikoje.
- Nustatyti Leo A galaktikos ribas, remiantis senų žvaigždžių populiacijų pasiskirstymu galaktikos pakraštyje.
- Identifikuoti Leo A galaktikos struktūrinius komponentus pagal raudonųjų milžinių sekos ir asimptotinės milžinių sekos žvaigždes ir ištirti jų radialines savybes.
- Nustatyti jaunų žvaigždžių populiacijų amžių pagal pagrindinės sekos žvaigždes, mėlynasias supermilžines ir jaunus žvaigždžių spiečius; ištirti Leo A žvaigždinių struktūrų evoliuciją per pastaruosius ~ 300 Myr.

Svarbiausieji rezultatai ir ginamieji teiginiai

1. Leo A galaktikoje atrasta anomali 26 RGB žvaigždžių grupė. Tikėtina, jog šių žvaigždžių spektruose yra stipri CN sugerties juosta ties $\sim 380\text{--}390$ nm.
2. Leo A galaktikoje atrasta 12 naujų AGB žvaigždžių ir 3 AGB kandidatės. Anksčiau Leo A buvo žinoma tik 20 AGB žvaigždžių.
3. Leo A galaktikoje atrasta 16 emisinių B-A spektrinių klasių supermilžinių (jaunesnių nei $\lesssim 300$ mln. m.). Leo A stipria $H\alpha$ emisija ($H\alpha - R < -0,06$) pasižymi $\sim 15\%$ B-A spektrinių klasių supermilžinių.
4. Nustatyta, kad dėl jaunų žvaigždžių populiacijų poveikio aplinkinėms dujoms susiformavo skylė H I dujų diske ir ją ribojantis jonizacinis frontas bei išsižiebė žvaigždédara priešais šį frontą. Šiuo metu vykstančios žvaigždédaros procesus rodo jauni žvaigždžių spiečiai ir H II sritys.
5. Nustatyta, kad mėlynos RGB ir šviesios AGB žvaigždės yra susitelkusios centrinėje Leo A galaktikos dalyje ($a < 4'$), o raudonosios RGB žvaigždės yra pasklidusios daug plačiau ($a < 10'$). Šie rezultatai paremia Leo A žvaigždédaros scenarijų “iš išorės į vidų” (angl. outside-in).

1 skyrius

Netaisyklingoji nykštukinė galaktika Leo A

1.1 lentelė. Leo A galaktikos parametrai.

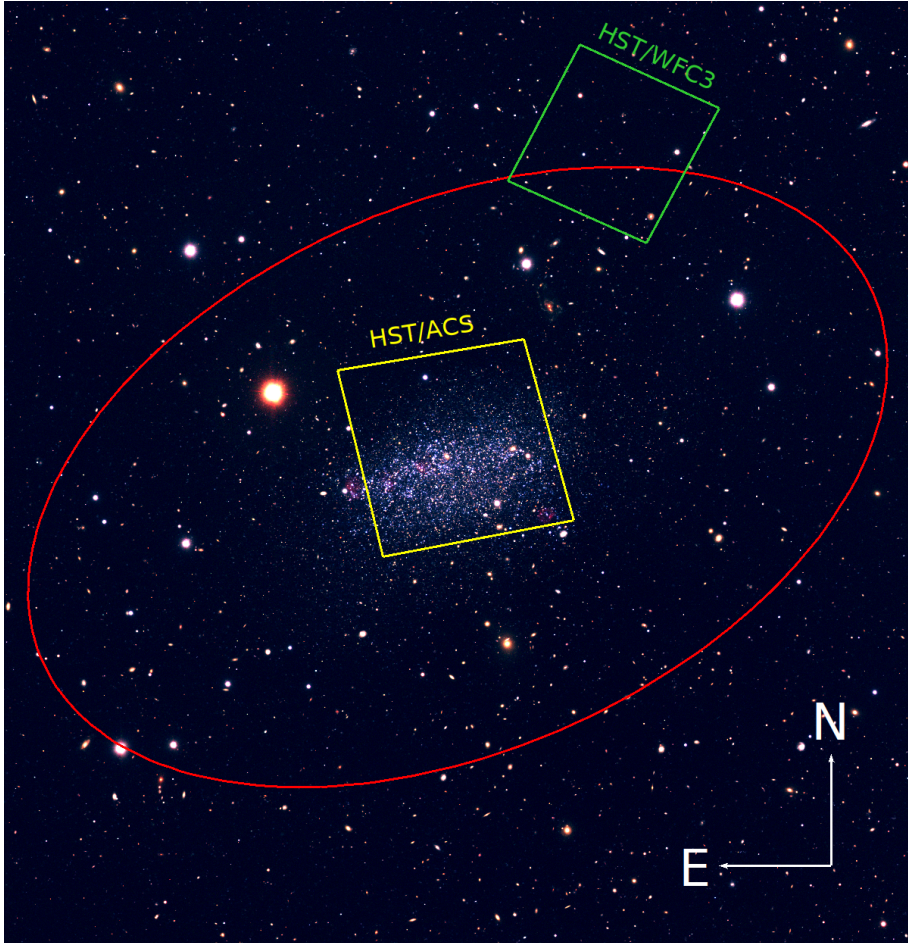
Parametras	Vertė	Šaltinis
$\alpha(\text{J2000}); \delta(\text{J2000})$	$9^{\text{h}}59^{\text{m}}24.5^{\text{s}}; +30^{\circ}44'47''$	Vansevičius et al. (2004)
P.A.	114°	Vansevičius et al. (2004)
b/a	0,6	Vansevičius et al. (2004)
Holmberg spindulys	3,5	Mateo (1998)
A_B, A_V, A_I	0,075, 0,057, 0,031	Schlafly & Finkbeiner (2011)
A_{F475W}, A_{F814W}	0,067, 0,032	Schlafly & Finkbeiner (2011)
$(m - M)_0$	$24,58 \pm 0,03$ (824 ± 15 kpc)	Leščinskaitė et al. (2021)
M_*	$3,3 \cdot 10^6 M_{\odot}$	Kirby et al. (2017)
$M_{\text{H I}}$	$6,9 \cdot 10^6 M_{\odot}$	Hunter et al. (2012)
M/L_V	$20 \pm 6 M_{\odot}/L_{\odot}$	Brown et al. (2007)
$\langle [\text{Fe}/\text{H}] \rangle$	$-1,67^{+0,09}_{-0,08}$	Kirby et al. (2017)
$12 + \log(\text{O}/\text{H})$	$7,38 \pm 0,1$	van Zee et al. (2006)
$12 + \log(\text{O}/\text{H})$	$7,4 \pm 0,2$	Ruiz-Escobedo et al. (2018)

$\alpha(\text{J2000})$ ir $\delta(\text{J2000})$ – galaktikos centro pusiaujinės koordinatės (atitinkamai, rektascencija ir deklinacija); P.A. – didžiosios ašies pozicinis kampas; b/a – mažosios ir didžiosios ašių santykis; Holmberg spindulys – atstumas nuo galaktikos centro iki paviršinio šviesio izofotos, atitinkančios $B = 26,5$ mag arcsec $^{-2}$; $\langle [\text{Fe}/\text{H}] \rangle$ – vidutinis RGB žvaigždžių metalingumas; A_B, A_V, A_I, A_{F475W} , ir A_{F814W} – foninė ekstinkcija B, V, I, A_{F475W} , ir A_{F814W} fotometriniuose juostose; $(m - M)_0$ – atstumo modulis; M_* – žvaigždinė masė; $M_{\text{H I}}$ – neutralaus vandenilio masė; M/L_V – apatinė masės ir šviesio santykio riba; $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ – deguonies gausa.

Leo A (Fig. 1.1) yra viena labiausiai izoliuotų galaktikų Vietinėje grupėje, nutolusi ~ 800 kpc atstumu nuo Paukščių tako ($1' \sim 230$ pc; Dolphin et al. 2003; Bernard et al. 2013). Tai netaisyklinga nykštukinė galaktika, kurios itin didelę masės dalį sudaro tamsioji materija ($\sim 80\%$; Brown et al. 2007; Kirby et al. 2017), o didžiąją barijoninės medžiagos dalį iki šiol sudaro dujos (Young & Lo 1996; Hunter et al. 2012). Itin mažas šios galaktikos metalingumas (van Zee et al. 2006; Kirby et al. 2017; Ruiz-Escobedo et al. 2018) galėjo nulemti menką žvaigždėdaros efektyvumą ir santykinai mažą žvaigždinę masę. Kaimyninių objektų trūkumas Leo A aplinkoje, taip pat reiškia, jog žvaigždėdara šioje galaktikoje negalėjo būti sukelta dėl išorinio poveikio, o vos prieš ~ 5 Gyr paste-

bimai išaugusi Leo A žvaigždėdaros sparta (Cole et al. 2007; Skillman et al. 2014) yra vidinių procesų pasekmė. Įdomu tai, jog artimoje aplinkoje Aquarius yra vienintelė kita izoliuota netaisyklinga nykštukinė galaktika, pasižyminti uždelstu žvaigždėdaros procesų suaktyvėjimu (Cole et al. 2014), tad detalus Leo A tyrimas gali suteikti vertingos informacijos apie tokio pobūdžio galaktikų evoliuciją. Nepaisant to, jog žvaigždėdara Leo A suaktyvėjo pavėluotai, joje aptinkamos platų amžių intervalą ($\sim 0,01-10$ Gyr) apimančios žvaigždžių populiacijos: H II sritys yra akivaizdi neseniai vykusios žvaigždėdaros pasekmė, o RR Lyr kintamosios žvaigždės (Dolphin et al. 2002; Bernard et al. 2013) rodo, jog galaktikoje egzistuoja sena ($\gtrsim 10$ Gyr) žvaigždžių populiacija.

Netaisyklingos nykštukinės galaktikos yra palyginti paprastos, dujomis turtingos sistemos, kurios manomai yra geriausias pirminių ankstyvosios Visatos struktūrų (t. y., komponentų, iš kurių formavosi masyvios galaktikos) atitikmuo (Tosi 2003). Detalūs tokių sistemų, tikėtina, susiformavusių ir evoliucionavusių tik vidinių procesų ir savaiminio praturtinimo būdu, tyrimai gali padėti geriau suprasti žvaigždėdaros procesus ankstyvojoje Visatoje. Dėl savo izoliuotos padėties, Leo A galaktika yra puikus tokios sistemos pavyzdys. Šioje disertacijoje buvo atliktas žvaigždžių populiacijų ir struktūrinių Leo A savybių tyrimas, pasinaudojant Subaru teleskopo plataus lauko kameros Suprime-Cam stebėjimų duomenimis bei didelės raiškos duomenimis gautais Hubble kosminio teleskopo (angl. Hubble Space Telescope, HST) ACS (angl. Advanced Camera for Surveys) ir WFC3 (angl. Wide Field Camera 3) kameromis. Disertacijoje naudojami Leo A parametrai yra pateikti 1.1 lentelėje.



1.1 pav. Leo A nuotrauka Subaru/Suprime-Cam $H\alpha$, V ir B fotometrinių juostų kompozicijoje (Stonkutė et al. 2014). Raudonai pažymėtos elipsės parametrai: didysis pusašis, $a = 8'$; ašių santykis, $b/a = 0.6$; pozicinis kampas, P.A. = 114° ; centro koordinatės, $\alpha = 9^h59^m24,5^s$, $\delta = +30^\circ44'47''$ (J2000). HST/ACS stebėjimų laukas yra pažymėtas geltonu kontūru, HST/WFC3 – žaliu. Šiaurė yra nukreipta į viršų, o rytai į kairę.

2 skyrius

Stebėjimų duomenys

2.1 Subaru/Suprime-Cam

Leo A struktūrinei analizei panaudoti Subaru/Suprime-Cam stebėjimų duomenys, kurių žvaigždžių fotometrijos procedūros ir duomenų redukcijos yra detalai aprašytos Stonkutė et al. (2014) (B , V , I) ir Stonkutė et al. (įteiktas) (R ir $H\alpha$) darbuose. Nepaisant to, jog pastebimai išplitę šviesos šaltiniai iš Stonkutė et al. (2014) katalogo buvo pašalinti remiantis palyginimu su PSF (angl. point spread function) modeliais, daug pašalinių objektų, pasižyminčių mažiau išplitusiu, arba žvaigždėms būdingu šviesos signalo profiliu, yra įtraukti į katalogą. Tokie patikimai Leo A struktūros analizei trukdantys objektai yra tiriamame lauke besiprojektuojančios Paukščių Tako (angl. Milky Way, MW) žvaigždės, dėl nepakankamos erdvinės skyros neišskirtos žvaigždės bei kompaktiškos foninės galaktikos. Siekiant sumažinti pastarųjų objektų įtaką tyrimo rezultatams, Stonkutė et al. (2014) katalogui buvo pritaikyti papildomi apribojimai:

1. Tyrimui atrinkti tik ryškiausi ($V < 24$) objektai patenkantys į $a < 10'$ (čia a – didysis pusašis) dydžio elipsę aplink galaktikos centrą.
2. Centrinėje srityje ($1,6$) esantys Subaru katalogo objektai buvo interaktyviai palyginti su didelės raiškos HST/ACS nuotraukomis (HST programa Nr. 10590), tokiu būdu vizualiai identifikuojant ir atmetant neišskirtas žvaigždes bei fonines galaktikas.
3. Likę objektai buvo apriboti pagal fotometrijos kokybę apibrėžiančius *sharpness* ir χ^2 parametrus.
4. Galiausiai iš katalogo buvo pašalintos besiprojektuojančios MW žvaigždės, kurios $V - I$ vs. $B - V$ diagramoje sudaro akivaizdžią seką, atsiskiriančią nuo Leo A objektų ties $V - I \sim 1,5$ ir $B - V \sim 1,0$ bei gerai atitinkančią didesnio metalingumo ($0,001 \lesssim Z \lesssim 0,015$) populiacijų padėtis diagramoje.

Tiriamame Leo A lauke ($a < 10'$) iš viso pašalinta $\sim 22\%$ Subaru katalogo objektų: $\sim 13\%$ vizualiai identifikuotų objektų, $\sim 6\%$ prasta fotometrijos kokybe pasižyminčių objektų ir $\sim 3\%$ MW žvaigždžių.

2.2 HST/ACS

Populiacijų tyrimui centrinėje Leo A galaktikos srityje buvo panaudotos HST/ACS nuotraukos *F475W* ir *F814W* fotometriniuose juostose, gautos LCID (angl. Local Cosmology from Isolated Dwarfs¹) projekto metu (Cole et al. 2007). Automatiškai apdorotos (atimtas “bias” signalas, atliktos tolygaus lauko bei krūvio pernašos efektyvumo korekcijos) nuotraukos buvo paimtos iš MAST (Mikulski Archive for Space Telescopes²) archyvo.

Žvaigždžių fotometrija buvo atlikta naudojant DOLPHOT 2,0 paketą (Dolphin 2000) ir vadovaujantis HST/ACS moduliui rekomenduojamais apdorojimo žingsniais bei fotometrijos metodika. Pradiniame žvaigždžių fotometrijos kataloge buvo 189 947 objektai, turintys matavimus *F475W* ir *F814W* fotometriniuose juostose. Nežvaigždiniai objektai bei nepatikimi matavimai buvo atmesti vizualiai peržiūrint HST/ACS nuotraukas bei abejose fotometriniuose juostose nustatant *sharpness* parametro apribojimą: $0,2 < sharpness < -0,2$. Papildomai buvo atmesti nuotraukų pakraščiuose (8-ių pikselių pločio srityje) esantys objektai. Po pastarųjų apribojimų kataloge liko 151 146 objektai.

2.3 HST/WFC3

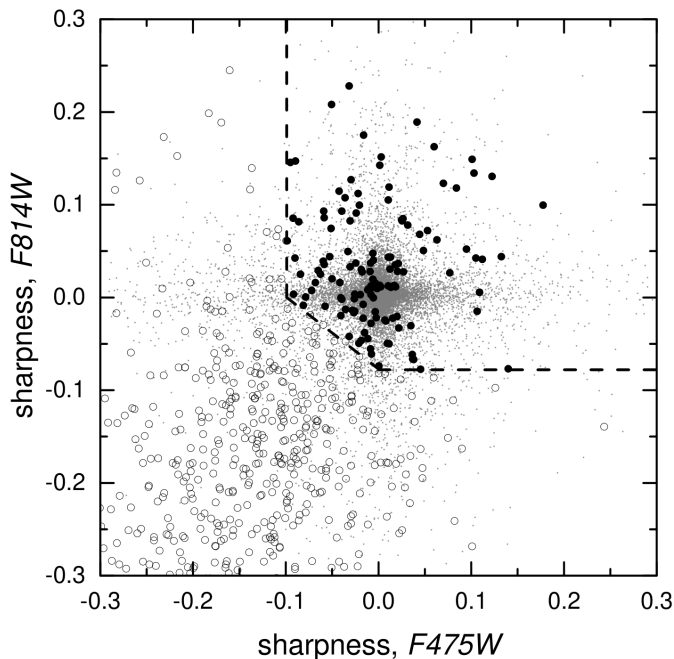
Tyrimui buvo panaudoti HSTPROMO (angl. The High-resolution Space Telescope Proper Motion Collaboration) HST projekto “Mass of the Local Group from Proper Motions of Distant Dwarf Galaxies” (Nr. GO 12273) metu WFC3 kamera gauti nedidelės Leo A pakraštyje esančios srities stebėjimų duomenys. Automatiškai apdorotos (atimtas “bias” signalas, atliktos tolygaus lauko bei krūvio pernašos efektyvumo korekcijos) HST/WFC3 nuotraukos buvo paimtos iš MAST archyvo.

Žvaigždžių fotometrija buvo atlikta naudojant DOLPHOT 2,0 paketą (Dolphin 2000) ir vadovaujantis HST/WFC3 moduliui rekomenduojamais apdorojimo žingsniais bei fotometrijos metodika. Pradiniame kataloge buvo ~60 000 objektų. Siekiant pašalinti nežvaigždinius objektus bei nepatikimus matavimus, buvo atmesti objektai, turintys matavimus tik vienoje iš dviejų fotometrinių juostų arba turintys DOLPHOT fotometrinių ryškio paklaidų vertes didesnes nei 0,3 mag. Papildomai buvo peržiūrėtos HST/WFC3 nuotraukos ir iš katalogo pašalinti likę akivaizdūs nežvaigždiniai objektai. Po pastarųjų apribojimų kataloge liko 756 objektai.

Siekiant užtikrinti patikimesnį reto žvaigždžių lauko diagramų interpretavimą, buvo atliktas dirbtinių žvaigždžių testas (angl. Artificial Star Test, AST), kurio metu buvo sugeneruota 35 000 tolygiai HST/WFC3 lauke pasiskirsčiusių dirbtinių žvaigždžių ($-1 < (F475W - F814W) < 5$ ir $22 < F475W < 32$). Norint iš apriboto 756-ųjų objektų katalogo at-

¹<http://www.iac.es/proyecto/LCID>

²<http://archive.stsci.edu>



2.1 pav. HST/WFC3 stebėtų objektų ir AST žvaigždžių *sharpness* parametų diagrama $F475W$ ir $F814W$ fotometrines juostose. Punktyrinėmis linijomis pažymėtos žvaigždinių objektų (juodi taškai) atrinkimui pasirinktos ribos.

sirinkti patikimus žvaigždinius objektus buvo panaudota AST ir stebėtų objektų $sharpness_{F814W}$ vs. $sharpness_{F457W}$ diagrama. Pernelyg neigiamas *sharpness* vertes ($sharpness_{F457W} > -0.099$; $sharpness_{F814W} > -0.078$) turintys objektai buvo atmesti pagal 2.1 pav. pavaizduotas ribas. Po pastarųjų apribojimų kataloge liko 128 tikėtini žvaigždiniai objektai.

3 skyrius

Senų žvaigždžių populiacijos Leo A galaktikoje

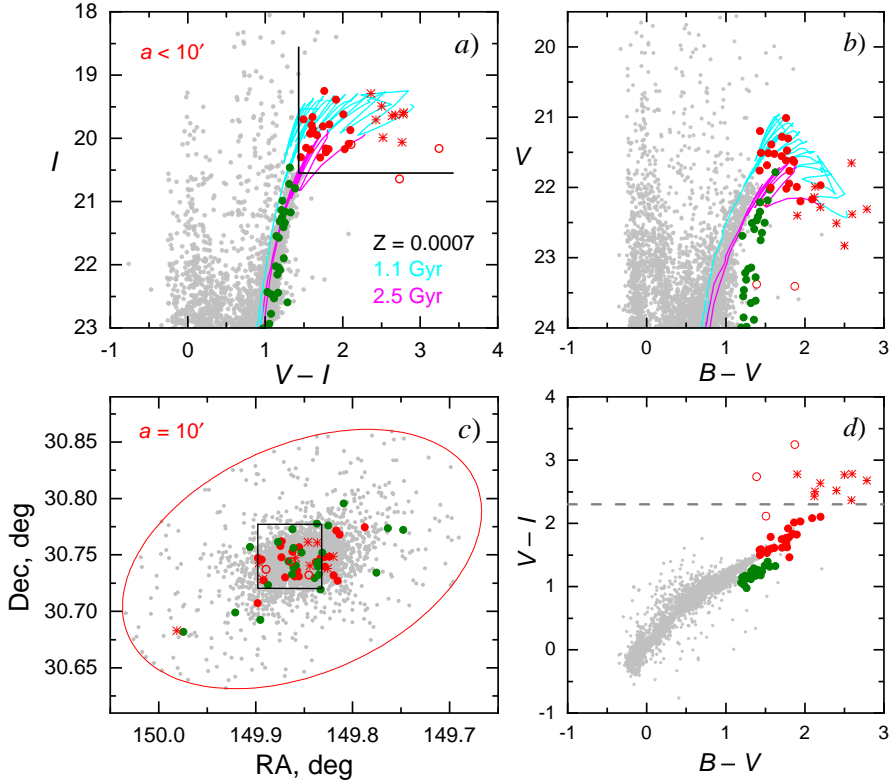
Mažos ir vidutinės masės ($0,5-8 M_{\odot}$) žvaigždžių galaktikose yra žymiai daugiau nei masyvių žvaigždžių, todėl tokios žvaigždės yra itin naudingos tiriant galaktikų evoliuciją. Žvaigždžių, kurių masė $\lesssim 8 M_{\odot}$, branduolyje pasibaigus vandenilio virsmo heliu reakcijoms, šios palieka pagrindinę seką ir pereina į tolimesnę evoliucijos stadiją, kurios metu vandenilio virsmo heliu reakcijos vyksta sluoksnyje aplink helio branduolį. Šiame raidos etape žvaigždžių išorinės sritys smarkiai išsiplėčia ir atvėsta, o branduolys traukiasi ir jo temperatūra kyla. Tokios žvaigždės suformuoja siaurą seką raudonoje spalvos-ryškio diagramos (angl. colour-magnitude diagram, CMD) dalyje, todėl yra atitinkamai vadinamos raudonųjų milžinių seka (angl. red giant branch, RGB). Netoli RGB viršūnės prasidėjus helio virsmo anglimi branduolinėms reakcijoms žvaigždės šiek tiek susitraukia, jų temperatūra padidėja ir jos atsiduria mėlynesnėje CMD dalyje esančioje horizontaliojoje sekoje. Pasibaigus helio virsmo anglimi branduolinėms reakcijoms, žvaigždės pereina į asimptotinės milžinių sekos (angl. asymptotic giant branch, AGB) stadiją, kurios metu vandenilio virsmo heliu ir helio virsmo anglimi reakcijos vyksta sluoksniuose aplink branduolį. Tokių sluoksnių nestabilumas lemia pasikartojantį medžiagos maišymąsi, kurio metu išoriniai žvaigždžių sluoksniai yra praturtinami vidiniuose sluoksniuose susintetintais elementais. Šioje stadijoje žvaigždės taip pat netenka didelės dalies savo masės, kuri žvaigždinių vėjų dėka yra nupučiama į tarpžvaigždinę terpę, taip praturtindama šią naujais cheminiais elementais.

Vėlyvoje stadijoje esančios, termiškai nestabilios AGB žvaigždės suteikia galimybę tirti vidutinio amžiaus ($\sim 1-3$ Gyr) žvaigždžių populiacijas ir geriau suprasti galaktikų struktūrinės savybės. RGB žvaigždės atitinka senąsias ($\sim 2-13$ Gyr) žvaigždžių populiacijas, kurios dažnai pasižymi išplitusiu pasiskirstymu ir dominuoja nykštukinių galaktikų išorinėse dalyse, taigi jos yra puikus įrankis tokių galaktikų išplitimui bei bendrai jų struktūrai tirti (pvz., Vansevičius et al. 2004; Hidalgo et al. 2009; Sanna et al. 2010; Bellazzini et al. 2014). Atsižvelgiant į tai, jog AGB ir RGB žvaigždės vaidina itin svarbų vaidmenį tiriant galaktikų morfologiją ir cheminę evoliuciją, būtent šios žvaigždės buvo panaudotos šiame Leo A galaktikos tyrime, siekiant geriau suprasti jos struktūrinės savybės.

3.1 AGB žvaigždės Leo A galaktikoje

Šviesios AGB žvaigždės buvo apibrėžtos kaip ryškesni ir raudonesni nei RGB viršūnė ($I = 20, 55, V - I = 1, 43$) objektai. Į apibrėžtas ribas, juodomis linijomis pažymėtas 3.1 pav., patenka 32 šviesios AGB žvaigždės (raudoni taškai ir žvaigždutės 3.1 pav.), tačiau prie jų imties taip pat buvo pridėtos dar trys AGB kandidatės (cAGB; raudoni apskritimai 3.1 pav.), kurios yra žinomos Leo A galaktikos kintamosios žvaigždės ir dėl to gali turėti neįprastas padėtis diagramose. 3.1 pav. a ir b diagramose pažymėtos 1,1 Gyr (žydra) ir 2,5 Gyr (purpurinė) amžiaus bei $Z = 0,0007$ metalingumo PARSEC izochronos (Bresnan et al. 2012) apytiksliai nurodo šviesių AGB žvaigždžių amžių.

Palyginus atrinktas AGB žvaigždes su literatūroje pateiktais kintamųjų žvaigždžių katalogais (Snigula 2005; Gössl 2007; Bernard et al. 2013; Boyer et al. 2015; Jones et al. 2018), paaiškėjo, jog 18 AGB žvaigždžių turi juose atitikmenis ir yra klasifikuojamos kaip ilgo periodo kintamosios (taip pat klasifikuojamos ir kintamosios cAGB žvaigždės). Jones et al. (2018) atliko centrinės Leo A dalies (žr. 3.1c pav.) stebėjimus artimojoje infraraudonojoje (angl. near-infrared, NIR) srityje ir aptiko joje 32 žvaigždes su dulkių apvalkais. Toks rezultatas patvirtino, jog vėlyvojoje evoliucijos stadijoje esančios žvaigždės nedidelio metalingumo galaktikose gali suformuoti didelį kiekį dulkių. Šioje disertacijoje tiriamos šviesios AGB žvaigždės yra tokių dulkėtų žvaigždžių atitikmuo, todėl jos buvo sulygtintos su Jones et al. (2018) katalogo objektais, siekiant nustatyti fotometrines šių žvaigždžių savybes optinėse fotometriniuose juostose ir tokių būdų praplėsti Leo A dulkėtų žvaigždžių sąrašą visos galaktikos mastu. Į Jones et al. (2018) stebėtą sritį patenka 23 šiame darbe identifikuotos AGB (3 cAGB ir 20 AGB) žvaigždės ir visos jos turi atitikmenis Jones et al. (2018) kataloge. Iš šių 23-jų žvaigždžių, 6-ios (1 cAGB ir 5 AGB) yra klasifikuojamos kaip dulkes formuojančios žvaigždės pagal Jones et al. (2018) apibrėžimą, jog jų nustatyta dulkių formavimosi sparta (angl. Dust Production Rate, DPR) turėtų viršyti $10^{-11} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$. Penkios iš šešių dulkėtų žvaigždžių centrinėje Leo A dalyje priklauso pastebimai diagramose (3.1 pav.) išsiskiriančiai 11-os žvaigždžių grupei ties $V - I > 2, 3$. Tikėtina, jog visos šiai grupei priklausančios žvaigždės turi dulkių apvalkus (flag = 1 3.1 lentelėje).



3.1 pav. Išvalyto Subaru/Suprime-Cam žvaigždžių fotometrijos katalogo diagramos. a) I vs. $V - I$ diagrama. Raudonais simboliais pažymėtos AGB žvaigždės (ribos, atskiriančios šviesias AGB žvaigždes, pažymėtos juodomis linijomis): taškai – AGB žvaigždės; žvaigždutės – AGB žvaigždės su dulkių apvalkais; apskritimai – AGB kandidatės (cAGB). Žaliais taškais pažymėtos anomaliios RGB (pRGB) žvaigždės. Pilkais taškais pažymėti kiti išvalyto katalogo objektai. Spalvos ir simboliai yra vienodi visose diagramose. a) ir b) diagramose yra parodytos PARSEC izochronos (Bressan et al. 2012), atitinkančios 1,1 Gyr (žydra) ir 2,5 Gyr (purpurinė) amžius bei $Z = 0,0007$ metalingumą. Izochronos yra pakoreguotos, atsižvelgiant į Leo A atstumo modulį, $(m - M)_0 = 24,58$ (žiūrėti 3 skyrių), ir MW ekstinkciją Leo A kryptimi, $A_B = 0,075$, $A_V = 0,057$ ir $A_I = 0,031$ (Schlafly & Finkbeiner 2011). b) V vs. $B - V$ diagrama. c) objektų, esančių $a = 10'$ elipsėje ($b/a = 0,6$; P.A. = 114°) aplink Leo A galaktikos centrą, erdvinis pasiskirstymas. Juodu kvadratu ($3,4 \times 3,4$) pažymėta Jones et al. (2018) atliktų NIR stebėjimų sritis. d) $V - I$ vs. $B - V$ diagrama. Punktyrine linija pažymėta riba ($V - I = 2,3$), aukščiau kurios esančios AGB ir cAGB žvaigždės galimai turi dulkių apvalkus.

3.1 lentelė. AGB žvaigždės Leo A galaktikoje.

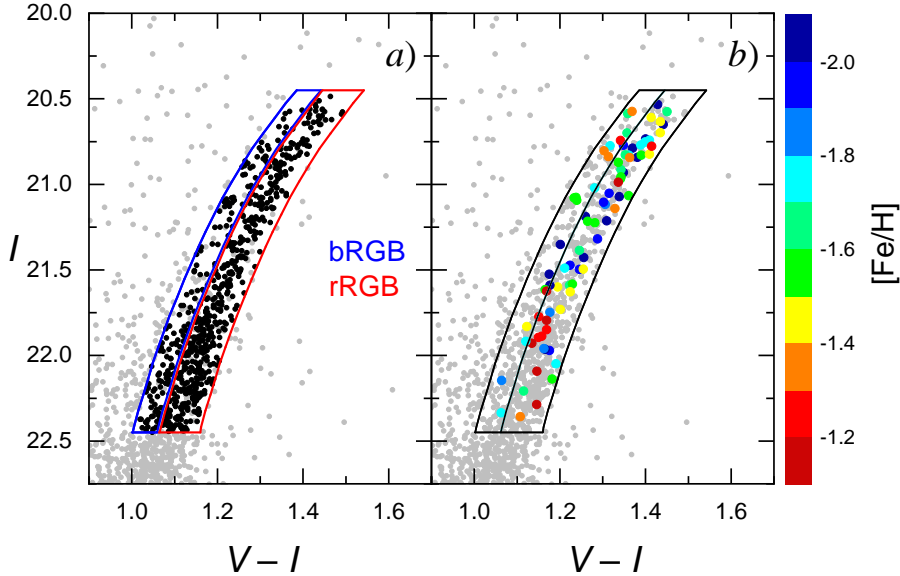
ID	RA(J2000)	Dec(J2000)	B	V	I	R	$H\alpha$	DPR	flag
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
AGB01	149,7874	30,7744	23,575	22,006	20,222	21,071	21,148	–	0
AGB02	149,8133	30,7679	23,251	21,476	19,857	20,549	20,630	–	0
AGB03	149,8155	30,7269	23,894	21,994	20,174	20,909	20,993	–	0
AGB04	149,8168	30,7715	22,991	21,279	19,668	20,276	20,343	–	0
AGB05	149,8195	30,7319	23,788	22,020	20,308	20,934	21,011	–	0
AGB06	149,8200	30,7485	24,119	21,990	19,490	20,678	20,836	–	1
AGB07	149,8240	30,7483	23,193	21,761	20,184	20,880	20,928	–	0
AGB08	149,8255	30,7379	24,977	22,380	19,595	20,720	20,853	–	1
AGB09	149,8285	30,7396	23,750	21,946	20,166	20,693	20,755	–	0
AGB10	149,8288	30,7480	22,782	21,017	19,252	20,158	20,242	–	0
AGB11	149,8331	30,7473	23,504	21,638	19,627	20,721	20,798	4,2E-11	0
AGB12	149,8364	30,7608	24,256	22,138	19,709	20,678	20,831	6,4E-12	1
AGB13	149,8377	30,7437	24,170	21,971	19,871	20,787	20,850	2,8E-12	0
AGB14	149,8440	30,7405	24,478	22,281	19,646	20,784	20,921	1,0E-10	1
AGB15	149,8460	30,7614	25,094	22,309	19,630	20,602	20,733	6,1E-11	1
AGB16	149,8551	30,7566	23,096	21,307	19,392	20,015	20,096	4,0E-12	0
AGB17	149,8554	30,7310	22,953	21,508	19,923	20,551	20,608	4,5E-13	0
AGB18	149,8572	30,7359	24,149	22,202	20,174	21,122	21,236	–	0
AGB19	149,8589	30,7476	24,306	22,401	19,621	20,823	20,965	2,1E-10	1
AGB20	149,8596	30,7310	23,267	21,558	19,812	20,647	20,720	–	0
AGB21	149,8619	30,7527	24,264	22,169	20,089	21,182	21,295	2,1E-12	0
AGB22	149,8696	30,7300	23,139	21,522	19,911	20,640	20,707	4,0E-13	0
AGB23	149,8731	30,7621	22,633	21,198	19,702	20,342	20,392	5,9E-13	0
AGB24	149,8732	30,7479	23,208	21,686	20,155	20,871	20,940	3,2E-13	0
AGB25	149,8744	30,7578	23,385	21,619	19,951	20,672	20,750	2,4E-12	0
AGB26	149,8915	30,7274	22,966	21,388	19,791	20,482	20,546	–	0
AGB27	149,8928	30,7286	25,329	22,829	20,064	19,937	19,994	1,3E-09	1
AGB28	149,8937	30,7456	23,572	21,765	20,303	20,955	21,024	3,3E-13	0
AGB29	149,8965	30,7431	24,908	22,508	19,991	21,326	21,457	6,0E-12	1
AGB30	149,8974	30,7473	23,462	21,613	19,784	20,474	20,547	3,0E-12	0
AGB31	149,8977	30,7072	23,054	21,516	19,932	20,617	20,673	–	0
AGB32	149,9815	30,6830	24,246	21,654	19,290	20,251	20,360	–	1
cAGB01	149,8450	30,7320	23,718	22,209	20,098	21,190	21,094	1,8E-12	0
cAGB02	149,8633	30,7440	24,769	23,379	20,644	22,918	22,875	1,2E-09	1
cAGB03	149,8891	30,7372	25,286	23,411	20,166	22,217	22,009	4,5E-12	1

Pastabos. (1) ID yra identifikacinis numeris (AGB/cAGB); (2) ir (3) yra pusiaujiinės koordinatės (atitinkamai, rektascencija ir deklinacija); (4)-(8) yra Subaru/Suprime-Cam ryškiai B , V , I , R ir $H\alpha$ fotometrinėse juostose; (9) DPR (angl. Dust Production Rate; [$M_{\odot} \text{yr}^{-1}$]) yra dulkių gaminimosi sparta (Jones et al. 2018); (10) flag: 0 – objektai be dulkių; 1 – objektai su galimais dulkių apvalkais (sprendžiant pagal AGB žvaigždžių padėtis CMD; $V - I > 2,3$).

3.2 RGB žvaigždės Leo A galaktikoje

RGB žvaigždžių imtis buvo parinkta pasinaudojant I vs. $V - I$ diagrama (3.2 pav.) ir apima objektus dviejų ryškių intervale y ašies kryptimi, pradedant nuo RGB viršūnės (apatinė riba parinkta siekiant apriboti imties užterštumą raudonosios sankaupos žvaigždėmis ir foninėmis galaktikomis). RGB imtis buvo papildomai apribota pagal Q_{BVI} parametą ($Q_{BVI} = (B - V) - (V - I) \cdot (E_{B-V}/E_{V-I})$, čia $E_{B-V}/E_{V-I} = 0.72$) ir $H\alpha - R$ spalvos rodiklį, taip atmetant $H\alpha$ emisija ar neįprasta chemine sudėtimi pasižyminčius objektus. Pritaikyti kriterijai $(24, 73 - I)/9, 52 < Q_{BVI} < (21, 83 - I)/9, 52$ ir $|H\alpha - R| > 0, 05$ sumažino RGB žvaigždžių skaičių nuo 726 iki 648.

3.2.1 Leo A galaktikos atstumas



3.2 pav. a) išvalytos RGB žvaigždžių imties (juodi taškai) I vs. $V - I$ diagrama. Mėlynai ir raudonai, atitinkamai, yra pažymėtos bRGB ir rRGB žvaigždžių imčių ribos. b) RGB žvaigždės, turinčios atitikmenis Kirby et al. (2017) spektroskopinių matavimų kataloge (žvaigždės užkoduotos spalvomis pagal jų $[Fe/H]$ vertes).

Turimi aukštos kokybės fotometriniai duomenys suteikė galimybę įvertinti atstumą iki Leo A galaktikos. Atstumo nustatymui pritaikytas Rizzi et al. (2007) aprašytas RGB viršūnės (angl. Tip of the RGB, TRGB) metodas, pasinaudojant Bellazzini et al. (2004) pateiktu TRGB M_I kalibravimu pagal $[M/H]$. Remiantis Kirby et al. (2017) įvertintu Leo A RGB žvaigždžių metalingumo intervalu, $[Fe/H] \sim -1, 3 \div -1, 7$, ir α elementų gausa, $[\alpha/Fe] = 0, 04 \pm 0, 05$, nustatytas absoliutinis RGB viršūnės ryškis yra $M_I = -4, 06 \pm 0, 03$. Pagal viršutinę RGB dalį ($I \lesssim 21$) įvertinti TRGB ryškis ir spalvos rodiklis, atitinka-

mai, yra $I = 20,55 \pm 0,01$ ir $V - I = 1,43 \pm 0,03$, taigi įskaičius $A_I = 0,031$ ekstinkciją (Schlafly & Finkbeiner 2011), Leo A galaktikos atstumo modulis yra $(m - M)_0 = 24,58 \pm 0,04$ (824 ± 15 kpc).

Įvertinas Leo A atstumo modulis gerai atitinka ankstesnius TRGB metodu gautus įverčius: $24,59 \pm 0,06$ (pataisyta laikant, kad $M_I = -4,06$; Dolphin et al. 2003) ir $24,57 \pm 0,13$ (Bernard et al. 2013). Gautoji vertė taip pat gerai sutampa ir su įverčiu, nustatytu pagal cefeides: $24,59 \pm 0,03$ (Tammann et al. 2011). Šiame darbe gautas atstumo modulis taip pat pakankamai gerai atitinka ir kitus RR Lyr žvaigždėmis ($24,51 \pm 0,12$, Dolphin et al. 2002; $24,48 \pm 0,12$, Bernard et al. 2013) ir cefeidėmis ($24,70 \pm 0,10$, Bernard et al. 2013) paremtus įverčius.

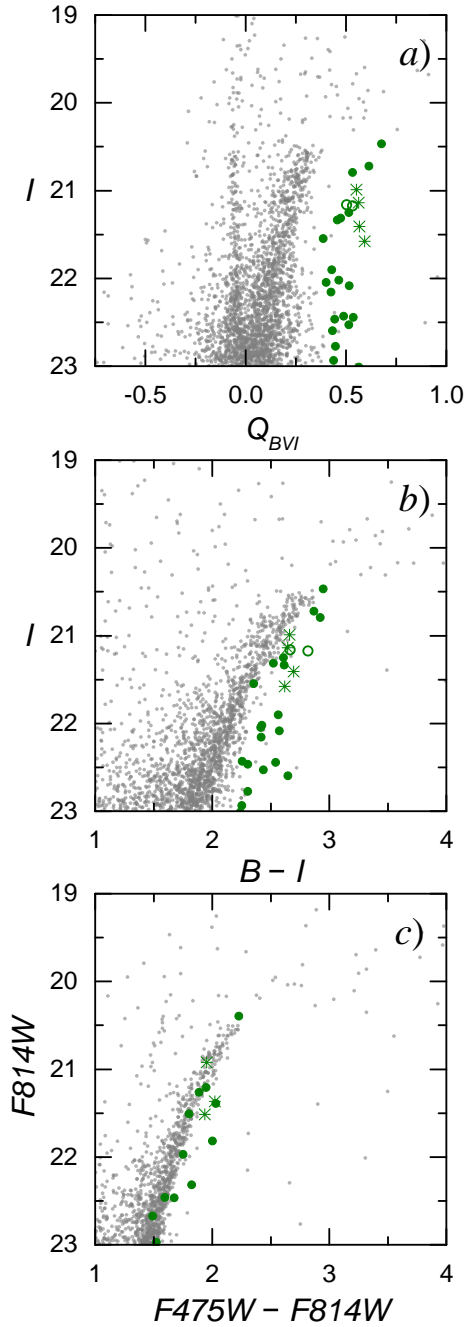
3.2.2 Anomali RGB žvaigždžių seka

3.2 lentelė. Anomalios RGB žvaigždės Leo A galaktikoje.

ID	RA(J2000)	Dec(J2000)	B	V	I	R	$H\alpha$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
pRGB01	149,7478	30,7721	23,995	22,504	21,175	21,688	21,707
pRGB02	149,7635	30,7736	25,245	23,885	22,598	23,169	23,198
pRGB03	149,7754	30,7340	23,718	22,185	20,796	21,333	21,354
pRGB04	149,8091	30,7955	24,692	23,463	22,435	22,842	22,881
pRGB05	149,8251	30,7760	23,592	22,033	20,723	21,223	21,259
pRGB06	149,8313	30,7519	24,969	23,650	22,532	23,007	23,022
pRGB07	149,8330	30,7195	24,465	23,220	22,049	22,520	22,498
pRGB08	149,8347	30,7325	25,253	23,987	23,013	23,398	23,439
pRGB09	149,8349	30,7436	24,989	23,613	22,445	22,908	22,888
pRGB10	149,8358	30,7396	24,448	23,163	22,024	22,485	22,517
pRGB11	149,8368	30,7776	23,650	22,215	20,989	21,480	21,505
pRGB12	149,8369	30,7426	23,841	22,508	21,317	21,799	21,806
pRGB13	149,8393	30,7293	23,955	22,594	21,338	21,837	21,854
pRGB14	149,8525	30,7520	24,773	23,551	22,469	22,895	22,879
pRGB15	149,8585	30,7406	23,417	21,788	20,467	20,963	20,964
pRGB16	149,8607	30,7561	24,467	23,144	21,902	22,382	22,397
pRGB17	149,8609	30,7387	25,079	23,854	22,776	23,237	23,248
pRGB18	149,8619	30,7726	24,196	22,755	21,578	22,032	22,073
pRGB19	149,8624	30,7326	23,903	22,692	21,549	22,030	22,043
pRGB20	149,8659	30,7443	23,864	22,472	21,253	21,759	21,770
pRGB21	149,8766	30,7614	24,105	22,647	21,410	21,905	21,912
pRGB22	149,8872	30,7233	25,193	23,994	22,939	23,372	23,393
pRGB23	149,8950	30,6924	24,577	23,317	22,158	22,644	22,663
pRGB24	149,9059	30,7570	23,828	22,419	21,162	21,667	21,678
pRGB25	149,9209	30,6988	23,782	22,347	21,136	21,651	21,687
pRGB26	149,9743	30,6818	24,660	23,281	22,086	22,509	22,517

Pastabos. (1) ID yra žvaigždės identifikacinis numeris; (2) ir (3) yra pusiaujinės koordinatės (atitinkamai, rektascencija ir deklinacija); (4)-(8) yra Subaru/Suprime-Cam ryškiai B , V , I , R ir $H\alpha$ fotometriniuose juostose;

3.3a pav. pavaizduotoje I vs. Q_{BVI} diagramoje matyti aiškiai nuo kitų RGB žvaigždžių atsiskirianti 26-ųjų žvaigždžių seka (žali simboliai). Ši neįprasta seka (angl. peculiar RGB, pRGB) nuo kitų RGB žvaigždžių atsiskiria įvairiose



3.3 pav. Anomalių RGB žvaigždžių spalvos-ryškio diagramos. Žaliais simboliais pažymėtos pRGB žvaigždės: apskritimai – didesnio nei vidutinis metalingumo žvaigždės (Kirby et al. 2017); žvaigždutės – CN sugertimi pasižymintys objektai (Kirby et al. 2017); taškai – žvaigždės, neturinčios spektroskopinių matavimų. a) ir b) išvalyto Subaru/Suprime-Cam katalogo (Stonkutė et al. 2014) diagramos. c) HST/ACS diagrama (Stonkutė et al. 2018).

spalvos-ryškio diagramose (pvz., 3.1 ir 3.3 pav.), tačiau visi joje esantys objektai projektuojasi ant Leo A (žali taškai 3.1c pav.), todėl, tikėtina, jog visi jie priklauso šiai galaktikai. Be to, pRGB žvaigždės neturi artimų kaimyninių objektų, taigi neįprasta padėtis diagramose, tikriausiai, yra jų fizinių ypatybių, o ne fotometrijos netikslumų pasekmė. 3.2 lentelėje yra pateiktas pRGB žvaigždžių katalogas iki $I = 23$ (ties silpnesniais ryškiais išaugančios fotometrinės paklaidos apunkina pRGB ir RGB žvaigždžių atskyrimą).

3.3 pav. pateiktos pRGB (žali simboliai) diagramos Subaru/Suprime-Cam (a ir b; Stonkutė et al. 2014) ir HST/ACS (c) fotometrijos atvejais. Žaliais taškais yra pažymėtos spektroskopinių matavimų neturinčios žvaigždės, žali apskritimai ir žvaigždutės rodo spektroskopiškai patvirtintas Leo A galaktikos žvaigždes (Kirby et al. 2017). Apskritimais pažymėti objektai turi didesnę metalingumą nei nustatyta vidutinė vertė RGB žvaigždėms, o žvaigždutės atitinka objektus, kurių spektruose yra CN sugerties juostos.

Neįprastos pRGB žvaigždės buvo palygintos su Kirby et al. (2017) spektroskopinių stebėjimų duomenimis, siekiant suprasti jų kilmę. Kirby et al. (2017) Leo A lauke DEIMOS (angl. Deep Imaging Multiobject Spectrograph; Faber et al. 2003) spektrografu išmatavo 168 objektų spektrus, iš šių objektų 127 (daugiausiai RGB žvaigždės) priklauso Leo A galaktikai. Spektroskopiniame kataloge 6-ios iš 26-ių pRGB žvaigždžių turi atitikmenis ir visos 6-ios žvaigždės pasižymi neįprastomis savybėmis: pRGB01 ir pRGB24 žvaigždėms (žali apskritimai 3.3 pav.) būdingas didesnis (atitinkamai, $[Fe/H] = -0.88 \pm 0.11$ ir -0.57 ± 0.11) nei vidutinis RGB metalingumas ($-1.67_{-0.08}^{+0.09}$), o pRGB11, pRGB18, pRGB21, ir pRGB25 (žalios žvaigždutės 3.3 pav.) žvaigždžių spektruose aptikta CN sugertis. Įdomu tai, jog iš visų 168 Kirby et al. (2017) stebėtų objektų tik 6 pasižymi CN sugertimi ir 4 iš jų priklauso pRGB (dar vienas objektas priklauso įprastai RGB sekai, o kitas yra klasifikuojamas kaip nepriklausantis Leo A). Toks rezultatas gali reikšti, jog pRGB seka yra sudaryta iš anglimi praturtintų žvaigždžių.

Perėjimas į anglimi praturtintą atmosferą įprastai vyksta žvaigždėms pasiekus nestabilią AGB evoliucinę fazę, kurioje vyksta terminės pulsacijos (sritis virš RGB viršūnės spalvos-ryškio diagramoje), tačiau įmanomi ir kitokie scenarijai. Hamren et al. (2016) identifikavo 41-ą anglimi praturtintą žvaigždę M31 galaktikos halo srityje bei jos palydovinėse galaktikose, bet panašiai į Leo A pRGB žvaigždes, didžioji dalis neryškių šių autorių tirtų žvaigždžių turi mėlynesnes $V - I$ spalvos rodiklio vertes, lyginant su anglimi praturtintomis nestabiliomis AGB žvaigždėmis. Hamren et al. (2016) teigia, jog yra tikimybė, kad neįprasti objektai yra išoriškai anglimi praturtintos žvaigždės (t. y., artimoje dvinarėje sistemoje esančios RGB žvaigždės, kurios buvo praturtintos anglimi dėl medžiagos akrecijos ant jų paviršiaus iš anglimi praturtintos AGB stadijoje esančios kaimyninės žvaigždės; (Izzard & Tout 2004)). Tikėtina, jog ir pRGB žvaigždės Leo A galaktikoje gali būti išoriškai anglimi praturtintos

žvaigždės, tačiau tokiam teiginiui patvirtinti reikalingi detalūs visų pRGB sekos žvaigždžių spektroskopiniai tyrimai.

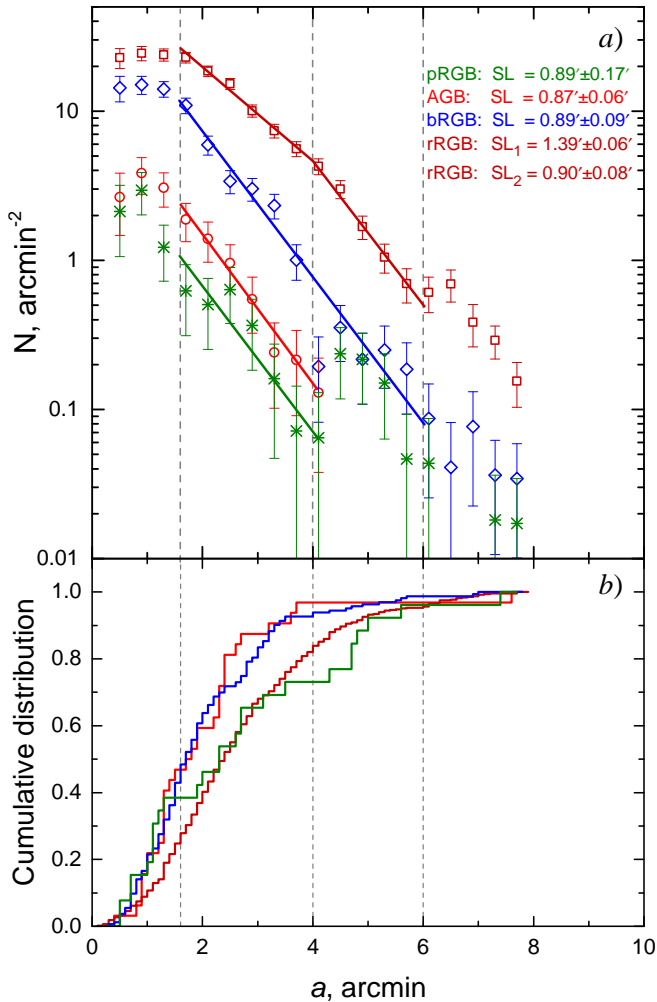
3.3 Radialinis AGB ir RGB žvaigždžių pasiskirstymas

Atsižvelgiant į tai, jog AGB žvaigždės atitinka vidutinio, o RGB seno amžiaus populiacijas jų radialinių pasiskirstymų tyrimas gali suteikti naudingos informacijos apie galaktikos struktūrines savybes. Leo A galaktikos RGB žvaigždėms būdingas pastebimai skirtingo tankio pasiskirstymas x ašies kryptimi I vs. $V-I$ diagramoje, todėl siekiant ištirti galimus populiacijų skirtumus, RGB buvo padalinta į mėlyną (angl. blue RGB, bRGB) ir raudoną (angl. red RGB, rRGB) dalis taip, kaip parodyta (3.2 pav. RGB žvaigždžių skaičius bRGB imtyje yra maždaug tris kartus mažesnis nei rRGB ($N_{\text{bRGB}} / N_{\text{rRGB}} = 0,34$).

Siekiant gauti papildomos informacijos apie galimus bRGB ir rRGB skirtumus, RGB žvaigždės buvo sulygintos su Kirby et al. (2017) spektroskopinių matavimų katalogu. 3.2b pav. parodytos pagal metalingumą spalvomis užkoduotos RGB žvaigždės, turinčios atitikmenis Kirby et al. (2017) kataloge. Pastarojoje diagramoje matyti, jog nėra akivaizdžių metalingumo skirtumų tarp bRGB ir rRGB žvaigždžių, tačiau galima išvelti šiek tiek didesnę mažo metalingumo ($[Fe/H] \lesssim -1,8$) žvaigždžių skaičių rRGB imtyje. Kirby et al. (2017) tyrimų rezultatai parodė, jog Leo A galaktikai yra būdingas palyginti plokščias amžiaus-metalingumo sąryšis, kuris tapo labiau išreikštas tik per pastaruosius 5 Gyr. Skillman et al. (2014) taip pat parodė, jog Leo A metalingumas pradėjo palaipsniui didėti prieš ~ 5 Gyr, kai šioje galaktikoje suaktyvėjo žvaigždėdaros procesai (Cole et al. 2007). Tokie rezultatai gali reikšti, kad amžius yra dominuojantis veiksnys, lemiantis RGB sekos išplitimą populiacijoms, kurių amžius yra $\gtrsim 5$ Gyr, o didesnis metalingumas gali papildomai paraudoninti jaunesnes ($\sim 2-5$ Gyr) žvaigždes. 3.2b pav. matomas įvairių metalingumų populiacijų persidengimas yra tokio amžiaus-metalingumo išsigimimo pasekmė.

Nepaisant to, jog tarp bRGB ir rRGB žvaigždžių nėra žymių metalingumo skirtumų, jų erdvinis pasiskirstymas pastebimai skiriasi: bRGB žvaigždės yra susitelkusios centrinėje Leo A dalyje (didžioji jų dalis telkiasi $a = 3,5$ dydžio elipsinėje srityje, kuri atitinka Leo A Holmberg spindulį¹; Mateo 1998), o rRGB žvaigždžių pasiskirstymas yra labiau išplitęs. Taibi et al. (2018) Cetus nykštukinėje sferoidinėje galaktikoje aptiko priešingą sąryšį: raudonos RGB žvaigždės šioje galaktikoje koncentruojasi į centrą labiau nei mėlynos. Tačiau tokį pasiskirstymą galima paaiškinti kitokia Cetus galaktikos žvaigždėdaros istorija, kadangi didžioji dalis žvaigždžių joje susiformavo ankstyvojoje galak-

¹Holmberg spindulys atitinka sritį, kurioje paviršinis šviesis B fotometrinėje juostoje yra lygus $26,5 \text{ mag arcsec}^{-2}$



3.4 pav. a) elipsiniuose žieduose įvertinto paviršinio žvaigždžių tankio profiliai: RGB (bRGB – mėlini rombais, rRGB – tamsiai raudoni kvadratai), AGB (raudoni apskritimai) ir pRGB (žalios žvaigždutės). Atitinkamomis spalvomis pavaizduotos tam tikras profilių dalis aproksimuojančios tiesės, kurių skalės ilgiai (SL) yra nurodyti legendoje. Vertikaliomis brūkšninėmis linijomis pažymėta: tankaus centrinio lauko riba ($a = 1,6'$; fotometrijos pilnumas ties $I = 22,5$ yra $\sim 80\%$), šviesių AGB žvaigždžių pasiskirstymo riba ($a \sim 4'$) ir rRGB profilyje matomo lūžio padėtis ($a \sim 6'$). b) sunormuoti AGB, pRGB, bRGB ir rRGB kumuliatyvūs pasiskirstymai (spalvos atitinka žymėjimus a diagramoje).

tikos evoliucijos stadijoje, o pastaruosius ~ 8 Gyr žvaigždėdaros procesai beveik nevyko. Tai reiškia, jog Cetus RGB sekos išplitimą pagrindė lemia metalingumas ir seka turi aiškų spalvos-metalingumo sąryšį: raudonos žvaigždės yra metalingos, o mėlynos – nemetalingos. Priešingai pastarajam scenarijui, Leo A galaktikoje žvaigždėdara vyko nuo jos ankstyvų evoliucijos stadijų iki dabar,

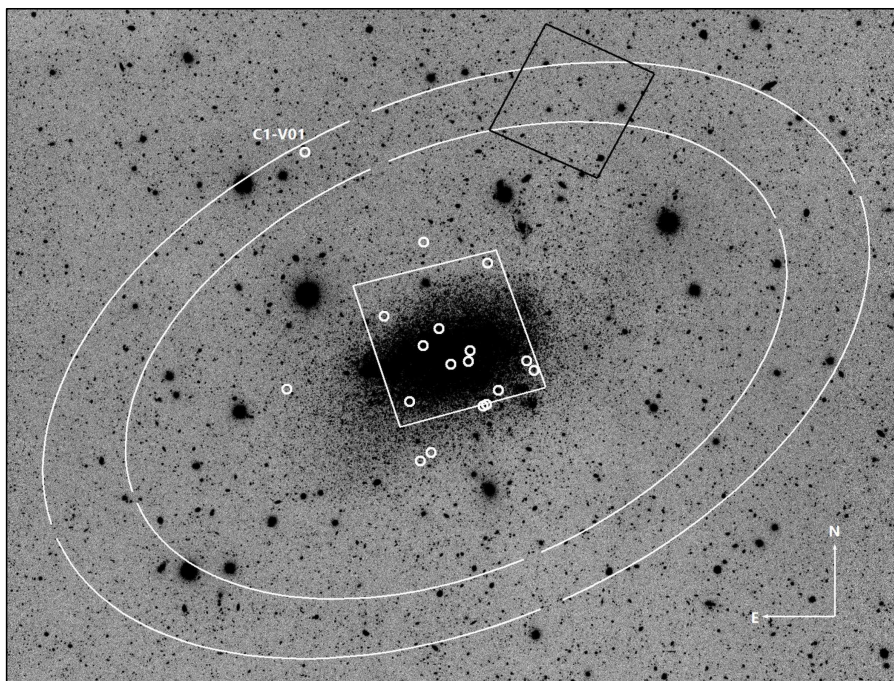
tad platūs amžių ir metalingumų intervalai lėmė skirtingų RGB žvaigždžių populiacijų persidengimą spalvos-ryškio diagramoje. Šie rezultatai parodo galimus skirtumus tarp skirtingų tipų nykštukinių galaktikų, t. y., tarp sferoidinių (Cetus) ir netaisyklingų (Leo A) nykštukinių galaktikų.

3.4 pav. pateiktos Leo A AGB ir RGB žvaigždžių paviršinio žvaigždžių tankio profilių (a) bei kumuliatyvių pasiskirstymų (b) diagramos. Paviršinis žvaigždžių tankis aprašomas funkcija $N = N_0 \exp(-a/SL)$, kur SL – skalės ilgis (angl. Scale Length), o a – atstumas nuo galaktikos centro išilgai didžiojo pusašio. Didesnis mėlynų RGB žvaigždžių susikoncentravimas į galaktikos centrą yra akivaizdžiai matomas iš gan stataus bRGB (mėlyni simboliai) radialinio profilio, kurio skalės ilgis yra $0,89 \pm 0,09$. Vidinėje galaktikos dalyje ($a < 4'$) tolygesnį pasiskirstymą turinčių rRGB žvaigždžių (tamsiai raudoni simboliai) profilis yra plokštesnis ($SL = 1,39 \pm 0,06$). Šviesios AGB žvaigždės (raudoni simboliai; $SL = 0,87 \pm 0,06$) pasižymi labai panašiu į bRGB pasiskirstymu, o tai gali reikšti, jog AGB ir bRGB žvaigždės priklauso tos pačios kartos populiacijai. Kumuliatyvūs pasiskirstymai (3.4b pav.) taip pat rodo panašų AGB ir bRGB žvaigždžių pasiskirstymą, kadangi 90% abiem grupėms priklausančių žvaigždžių yra susitelkusios vidinėje srityje ($a < 3,5$), o labiau pasklidusios pRGB ir rRGB populiacijos 90% ribą pasiekia tik ties $a \sim 5'$. Pastebimais skirtumais pasižyminčios mėlynesnės ir raudonesnės žvaigždžių populiacijos rodo, jog Leo A galimai yra būdingas žvaigždėdaros procesų scenarijus, kai žvaigždėdara vyksta iš išorės į vidų (angl. outside-in; Bernard et al. 2007; Zhang et al. 2012; Hidalgo et al. 2013; Benítez-Llambay et al. 2016).

3.4 Žvaigždžių populiacijos Leo A pakraštyje

Siekiant ištirti Leo A galaktikos išorinę sritį ir įvertinti galimą jos išplitimo ribą, buvo pasinaudota archyviniais HST/WFC3 duomenimis (žr. 2 skyrių). Gilesnė HST/WFC3 fotometrija, lyginant su antžeminiais Subaru/Suprime-Cam stebėjimais, suteikė galimybę ištirti Leo A pakraštyje esančias senų žvaigždžių populiacijas iki $F814W < 27$ ryškio ribos. 3.5 pav. juodai pažymėtas HST/WFC3 stebėjimų laukas kartu su jo nuotolį nuo galaktikos centro parodančiomis elipsėmis: $a = 8'$ ir $10'$ ($b/a = 0,6$; P.A. = 114°). Papildomai 3.5 pav. baltai pažymėtos HST/ACS stebėjimų lauko centrinėje galaktikos dalyje bei Dolphin et al. (2002) ir Bernard et al. (2013) atrastų RR Lyr žvaigždžių padėtys.

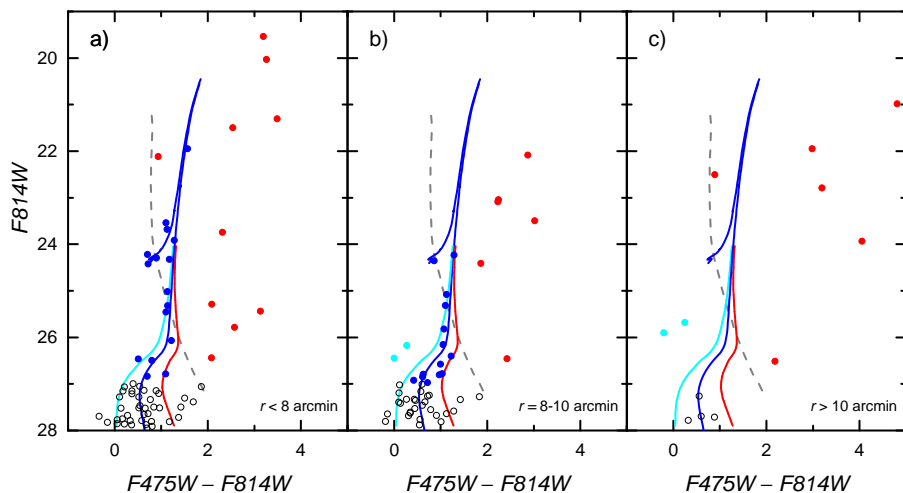
3.6 pav. pateiktose diagramose pavaizduoti žvaigždiniai objektai (žr. 2 skyrių), esantys skirtinguose nuotoliuose nuo galaktikos centro: $r < 8'$ (a), $8' < r < 10'$ (b) ir $r > 10'$ (c). Visose diagramose pažymėta 7 Gyr amžiaus ir $Z = 0,0001$ metalingumo izochrona (mėlyna linija), kurios padėtis buvo pako-reguota įskaitant Leo A atstumo modulio vertę (24,51; Dolphin et al. 2002) bei MW ekstinkciją ($A_{F475W} = 0,067$ ir $A_{F814W} = 0,032$; Schlafly & Finkbeiner 2011). Taip pat visose diagramose pažymėtos AST žvaigždžių fotometrinių



3.5 pav. Leo A nuotrauka Subaru/Suprime-Cam *B* fotometriniėje juostoje (Stonkutė et al. 2014). Baltai pažymėtų elipsių ($b/a = 0,6$; P.A. = 114°) didieji pusašiai, a , yra $8'$ ir $10'$. Nuotraukoje pažymėti HST ACS (baltas) ir WFC3 (juodas) stebėjimų laukus atitinkantys kontūrai (HST programa Nr. 12273: https://archive.stsci.edu/proposal_search.php?mission=hst&id=12273) bei Dolphin et al. (2002) ir Bernard et al. (2013) atrastos RR Lyr žvaigždės (balti apskritimai). Šiaurė yra nukreipta į viršų, o rytai – į kairę.

matavimų sklaidos ribos (žydra ir raudona linijos) bei Besançon modeliu (Robin et al. 2003) sugeneruotų MW žvaigždžių pasiskirstymo apatinė riba (pilka punktyrinė linija). Atsižvelgiant į Besançon modelio rezultatus, visi objektai, kurių $F475W - F814W \sim 2,0$, yra laikomi MW žvaigždėmis (raudoni taškai). Tikėtina, jog į gana siaurą seką aplink diagramose pavaizduotą izochroną susitelkę objektai (mėlyni taškai) priklauso Leo A. Keletas atsiskyrusių, žydra spalva pažymėtų taškų, galimai rodo tolimas mėlynas kompaktiškas galaktikas arba MW baltąsias nykštukes. Dėl didesnės fotometrinių matavimų sklaidos objektai, kurių $F814W > 27$, nebuvo įtraukti į analizę.

Leo A pakraštyje esančių žvaigždžių amžiui įvertinti buvo panaudotos PARSEC izochronos (v1,2S; Bressan et al. 2012), kurių metalingumo ribos: $Z = 0,0001-0,001$. Spalvos-ryškio diagramų analizė parodė, jog geriausiai senas populiacijas atitinka mažiausio metalingumo ($Z = 0,0001$) izochronos, o jų amžius yra >5 Gyr. Šių žvaigždžių radialinio pasiskirstymo tyrimas (mėlyni taškai 3.6 pav.) atskleidė, jog Leo A yra mažiausiai $a = 10'$ dydžio. Šis rezul-



3.6 pav. Žvaigždinių objektų HST/WFC3 laukelyje spalvos-ryškio diagramos. Visose diagramose pavaizduota: 7 Gyr ir $Z = 0,0001$ izochrona (mėlyna linija), MW besiprojektuojančių žvaigždžių riba, nustatyta iš Besançon modelių (pilka punktyrinė linija) bei AST žvaigždžių fotometrinių matavimų sklaidos ribos (žydra ir raudona linijos). Diagramose pavaizduoti skirtingais atstumais nuo galaktikos centro esantys objektai: $r < 8'$ (a); $8' < r < 10'$ (b); $r > 10'$ (c). Spalvotais taškais pažymėti žvaigždiniai objektai, kurie: yra arti pavaizduotos izochronos ir tikėtina, jog priklauso Leo A (mėlyni); yra toli nuo izochronos ir yra srityje, kurioje aptinkamos MW žvaigždės (raudoni); yra toli nuo izochronos ir yra už MW žvaigždžių pasiskirstymo ribos (žydri). Pilkais apskritimais pažymėti neryškūs objektai, kurie nebuvo įtraukti į analizę.

tatas gerai sutampa su Dolphin et al. (2002) aptiktos RR Lyr C1-V01 žvaigždės, esančios netoli $a = 10'$ elipsės (3.5 pav.), rodomu galimu galaktikos dydžiu.

3.5 Apibendrinimas

Senų žvaigždžių populiacijų Leo A galaktikoje tyrimas buvo atliktas pasinaudojant Subaru Suprime-Cam ir HST ACS/WFC3 daugiaspalvės fotometrijos duomenimis. Tyrimo metu buvo identifikuota anomali RGB (pRGB) seka sudaryta iš 26-ių spalvos-ryškio diagramose aiškiai atsiskiriančių žvaigždžių. Palyginus pastarąsias su spektroskopiniais duomenimis iš Kirby et al. (2017), nustatyta, jog 6-ios iš 26-ių pRGB žvaigždžių turi tokius matavimus ir visos jos pasižymi išskirtinėmis savybėmis (CN sugertimi arba didesniu metalingumu), kurios rodo, jog pRGB seką galima sudaro anglimi praturtintos arba kitomis neįprastomis cheminės sudėties savybėmis pasižymintios žvaigždės.

Leo A taip pat buvo identifikuotos 32 šviesios AGB žvaigždės bei 3 AGB kandidatės (cAGB). Siekiant nustatyti dulkėtoms žvaigždėms būdingas fotometrines savybes, AGB žvaigždės buvo palygintos su Jones et al. (2018) atliktais centrinės galaktikos dalies stebėjimais NIR srityje. Remiantis paly-

ginimo rezultatais, tikėtina, jog 9 AGB ir 2 cAGB žvaigždės ($V - I > 2,3$) turi dulkių apvalkalus. Dvylika šviesių AGB žvaigždžių (trys iš jų su galimais dulkių apvalkalais) yra už Jones et al. (2018) stebėto lauko ribų, todėl yra naujai identifikuotos ir papildo tokių objektų Leo A galaktikoje sąrašą.

RGB padalinimas į mėlyną (bRGB) ir raudoną (rRGB) dalis atskleidė, jog šių žvaigždžių erdvinis pasiskirstymas pastebimai skiriasi: bRGB yra labiau susitelkusios vidinėje Leo A dalyje, maždaug iki Holmberg spindulio ($a = 3,5$; Mateo 1998), o rRGB yra labiau išplitusios ir jų pasiskirstymas tęsiasi mažiausiai iki $8'$. Spektroskopiniai duomenys iš Kirby et al. (2017) parodė, jog bRGB ir rRGB metalingumų ribos yra panašios, tačiau rRGB imčiai būdingas šiek tiek didesnis nemetalingų ($[Fe/H] \lesssim -1,8$) žvaigždžių skaičius. Taip pat buvo nustatyta, jog šviesioms AGB ir bRGB žvaigždėms yra būdingas pasiskirstymas su beveik vienodu skalės ilgiu (atitinkamai, $0,87 \pm 0,06$ ir $0,89 \pm 0,09$), o tai gali reikšti, kad šios žvaigždės priklauso tos pačios kartos populiacijoms. Panašumai tarp AGB ir bRGB žvaigždžių matomi ir kumuliatyviuose pasiskirstymuose, kuriuose matomas jų pastebimai labiau į centrą koncentruotas pasiskirstymas, lyginant su labiau pasklidusiomis rRGB ir pRGB žvaigždėmis. Spektroskopiniai duomenys iš Kirby et al. (2017) parodė, jog metalingesnės (taigi tikėtina, jog ir jaunesnės) žvaigždės tiek bRGB, tiek rRGB imtyse telkiasi centrinėje galaktikos dalyje, o žvaigždžių analizė išorinėse Leo A dalyse pasitelkiant HST/WFC3 duomenis atskleidė, jog iki $a \sim 10'$ besitęsiantis galaktikos halas yra sudarytas iš senų ($\gtrsim 5$ Gyr) ir nemetalingų ($Z \sim 0,0001$) populiacijų. Pastarasis rezultatas reiškia, jog Leo A galimai yra būdingas žvaigždėdaros plitimo iš išorės į vidų (angl. outside-in) scenarijus.

4 skyrius

Jaunų žvaigždžių populiacijos Leo A galaktikoje

Žvaigždėdaros srityse intensyvus jaunų masyvių žvaigždžių grįžtamasis ryšys (pvz., žvaigždinis vėjas, supernovų sprogimai, ultravioletinė spinduliuotė) gali drastiškai pakeisti aplinkinės tarpžvaigždinės terpės morfologiją bei dinamiką. Grįžtamojo ryšio aplinkai suteiktas didelis energijos kiekis gali išsklaidyti arba suspausti aplinkines dujas taip suformuodamas H I skylės (t. y., smarkiai išretintų dujų sritis, kurias dažnai supa netaisyklingas sutankėjusių dujų apvalkas; Weaver et al. 1977; McCray & Kafatos 1987; Tenorio-Tagle & Bodenheimer 1988; Weisz et al. 2009b,a; Cannon et al. 2011; Warren et al. 2011; Pokhrel et al. 2020). Jei H I skylės pakraščiuose susitelkę dujų debesys tampa pakankamai tankūs, juose gali prasidėti nauji žvaigždėdaros procesai. Dujomis turtingose galaktikose, kuriose savaime plintančiai žvaigždėdarai yra palankiausios sąlygos, žvaigždinių struktūrų ir tarpžvaigždinės terpės morfologija dėl tokių procesų gali smarkiai pasikeisti vos per keletą milijonų metų (Weisz et al. 2009b; Bastian et al. 2011; Cannon et al. 2011). Tačiau įvertinant jaunų žvaigždžių amžių ir analizuojant jų pasiskirstymą neutralios bei jonizuotos tarpžvaigždinės terpės atžvilgiu, visgi yra įmanoma bent iš dalies atsekti žvaigždinių struktūrų evoliuciją.

Įvertinti žvaigždžių amžių pagal jų fotometrinius duomenis bei evoliucinius modelius yra gan sudėtinga. Lyginant žvaigždžių padėtis spalvos-ryškio diagramoje su izochromis, patikimai amžių įvertinti įmanoma tik pačioms ryškiausioms pagrindinės sekos (angl. main sequence, MS) žvaigždėms, kadangi dėl glausto izochronų išsidėstymo bei didesnės fotometrinių matavimų sklaidos ties silpnesniais ryškiais vienareikšmis amžiaus nustatymas MS žvaigždėms tampa neįmanomas. Kita vertus, galimas pakankamai tikslus pagrindinę seką palikusiu ir helio degimo (angl. He-burning, HeB) branduolyje stadiją pasiekusių žvaigždžių amžiaus įvertinimas. Dėl pakilusios temperatūros HeB stadijos metu vidutinės masės ($\sim 2-15 M_{\odot}$) žvaigždės spalvos-ryškio diagramoje pasislenka į mėlyną pusę, o temperatūrai sumažėjus – grįžta į raudonąją taip suformuodamos vadinamąją „mėlynąją kilpą“. Šioje stadijoje esančios žvaigždės didžiąją laiko dalį praleidžia mėlynosios kilpos viršūnėje, todėl spalvos-ryškio diagramoje matoma aiški, šiek tiek į raudoną pusę nuo MS pasislinkusi žvaigždžių seka (Dohm-Palmer et al. 1997; Weisz et al. 2008). HeB

stadija yra palyginti trumpa, todėl seką sudarančių mėlynų HeB (angl. blue HeB, BHeB) žvaigždžių yra mažiau nei ilgą laiką MS stadijoje praleidžiančių žvaigždžių, tačiau BHeB žvaigždės turi keletą svarbių privalumų: (a) jos yra ~ 2 ryškiausiai šviesesnės nei to paties amžiaus MS posūkio taško žvaigždės; (b) skirtingų amžių BHeB žvaigždės spalvos-ryškio diagramoje nepersidengia, todėl jų amžiaus-šviesio sąryšis leidžia tiksliau įvertinti jų amžių (Dohm-Palmer et al. 1997; Gallart et al. 2005; Weisz et al. 2008).

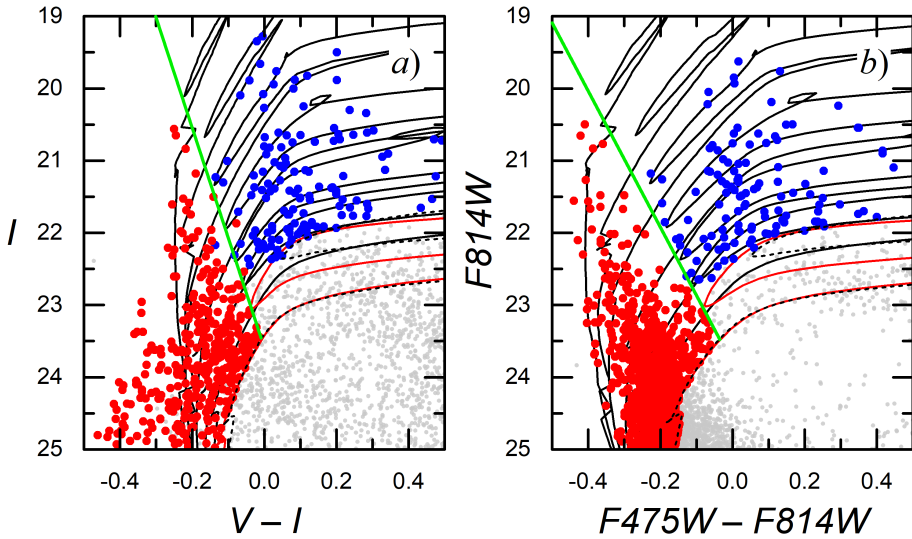
Siekiant atsekti žvaigždėdaros eigą Leo A galaktikoje per pastaruosius ~ 300 Myr, buvo tiriamos ryškiausios MS ir BHeB žvaigždės. Taip pat buvo įvykdyta jaunų žvaigždžių spiečių paieška centrinėje galaktikos dalyje (HST/ACS stebėjimų lauke) bei jaunų žvaigždžių populiacijų pasiskirstymo H I ir H II dujų atžvilgiu analizė.

4.1 Duomenų redukcija

Jaunų žvaigždžių populiacijų Leo A galaktikoje tyrimui panaudoti Subaru/Suprime-Cam ir HST/ACS daugiaspalvės fotometrijos duomenys (žr. 2 skyrių). Tyrimo metu apsiribota $a = 4'$ elipse ($b/a = 0.6$, P.A. = 114°) apibrėžta sritimi, kadangi už jos ribų nėra žvaigždėdaros regionų. Pradinės jaunų žvaigždžių imtys buvo apribotos $I < 25$ (Subaru/Suprime-Cam) ir $F814W < 25$ (HST/ACS) ryškių ribomis bei 320 Gyr amžiaus ir $Z = 0,0005$ metalingumo izochronomis (izochronos buvo pakoreguotos įskaitant Leo A atstumo modulio vertę, $(m - M)_0 = 24,58$, bei MW ekstinkciją: $A_V = 0,057$, $A_I = 0,031$, $A_{F475W} = 0,068$ ir $A_{F814W} = 0,032$; Schlafly & Finkbeiner 2011). Į pasirinktas imtis patenkančios žvaigždės buvo interaktyviai patikrintos, lyginant antžeminių stebėjimų nuotraukas su aukštos raiškos HST/ACS nuotraukomis. Vizualios patikros metu iš Subaru/Suprime-Cam žvaigždžių fotometrijos katalogo atmestos 83 neišskirtos žvaigždės, iš HST/ACS – 12. Dėl didesnės fotometrinių duomenų sklaidos, iš Subaru/Suprime-Cam duomenų papildomai atmestos 46-ios žvaigždės, turinčios atitikmenis HST/ACS kataloge ir patenkančios už pasirinktą žvaigždžių imtį apribojančios 320 Gyr amžiaus ($Z = 0,0005$) izochronos.

4.2 MS ir BHeB žvaigždės

MS ir BHeB žvaigždės spalvos-ryškio diagramose telkiasi skirtingose srityse, todėl šias žvaigždes galima tirti atskirai. 4.1 pav. pateiktose diagramose iliustruojami MS (raudoni taškai) ir BHeB (mėlyni taškai) atskyrimui pritaikyti kriterijai Subaru/Suprime-Cam (a) ir HST/ACS (b) katalogų atvejais. Žalioji linijomis pažymėtos atskyrimo ribos buvo parinktos taip, jog apytiksliai atkartotų skirtingų amžių, $Z = 0,0001$ metalingumo izochronų mėlynųjų kilpų mėlyniausių taškų padėtis. Siekiant atmesti MW objektus, pritaikytas papildomas apribojimas: $V - I < 0,5$. Dėl didesnės fotometrinių duomenų sklaidos Subaru/Suprime-Cam diagramoje riba tarp MS ir BHeB



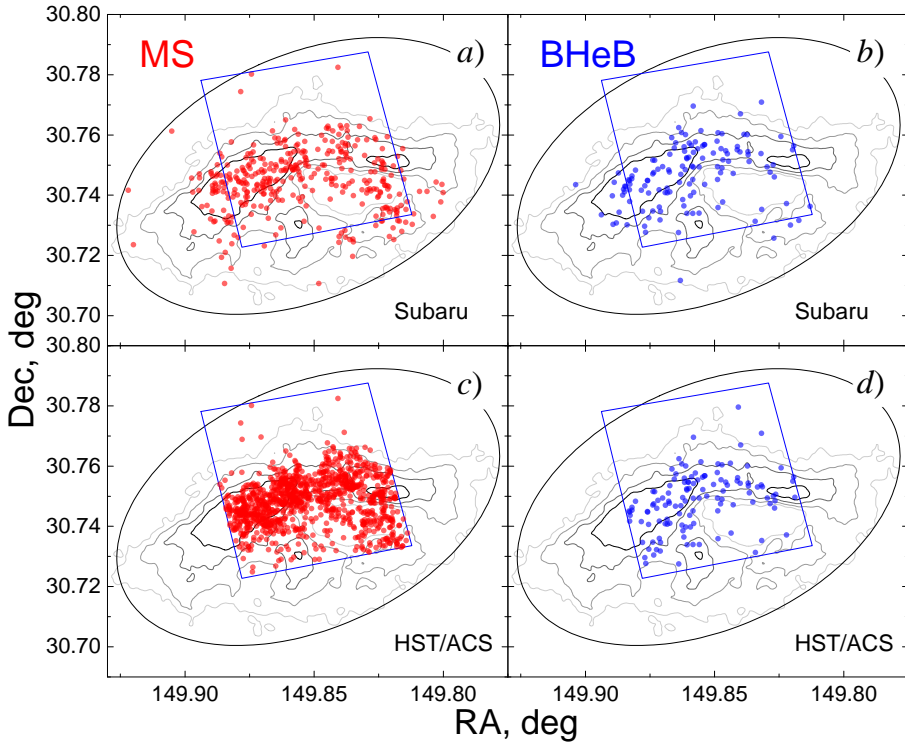
4.1 pav. MS (raudoni taškai) ir BHeB (mėlyni taškai) žvaigždžių atskyrimui panaudotos spalvos-ryškio diagramos Subaru/Suprime-Cam (a) ir HST/ACS (b) fotometrijos atvejais. Abejose diagramose plonomis juodomis linijomis pažymėtos 15, 30, 55, 100, 160 ir 220 ($Z = 0,0001$) PARSEC izochronos (Bressan et al. 2012); raudona linija pažymėta 320 Myr ($Z = 0,0001$) izochrona; juoda punktyrinė linija pažymėta 320 Myr ($Z = 0,0005$) izochrona. Žaliai pažymėtos MS ir BHeB žvaigždės atskiriančios tiesės: $I = 23,6 + 15,2(V - I)$ ir $F814W = 23,8 + 9,4(F475W - F814W)$.

žvaigždžių nėra tokia aiški, kaip HST/ACS atveju, todėl, atsižvelgiant į tai, jog tyrimo metu abiejų teleskopų duomenys yra apjungiami, Subaru/Suprime-Cam žvaigždžių imtys buvo pakoreguotos pagal HST/ACS rezultatus: trys žvaigždės buvo perkeltos iš BHeB imties į MS ir viena žvaigždė – iš MS į BHeB.

Gautų žvaigždžių grupių erdvinio pasiskirstymo diagramos yra pateiktos 4.2 pav.: a ir b diagramos yra Subaru/Suprime-Cam duomenys, c ir d – HST/ACS; raudonais taškais pažymėtos MS žvaigždės, mėlynais – BHeB. Diagramose taip pat pavaizduota: $a = 4'$ elipsė; HST/ACS stebėjimų lauko padėtis; H I stulpelio tankio kontūrai (tamsesni kontūrai atitinka didesnių dujų stulpelio tankį).

4.2.1 BHeB žvaigždžių amžius

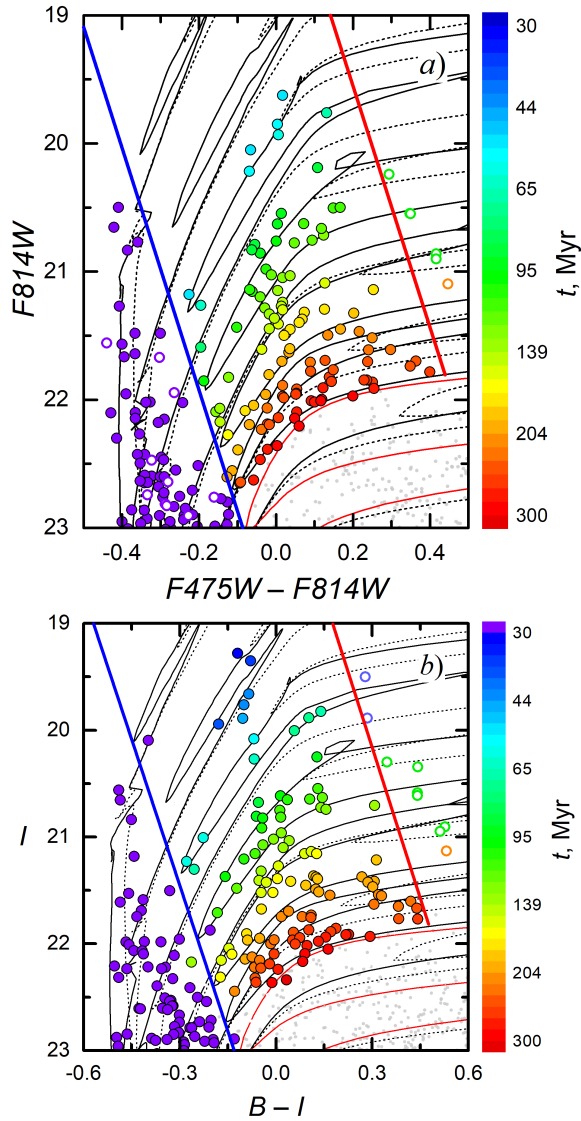
Tikslus amžiaus įvertinimas yra itin svarbus, tiriant galaktikos žvaigždines struktūras. BHeB žvaigždėms būdingas amžiaus-šviesio sąryšis suteikia galimybę gana tiksliai įvertinti individualių žvaigždžių amžių, lyginant šių žvaigždžių padėtis spalvos-ryškio diagramoje su teoriniais modeliais (pvz., Bertelli et al. 1994). Šio tyrimo metu, siekiant įvertinti BHeB žvaigždžių amžių, buvo panaudotos PARSEC v1,2S versijos izochronos (Bressan et al. 2012). Amžiaus įvertinimui panaudotos HST/ACS ir Subaru/Suprime-Cam duomenų spalvos-ryškio diagramos yra pateiktos 4.3 pav.



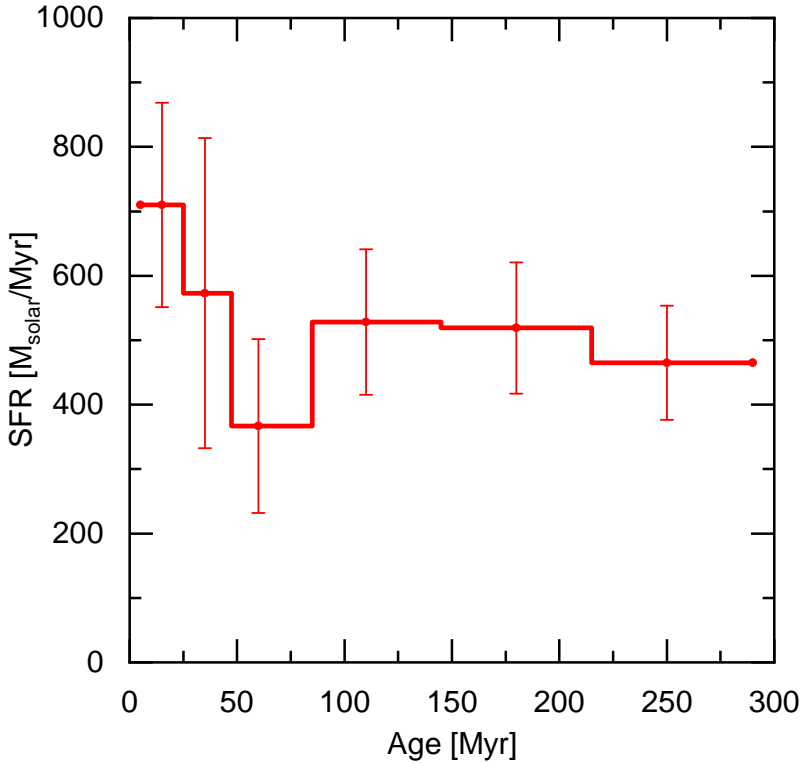
4.2 pav. MS (raudoni taškai) ir BHeB (mėlyni taškai) žvaigždžių, atrinktų pagal 4.1 pav. pateiktas diagramas, erdviniai pasiskirstymai Subaru/Suprime-Cam (a ir b) bei HST/ACS (c ir d) fotometrijos atvejais. Visose diagramose pavaizduota: $a = 4'$ elipsė; HST/ACS stebėjimų lauko padėtis (mėlynas kontūras); H I stulpelio tankio kontūrai (nuo blankiausio iki tamsiausio: 3×10^{20} , 5×10^{20} , 7×10^{20} , 10^{21} atomai/cm²).

BHeB žvaigždžių amžiaus nustatymui panaudotos $Z = 0,0001-0,0021$ (žingsnis: 0,0002) metalingumo bei $\log t = 6,95-8,6$ (žingsnis: 0,05) amžiaus izochronos. Iš kiekvienos izochronos mėlynosios kilpos mėlyniausių taškų buvo sudarytas 2-D tinklelis ir jam pritaikant penkto laipsnio polinomo interpoliaciją (angl. quintic spline interpolation; `interp2d`¹) kiekvienai apsibrėžtose ribose esančiai BHeB buvo priskirtas atitinkamas amžius. 4.3 pav. gauti amžių įverčiai HST/ACS (a) ir Subaru/Suprime-Cam (b) atvejais yra užkoduoti spalvomis. Taip pat 4.3 pav. pavaizduotos 15, 30, 55, 100, 160, 220 ir 320 Myr amžių bei $Z = 0,0001$ (ištinės juodos linijos arba raudona linija 320 Gyr atveju) ir $Z = 0,0015$ (punktyrinės juodos linijos) metalingumų izochronos, iliustruojančios mėlynujų kilpų sutrumpėjimą didėjant metalingumui, bei mėlyna ir raudona linijos, žyminčios amžiaus įvertinimui naudotos srities ribas. Violetiniais taškais šiose diagramose pažymėtos MS žvaigždės (violetiniai taškai).

¹<http://pageperso.lif.univ-mrs.fr/~francois.denis/IAAM1/scipy-html-1.0.0/generated/scipy.interpolate.interp2d.html>



4.3 pav. MS ir BHeB žvaigždžių diagramos pagal HST/ACS (a) ir Subaru/Suprime-Cam (b) fotometrinius duomenis. Pasviromis, lygiagrečiomis linijomis (mėlyna ir raudona) pažymėtos ribos, tarp kurių esančioms BHeB žvaigždėms interpoliacijos tarp izochronų metodu buvo nustatyti individualūs amžiai (užkoduoti spalvomis). Abejose diagramose pavaizduotos 15, 30, 55, 100, 160, 220 ir 320 Myr amžiaus ir $Z = 0,0001$ (juodos išsitiesinės linijos; raudona linija 320 Myr atveju) bei $Z = 0,0015$ (juodos punktyrinės linijos) metalingumų PARSEC izochronos (Bressan et al. 2012). Violetiniais taškais pažymėtos MS žvaigždės (violetiniais apskritimais pažymėtos MS žvaigždės, patenkančios į H I skylę). Už amžiaus įvertinimui parinktų ribų patenkančios BHeB žvaigždės yra pažymėtos skirtingų spalvų apskritimais, priklausomai nuo amžiaus intervalo, kuriam jos buvo priskirtos: 30-80 Myr (mėlyni), 80-180 Myr (žali) ir 180-300 Myr (oranžiniai).



4.4 pav. Leo A galaktikos žvaigždėdaros istorija, nustatyta pagal BHeB žvaigždes. Žvaigždžių formavimosi sparta (SFR) jauniems amžiams (<30 Myr) buvo nustatyta pagal MS žvaigždes.

tiniai apskritimai – MS žvaigždės H I skylėje). Už raudonos linijos esančios, apskritimais pažymėtos mėlynosios kilpos žvaigždės dar nepasiekė kilpos viršūnės, arba ją jau paliko. BHeB amžiaus įvertinimui pritaikytas metodas neveikia pastarųjų žvaigždžių užimamoje diagramos srityje, todėl jos buvo priskirtos vienai iš trijų amžių grupių: 30-80 Myr (mėlyni apskritimai), 80-180 Myr (žali apskritimai), 180-300 Myr (oranžiniai apskritimai).

4.4 pav. parodyta žvaigždžių formavimosi spartos (angl. Star Formation Rate, SFR; matuojama Saulės masėmis per Myr) evoliucija, nustatyta pagal BHeB žvaigždes, atsižvelgiant į katalogo pilnumo įverčius (Stonkutė et al. 2014) bei neišskirtas žvaigždes. Jauniausių amžių (< 30 Myr) SFR buvo nustatyta atsižvelgiant tik į šviesiausias ($I < 22,5$) MS žvaigždes pagal 15 Myr izochroną. Leo A galaktikai pastaruosius 300 Myr buvo būdinga tolygi žvaigždėdaros sparta su nedideliu jos sumažėjimu prieš ~50-80 Myr (4.4 pav.). Paskutinių 300 Myr vidutinė SFR vertė yra $(561 \pm 60) M_{\odot}/\text{Myr}$, o <30 Myr laikotarpiu SFR vertė siekia $(616 \pm 56) M_{\odot}/\text{Myr}$. Pastarasis rezultatas puikiai atitinka

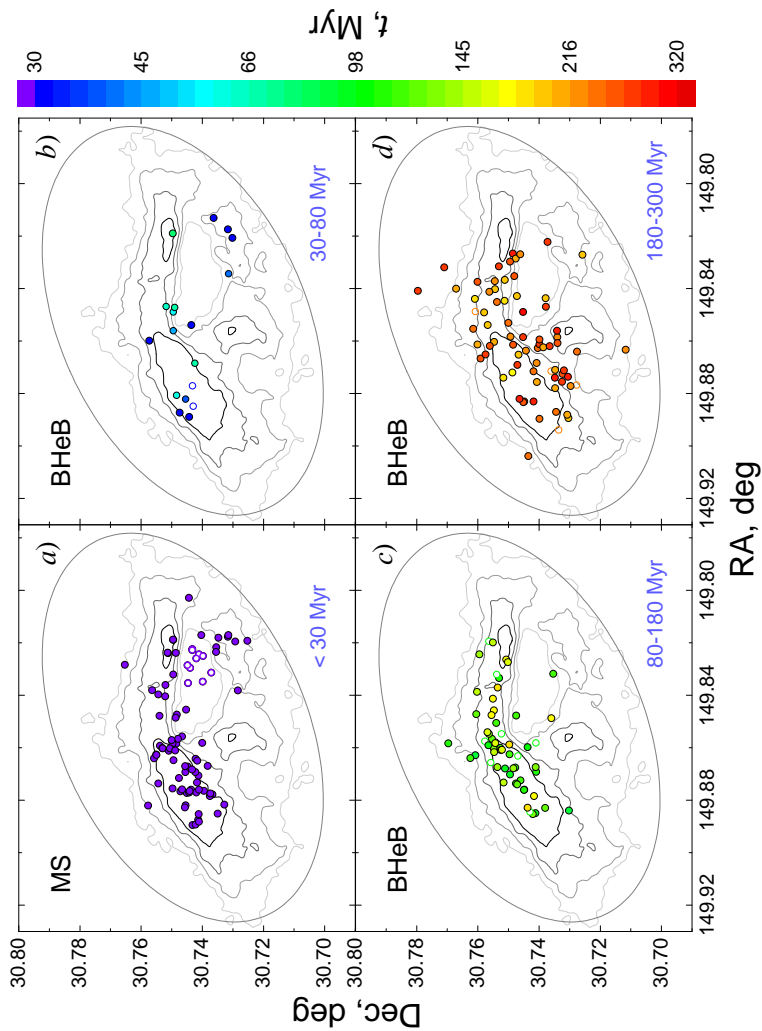
Karachentsev & Kaisina (2013) pagal tolimosios ultravioletinės srities srautą nustatytą $603 M_{\odot}/\text{Myr}$ SFR vertę. Tačiau verta paminėti, jog šių autorių SFR įvertis pagal $H\alpha$ srautą yra žymiai mažesnis, vos $93 M_{\odot}/\text{Myr}$. Pasak Lee et al. (2009), tokį neatitikimą nykštukinėse galaktikose gali lemti didelės masės žvaigždžių trūkumas žvaigždžių pradinėje masių funkcijoje.

4.2.2 MS ir BHeB žvaigždžių erdvinis pasiskirstymas

Netaisyklingos nykštukinės galaktikos turi didelį privalumą lyginant su masyviomis žvaigždes formuojančiomis galaktikomis – nykštukinių galaktikų sukimasis yra panašus į kietojo kūno, o kartais jos netgi nerodo jokių pastebimų sukimosi požymių (Young & Lo 1997). Šlyties trūkumas tokiose galaktikose reškia, jog jaunų žvaigždinių struktūrų morfologija gali išlikti nepakitusi ilgesnį laiko tarpą. Taigi paprastesnė nykštukinių galaktikų dinamika kartu su individualių žvaigždžių amžiaus nustatymu, suteikia galimybę geriau suprasti šių galaktikų struktūrą bei žvaigždžių populiacijų jose evoliuciją.

Individualių BHeB žvaigždžių amžių įvertinimas suteikė galimybę ištirti žvaigždėdaros kitimą Leo A galaktikoje per pastaruosius ~ 300 Myr metų. 4.5 pav. parodyti MS (a) ir BHeB (b-d) žvaigždžių erdviniai pasiskirstymai priklausomai nuo to, į kokį amžiaus intervalą (nurodytą apatiniame dešiniajame kiekvienos diagramos kampe) jos patenka. Diagramose pavaizduoti objektai iš abiejų 4.3 pav. pateiktų diagramų, t. y., buvo apjungti HST/ACS ir Subaru/Suprime-Cam katalogų duomenys. Šviesesnių nei 23 ryškis I ir $F814W$ fotometriniuose juostose objektų, turinčių matavimus abiejuose kataloguose, yra 151, turinčių tik HST/ACS duomenis – 43, turinčių tik Subaru/Suprime-Cam duomenis – 44. Vaizduojant erdvinį pasiskirstymą (4.5 pav.), žvaigždėms, turinčioms du amžiaus įverčius (gautus pagal abiejų teleskopų duomenis), buvo priskirta vidutinė amžiaus vertė, visi kiti simboliai ir spalvinis kodavimas yra tokie patys kaip ir 4.3 pav. diagramose.

Iš 4.5 pav. matyti, jog ~ 180 - 300 Myr amžių BHeB žvaigždės (d diagrama) yra pastebimai labiau išplitusios ir tolygiau pasiskirsčiusios nei jaunesnės žvaigždės. Kadangi senesnės žvaigždės turėjo daugiau laiko nukeliauti toliau nuo savo formavimosi vietos, šią nustatyti yra sudėtinga. Šiek tiek jaunesnės žvaigždės (~ 80 - 180 Myr; c diagrama) rodo kompaktiškesnį pasiskirstymą ir dauguma jų yra susitelkusios netoli sričių, pasižyminčių didesniu H I dujų tankiu. Jauniausių BHeB žvaigždžių (~ 30 - 80 Myr; b diagrama) yra nedaug, tačiau jų padėtys gerai atitinka jaunų MS žvaigždžių pasiskirstymą (a diagrama). Jaunos BHeB žvaigždės matomos netgi pietvakarinėje Leo A dalyje, kurioje yra MS žvaigždžių, tačiau visos senesnės BHeB žvaigždės nerodo šioje srityje jokių ankstesnės žvaigždėdaros požymių.



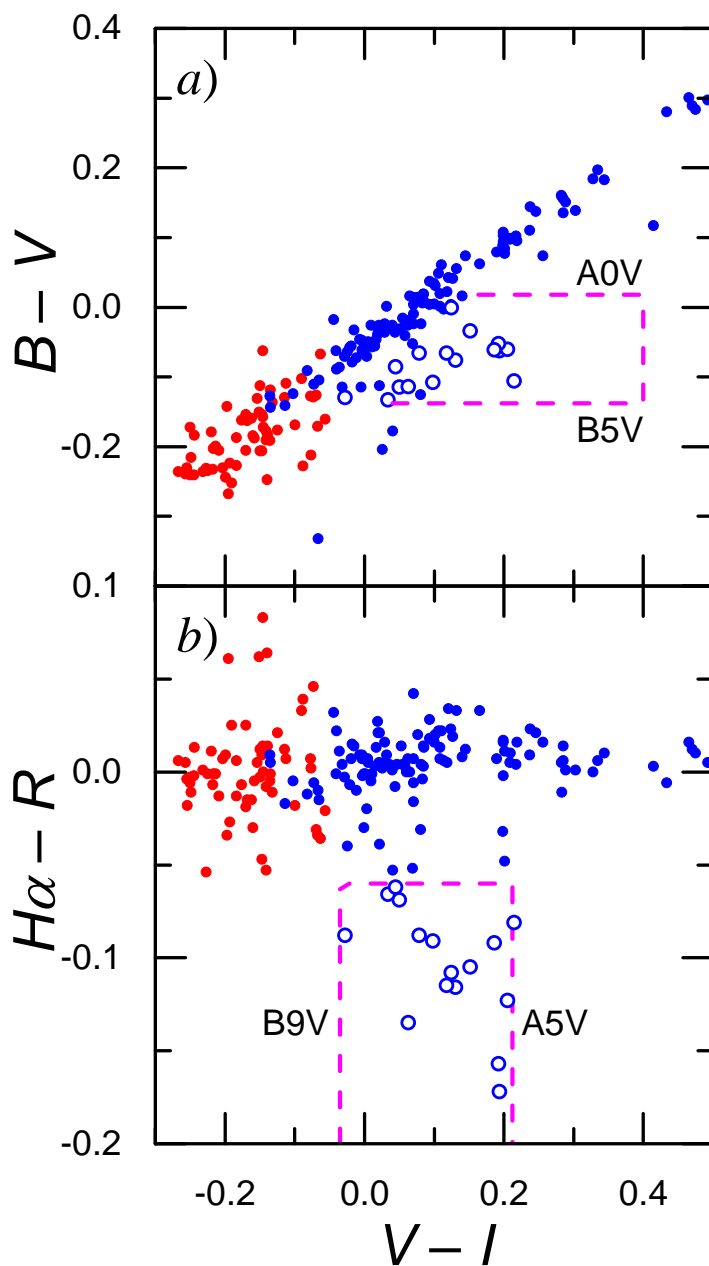
4.5 pav. MS (a) ir BHeB (b-d) žvaigždžių erdvinis pasiskirstymas (vaizduojami apjungti HST/ACS ir Subaru/Suprime-Cam duomenys). Simboliai ir spalvinis kodavimas atitinka 4.3 pav. žymėjimus, tačiau žvaigždėms, turinčioms ir HST/ACS, ir Subaru/Suprime-Cam atvejais gautus amžių įverčius, priskirtos vidutinės amžių vertės. Kiekvienos vidutinės amžių vertės dešiniajame kampe yra nurodytas atitinkamas pavaizduotų žvaigždžių amžių intervalas. Diagramose taip pat pažymėta ir $a = 4'$ elipsė bei parodyti H I dujų tankio kontūrai.

4.3 $H\alpha$ emisinės žvaigždės

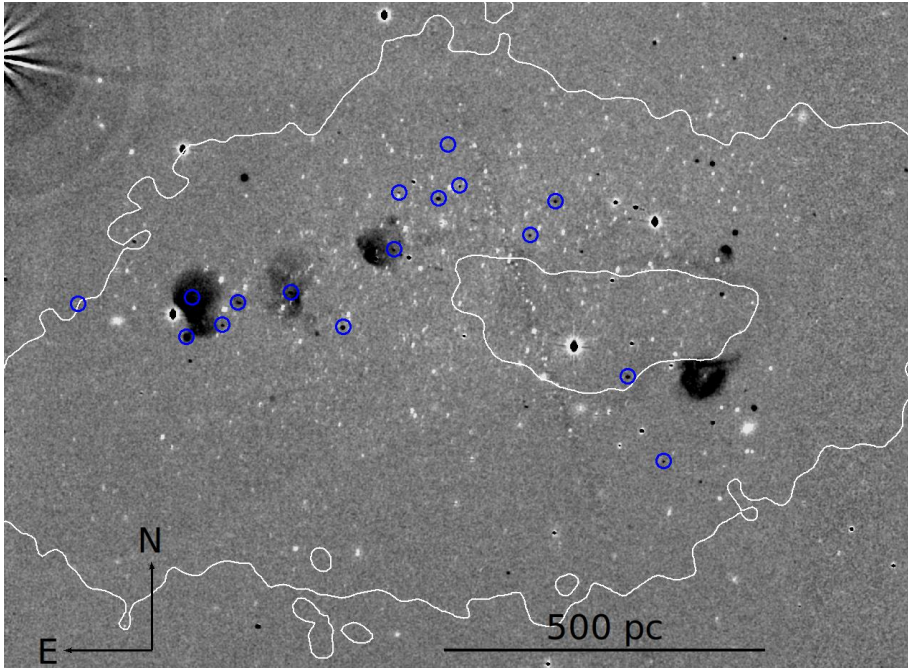
Subaru/Suprime-Cam fotometrija $H\alpha$ ir R fotometrinėse juostose (Stonkutė et al. 2021, ruošiamas) suteikė galimybę Leo A galaktikoje identifikuoti $H\alpha$ emisija pasižyminčias žvaigždes. Tokių žvaigždžių atskyrimui panaudotos dvispalvės diagramos yra pateiktos 4.6 pav. (MS – raudoni taškai, BHeB – mėlyni). 4.6a pav. parodytoje $B - V$ vs. $V - I$ diagramoje mėlynais apskritimais pažymėta 16 žvaigždžių su pastebimai padidėjusia $H\alpha$ emisija ($H\alpha - R \lesssim -0.06$), kurios buvo atrinktos pagal $H\alpha - R$ vs. $V - I$ diagramą (punktyrinėmis linijomis išskirta sritis 4.6b pav.). Šios emisinės žvaigždės apima beveik visą tiriamą amžių intervalą (~ 50 - 300 Myr) bei sudaro 15% tiriamų BHeB žvaigždžių. Įdomu tai, jog 15% MW galaktikos greitai besisukančių A spektrinio tipo žvaigždžių taip pat rodo emisijos požymių (Bohlander 2016).

Emisinių žvaigždžių išskirtinės savybės pastebimos ir $V - I$ vs. $B - V$ diagramoje (4.6a pav.), kurioje didžioji dalis nuo įprastos sekos atsiskiriančių objektų yra būtent $H\alpha$ emisijos padidėjimu pasižyminčios žvaigždės. Toks šių objektų išsidėstymas gali rodyti padidėjusį kontinuumo lygį arba stiprias emisines linijas B ir/arba I fotometrinėse juostose. Tačiau norint patvirtinti šių objektų prigimtį (Be, B[e], A-shell; Slettebak 1982), reikalingi jų spektroskopiniai matavimai.

4.7 pav. parodyta $H\alpha$ emisija pasižyminčias sritis išryškinanti Leo A nuotrauka, gauta atimant R fotometrinėje juostoje gautą nuotrauką iš nuotraukos, gautos daug siauresnėje (~ 14 nm pločio) $H\alpha$ fotometrinėje juostoje. Tamsesnės nuotraukos sritys rodo padidėjusią $H\alpha$ emisiją, būdingą aktyvios žvaigždėdaros srityse esantiems H II regionams bei emisinėms žvaigždėms (mėlyni apskritimai). Pastebėtina, jog 7-ios emisinės žvaigždės iš 16-os yra H II zonose arba netoli jų, todėl yra tikimybė, jog jų fotometrija gali būti paveikta tarpžvaigždinės terpės emisijos.



4.6 pav. Šviesių ($I < 23$) Leo A žvaigždžių dvispalvės diagramos (MS – raudoni taškai, BHeB – mėlyni). a): $B - V$ vs. $V - I$ diagrama; pagal b) diagramą atrinktos $H\alpha$ emisinės žvaigždės pažymėtos mėlynais apskritimais. b): $H\alpha - R$ vs. $V - I$ diagrama; emisinių žvaigždžių atrinkimui pritaikytos ribos pažymėtos punktyrinėmis linijomis. Diagramose taip pat yra nurodyti normalių MW žvaigždžių spalvos rodiklius atitinkantys spektrinių tipų intervalai (Pecaut & Mamajek 2013).



4.7 pav. Leo A galaktikos Subaru/Suprime-Cam nuotrauka ($H\alpha - R$). Tamsesnės sritys rodo padidėjusią $H\alpha$ emisiją (pvz., H II regionai, emisinės žvaigždės). Mėlyniais apskritimais pažymėtos $H\alpha$ emisija pasižyminčios žvaigždės.

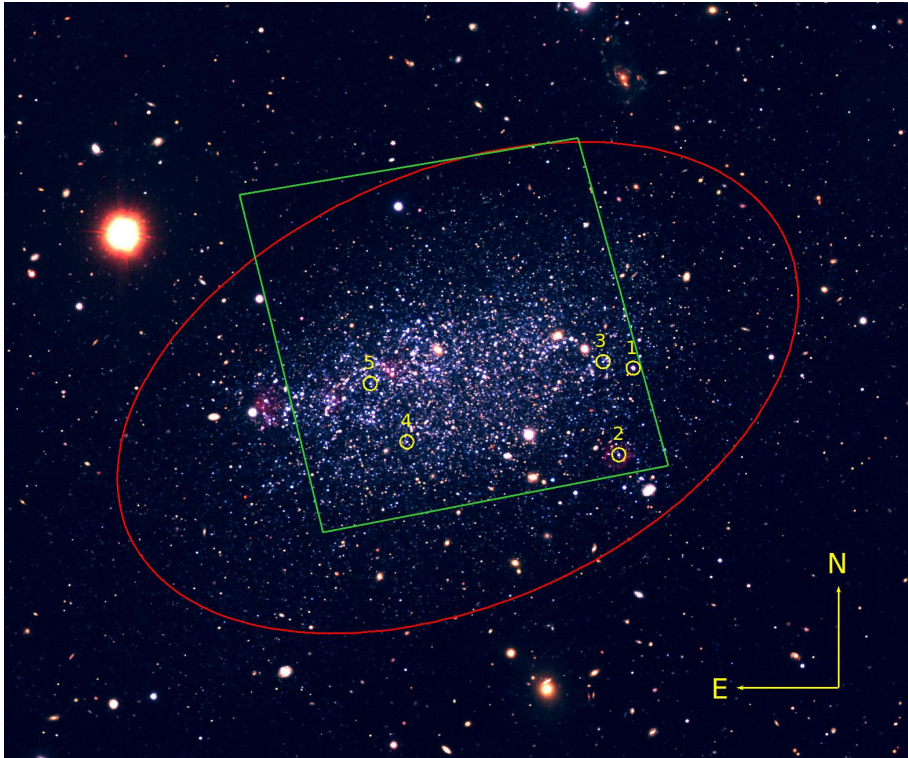
4.4 Žvaigždžių spiečiai

Žvaigždžių spiečių paieška Leo A galaktikoje buvo vykdyta pasinaudojant archyviniais HST/ACS duomenimis $F475W$ ir $F814W$ fotometrinėse juostose (žr. 2 skyrių). Siekiant aptikti žvaigždžių sutankėjimus, fotometrijos katalogas buvo apribotas paliekant tik ryškius ir patikimus matavimus ($F814W < 28$). Papildomas spalvos rodiklio apribojimas, $F475W - F814W < 2$, buvo pritaikytas siekiant nagrinėjamoje žvaigždžių imtyje išvengti MW objektų. Po pastarųjų apribojimų HST/ACS kataloge liko 98 525 objektai. Tarp pasirinktų

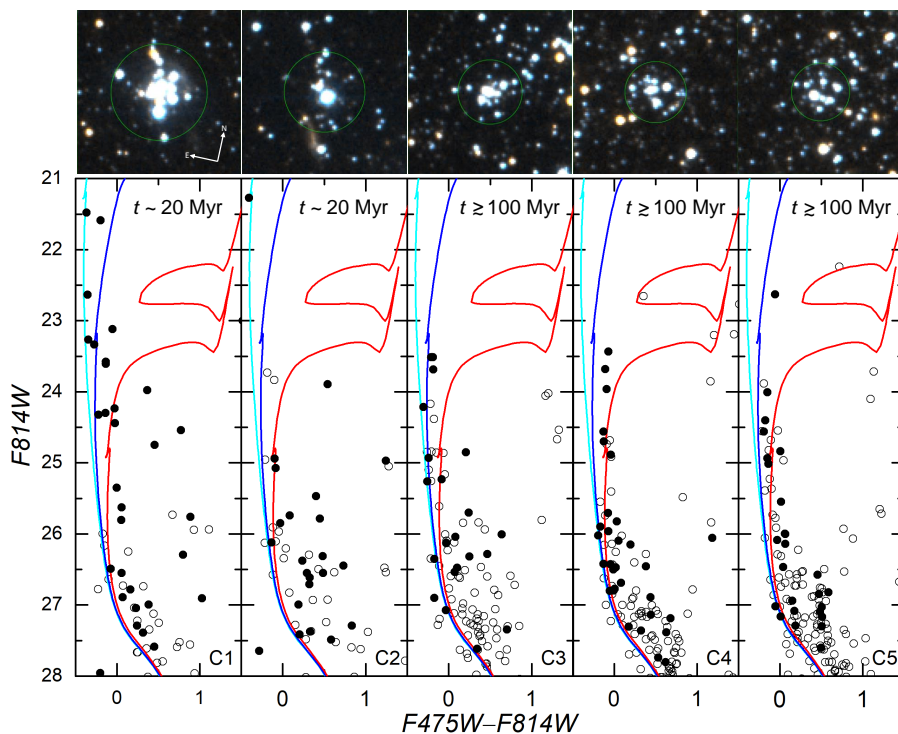
4.1 lentelė. Leo A galaktikos spiečių parametrai.

ID	α (J2000)	δ (J2000)	R	R_h	$F814W$	CI	Amžius (Myr)	Masė (M_\odot)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
LeoA-C1	9:59:16,5	+30:44:59	1,50	0,55	19,85	-0,11	~ 20	$\gtrsim 400$
LeoA-C2	9:59:17,2	+30:44:08	1,25	0,7*	20,82	-0,24	~ 20	$\gtrsim 150$
LeoA-C3	9:59:17,9	+30:45:02	1,00	0,31	21,69	-0,15	$\gtrsim 100$	$\gtrsim 300$
LeoA-C4	9:59:26,9	+30:44:15	0,95	0,37	21,68	0,02	$\gtrsim 100$	$\gtrsim 300$
LeoA-C5	9:59:28,5	+30:44:50	0,90	0,34	21,78	-0,14	$\gtrsim 100$	$\gtrsim 300$

Pastabos. (1) ID yra spiečiaus identifikacinis numeris; (2) ir (3) yra spiečių pusiaujinės koordinatės (atitinkamai, rektascencija ir deklinacija); (4) R yra spiečiaus spindulys [arcsec]; (5) R_h yra pusės šviesio spindulys [arcsec]; (6) yra spiečiaus ryškis $F814W$ fotometrinėje juostoje; (7) CI yra $F475W - F814W$ spalvos rodiklis; (8) spiečiaus amžiaus įvertis [Myr]; (9) spiečiaus masė [M_\odot].



4.8 pav. Leo A galaktikos nuotrauka, sudaryta iš Subaru/Suprime-Cam V , B ir $H\alpha$ fotometrinių juostų kombinacijos (Stonkutė et al. 2014). Raudonai pažymėta $a = 3,5$ (Holmberg spindulys; Mateo 1998) dydžio elipsė ($b/a = 0,6$; P.A. = 114°), kurios centro koordinatės yra $\alpha = 9^h 59^m 24.5^s$ ir $\delta = +30^\circ 44' 47''$ (J2000). HST/ACS stebėjimų laukas pažymėtas žaliu kontūru. Atrastų spiečių padėtys pažymėtos geltonais apskritimais. Šiaurė yra nukreipta į viršų, rytai – į kairę.



4.9 pav. Viršutinė eilutė: Leo A spiečių HST/ACS nuotraukos ($5'' \times 5''$), sudarytos iš $F814W$, $(F475W + F814W)/2$ ir $F475W$ fotometrinių juostų derinio. Žaliais apskritimais pažymėti spiečių dydžiai (apskritimų spinduliai, R , yra nurodyti 4.1 lentelėje). Apatinė eilutė: spiečių spalvos-ryškio diagramos. Juodais taškais pažymėtos žvaigždės patenkančios į atitinkamose spiečių nuotraukose pažymėtus žalius apskritimus; juodi apskritimai – žvaigždės patenkančios į $2,5''$ spindulio apskritimus. Visose diagramose pažymėtos 20 Myr (žydra), 100 Myr (mėlyna) ir 500 Myr (raudona) amžiaus ir $Z = 0,0007$ metalingumo izochronos.

katalogo objektų ieškant sutankėjimų, aplink žvaigždes buvo apibrėžiamos $0,5''$ spindulio sritys bei žiedo formos sritys (nuo $1''$ iki $2''$) aplink pastarąsias. Žiedo formos srityje įvertinus fono žvaigždžių tankį, šis buvo atimamas iš vidinės $0,5''$ spindulio sritys, taip joje išryškinant žvaigždžių sutankėjimus. Atliekant tokią procedūrą, tolimesnei analizei buvo atrinkti 76 sutankėjimai, kurių tankis bent 5 kartus viršija juos supančio fono tankį. Atrinktus sutankėjimus vizualiai patikrinus aukštos skyros HST/ACS nuotraukose, galimų žvaigždžių spiečių skaičius sumažėjo iki 5 (įskaitant ir anksčiau atrastą spiečių LeoA-C1; Stonkutė et al. 2015).

Atrinktų spiečių centrų padėtys buvo įvertintos pagal žvaigždžių tankio žemėlapių maksimumus. Spiečių dydžiai (R) buvo nustatyti atliekant apertūrinę fotometriją, kuomet apertūra aplink gautą centrą buvo didinama $0,1''$ dydžio žingsniu iki $2,5''$, taip sudarant spiečiaus augimo kreivę. Spiečiaus

dydis atitinka pirmojo staigaus augimo kreivės suplokštėjimo padėtį. Pusės šviesio spinduliai (R_h) spiečiams nustatyti prie ryškių, gautų ties spinduliu R , pridodant 0,75 ir randant susikirtimo tašką su augimo kreive. R ir R_h įverčių skirtumai $F475W$ ir $F814W$ fotometrines juostose yra ne didesni nei 0,05". R ir R_h vertės atrinktiems spiečiams yra pateiktos, atitinkamai, 4-ame ir 5-ame 4.1 lentelės stulpeliuose.

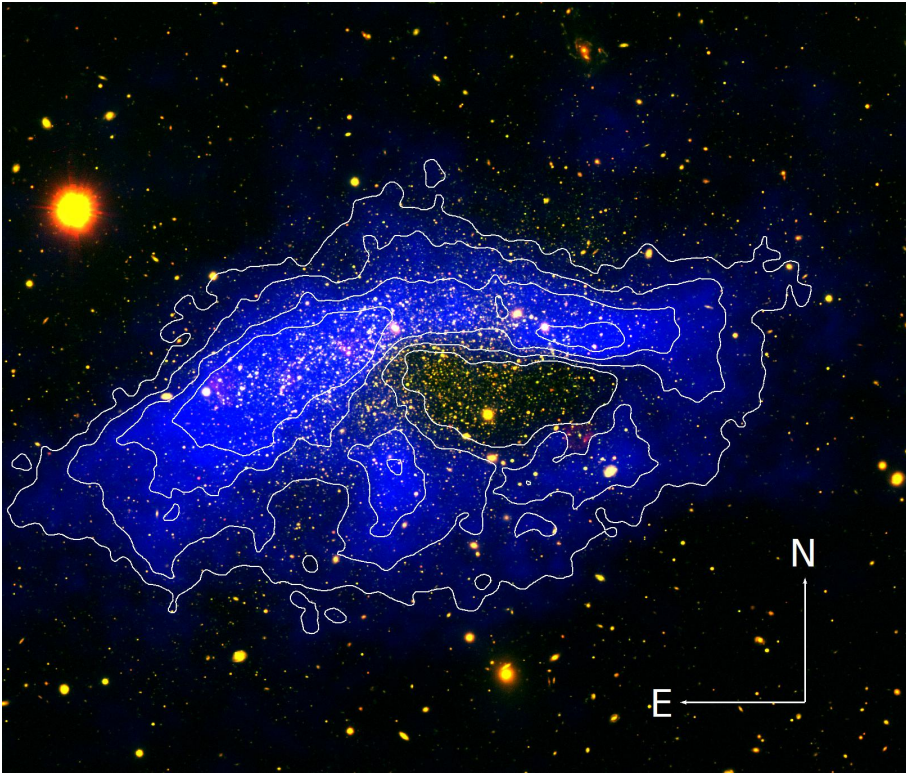
4.9 pav. parodytos Leo A spiečių nuotraukos (sudarytos iš $F814W$, $(F475W + F814W)/2$ ir $F475W$ fotometrinių juostų derinio) ir jų atitinkamos spalvos-ryškio diagramos. Juodais taškais diagramose pažymėtos žvaigždės patenkančios į spiečių nuotraukose pažymėtus ir jų dydį (R) atitinkančius žalius apskritimus, o juodais apskritimais – žvaigždės patenkančios į 2,5" spindulio apskritimus. Spiečių amžiai (nurodyti viršutiniame dešiniajame diagramų kampe) buvo nustatyti pasinaudojant $Z = 0,0007$ metalingumo (parinkto remiantis Leo A H II regionų metalingumo tyrimų rezultatais; van Zee et al. 2006; Ruiz-Escobedo et al. 2018) PARSEC izochromis (v1,2S; Bressan et al. 2012). Visose 4.9 pav. diagramose pažymėtos 20 Myr (žydra), 100 Myr (mėlyna) ir 500 Myr (raudona) izochronos, kurios yra pakoreguotos įskaitant 24,51 atstumo modulio vertę (Dolphin et al. 2002) bei MW ekstinkciją ($A_{F475W} = 0,068$ ir $A_{F814W} = 0,032$; Schlafly & Finkbeiner 2011). Spiečių amžiai (stulpelis Nr. 8 4.1 lentelėje) įvertinti atsižvelgiant į šviesiausių jų žvaigždžių padėtis spalvos-ryškio diagramoje, kadangi šviesioms žvaigždėms yra būdingas didesnis fotometrinių matavimų tikslumas ir menka priklausomybė nuo metalingumo. LeoA-C1 ir LeoA-C2 spiečių jauną amžių papildomai patvirtina ir juos supanti stipri H II spinduliuotė.

Siekiant įvertinti spiečių mases, kiekviename jų buvo atrinktos pagrindinėje sekoje arba netoli jos esančios, šviesios, mėlynos ($F475W - F814W < 0,5$ ir $F814W < 26$) žvaigždės. Pasinaudojant nustatytus spiečių amžius atitinkančiomis izochromis ir Kroupa (2002) pradine masės funkcija masių intervale nuo 0,08 M_{\odot} iki 120 M_{\odot} , buvo įvertinta, jog Leo A spiečiams būdingos masės apima 200-500 M_{\odot} intervalą (stulpelis Nr. 9 4.1 lentelėje).

4.5 H I skylė

Skylės H I dujų pasiskirstyme yra dažna ypatybė dujomis turtingose ir aktyviai žvaigždes formuojančiose galaktikose (Warren et al. 2011; Pokhrel et al. 2020). Tikėtina, jog tokias struktūras suformuoja žvaigždžių grįžtamasis ryšys, todėl aiškiai matomos H I skylės Leo A galaktikoje (Pokhrel et al. 2020) ir jos sąryšio su jaunomis žvaigždžių populiacijomis tyrimas yra itin svarbus siekiant suprasti žvaigždėdaros eigą per pastaruosius ~ 300 Myr.

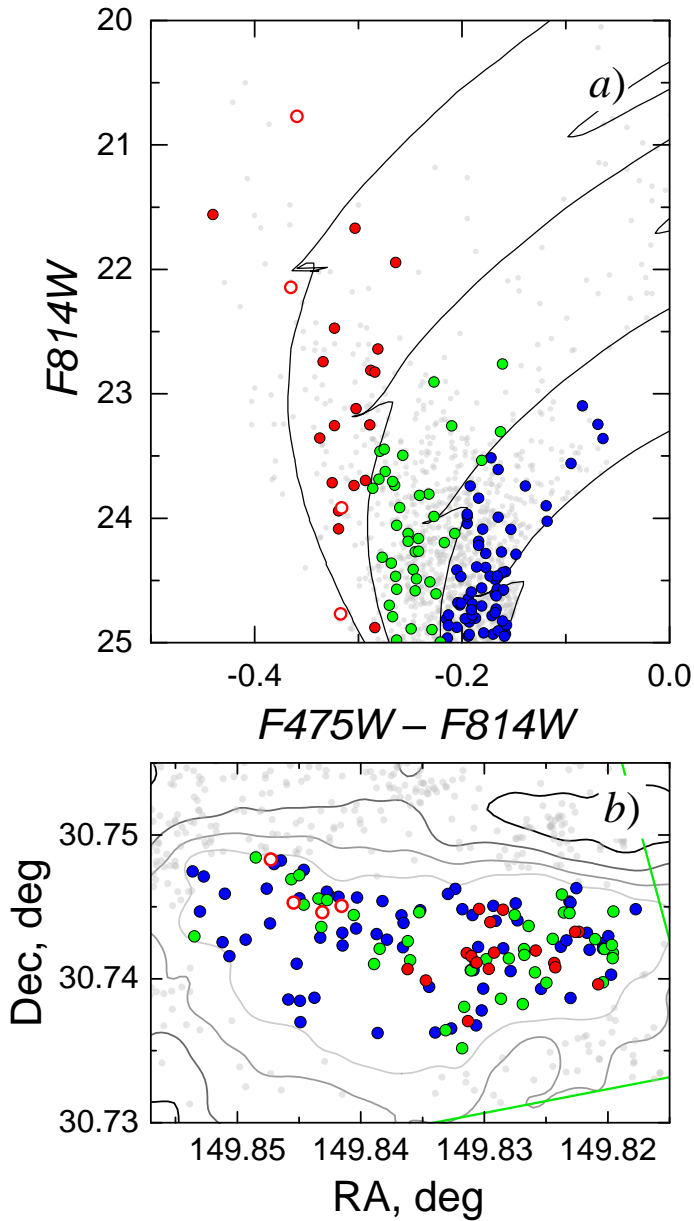
Suintegruoto H I stulpelio tankio pasiskirstymo (Hunter et al. 2012) analizė atskleidė, jog H I dujų tankis skylėje yra ~ 10 kartų mažesnis nei ją supančiuose regionuose. Šios mažo dujų tankio srities dydis siekia ~ 500 pc. Laikant, jog vidutinė dujų greičių dispersija yra ~ 7 km/s (Hunter et al. 2012), tokio dydžio



4.10 pav. Leo A galaktikos nuotrauka Subaru/Suprime-Cam $H\alpha$ ir B fotometrines juostose (Stonkutė et al. 2014) sukomponuota su integruotu H I stulpelio tankio pasiskirstymu (papildomai pažymėti ir dujų stulpelio tankio kontūrai (atomai/cm²): 3×10^{20} , 5×10^{20} , 7×10^{20} , 10^{21} ; Hunter et al. 2012).

struktūra iš vieno centro susiformuotų per ~ 40 Myr, taigi ši vertė gali būti laikoma viršutine Leo A H I skylės amžiaus riba.

Pasinaudojant gilesne HST/ACS fotometrija ($F814W < 25$), buvo atlikta detalesnė H I skylėje esančių MS žvaigždžių analizė. 4.11a pav. pateikta spalvos-ryškio diagrama, kurioje pavaizduotos pagal 30, 80, 180 ir 320 Myr amžiaus bei $Z = 0,0005$ metalingumo izochronas (Bressan et al. 2012) į skirtingas amžiaus grupes suskirstytos H I skylėje esančios MS žvaigždės: $\lesssim 80$ Myr (raudoni taškai/apskritimai), 80-180 Myr (žali taškai) ir 180-300 Myr (mėlyni taškai). 4.11b pav. pavaizduoti atitinkamiems amžių intervalams priskirtų žvaigždžių erdviniai pasiskirstymai. Pastarojoje diagramoje matomas žvaigždžių trūkumas pietrytinėje H I skylės dalyje (taip pat ir srityje už skylės ribų), galimai rodantis mažą žvaigždėdaros aktyvumą netolimoje praeityje. Taip pat matomos ir dvi pastebimai atsiskyrusios jauniausių ($\lesssim 80$ Myr) žvaigždžių grupės šiaurės rytinėje (raudoni apskritimai) bei vakarinėje (raudoni taškai) skylės dalyse. Spalvos-ryškio diagramoje (4.11a pav.) šiaurės rytinėje srityje esanti nedidelė populiacija atrodo jaunesnė. Nors šių žvaigždžių skaičius



4.11 pav. a) HST/ACS katalogo MS žvaigždžių spalvos-ryškio diagrama. Juodomis linijomis pažymėtos 30, 80, 180 ir 320 Myr amžiaus bei $Z = 0.0005$ metalingumo PARSEC izochronos (Bressan et al. 2012). Spalvotais taškais pažymėtos į H I skylę patenkančios žvaigždės, pilkais taškais pažymėti objektai esantys už skylės ribų. b) MS žvaigždžių erdvinis pasiskirstymas. Simbolių žymėjimas atitinka žymėjimus a) diagramoje. Pavaizduoti H I dujų pasiskirstymo kontūrai yra tokie patys kaip 4.1, 4.5 ir 4.10 pav. Žaliai pažymėtos HST/ACS stebėjimų lauko ribos.

yra labai mažas, jis gali rodyti, jog H I skylės susidarymą lėmė keletu skirtingų jaunų žvaigždžių populiacijų poveikis.

Vakarinėje skylės pusėje esančios populiacijos grįžtamasis ryšys galėjo suformuoti jonizacinį frontą (matomą $H\alpha$ pasiskirstymo nuotraukose; žr. 4.7 pav.) ir įžiebtį žvaigždėdaros procesus už jo esančiose srityse, kuriose neseniai vykusią žvaigždėdarą patvirtina jauni žvaigždžių spiečiai (Stonkutė et al. 2019) bei H II regionai. Tokią prielaidą sustiprina ir itin geras $H\alpha$ fronto ir vakarinio H I skylės krašto formų atitikimas.

4.6 Apibendrinimas

Pastarųjų ~ 300 Myr metų žvaigždinių struktūrų evoliucija Leo A galaktikoje buvo ištirta pasinaudojant Subaru/Suprime-Cam ir HST/ACS duomenimis. Mėlynosios kilpos viršūnėse susitelkusių žvaigždžių (BHeB) amžiaus-šviesio sąryšis suteikė galimybę interpoliacijos tarp skirtingų amžių ir metalingumų izochronų būdu gan tiksliai įvertinti individualius šių žvaigždžių amžius. Erdvinio žvaigždžių pasiskirstymo analizė skirtingose amžių grupėse atskleidė, jog seniausios tirtos BHeB žvaigždės (~ 180 - 300 Myr) yra pasiskirsčiusios gana tolygiai, jaunesnės (~ 80 - 180 Myr) yra labiau susitelkusios didesniu H I stulpelio tankiu pasižyminčiose srityse, o jauniausios (~ 30 - 80 Myr), kartu su šviesiausiomis MS žvaigždėmis ($\lesssim 30$ Myr), nors taip pat telkiasi didesnio dujų tankio srityse, papildomai rodo ir neseniai įvykusios žvaigždėdaros požymius pietvakarinėje Leo A dalyje, kurioje pastebimas senesnių BHeB žvaigždžių trūkumas, o tai gali reikšti, jog žvaigždėdaros procesai šioje galaktikos dalyje nevyko bent keletą šimtų milijonų metų ir įsižiebė tik neseniai.

Nustačius pastarųjų 300 Myr Leo A galaktikos žvaigždėdaros istoriją, paaiškėjo, jog žvaigždėdaros sparta per šį laikotarpį buvo beveik pastovi su vienu nedideliu sumažėjimu prieš ~ 50 - 80 Myr. Vidutinė žvaigždėdaros sparta per paskutinius 300 Myr yra $(561 \pm 60) M_{\odot}/\text{Myr}$, o per paskutinius 30 Myr – $(616 \pm 56) M_{\odot}/\text{Myr}$.

Subaru/Suprime-Cam duomenų $H\alpha$ ir R fotometriniuose juostose analizė padėjo Leo A galaktikoje identifikuoti 16 $H\alpha$ emisija ($H\alpha - R \lesssim -0,06$) pasižyminčių žvaigždžių. Padidėjusi $H\alpha$ emisija gali reikšti, jog identifikuoti objektai yra Be, B[e] arba A-shell tipų žvaigždės, tačiau siekiant tiksliai juos suklasifikuoti, reikalingi jų spektroskopiniai matavimai. Taip pat reikėtų atkreipti dėmesį į tai, kad 7-ios iš šių emisinių žvaigždžių yra H II zonose arba šalia jų, taigi yra tikimybė, jog jų fotometrija gali būti paveikta foninės emisijos.

Aiškliai matomos skylės (~ 500 pc) Leo A H I dujų pasiskirstyme (Pokhrel et al. 2020) tyrimo metu įvertinta viršutinė šios struktūros amžiaus riba yra ~ 40 Myr (laikant, jog jos susidarymas vyko iš vieno centro su ~ 7 km/s vidutiniu dujų dispersijos greičiu). Optinės nuotraukos atskleidė, jog žvaigždžių tankis rytinėje H I skylės pusėje yra didesnis nei vakarinėje. Toks žvaigždžių pasiskirstymas gali būti nulemtas to, jog rytinėje galaktikos pusėje per pas-

taruosius ~ 300 Myr metų žvaigždėdaros procesai buvo aktyvesni (sprendžiant iš BHeB žvaigždžių analizės rezultatų). Gilesni HST/ACS žvaigždžių fotometrijos duomenys, parodė, jog H I skylėje yra bent dvi pastebimai atsiskyrusios jaunų pagrindinės sekos žvaigždžių populiacijos šiaurės-rytinėje ir vakarinėje skylės dalyse. Sprendžiant iš žvaigždžių padėčių spalvos-ryškio diagramoje, šiaurės-rytinėje pusėje esanti populiacija galimai yra šiek tiek jaunesnė, taigi tikėtina, jog H I skylės susidarymą lėmė žvaigždžių grįžtamojo ryšio poveikis iš keleto skirtingų populiacijų. Taip pat tikėtina, jog vakarinėje skylės pusėje esančios populiacijos poveikis lėmė jonizacinio fronto (matomo $H\alpha$ pasiskirstymo nuotraukose) susidarymą ir įžiebė žvaigždėdaros procesus už jo esančiose srityse, kuriose neseniai vykusią žvaigždėdarą patvirtina jauni žvaigždžių spiečiai bei H II regionai.

Rezultatai ir išvados

Šiame darbe, pasinaudojant Subaru/Suprime-Cam ir HST ACS/WFC3 daugiaspalvės fotometrijos duomenimis, buvo tiriamos senos ($\gtrsim 1$ Gyr) ir jaunos ($\lesssim 300$ Myr) žvaigždžių populiacijos netaisyklingoje nykštukinėje galaktikoje Leo A. Žvaigždžių fotometrijos katalogai buvo išvalyti parenkant atitinkamoms populiacijoms tinkamus apribojimų kriterijus pagal kokybinius fotometrijos parametrus ir dvispalvę diagramą, taip pat atliekant vizualinę objektų nuotraukų analizę. Išvalyti katalogai užtikrino patikimesnę Leo A galaktikai priklausančių objektų imtį ir suteikė galimybę ištirti jos struktūrinės savybes.

Išvalytose Leo A spalvos-ryškio diagramose buvo identifikuotos 32 šviesios AGB žvaigždės ir 3 AGB kandidatės (20 iš šių žvaigždžių jau buvo pristatytos ankstesnėje literatūroje, o 12 yra identifikuotos pirmą kartą). Išvalytų diagramų analizė taip pat leido aptikti anksčiau nežinomą, 26-ių anomalių RGB (pRGB) žvaigždžių seką, kurią sudarančių žvaigždžių spektrai galimai pasižymi stipria CN sugertimi, atsižvelgiant į tai, jog keturios iš šešių spektroskopinius matavimus turinčių pRGB žvaigždžių rodo CN sugerties požymius.

RGB sekos padalinimas į mėlyną ir raudoną dalis atskleidė, jog mėlynojoje dalyje esančios žvaigždės ir šviesios AGB žvaigždės turi itin panašų erdvinį pasiskirstymą ir beveik vienodus skalės ilgius (atitinkamai, $0,89 \pm 0,09$ ir $0,87 \pm 0,06$), o tai gali reikšti, kad šios žvaigždės priklauso tos pačios kartos populiacijoms. Pastarųjų žvaigždžių pasiskirstymas yra žymiai labiau koncentruotas į galaktikos centrą palyginus su raudonų RGB žvaigždžių išsidėstymu. Papildomas nedidelio lauko Leo A išorinėje dalyje tyrimas, paremtas HST/WFC3 stebėjimų duomenimis, taip pat atskleidė, jog senų halo žvaigždžių išplitimas siekia mažiausiai $\sim 10'$, t. y., daugiau nei dvigubai daugiau nei vidutinio amžiaus žvaigždės atitinkančių šviesių AGB žvaigždžių išplitimas, tesiekiantis $\sim 4'$. Šie rezultatai rodo, jog žvaigždės formuojantis Leo A diskas traukiasi, o tai atitinka nykštukinių galaktikų evoliucijos scenarijų, kuomet žvaigždėdara vyksta iš išorės į vidų.

Atsižvelgiant į helio degimo šerdyje (BHeB) stadijoje esančių žvaigždžių amžiaus-šviesios sąryšį, interpoliuojant tarp skirtingo amžiaus ir metalingumo izochronų mėlynosios kilpos viršūnių taškų, buvo nustatyti individualių BHeB žvaigždžių amžiai. Tiriant skirtingų amžių žvaigždžių erdvinį pasiskirstymą nustatyta, jog ~ 180 - 300 Myr amžiaus žvaigždėms yra būdingas tolygus pasiskirstymas, o jaunesnės žvaigždės ($\lesssim 180$ Myr) yra susitelkusios į labiau koncentruotas struktūras ir yra aptinkamos netoli didesniu H I dujų tankiu pasižyminčių sričių.

Archyvinių H I stulpelio tankio duomenų analizės metu buvo nustatyta, jog ~ 500 pc dydžio skylės šių dujų pasiskirstyme viršutinė amžiaus riba yra

~ 40 Myr, jei laikoma, jog ji susiformavo iš vieno centro, o vidutinis dujų dispersijos greitis yra ~ 7 km/s. Tačiau pagrindinės sekos žvaigždžių pasiskirstymas rodo, jog skylėje gali būti daugiau nei viena jaunų žvaigždžių populiacija. Vakarinėje skylės dalyje esančios jaunų žvaigždžių populiacijos sukurtas grįžtamasis ryšys, galėjo suformuoti jonizacinį frontą (matomą $H\alpha$ pasiskirstymo nuotraukoje) ir įžiebtį žvaigždėdarą už jo esančiose srityse, kuriose esantys ryškūs H II regionai bei jauni (~ 20 Myr) žvaigždžių spiečiai įrodo neseniai vykusių žvaigždėdaros procesus.

Subaru/Suprime-Cam žvaigždžių fotometrijos duomenų $H\alpha$ ir R fotometrines juostose analizė suteikė galimybę identifikuoti 16 $H\alpha$ emisija ($H\alpha - R \lesssim -0,06$) pasižyminčių BHeB žvaigždžių. Tikėtina, kad $H\alpha$ emisija rodo, jog Leo A galaktikoje yra emisinėmis linijomis pasižyminčių B-A spektrinių tipų žvaigždžių. Tačiau pažymėtina, jog 7-ios iš šių žvaigždžių yra H II regionuose arba netoli jų, todėl foninė emisija galėjo turėti įtakos jų fotometriniams matavimams.

Padėka

Norėčiau išreikšti nuoširdžiausią padėką savo vadovams prof. dr. Vladui Vansevičiui ir dr. Rimai Stonkutei už vertingas pamokas ir patarimus, už nuolatinį palaikymą ir begalinę kantrybę.

Per ilgus studijų metus įvairių paskaitų, seminarų ir praktinių užsiėmimų metu savo žiniomis ir įžvalgomis su manimi pasidalino daug žmonių. Labai dėkoju dr. Kastyčiui Zubovui, dr. Donatui Narbučiui, dr. Audriui Bridžiui, dr. Dmitrij Semionov, dr. Jokūbui Sūdžiui, dr. Juliu Sperauskui, prof. dr. Arūnui Kučinskui, dr. Vidui Dobrovolskui ir kitiems padėjusiems praplėsti mano žinias.

Taip pat dėkoju kartu studijavusiems Laurai Martinkei, Skaistei Valtanavičiūtei, Tomui Seniut, Mariui Čeponiui, Rokui Naujaliui, Kostui Sabuliui, Karoliui Lyvens, Edgarui Kolomicui, Mantui Račiūnui ir Giedriui Žlabiui už tai, jog vienu ar kitu studijų laikotarpiu dalinosi su manimi savais sunkumais ir pasiekimais bei leidosi į domius pokalbius tiek mokslo, tiek kitomis temomis.

Nuoširdžiai dėkoju savo tėvams Liudmilai ir Kęstučiui bei savo seseriai Kristinai ir broliui Viktorui už jų palaikymą ir paskatinimą.

Gyvenimo aprašymas

Asmens duomenys:

Vardas: Alina
Pavardė: Leščinskaitė
Gimimo data: 1992-09-27
Gimimo vieta: Alanta, Molėtų raj., Lietuva
El. paštas: alina.lescinskaite@ftmc.lt

Išsilavinimas:

1998–2011 Alantos gimnazija,
Vidurinis išsilavinimas.
2011–2015 Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas,
Fizikos bakalauro laipsnis.
2015–2017 Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas,
Fizikos magistro laipsnis.
2017–2021 Fizinių ir technologijos mokslų centras (FTMC),
Megasistemų fizikos laboratorija,
Doktorantūra.

Profesinė veikla:

2013–2018 Technikė, FTMC.
2018–2020 Inžinierė, FTMC.
2020–dabar Jaunesnioji mokslo darbuotoja, FTMC.

Curriculum Vitae

Name: Alina
Surname: Leščinskaitė
Date of birth: 1992-09-27
Place of birth: Alanta, Lithuania
E-mail: alina.lescinskaite@ftmc.lt

Education:

1998–2011 Alanta secondary school
2011–2015 Vilnius University, Faculty of Physics
Bachelor degree.
2015–2017 Vilnius University, Faculty of Physics
Master degree.
2017–2021 Center for Physical Sciences and Technology (FTMC),
Ph.D. studies.

Work experience:

2013–2018 Technician, FTMC.
2018–2020 Engineer, FTMC.
2020–now Junior Researcher, FTMC.

Vilnius University Press
Sauletekio al. 9, LT-10222 Vilnius
e-mail: info@leidykla.vu.lt, www.leidykla.vu.lt
Print run copies 20