

УДК 524.7-323.3; 524.7: 520.82; 524.7:524.3

ЯРЧАЙШИЕ ЗВЕЗДЫ ИРРЕГУЛЯРНЫХ И МАЛОМАССИВНЫХ СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК

© 2021 Н. А. Тихонов^{1*}, О. А. Галазутдинова¹, Г. М. Каратаева²,
О. Н. Шолухова¹, А. Валчева³, В. Д. Иванов⁴, П. Л. Недялков³

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Астрономический институт Санкт-Петербургского государственного университета, Старый Петергоф, 198504, Россия

³Софийский университет, BG-1164, София, Болгария

⁴Европейская Южная Обсерватория, D-85748, Германия

Поступила в редакцию 3 сентября 2021 года; после доработки 14 сентября 2021 года;
принята к публикации 14 сентября 2021 года

На основе фотометрии 150 близких галактик по архивным снимкам космического телескопа им. Хаббла (HST) в фильтрах *F606W* или *F555W* (*V*) и *F814W* (*I*) проведен поиск корреляции между светимостями ярчайших звезд и их родительских галактик. В представленную выборку включены только галактики с процессами звездообразования (SF) с известными расстояниями, для определения которых мы использовали TRGB-метод. В каждой галактике на диаграмме Гершпрунга–Рессела было выбрано по три ярчайшие голубые и красные звезды, средняя светимость которых сравнивалась со светимостью родительской галактики. Полученные результаты показывают, что для голубых и красных звезд иррегулярных и маломассивных спиральных галактик между светимостями звезд и галактик существуют линейная зависимость, которую можно использовать для определения расстояний до галактик. Мы установили, что в 31 карликовой галактике нашего списка $M_B > -13^m$ яркие массивные звезды ($M_V(BS) < -7^m$) отсутствуют, что можно объяснить физическими условиями, препятствующими их рождению. Для галактик средней светимости $-18^m < M_B < -13^m$ наблюдается асимметрия в распределении численности галактик относительно линейной зависимости, что указывает на увеличение числа галактик, имеющих звезды повышенной яркости.

Ключевые слова: галактики: расстояние и красное смещение — галактики: фотометрия — галактики: звездное население

1. ВВЕДЕНИЕ

В спиральных и иррегулярных галактиках идут непрерывные процессы звездообразования, иногда очень активные. Бурное звездообразование чаще всего наблюдается у галактик при их взаимодействии друг с другом на близких расстояниях. Распределение масс молодых звезд определяется функцией Солпитера (Salpeter 1955), но в данной работе нас интересуют только самые массивные и ярчайшие из них. В настоящее время имеется возможность по снимкам космического телескопа им. Хаббла (HST) изучить звездный состав многих галактик, выделить в них ярчайшие звезды и найти корреляцию между параметрами таких звезд и родительских галактик. Этот вопрос не является простым, поскольку галактики сильно различаются по морфологии, светимостям и массам, а кроме

того имеют различную металличность газа, из которого рождаются звезды, или могут входить в состав различных пространственных структур, групп или скоплений, что влияет на процессы звездообразования. В данной работе мы рассматриваем только корреляцию между светимостями ярчайших звезд и их родительских галактик.

Интерес к ярчайшим звездам вызван тем, что в современной астрофизике не решен вопрос о верхнем пределе массы звезды. Массивные звезды очень быстро эволюционируют и сложно найти такие звезды на главной последовательности в момент их наивысшей светимости. Эволюция звезды зависит от ее первоначальной массы. Модели эволюции звезд предполагают, что первоначальные массы звезд могут достигать до $500M_{\odot}$ (Yusof et al. 2013) и более, но пока что обнаружены звезды значительно меньшей массы (Crowther et al. 2010, Tehrani et al. 2019, Bestenlehner et al. 2020).

*E-mail: ntik@sao.ru

Теория предсказывает, что наиболее яркие и массивные звезды должны иметь низкую металличность, то есть их рождение должно происходить в карликовых галактиках с низкой металличностью и бурным звездообразованием. Как правило, такие галактики являются взаимодействующими. Из наблюдений оказывается, что большинство обнаруженных ярких массивных звезд находится в спиральных галактиках (Milky Way, M 31, M 33), хотя такие звезды найдены и в карликовых иррегулярных галактиках, например в NGC 6822, SMC, DDO 68, IC 10 (Wofford et al. 2020). Ответить на вопрос о соответствии между теоретическими моделями и реальными наблюдениями можно только на основе поиска и исследования ярких массивных звезд в разнообразных по физическим параметрам галактиках.

Интерес к корреляции между светимостью звезд и родительских галактик состоит также в проверке возможности использования ярчайших звезд для определения расстояний до галактик. Этот метод был предложен Лундмарком в 1919 г. (Lundmark 1919), но только в 1936 г. Хаббл определил средние светимости ярчайших звезд для 145 близких галактик (Hubble 1936). Активно метод стал использоваться в 1960–1990-х годах (Holmberg 1950, Sandage and Tammann 1974, de Vaucouleurs 1978, Humphreys 1983, Karachentsev and Tikhonov 1994). Ярчайшие красные сверхгиганты также использовались в качестве стандартных свечей для определения расстояний до галактик (Humphreys 1983, Karachentsev and Tikhonov 1994). Предполагалось, что красные сверхгиганты могут быть более удобны для этой цели, поскольку их можно легко отличить от компактных молодых скоплений по показателю цвета.

В настоящее время точные измерения расстояний до галактик, находящихся не дальше 25 Мпк, получают с помощью метода цефеид (Kennicutt et al. 1998) или TRGB-методом (Tip of Red Giant Branch) (Lee et al. 1993) на основе снимков космического телескопа Хаббла. Для метода цефеид требуется серия снимков, разделенных по времени и полученных в нескольких фильтрах, а для TRGB-метода необходимо получить снимки только в двух фильтрах — $F606W$ ($F555W$) и $F814W$, поэтому методом цефеид измерено существенно меньше галактик, чем TRGB-методом.

Для более далеких галактик используют другие методы. Метод Талли–Фишера (Tully and Fisher 1977), который широко применяется для спиральных галактик, имеет точность примерно $\pm 0^m 4$ (Willick 1996). Метод сверхновых звезд SNIa имеет низкую точность, но Riess et al. (2016) ее повысили с $\pm 0^m 65$ до $\pm 0^m 12$ путем введения дополнительных поправок. В работе Antipova et al. (2020) указывается точность этого метода в

$\pm 0^m 18$. Проблема этого метода состоит в том, что сверхновые вспыхивают редко и наблюдаются в ограниченном числе галактик. Можно констатировать, что для удаленных галактик сегодня не существует простого и точного метода измерения расстояний, аналогичного TRGB-методу.

Запуск космического телескопа HST, создание программ автоматической фотометрии звезд (DAOPHOT (Stetson 1987) и DOLPHOT (Dolphin 2016)) и появление TRGB-метода для определения расстояний до галактик отодвинули ранее использовавшийся метод ярчайших звезд на задний план из-за его более низкой точности по сравнению с TRGB-методом. До 90-х годов фотометрия звезд проводилась по фотопластинкам, что приводило к большим ошибкам, а калибровка метода ярчайших звезд была получена только по нескольким галактикам, расстояния до которых были известны с низкой точностью. В данной работе рассматриваются возможности повышения точности метода, исходя из преимуществ автоматической фотометрии с помощью DAOPHOT (Stetson 1987) и DOLPHOT (Dolphin 2016) плотных звездных полей по большим наборам данных, полученных на космическом телескопе им. Хаббла. Большая полнота выборки обеспечивает статистически более значимый результат при определении расстояний таким образом. Кроме того, введение в зависимость между светимостью галактик и их ярчайших звезд дополнительных параметров для учета металличности и возраста галактик может уменьшить «внутренний» разброс значений. Подобные улучшения могут повысить точность этого простого метода, и он найдет свою область применения. Мы полагаем, что метод будет востребован для спиральных и иррегулярных галактик за пределами 20–25 Мпк, где красные гиганты не видны на снимках телескопа HST, а также для очень маломассивных карликовых галактик, в которых наблюдается только небольшое количество голубых звезд.

2. ПОИСК ЯРЧАЙШИХ ЗВЕЗД В ГАЛАКТИКАХ

Для сравнения светимостей звезд и родительских галактик нам необходимо найти в галактиках ярчайшие звезды. На первый взгляд, задача кажется несложной, поскольку яркие массивные звезды (гипергиганты) хорошо выделяются на фоне других объектов. Однако в большинстве карликовых галактик таких звезд просто нет. Время жизни очень массивных объектов, которые в этот период и являются самыми яркими звездами в галактиках, чрезвычайно мало (1–3 миллиона лет), а вероятность их появления в маломассивных галактиках невелика. Согласно закону распределения масс звезд Salpeter (1955), при рождении одной звезды

массой $100M_{\odot}$ должны появиться несколько тысяч звезд меньших масс. Даже в спиральных галактиках с многочисленными областями звездообразования (M31, M33, NGC 2403) известно менее 10 ярких звезд с массами $150\text{--}300M_{\odot}$ (Richardson and Mehner 2018, Wofford et al. 2020).

Вторая причина, затрудняющая выделение ярчайших звезд других галактик, состоит в наложении фоновых звезд нашей Галактики на исследуемые поля. В подавляющем большинстве звезды фона имеют показатель цвета $(V - I) = 0^m8 - 1^m2$, но иногда покрасневшие из-за поглощения света яркие голубые звезды галактик попадают в этот интервал показателей цвета, что усложняет их поиски. В качестве примера можно назвать малометаллическую карликовую галактику DDO 68, где кроме яркой массивной LBV-звезды (Luminosity Blue Variable) видна более яркая голубая фоновая звезда (Tikhonov et al. 2021). То есть вероятность попадания объектов фона в выборку кандидатов в массивные звезды оказывается далеко не нулевой.

Яркие массивные звезды чаще всего рождаются в скоплениях (de Wit et al. 2004), поэтому поиски ярчайших звезд следует проводить в молодых звездных скоплениях, но там большая концентрация ярких звезд затрудняет их исследование. О сложности выявления ярких звезд среди других объектов галактики говорит тот факт, что Sandage (1958) показал, что за отдельные звезды в M101 Э. Хаббл принимал звездные скопления и II области. Использование снимков космического телескопа Хаббла позволяет значительно повысить угловое разрешение, но для удаленных галактик даже этих снимков бывает недостаточно. Для выявления ярких гипергигантов можно воспользоваться свойством переменности их блеска из-за нестабильности звезд этого типа, а также присутствием сильной эмиссионной линии $H\alpha$ в спектрах. Однако такое детальное изучение звездного состава потребует длительного исследования каждой галактики, поэтому задача поиска самых ярких звезд в нескольких сотнях галактик окажется невыполнимой.

В представляемой работе мы использовали снимки HST-телескопа, которые позволяли выделять яркие звезды среди других звезд, проводить фотометрию и определять блеск и показатель цвета. По этим параметрам звезду можно найти на CM-диаграмме звезд изучаемой галактики. Звезды, отобранные по высокой светимости и малому показателю цвета, просматривались на снимках с различными уровнями визуализации. Это позволило исключить очень компактные звездные скопления, которые имели практически звездный фотометрический профиль изображения. Компактные II области выявлялись по малому показателю цвета и различному фотометрическому

профилю в фильтрах $F814W$ и $F606W$. Отобранные таким способом звезды составили наш список ярчайших голубых звезд спиральных и иррегулярных галактик.

При поиске в галактиках ярких красных звезд в список могут попасть красные карлики нашей Галактики. Их выявление представляло сложность в работе. Один из способов определения типа звезд состоял в построении их распределения по телу галактики. Звезды галактики показывали концентрацию к телу галактики, а фоновые звезды были распределены равномерно. Второй способ состоял в сравнении положений ярких красных звезд, вероятных массивных звезд галактики, относительно областей звездообразования. Более вероятно, что рождение яркой массивной звезды произойдет в области звездообразования. Возможно, что можно решить вопрос о разделении далеких и близких звезд, если использовать измерения собственных движений звезд полученных телескопами Gaia (Wgown 2021). Но пока что, несмотря на способы отбора, в нашем списке ярких красных звезд возможно присутствие красных карликов нашей Галактики. В некоторых галактиках яркие красные звезды отсутствовали, поэтому в нашем списке число галактик с голубыми и красными звездами разное.

3. СПИСОК ГАЛАКТИК И РАССТОЯНИЕ ДО НИХ

Для поиска корреляции между светимостями галактик и их ярчайших звезд мы использовали архивные снимки HST WFPC2, WFC3 и ACS в фильтрах $F435W$, $F555W$, $F606W$ и $F814W$ (далее в статье B , V , R и I соответственно), полученные за много лет его работы по различным программам, главным образом по заявкам определения расстояний до галактик. 150 галактик нашей выборки распределены в интервале светимостей M_B от -19^m до -8^m . Мы не включили в нашу выборку очень близкие галактики (M31, M33 и другие), поскольку их угловые размеры намного превышали размеры поля ACS-камеры HST, а составлять мозаику из многих снимков не являлось целью данной работы. Для некоторых галактик мы использовали два поля, чтобы охватить все яркие звезды таких галактик, но результаты в подавляющем большинстве случаев получены по фотометрии одного поля (рис. 1. Те галактики, у которых на HST-снимки попадала только часть галактики с яркими звездами, мы не рассматривали. В выборке преобладают иррегулярные и спиральные галактики, с расстояниями от 5 до 15 Мпк. Полный список представлен в таблице 1¹ и будет пополняться.

¹https://www.sao.ru/hq/dolly/bs/table_1_150.pdf

Таблица 1. Параметры исследованных галактик.* Полный список галактик доступен по адресу: https://www.sao.ru/hq/dolly/bs/table_1_150.pdf

Number	Galaxy	RA (J 2000)	Dec (J 2000)	$(m - M)$	D , Мpc	A_B	$E(V - I)$	B_t	M_B
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
1	AGC 102728	00 00 21.4	+31 01 18.7	29.73	8.84	0.17	0.057	19.45	-10.45
2	ESO 349-031	00 08 13.5	-34 34 43.6	27.21	2.77	0.04	0.015	15.69	-11.56
3	NGC 24	00 09 56.4	-24 57 49.8	29.35	7.42	0.07	0.024	12.08	-17.34
4	UGC 288	00 29 04.1	+43 25 50.7	29.17	6.82	0.28	0.138	16.00	-13.45
5	IC 1574	00 43 03.7	-22 14 51.4	27.85	3.73	0.06	0.019	14.47	-13.44
6	DDO 6	00 49 49.7	-21 00 47.1	27.52	3.19	0.06	0.021	14.99	-12.59
7	IC 1613	01 04 47.8	+02 07 03.6	24.48	0.79	0.09	0.030	10.01	-14.56
8	UGC 685	01 07 22.4	+16 41 02.0	28.27	4.51	0.21	0.071	14.37	-14.11
9	KKH 6	01 34 51.6	+52 05 30.0	27.91	3.81	1.27	0.434	17.00	-12.18
10	PGC 6430	01 45 03.9	-43 35 54.9	28.30	4.57	0.06	0.020	12.80	-15.55

* Координаты галактик (RA и Dec), величины поглощения света в направлении на галактики (A_B и $E(V - I)$) и видимые величины галактик (B_t) взяты из баз данных NED (<https://ned.ipac.caltech.edu/>) и HyperLEDA (Макагов et al. 2014), а модули расстояний ($m - M$), расстояния до галактик (D) и абсолютные светимости галактик (M_B) получены нами.

Для трех галактик имелись снимки только в фильтрах $F435W$ и $F814W$, и мы поступили следующим образом. На основе изображений аналогичных по типу галактик, для которых снимки были сделаны в фильтрах $F435W$, $F606W$ и $F814W$, мы определили зависимость между показателями цвета ($B - I$) и ($V - I$) и получили нужные нам для этих галактик значения в фильтре V .

Для части галактик выборки (отсутствующих в списке из работы Tikhonov (2018)) расстояния получены впервые. Они определялись по красным гигантам с помощью TRGB-метода (Lee et al. 1993)). При определении расстояний до галактик мы старались использовать снимки не центральных областей, где находятся яркие звезды и существенно повышен фон, а изображения периферии галактик, где звездное население состоит из красных гигантов и AGB-звезд. Для калибровки применялись зависимости из работы Lee et al. (1993), при определении положения TRGB-скачка использовалась функция Собеля (Madore and Freedman 1995). Поглощение света в направлении на галактики определялось на основе работы Schlafly and Finkbeiner (2011). Для однородности данных мы определили расстояния до галактик выборки с известными расстояниями. Полученные нами значения в пределах ошибок совпадают с измерениями других авторов (Tikhonov 2018).

4. ЗВЕЗДНАЯ ФОТОМЕТРИЯ

Звездная фотометрия HST снимков с камерой ACS выполнялась пакетом программ DAOPHOT II (Stetson 1987; 1994), а при фотометрии снимков галактик с камерой WFC3 использовался пакет программ DOLPHOT 2.0². Фотометрия звезд обеими программами проводилась стандартным образом. Для DAOPHOT II порядок действий описан нами ранее (Tikhonov et al. 2019), а пакет DOLPHOT 2.0 использовался в соответствии с рекомендациями его автора (Dolphin 2016). Принципы фотометрии программами DOLPHOT и DAOPHOT одинаковы, но есть некоторые различия при их использовании. Например, в DAOPHOT в качестве PSF-звезд мы брали одиночные звезды из исследуемых полей, а в DOLPHOT использовалась библиотека PSF-профилей. При измерении положений TRGB-скачков оба метода дают сходные результаты и значимых различий между ними не обнаружено. рис. 2 — CM-диаграмма этой галактики с указанием выбранных звезд.

Процедура фотометрии состояла из предварительного маскирования плохих пикселей, удаления следов космических частиц и дальнейшей

²<http://americano.dolphinssim.com/dolphot/dolphot.pdf>

Таблица 2. Результаты фотометрии ярчайших звезд галактик. Полный список галактик доступен по адресу: https://www.sao.ru/hq/dolly/bs/table_2_150.pdf

Number	Galaxy	m_V^{1B}	$(V - I)^{1B}$	$\langle m_V^{3B} \rangle$	$\langle (V - I)^{3B} \rangle$	m_V^{1R}	$(V - I)^{1R}$	$\langle m_V^{3R} \rangle$	$\langle (V - I)^{3R} \rangle$
1	AGC 102728	24.398	0.101	24.535	0.099	23.333	1.513	24.404	1.583
2	ESO 349-031	20.711	-0.049	21.125	-0.022	21.184	1.529	22.055	1.600
3	NGC 24	22.214	0.085	22.380	0.119	23.671	1.451	24.057	1.493
4	UGC 288	22.914	-0.088	23.209	0.031	24.410	1.668	24.709	1.611
5	IC 1574	22.550	0.290	22.671	0.113	22.084	1.500	22.182	1.503
6	DDO 6	22.441	0.267	22.634	0.244	23.235	2.855	23.566	2.881
7	IC 1613	18.787	0.121	18.774	-0.060	19.297	1.634	19.595	1.575
8	UGC 685	20.401	0.016	21.193	0.045	22.742	1.701	22.992	1.560
9	ККН 6	22.124	0.711	22.689	0.718	22.845	2.566	23.562	2.278

* В столбцах таблицы: m_V^{1B} — видимая величина наиболее яркой голубой звезды, $(V - I)^{1B}$ — ее показатель цвета, $\langle m_V^{3B} \rangle$ — средняя видимая величина трех ярчайших голубых звезд, $\langle (V - I)^{3B} \rangle$ — средний показатель цвета этих звезд, m_V^{1R} — видимая величина наиболее яркой красной звезды, $(V - I)^{1R}$ — ее показатель цвета, $\langle m_V^{3R} \rangle$ — средняя видимая величина трех ярчайших красных звезд и $\langle (V - I)^{3R} \rangle$ — средний показатель цвета этих звезд.

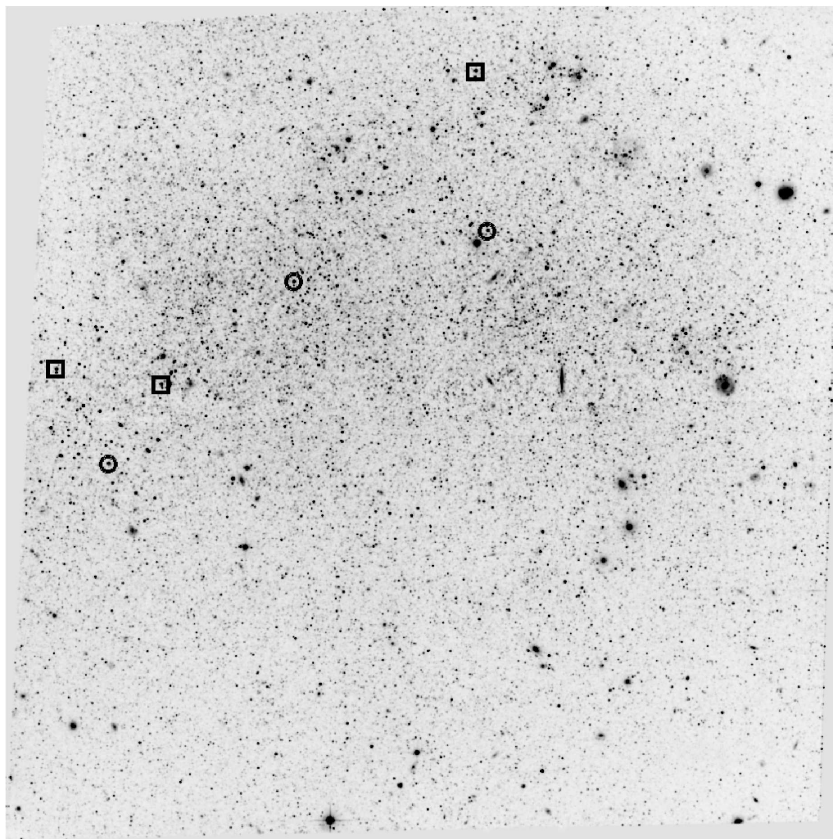


Рис. 1. Изображение галактики Holmberg I, полученное на HST-телескопе в фильтре $F814W$. Кружками отмечены три ярчайшие голубые звезды, а квадратами — три красные. Размер изображения $3'5 \times 3'5$. Север — сверху, восток — справа.

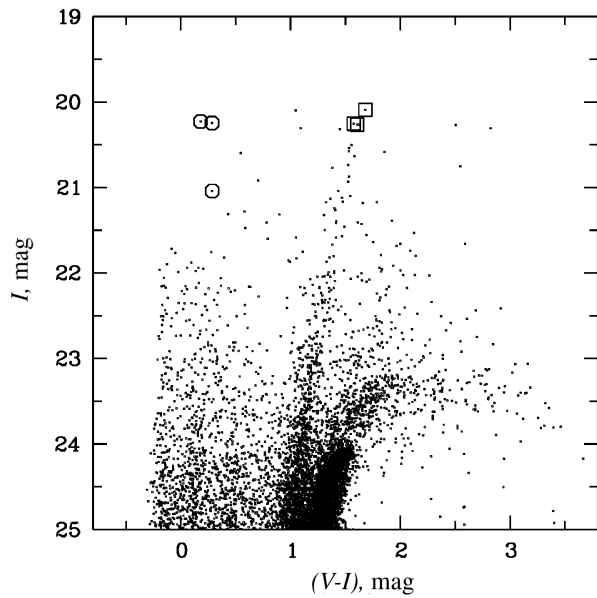


Рис. 2. CM-диаграмма галактики Holmberg I, полученная после фотометрии снимков HST телескопа. Отмечены положения голубых (кружки) и красных (квадраты) звезд.

PSF-фотометрии найденных звезд. Для удаления незвездных объектов: звездных скоплений, далеких или компактных галактик, все звезды проходили селекцию по параметрам «CHI» и «SHARP», которые определяют форму фотометрического профиля каждой измеряемой звезды (Stetson 1987). Профили незвездных объектов отличались от профилей изолированных звезд, выбранных нами в качестве стандартных, что позволило провести такую селекцию со списками звезд, полученных при работе DAOPHOT II и DOLPHOT 2.0. Для нескольких галактик снимки на HST получены с камерой WFPC2. При их фотометрии с помощью DAOPHOT мы следовали рекомендациям Holtzman et al. (1995a; b).

Пример CM-диаграммы с указанием трех ярчайших красных и голубых звезд показан на рис. 2. Результаты фотометрии найденных ярчайших звезд галактик выборки в виде средних звездных величин и показателей цвета приведены в таблице 2³.

5. ГАЛАКТИКИ И ИХ ЯРЧАЙШИЕ ЗВЕЗДЫ

Мы построили диаграммы зависимостей между светимостями галактик M_B и средними светимостями в фильтре V трех ярчайших голубых и красных звезд, $M_V(BS)$ и $M_V(RS)$ соответственно (рис. 3). Видно, что для галактик низкой и средней светимости ($-19^m < M_B < -10^m$ для голубых звезд) и ($-17^m < M_B < -10^m$ для красных) между

указанными величинами существуют линейные зависимости:

$$M_V(BS) = 0.471M_B + 0.059, \sigma = 0.38, \quad (1)$$

$$M_V(RS) = 0.539M_B + 1.854, \sigma = 0.42. \quad (2)$$

Как указывалось выше, наиболее яркие и массивные звезды должны наблюдаться в галактиках с очень низкой металличностью (Yusof et al. 2013). Поскольку низкометаллические галактики могут быть только карликовыми галактиками, у которых процесс звездообразования состоит из отдельных неравномерных вспышек, то у таких галактик должен наблюдаться максимальный разброс светимостей звезд, от ярчайших гипергигантов до нормальных звезд главной последовательности. Однако на диаграмме рис. 3а видно, что в слабых галактиках ($-13^m < M_B < -10^m$) отсутствуют очень яркие голубые звезды. Если рассмотреть эту диаграмму в области более ярких галактик ($-18^m < M_B < -13^m$), то заметно увеличение числа галактик, содержащих звезды повышенной светимости. На это указывает сдвиг точек вниз относительно линейной зависимости (1) (прямая линия на рис. 3а). Более наглядно этот эффект виден на рис. 4, где показаны распределения численности галактик разной светимости относительно указанной выше линейной зависимости (1) для голубых звезд. У галактик низкой светимости ($-13^m < M_B < -10^m$) заметен простой статистический разброс относительно зависимости (1), то есть не видно избытка числа галактик со звездами повышенной яркости. Но у галактик средней светимости ($-18^m < M_B < -13^m$) наблюдается хорошо заметная асимметрия в распределении. Видно увеличение числа галактик, где звезды имеют повышенную яркость относительно зависимости (1). Избыток галактик со звездами повышенной яркости и вызывает наблюдаемую асимметрию распределения.

Данный результат находит простое объяснение. Самые слабые галактики — это галактики без интенсивных процессов звездообразования и не следует ожидать появления в таких галактиках очень ярких звезд. Эти галактики обладают незначительными массами водорода и в процессе звездообразования образуются маломассивные скопления. Поэтому рождение сверхмассивной ярчайшей звезды в такой галактике маловероятно. Более массивные галактики ($-18^m < M_B < -13^m$) имеют достаточное количество водорода, а их металличность все еще низка по сравнению с массивными спиральными галактиками, поэтому можно ожидать появление сверхмассивных звезд именно в таких галактиках.

³https://www.sao.ru/hq/dolly/bs/table_2_150.pdf

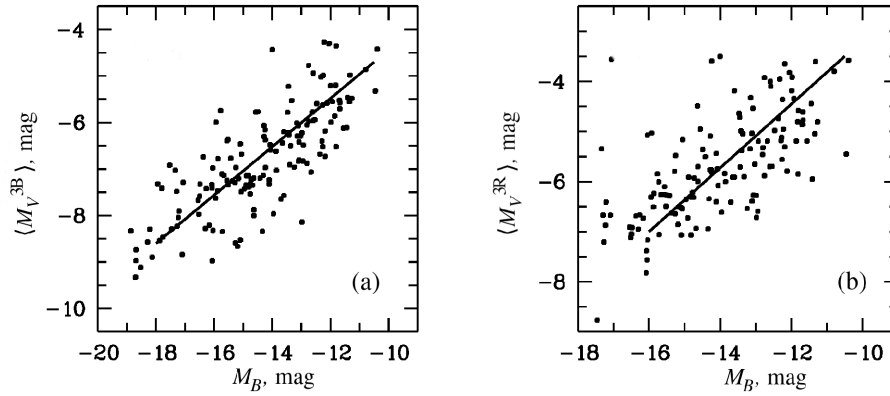


Рис. 3. Диаграммы зависимости между светимостью галактик и светимостью их ярчайших голубых (а) и красных звезд (б). Величинами $M_V(BS)$ и $M_V(RS)$ обозначены средние значения M_V по трем голубым и трем красным сверхгигантам.

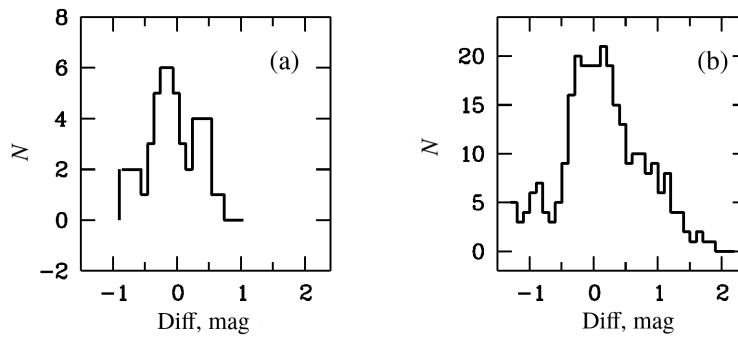


Рис. 4. Распределение численности галактик относительно линейной зависимости для голубых звезд на рис. 3. Самые малые галактики ($M_B > -13^m$) отклоняются от среднего значения только в пределах статистических значений (а). У галактик средней светимости ($-18^m < M_B < -13^m$) в распределении их численности видна асимметрия (б), то есть увеличивается число галактик, голубые звезды которых имеют повышенную до двух величин яркость относительно среднего значения яркости таких звезд.

При активных процессах звездообразования светимость галактик повышается, особенно в голубой области, из-за появления молодых голубых звезд, поэтому при вспышке звездообразования, когда можно ожидать рождение ярких массивных звезд, сама галактика имеет повышенную яркость. Это и видно на диаграмме рис. 4, где асимметрия распределения, то есть появление звезд повышенной яркости наблюдается у галактик с $-18^m < M_B < -13^m$.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На диаграмме рис. 5 показана зависимость между абсолютной светимостью галактик M_B и разностью между видимой звездной величиной галактики B_t и средней видимой величиной трех голубых звезд: $Dmag(GS) = B_t - \langle m_V^{3B} \rangle$. Представленная диаграмма дает возможность по разности величин галактики и звезд вычислить абсолютную светимость галактики M_B и затем определить расстояние до нее. Получены следующие зависимости:

$$B_t - \langle m_V^{3B} \rangle = 0.611M_B + 1.311, \sigma = 0.41 \quad (3)$$

$$M_B = \frac{(B_t - \langle m_V^{3B} \rangle) - 1.311}{0.611}. \quad (4)$$

Мы не нашли заметного изменения разброса величин, что означает отсутствие систематических эффектов. Благодаря высокому угловому разрешению HST, удается надежно исключать из выборки скопления во всем охваченном ею диапазоне расстояний.

Таким образом, на основе фотометрии голубых звезд и интегральной звездной величины галактики можно по уравнению (4) определить абсолютную величину галактики (M_B) и найти значение модуля расстояния:

$$(m - M) = B_t - M_B.$$

По известному модулю определяется расстояние из уравнения: $\lg D = (m - M)/5 + 1$ (пк). Необходи-

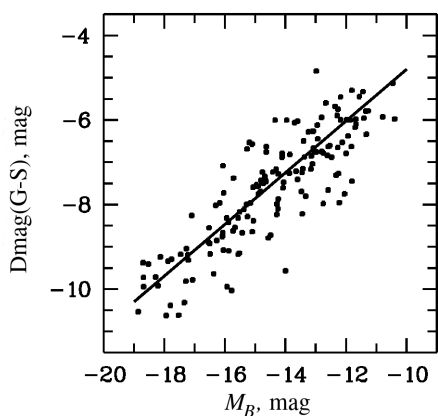


Рис. 5. Диаграмма зависимости между абсолютными величинами галактик и разностью между видимыми величинами галактик и средним значением яркости трех голубых звезд. Диаграмма позволяет определять расстояние до галактик на основе фотометрии их голубых звезд.

мо отметить, что значения B_t и $\langle m_V^{3B} \rangle$ были исправлены за поглощение света в нашей Галактике на основе работы Schlafly and Finkbeiner (2011).

Аналогично голубым можно использовать и красные звезды, однако зависимость имеет более сильное рассеяние точек и точность вычислений расстояния будет хуже. Основное преимущество использования голубых звезд состоит в том, что голубые звезды легче выделить среди массы других звезд, а кроме того, в малых карликовых галактиках с областями звездообразования голубых звезд больше, чем красных, поэтому выбирая голубые звезды, мы повышаем точность измерений.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

На основе фотометрии снимков космического телескопа Хаббла в 150 иррегулярных и маломассивных спиральных галактиках выделены ярчайшие голубые и красные звезды. Для всех галактик выборки TRGB-методом определены расстояния.

На диаграмме светимостей галактик и голубых звезд (рис. 3а) видно, что в слабых галактиках яркие звезды отсутствуют: в 31 самой слабой ($-12^m < M_B < -10^m$) нет ни одной, а в галактиках с более высокой светимостью ($-16^m < M_B < -15^m$) такие голубые звезды есть. Ранее считалось, что появление более ярких звезд в массивных галактиках объясняется только статистическими причинами. Однако наши результаты дают основания говорить о других причинах, связанных с физическими условиями и механизмами образования ярких массивных звезд в галактиках малой массы. Возможно, что в настоящее время вообще ни в каких галактиках нет условий для рождения сверхмассивных звезд. Карликовые галактики имеют слишком малые

массы, а более массивные галактики приобрели за время эволюции повышенную металличность газа, что препятствует образованию сверхмассивных звезд. То есть благоприятные условия для образования таких звезд могли существовать только в начальный период образования галактик.

По результатам фотометрии найдена линейная зависимость:

$$M_B = (B_t - \langle m_V^{3B} \rangle - 1.311) / 0.611,$$

которую можно использовать для определения расстояний до карликовых и удаленных спиральных галактик с ошибкой измерения $0^m 41$. Точность метода можно повысить, если в зависимость (рис. 3) ввести дополнительные параметры. Например, использовать показатели цвета галактик или величины потока в фильтре $H\alpha$, которые указывают на интенсивность процессов звездообразования. Кроме того, можно использовать инфракрасную величину светимости галактик, что более точно определяет значение их массы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензенту и В. Н. Комаровой за ценные замечания и предложения, которые способствовали улучшению содержания статьи.

Работа основана на наблюдениях с космического телескопа Хаббла NASA/ESA, полученных в Научном институте космического телескопа, который управляется AURA, Inc. по контракту № NAS5-26555. Эти наблюдения связаны с заявками 5091, 5375, 5397, 5427, 5915, 5971, 5972, 6431, 6549, 6584, 6695, 6865, 7202, 7496, 8059, 8122, 8192, 8199, 8584, 8601, 9042, 9086, 9162, 9765, 9771, 9774, 9820, 10182, 10210, 10235, 10402, 10433, 10438, 10505, 10523, 10585, 10605, 10696, 10765, 10877, 10885, 10889, 10905, 10915, 10918, 11229, 11307, 11360, 11575, 11718, 11986, 12196, 12546, 12878, 12880, 12902, 12968, 13357, 13364, 13442, 13750, 14678, 15133, 15243, 15275, 15564, 16075.

В настоящей работе были использованы базы данных NED, HyperLEDA.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Национального научного фонда Болгарии в рамках научного проекта № 19-52-18007 и гранта КР-06-Russin-09/2019.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. V. Antipova, D. I. Makarov, and L. N. Makarova, *Astrophysical Bulletin* **75** (2), 93 (2020).
2. J. M. Bestenlehner, P. A. Crowther, S. M. Caballero-Nieves, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **499** (2), 1918 (2020).
3. A. G. Brown, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **59** (1), 59 (2021).
4. P. A. Crowther, O. Schnurr, R. Hirschi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **408** (2), 731 (2010).
5. G. de Vaucouleurs, *Astrophys. J.* **224**, 710 (1978).
6. W. J. de Wit, L. Testi, F. Palla, et al., *Astron. and Astrophys.* **425**, 937 (2004).
7. A. Dolphin, *DOLPHOT: Stellar photometry* (2016), ascl:1608.013.
8. E. Holmberg, *Meddelanden fran Lunds Astronomiska Observatorium Serie II* **128**, 5 (1950).
9. J. A. Holtzman, C. J. Burrows, S. Casertano, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **107**, 1065 (1995a).
10. J. A. Holtzman, J. J. Hester, S. Casertano, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **107**, 156 (1995b).
11. E. Hubble, *Astrophys. J.* **84**, 270 (1936).
12. R. M. Humphreys, *Astrophys. J.* **269**, 335 (1983).
13. I. D. Karachentsev and N. A. Tikhonov, *Astron. and Astrophys.* **286**, 718 (1994).
14. R. C., Jr. Kennicutt, P. B. Stetson, A. Saha, et al., *Astron. J.* **498**, 181 (1998).
15. M. G. Lee, W. L. Freedman, and B. F. Madore, *Astrophys. J.* **417**, 553 (1993).
16. K. Lundmark, *Astronomische Nachrichten* **209** (24), 369 (1919).
17. B. F. Madore and W. L. Freedman, *Astron. J.* **109**, 1645 (1995).
18. D. Makarov, P. Prugniel, N. Terekhova, et al., *Astron. and Astrophys.* **570**, A13 (2014).
19. N. D. Richardson and A. Mehner, *Research Notes Amer. Astron. Soc.* **2** (3), 121 (2018).
20. A. G. Riess, L. M. Macri, S. L. Hoffmann, et al., *Astrophys. J.* **826**, 56 (2016).
21. E. E. Salpeter, *Astrophys. J.* **121**, 161 (1955).
22. A. Sandage, *Astrophys. J.* **127**, 513 (1958).
23. A. Sandage and G. A. Tammann, *Astrophys. J.* **194**, 223 (1974).
24. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, *Astrophys. J.* **737** (2), 103 (2011).
25. P. B. Stetson, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **99**, 191 (1987).
26. P. B. Stetson, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **106**, 250 (1994).
27. K. A. Tehrani, P. A. Crowther, J. M. Bestenlehner, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **484** (2), 2692 (2019).
28. N. Tikhonov, O. Galazutdinova, O. Sholukhova, et al., *Research Astron. Astrophys.* **21** (4), 98 (2021).
29. N. A. Tikhonov, *Astrophysical Bulletin* **73** (1), 22 (2018).
30. N. A. Tikhonov, O. A. Galazutdinova, and G. M. Karataeva, *Astrophysical Bulletin* **74** (3), 257 (2019).
31. R. B. Tully and J. R. Fisher, *Astron. and Astrophys.* **500**, 105 (1977).
32. J. A. Willick, arXiv:9610200 (1996).
33. A. Wofford, V. Ramirez, J. C. Lee, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **493** (2), 2410 (2020).
34. N. Yusof, R. Hirschi, G. Meynet, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **433** (2), 1114 (2013).

The Brightest Stars of Irregular and Low-Mass Spiral Galaxies

N. A. Tikhonov¹, O. A. Galazutdinova¹, G. M. Karataeva², O. N. Sholukhova¹,
A. Valcheva³, V. D. Ivanov⁴, and P. L. Nediakov³

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

²St. Petersburg University, St. Petersburg, 199034 Russia

³University of Sofia "St. Kliment Ohridski", BG-1164, Sofia, Bulgaria

⁴European Southern Observatory, D-85748 Garching bei Muenchen, Germany

A search for a correlation between the luminosities of the brightest stars and luminosities of their host galaxies was carried out on archival Hubble Space Telescope (HST) *F606W* or *F555W* (*V*) and *F814W* (*I*) images of 150 nearby galaxies. The sample contains only galaxies with ongoing star formation and with known distances we derived with the TRGB-method. We correlated the average absolute luminosities of the three brightest blue and the three brightest red stars with the luminosity of a host. We find a linear relation for both the blue and the red stars in irregular and low-mass spiral galaxies. Their scatters are sufficiently small (0^m4) to make these relations useful for distance determination for low-mass galaxies. We found that all 31 dwarf galaxies ($M_B > -13^m$) in our sample lack bright massive stars ($M_V(\text{BS}) < -7^m0$), probably due to the physical conditions that prevent their birth. For galaxies with higher average luminosity in the range $-18^m < M_B < -13^m$, there is an asymmetry in the distribution of the number of galaxies relative to the linear dependence, indicating an increase in the fraction of galaxies with bright stars.

Keywords: *galaxies: distances and redshifts—galaxies: photometry—galaxies: stellar content*