

УДК 524.7–323.3

ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЙ ДО РОДИТЕЛЬСКИХ ГАЛАКТИК SN Ia ПО ВЕРШИНЕ ВЕТВИ КРАСНЫХ ГИГАНТОВ

© 2020 А. В. Антипова^{1*}, Д. И. Макаров¹, Л. Н. Макарова¹¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 16 августа 2019 года; после доработки 13 января 2020 года; принята к публикации 13 января 2020 года

Мы используем архивные данные телескопа им. Хаббла для измерения расстояний по вершине ветви красных гигантов (TRGB) до родительских галактик SN Ia. Наша выборка состоит из четырех галактик: NGC 2841, NGC 4496A, NGC 4535, NGC 4527. Для трех из них мы смогли определить только нижнюю оценку расстояния. Для галактики NGC 4527 мы оценили модуль TRGB-расстояния: $(m - M)_0 = 30^m56 \pm 0^m09$. Объединив наши измерения с литературными данными, мы провели сравнение модулей расстояний сверхновых в методе MLCS2k2 и хозяйских галактик TRGB-методом. Были выявлены систематически более высокие значения модуля расстояния SN Ia на $0^m15 - 0^m18$ по отношению к шкале TRGB-расстояний. Это соответствует переоценке светимости сверхновых в методе MLCS2k2. Мы оценили светимость сверхновых в максимуме блеска как $M_V = -19^m33 \pm 0^m03$, что позволяет принять следующее значение постоянной Хаббла: $H_0 = 70.4 \pm 1.0 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$.

Ключевые слова: галактики: расстояния и красное смещение — галактики: индивидуальные: NGC 4527 — шкала расстояний

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разработано большое количество методов оценки расстояний до внегалактических объектов, часть из них перечислена в работе Макаров et al. (2014) (см. раздел 3.3). Не существует единого метода, одинаково хорошо работающего во всем диапазоне доступных расстояний и для объектов разных типов. Один из самых эффективных методов определения расстояния до близких галактик (менее 10 Мпк) основан на использовании светимости звезд вершины ветви красных гигантов (Tip of the Red Giant Branch, TRGB) в качестве стандартной свечи. Как было показано в ряде работ, например, Макаров et al. (2006), Rizzi et al. (2007), метод TRGB имеет высокую точность, сопоставимую с точностью оценки расстояния по цефеидам. Ветвь красных гигантов формируется звездами с массами менее двух масс Солнца. Начало горения гелия в звездах данных масс сопровождается термоядерной вспышкой. После снятия вырождения в ядре звезды энерговыделение сильно сокращается, звезда уходит с ветви красных гигантов на горизонтальную ветвь. Наблюдательное проявление этой теоретической картины — резкий обрыв функции светимости красных гигантов, который происходит с предсказуемой светимостью. Таким образом, к преимуществу данного метода можно отнести хорошо понятную физику

процесса. Использование старого звездного населения в качестве индикатора расстояния делает применение TRGB-метода более универсальным, не зависящим от морфологии галактик, и во многом решает проблему учета неоднородного внутреннего поглощения в галактиках, особенно остро стоящую при наблюдении областей звездообразования. В данной работе для определения абсолютной звездной величины TRGB был использован метод, изложенный в статье Rizzi et al. (2007), в которой была проведена калибровка нуля-пункта метода и получена линейная зависимость светимости обрыва от его цвета.

Особый интерес представляет независимое измерение расстояний до тех галактик, в которых наблюдались сверхновые типа Ia (SN Ia). Эти сверхновые зарекомендовали себя как чрезвычайно важные «стандартные свечи» для изучения космологии Вселенной, позволяющие оценивать расстояния даже на больших красных смещениях вплоть до $z \sim 1$. Для SN Ia характерна высокая внутренняя точность предсказания светимости сверхновой в максимуме по наблюдаемой кривой блеска. Однако из-за редкости вспышек их известно крайне мало в близких галактиках, что осложняет абсолютную калибровку метода.

Существует ряд работ по калибровке шкалы сверхновых SN Ia через TRGB и цефеиды. Недавние работы по уточнению светимости SN Ia, основанной на цефеидах, дают согласующиеся и одинаковые в пределах ошибок

*E-mail: osen.nayti@gmail.com

значения постоянной Хаббла: $H_0 = 73.2 \pm 2.3$ и 72.7 ± 2.1 (Burns et al. 2018), 73.8 ± 2.4 (Riess et al. 2011), 73.24 ± 1.74 (Riess et al. 2016), 74.3 ± 2.1 км с⁻¹ Мпк⁻¹ (Freedman et al. 2012). Однако анализ космического микроволнового фонового излучения (Cosmic Microwave Background Radiation, CMBR) с плоской Λ CDM космологической моделью дает значительно отличающуюся величину $H_0 = 69.3 \pm 0.8$ км с⁻¹ Мпк⁻¹ по данным WMAP (Bennett et al. 2013) и 66.93 ± 0.62 км с⁻¹ Мпк⁻¹ по данным миссии Planck (Planck Collaboration et al. 2016). Недавние исследования барионных акустических осцилляций (Baryonic Acoustic Oscillations, BAO) в сочетании с данными SN Ia дали значение $H_0 = 67.3 \pm 1.1$ км с⁻¹ Мпк⁻¹, что хорошо согласуется с результатом CMBR (Aubourg et al. 2015). Точность современных измерений позволяет утверждать, что разногласие между прямыми измерениями постоянной Хаббла в локальной Вселенной и глобального значения по данным CMBR является значимым на уровне 3σ , что представляет проблему для современной космологии.

Различными группами ученых (см. работу Freedman et al. (2019) и ссылки в ней) ведётся активное измерение расстояний методом TRGB до родительских галактик SN Ia. Данные авторы обобщили результаты предыдущих работ и провели калибровку SN Ia через TRGB. В этой работе они получили значение постоянной Хаббла $H_0 = 69.8 \pm 1.8$ км с⁻¹ Мпк⁻¹, тем самым устраняя противоречие между глобальными и локальными измерениями темпа расширения Вселенной.

Однако на точность взаимной калибровки влияет как точность измерений калибраторов, их количество, так и различные систематические эффекты. Поэтому чрезвычайно важно проводить независимые калибровки. В данной статье мы оцениваем расстояния до родительских галактик SN Ia, а также калибруем светимость SN Ia, используя метод TRGB, и определяем значение постоянной Хаббла. В разделе 2 приводятся результаты звездной фотометрии для четырех галактик, в которых наблюдались SN Ia. Раздел 3 посвящен поиску данных в литературе об измерениях TRGB-расстояний до галактик со сверхновыми. В разделе 4 проводится сравнение шкал внегалактических расстояний, полученных разными методами. В Заключение суммируются результаты исследования. В Приложении мы приводим подробности нахождения обрыва функции светимости TRGB галактики NGC 4527.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ TRGB-РАССТОЯНИЙ ДЛЯ ЧЕТЫРЕХ ГАЛАКТИК

При выборе галактик для измерения расстояний мы исходили из следующих соображений:

- 1) галактика должна быть сравнительно близкой, с ожидаемым модулем расстояния меньше 32, что примерно соответствует расстоянию 25.1 Мпк;
- 2) в ней наблюдались сверхновые типа Ia;
- 3) имеются глубокие наблюдения на телескопе Хаббла (HST) с приборами WFPC2 или ACS в фильтре *F814W* и дополнительно в *F555W* либо *F606W*;
- 4) при этом TRGB-расстояния ранее не определялись.

Для этой работы мы использовали базу данных HyperLEDA¹ (Makarov et al. 2014) и Mikulski Archive for Space Telescopes². В результате мы отобрали четыре галактики для дальнейшего изучения. В таблице 1 собрана информация по наблюдениям этих галактик. В первой колонке приведено имя галактики, во второй — номер программы наблюдений на HST, в третьей — основной заявитель данного проекта, в четвертой и пятой указаны количество кадров и время экспозиции в секундах в фильтрах *F555W* и *F814W* соответственно.

Прямые изображения галактик, полученные с HST/WFPC2, были взяты из архива Хаббловского телескопа. Хаббловский архив предоставляет пользователям изображения, которые уже прошли первичную обработку: вычтены темновые кадры и проведено исправление за плоское поле.

Для приведенных в таблице 1 галактик была выполнена звездная фотометрия в программном пакете HSTphot (Dolphin 2000) с рекомендуемыми параметрами. В ходе подготовки к PSF-фотометрии изображений нами были измерены сдвиги звезд относительно опорного кадра и выполнено маскирование «плохих» пикселей, столбцов и следов космических частиц. Суммирование кадров производилось с помощью процедуры *coadd*. Складывались кадры, смещение между которыми не превышало 0.3 пикселя на планетарной камере (PC). PSF-фотометрия выполнялась одновременно для всех звезд, детектированных в двух фильтрах: *F555W* и *F814W*. Флаг операции *hstphot* мы установили равным 2114, что включает локальное определение фона неба для полей с быстро меняющимся фоном (2), добавление фотометрии искусственных звезд (64), взвешенную PSF-фотометрию (2048) (применяется для густонаселенных полей).

Для учета фотометрических эффектов мы выполнили тесты с искусственными звездами, которых было создано в десять раз больше, чем наблюдаемых. Распределение искусственных звезд

¹<http://leda.univ-lyon1.fr/>

²<https://archive.stsci.edu/>

Таблица 1. Наблюдательные данные

Name	No.	PI	$F555W$	$F814W$
NGC 2841	8322	G. Bothun	24×1100	10×1100
NGC 4535	6431	J. Mould	40×1200	24×1300
NGC 4496A	5427	A. Sandage	34×2000	8×2000
NGC 4527	7504	A. Sandage	24×2500	10×2500

по цветам и звездным величинам имитирует распределение реальных звезд. К искусственным звездам на изображениях галактик были применены в точности те же процедуры фотометрии, что и к реальным.

На рис. 1 приведены диаграммы цвет–звездная величина, полученные для галактик NGC 2841, NGC 4496A, NGC 4527 и NGC 4535.

На диаграмме NGC 2841 (рис. 1a) ветвь голубых сверхгигантов $F814W \gtrsim 22$ сравнительно узкая. Цвет этих звезд примерно 0^m1 . Красные сверхгиганты и звезды верхней части AGB занимают на диаграмме диапазон $F814W \gtrsim 22^m5$, $(F555W - F814W) \gtrsim 1^m5$. Других надежно выделяемых структур не заметно. Для данной галактики мы можем определить только нижнюю границу модуля расстояния $(m - M)_0 > 30^m$, так как ветвь красных гигантов располагается ниже фотометрического предела.

В отличие от предыдущей галактики NGC 4496A демонстрирует клочковатую рассеянную ветвь голубых сверхгигантов и голубой петли $0 \lesssim (F555W - F814W) \lesssim 0.5$ (рис. 1b). Аналогичную структуру имеет и ветвь красных сверхгигантов $I \gtrsim 22^m$, $(F555W - F814W) \gtrsim 1^m5$ и верхняя часть AGB. Звезды в диапазоне $F814W \gtrsim 25^m$, $(F555W - F814W) \gtrsim 1^m$, скорее всего, представляют собой среднюю и нижнюю части AGB. Так же, как и в предыдущем случае, мы не достигли ветви красных гигантов, и поэтому приводим только нижнюю оценку модуля расстояния для данной галактики, которая равна 29^m9 .

В галактике NGC 4527 ветви голубых и красных сверхгигантов хорошо населены, однако выглядят еще более рассеянными, чем в предыдущей галактике (рис. 1c). В отличие от предыдущих объектов, в NGC 4527 нам удалось достичь верхней части ветви красных гигантов. Таким образом, весьма густонаселенная ветвь RGB и нижняя часть AGB легко детектируются в диапазоне $F814W \gtrsim 25^m5$, $(F555W - F814W) \gtrsim 1^m0$.

Диаграмма NGC 4535 менее населена, чем предыдущая. Интересно заметить, что ветвь голубых сверхгигантов $(F555W - F814W) \sim 0^m1$, $F814W \gtrsim 22^m8$ визуально отделяется от предполагаемых звезд голубой петли

$(F555W - F814W) \sim 0^m5$ (рис. 1d). Очевидно, что для этой галактики нам удалось разрешить красные сверхгиганты и верхнюю часть AGB, а также начало ветви нижней части AGB $F814W \gtrsim 26^m0$, $(F555W - F814W) \gtrsim 1^m2$. Для данной галактики мы также приводим только нижнюю границу модуля расстояния, равную 30^m2 .

Только для одной галактики, NGC 4527, мы смогли достичь ветви красных гигантов, для всех остальных галактик экспозиция оказалась недостаточной. Мы определяли положение TRGB, используя программный пакет TRGBtool (Makarov et al. 2006). В этом методе функция светимости звезд ветви красных гигантов описывается кусочно-непрерывной степенной функцией со скачком, а наилучшее согласие находится методом максимального правдоподобия. Цвет TRGB определяется как робастная оценка бегущего среднего в области скачка. Ошибки фотометрии оценивались на основе статистики тестов искусственных звезд. Для повышения контраста ветви красных гигантов на диаграмме цвет–звездная величина мы исключали из рассмотрения звезды вблизи областей активного звездообразования. В анализе использовались только звезды с кадров планетарной камеры (PC), так как она дает лучшее пространственное разрешение, что чрезвычайно важно при фотометрии в густых полях. Звезды с хорошей фотометрией отбирались по отношению $S/N > 5$ в фильтре $F814W$ и $S/N > 3$ в фильтре $F555W$, и $\chi^2 \leq 2.5$, $|sharp| \leq 0.3$ в обоих фильтрах.

В результате для галактики NGC 4527 мы получили видимую звездную величину TRGB равной $26^m60 \pm 0^m07$ и цвет обрыва

$$(F555W - F814W)_{\text{TRGB}} = 1^m72 \pm 0^m04.$$

Более подробное описание процесса измерения TRGB дано в Приложении. На рис. 1c красной горизонтальной чертой отмечено положение TRGB для галактики NGC 4527. С учетом поглощения в нашей галактике по работе Schlafly and Finkbeiner (2011) $A_{F555W} = 0.060$, $A_{F814W} = 0.034$, модуль расстояния NGC 4527 равен $30^m56 \pm 0^m09$, что соответствует расстоянию 12.9 ± 0.5 Мпк.

Для данной галактики в базе данных NED собраны 49 измерений расстояний. Из них по цефеидам были сделаны 13 оценок расстояния, 11 оценок были получены по SN Ia, 24 — по зависимости Талли–Фишера и одно измерение было выполнено по флуктуациям поверхностной яркости. На рис. А.1 приведено сравнение полученного нами модуля расстояния с измерениями по цефеидам и данными по SN Ia для галактики NGC 4527. Полученный нами для NGC 4527 TRGB-модуль расстояния 30.56 ± 0.09 находится в хорошем согласии со всеми измерениями, выполненными по цефеидам

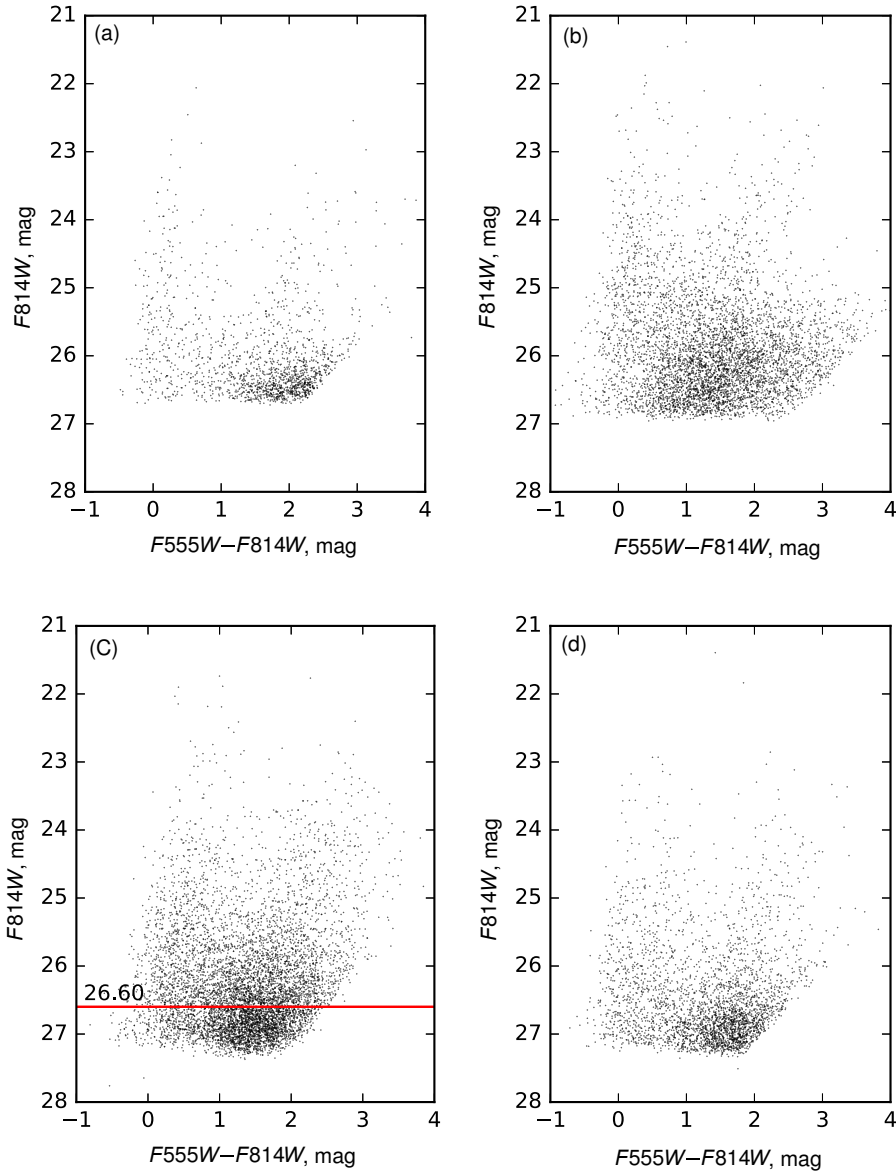


Рис. 1. Диаграммы цвет ($F555W - F814W$)–звездная величина ($F814W$) звезд галактик NGC 2841 (a), NGC 4496A (b), NGC 4527 (c) и NGC 4535 (d).

(взвешенное среднее цефеидных модулей расстояния равно 30.70 по данным NED). Разброс оценок расстояний по сверхновым существенно больше и в первую очередь это связано с выбором нуля-пункта расстояний, принятого разными авторами.

3. ПРИВЕДЕНИЕ SNIa-РАССТОЯНИЙ В ЕДИНУЮ СИСТЕМУ

На данный момент для большого числа близких галактик выполнены TRGB-измерения. Многие оценки получены с использованием единой методики, калибровки и даже одной и той же

командой. The Extragalactic Distance Database³ (EDD) (Jacobs et al. 2009) содержит диаграммы цвет–величина примерно для 400 галактик, изучавшихся в рамках программы исследования распределения и движения вещества в близкой Вселенной на HST. TRGB-расстояния до них были оценены методом максимального правдоподобия (Makarov et al. 2006) с калибровкой нуля-пункта, выполненной в работе Rizzi et al. (2007).

Jang and Lee (2017b) разработали новый подход к оценке яркости TRGB по так называемым

³<http://edd.ifa.hawaii.edu/>

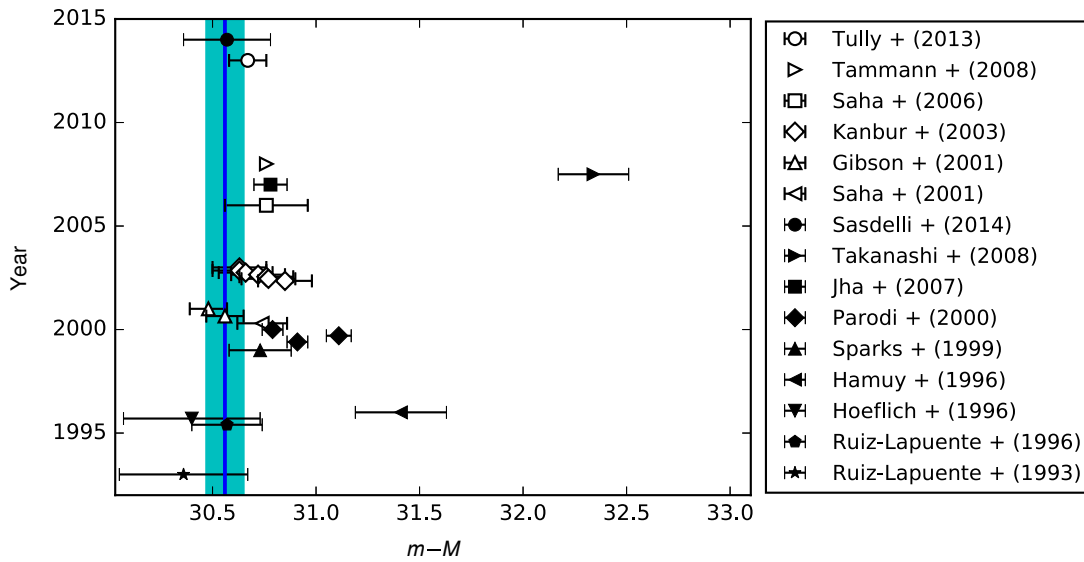


Рис. 2. Сравнение полученного нами модуля расстояния с измерениями по цефеидам и SN Ia для галактики NGC 4527. Вертикальная синяя линия показывает значение модуля расстояния, найденного в данной работе. Сине-зелёной полосой показан интервал, соответствующий неопределенности в 1σ . Белые маркеры — модуль расстояния, найденный по цефеидам. Черные маркеры — модуль расстояния SN Ia галактики NGC 4527.

Таблица 2. Средняя разница модулей расстояния по SN Ia, полученных в различных работах. Величина соответствует разнице между работой в столбце и работой в строке

	Jha et al. (2007), $R_V = 3.1$	Jha et al. (2007), $R_V = 1.7$	Guy et al. (2007)	Reindl et al. (2005)	Jha et al. (2007)
Jha et al., $R_V = 3.1$	0	$+0.021 \pm 0.012$	-0.86 ± 0.02	$+0.23 \pm 0.02$	$+0.067 \pm 0.006$
Jha et al., $R_V = 1.7$		0	-0.86 ± 0.01	$+0.17 \pm 0.02$	$+0.065 \pm 0.006$
Guy et al.			0	$+1.03 \pm 0.02$	-0.93 ± 0.02
Reindl et al.				0	-0.14 ± 0.02
Jha et al.					0

QT-величинам звезд, в которых убрана зависимость светимости ярчайших звезд от их показателя цвета. Калибровка светимости TRGB была получена по Большому Магеллановому Облаку и галактике NGC 4258, для которой напрямую измерено высокоточное расстояние 7.60 ± 0.23 Мпк из анализа движения мазеров вокруг центральной черной дыры (Humphreys et al. 2013). Этим методом измерены расстояния примерно до десяти галактик с известными вспышками сверхновых (Jang and Lee 2017a).

К сожалению, пересечение данных между галактиками с известными SN Ia и с TRGB-измерениями крайне малое. Связано это с тем, что с помощью HST можно эффективно проводить TRGB-измерения до галактик, находящихся на расстояниях менее 10 Мпк, в то время как вероятность вспышек сверхновых типа SN Ia силь-

но ограничивает их количество в Местном Объемe. Кроме того, обнаруженные сверхновые анализировались разными методиками с различными нуль-пунктами, и нет одного метода, который охватывал бы весь массив наших данных. Поэтому прежде чем перейти к калибровке светимости SN Ia и определению нуль-пункта их шкалы расстояний, нужно было найти систематические сдвиги между различными методами оценки расстояния по SN Ia и привести все данные в единую систему.

Наиболее распространенным методом оценки расстояния до SN Ia из нашего списка является метод Multicolor Light-Curve Shapes 2k2 (MLCS2k2) (Jha et al. 2007). Это эмпирический метод, в котором используется шаблон кривой яркости сверхновой, созданный на основе «обучающего набора» сверхновых, и корректирующая поправка за светимость для оценки яркости Δ .

Использование кривых блеска в разных фильтрах *UBVRI* позволяет учитывать эффекты, связанные с поглощением света. Исключением является SN 1937C, расстояние до которой было определено по скорости спада светимости Δm_{15} (Reindl et al. 2005).

В работе Antipova et al. (2017) мы определили систематические сдвиги модулей расстояния, полученных в работах Guy et al. (2007), Jha et al. (2007), Reindl et al. (2005) с применением различных методик и нуль-пунктов. Здесь мы вкратце изложим результаты этой работы. Мы проверили, что зависимость между этими калибровками SN Ia линейная с наклоном, равным единице в пределах ошибки. Измерение для SN 1937C мы перевели в калибровку (Jha et al. 2007), получив тем самым однородную выборку. В таблице 2 представлены систематические сдвиги между различными калибровками. Мы представили ее в виде верхней треугольной матрицы, так как очевидно, что данная таблица является кососимметричной матрицей, и значения в нижней части являются негативным отражением верхней ($A^T = -A$).

4. СРАВНЕНИЕ ШКАЛ TRGB И SN Ia

Для калибровки светимости SN Ia мы составили список галактик с известными фотометрическими TRGB-расстояниями, в которых наблюдались вспышки сверхновых типа Ia. Для нахождения подобных галактик мы использовали базу данных HyperLEDA (Makarov et al. 2014), базу данных NED⁴ и SN Database⁵ (Silverman et al. 2012). Сводка измерений приведена в таблице 3.

Мы ограничили свой выбор наиболее однородными данными TRGB-измерений расстояний до хозяйских галактик, оцененными методом максимального правдоподобия (Makarov et al. 2006) с калибровкой нуль-пункта в работе Rizzi et al. (2007), и предложенным Jang and Lee (2017b) методом QT-величин. Измерения, выполненные по методологии Makarov et al. (2006) и Rizzi et al. (2007), были взяты из базы данных EDD⁶ и представлены в колонке (2) таблицы 3. Литературные данные были дополнены нашим измерением модуля расстояния до галактики NGC 4527 (выделено курсивом).

В колонке (3) таблицы 3 приведены измерения TRGB модуля расстояния до галактик методом QT-величин (Jang and Lee 2017b) из работы Jang and Lee (2017a). Модуль расстояния до NGC 1316

был взят из работы Lee et al. (2017) и отмечен в таблице символом †. Для галактик NGC 5128, IC 4182, NGC 5253 и NGC 5457 не проводились измерения расстояний методом QT-величин (Jang and Lee 2017b). Поэтому мы оценили соответствующие модули расстояний по величине и цвету TRGB, полученным в рамках проекта по исследованию галактик Местного Объема из базы данных EDD, с учетом калибровок, приведенных в таблице 6 в работе Jang and Lee (2017b). Эти оценки помечены символом *.

Колонки (5) и (6) таблицы 3 содержат модули расстояний, оцененных по кривым блеска сверхновых SN Ia методом MLCS2k2 (Jha et al. 2007) для двух значений $R_V = 1.7$ и 3.1 . Соответствующие имена сверхновых приведены в колонке (4).

Как следует из таблицы 3, для близких галактик с известными сверхновыми, расстояние до которых было определено методом MLCS2k2 (Jha et al. 2007), только восемь объектов имеют TRGB-оценки расстояния, выполненные по методологии Makarov et al. (2006) и Rizzi et al. (2007), и девять оценок, выполненных методом QT-величин (Jang and Lee 2017b). Пересечение TRGB-выборок составляет всего четыре объекта. Однако знание величин и цвета TRGB позволяет дополнить QT-выборку еще четырьмя объектами и довести общее число галактик в анализе до тринадцати. К сожалению, обратная трансформация из QT-модулей расстояния в модули расстояния по методологии Makarov et al. (2006) и Rizzi et al. (2007) невозможна из-за отсутствия в статьях информации о цвете TRGB.

Регрессионный анализ между различными выборками показал, что, как и ожидалось, наклоны зависимостей статистически неотличимы от единицы, а разница в модулях расстояния определяется разницей в принятых нуль-пунктах в различных работах. На рис. 3 показана корреляция MLCS2k2-модулей расстояния с оценками, полученными методом Makarov et al. (2006) и Rizzi et al. (2007). Видно, что в случае $R_V = 1.7$ галактика NGC 3627 демонстрирует отклонение более чем 3σ от зависимости, а в случае $R_V = 3.1$ большой отскок оказывается у галактики NGC 5128. Эти галактики были исключены при анализе соответствующих сдвигов нуль-пунктов зависимостей. Аналогичная корреляция с TRGB-расстояниями, полученными QT-методом (Jang and Lee 2017b), показана на рис. 4. При оценке статистического сдвига между QT-модулями расстояния и по сверхновым в обоих случаях из анализа исключались сверхновые SN 1981D, SN 2007af в случае $R_V = 1.7$ и SN 1986G в случае $R_V = 3.1$.

Систематические сдвиги модулей расстояния сверхновых и хозяйских галактик суммированы в

⁴<https://ned.ipac.caltech.edu/>

⁵<http://heracles.astro.berkeley.edu/oldsnadb>

⁶<http://edd.ifa.hawaii.edu/>

Таблица 3. Модули расстояний, измеренные TRGB-методом и по SN Ia

Galaxy	TRGB		SN Ia	Jha et al. (2007)	
	Rizzi et al. (2007)	Jang and Lee (2017b)		$R_V = 1.7$	$R_V = 3.1$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
NGC 3368	30.15 ± 0.12	30.22 ± 0.05	SN 1998bu	30.52 ± 0.03	30.20 ± 0.04
NGC 4038/39	31.72 ± 0.14	31.68 ± 0.04	SN 2007sr	31.93 ± 0.05	31.97 ± 0.06
NGC 5457	29.21 ± 0.06	29.16 ± 0.02	SN 2011fe	29.23 ± 0.07	29.21 ± 0.07
NGC 3627	29.60 ± 0.09	30.18 ± 0.03	SN 1989B	30.32 ± 0.05	29.84 ± 0.07
NGC 4527	30.56 ± 0.09	$30.59 \pm 0.07^*$	SN 1991T	30.76 ± 0.03	30.72 ± 0.04
IC 4182	28.19 ± 0.03	$28.18 \pm 0.07^*$	SN 1937C	28.27 ± 0.14	28.31 ± 0.14
NGC 5253	27.68 ± 0.02	$27.64 \pm 0.06^*$	SN 1972E	27.74 ± 0.06	27.81 ± 0.06
NGC 5128	27.83 ± 0.03	$27.83 \pm 0.06^*$	SN 1986G	28.01 ± 0.04	27.19 ± 0.06
NGC 1316		$31.45 \pm 0.11^\dagger$	SN 1980N	31.55 ± 0.04	31.52 ± 0.05
NGC 1316		...	SN 1981D	31.10 ± 0.11	30.85 ± 0.16
NGC 3021		32.18 ± 0.03	SN 1995al	32.59 ± 0.04	32.61 ± 0.05
NGC 3370		32.25 ± 0.04	SN 1994ae	32.44 ± 0.03	32.51 ± 0.04
NGC 1309		32.47 ± 0.04	SN 2002fk	32.68 ± 0.03	32.74 ± 0.04
NGC 5584		31.75 ± 0.05	SN 2007af	32.26 ± 0.04	32.23 ± 0.05

* — галактики, для которых мы осуществили переход от калибровки Rizzi et al. (2007) к калибровке Jang and Lee (2017b).

Таблица 4. Средняя разница между модулями расстояния, полученными различными методами

	TRGB Rizzi et al. (2007)	TRGB Jang and Lee (2017b)
Jha et al. (2007), $R_V = 1.7$	0.16 ± 0.05	0.18 ± 0.03
Jha et al. (2007), $R_V = 3.1$	0.14 ± 0.04	0.16 ± 0.06
среднее	0.15 ± 0.04	0.18 ± 0.03

таблице 4. Величины отражают среднюю разницу между оценками расстояний сверхновых, полученных при различных значений R_V (конкретная величина указана в первой колонке таблицы) и TRGB-расстояний до галактик, измеренных по методикам Rizzi et al. (2007) и Jang and Lee (2017b). Видно, что модули расстояния сверхновых, оцененные в работе Jha et al. (2007), систематически больше TRGB-модулей галактик. Систематические сдвиги, полученные для разных калибровок согласуются между собой в пределах ошибок измерений.

Абсолютная звездная величина SN Ia, полученная Jha et al. (2007), определена как

$$M_V = -19.504 + 5 \lg h_{65}$$

и привязана к постоянной Хаббла

$$H_0 = 65 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}.$$

Выполненный нами анализ показывает, что использование данной калибровки приводит к систематическому завышению модуля расстояний на 0^m15-0^m18 . Это эквивалентно переоценке светимости сверхновых на соответствующую величину. Таким образом, мы можем определить абсолютную звездную величину SN Ia в максимуме блеска и привязать ее к TRGB-шкале расстояний: для шкалы расстояний, основанной на методологии Макагов et al. (2006) и Rizzi et al. (2007), она равна $M_V = -19^m35$, что соответствует постоянной Хаббла $H_0 = 69.8 \pm 1.3 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$. Соответствующие значения для калибровки Jang and

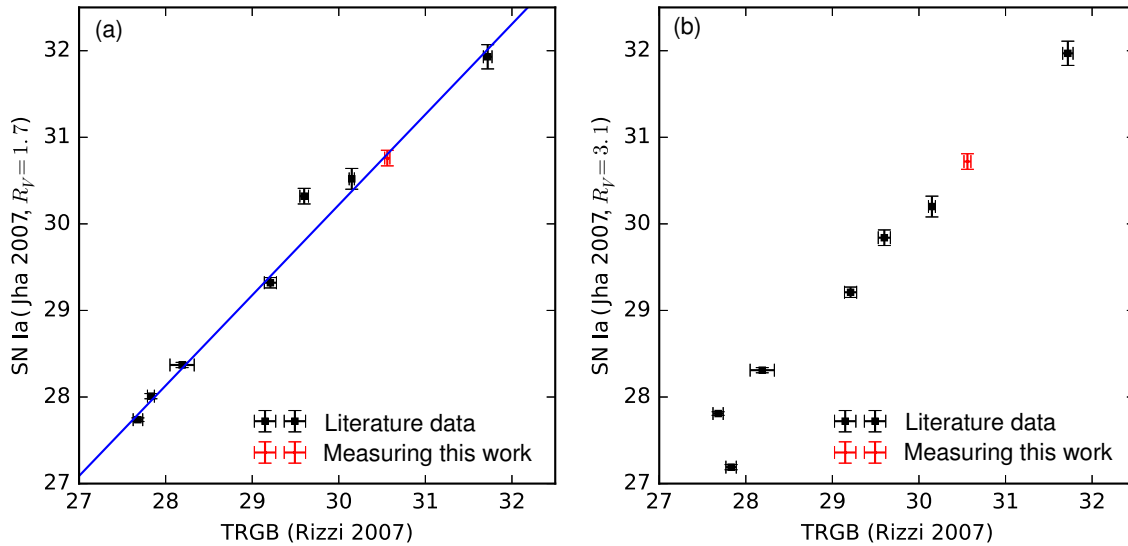


Рис. 3. Связь между MLCS2k2-модулем расстояния SN Ia (Jha et al. 2007) с $R_V = 1.7$ (a) и $R_V = 3.1$ (b), и TRGB-модулем расстояния, измеренным по методу Makarov et al. (2006), Rizzi et al. (2007).

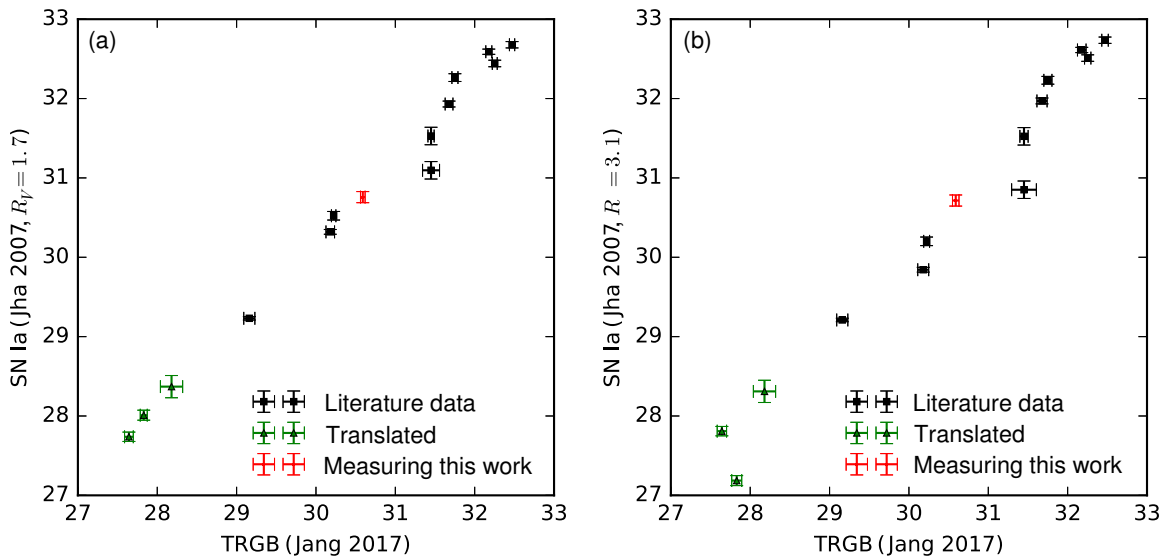


Рис. 4. Связь между MLCS2k2-модулем расстояния SN Ia (Jha et al. 2007) с $R_V = 1.7$ (a) и $R_V = 3.1$ (b), и TRGB-модулем расстояния, полученным с калибровкой Jang and Lee (2017b).

Lee (2017b): $M_V = -19.32$ и постоянной Хаббла $H_0 = 70.6 \pm 1.0 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод TRGB основан на использовании старого звездного населения для определения расстояний до близких галактик. Это дает нам возможность построения шкалы внегалактических расстояний, независимой от шкалы цефеид. Мы провели привязку светимости сверхновых SN Ia к шкале расстояний, основанной на TRGB-измерениях.

Из-за сравнительно небольшой светимости ярчайших звезд красных гигантов телескоп Хаббла позволяет эффективно применять TRGB-метод только на расстояниях порядка 10 Мпк. Однако редкость вспышек сверхновых SN Ia сильно ограничивает количество этих событий в Местном Объеме.

Поэтому мы отобрали четыре галактики: NGC 2841, NGC 4535, NGC 4496A и NGC 4527, в которых наблюдались сверхновые SN Ia и были получены глубокие изображения на телескопе Хаббл. К сожалению, выделить ветвь красных

гигантов и надежно оценить положение обрыва функции их светимости удалось только в галактике NGC 4527. Во всех остальных случаях яркость звезд ветви красных гигантов оказалась ниже фотометрического предела измерений. Для галактики NGC 4527 мы измерили модуль расстояния $30^m56 \pm 0^m09$, или 12.9 ± 0.5 Мпк, используя методологию Makarov et al. (2006) с калибровкой Rizzi et al. (2007), и $30^m59 \pm 0^m07$, или 13.1 ± 0.4 Мпк, основываясь на QT-величинах и калибровке Jang and Lee (2017b).

Объединяя литературные данные с нашими измерениями, мы собрали выборку 13 галактик в которых наблюдалось 14 сверхновых с однородными оценками расстояний TRGB-методом и по кривым блеска SN Ia. TRGB-расстояния близких галактик были измерены методом максимального правдоподобия (Makarov et al. 2006, Rizzi et al. 2007) в рамках проекта по исследованию распределения галактик в Местном Объеме и были взяты из базы данных EDD. Эта выборка была расширена за счет новых измерений, выполненных недавно предложенным методом QT-величин (Jang and Lee 2017b). Мы использовали базу данных о сверхновых Silverman et al. (2012), в которой расстояния оценивались методом MLCS2k2 (Jha et al. 2007). В этой работе внутренняя абсолютная V -величина сверхновых SN Ia в момент максимума в B -фильтре определялась при фиксированном значении постоянной Хаббла $H_0 = 65 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ и составила $M_V = -19.504 + 5 \lg h_{65} \text{ mag}$.

Систематические сдвиги модулей расстояния сверхновых и хозяйских галактик, оцененные TRGB-методами, определены как

$$(m - M)_{\text{SN Ia}} - (m - M)_{\text{TRGB}} = 0^m15 \pm 0^m04$$

для методологии Makarov et al. (2006) с калибровкой Rizzi et al. (2007), и $0^m18 \pm 0^m03$ в случае применения QT-метода (Jha et al. 2007). Отметим, что оба TRGB-метода дают согласующиеся шкалы расстояний. Это означает, что абсолютная звездная величина сверхновых SN Ia в максимуме блеска $M_V = -19^m33 \pm 0^m03$, что соответствует постоянной Хаббла $H_0 = 70.4 \pm 1.0 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ (эти неопределенности не учитывают систематические ошибки). Данная величина постоянной Хаббла находится в прекрасном согласии с измерениями, полученными в рамках the Carnegie–Chicago Hubble Program.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарны Н. А. Тихонову за критические замечания и обсуждение нашей работы. В работе мы использовали модули расстояния TRGB, из базы данных the Extragalactic Distance Database (EDD) (Jacobs et al. 2009). Мы также использовали базу данных HyperLeda (Makarov et al. 2014).

Для проведения звездной фотометрии галактик мы использовали данные из архива телескопа им. Хаббла (Hubble Legacy Archive, <https://hla.stsci.edu/>).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Antipova, D. Makarov, and L. Makarova, ASP Conf. Ser. **510**, 203 (2017).
2. É. Aubourg, S. Bailey, J. E. Bautista, et al., Phys. Rev. D **92** (12), 123516 (2015).
3. C. L. Bennett, D. Larson, J. L. Weiland, et al., Astrophys. J. Suppl. **208**, 20 (2013).
4. C. R. Burns, E. Parent, M. M. Phillips, et al., Astrophys. J. **869**, 56 (2018).
5. A. E. Dolphin, Publ. Astron. Soc. Pacific **112**, 1383 (2000).
6. W. L. Freedman, B. F. Madore, D. Hatt, et al., Astrophys. J. **882** (1), 34 (2019).
7. W. L. Freedman, B. F. Madore, V. Scowcroft, et al., Astrophys. J. **758**, 24 (2012).
8. J. Guy, P. Astier, S. Baumont, et al., Astron. and Astrophys. **466**, 11 (2007).
9. E. M. L. Humphreys, M. J. Reid, J. M. Moran, et al., Astrophys. J. **775**, 13 (2013).
10. B. A. Jacobs, L. Rizzi, R. B. Tully, et al., Astron. J. **138**, 332 (2009).
11. I. S. Jang and M. G. Lee, Astrophys. J. **836**, 74 (2017a).
12. I. S. Jang and M. G. Lee, Astrophys. J. **835**, 28 (2017b).
13. S. Jha, A. G. Riess, and R. P. Kirshner, Astrophys. J. **659**, 122 (2007).
14. M. G. Lee, I. S. Jang, R. Beaton, et al., Astrophys. J. **835**, L27 (2017).
15. D. Makarov, L. Makarova, L. Rizzi, et al., Astron. J. **132**, 2729 (2006).
16. D. Makarov, P. Prugniel, N. Terekhova, et al., Astron. and Astrophys. **570**, A13 (2014).
17. Planck Collaboration, et al., Astron. and Astrophys. **596**, A107 (2016).
18. B. Reindl, G. A. Tammann, A. Sandage, and A. Saha, Astrophys. J. **624**, 532 (2005).
19. A. G. Riess, L. Macri, S. Casertano, et al., Astrophys. J. **730**, 119 (2011).
20. A. G. Riess, L. M. Macri, S. L. Hoffmann, et al., Astrophys. J. **826**, 56 (2016).
21. L. Rizzi, R. B. Tully, D. Makarov, et al., Astrophys. J. **661**, 815 (2007).
22. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, Astrophys. J. **737**, 103 (2011).
23. J. M. Silverman, R. J. Foley, A. V. Filippenko, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **425**, 1789 (2012).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Для поиска обрыва функции светимости TRGB мы используем наблюдательные данные программы № 7504 телескопа Хаббла. Данная программа была нацелена на получение цефеидных оценок расстояний для нескольких галактик, в том числе и для NGC 4527.

Цефеиды — это молодые звезды, связанные с областями звездообразования, в которых содержится большое количество пыли. Звезды ветви красных гигантов распределены равномерно по всему телу галактики, поэтому для определения расстояния TRGB-методом можно использовать любые кадры, однако в областях звездообразования идет сильное поглощение, что приводит к неправильному определению светимости звезд и «размытию» ветвей на диаграмме цвет—звездная величина. Это в свою очередь осложняет нахождение обрыва функции светимости красных гигантов.

Для усиления контрастности ветви красных гигантов мы маскируем те области, в которых сконцентрированы звезды главной последовательности. На полной диаграмме цвет—звездная величина содержится 6722 звезды (см. рис. 1с), после проведения процедуры маскирования остается 1591 звезда, представленная на рис. А.1а. На диаграмме цвет—звездная величина сплошной линией показано положение TRGB.

На рис. А.1 показано два графика: (b) — функция полноты, которая определяется из тестов с искусственными звездами, (с) — распределение ошибок и систематический сдвиг, вызванный смещением Малмквиста. На графике функции полноты видно, что фотометрический предел (полнота примерно 50%) в фильтре $F814W$ равен 27^m1 . На обоих графиках сплошной вертикальной линией указано положение TRGB, а пунктирными вертикальными линиями — диапазон, в котором осуществлялся поиск обрыва функции светимости. На панели (b) видно, что поиск проводился в интервале, где полнота фотометрии превышает 50%.

На рис. А.1 d сплошной вертикальной линией показано положение TRGB. Эта линия пересекает наблюдаемую функцию светимости (сплошная ступенчатая кривая) в месте ее слабого обрыва. Это положение находится в хорошем согласии с положением максимума функции градиента численности звезд. Она получается применением фильтра Собеля (показано пунктирной кривой) к сглаженным данным. Модель функции светимости звезд в области TRGB задается кусочно-непрерывной степенной функцией со скачком (показано толстой штриховой линией). Наблюдаемое распределение звезд описывается модельной функцией с учетом наблюдательных эффектов (полноты фотометрии и фотометрических ошибок). Модельная кривая показана толстой гладкой кривой. Видно, что ошибки фотометрии заывают TRGB-скачок, тем не менее это позволяет подогнать данные и надежно оценить положение TRGB.

Точность оценки модуля расстояния до галактики NGC 4527 определяется влиянием нескольких факторов. Светимость TRGB была откалибрована в работе Rizzi et al. (2007) с погрешностью 0^m02 . Типичная погрешность поглощения оценивается в 16%, что дает величину порядка 0^m005 в фильтре I . Наибольший вклад вносит неопределенность оценки положения TRGB $26^m603_{-0.064}^{+0.068}$ и его цвета $(F555W - F814W) = 1.719_{-0.051}^{+0.025}$. Как было показано в статье Makarov et al. (2006), точность определения TRGB зависит от точности фотометрии звезд и населенности ветви красных гигантов вблизи обрыва функции светимости. Точность определения TRGB оценивалась статистическими методами по форме функции максимального правдоподобия, использовавшейся при подгонке наблюдаемого распределения звезд заданной функцией светимости звезд.

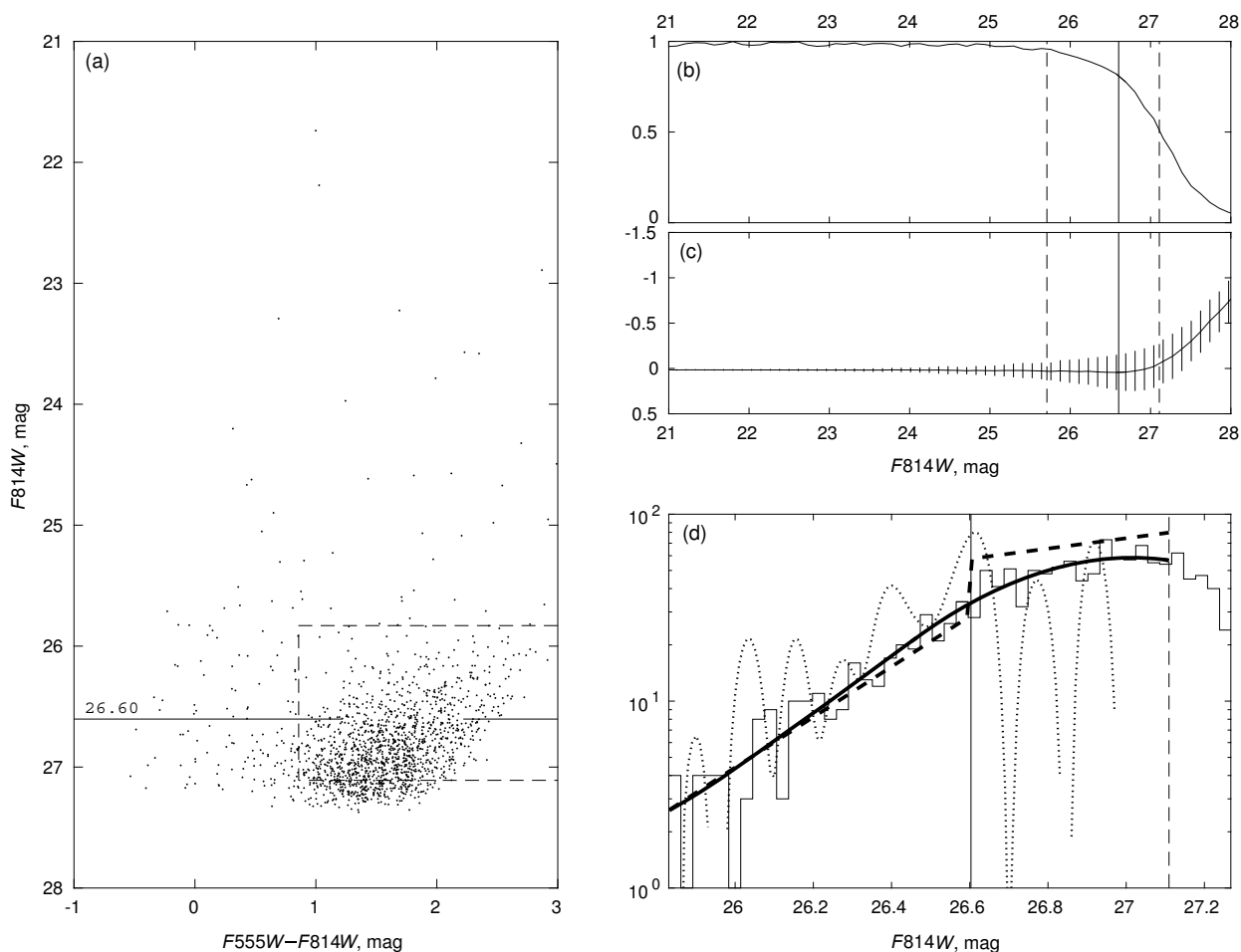


Рис. А.1. Рабочий график для галактики NGC 4527. (а): диаграмма цвет–звездная величина; сплошной горизонтальной линией показано положение TRGB. (b) и (с): функция полноты и функция распределения ошибок. (d): сплошная тонкая ступенчатая линия — гистограмма наблюдаемой функции светимости, штриховая кривая — модельная функция светимости звезд в области TRGB, толстая сплошная линия — модель с учетом фотометрических эффектов (полнота данных и ошибки фотометрии), пунктирная линия — применение фильтра Собея к наблюдаемой функции светимости для выделения областей с наиболее быстро меняющейся численностью. На панелях (b)–(d) сплошной вертикальной линией показано положение TRGB, вертикальной штриховой линией — область, в которой осуществлялся поиск положения TRGB.

Distance Measurements to Parent Galaxies of SN Ia by the Tip of the Red-Giant Branch**A. V. Antipova, D. I. Makarov, and L. N. Makarova**

We use the archival data obtained with the Hubble space telescope to measure distances by the tip of the red-giant branch (TRGB) method to SNIa parent galaxies. Our sample consists of four galaxies: NGC 2841, NGC 4496A, NGC 4535, and NGC 4527. For three of them, we were able to determine only the lower bounds of the distance. For the galaxy NGC 4527, we estimated the TRGB distance modulus: $(m - M)_0 = 30^m56 \pm 0^m09$. Combining our measurements with the published data, we compared the supernova distance moduli using the MLCS2k2 method and the host galaxies with the TRGB method. SNIa distance moduli show systematically higher value at 0^m15-0^m18 relative to the scale of the TRGB distances. This corresponds to overestimation of the luminosity of supernovae with the MLCS2k2 method. We estimated the luminosity of supernovae at the brightness maximum as $M_V = -19^m33 \pm 0^m03$ which allows one to accept the following Hubble constant: $H_0 = 70.4 \pm 1.0 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

Keywords: *galaxies: distances and redshift—galaxies: individual: NGC 4527—distance scale*