

УДК 524.7-74; 524.7-44; 524.7:520.82; 524.7-323.3

TRGB-РАССТОЯНИЯ ДО СЕЙФЕРТОВСКИХ ГАЛАКТИК NGC 1068, NGC 3227, NGC 4051 И NGC 4151

© 2021 Н. А. Тихонов^{1*}, О. А. Галазутдинова¹¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 1 февраля 2021 года; после доработки 8 апреля 2021 года; принята к публикации 8 апреля 2021 года

На основе архивных снимков космического телескопа им. Хаббла проведена звездная фотометрия четырех классических сейфертовских галактик: NGC 1068, NGC 3227, NGC 4051 и NGC 4151. На снимках выделены красные гиганты и TRGB-методом впервые измерены точные расстояния до этих галактик. Полученные расстояния 11.14 ± 0.54 , 15.33 ± 0.80 , 16.48 ± 0.69 и 14.20 ± 0.88 Мпк дают возможность более точно оценить энергию излучения активных ядер этих галактик. В группе NGC 1068 определены расстояния до двух основных галактик группы: NGC 1068 и NGC 1073 (11.14 ± 0.54 и 11.28 ± 0.70 Мпк), что позволяет оценить расстояние до этой малой группы галактик как $D = 11.2$ Мпк. Показано, что галактика NGC 1087 находится на расстоянии $D = 17.79 \pm 0.83$ Мпк и в группу NGC 1068 не входит.

Ключевые слова: галактики: Сейфертовские — галактики: активные — галактики: фотометрия — галактики: расстояния и красные смещения

1. ВВЕДЕНИЕ

В 1943 году Карл Сейферт (Seifert 1943) опубликовал статью, в которой представил результаты исследования шести спиральных галактик с яркими ядрами, в спектрах которых наблюдались широкие эмиссионные линии, что указывало на активные процессы в этих ядрах. Галактики такого типа позже стали называть сейфертовскими. Галактики Сейферта составляют примерно один процент от всех спиральных галактик, но им уделяется очень много внимания, для того чтобы изучить процесс выделения огромной энергии их компактными ядрами.

Среди галактик Сейферта восемь галактик считаются классическими представителями объектов этого класса: NGC 1068, NGC 1275, NGC 3227, NGC 3516, NGC 4051, NGC 4151, NGC 5548 и NGC 7469. Несмотря на многолетние исследования этих галактик, для них отсутствуют точные значения расстояний. В базе данных NASA Extragalactic Database (NED) можно увидеть результаты измерений расстояний, которые к настоящему времени получены для этих галактик с использованием различных методов. Разброс результатов очень значительный, а поскольку измеренная величина излучаемой энергии пропорциональна квадрату расстояния до галактики, то это приводит к низкой точности измерений энергии излучения активных ядер этих галактик.

Четыре галактики — NGC 1068, NGC 3227, NGC 4051 и NGC 4151 — из названных восьми имеют относительно малые лучевые скорости, то есть, вероятно, ближе расположены, и можно определить для них точные значения расстояний. Физические параметры этих галактик приведены в таблице 1. В этой же таблице приведены данные еще для трех галактик, расстояния до которых мы определили: NGC 1073, NGC 1087 и NGC 3226. Галактика NGC 1073 входит в группу NGC 1068 (Fouque et al. 1992) и к этой же группе относят иногда NGC 1087 (Tully 2015). Мы проверили такие предположения, измерив расстояния до этих галактик. Галактика NGC 3226 образует тесную пару с сейфертовской галактикой NGC 3227, поэтому мы включили ее в таблицу 1. Приведенные в таблице результаты классификации галактик (Type), величины гелиоцентрических скоростей (v_h), видимые величины (B_t) и размеры галактик в угловых минутах ($a \times b$) взяты из NED. Измеренные расстояния до галактик D получены нами, а минимальные (D_{\min}) и максимальные (D_{\max}) взяты из указанных в таблице работ.

Единственным методом точного определения расстояний до данных галактик является TRGB-метод, основанный на измерении положения верхнего края ветви красных гигантов. Несмотря на его простоту, существует трудность для применения этого метода к указанным га-

*E-mail: ntik@sao.com

Таблица 1. Параметры исследованных галактик

Galaxy	Type	B_t , mag	v_h , km s ⁻¹	$a \times b$, arcmin	D , Mpc	D_{\min} , Mpc	D_{\max} , Mpc
NGC 1068	(R)SA(rs)b	9.61	1137	7.1×6.0	11.14	7.2 [1]	16.0 [2]
NGC 1073	SB(rs)c	11.47	1208	4.9×4.5	11.28	3.2 [3]	15.2 [4]
NGC 1087	SAB(rs)c	11.46	1566	3.1×1.5	17.79	10.8 [3]	19.5 [5]
NGC 3227	SAB(s)a pec	11.10	1157	5.4×3.6	15.54	14.5 [6]	31.0 [7]
NGC 3226	E2 pec LINER	12.30	1315	3.2×2.8	14.77	23.6 [8]	43.5 [9]
NGC 4051	SAB(rs)bc	10.83	700	5.2×3.9	16.64	8.8 [10]	19.0 [7]
NGC 4151	(R)SAB(rs)ab	11.50	995	6.3×4.5	14.20	3.9 [11]	29.2 [6]

[1] — Bottinelli et al. (1986), [2] — Sofue (1991), [3] — Bottinelli et al. (1984), [4] — Tully and Fisher (1988), [5] — Theureau et al. (2007), [6] — Yoshii et al. (2014), [7] — Cackett et al. (2007), [8] — Tully et al. (2013), [9] — Blakeslee et al. (2001), [10] — Sorce et al. (2014), [11] — Tully et al. (2009).

Таблица 2. Архивные данные телескопа им. Хаббла

Галактика	ID	Камера	Длительность экспозиции, с				
			T_{F814W}	T_{F606W}	T_{F555W}	T_{F435W}	T_{F160W}
NGC 1068	5369	WFPC2	5400	—	—	—	—
NGC 1068	8090	WFPC2	—	11400	—	—	—
NGC 1068	16179	WFC3	780	—	710	—	—
NGC 1073	10001	ACS	—	2240	—	2160	—
NGC 1087	15654	ACS	3206	3536	—	—	—
NGC 3227	9293	ACS	700	—	—	—	—
NGC 4051	15645	ACS	2208	—	—	—	—
NGC 4051	14697	WFC3	3300	—	3300	—	6635
NGC 4151	13765	WFC3	3300	—	3300	—	6635

лактикам из-за малого числа глубоких снимков, необходимых для измерения расстояний.

2. ЗВЕЗДНАЯ ФОТОМЕТРИЯ

Для галактик, рассмотренных нами, на космическом телескопе им. Хаббла по разным программам и в разные годы были получены снимки, которые можно использовать для звездной фотометрии и определения расстояния. К сожалению, так как эти наблюдательные программы не ставили своей целью измерение расстояний, положения снимков, длительность экспозиций и использованные фильтры не оптимальны для такой задачи. Этот недостаток нам пришлось компенсировать выборкой звезд в наименее населенных полях, переводом результатов фотометрии в необходимую для измерений фотометрическую систему Крона–Казинца, а при отсутствии нужных изображений — измерением расстояний на основе фотометрии звезд только в одном фильтре.

При изучении звездного состава галактик и определении расстояний мы использовали архивные данные космического телескопа им. Хаббла (HST) по заявкам ID 5369, 8090, 9293, 9392, 10001, 10915, 13765, 14697, 15645, 15654 и 16179 (см. таблицу 2). На рис. 1 представлены изображения из обзора DSS 2 (Digitized Sky Survey), полученные для четырех сейфертовских галактик с голубым фильтром, на которых размечены положения снимков из архива космического телескопа им. Хаббла, а на рис. 2 — HST-снимки этих галактик.

Яркий фон центральных областей галактик и присутствие в них большого числа сверхгигантов и AGB-звезд, более ярких, чем красные гиганты, делают эти области малопригодными для фотометрии красных гигантов и определения по ним расстояния TRGB-методом. У таких галактик измерения расстояний мы проводили по звездам на периферии. Эта селекция вела к уменьшению общего числа

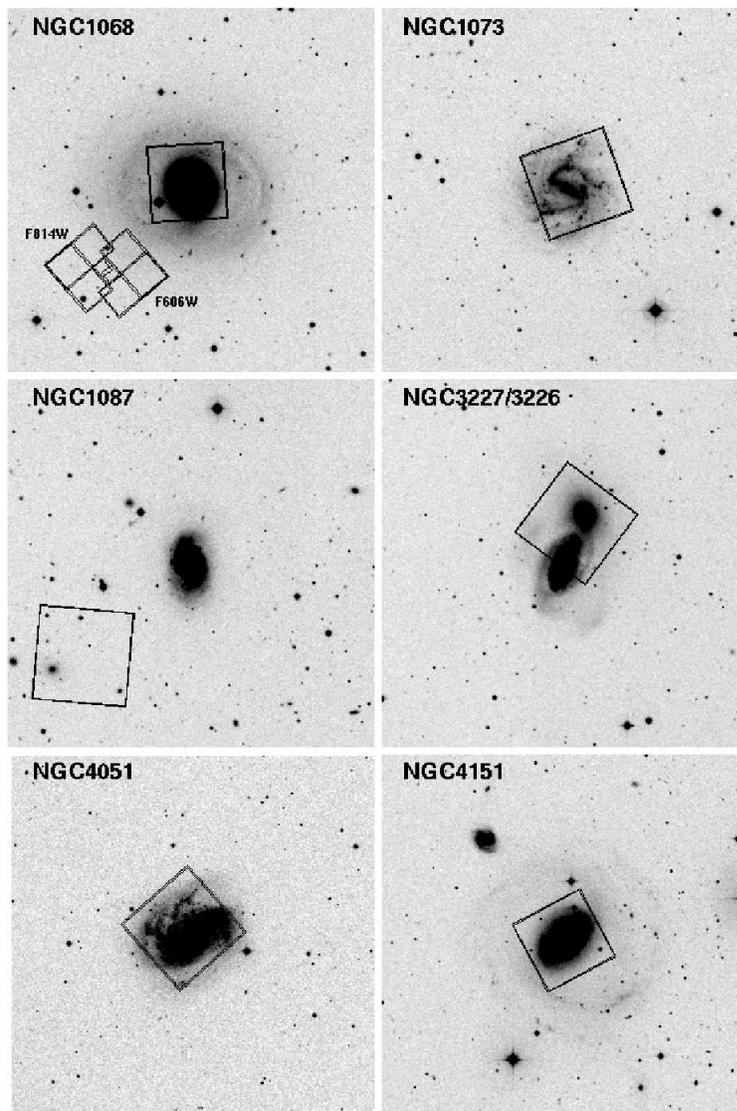


Рис. 1. Изображение галактик на снимках обзора DSS2. Отмечены поля космического телескопа им. Хаббла. Размер снимков $15' \times 15'$, север — вверх.

звезд в выборке, но увеличивала содержание красных гигантов по отношению к другим типам звезд, что давало возможность измерить положение верхнего края ветви красных гигантов (TRGB-скачок), необходимого для вычисления расстояния.

Для звездной фотометрии мы использовали два пакета программ: DAOPHOT II (Stetson 1987; 1994) и DOLPHOT 2.0 (Dolphin 2016). Фотометрия звезд в обоих случаях проводилась стандартным образом. Работа с DAOPHOT II описана нами ранее (Tikhonov et al. 2019). Пакет DOLPHOT 2.0 применялся в соответствии с рекомендациями Долфина¹. Процедура фотометрии состояла из предварительного маскирования

¹<http://americano.dolphinim.com/dolphot/dolphot.pdf>

плохих пикселей, удаления следов космических частиц и дальнейшей PSF-фотометрии найденных звезд в двух фильтрах. 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, полученными при работе DAOPHOT II и DOLPHOT 2.0.

Принципы фотометрии программами DOLPHOT и DAOPHOT одинаковы, но есть некоторые различия при их использовании. Например, в DAOPHOT в качестве PSF-звезд мы брали

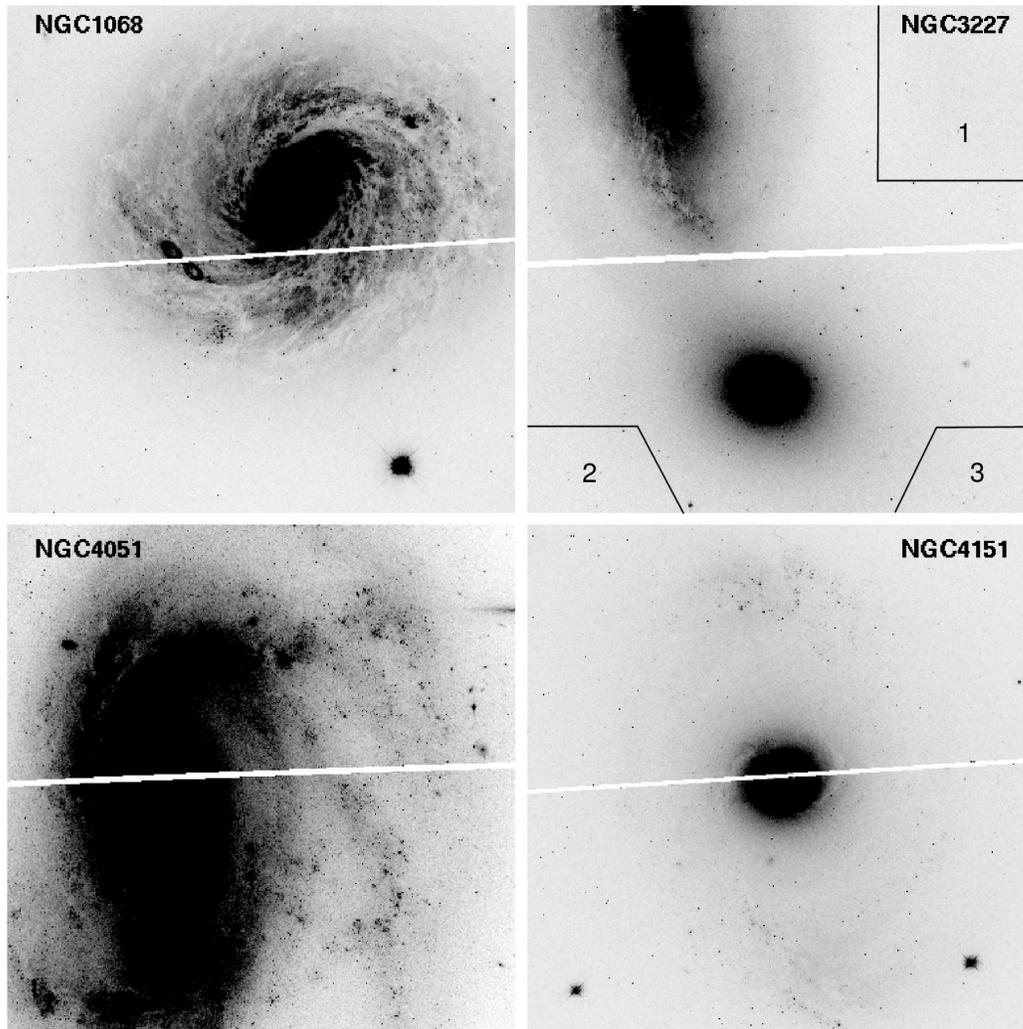


Рис. 2. Изображения сейфертовских галактик на HST-снимках: NGC 1068 ($F555W$), NGC 3227 ($F814W$), NGC 4051 ($F814W$), NGC 4151 ($F555W$). Белые полосы поперек каждого снимка возникают из-за пустой площади между чипами камер ACS и WFC3. На снимке галактики NGC 3227 показаны области, где выбирались звезды для определения TRGB-скачков. Область 1 — для NGC 3227, области 2 и 3 — для NGC 3226.

одиночные звезды из исследуемых полей, а в DOLPHOT пользовались библиотекой PSF-профилей. Для снимков с ACS-камерой мы использовали DAOPHOT II, а для снимков с WFC3 — DOLPHOT 2.0. При измерении положений TRGB-скачков оба метода дают сходные результаты, и значимые различия между ними не обнаружены.

Полученные при фотометрии звезд диаграммы Герцшпрунга–Рессела (СМ-диаграммы) являются обычными диаграммами для такого типа галактик, поэтому мы не обсуждаем их морфологию и не представляем диаграммы. Отметим, что на СМ-диаграммах видны ветви голубых и красных сверхгигантов, а красные гиганты визуально не выделяются из-за большого числа более ярких сверхгигантов и AGB-звезд.

Как было указано выше, кроме измерений стандартным TRGB-методом мы определяли расстояния и на основе фотометрии звезд только в одном фильтре. Рассмотрим, для каких целей требуются снимки в двух фильтрах. При переводе инструментальных величин в стандартную систему Крона–Казинца необходимо знать показатели цвета звезд, которые вычисляются после фотометрии звезд в двух фильтрах. Однако при работе в узком интервале показателя цвета, то есть при фотометрии красных гигантов, можно использовать среднее значение показателя цвета этих звезд, и ошибка перевода будет незначительной. Например, при фотометрии галактик с камерой WFPC2 (Tikhonov 2006) мы нашли, что в интервале показателей цвета $1^m35 < (V - I) < 1^m45$ (что соответствует малометаллическим красным гигантам) соотношение

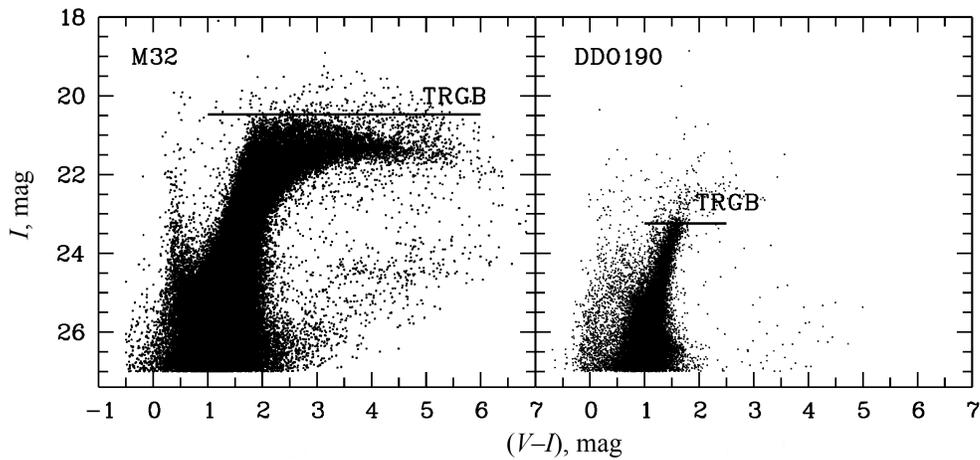


Рис. 3. CM-диаграммы красных гигантов и AGB-звезд высокометаллической галактики M32 и галактики DDO190 с низкой металличностью. У красных гигантов M32 видно нелинейное падение светимости при увеличении показателя цвета (металличности) от $I_{\text{TRGB}} = 20^{\text{m}}47$ при $(V - I) = 1^{\text{m}}8$ до $I_{\text{TRGB}} = 21^{\text{m}}5$ при $(V - I) = 6^{\text{m}}$. У DDO190 красные гиганты имеют очень небольшое различие металличности и одно значение $I_{\text{TRGB}} = 23^{\text{m}}24$.

между инструментальной величиной i_0 и величиной I в системе Крона–Казинца выражается простой зависимостью:

$$I = i_0 + 21.67 \pm 0.01. \quad (1)$$

В указанном диапазоне показателей цвета находятся красные гиганты маломассивных галактик и красные гиганты на далекой периферии спиральных галактик.

В DAORHOT II для преобразования инструментальных звездных величин в V - и I -величины системы Крона–Казинса мы использовали уравнения перехода, полученные нами ранее (Tikhonov et al. 2019):

$$(V - I) = 1.3213(v - i) + 1.133, \quad (2)$$

$$I = i + 0.0592(V - I) + 25.972, \quad (3)$$

где v и i — инструментальные звездные величины, а V и I — звездные величины в системе Крона–Казинса.

В уравнении (3) видна малая зависимость получаемой светимости звезды в фильтре I от показателя цвета звезды $(V - I)$. То есть, если мы будем использовать среднее значение показателя цвета $(V - I) = 1^{\text{m}}6$, что близко к реальным цветам красных гигантов массивных спиральных галактик, то звезды краснее или голубее на $0^{\text{m}}2$ будут иметь ошибку измерения светимости всего лишь в $0^{\text{m}}01$. Таким образом, при фотометрии красных гигантов мы можем получить их светимости в I -фильтре системы Крона–Казинса на основе изображений только в одном фильтре $F814W$.

На CM-диаграмме светимость красных гигантов на вершине ветви, по которым определяют

положение TRGB-скачка, зависит от их показателя цвета. В физическом смысле это зависимость светимости от металличности звезд и их возраста. Согласно работе Lee et al. (1993), изменение показателя цвета красных гигантов $(V - I)$ от $1^{\text{m}}4$ до $1^{\text{m}}8$ ведет к изменению положения TRGB-скачка на $0^{\text{m}}1$. На рис. 3 представлена CM-диаграмма галактики M32, в которой имеются звезды разной металличности. Очень населенная ветвь красных гигантов простирается по цвету от $(V - I) = 1^{\text{m}}7$ при $I_{\text{TRGB}} = 20^{\text{m}}47$ до $(V - I) = 6^{\text{m}}$ при $I_{\text{TRGB}} = 21^{\text{m}}5$. Изменение показателя цвета красных гигантов от 2^{m} до 6^{m} ведет к падению их блеска нелинейным образом на 1^{m} (см. рис. 3). Галактика M32 относится к эллиптическим галактикам с большим диапазоном металличности звезд, что размывает TRGB-скачок. Иррегулярные галактики имеют узкую ветвь красных гигантов (DDO190 на рис. 3), и TRGB-скачок определяется очень точно. В спиральных галактиках присутствуют звезды разного возраста и металличности. Кроме того, в этих галактиках наблюдается падение металличности звезд от центра к краю, поэтому для повышения точности измерений TRGB-скачка выборку звезд в таких галактиках следует проводить на максимально удаленных от центра расстояниях. Поскольку спиральные галактики имеют протяженные толстые диски и гало, состоящие из наиболее ярких низкометаллических красных гигантов, то эти объекты всегда будут попадать в выборку звезд, независимо от места ее расположения в галактике. Эти звезды периферии в наименьшей степени подвержены действию поглощения света родительской галактикой и поэтому именно они могут определять положение TRGB-скачка спиральной галактики.

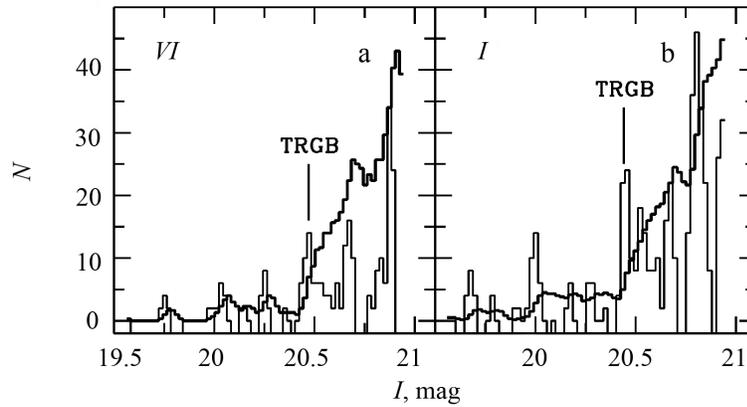


Рис. 4. Функция светимости красных гигантов и AGB-звезд М 32 при фотометрии и селекции звезд в двух фильтрах $F814W$ и $F606W$ (слева) и аналогичная функция светимости при фотометрии только одного снимка $F814W$ (справа). Вертикальной линией отмечено на каждой диаграмме положение TRGB-скачка. Различие между ними в $0^{\text{m}}03$ происходит из-за ошибки перевода инструментальных величин i_0 в I -величины Крона–Казинца очень металлических звезд.

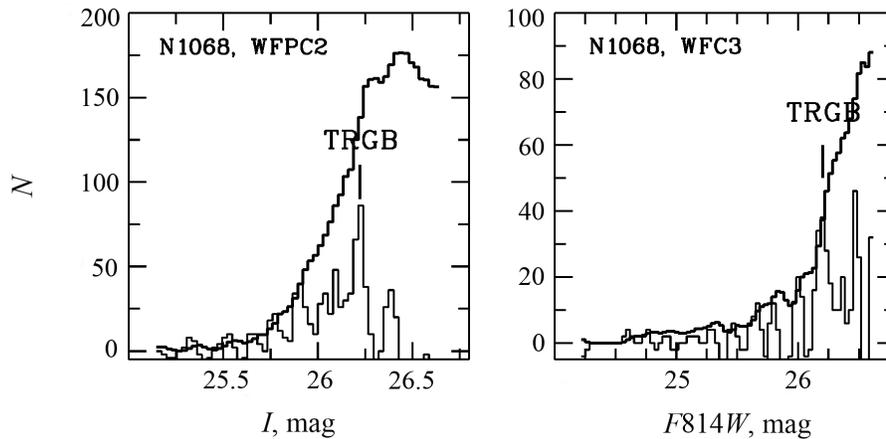


Рис. 5. Функции светимости красных гигантов и AGB-звезд галактики NGC 1068, полученные с камерами WFPC2 и ACS. Тонкой линией отмечены на каждой диаграмме функции Собеля, максимумы которой соответствуют началу ветви красных гигантов — TRGB-скачку, положение которого отмечено вертикальными штрихами.

Указанные неопределенности с фотометрическими параметрами звезд привели некоторых астрономов к использованию постоянного значения светимости красных гигантов на вершине их ветви, независимо от показателя цвета: для иррегулярных галактик в диапазоне от $M_I = -4^{\text{m}}04$ до $M_I = -4^{\text{m}}05$ (Bellazzini et al. 2001, Corbin et al. 2008) и для спиральных галактик — $M_I = -4^{\text{m}}08$ (Seth et al. 2005). В других работах по определению расстояний (Jacobs et al. 2009) поправка за показатель цвета вводится относительно среднего значения показателя цвета $(V - I) = 1^{\text{m}}6$ красных гигантов спиральных галактик:

$$M_I = -4.05 + 0.217((V - I) - 1.6).$$

Поскольку для большинства спиральных галактик показатель цвета красных гигантов $(V - I)$ заключен в диапазоне от $1^{\text{m}}4$ до $1^{\text{m}}8$, то значение M_I

для них изменяется на $0^{\text{m}}04$ и значит эту максимальную ошибку измерений мы можем получить при определении расстояний без поправок на цвет гигантов. В реальных измерениях морфология галактики и ее светимость указывают на ожидаемый показатель цвета красных гигантов, и ошибка измерений будет меньше.

При использовании фотометрии в двух фильтрах появляется возможность проводить селекцию звезд по показателю цвета и таким образом увеличить в выборке содержание красных гигантов. Кроме того, CM -диаграмма, на которой видна ветвь красных гигантов, дает уверенность, что определен TRGB-скачок, а не скачок AGB-звезд, который располагается на CM -диаграмме выше на одну звездную величину. Впрочем, даже наличие фотометрии в двух фильтрах не избавляет

от этой распространенной ошибки (Tikhonov and Galazutdinova 2018; 2020).

На рис. 4 представлены функции светимости звезд галактики М32. На рис. 4а представлен результат фотометрии и селекции звезд в фильтрах $F814W$ и $F606W$, а на рис. 4б функция светимости получена на основе фотометрии только в одном фильтре $F814W$. На первый взгляд, диаграммы идентичны, но в положении TRGB-скачков есть различие в 0^m03 , которое появилось из-за ошибки преобразования инструментальных величин в величины Крона–Казинца звезд с очень большим показателем цвета. При учете поглощения света в направлении на М32 (Schlafly and Finkbeiner 2011) мы получаем два значения TRGB-расстояния до М32: $D_{VI} = 0.78 \pm 0.03$ Мпк и $D_I = 0.77 \pm 0.04$ Мпк. Видно, что различие в результатах незначимое. В иррегулярных и на периферии спиральных галактик красные гиганты имеют существенно меньшую металличность, и различия в положении TRGB-скачков, как это наблюдается в М32, отсутствуют.

Фотометрия в одном фильтре I дает некоторые преимущества. Отпадает необходимость иметь снимки во втором фильтре и поэтому появляется возможность использовать те многочисленные архивные HST-снимки с одним $F814W$ -фильтром, которые иначе невозможно использовать для определения расстояний. Поскольку при одинаковых экспозициях красные гиганты в фильтре $F814W(I)$ видны лучше, чем в фильтре $F606W(V)$, то использование для звездной фотометрии снимков в двух фильтрах понижает предел регистрации красных гигантов, и расстояния до галактик могут стать неизмеримыми, хотя в одном фильтре $F814W$ красные гиганты видны вполне отчетливо.

Таким образом, при определенных условиях для определения расстояния достаточно иметь снимки только в одном фильтре $F814W$. Это показано нами в работе по изучению звездных подсистем галактики М87 в скоплении Virgo (Tikhonov et al. 2019).

3. NGC 1068 И ЕЕ ГРУППА ГАЛАКТИК

Довольно яркая галактика NGC 1068 = М77 ($B_T = 9^m61$ по NED) была внесена Арпом под номером 37 в свой атлас пекулярных галактик (Ayr 1966). NGC 1068 является центром малой группы галактик (Fouque et al. 1992), в которую также входят галактики меньшей светимости: NGC 1055, NGC 1073 и другие. За последние десятилетия опубликованы тринадцать работ, в которых состав группы NGC 1068 изменяется от трех до одиннадцати членов.

Результаты измерений расстояния до NGC 1068 методом Талли–Фишера заключены в диапазоне от 7.2 до 16.0 Мпк (см. таблицу 1), но обычно принимают значение $D = 10.1$ Мпк (Tully et al. 2009). На HST получено много снимков NGC 1068 с фильтрами $F814W(I)$, $F555W(V)$, $F550W(V)$, $F547M(V)$ и $F656N(H\alpha)$, но длительности экспозиций большинства из них недостаточны для регистрации красных гигантов, поэтому эти снимки можно использовать только для изучения звездной морфологии галактики. На снимке (рис. 2) видно, что NGC 1068 является обычной спиральной галактикой без каких-либо морфологических особенностей, за исключением яркого звездообразного ядра.

Глубокие снимки с камерой WFPC2 в фильтрах $F814W$ и $F606W$ с экспозициями 5400 с и 11400 с сделаны на периферии NGC 1068, где отсутствуют яркие сверхгиганты и все видимое звездное население состоит из красных гигантов и меньшего числа более ярких AGB-звезд. Недостаток этих изображений состоит в том, что они получены с камерой WFPC2, эффективность которой существенно ниже, чем у камеры ACS или WFC3. Кроме того, снимки с фильтрами $F814W$ и $F606W$ не пересекаются друг с другом (рис. 1), что исключает возможность измерения показателя цвета звезд по этим данным.

Принимая во внимание указанные недостатки, мы провели определение расстояния на основе одного фильтра. Снимки с WFPC2-камерой были профотометрированы в DAOPHOT II стандартным образом, отдельно для фильтров $F814W$ и $F606W$. Совмещение результатов для получения показателя цвета не проводилось из-за принадлежности этих снимков разным полям (рис. 1). На далекой периферии галактики красные гиганты имеют низкую металличность и их показатель цвета равен примерно $(V - I) = 1^m4 \pm 0^m1$. Используя уравнение (1), мы определили светимости звезд в фильтре I системы Крона–Казинца и построили функцию светимости звезд NGC 1068 (рис. 5). На полученной диаграмме виден TRGB-скачок при $I = 26^m22$. На WFPC2-снимке с фильтром $F606W$ также видны красные гиганты, но их светимость (примерно при $V = 27^m6$) находится вблизи фотометрического предела снимков, и мы не использовали эти результаты. Положение TRGB-скачка при $I = 26^m22 \pm 0^m08$ и величина поглощения света $A_I = 0^m050$ из работы Schlafly and Finkbeiner (2011) дает нам возможность определить расстояние до NGC 1068: $D_{WFPC2} = 11.05 \pm 0.75$ Мпк.

В архиве HST есть снимки NGC 1068 с камерой WFC3 (см. таблицу 2). Выполнив их фотометрию в DOLPHOT 2.0, мы получили CM-диаграмму

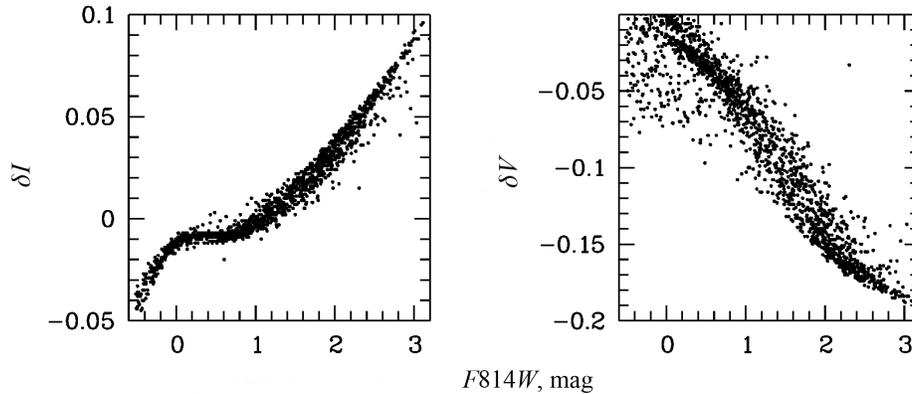


Рис. 6. Зависимость между показателем цвета системы VEGAMAG и разностью величин $(I - F814W) = \delta I$ и $(V - F555W) = \delta V$.

звезд NGC 1068, которая ничем не отличается от диаграмм аналогичных спиральных галактик. Из-за яркого фона галактики красные гиганты видны только на краях снимка, но их количества достаточно для получения функции светимости, которая приведена на рис. 5. На этой диаграмме виден TRGB-скачок при $F814W = 26^{\text{m}}20 \pm 0^{\text{m}}10$. При фотометрии WFC3-снимков DOLPHOT 2.0 представляет результат в системе VEGAMAG. Чтобы получить нужные нам значения I и V в системе Крона–Казинца, мы воспользовались фотометрией DOLPHOT 2.0 ACS-снимков галактики NGC 3125 и получили результат фотометрии как в системе VEGAMAG, так и в системе Крона–Казинца. Зависимости между величинами в этих системах показаны на рис. 6. С помощью этого рисунка мы определили, что различие между положениями TRGB-скачка в двух системах составляет $0^{\text{m}}02$, то есть в системе Крона–Казинца $I = 26^{\text{m}}22 \pm 0.10$. Используя работу Lee et al. (1993), мы оценили расстояние до NGC 1068 по снимкам WFC3-камеры: $D = 11.22 \pm 0.81$ Мпк. Среднее значение двух измерений расстояния $D_{\text{NGC 1068}} = 11.14 \pm 0.54$ Мпк. При одинаковых значениях TRGB-скачков расстояние по снимкам WFC3 получается больше, чем по снимкам с WFPC2, из-за более близкого расположения выборки звезд к центру галактики и большей металличности красных гигантов.

Для галактики NGC 1073, второго по яркости члена группы NGC 1068, в архиве HST нет глубоких снимков с фильтром $F814W$ (I), но есть ACS-снимки с фильтрами $F606W$ (V) и $F435W$ (B). На краю галактики, где мало ярких звезд, на снимке $F606W$ видны красные гиганты. Применение TRGB-метода основано на том, что светимость красных гигантов в фильтре I ($F814W$ для HST) мало зависит от их металличности. В фильтре V ($F606W$) такая зависимость существует и для этого фильтра нельзя использовать значение

TRGB-скачка для определения расстояния без привлечения дополнительной информации о металличности красных гигантов и их показателе цвета ($V - I$).

Ранее при определении расстояния до спиральной галактики NGC 1313 мы провели измерения показателя цвета ($V - I$) в нескольких полях вокруг галактики и получили среднее значение $(V - I)_{\text{TRGB}} = 1^{\text{m}}6$ (Tikhonov and Galazutdinova 2016). Опыт фотометрии других спиральных галактик показывает, что значение $(V - I)_{\text{TRGB}}$ уменьшается от $1^{\text{m}}8$ для центральных областей до $1^{\text{m}}4$ для далекой периферии. Для маломассивных галактик такие изменения незначительны. Исходя из вышесказанного, мы можем принять значение $(V - I)_{\text{TRGB}} = 1^{\text{m}}6 \pm 0^{\text{m}}05$ для красных гигантов NGC 1073. Для уменьшения численности ярких сверхгигантов и AGB-звезд мы провели выборку звезд на краю снимка NGC 1073 и построили функцию светимости (рис. 7), на которой виден TRGB-скачок при $V = 27^{\text{m}}84 \pm 0^{\text{m}}05$. Принимая значение $(V - I)_{\text{TRGB}} = 1^{\text{m}}60 \pm 0^{\text{m}}05$, мы находим, что TRGB-скачок в фильтре I должен находиться при $I = 26^{\text{m}}24 \pm 0.07$. Учитывая поглощение света $A_I = 0^{\text{m}}059$ (Schlafly and Finkbeiner 2011) в направлении на NGC 1073 и используя работу Lee et al. (1993), мы определяем расстояние до NGC 1073: $D = 11.28 \pm 0.70$ Мпк.

Лучевая скорость галактики NGC 1087 превышает скорости NGC 1068 и NGC 1073 (см. таблицу 1), но это только косвенно указывает на иное расстояние до NGC 1087 по сравнению с NGC 1068. В архиве HST есть глубокие снимки, полученные на далекой периферии NGC 1087, что позволило нам определить расстояние до этой галактики. Фотометрия этих снимков пакетом DOLPHOT 2.0 выявила красные гиганты в этом поле, а на функции светимости (рис. 8) хорошо виден TRGB-скачок при $I = 27^{\text{m}}22 \pm 0^{\text{m}}05$.

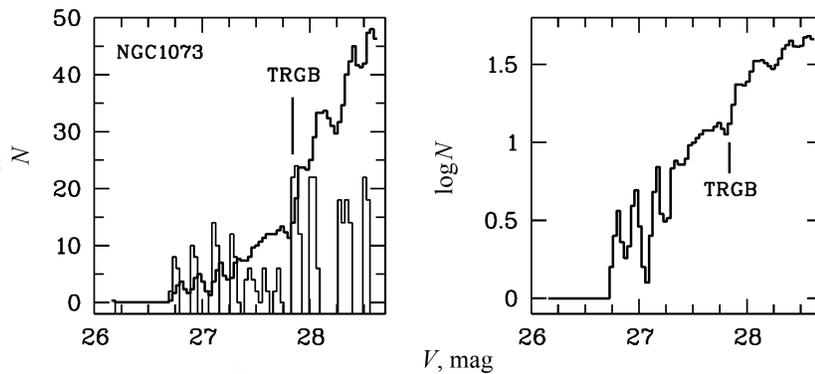


Рис. 7. Функция светимости красных гигантов и AGB-звезд галактики NGC 1073, полученная в фильтре $F606W$ с камерой ACS. Тонкой линией отмечена функция Собеля, максимум которой соответствует TRGB-скачку красных гигантов.

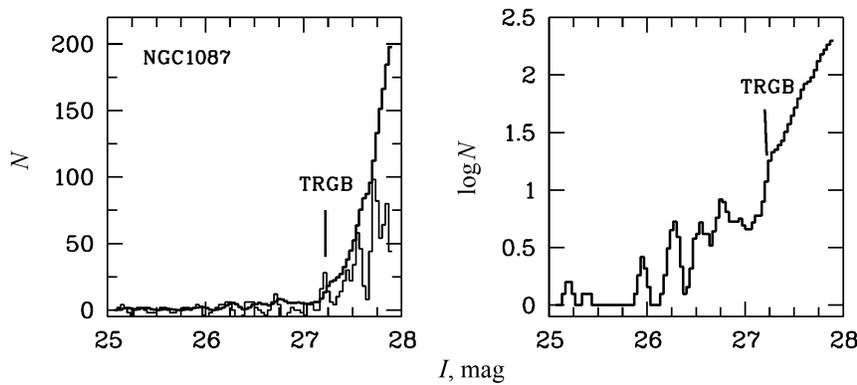


Рис. 8. Функция светимости красных гигантов и AGB-звезд галактики NGC 1087. Тонкой линией отмечена функция Собеля, максимум которой соответствует TRGB-скачку красных гигантов.

Учитывая поглощение света в направлении на NGC 1087 ($A_V = 0^m052$), мы получили расстояние $D = 17.79 \pm 0.83$ Мпк. Это значение показывает, что NGC 1087 расположена на 6 Мпк дальше основных галактик группы NGC 1068 и не входит в ее состав.

4. СИСТЕМА ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ГАЛАКТИК NGC 3227 И NGC 3226

Физическая пара галактик: спиральная NGC 3227 (SAB(s)a pec, Sy2) и менее массивная эллиптическая NGC 3226 (E2 pec, LINER) — неоднократно включалась в списки двойных галактик (Holm 187 (Holmberg 1937), VV 209 (Vorontsov-Velyaminov 1959), Arp 94 (Arp 1966), KPG 234 (Karachentsev 1972)). Две галактики находятся на малом расстоянии друг от друга и взаимодействуют между собой, а результат взаимодействия проявляется даже на DSS2-снимке (рис. 1) в виде диффузных хвостов и облаков вокруг галактик. Mundell et al. (2004), подробно изучившие эту систему, сообщают о

возможном существовании карликовой галактики, появившейся в результате гравитационного взаимодействия NGC 3227 и NGC 3226. Лучевые скорости двух галактик имеют небольшое различие ($v_h = 1157 \pm 3$ км с $^{-1}$ и $v_h = 1315 \pm 5$ км с $^{-1}$), что также указывает на их близкое пространственное расположение. В таблице 1 показаны минимальные и максимальные расстояния до каждой галактики системы, которые измерялись в разные годы разными методами. Оценки сильно разнятся, хотя ясно, что расстояния до двух галактик должны быть почти одинаковы.

В архиве HST имеется снимок с ACS-камерой в фильтре $F814W$ с экспозицией 700 с, на котором видна галактика NGC 3226 и большая часть NGC 3227 (рис. 2). Мы использовали это снимок для поиска красных гигантов и определения расстояния. Фотометрия звезд была проведена в DAOPHOT II стандартным образом. Инструментальная звездная величина была переведена в систему Крона–Казинца по уравнениям (2) и (3).

Красные гиганты, необходимые для измерения расстояния, не видны в центральных областях галактик из-за большого числа более ярких звезд и

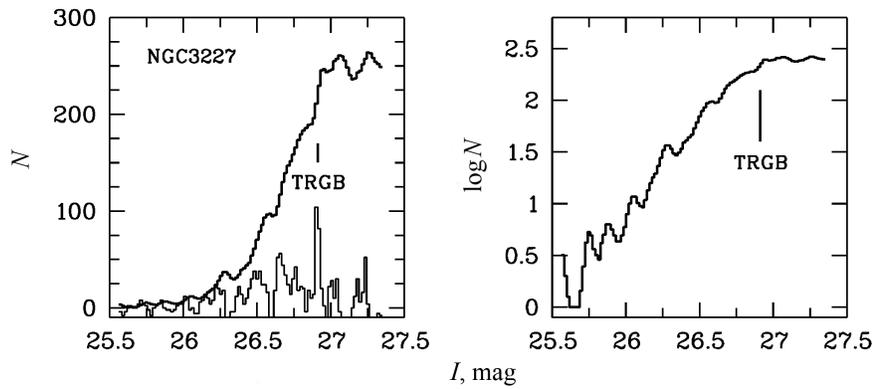


Рис. 9. Функция светимости красных гигантов и AGB-звезд галактики NGC 3227. Тонкой линией отмечена функция Собеля.

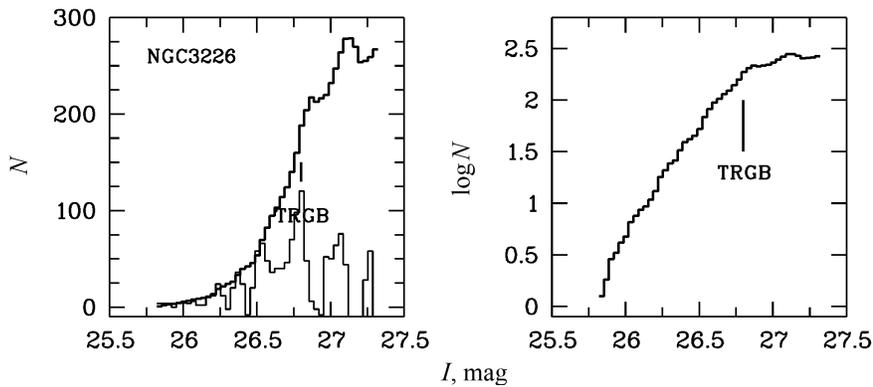


Рис. 10. Функция светимости красных гигантов и AGB-звезд галактики NGC 3226, полученная в фильтре $F814W$ с камерой ACS. Тонкой линией отмечена функция Собеля.

повышенной яркости фона галактики, но на снимке NGC 3227 несложно найти места на периферии, где отсутствуют яркие звезды, а фон галактики низкий. Для галактики NGC 3226 выборка звезд проводилась в нижней части снимка (рис. 2), максимально удаленной от более яркой NGC 3227, а для основной галактики NGC 3227 звезды выбирались в верхней части снимка на периферии галактики. На рис. 9 и рис. 10 представлены функции светимости звезд этих полей с указанием положений TRGB-скачков. Эти же функции светимости показаны рядом в логарифмическом масштабе, где более наглядно видно изменение численности звезд, особенно в районе скачка AGB-звезд, что обычно наблюдается примерно на одну звездную величину до положения TRGB-скачка.

На диаграммах рис. 9 и рис. 10 у галактики NGC 3227 $I_{\text{TRGB}} = 26^{\text{m}}91 \pm 0^{\text{m}}03$, а у NGC 3226 $I_{\text{TRGB}} = 26^{\text{m}}80 \pm 0^{\text{m}}05$. Используя работу Lee et al. (1993), учитывая поглощение света $A_I = 0^{\text{m}}034$ (Schlafly and Finkbeiner 2011) и принимая средний показатель цвета ветви гигантов $(V - I)_{\text{TRGB}} = 1^{\text{m}}5$ для NGC 3227 и $(V - I)_{\text{TRGB}} = 1^{\text{m}}6$ для NGC 3226 (у эллипти-

ческих галактик металличность красных гигантов обычно выше, чем у спиральных), мы получили значения расстояний $D = 15.33 \pm 0.80$ Мпк для NGC 3227 и $D = 14.80 \pm 0.85$ Мпк для NGC 3226.

Возможно, что немного большее расстояние до NGC 3227 можно объяснить дополнительным поглощением света в наблюдаемых хвостах и облаках вокруг галактики. Одно такое облако совпадает с положением нашей выборки звезд для определения расстояния до NGC 3227. Среднее расстояние до этой системы галактик $D = 15.06 \pm 0.82$ Мпк.

5. СПИРАЛЬНЫЕ ГАЛАКТИКИ NGC 4051 И NGC 4151

Несмотря на долгую историю изучения этих ярких сейфертовских галактик, расстояния до них принимаются с большими неопределенностями (таблица 1). Для NGC 4051 в архиве HST есть снимок с камерой ACS в фильтре $F814W$ и длительностью экспозиции $T_{F814W} = 2208$ с. На нем хорошо видны красные гиганты и можно получить значение расстояния по одному этому снимку. Кроме того, есть снимки $F814W$ и $F555W$ с камерой WFC3, которые также можно использовать

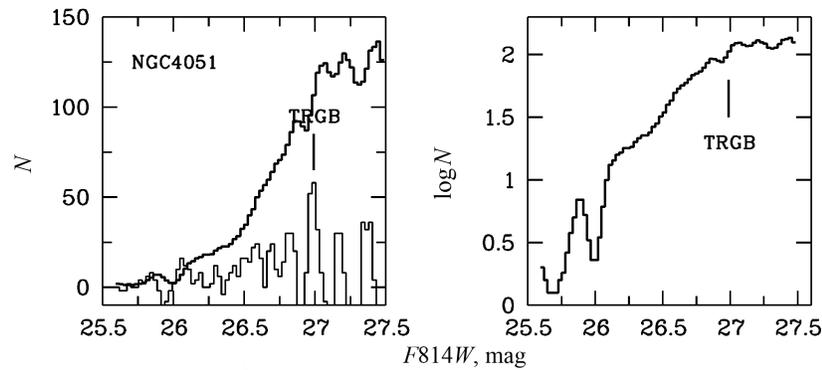


Рис. 11. Функция светимости красных гигантов и AGB-звезд галактики NGC 4051, полученная в фильтре $F814W$ с камерой ACS.

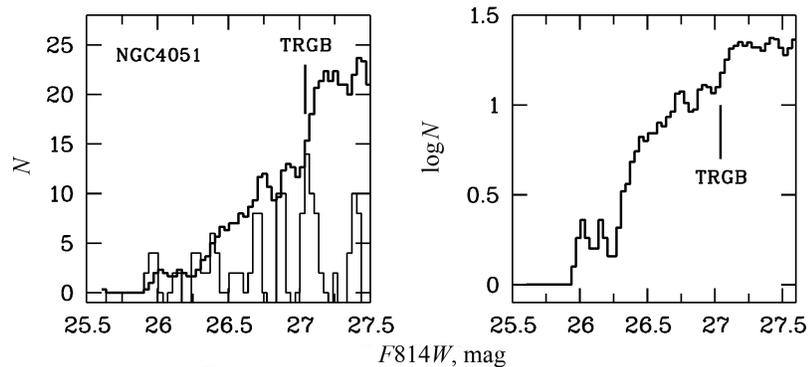


Рис. 12. Функция светимости красных гигантов и AGB-звезд галактики NGC 4051, полученная в фильтре $F814W$ с камерой WFC3. Светимость звезд приведена в системе VEGAMAG.

для определения расстояния. Фотометрия звезд была проведена в DAOPHOT II для ACS-снимков и в DOLPHOT 2.0 для WFC3. Результаты фотометрии прошли стандартную селекцию, а для измерения расстояния использовались звезды на периферии галактики (8.5 кпк от центра). Полученные функции светимости показаны на рис. 11 и рис. 12. На диаграмме по данным ACS-камеры виден TRGB-скачок при $I_{\text{TRGB}} = 26^{\text{m}}99 \pm 0^{\text{m}}05$, а также начало подъема численности AGB-звезд (AGB-скачок) при $I = 26^{\text{m}}1$. Разница между этими скачками — примерно одна звездная величина, и наличие двух этих скачков косвенно подтверждает правильность результатов измерений.

TRGB-скачок для NGC 4051, полученный с помощью WFC3-камеры, виден при значении $F814W = 27^{\text{m}}04 \pm 0^{\text{m}}08$ (рис. 12). На основе рис. 6 преобразуем это значение в систему Крона–Казинца: $I_{\text{TRGB}} = 27^{\text{m}}06 \pm 0^{\text{m}}08$. Поглощение света $A_I = 0^{\text{m}}02$ в направлении на NGC 4051 принимаем согласно работе Schlafly and Finkbeiner (2011). Используя работу Lee et al. (1993), мы вычисляем расстояние до NGC 4051: $D_{\text{ACS}} = 16.22 \pm 0.92$ Мпк и $D_{\text{WFC3}} = 16.75 \pm 1.04$ Мпк.

Среднее значение расстояния до NGC 4051 равно: $D = 16.48 \pm 0.69$ Мпк.

Спиральная галактика NGC 4151 входит в каталоги двойных галактик (Holmberg 345A и KPG 324B). По всей видимости, она составляет пару со спиральной галактикой NGC 4145 ($B_t = 11^{\text{m}}78$), которая расположена на расстоянии $28'7$, или 119 кпк в проекции на небесную сферу, и имеет лучевую скорость $v_h = 1009$ км с $^{-1}$, очень незначительно отличающуюся от скорости NGC 4151 ($v_h = 995$ км с $^{-1}$).

Для NGC 4151 в архиве HST есть снимки с камерой WFC3 (таблица 2), на которых можно выделить красные гиганты. Фотометрия этих снимков была проведена в DOLPHOT 2.0 стандартным образом. Кроме обычной селекции звезд мы оставили только звезды на периферии галактики, чтобы уменьшить в выборке численность более ярких, чем красные гиганты, сверхгигантов и AGB-звезд. Функция светимости для этой выборки красных гигантов и AGB-звезд представлена на рис. 13. TRGB-скачок на этой диаграмме виден при $F814W = 26^{\text{m}}68 \pm 0^{\text{m}}05$. Преобразуем это значение в систему Крона–Казинца на основе

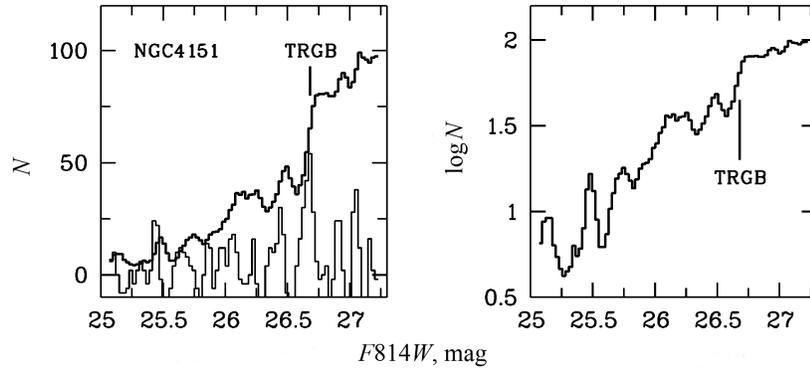


Рис. 13. Функция светимости красных гигантов и AGB-звезд галактики NGC 4151, полученная в фильтре $F814W$ с камерой WFC3. Тонкой линией отмечена функция Собеля.

Таблица 3. Результаты фотометрии галактик

Галактика	I_{TRGB} , mag	A_B , mag	A_I , mag	$(m - M)$, mag	D , Мпс	B_t , mag	M_B , mag
NGC 1068	26.22	0.121	0.050	30.23	11.14 ± 0.54	9.61	-20.74
NGC 1073	26.24	0.143	0.059	30.26	11.28 ± 0.70	11.47	-18.93
NGC 1087	27.22	0.125	0.052	31.25	17.79 ± 0.83	11.46	-19.91
NGC 3226	26.80	0.082	0.034	30.85	14.80 ± 0.85	12.30	-18.63
NGC 3227	26.91	0.082	0.034	30.93	15.33 ± 0.80	11.10	-19.91
NGC 4051	27.03	0.047	0.020	31.08	16.48 ± 0.69	10.83	-20.30
NGC 4151	26.70	0.098	0.041	30.76	14.20 ± 0.88	11.50	-19.36

рис. 6 и получаем $I_{\text{TRGB}} = 26^{\text{m}}70 \pm 0^{\text{m}}05$. Учитывая поглощение света $A_I = 0^{\text{m}}041$ (Schlafly and Finkbeiner 2011) и используя работу Lee et al. (1993), оцениваем расстояние до галактики NGC 4151: $D = 14.20 \pm 0.88$ Мпк.

Указанная в таблицах точность измерения расстояний (внешняя точность) является результатом сложения нескольких возможных погрешностей измерений. Точность метода (Lee et al. 1993) составляет $0^{\text{m}}1$. Точность определения TRGB-скачка изменяется от галактики к галактике в пределах от $0^{\text{m}}03$ до $0^{\text{m}}10$. Остальные составляющие ошибки измерения — перевод из одной системы в другую, точность фотометрии звезд, ошибка PSF-функции — не превышают $0^{\text{m}}02$ – $0^{\text{m}}03$ для каждой составляющей.

Для некоторых галактик есть HST-изображения с инфракрасным фильтром $F160W$. На этих снимках галактики хорошо разрешаются на звезды, однако использовать эти данные для измерения расстояний весьма затруднительно из-за отсутствия надежных калибровок.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты измерения расстояний до семи галактик представлены в таблице 3. Важно

отметить, что для четырех классических сейфертовских галактик впервые TRGB-методом получены точные расстояния. Это позволит повысить точность измерений энергетики их активных ядер, что совершенно необходимо для изучения природы и причины излучения столь большой энергии.

В группе галактик NGC 1068 определены расстояния до двух основных членов группы: NGC 1068 и NGC 1073. Учитывая, что их массы существенно больше масс второстепенных членов группы, мы можем считать, что среднее расстояние до NGC 1068 и NGC 1073 является расстоянием до всей группы. Показано, что NGC 1087, которую иногда включают в группу NGC 1068, в эту группу не входит. Измеренные расстояния до NGC 1068 и NGC 1073 позволяют нам определить светимости массивных звезд, вероятных LBV, которые найдены в этих галактиках.

Снимки $F814W$ WFPC2-камеры для NGC 1068 получены на расстоянии $4'6$, что составляет 15 кпк. На таком расстоянии от центра массивной галактики, какой является NGC 1068 ($M_B = -20^{\text{m}}74$), красные гиганты толстого диска и гало достаточно многочисленны, поэтому не возникает проблемы с определением TRGB-скачка. Для галактики NGC 1087 снимки $F814W$ и $F606W$

с ACS-камерой получены на расстоянии 5'74 от центра галактики, что соответствует 30 кпк. Диски и гало массивных галактик простираются на существенно большие, чем 30 кпк, расстояния (Ibata et al. 2014, Rejkuba et al. 2014, Rudick et al. 2006, Tikhonov et al. 2005; 2019), поэтому нет ничего удивительного в присутствии красных гигантов в исследуемом поле около NGC 1087.

Использование снимков только в одном фильтре *F814W* дало нам возможность получить надежные оценки расстояний до галактик, пространственные положения которых до этого были очень неопределенными. Аналогичные измерения мы проводили при изучении звездных подсистем галактики M87 в скоплении Virgo (Tikhonov et al. 2019) и мы надеемся продолжить такие измерения, поскольку в архиве HST находится достаточно много снимков галактик только в одном фильтре *F814W*.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны В. С. Лебедеву за конструктивные замечания по численному составу группы галактик NGC 1068. Работа основана на наблюдениях с космического телескопа им. Хаббла NASA/ESA, полученных в Научном институте космического телескопа, который управляется AURA, Inc., по контракту № NAS5-26555. Эти наблюдения связаны с заявками 5369, 8090, 9293, 10001, 13765, 14697, 15645, 16179. В настоящей работе были использованы базы данных NED, HyperLeda.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Национального научного фонда Болгарии в рамках научного проекта № 19-52-18007.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. Arp, *Astrophys. J. Suppl.* **14**, 1 (1966).
2. M. Bellazzini, F. R. Ferraro, and E. Pancino, *Astrophys. J.* **556** (2), 635 (2001).
3. J. P. Blakeslee, J. R. Lucey, B. J. Barris, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **327** (3), 1004 (2001).
4. L. Bottinelli, L. Gouguenheim, G. Paturel, and G. de Vaucouleurs, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **56**, 381 (1984).
5. L. Bottinelli, L. Gouguenheim, G. Paturel, and P. Teerikorpi, *Astron. and Astrophys.* **156**, 157 (1986).
6. E. M. Cackett, K. Horne, and H. Winkler, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **380** (2), 669 (2007).
7. M. R. Corbin, H. Kim, R. A. Jansen, et al., *Astrophys. J.* **675** (1), 194 (2008).
8. A. Dolphin, *DOLPHOT: Stellar photometry* (2016).
9. P. Fouque, E. Gourgoulhon, P. Chamaroux, and G. Paturel, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **93**, 211 (1992).
10. E. Holmberg, *Annals of the Observatory of Lund* **6**, 1 (1937).
11. R. A. Ibata, G. F. Lewis, A. W. McConnachie, et al., *Astrophys. J.* **780** (2), 128 (2014).
12. B. A. Jacobs, L. Rizzi, R. B. Tully, et al., *Astron. J.* **138** (2), 332 (2009).
13. I. D. Karachentsev, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **7**, 3 (1972).
14. M. G. Lee, W. L. Freedman, and B. F. Madore, *Astrophys. J.* **417**, 553 (1993).
15. C. G. Mundell, P. A. James, N. Loiseau, et al., *Astrophys. J.* **614** (2), 648 (2004).
16. M. Rejkuba, W. E. Harris, L. Greggio, et al., *Astrophys. J.* **791** (1), L2 (2014).
17. C. S. Rudick, J. C. Mihos, and C. McBride, *Astrophys. J.* **648** (2), 936 (2006).
18. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, *Astrophys. J.* **737** (2), 103 (2011).
19. A. C. Seth, J. J. Dalcanton, and R. S. de Jong, *Astron. J.* **129** (3), 1331 (2005).
20. C. K. Seyfert, *Astrophys. J.* **97**, 28 (1943).
21. Y. Sofue, *Publ. Astron. Soc. Japan* **43**, 671 (1991).
22. J. G. Sorce, R. B. Tully, H. M. Courtois, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **444** (1), 527 (2014).
23. P. B. Stetson, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **99**, 191 (1987).
24. P. B. Stetson, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **106**, 250 (1994).
25. G. Theureau, M. O. Hanski, N. Coudreau, et al., *Astron. and Astrophys.* **465** (1), 71 (2007).
26. N. A. Tikhonov, *Astronomy Reports* **50** (7), 517 (2006).
27. N. A. Tikhonov and O. A. Galazutdinova, *Astronomy Letters* **42** (7), 428 (2016).
28. N. A. Tikhonov and O. A. Galazutdinova, *Astrophysical Bulletin* **73** (3), 279 (2018).
29. N. A. Tikhonov and O. A. Galazutdinova, *Astrophysical Bulletin* **75** (4), 384 (2020).
30. N. A. Tikhonov, O. A. Galazutdinova, and I. O. Drozdovsky, *Astron. and Astrophys.* **431**, 127 (2005).
31. N. A. Tikhonov, O. A. Galazutdinova, and G. M. Karataeva, *Astrophysical Bulletin* **74** (3), 257 (2019).
32. R. B. Tully, *Astron. J.* **149** (5), 171 (2015).
33. R. B. Tully, H. M. Courtois, A. E. Dolphin, et al., *Astron. J.* **146** (4), 86 (2013).
34. R. B. Tully and J. R. Fisher, *Catalog of Nearby Galaxies* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1988).
35. R. B. Tully, L. Rizzi, E. J. Shaya, et al., *Astron. J.* **138** (2), 323 (2009).

36. B. A. Vorontsov-Velyaminov, *Atlas and Catalog of Interacting Galaxies*, (Sternberg Institute, Moscow State University, Moscow, 1959).
37. Y. Yoshii, Y. Kobayashi, T. Minezaki, et al., *Astrophys. J.* **784** (1), L11 (2014).

TRGB-Distances to Seyfert Galaxies NGC 1068, NGC 3227, NGC 4051, and NGC 4151

N. A. Tikhonov¹ and O. A. Galazutdinova¹

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

We use archive images from the Hubble Space Telescope to perform stellar photometry of four classic Seyfert galaxies: NGC 1068, NGC 3227, NGC 4051, and NGC 4151. We identified the red giants in the images and use the TRGB method for the first time to determine precise distances to these galaxies. The inferred distances— 11.14 ± 0.54 , 15.33 ± 0.80 , 16.48 ± 0.69 , and 14.20 ± 0.88 Mpc—make it possible to more accurately estimate the energy emitted by the nuclei of these active galaxies. We determine the distances to the two main galaxies of the NGC 1068 group, NGC 1068 and NGC 1073, (11.14 ± 0.54 and 11.28 ± 0.70 Mpc), allowing the distance to this small group of galaxies to be estimated as $D = 11.2$ Mpc. We show that NGC 1087 is located at a distance of $D = 17.79 \pm 0.83$ Mpc and therefore does not belong to the NGC 1068 group.

Keywords: *galaxies: Seyfert—galaxies: active—galaxies: photometry—galaxies: distances and redshifts*