

# АСТРОФИЗИКА

ТОМ 66

ФЕВРАЛЬ, 2023

ВЫПУСК 1

DOI: 10.54503/0571-7132-2023.66.1-5

## РАССТОЯНИЯ ДО 10 БЛИЗКИХ ГАЛАКТИК, НАБЛЮДАВШИХСЯ НА КОСМИЧЕСКОМ ТЕЛЕСКОПЕ ХАББЛ

И.Д.КАРАЧЕНЦЕВ, Н.А.ТИХОНОВ

Поступила 21 ноября 2022

Изображения 10 галактик в фильтрах F814W и F606W, полученные с ACS камерой на космическом телескопе Хаббл, использованы для построения диаграммы цвет-величина звездного населения этих галактик. Расстояния до галактик оценены по светимости вершины ветви красных гигантов. Рассмотренные галактики имеют лучевые скорости от 250 км с<sup>-1</sup> до 760 км с<sup>-1</sup> относительно центроида Местной группы и расстояния в диапазоне от 3.7 Мпк до 13.0 Мпк. Отмечены также несколько других наблюдавшихся галактик с малыми лучевыми скоростями, расстояния которых оказались за пределом 13 Мпк.

Ключевые слова: *галактики - карликовые галактики: расстояния - галактики*

1. *Введение.* Большим достижением в изучении кинематики и динамики Местной вселенной за последние два десятилетия явилось массовое определение высокоточных расстояний до близких галактик с помощью космического телескопа Хаббл (HST). Используя метод светимости вершины ветви красных гигантов (TRGB) [1], стало возможным измерить расстояния с погрешностью ~5% для более 400 галактик Местного объема (МО) в пределах расстояния  $D \approx 11$  Мпк вокруг нас. Для многих галактик было установлено их членство в близких группах, и по вириальным скоростям спутников были определены массы темного гало вокруг ярких центральных галактик [2]. Средняя плотность темной материи, сосредоточенной в гало местных галактик, оказалась равной 0.08 в единицах критической плотности [3], что составляет всего одну четверть от глобальной космической плотности материи  $\Omega_m \approx 0.31$ . Этот результат выглядит парадоксальным, поскольку средняя плотность звездной материи в Местном объеме практически неотличима от средней глобальной звездной плотности. Отклонение лучевых скоростей галактик от идеального хаббловского потока  $V = H_0 D$ , где  $H_0 = 73$  км с<sup>-1</sup> Мпк<sup>-1</sup> - параметр Хаббла, дало также четкое свидетельство наличия коллективного движения местных галактик в сторону ближайшего богатого скопления в созвездии Девы, а также участия их в систематическом расширении окрестностей Местного вояда. Наблюдательные данные о расстояниях галактик МО, представленные в Updated Nearby Galaxy Catalog (UNGC, [4]) и Extragalactic Distance Database (EDD,

[5]), являются фундаментом для проверки космологических моделей на малых масштабах.

Последним значительным пополнением данных о расстояниях близких галактик явились наблюдения на HST с камерой ACS по программе SNAP 15922 (PI R.B.Tully). Из 153 мишеней программы наблюдения были выполнены для 80 галактик. Аккуратные TRGB-расстояния были получены для 53 галактик [5-11] и документированы в базе данных EDD (edd.ifa.hawaii.edu). Независимые измерения TRGB-расстояний для 24-х карликовых галактик из обзора SNAP15922 были проведены Тихоновым и Галазутдиновой [12], у половины этих галактик расстояния были определены впервые. Среди наблюдавшихся объектов остались случаи, когда гидирование телескопа оказалось неидеальным, а также галактики с положением TRGB вблизи предела обнаружения и некоторые голубые компактные галактики с высокой звездной концентрацией. Рассмотрение этих сложных случаев является предметом данной работы.

*2. Наблюдения и обработка данных.* Снимки рассматриваемых галактик были получены с камерой ACS HST с экспозициями 760 с в каждом фильтре F814W и F606W. Выбор экспозиций определялся возможностью

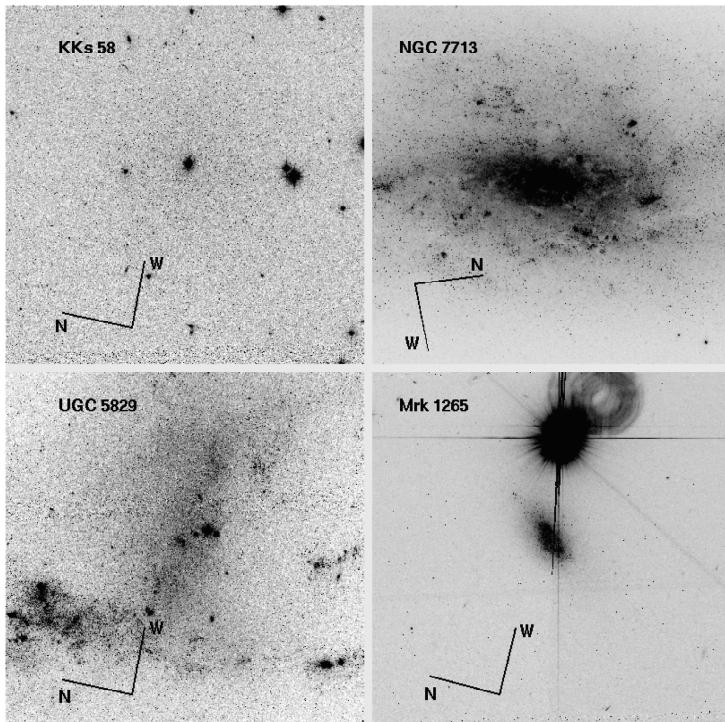


Рис.1. Изображения галактик в фильтре F606W, полученные на ACS-камере космического телескопа Хаббл. Размер снимков 1'.67 x 1'.67, север и запад отмечены стрелками.

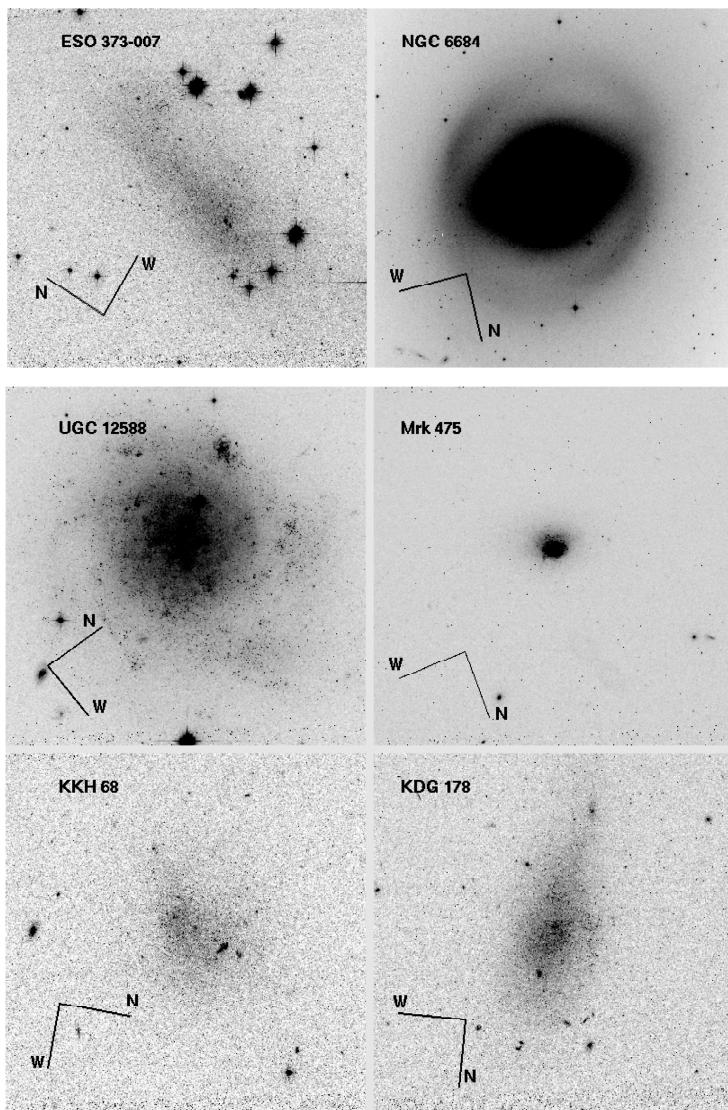


Рис.1. (Окончание).

проведения цикла наблюдений в течение одного орбитального периода HST в SNAP-режиме.

Для звездной фотометрии были использованы стандартные пакеты программ DAOPHOT II [13,14] и DOLPHOT 2.0 [15]. Результаты фотометрии звезд проходили обычную проверку по критериям "CHI" и "SHARP", чтобы исключить диффузные объекты. Методические детали изложены в работе [16].

Изображения 10-ти изученных нами галактик представлены в виде мозаики

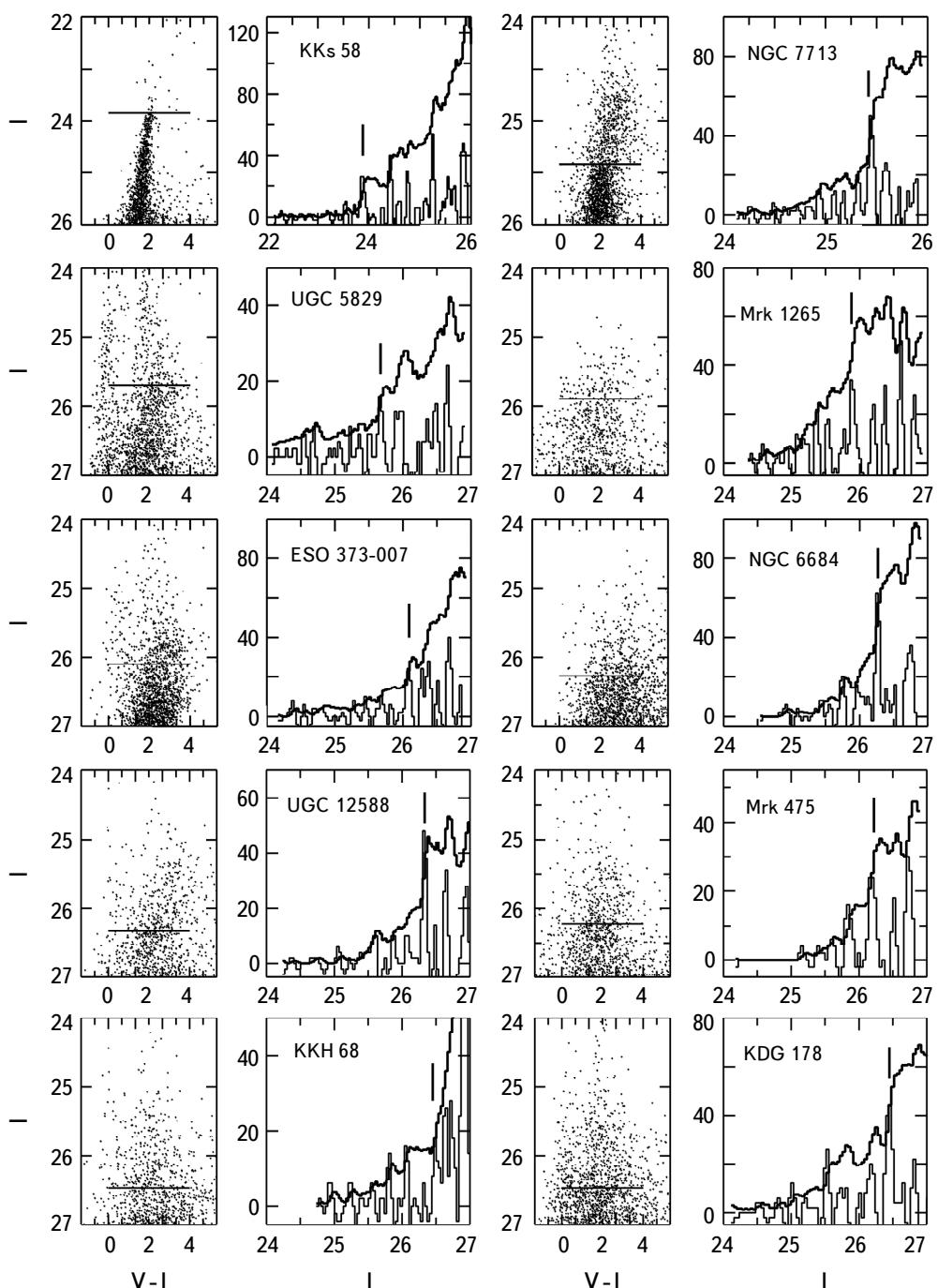


Рис.2. СМ-диаграммы для рассматриваемых галактик (левые панели). Горизонтальные линии отмечают положение TRGB. На правых панелях представлены функции светимости красных звезд в линейной шкале.

на рис.1. Размер каждого изображения в фильтре F606W составляет 1'.67. Некоторые крупные галактики попадают в этот формат лишь частично.

Полученные диаграммы цвет-величина (CMD) для каждой из 10-ти галактик показаны на левых панелях рис.2. Правые панели рисунка воспроизводят построенную функцию светимости галактик в линейной шкале. Для построения функции светимости использованы звезды с показателем цвета в интервале  $1.0 < (V - I) < 1.7$ , соответствующем диапазону цвета звезд ветви красных гигантов. Положение TRGB у галактик отмечено горизонтальной линией. Оно определялось по скачку на функции светимости звезд, для чего была использована функция Собеля [17], максимумы которой соответствуют резким изменениям в числе звезд. Этот метод имеет известные трудности, неоднократно обсуждавшиеся в литературе. Особенно эти трудности проявляются, когда TRGB-галактики располагаются вблизи фотометрического предела (в нашем случае  $I_{\text{lim}} \approx 27^{\text{m}.0}$ ), или если число измеренных звезд в карликовой галактике невелико.

Еще одним фактором, затрудняющим определение положения TRGB, является наличие у галактики подсистемы AGB-звезд, светимости которых лишь немного ярче светимости вершины ветви красных гигантов. Чтобы ослабить роль этого эффекта, мы выбирали для фотометрии звезды на окраине галактики, где относительный вклад AGB-звезд меньше, чем вклад RGB-населения.

Результаты определения расстояний у рассмотренных галактик приведены в табл.1, где (1) - имя галактики в базе данных sao.ru/lv/lvgdb; (2) - номер галактики в каталоге HyperLEDA [18]; (3) - экваториальные координаты на эпоху J2000.0; (4) - лучевая скорость в  $\text{км с}^{-1}$  относительно центроида Местной группы; (5) - положение вершины ветви красных гигантов (зв. вел.); (6) -

Таблица 1

## TRGB-ПАРАМЕТРЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ГАЛАКТИК

Имя галактики	PGC-номер	RA Dec (2000.0)	$V_{\text{LG}}$	$I_{\text{TRGB}}$	$A_I$	$M_I$	$DM$	$D$
[KK2000]58	2815824	134600.8-361944	+255	23.85	0.09	-4.11	27.87	3.75
NGC 7713	71866	233615.0-375620	+696	25.45	0.02	-4.10	29.53	8.05
UGC 5829	31923	104241.9+342656	+592	25.69	0.04	-4.11	29.76	8.95
Mrk 1265	32413	104940.4+225019	+534	25.89	0.04	-4.05	29.90	9.55
ESO 373-007	27104	093245.4-331444	+556	26.10	0.20	-4.05	29.95	9.77
NGC 6684	62453	184857.9-651024	+720	26.27	0.10	-3.88	30.05	10.23
UGC 12588	71368	232442.4+412053	+723	26.33	0.22	-4.11	30.22	11.07
Mrk 475	52358	143905.4+364822	+677	26.22	0.02	-4.11	30.31	11.53
KKH 68	2807141	113053.3+140846	+753	26.47	0.06	-4.07	30.48	12.47
KDG 178	42413	124010.0+323931	+763	26.47	0.02	-4.12	30.57	13.00

межзвездное поглощение в направлении галактики (зв. вел.), согласно Шлафли и Финкбейнеру [19]; (7) - положение TRGB (зв. вел.), которое слабо зависит от среднего показателя цвета ( $F814W - F606W$ ) у населения RGB [20]; (8,9) - модуль расстояния галактики (зв. вел.) и линейное расстояние в Мпк. Галактики в таблице ранжированы по величине оценки их расстояния.

Как показывает сравнение оценок расстояния этим методом, сделанных разными авторами, характерная погрешность измерения  $D$  составляет  $\sim 5\%$ . Эта погрешность возрастает до 7-10% с приближением TRGB-галактики к фотометрическому пределу. При этом иногда возникает и систематическая ошибка из-за путаницы в положении вершины ветвей RGB- и AGB-звезд.

Очевидно, что полученные данные об оценках расстояния галактик нуждаются в более детальных комментариях.

### 3. Индивидуальные случаи.

**[KK2000]58.** Эта карликовая сфероидальная галактика была впервые разрешена на звезды на снимках с наземным 8-м телескопом LVT [21]. Авторы определили расстояние до галактики, равное  $3.36 \pm 0.11$  Мпк, что ставило эту галактику на переднюю границу группы вокруг Сен А (NGC 5128). Наша оценка расстояния,  $3.75 \pm 0.18$ , лучше соответствует среднему расстоянию группы Сен А (3.68 Мпк). Вблизи центра dSph-галактики находится шаровое звездное скопление, лучевая скорость которого была измерена Фарионом и др. [22]. На

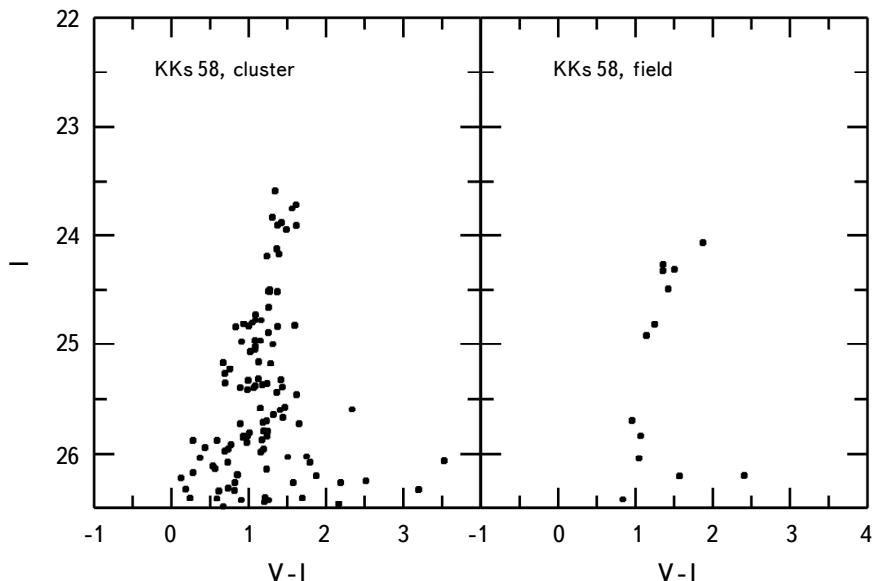


Рис.3. Слева - СМ-диаграмма для звезд шарового скопления вблизи центра dSph-галактики [KK2000]58 в апертуре радиусом  $2''$ . Справа - СМ-диаграмма для звезд соседней площадки с той же апертурой.

снимках, полученных с ACS HST, шаровое скопление хорошо разрешается на звезды ветви красных гигантов (рис.3). Положение TRGB у скопления согласуется с оценкой TRGB по всему телу карликовой галактики.

**NGC 7713.** Согласно NASA Extragalactic Database (NED; ned.ipac.caltech.edu), эта спиральная галактика позднего типа имеет 23 оценки расстояния по методу Талли-Фишера [23], связывающего светимость галактики с амплитудой ее вращения. Среднее значение расстояния по ним составляет  $9.05 \pm 1.38$  Мпк, согласуясь в пределах стандартной ошибки с нашей оценкой  $8.05 \pm 0.40$  Мпк. На проекционном расстоянии  $1^{\circ}.9$  от нее (или 270 кпк) находится другая спиральная галактика позднего типа, IC 5332, лучевая скорость которой,  $V_{LG} = 716$  км  $s^{-1}$ , и расстояние  $D = 9.01$  Мпк [5] указывают на возможное физическое ассоциирование этих галактик.

**UGC 5829 = DDO 84 = VV 794.** Иррегулярная (Im) галактика с сильно выраженной пекулярной структурой, получившая название "spider" (рис.4). Более половины барионной массы галактики приходится на газовую компоненту, которая, очевидно, подпитывает в ней многочисленные очаги звездообразования. UGC 5829 = KIG 434 входит в Каталог изолированных галактик [24]. Ближайшая относительно массивная галактика NGC 3432 с  $V_{LG} = 578$  км  $s^{-1}$  и  $D = 9.14$  Мпк [5] находится на проекционном расстоянии  $3^{\circ}.0$  или 470 кпк. UGC 5829 является выразительным примером того, что искаженная пекулярная структура галактики может быть вызвана не внешним возмущением, а сугубо внутренними свойствами галактики.



Рис.4. Изображение пекулярной галактики UGC 5829 (VV 794, "Паук"), взято из цифрового обзора неба DECaLS. Размер поля  $6' \times 6'$ , север - вверху, восток - слева.

**Mrk 1265.** Эта компактная голубая карликовая галактика находится в ореоле яркой звезды Млечного Пути. Компактность структуры, обилие голубых звезд и наличие ореола проектирующейся звезды понижают точность фотометрии. По нашей оценке расстояние до галактики составляет  $D=9.55 \pm 0.96$  Мпк, что несколько больше оценки ее расстояния  $D_{\text{NAM}} = 7.8$  Мпк по лучевой скорости с учетом местного поля скоростей в модели Numerical Action Method [25].

**ESO 373-007 = AM 0930-330 = [KK2000]31.** Две оценки расстояния этой dIrr-галактики: 8.32 Мпк по соотношению Талли-Фишера и 9.65 Мпк в модели NAM хорошо согласуются с нашей оценкой  $D=9.77 \pm 0.98$  Мпк по TRGB. Рядом, на проекционном расстоянии 15' или 40 кпк расположена более яркая Sd-галактика ESO 373-008 с лучевой скоростью  $V_{\text{LG}} = 620 \text{ км с}^{-1}$  и TF-расстоянием 9.68 Мпк. Обе галактики, очевидно, образуют изолированную пару.

**NGC 6684.** Это галактика раннего типа S0a, в структуре которой видна перемычка и кольцо. На периферии галактики заметна звездная петля и радиальная струя. В NED для нее представлено 14 грубых оценок расстояния разными приближенными методами в диапазоне от 5.5 Мпк до 15.5 Мпк. Измеренное нами TRGB-расстояние,  $10.23 \pm 1.9$  Мпк, приходится как раз на середину этого интервала. На расстоянии  $2^{\circ}.6$  от NGC 6684 находится спиральная галактика NGC 6744 с несколькими спутниками. Ее TRGB-расстояние, 9.51 Мпк, [5] и лучевая скорость  $V_{\text{LG}} = 720 \text{ км с}^{-1}$ , показывают, что эти галактики, вероятно, являются членами единой диффузной ассоциации.

**UGC 12588.** Эта dIrr-галактика, видимая анфас, находится в зоне значительного галактического поглощения. Вблизи нее на проекционном расстоянии 42' имеется более яркая спиральная галактика NGC 7640 с  $V_{\text{LG}} = 668 \text{ км с}^{-1}$  и TRGB-расстоянием 8.43 Мпк [5]. По нашей оценке TRGB-расстояние UGC 12588,  $11.07 \pm 1.1$  Мпк, заметно превосходит расстояние соседней галактики. Для проверки возможной физической связи обеих галактик необходимы более глубокие наблюдения UGC 12588.

**Mrk 475.** Голубая компактная галактика, расположенная вдали от других галактик с близкими лучевыми скоростями. Густое звездное поле в основном теле галактики снижает точность проведенной фотометрии. Полученная нами оценка TRGB-расстояния,  $11.53 \pm 1.15$  Мпк, оказалась значительно больше кинематической оценки, 9.18 Мпк (NAM).

**KKH 68 = AGC 212837.** Положение TRGB у этой dIrr-галактики выше фотометрического предела всего на  $\sim 0^m.5$ , что делает нашу оценку расстояния,  $D_{\text{TRBG}} = 12.47 \pm 1.25$  Мпк, неуверенной. Галактика находится на угловом расстоянии  $2^{\circ}.9$  от спиральной Sb-галактики NGC 3627 (M 66) с TRGB-расстоянием  $D_{\text{TRBG}} = 11.12 \pm 0.56$  Мпк [26], которая является самым ярким членом группы в созвездии Льва. Вероятно, KKH 68 принадлежит к

периферийным членам этой группы.

**KDG 178 = BTS 147.** Эта богатая газом карликовая галактика расположена всего в  $26'$  от яркой спиральной галактики NGC 4631, у которой  $V_{LG} = 581 \text{ км с}^{-1}$  и  $D_{TRBG} = 7.35 \pm 0.10 \text{ Мпк}$  (EDD). Судя по полученному нами расстоянию,  $13.0 \pm 1.3 \text{ Мпк}$ , KDG 178 находится позади группы карликов вокруг NGC 4631. Радиальная удаленность этого объекта от группы NGC 4631 косвенно подтверждается относительно большой шириной линии 21-см,  $W_{50} = 52 \text{ км с}^{-1}$ , которой соответствует TF-расстояние  $\geq 11 \text{ Мпк}$ .

Помимо перечисленных выше случаев, отметим еще несколько галактик, наблюдавшихся по программе SNAP 15922, но оказавшихся определенно далекими. Ерден и др. [27] оценили для галактики ESO 219-010 (PGC 44110) расстояние  $4.29 \text{ Мпк}$  методом флюктуаций поверхностной яркости. Эта галактика практически не разрешается на звезды на снимках, полученных с ACS. По фактуре этой галактики можно грубо оценить ее расстояние как  $D \approx 15 \text{ Мпк}$ .

Две карликовые галактики в контуре скопления Virgo: EVCC 67 и UGC 7983 с лучевыми скоростями, соответственно,  $458 \text{ км с}^{-1}$  и  $565 \text{ км с}^{-1}$ , оказались неразрешенными на снимках, полученных с ACS. Очевидно, они являются членами скопления Virgo на расстоянии  $16.5 \text{ Мпк}$ .

Изолированная dIrr-галактика KKH 46 (PGC 2807128) имеет лучевую скорость  $V_{LG} = 409 \text{ км с}^{-1}$  и ширину линии 21-см  $W_{50} = 25 \text{ км с}^{-1}$ . Она находится в так называемой "Зоне Аномальных Скоростей" [28], где галактики с расстояниями  $D = 16 \text{ Мпк}$  имеют большие отрицательные пекулярные скорости около  $-700 \text{ км с}^{-1}$ .

**4. Заключительные замечания.** Используя снимки, полученные с ACS-камерой на космическом телескопе Хаббла в фильтрах F814W и F606W, мы выполнили PSF-фотометрию и построили диаграммы цвет-величина для звездного населения 10 близких галактик. По скачку на функции светимости красных звезд определены положения вершины ветви красных гигантов и по ним оценены расстояния до галактик. Помимо спиральных галактик NGC 6684 и NGC 7713, остальные объекты относятся к карликовым галактикам dIrr, dIm, BCD, dSph. Лучевые скорости галактик относительно центроида Местной группы заключены в интервале от  $250 \text{ км с}^{-1}$  до  $770 \text{ км с}^{-1}$ , а определенные нами расстояния лежат в диапазоне от  $3.7 \text{ Мпк}$  до  $13.0 \text{ Мпк}$  с медианой  $10.0 \text{ Мпк}$ . Нами отмечено еще несколько галактик с лучевыми скоростями  $V_{LG} \approx 600 \text{ км с}^{-1}$ , которые едва разрешаются на звезды и находятся на расстояниях более  $13 \text{ Мпк}$ . Эти галактики являются или членами скопления Virgo, или же расположены в зоне аномально больших отрицательных пекулярных скоростей. Полученные данные дополняют картину поля пекулярных скоростей у галактик Местного объема, которая обусловлена

расположением локальных аттракторов с различными массами темного гало.

Работа основана на наблюдениях, выполненных на космическом телескопе Хаббл NASA/ESA по контракту NAS5-26555. В работе использованы базы данных HyperLEDA, NED и EDD. Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования РФ №075-15-2022-262 (13.МНПМУ.21.0003).

Специальная астрофизическая обсерватория РАН,  
e-mail: idkarach@gmail.com ntik@sao.ru

## DISTANCES TO TEN NEARBY GALAXIES OBSERVED WITH THE HUBBLE SPACE TELESCOPE

I.D.KARACHENYSEV, N.A.TIKHONOV

Images of 10 galaxies in the F814W and F606W filters, obtained with the ACS camera on the Hubble Space Telescope, were used to construct color-magnitude diagrams for the stellar population of these galaxies. The distances to the galaxies are estimated from the luminosity of the tip of the red giant branch. The considered galaxies have radial velocities from  $250 \text{ km s}^{-1}$  to  $760 \text{ km s}^{-1}$  relative to the Local Group centroid and distances in the range from 3.7 Mpc to 13.0 Mpc. Several other observed galaxies with low radial velocities were also noted, the distances of which turned out to be beyond the limit of 13 Mpc.

*Keywords:* galaxies - dwarf galaxies: distances - galaxies

## ЛИТЕРАТУРА

1. *M.G.Lee, W.L.Freedman, B.F.Madore*, *Astrophys. J.*, **417**, 553, 1993.
2. *I.D.Karachentsev, O.G.Kashibadze*, *Astron. Nachr.*, **342**, 999, 2021.
3. *I.D.Karachentsev, K.N.Telikova*, *Astron. Nachr.*, **339**, 615, 2018.
4. *I.D.,Karachentsev, D.I.Makarov, E.I.Kaisina*, *Astron. J.*, **145**, 101, 2013.
5. *G.S.Anand, L.Rizzi, R.B.Tully et al.*, *Astron. J.*, **162**, 80, 2021.
6. *I.D.Karachentsev, L.N.Makarova, R.B.Tully et al.*, *Astron. Astrophys.*, **638**, 111, 2020.

7. *I.D.Karachentsev, L.N.Makarova, R.B.Tully et al.*, Astron. Astrophys., **643**, 124, 2020.
8. *I.D.Karachentsev, R.B.Tully, G.S.Anand et al.*, Astron. J., **161**, 205, 2021.
9. *I.D.Karachentsev, J.M.Cannon, J.Fusion et al.*, Astron. J., **163**, 51, 2022.
10. *I.D.Karachentsev, L.N.Makarova, G.S.Anand et al.*, Astron. J., **163**, 234, 2022.
11. *I.D.Karachentsev, L.N.Makarova, B.S.Koribalski et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **518**, 5823, 2023.
12. *N.A.Tikhonov, O.A.Galazutdinova*, Astrophys. Bull., **77**, 430, 2022.
13. *P.B.Stetson*, Publ. Astron. Soc. Pacif., **99**, 191, 1987.
14. *P.B.Stetson*, Publ. Astron. Soc. Pacif., **106**, 250, 1994.
15. *A.Dolphin*, DOLPHOT: Stellar photometry, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1608.013, 2016.
16. *N.A.Tikhonov, O.A.Galazutdinova, G.M.Karataeva*, Astrophys. Bull., **74**, 257, 2019.
17. *B.F.Madore, W.L.Freedman*, Astron. J., **109**, 1645, 1995.
18. *D.Makarov, P.Prugniel, N.Terekhova et al.*, Astron. Astrophys., **570A**, 13, 2014.
19. *E.F.Schlaflly, D.P.Finkbeiner*, Astrophys. J., **737**, 103, 2011.
20. *L.Rizzi, R.B.Tully, D.I.Makarov et al.*, Astrophys. J., **661**, 815, 2007.
21. *O.Müller, M.Rejkuba, M.Pawlowski et al.*, Astron. Astrophys., **629A**, 18, 2019.
22. *K.Fahrion, O.Müller, M.Rejkuba et al.*, Astron. Astrophys., **634A**, 53, 2020.
23. *R.B.Tully, J.R.Fisher*, Astron. Astrophys., **54**, 661, 1977.
24. *V.E.Karachentseva*, Soobschenia SAO, **8**, 3, 1973.
25. *E.J.Shaya, R.B.Tully, Yu.Hoffman et al.*, Astrophys. J., **850**, 207, 2017.
26. *T.J.Hoyt, W.L.Freedman, B.F.Madore et al.*, Astrophys. J., **882**, 150, 2019.
27. *H.Jerjen, K.C.Freeman, B.Binggeli*, Astron. J., **119**, 166, 2000.
28. *R.B.Tully*, in "Large-Scale Motions in the Universe" (Princeton: Princeton Univ. Press), 169, 1988.