УДК 524.7-33+52-323.3:520.82

СВЕТИМОСТИ ЯРЧАЙШИХ ГОЛУБЫХ ЗВЕЗД В 30 КАРЛИКОВЫХ ГАЛАКТИКАХ

© 2024 Н. А. Тихонов^{1*}, О. А. Галазутдинова¹, Г. М. Каратаева²

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия ²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия Поступила в редакцию 29 ноября 2023; после доработки 3 мая 2024; принята к публикации 15 мая 2024

На основе архивных снимков космического телескопа им. Хаббла мы провели звездную и интегральную фотометрию 30 иррегулярных карликовых галактик в фильтрах F606W (V) и F814W (I). Для 12 галактик определены расстояния TRGB-методом. На построенных диаграммах Герцшпрунга-Рессела выделены ветви голубых сверхгигантов и вычислены средние светимости трех ярчайших звезд. В круговых апертурах с максимальным радиусом $\operatorname{Rad} = 50''$ определены показатели цвета (V - I) и светимости галактик в фильтрах V и I. Построена диаграмма зависимости между светимостями галактик и их ярчайших звезд, на которой видно, что светимость ярчайших звезд увеличивается при увеличении светимости родительских галактик. Сравнение полученной для 30 иррегулярных галактик зависимости с аналогичной для 150 спиральных и иррегулярных галактик, опубликованной Тихоновым и др. в 2021 году, показывает их сходство. Данный результат подтверждает гипотезу о том, что отсутствие ярких массивных звезд в карликовых иррегулярных галактиках нельзя объяснить статистикой малого числа звезд в этих галактиках. Используя результаты работ Хантер и др., изданных в 2019 и 2021 годах, мы построили зависимость между светимостью галактик и массой третьего по величине массы НІ-облака этих галактик. Представленная взаимосвязь, а также известная корреляция Ларсона между массой облаков молекулярного водорода и массой рождающихся в них звезд, предложенная в 1982 году, дают нам основание для вывода, что полученная нами зависимость между светимостью галактик и ярчайших звезд является следствием корреляции между светимостью (массой) галактик и средней массой газовых облаков этих галактик.

Ключевые слова: галактики: карликовые — галактики: неправильные — галактики: фотометрия

1. ВВЕДЕНИЕ

Зависимость между светимостью галактик и их ярчайших звезд была найдена давно и использовалась для определения расстояний до галактик как метод ярчайших звезд (Holmberg, 1950; Sandage and Tammann, 1974; de Vaucouleurs, 1978; Humphreys, 1983; Karachentsev and Tikhonov, 1994). Его суть состояла в том, что в галактиках светимость наиболее ярких звезд увеличивалась с увеличением светимости родительской галактики. Калибровка этого метода была основана на фотографической фотометрии звезд в нескольких близких галактиках с известными расстояниями. С появлением более точного TRGB-метода (Lee et al., 1993) астрономы перестали использовать для определения расстояний зависимость между светимостью галактик и их ярчайших звезд.

Интерес к этой зависимости снова появился при изучении природы массивных и сверхмассивных

звезд. Звезды больших масс встречаются очень редко, их поиски стали бы более успешными, если заранее знать, в каких галактиках можно ожидать появление таких звезд. В нашей Галактике известны массивные звезды до $150 M_{\odot}$ (De Becker et al., 2006; Bik et al., 2019), но, согласно теоретическим расчетам, массы самых ярких и массивных звезд могут достигать до 500 М_☉ и более. Условием появления таких звезд является низкая металличность исходного газа (Yusof et al., 2013; Spera and Mapelli, 2017). В нашей Галактике межзвездный газ имеет высокую металличность, поэтому поиски сверхмассивных звезд следует проводить в других галактиках с более низкой металличностью. Такую металличность имеют карликовые иррегулярные галактики, следовательно в этих галактиках и должны рождаться яркие очень массивные звезды. Иррегулярная галактика Большое Магеланово Облако (БМО) имеет вдвое меньшую металличность газа, чем газ нашей Галактики, и именно в БМО найдено много массивных звезд. Массы

^{*}E-mail: ntik@sao.ru



Рис. 1. Зависимость между светимостью галактик и их ярчайших голубых звезд из работы Tikhonov et al. (2021).

некоторых из них превышают массы звезд нашей Галактики (Hainich et al., 2014; Bestenlehner et al., 2020; Kalari et al., 2022). Эти факты вроде бы являются подтверждением зависимости между массой звезд и металличностью межзвездной среды, но кроме БМО есть много других иррегулярных галактик с существенно более низкой металличностью, поэтому если следовать выводам теоретических расчетов, то в этих галактиках и должны рождаться самые массивные звезды.

Известно, что существует зависимость между светимостью галактик (спиральных и иррегулярных) и их металличностью (Lequeux et al., 1979; Mateo, 1998; Kuzio de Naray et al., 2004; Pilyugin et al., 2004; Tremonti et al., 2004 и много аналогичных публикаций). Самую низкую металличность имеют галактики самых малых масс, значит поиски наиболее массивных и ярких звезд следует вести в этих крохотных галактиках. Но в реальности наблюдается обратная зависимость: чем меньше галактика, тем более слабые звезды она содержит.

В нашей первой работе по изучению корреляции между светимостью галактик и звезд (Tikhonov et al., 2021) мы использовали снимки космического телескопа им. Хаббла (HST) и измерили расстояния до 150 спиральных и иррегулярных галактик и светимости их ярчайших звезд. На основе полученных результатов мы определили зависимость между светимостью галактик и звезд. На диаграмме (рис. 1), взятой из указанной выше публикации, видно, что все слабые галактики ($-12^{m}5 < M_B < -10^{m}0$) не содержат ярких звезд, которые по своей светимости были бы примерно равны светимости звезд более ярких галактик. По-казанную на рис. 1 зависимость обычно объясняли

влиянием малой статистической выборки. Карликовые галактики содержат значительно меньше звезд, чем спиральные, и вероятность появления яркой массивной звезды в карликовой галактике также будет мала. Однако, если взять на рис. 1 сумму 30 карликовых галактик со светимостью $-12^{m}5 < M_B < -10^{m}0$, их общая светимость будет равна примерно $M_B = -15^{m}5$, но во всех этих малых галактиках нет таких ярких звезд, которые видны в галактиках в диапазоне светимости $-16^{m}0 < M_B < -15^{m}0$. Это означает, что отсутствие ярких звезд в слабых галактиках нельзя объяснить действием только одного эффекта малой статистики.

Но в то же время мы не можем полностью отказаться от гипотезы отсутствия ярких звезд изза малой статистической выборки галактик, поскольку среди исследованных нами ранее 150 галактик можно найти галактики со светимостью $M_B = -15.^{\rm m}5$, в которых отсутствуют яркие звезды. Чтобы при решении вопроса о возможном рождении массивных звезд в карликовых галактиках результат измерений получился статистически более значимым, следует увеличить число галактик в выборке. Поэтому после появления новых HST-снимков карликовых галактик мы продолжили изучение соотношения светимости галактик и звезд.

2. ЗВЕЗДНАЯ ФОТОМЕТРИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЙ

Среди галактик, снимки которых получены на HST-телескопе по заявке ID 15922 (R. B. Tully), находится много карликовых, на СМ-диаграммах которых видны ветви голубых сверхгигантов. Мы изучили звездный состав этих галактик, а также измерили их интегральные светимости. Полученные результаты позволили увеличить число карликовых галактик, у которых известны светимости ярчайших звезд.

Снимки 30 галактик, взятые нами из архива космического телескопа им. Хаббла, были получены с камерой ACS/WFC в фильтрах *F*606*W* и *F*814*W* с экспозициями 760 с. Изображения 12 галактик представлены на рис. 2, а остальные можно найти в опубликованных нами ранее статьях (Tikhonov and Galazutdinova, 2022; Karachentsev and Tikhonov, 2023).

Исследованные нами галактики имеют разные пространственные размеры, от 0.82 кпк (AGC 208477) до 11.7 кпк (UGC 7827), и находятся на расстояниях в диапазоне от 3 Мпк до 12 Мпк. Размеры галактик оценивались по размерам протяженного гало, состоящего из красных гигантов. Если гало выходило за пределы имеющихся снимков, то размер вычислялся экстраполяцией

373



Рис. 2. HST-изображения галактик выборки в фильтре *F*606*W* с разметкой положений ярчайших голубых звезд.



Рис. 2. (Продолжение.)

численной плотности звезд. Основные параметры галактик представлены в таблицах 1 и 2.

Звездная фотометрия галактик выполнялась двумя пакетами программ: DAOPHOT II (Stetson, 1987; 1994) и DOLPHOT 2.0¹ (Dolphin, 2016). Фотометрия в DOLPHOT 2.0 и DAOPHOT II проводилась стандартным образом в соответствии с рекомендациями Долфина и Стетсона. У всех галактик на диаграммах Герцшпрунга-Рессела (рис. 4) помимо ветвей голубых сверхгигантов, на которых мы выбирали ярчайшие звезды, видны также и ветви красных гигантов, их мы использовали для определения расстояний до галактик TRGB-методом (Lee et al., 1993). Процедуры фотометрии звезд и измерения расстояний более подробно описаны в нашей статье (Tikhonov and Galazutdinova, 2022). Величина поглощения света в направлении на каждую галактику бралась из работы Schlafly and Finkbeiner (2011). Лучевые скорости галактик взяты из NED или HYPERLEDA, за исключением скорости галактики КК 242, которая взята из работы Karachentsev et al. (2022). Полученные результаты приведены в таблице 1, где RA и Dec прямое восхождение и склонение, v_h — лучевая скорость, *I*_{TRGB} — положение TRGB-скачка, *А_I* — величина экстинкции в фильтре *I* в звездных величинах, (m - M) — модуль расстояния до галактики, *D* — расстояние до галактики в Мпк.

3. ЯРЧАЙШИЕ ЗВЕЗДЫ ГАЛАКТИК

СМ-диаграммы 12 галактик с указанием ярчайших звезд представлены на рис. 4. СМ-диаграммы остальных галактик были показаны в наших более ранних работах (Tikhonov and Galazutdinova, 2022; Karachentsev and Tikhonov, 2023). Ветви голубых сверхгигантов, ярчайшие звезды которых мы использовали для построения зависимости между светимостью галактик и звезд, есть на диаграммах всех галактик выборки.

При отборе ярчайших звезд у нас возникли некоторые трудности. Показатель цвета (V - I) у звезды высокой светимости может быть больше, чем 0^m7, но в интервал показателя цвета (V - I) от 0^m7 до 1^m2 попадают карликовые звезды нашей Галактики. Таких звезд, яркость которых соответствует яркости нужных нам голубых сверхгигантов, на HST-снимке может быть несколько десятков, особенно если исследуемая галактика попадает в зону Млечного Пути. Чтобы отделить ярчайшие звезды таких галактик от фоновых звезд, мы использовали свойство ярких голубых сверхгигантов располагаться в звездных скоплениях или вблизи

них (de Wit et al., 2004, 2005), в то время как фоновые звезды — карлики нашей Галактики распределены равномерно по всему снимку. Поскольку каждая галактика занимает только часть HST-снимка, то можно было оценить количество и фотометрические параметры фоновых звезд за границей галактики. Эти измерения помогали нам разделить яркие сверхгиганты галактик и фоновые звезды нашей Галактики.

Очень компактные звездные скопления могут маскироваться под одиночные звезды. Чтобы отличать голубые сверхгиганты от молодых компактных скоплений, мы контролировали значения параметров профиля каждой звезды (CHI, SH и PSF) в фильтрах F814W и F606W при сравнении их с аналогичными параметрам для одиночных изолированных звезд. Но вероятно существование звездных пар или даже очень компактных групп звезд, которые на HST-снимках невозможно отличить от одиночных звезд ни по каким измерениям их фотометрических профилей. Если такие объекты попадут в наш список, то это приведет к повышению средней светимости звезд у некоторых галактик. Чем дальше расположена галактика, тем труднее отделить одиночные звезды от компактных скоплений, и значит число таких ошибочных «одиночных» звезд должно увеличиваться при увеличении расстояния до галактик. Этот эффект приведет к появлению зависимости между средней светимостью ярчайших звезд и расстоянием до галактик. Такая диаграмма для 30 галактик нашего списка представлена на рис. 4. Программа вычисления регрессии действительно показывает наличие слабой корреляции. Однако эта корреляция создается всего лишь пятью галактиками, которые на рис. 4 обозначены кружками. Мы более подробно изучили звезды этих галактик и не нашли причин для изменения положений этих галактик на диаграмме. Три галактики (SDSS J115840.37+153533.7, SDSS J124029.91+472203.9, КК 242) содержат слабые голубые сверхгиганты, а более яркие звезды в них отсутствуют. В этих галактиках нет областей звездообразования, поэтому существовавшие когда-то яркие голубые сверхгиганты давно проэволюционировали в другие типы звезд. В каждой из двух оставшихся галактик (HIPASS J0517-32, PGC 1099440) видны две яркие области звездообразования со звездами высокой светимости. Выбранные ярчайшие звезды в этих галактиках расположены на периферии областей звездообразования, но, судя по цвету и светимости этих звезд, они принадлежат этим областям. Все параметры фотометрических профилей выбранных ярчайших звезд не отличаются от аналогичных параметров других звезд галактик, поэтому мы считаем эти яркие звезды одиночными. Дополнительную информацию о кратности звезд

¹http://americano.dolphinsim.com/dolphot/ dolphot.pdf

ТИХОНОВ и др.



Рис. 3. СМ-диаграммы галактик, показанных на рис. 2. Кружками отмечены три ярчайшие голубые звезды в каждой галактике.

Габлица 1. Параметры 30 карликовых галактик: RA и Dec — прямое восхождение и склонение галактики (J 200	JO),
w_h — лучевая скорость по данным NED, $I_{ m TRGB}$ — положение TRGB-скачка на функции светимости в фильтре	e I.
A_I — величина экстинкции в фильтре $I, (m-M)$ — модуль расстояния до галактики, D — расстояние до галакти	ИКИ

N	Galaxy	RA	Dec	v_h , km c $^{-1}$	$I_{\mathrm{TRGB}}, \mathrm{mag}$	A_I , mag	(m-M), mag	<i>D</i> , Мпк
01	HIPASS J0517-32	05 17 21.6	$-32\ 45\ 35$	813	25.83	0.028	29.85	9.32
02	KKH 34	05 59 40.4	+73 25 40	110	25.75	0.361	29.25	7.08
03	ESO 006-001	08 19 22.1	$-85\ 08\ 36$	738	23.34	0.237	27.07	2.59
04	KKH 46	09 08 36.5	+05 17 27	598	25.70	0.068	29.60	8.31
05	PGC 807172	09 44 20.1	$-22\ 54\ 58$	719	26.16	0.114	30.10	10.46
06	PGC 154449	09 57 08.9	$-09\ 15\ 49$	542	26.05	0.100	30.00	9.99
07	AGC 208477	10 09 19.8	$+27\ 56\ 44$	583	26.04	0.042	30.05	10.22
08	PGC 1099440	10 09 32.5	$-02\ 10\ 58$	750	26.19	0.066	30.17	10.80
09	KKsg19	10 24 28.3	$-12\ 25\ 57$	624	26.03	0.106	29.92	9.66
10	SDSS J103512.07+461412.2	10 35 12.1	$+46\ 14\ 12$	505	26.29	0.038	30.30	11.47
11	AGC 205685	10 56 40.3	$+36\ 08\ 28$	572	25.80	0.030	29.82	9.19
12	SDSSJ115205.58+544732.2	11 52 05.6	+54 47 32	321	24.95	0.013	28.85	5.89
13	ESO 379-024	12 04 56.7	$-35\ 44\ 35$	630	24.66	0.112	28.44	4.87
14	SDSSJ115840.37+153533.7	11 58 40.4	$+15\ 35\ 34$	561	26.40	0.057	30.39	11.95
15	SDSSJ120531.03+310434.1	12 05 31.0	+31 04 34	589	26.24	0.027	30.26	11.26
16	MCG+09-20-182	$12\ 26\ 52.7$	$+53\ 06\ 19$	300	24.97	0.030	28.99	6.27
17	MCG+00-32-016	12 31 03.8	+01 40 33	1105	25.87	0.026	29.89	9.50
18	SDSSJ123109.09+420533.9	12 31 09.1	$+42\ 05\ 34$	543	25.53	0.027	29.55	8.12
19	MCG+07-26-024	12 33 52.7	+39 37 33	648	25.82	0.023	29.85	9.32
20	KKH 69	11 34 53.1	+11 01 16	882	25.79	0.037	29.71	8.75
21	UGC 7827	12 39 38.9	$+44\ 49\ 14$	554	25.45	0.027	29.47	7.82
22	KDG 178	12 40 10.0	+32 39 32	759	26.38	0.022	30.31	11.53
23	SDSSJ124029.91+472203.9	12 40 29.9	$+47\ 22\ 04$	229	25.22	0.025	29.20	6.92
24	UGC 7903	12 43 45.0	$+53\ 57\ 32$	4451	25.84	0.022	29.70	8.71
25	SDSSJ132831.21+492727.9	13 28 31.2	$+49\ 37\ 38$	395	25.40	0.013	29.44	7.72
26	MCG+08-25-028	13 36 44.8	$+44\ 35\ 57$	477	25.61	0.023	29.64	8.46
27	WOC 2017-07	13 45 16.4	$-23\ 10\ 08$	250	23.77	0.118	27.51	3.17
28	KK 242	17 53 55.2	$+70\ 06\ 44$	-80	25.02	0.054	28.85	5.91
29	AGC 322463	$22\ 59\ 35.5$	$+16\ 45\ 56$	350	26.08	0.099	29.98	9.92
30	PGC 704814	23 58 40.7	$-31\ 28\ 03$	270	23.83	0.024	27.86	3.73

могли бы дать спектральные наблюдения, но это выходит далеко за рамки нашей работы. Если исключить указанные пять галактик, то наблюдается слабая антикорреляция между расстоянием и светимостью звезд.

У некоторых галактик (ККН 34, ККsg 19, WOC 2017-07, КК 242) видно большое различие между светимостью первой и третьей звезды. Чтобы уменьшить влияние отдельных звезд, мы использовали среднее значение светимости трех

АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ том 79 № 3 2024

звезд так же, как это было сделано ранее для звезд в 150 галактиках (Tikhonov et al., 2021). Результаты фотометрии звезд приведены в таблице 2.

4. ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФОТОМЕТРИЯ ГАЛАКТИК

Перед проведением интегральной фотометрии галактик на снимках были удалены программой



Рис. 4. Диаграмма зависимости между расстояниями до галактик и светимостью их ярчайших звезд. Кружками отмечены галактики, которые создают слабую корреляцию между этими величинами.



Рис. 5. Увеличение интегральной светимости галактики SDSS J132831.81+492727.9 и достижение предельного значения (выход на горизонтальную прямую) при непрерывном увеличении радиуса апертуры фотометрии.

modif/area все фоновые объекты, главным образом далекие галактики. Для каждой галактики была измерена ее светимость в большом числе круговых апертур, каждая из которых была по размерам больше предыдущей. В идеальном случае за пределами определенного по размерам значения апертуры светимость галактики перестает увеличиваться, что и будет величиной полной светимости галактики. На рис. 5 показано изменение интегральной светимости карликовой галактики SDSS J132831.81+492727.9 при увеличении апертуры измерения. При значении апертуры

Rad = 25" происходит выход кривой на горизонтальный участок, дальнейшее увеличение апертуры не изменяет полученное максимальное значение. На рис. 6 показана измеряемая галактика и обозначена апертура Rad = 25", при которой достигается максимальное значение светимости.

В реальности выход на горизонтальный участок светимости происходит не всегда по нескольким причинам. Во-первых, невозможно убрать все слабые фоновые объекты, которые вносят свой вклад в интегральную светимость при увеличении апертуры фотометрии. Во-вторых, площадь снимка часто бывает недостаточна для измерения яркости фона за пределами гало галактик. Для тех галактик, чье гало выходит за границы HST-снимка, полученные величины фотометрии являются результатами измерений в апертуре D = 100'', а не V_{tot} , как для малых галактик. В таблице 2 у галактик, гало которых существенно выходит за пределы апертуры $\operatorname{Rad} = 50''$, измерения интегральной светимости отмечены двумя звездочками (**). Там, где гало из красных гигантов выступает незначительно за пределы апертуры Rad = 50'', измерения отмечены отмечены одной звездочкой (*). Отсутствие звездочки указывает, что гало не выходит за пределы апертуры Rad = 50''. Точность измерения полной $V_{\rm tot}$ светимости таких галактик составляет 0.105, а для галактик с одной или двумя звездочками можно говорить только о светимости в апертуре Rad = 50''. Следует отметить, что, хотя у некоторых галактик наблюдается выход гало за пределы апертуры, вклад в общую светимость галактики этой части гало очень незначительный, не более 0^m.1-0^m.3. То есть это ограничение практически не изменяет вид конечной зависимости между светимостью галактик и звезд.

Полученные при апертурной фотометрии инструментальные величины в фильтрах F606W и F814W были преобразованы в величины V и I системы Казинца по формулам Sirianni et al. (2005):

$$(V - I) = 1.312(F606W - F814W) + 1.089 (1),$$

$$I = F814W + 25.495 - 0.002(V - I)$$
(2).

Для всех галактик списка известны расстояния, поэтому можно вычислить абсолютные светимости ярчайших звезд и галактик и сравнить их между собой. Результат сравнения показан на диаграмме рис. 7.

Как и ожидалось, на рис. 7, несмотря на рассеяние точек, хорошо видна корреляция между светимостью галактик и их ярчайших звезд. Главная причина рассеяния точек состоит в том, что для измерения средней светимости звезд берется результат только по трем звездам. Яркие и массивные звезды быстро эволюционируют и превращаются в

Таблица 2. Фотометрия звезд в 30 карликовых галактиках: V_{blue}^{3*} — средняя величина V трех ярчайших голубых звезд, $(V - I)_{\text{blue}}^{3*}$ — средний показатель цвета трех звезд, A_V — величина экстинкции в фильтре V в звездных величинах, M_V^* — абсолютная величина трех звезд в фильтре V, V_{gal} — видимая величина галактики в апертуре Rad = 50'', $(V - I)_{\text{gal}}$ — показатель цвета галактики, (m - M) — модуль расстояния, M_V^{gal} — абсолютная величина галактики в апертуре Rad = 50'', $(V - I)_{\text{gal}}$ — показатель цвета галактики, (m - M) — модуль расстояния, M_V^{gal} — абсолютная величина галактики в фильтре V

N	Galaxy	$V_{\rm blue}^{3*}$	$(V-I)^{3*}_{\text{blue}}$	A_V	M_V^*	$V_{\rm gal}$	$(V-I)_{\rm gal}$	(m - M)	M_V^{gal}
01	HIPASS J0517-32	21.19	0.55	0.051	-8.71	15.24*	0.67	29.85	-14.66
02	KKH 34	22.69	0.81	0.657	-7.22	16.14*	1.04	29.25	-13.77
03	ESO 006-001	19.98	0.69	0.525	-7.62	14.30**	1.06	27.07	-13.30
04	KKH 46	22.52	0.10	0.123	-7.20	16.28	0.59	29.60	-13.44
05	PGC 807172	22.25	0.59	0.208	-8.06	16.07	0.89	30.10	-14.24
06	PGC 154449	22.69	0.07	0.182	-7.49	14.94*	0.93	30.00	-15.24
07	AGC 208477	23.96	0.03	0.077	-6.17	17.71	0.49	30.05	-12.42
08	PGC 1099440	21.67	0.36	0.121	-8.62	15.24**	0.50	30.17	-15.05
09	KKsg19	24.03	0.16	0.193	-6.08	16.48*	0.85	29.92	-13.63
10	SDSS J103512.07+461412.2	23.15	0.53	0.069	-7.22	16.28*	0.49	30.30	-14.09
11	AGC 205685	23.77	-0.01	0.055	-6.11	16.52	0.56	29.82	-13.36
12	SDSS J115205.58+544732.2	22.45	0.01	0.024	-6.42	17.33	0.96	28.85	-11.54
13	ESO 379-024	23.12	0.09	0.204	-5.41	15.55**	0.54	28.44	-13.09
14	SDSS J115840.37+153533.7	23.52	0.27	0.149	-7.02	17.60	0.87	30.39	-12.94
15	SDSS J120531.03+310434.1	23.76	0.13	0.049	-6.55	16.70	0.81	30.26	-13.61
16	MCG+09-20-182	20.89	0.26	0.054	-8.14	15.46*	0.73	28.99	-13.58
17	MCG+00-32-016	22.63	0.54	0.048	-7.31	15.09**	0.80	29.89	-14.85
18	SDSS J123109.09+420533.9	23.62	-0.10	0.049	-5.97	16.82	0.84	29.55	-12.78
19	MCG+07-26-024	22.36	0.08	0.041	-7.53	15.12*	0.54	29.85	-14.77
20	KKH 69	22.04	0.95	0.068	-7.74	16.28	0.93	29.71	-13.50
21	UGC 7827	22.90	0.32	0.050	-6.62	14.74**	0.42	29.47	-14.78
22	KDG 178	23.93	0.35	0.041	-6.42	15.74*	0.75	30.31	-14.61
23	SDSS J124029.91+472203.9	24.08	0.08	0.047	-5.17	16.91	0.73	29.20	-12.34
24	UGC 7903	23.42	0.04	0.039	-6.31	15.68*	0.62	29.70	-14.06
25	SDSS J132831.21+492727.9	22.33	0.09	0.024	-7.12	16.63	0.62	29.44	-12.83
26	MCG+08-25-028	21.71	0.36	0.042	-7.97	15.27*	0.67	29.64	-14.41
27	WOC 2017-07	21.24	-0.02	0.216	-6.49	16.48	0.84	27.51	-11.25
28	KK 242	23.75	0.78	0.098	-5.21	17.96	0.67	28.86	-11.00
29	AGC 322463	21.85	0.46	0.181	-8.31	16.56	0.72	29.98	-12.71
30	PGC 704814	20.67	0.18	0.044	-7.23	15.37*	0.70	27.86	-12.53

*Галактики, у которых гало из красных гигантов выступает незначительно за пределы апертуры Rad = 50'', **галактики, гало которых существенно выходит за пределы апертуры Rad = 50''.



Рис. 6. Изображение галактики SDSS J132831.81+492727.9 в фильтре *F*606*W* с указанием радиуса апертуры Rad = 25", при котором достигается максимальная интегральная светимость галактики.



Рис. 7. Зависимость между светимостью карликовых иррегулярных галактик и их ярчайших голубых звезд в фильтре F606W(V).

другие типы объектов либо взрываются сверхновыми звездами. Кроме того, при процессах звездообразования рождаются в основном маломассивные звезды. Поэтому в карликовых галактиках не может быть много ярких массивных звезд, а в некоторых галактиках такие звезды могут полностью отсутствовать. Галактики, в которых яркие звезды отсутствуют, на диаграмме рис. 7 будут находиться в стороне от линии общей зависимости. Вероятно, что большие флуктуации светимости звезд можно уменьшить, если усреднение светимости делать не по трем, а по десяти звездам, но это создаст дополнительные технические трудности.

Некоторый вклад в рассеяние точек на диаграмме рис. 7 вносят также ошибки измерения светимости галактик. В галактиках с интенсивным звездообразованием большой вклад в их светимость дают яркие голубые сверхгиганты. После окончания вспышки звездообразования яркость галактики станет намного меньше, хотя ее масса останется неизменной. Вероятно, что эту зависимость от процессов звездообразования можно устранить, если перейти в инфракрасную область для измерения светимости. При таком переходе светимость галактики будет лучше соответствовать массе галактики, и возможно, что это уменьшит рассеяние точек на диаграмме, подобной диаграмме рис. 7, но для инфракрасных значений светимости галактик.

Чтобы сравнить полученные нами результаты для 30 галактик с более обширными измерениями для 150 галактик (Tikhonov et al., 2021), нам необходимы измерения светимости галактик в *B*-фильтре, но такие измерения отсутствуют



Рис. 8. На основе работ Hunter et al. (2021; 2019) построена зависимость между светимостью карликовых иррегулярных галактик и полной массой нейтрального водорода (a), а также между светимостью и массой одиночного облака, третьего по величине массы (b).

для подавляющего большинства галактик нашего списка. Можно вычислить вероятный показатель цвета галактики (B - V) на основе измеренного нами показателя цвета (V - I), а затем определить светимость галактики в B-фильтре. Однако такие вычисления еще более увеличат рассеяние точек на диаграмме рис. 7.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

На основе снимков космического телескопа им. Хаббла в 30 карликовых галактиках проведена звездная фотометрия и получены СМ-диаграммы, на которых видны как молодые звезды — голубые и красные сверхгиганты, так и старое звездное население — красные гиганты. Для 12 галактик найдены расстояния TRGB-методом по положению верхней границы ветви красных гигантов. Расстояния до остальных 18 галактик определены нами ранее (Tikhonov et al., 2022; Karachentsev and Tikhonov, 2023). На ветви голубых сверхгигантов СМ-диаграммы каждой галактики были выбраны три ярчайшие звезды, и вычислено среднее значение их светимости. Для всех 30 галактик отсутствуют однородные фотометрические измерения их интегральных величин в В-, V-, І-фильтрах, поэтому мы выполнили апертурную фотометрию этих галактик по снимкам F606W и F814W с

максимальной апертурой Rad = 50". Полученные результаты мы использовали для построения зависимости между светимостью галактик и их ярчайших звезд. Измерения (рис. 7) показывают, что при увеличении светимости галактик возрастает светимость их ярчайших звезд. Полученные результаты увеличили число галактик самой малой светимости, у которых нет ярких массивных звезд, и подтверждают вывод нашей предыдущей статьи (Tikhonov et al., 2021) о том, что отсутствие ярких звезд в карликовых галактиках не является эффектом малой статистической выборки.

Изучая зависимость между массами молекулярных облаков звездных скоплений и массами наиболее ярких звезд, Larson (1982) получил линейную зависимость между этими величинами. Более массивные и яркие звезды образуются в более массивных газовых облаках. Следствием этого является существующая зависимость между интегральной светимостью рассеянных скоплений и светимостью их ярчайших звезд.

Можно предполагать, что существующая зависимость между светимостью галактик и звезд возникает совершенно аналогичным образом. Чем меньше масса галактики, тем меньше должны быть массы газовых облаков, которые она в состоянии удержать в своем составе. Поэтому звезды в таких галактиках будут иметь меньшую массу и светимость. Это предположение подтверждают наблюдения карликовых галактик. В работе Hunter et al. (2019) для 40 иррегулярных карликовых галактик представлены измерения масс газовых облаков нейтрального водорода. В более поздней работе Hunter et al. (2021) для этих же 40 галактик указаны их светимости. Используя результаты этих работ, мы построили две зависимости. На первой диаграмме (рис. 8а) представлено распределение полных масс нейтрального водорода Н I в зависимости от светимости галактик, а на второй диаграмме (рис. 8b) — распределение масс одиночных облаков Н I в зависимости от светимости родительской галактики. Поскольку каждая галактика имеет, как правило, несколько водородных облаков, то для построения указанной диаграммы выбиралась масса третьего по величине массы облака. Такой выбор сокращает возможность статистических выбросов, но несколько уменьшает количество объектов, так как некоторые галактики имеют всего лишь два водородных облака и они не попадают на диаграмму рис. 8b.

На полученных диаграммах (рис. 8) хорошо видна зависимость между светимостью иррегулярных галактик и массой водородных облаков. Следует заметить, что Larson (1982) использовал в своих измерениях массы молекулярных облаков, а в работе Hunter et al. (2019) речь идет об измерении масс облаков нейтрального водорода H I.

Пока что невозможно напрямую измерять излучение молекулярных облаков водорода, поэтому используются косвенные методы. В радиодиапазоне оценивают излучение молекул СО, имея в виду, что известна взаимосвязь между концентрацией молекул водорода и СО в галактиках. Можно также измерять ИК-излучение пыли, поскольку также известна зависимость между распределением пыли и молекулярного водорода. Но даже при таком косвенном подходе к изучению распределения молекулярного водорода во многих иррегулярных малометалличных галактиках облака молекулярного водорода трудно обнаружить, в отличие от облаков нейтрального водорода с линией излучения 21 см. Поскольку облака молекулярного водорода происходят из нейтрального водорода (McKee and Ostriker, 2007), то вполне логично принять предположение о соответствии их масс. То есть малым облакам нейтрального водорода соответствуют малые облака молекулярного. Применяя косвенные методы оценки масс молекулярных облаков, Hunter et al. (2019) указывают на наличие корреляции между массами молекулярного водорода и массами облаков Н І. Учитывая вышесказанное, мы считаем, что полученная нами взаимосвязь между светимостью галактик и звезд является следствием изменения средней массы газовых облаков в зависимости от изменения светимости (массы) родительской галактики.

Что касается не карликовых, а более массивных галактик ($M_B < -17^{\rm m}$), то они могут иметь газовые облака бо́льших масс, вследствие чего в таких галактиках возможно появление ярких массивных звезд (например, в Большом Магеллановом облаке). В спиральных массивных галактиках ($M_B < -20^{\rm m}$) металличность газа высокая, поэтому, если верны выводы работ Yusof et al. (2013), Spera and Mapelli (2017), в них не следует ожидать появления сверхмассивных звезд. По всей видимости, наиболее перспективными для поиска таких звезд оказываются галактики средней светимости с низкой металличностью межзвездной среды и активным звездообразованием.

БЛАГОДАРНОСТИ

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 заявкой 15922. В настоящей работе были использованы базы данных NED, HyperLeda.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа по изучению карликовых галактик выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2022-262 (13.МНПМУ.21.0003).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- J. M. Bestenlehner, P. A. Crowther, S. M. Caballero-Nieves, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. 499 (2), 1918 (2020). DOI:10.1093/mnras/staa2801
- A. Bik, T. Henning, S. W. Wu, et al., Astron. and Astrophys. 624, id. A63 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201935061
- M. De Becker, G. Rauw, J. Manfroid, and P. Eenens, Astron. and Astrophys. 456 (3), 1121 (2006). DOI:10.1051/0004-6361:20065300
- 4. G. de Vaucouleurs, Astrophys. J. **224**, 710 (1978). DOI:10.1086/156420
- W. J. de Wit, L. Testi, F. Palla, and H. Zinnecker, Astron. and Astrophys. 437 (1), 247 (2005). DOI:10.1051/0004-6361:20042489
- W. J. de Wit, L. Testi, F. Palla, et al., Astron. and Astrophys. 425, 937 (2004). DOI:10.1051/0004-6361:20040454
- A. Dolphin, DOLPHOT: Stellar photometry, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1608.013 (2016).
- R. Hainich, U. Rühling, H. Todt, et al., Astron. and Astrophys. 565, id. A27 (2014). DOI:10.1051/0004-6361/201322696
- 9. E. Holmberg, Meddelanden fran Lunds Astronomiska Observatorium Serie II **128**, 5 (1950).
- R. M. Humphreys, Astrophys. J. 269, 335 (1983). DOI:10.1086/161047
- D. A. Hunter, B. G. Elmegreen, H. Archer, et al., Astron. J. 161 (4), id. 175 (2021). DOI:10.3847/1538-3881/abe1c0
- D. A. Hunter, B. G. Elmegreen, and C. L. Berger, Astron. J. 157 (6), article id. 241 (2019). DOI:10.3847/1538-3881/ab1e54
- V. M. Kalari, E. P. Horch, R. Salinas, et al., Astrophys. J. 935 (2), id. 162 (2022). DOI:10.3847/1538-4357/ac8424
- I. D. Karachentsev, J. M. Cannon, J. Fuson, et al., Astron. J. 163 (2), id. 51 (2022). DOI:10.3847/1538-3881/ac3cbe
- I. D. Karachentsev and N. A. Tikhonov, Astron. and Astrophys. 286, 718 (1994). DOI:1994A&A...286..718K
- 16. I. D. Karachentsev and N. A. Tikhonov, Astrophysics **66** (1), 1 (2023). DOI:10.1007/s10511-023-09766-2

- R. Kuzio de Naray, S. S. McGaugh, and W. J. G. de Blok, Monthly Notices Royal Astron. Soc. 355 (3), 887 (2004). DOI:10.1111/j.1365-2966.2004.08364.x
- R. B. Larson, Monthly Notices Royal Astron. Soc. 200, 159 (1982). DOI:10.1093/mnras/200.2.159
- M. G. Lee, W. L. Freedman, and B. F. Madore, Astrophys. J. 417, 553 (1993). DOI:10.1086/173334
- 20. J. Lequeux, M. Peimbert, J. F. Rayo, et al., Astron. and Astrophys. **80**, 155 (1979).
- 21. M. Mateo, in Proc. VIII Canary Islands Winter School of Astrophysics on Stellar Astrophysics for the Local Group, 1998, Ed. by A. Aparicio, A. Herrero, and F. Sánchez (Cambridge, Cambridge University Press, 1998) p. 407.
- 22. C. F. McKee and E. C. Ostriker, Annual Rev. Astron. Astrophys. **45** (1), 565 (2007). DOI:10.1146/annurev.astro.45.051806.110602
- 23. L. S. Pilyugin, J. M. Vilchez, and T. Contini, Astron. and Astrophys. 425, 849 (2004). DOI:10.1051/0004-6361:20034522
- 24. A. Sandage and G. A. Tammann, Astrophys. J. **194**, 223 (1974). DOI:10.1086/153238
- 25. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, Astrophys. J. 737 (2), article id. 103 (2011). DOI:10.1088/0004-637X/737/2/103

- 26. M. Sirianni, M. J. Jee, N. Benítez, et al., Publ. Astron. Soc. Pacific **117** (836), 1049 (2005). DOI:10.1086/444553
- 27. M. Spera and M. Mapelli, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **470** (4), 4739 (2017). DOI:10.1093/mnras/stx1576
- 28. P. B. Stetson, Publ. Astron. Soc. Pacific **99**, 191 (1987). DOI:10.1086/131977
- 29. P. B. Stetson, Publ. Astron. Soc. Pacific 106, 250 (1994). DOI:10.1086/133378
- 30. N. A. Tikhonov and O. A. Galazutdinova, Astrophysical Bulletin 77 (4), 388 (2022). DOI:10.1134/S1990341322040150
- 31. N. A. Tikhonov, O. A. Galazutdinova, G. M. Karataeva, et al., Astrophysical Bulletin **76** (4), 381 (2021). DOI:10.1134/S1990341321040143
- 32. C. A. Tremonti, T. M. Heckman, G. Kauffmann, et al., Astrophys. J. 613 (2), 898 (2004). DOI:10.1086/423264
- 33. N. Yusof, R. Hirschi, G. Meynet, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. 433 (2), 1114 (2013). DOI:10.1093/mnras/stt794

Luminosities of the Brightest Blue Stars in 30 Dwarf Galaxies

N. A. Tikhonov¹, O. A. Galazutdinova¹, and G. M. Karataeva²

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia
²St. Petersburg University, St. Petersburg, 199034 Russia

The stellar and integral photometry of 30 irregular dwarf galaxies was performed in the F606W(V) and F814W(I) filters based on archival images from the Hubble Space Telescope. Distances were determined for 12 galaxies using the TRGB method. Branches of blue supergiants were identified on the plotted Hertzsprung-Russell diagrams, and the average luminosities of the three brightest stars were calculated. The color indices (V - I) and luminosities of galaxies in the V and I filters were determined in circular apertures with a maximum radius of $Rad = 50^{\circ\prime}$. A diagram of the dependence between the luminosities of galaxies and their brightest stars was developed, which shows that the luminosity of the brightest stars increases with increasing luminosity of the parent galaxies. A comparison of the dependence for 30 irregular galaxies with a similar one for 150 spiral and irregular galaxies, published by Tikhonov et al. in 2021, shows their similarity. This result confirms the hypothesis that the absence of bright massive stars in dwarf irregular galaxies cannot be explained by the small number of stars in these galaxies. Using the results of Hunter et al. (2019 and 2021), we developed a dependence between the luminosity of galaxies and the mass of the third-largest H I cloud of these galaxies. The presented correlation, as well as the well-known Larson correlation proposed in 1982, between the mass of molecular hydrogen clouds and the mass of stars born in them, give us reason to conclude that the dependence between the luminosity of galaxies and the brightest stars is a consequence of the correlation between the luminosity (mass) of galaxies and the average mass of the gas clouds of these galaxies.

Keywords: galaxies: dwarf—galaxies: irregular—galaxies: photometry