

ГРАДИЕНТЫ МЕТАЛЛИЧНОСТИ И ВОЗРАСТА
ЗВЕЗД В КАРЛИКОВЫХ СФЕРОИДАЛЬНЫХ
ГАЛАКТИКАХ KKs 3 И ESO 269-66

М.Е. ШАРИНА, Л.Н. МАКАРОВА, Д.И. МАКАРОВ

Поступила 30 мая 2018

Принята к печати 29 августа 2018

Мы сравниваем свойства звездных населений шаровых скоплений и звезд поля двух карликовых сфероидальных галактик (dSphs): ESO 269-66, близкой соседки гигантской S0 галактики NGC 5128, и KKs 3, одной из немногих крайне изолированных dSphs в пределах 14 Мпк. Истории звездообразования галактик известны из предыдущих работ по результатам глубокой звездной фотометрии на снимках с хаббловского телескопа (HST). Возраст и содержание металлов для ядерных шаровых скоплений в KKs 3 и ESO 269-66 известны из литературных спектроскопических исследований: $T = 12.6$ млрд лет, $[Fe/H] = -1.5$ и -1.55 dex. С помощью функции Серенка мы строим и анализируем профили поверхностной плотности звезд с высокой и низкой металличностью (красных и голубых) в KKs 3 и ESO 269-66, а также демонстрируем, что: 1) профили плотности красных звезд более круглые, чем у голубых, что свидетельствует о градиентах металличности и возраста в галактиках; 2) шаровые скопления в KKs 3 и ESO 269-66 содержат примерно 4% и 40%, соответственно, всех старых звезд в галактиках с металличностью $[Fe/H] \sim -1.5$ – -1.6 dex и возрастом 12–14 млрд лет. Шаровые скопления, таким образом, являются реликтами первых наиболее мощных вспышек звездообразования, произошедших в центральных областях этих объектов. Вероятно, вследствие своей изолированности KKs 3 потеряла меньший процент старых низкометаллических звезд, чем ESO 269-66.

Ключевые слова: *галактики: карликовые – галактики: звездные скопления – галактики: KKs 3, ESO 269-66*

1. *Введение.* Карликовые сфероидальные (dSphs) и эллиптические (dEs) галактики не содержат звезд моложе миллиарда лет. В отличие от dEs, dSphs имеют низкую поверхностную яркость, $(SB)_{0.9} > 22.5 - 23$ mag arcsec⁻² (в фильтре *B* фотометрической системы Джонсона-Казинса). В отличие от иррегулярных карликовых галактик низкой поверхностной яркости, сфероидальные не детектируются в линиях нейтрального водорода (HI) и не содержат областей активного звездообразования. Практически все dSphs, за исключением нескольких, наблюдаются в пределах 300 кпк вокруг массивных галактик (например, [1–4]). Этот наблюдаемый факт характеризуется соотношением "морфология-плотность" [5–7]. Физические механизмы, ответственные за существование этого эффекта, включают приливное взаимодействие галактик, обдирание газа вследствие лобового столкновения с межгалактической средой в группах и скоплениях

галактик, выметание газа посредством звездного ветра от вспышек сверхновых [2,8-13]). Более массивные галактики могут поглотить менее массивные при близком прохождении.

Градиенты свойств звездных населений существуют в dSphs Местной группы ([14-15] и ссылки в них) и dEs спутниках M31: NGC 205, 185, 147 (например, [16-17] и ссылки в этих статьях). Наблюдения показывают, что средняя звездная металличность выше в центральных областях галактик, чем на периферии, а средний возраст - моложе. Наличие градиентов объясняют закономерностями эволюции этих объектов. Величину градиентов можно объяснить, если предположить, что dEs и dSphs были в прошлом маломассивными спиральными [18]. Возможно, такие разрушенные спирали, потярявшие газ и часть звезд, являются результатом столкновения двух или нескольких карликовых галактик [19].

Таблица 1

ОСНОВНЫЕ НАБЛЮДАЕМЫЕ СВОЙСТВА KKs 3 и ESO 269-66

	KKs 3	Ref.	ESO269-66	Ref.
RA(J2000)	2°24'44.4	[4]	13 ^h 13 ^m 09 ^s .1	[25]
Dec.(J2000)	-73°30'51"	[4]	-44°53'24"	[25]
E(B - V)	0.045	[4]	0.093	[25]
Расстояние, Мпк	2.12	[4]	3.82	[25]
Диаметр, кпк	1.5	[4]	2.4	[25]
(V - I), mag	0.77	[24]	1.06	[23]
M_V	-12.3	[24]	-14.4	[25]
M_{HI} , M_{\odot}	$1.1 \cdot 10^5$	[24]	$< 0.9 \cdot 10^5$	[25]
$[Fe/H]_{Z=14 \text{ Gyr}}$, dex	-1.9	[4]	-1.75	[20]

KKs3 и ESO 269-66 существуют в различном окружении, но имеют похожие истории формирования звезд с тремя основными периодами, причем самый древний из них, 10-12 млрд. лет назад, был наиболее интенсивным [4,20,21]. KKs3 является уникальной, очень изолированной dSph в пределах 10 Мпк [4]. ESO 269-66 - близкая соседка гигантской S0 NGC 5128 [22]. Необычность этой dSph состоит в высокой дисперсии металличности ее звезд [22,23]. Основные свойства галактик перечислены в табл. 1 с соответствующими литературными ссылками: экваториальные координаты, цвет-экcess, расстояние до объектов, их диаметры, цвет в международной широкополосной системе Джонсона-Казинса, абсолютная звездная величина в фильтре V, приближенная масса HI и средняя металличность.

2. *О вспышках звездообразования в KKs 3 и ESO 269-66 и формировании шаровых скоплений.* Истории формирования звезд в

ККs 3 и ESO 269-66, изученные в работах [4,20], обобщены в табл.2, где в первом столбце приводится металличность в dex, во втором - интервал по времени в млрд. лет, в третьем - уровень звездообразования (интервал) в

Таблица 2

ДЕТАЛИ ИСТОРИИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ
ККs 3 [4] И ESO 269-66 [20]

[Fe/H]	T	SFR	M_{gas}
ККs 3			
-2.36	12-14	$0.34e-03 \div 4.47e-03$	$4.12e+06$
-1.74	12-14	$0.35e-03 \div 1.37e-02$	$1.33e+07$
-1.33	4-6	$0.14e-03 \div 3.39e-03$	$3.25e-06$
-0.72	0.5-1	$0.11e-03 \div 2.83e-03$	$7.37e+05$
-0.72	1.5-2	$0.21e-03 \div 8.05e-03$	$1.96e+06$
ESO 269-66			
-1.74	12-14	$2.55e-03 \div 10.35e-03$	$6.50e+06$
-1.33	12-14	$3.00e-03 \div 2.08e-01$	$1.74e+08$
-0.72	1.5-2	$7.88e-04 \div 4.43e-03$	$8.65e+05$
-0.72	2-4	$6.90e-04 \div 9.79e-03$	$9.07e+06$
-0.72	4-6	$1.24e-03 \div 9.45e-03$	$8.17e-06$
-0.41	1.5-2	$2.70e-03 \div 1.12e-01$	$2.73e+07$
0.18	0-0.5	$1.30e-03 \div 6.70e-02$	$1.64e+07$

M_{\odot}/yr , в четвертом - сформированная масса звезд в M_{\odot} . Из таблицы видно, что в галактиках было по несколько вспышек звездообразования. Несмотря на разное число вспышек и различие масс звезд, образующихся в разные периоды в двух галактиках, можно заметить общие черты: 1) первые вспышки, происходившие в период примерно 2 млрд. лет после зарождения Вселенной, были наиболее мощными; 2) за ними следовали менее интенсивные события в период 2-6 млрд. лет назад; 3) и, наконец, последние периоды звездообразования, которые были примерно 1 млрд. лет назад, вывели из галактик остатки газа. В настоящее время молодые области звездообразования в объектах не наблюдаются. Средние металличности и диапазоны металличности звезд разного возраста, наблюдаемых в ККs 3 и ESO 269-66, согласно результатам моделирования истории звездообразования, пропорциональны массам галактик, т.е. количеству газа, задействованного в процессе звездообразования. В ESO 269-66 средняя металличность звезд выше и диапазон по металличности шире: $[Fe/H] = -1.8 \div 0.2$ dex для ESO 269-66, и $[Fe/H] = -2.4 - 0.7$ dex для ККs 3.

Возраст и металличность центральных шаровых скоплений в ККs 3 и ESO 269-66, $T = 12.61 \pm 1$ млрд. лет, $[Fe/H] = -1.5, -1.55 \pm 0.2$ dex [26], попадают в интервалы, соответствующие двум наиболее ранним периодам звездообра-

зования в галактиках. Пользуясь данными табл.2, можно подсчитать, какая доля звезд с металличностью $[Fe/II] \sim -1.6$ dex содержится в шаровых скоплениях. Примерно 57% и 27% звезд в ККз 3 и ESO 269-6, соответственно, имеют $[Fe/II] \sim -1.6$ dex. Абсолютные величины шаровых скоплений в ККз 3 и ESO 269-66 составляют $M_v = -8^m.48$ и $M_v = -9^m.9$, соответственно. Принимая среднее отношение массы к светимости звезд в шаровых скоплениях $M/L = 3$, массы шаровых скоплений в ККз 3 и ESO 269-66 составляют $6.33e+05 M_\odot$ и $2.34e+06 M_\odot$, соответственно. Таким образом, шаровые скопления содержат примерно 4% и 40% всех звезд в ККз 3 и ESO 269-66, соответственно, с возрастом 12-14 млрд. лет и $[Fe/II] \sim -1.6$ dex. Принимая во внимание окружение карликовых галактик, можно предположить, что изолированная ККз 3 потеряла в процессе эволюции в 10 раз меньший процент звезд с возрастом порядка возраста Вселенной, чем ESO 269-66, находящаяся вблизи гигантской SO NGC 5128 в центральной области группы галактик Цеттавр А.

3. *Распределение красных и голубых звезд в ККз 3 и ESO 269-66.* В статье [23] было показано, что звезды, находящиеся в пределах радиусов ~ 47 пк вокруг центров шаровых скоплений в ККз 3 и ESO 269-66, имеют систематически более голубые цвета (низкие металличности), чем в среднем звезды остальных частей галактик. Ситуация чрезвычайно похожая в двух галактиках, несмотря на разное расстояние до них, и на то, что ширина ветвей красных гигантов (RGB), обусловленная разбросом звезд по металличности и возрасту у ККз 3 и ESO 269-66, разная. Необходимо отметить, что в ККз 3 и в ESO 269-66 на снимках HST видны только звезды RGB и асимптотических ветвей гигантов (AGB). На уровне $M_v \geq -3.5 \pm 0.1$ процент детектирования таких звезд на данных снимках HST близок к 100%, согласно проведенным экспериментам "искусственные звезды" [4,20]. В ESO 269-66 дисперсия цветов звезд ($V-I$) на уровне абсолютной звездной величины в фильтре I системы Джонсона-Казинса $M_v = -3.5 \pm 0.1$ составляет $\sigma(V-I) = 0^m.19$ [23]. Для ККз 3 эта величина составляет $\sigma(V-I) = 0^m.08$ [26].

Интересно проверить, как распределены по телу галактик звезды в голубой и красной частях диаграммы "цвет-звездная величина" (CMD). Способ деления звезд на голубые и красные иллюстрирован на рис.1. Условной разделительной линией служит часть изохроны [27] с металличностью $Z = 0.0004$, возрастом I Гуг и содержанием гелия $Y = 0.26$. Следует отметить, что распределение звезд по цвету на CMD подвержено так называемому эффекту вырождения "возраст-металличность". Так, звезды более молодого возраста, но большей металличности могут оказаться голубее звезд с меньшей металличностью. но более старым возрастом. Поэтому судить о возрасте и металличности

представителей простых звездных населений по их цветам можно только в вероятностном смысле.

Из 36763 звезд ESO 269-66, фотометрия которых была выполнена и представлена на рис.1, для последующего анализа распределения по плоскости галактики были выделены 5753 красных и 3389 голубых звезд с низкими фотометрическими ошибками, полнотой обнаружения $\sim 100\%$ и $M_i < -3^m$. Способ выделения красных и голубых звезд иллюстрирован на рис.1.

CMD KKs 3 (рис.1) содержит 22707 звезд. Из них были выделены 632 красных и 1032 голубых звезд способом, представленным на рис.1. Это звезды

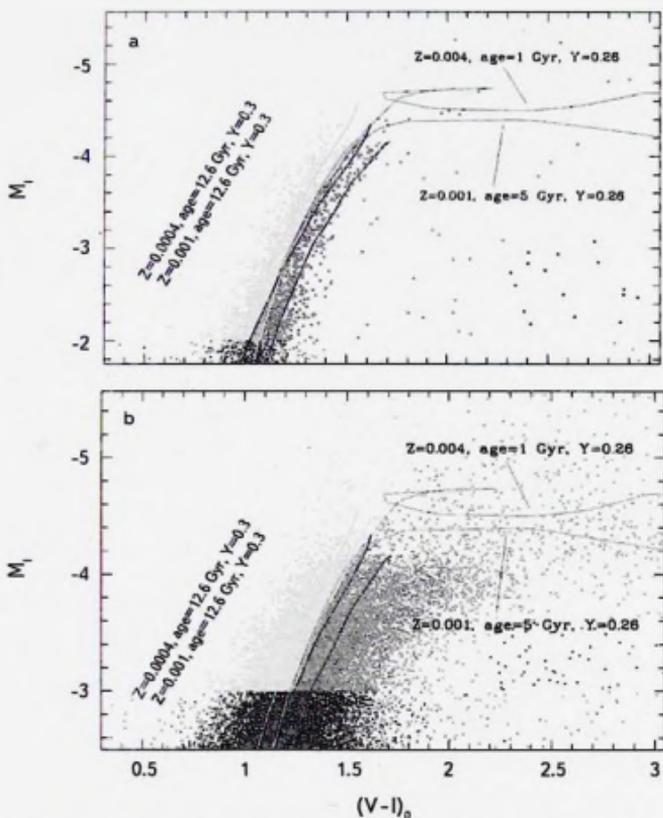


Рис.1. Диаграммы "цвет-звездная величина" для KKs 3 (a) и ESO 269-66 (b). Голубые звезды (светло-серые точки) и красные звезды (темно-серые точки) были отобраны так, как показано на рисунках.

с низкими фотометрическими ошибками, полнотой обнаружения 100% и $M_i < -2^m$. Глубина отбора разная для двух галактик и обусловлена разной фотометрической глубиной диаграмм в основном вследствие разного расстояния до объектов.

4. *Профили плотности звезд.* Для построения профилей звездной плотности для KKs 3 и ESO 269-66, мы использовали результаты звездной фотометрии и выделили из общей массы голубые и красные звезды с малыми фотометрическими ошибками и полнотой обнаружения 100%, как

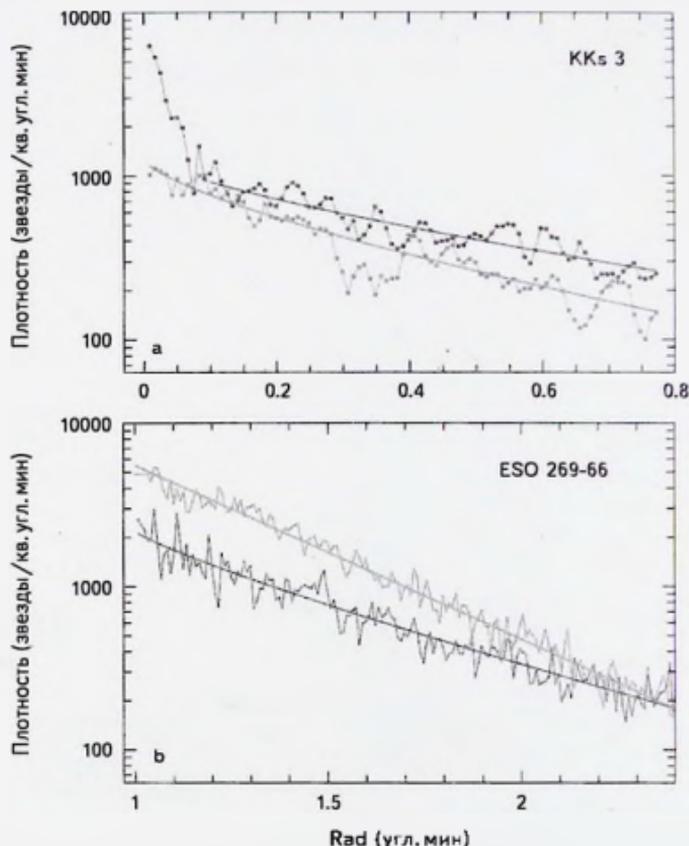


Рис.2 Профили поверхностной плотности для голубых (темно-серый) и красных (светло-серый) звезд в KKs 3 (а) и ESO 269-66 (б) с наложенными моделями Серсика. Вклад фона Галактики (-) звезда/кв.угл.мин) был вычтен из каждой точки профилей.

было описано в предыдущем разделе. Далее, мы разделили двумерное распределение звезд по поверхности галактики на ячейки размером 0.5 угл. с и подсчитывали число звезд, содержащихся в каждой ячейке. По результатам такого подсчета и последующего вычитания фона вокруг галактик были построены профили звездной плотности ККs 3 и ESO 269-66.

Азимутально-усредненные распределения звездной плотности в кольцах вокруг центров галактик, совпадающих с центрами шаровых скоплений, представлены на рис.2. Видно, что голубые звезды в ККs 3 и ESO 269-66 (то есть статистически более старые и низкометаллические) показывают более пологие профили плотности. Красные звезды более сконцентрированы к центрам галактик.

Для моделирования формы профилей плотности звезд в зависимости от радиуса галактик r , мы использовали функцию Серсика [28]:

$$I(r) = I_0 \cdot e^{-v_n (r/r_e)^n},$$

где I_0 - центральная интенсивность, r_e - эффективный радиус, n - положительное действительное число, показывающее степень кривизны профиля, v_n - константа, выбираемая так, чтобы в пределах эффективного радиуса излучалась половина полной светимости [29]:

$$v_n \sim 2n \left[\frac{1}{3} + \frac{4}{405n} + \frac{46}{25515n^2} \right].$$

В единицах поверхностной яркости это будет:

$$\mu(r) = \mu_0 + \frac{2.5v_n}{\ln 10} \left(\frac{r}{r_e} \right)^n,$$

где μ_0 - центральная поверхностная яркость. Параметры функции Серсика, подобранные нами для распределений красных и голубых звезд в ККs 3 и ESO 269-66, приведены в табл.3, где SD_{centr} - центральная поверхностная

Таблица 3

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ СЕРСИКА [28,29]

Галактика	$\log SD_{centr}$ [stars/arcmin ²]	r_e [arcmin]	n
ККs3			
Голубые звезды	3.12 ± 0.08	4.82:	1.38:
Красные звезды	3.10 ± 0.04	3.49 ± 1.13	1.41 ± 0.16
ESO 269-66			
Голубые звезды	3.34 ± 0.03	3.24 ± 0.46	1.18 ± 0.08
Красные звезды	3.74 ± 0.03	1.71 ± 0.10	1.00 ± 0.05

плотность, r_{eff} - эффективный радиус, n - параметр формы профиля. Видно, что согласно измеренным параметрам, эффективные радиусы распределений голубых звезд больше, чем красных. Заметим, однако, что для относительно видная глазом на рис.2 тенденция, в случае KKs 3 менее ярко выражена и труднее моделируемая, так как плотность звезд в этой галактике гораздо меньше, чем в ESO 269-66. В случае голубых звезд в KKs 3, мы смогли дать лишь оценку параметров функции Серсика r_{eff} и n . Они даны в табл.3 с двоякими без указания ошибок.

5. Заключение. Предпринятое в настоящей работе исследование распределения голубых и красных звезд в двух dSph KKs 3 и ESO 269-66, существующих в разном окружении, показало, что обе галактики показывают градиенты звездных популяций, а именно, голубые более старые и низкометаллические звезды имеют более пологий профиль плотности, чем красные более молодые и высокометаллические звезды. Таким образом, как и в массивных спиральных галактиках, на окраинах двух карликовых преобладают старые низкометаллические звезды. Остатки первых наиболее мощных вспышек звездообразования присутствуют в центрах галактик в виде шаровых скоплений, которые вмещают 4% и 40% звезд в KKs 3 и ESO 269-66, соответственно, с металличностью порядка $[Fe/H] = -1.5 - -1.6$ dex и возрастом 12-14 млрд. лет. Значительная часть звезд, возникших в центральных звездных вспышках, была потеряна. Шаровые скопления тоже теряли звезды. Как было показано в [26], во внешних частях скопления в KKs 3 в пределах приливного радиуса наблюдается усиление яркости звезд, которое составляет примерно 10% от полной светимости скопления. В этом месте профиль яркости скопления значительно отклоняется от закона King [30]. Очевидно, ESO 269-66 в ходе эволюции потеряла более значительный процент звезд, чем изолированная KKs 3. К сожалению, на основании только фотометрических данных не удастся дать большую детализацию процесса звездообразования в KKs 3 и ESO 269-66 и судить о причинах потери звезд. Спектроскопия высокого разрешения шаровых скоплений и отдельных звезд в dSphs в будущем поможет понять закономерности формирования и эволюции ядерных звездных скоплений и их галактик-хозяев.

Исследование структурных и фотометрических свойств звездных подсистем в dSph галактиках выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №14-12-00965).

GRADIENTS OF METALLICITY AND AGE OF STARS IN DWARF SPHEROIDAL GALAXIES KKS 3 AND ESO 269-66

M.E.SHARINA, L.N.MAKAROVA, D.I.MAKAROV

We compare properties of stellar populations for globular clusters and field stars in two dwarf spheroidal galaxies (dSphs): ESO 269-66, a close neighbour of the giant S0 NGC5128, and KKS 3, one of the few truly isolated dSphs within 10 Mpc. Star formation histories of the galaxies are known from previous studies according deep stellar photometry results using Hubble Space Telescope (HST) images. Age and metallicity for nuclear star clusters in KKS 3 and ESO 269-66 are known from literature spectroscopic studies: $T = 12.6$ Gyr, $[Fe/H] = -1.5$ and -1.55 dex. We analyse surface density profiles using the Sersic law of low and high metallicity (blue and red) stars in KKS 3 and ESO 269-66. We argue that 1) the density profiles of red stars are steeper than that of blue stars, that evidences in favour of metallicity and age gradients in the galaxies; 2) globular clusters in KKS 3 and ESO 269-66 contain approximately 4 and 40 percent of all stars with $[Fe/H] = -1.5 \div -1.6$ dex and age 12-14 Gyr, correspondingly. Therefore, globular clusters are relics of the first powerful star forming bursts in the central regions of the galaxies. KKS 3 has lost a smaller percentage of its old low-metallicity stars than ESO 269-66 probably thanks to its isolation.

Key words: *galaxies: dwarf - galaxies: star clusters - galaxies: individual: KKS 3, ESO 269-66*

ЛИТЕРАТУРА

1. *B.Binggeli*, in ESO/OHP Workshop on Dwarf Galaxies, eds. G.Meylan, P.Prugniel, ESO, Garching, p.123, 1994.
2. *E.K.Grebel, J.S.Gallagher III, D.Harbeck*, *Astron. J.*, **125**, 1926, 2003.
3. *I.D.Karachentsev, V.E.Karachentseva, M.E.Sharina*, in IAU Colloq. 198, eds. H.Jerjen, B.Binggeli, Near-field Cosmology with Dwarf Elliptical Galaxies, Cambridge Univ. Press, Cambridge, p.105, 2005.
4. *I.D.Karachentsev, L.N.Makarova, D.I.Makarov et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **447**, L85, 2015.
5. *E.Hubble, M.L.Humason*, *Astrophys. J.*, **74**, 43, 1931.
6. *J.Einasto, E.Saar, A.Kaasik et al.*, *Nature*, **252**, 111, 1974.

7. *A.Dressler*, *Astrophys. J.*, **236**, 351, 1980.
8. *J.E.Gunn, J.R.I.Gott*, *Astrophys. J.*, **176**, 1, 1972.
9. *A.V.Zasov, V.E.Karachentseva*, *Sov. Astron. Lett.*, **5**, 137, 1979.
10. *A.Dekel, J.Silk*, *Astrophys. J.*, **303**, 39, 1986.
11. *A.Ferrara, E.Tolstoy*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **313**, 291, 2000.
12. *O.Y.Gnedin*, *Astrophys. J.*, **589**, 752, 2003.
13. *A.Boselli, G.Gavazzi*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **118**, 517, 2006.
14. *D.Harbeck et al.*, *Astron. J.*, **122**, 3092, 2001.
15. *A.W.McConnachie*, *Astron. J.*, **144**, 4, 2012.
16. *T.J.Davidge*, *Astron. J.*, **130**, 2087, 2005.
17. *M.E.Sharina, V.L.Afunasiev, T.H.Puzia*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **372**, 1259, 2006.
18. *J.Kormendy, R.Bender*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **198**, 2, 2012.
19. *P.Volsanen, S.Barway, Z.Randriamanakoto*, *Astrophys. J. Letters*, **797**, 2014.
20. *L.Makarova et al.*, *Proceedings IAU Symposium 235: Galaxy Evolution across the Hubble Time*, Eds. F.Combes, J.Palous, **320**, 2007.
21. *D.Crnojević, M.Rejkuba, E.K.Grebel et al.*, *Astron. Astrophys.*, **530**, 58, 2011.
22. *I.D.Karachentsev et al.*, *Astron. J.*, **133**, 504, 2007.
23. *M.E.Sharina et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **384**, 1544, 2008.
24. *I.D.Karachentsev, A.Yu.Kniazev, M.E.Sharina*, *Astron. Nachr.*, **336**, 707, 2015.
25. *I.D.Karachentsev, D.I.Makarov, E.I.Kaisina*, *Astron. J.*, **145**, 101, 2013.
26. *M.E.Sharina, V.V.Shimansky, A.Y.Kniazev*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **471**, 1955, 2017.
27. *G.Bertelli, L.Girardi, P.Marigo et al.*, *Astron. Astrophys.*, **484**, 815, 2008.
28. *J.L.Sersic*, *Atlas de Galaxias Australes*, Cordoba, Argentina: Observatorio Astronomico, 1968.
29. *L.Ciotti, G.Bertin*, *Astron. Astrophys.*, **352**, 447, 1999.
30. *I.King*, *Astron. J.*, **67**, 471, 1962.