

КАРЛИКОВЫЕ СФЕРОИДАЛЬНЫЕ ГАЛАКТИКИ В ГРУППЕ M101 И ПОЗАДИ НЕЕ

И.Д.КАРАЧЕНЦЕВ, Л.Н.МАКАРОВА

Поступила 22 марта 2019

Мы используем снимки, полученные на космическом телескопе Хаббла, чтобы определить расстояния до дюжины объектов низкой поверхностной яркости, недавно обнаруженных вокруг яркой близкой спирали M101. Только две карликовые галактики: M101-DwA и M101-Dw9 оказались реальными спутниками M101 на расстояниях около 7 Мпк. Остальные объекты являются вероятными членами далекой группы вокруг S0-галактик NGC 5485/5473. Основываясь на лучевых скоростях и проекционных расстояниях 9 спутников, мы получили оценку полной массы M101 как $(8.5 \pm 3.0) \cdot 10^{11} M_{\odot}$, что соответствует отношению полной массы к звездной массе галактики (16 ± 6) .

Ключевые слова: *галактики: карликовые галактики*

1. *Введение.* M101 = NGC 5457 является одной из самых близких массивных галактик позднего типа Scd, в которой практически отсутствует сфероидальная звездная составляющая (bulge). Такие галактики обычно располагаются в областях пониженной космической плотности. Согласно [1], количество темной материи у Sc, Sd галактик, приходящееся на единицу звездной массы, в 2-4 раза меньше, чем у спиралей ранних типов (Sa, Sb) или эллиптических галактик. Вокруг Sc, Sd галактик сравнительно редко встречаются карликовые сфероидальные спутники низкой поверхностной яркости (dSph), лишенные газа и молодых звезд.

До недавнего времени в окрестностях M101 была известна только одна галактика типа dSph, UGC 8882 [2]. Группа любителей астрономической фотографии (Tief Belichtete Galaxies) выполнила обзор окрестностей M101 на малых телескопах с очень длинными экспозициями и обнаружила 10 кандидатов в dSph спутники M101 [3]. Эти объекты были обнаружены независимо другой командой с помощью системы малых светосильных телескопов "Dragonfly Telephoto Array" [4]. Последующий обзор вириальной зоны M101 на 3.6-м телескопе CFHT [5] привел к обнаружению еще 38 новых кандидатов в сфероидальные спутники M101 с типичными видимыми величинами $B \approx (19-21)^m$ и угловыми диаметрами $\sim (10-20)''$. Еще 5 кандидатов в dSph спутники M101 были найдены в [6] при обзоре более широкой области неба.

Подтверждение членства сфероидальных карликов в группе M101 путем

измерения лучевой скорости является сложной наблюдательной задачей из-за низкой поверхностной яркости объекта, отсутствия в нем газа и видимых структурных деталей. Однако оказались возможными измерения расстояний dSph галактик на космическом телескопе Хаббла (HST) по светимости вершины ветви красных гигантов (TRGB). Изображения семи из десяти карликовых галактик, обнаруженных в [3,4], были получены на HST с камерой ACS по программе GO 13682 (PI P. van Dokkum). Анализ этих данных показал, что три карликовых объекта оказались реальными спутниками M101 [7], а четыре остальных - диффузными карликовыми системами, не разрешенными на звезды [8].

Недавно Карлстен и др. [9] использовали данные CFHT-обзора окрестностей M101 для определения расстояний найденных ранее сфероидальных карликов путем измерения флуктуаций поверхностной яркости в них. Авторы пришли к заключению, что большинство объектов (29 из 43) являются далекими галактиками, не имеющими отношения к группе M101. Кроме подтвержденных ранее трех dSph спутников: DF1, DF2, DF3 и более яркой галактики UGC 8882, только два сфероидальных карлика: Dwa и Dw9 были аттестованы как новые вероятные члены группы M101.

2. *Расстояния двух новых спутников M101.* В архиве Хаббловского телескопа имеются изображения 19 карликовых галактик в окрестностях M101, полученные с камерой ACS в фильтрах F814W и F606W по программе GO 14796 (PI D.Crnojevic) с экспозициями, соответственно, 900 с и 1200 с. Эти изображения, извлеченные из архива HST, были обработаны нами по

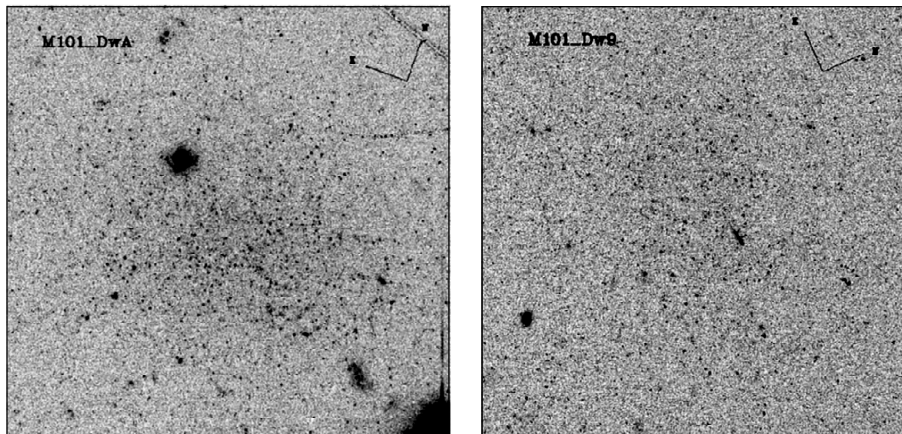


Рис.1. Изображения карликовых сфероидальных галактик в фильтре F606W, полученные с камерой ACS на космическом телескопе Хаббла. Размер изображений 35" x 35", направления на север и восток указаны стрелками.

стандартной процедуре с помощью пакета программ DOLPHOT [10]. В процессе обработки данных использовались параметры, рекомендованные для исключения незвездных и блендированных объектов. В большинстве случаев галактики не показали признаков разрешения на звезды. Только две галактики: M101-DwA и M101-Dw9 выглядят определенно разрешенными на звезды, включая ветвь красных гигантов, что позволяет определить расстояния этих галактик. Изображения обеих галактик представлены на рис.1. Размеры каждого кадра составляют 35" x 35".

Нахождение вершины ветви красных гигантов осуществлялось по принципу максимального правдоподобия с использованием моделирования и последующего выявления искусственных звезд [11]. Такой подход позволял оценить фотометрические ошибки и полноту диаграммы цвет-величина (CMD) в полях с перекрывающимися изображениями звезд. Калибровка абсолютной величины TRGB производилась согласно [12] с учетом Галактического поглощения по данным [13]. CM-диаграммы для обоих объектов представлены на рис.2. Горизонтальная линия обозначает положение TRGB, а кресты на правой стороне - фотометрические ошибки, определенные по искусственным звездам.

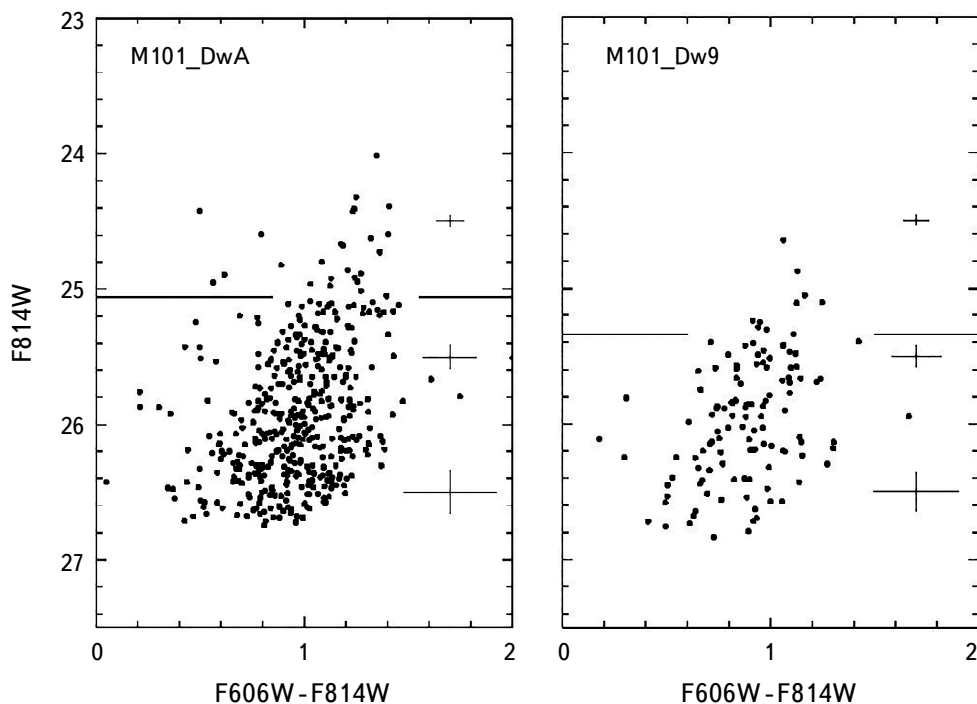


Рис.2. Диаграммы цвет-величина для галактик M101-DwA и M101-Dw9. Положение TRGB отмечено горизонтальной линией. Кресты на правой стороне показывают фотометрические ошибки измерений.

Таблица 1

ОЦЕНКИ РАССТОЯНИЯ ДЛЯ ДВУХ КАРЛИКОВЫХ ГАЛАКТИК

Галактики	TRGB	A_I	$(m - M)_0$	D , Мпк
M101-DwA	25.04	0.01	29.11 ± 0.13	6.64
M101-Dw9	25.36	0.01	29.44 ± 0.13	7.71

Полученные значения TRGB, их погрешности, величина принятого поглощения и значения модулей расстояния двух карликовых галактик приведены в табл.1.

3. *Группа галактик вокруг M101.* К настоящему моменту группа галактик, ассоциирующихся с M101, насчитывает 15 членов. Данные о них представлены в табл.2. В столбцах таблицы указаны: (1) галактики; (2) экваториальные координаты; (3) расстояние в Мпк; (4) метод, которым определено расстояние: "TRGB" - по вершине ветви красных гигантов, "sbf" - по флуктуациям поверхностной яркости, "TF" по соотношению Талли-Фишера [14], "mem" -по предполагаемому членству в группах; (5) лучевая скорость относительно центра Местной группы; (6) логарифм звездной массы из базы

Таблица 2

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГАЛАКТИК В ГРУППЕ M101

Галактики	RA (2000.0)	DEC	D Мпк	meth	V_{LG} км/с	$\log M^*$ $M_\odot$	T	r_p deg	R_p кпк	Ref.
dw1343+58	13 ^h 43 ^m 07 ^s .0	+58°13' 40"	6.95	mem	365	7.65	BCD	4.99	605	
Holm IV	13 54 45.1	+53 54 17	6.93	TRGB	272	8.60	Sm	1.34	163	[15]
GBT1355+54	13 54 50.6	+54 38 50	6.95	mem	345	7.10	HIcl	1.25	152	[16]
M101-Dw9	13 55 44.6	+55 08 45	7.71	TRGB	-	6.17	Sph	1.37	166	
UGC8882	13 57 14.6	+54 06 03	7.8	sbf	482	7.64	Sph	0.91	110	[9]
M101-df3	14 03 05.7	+53 36 56	6.52	TRGB	-	7.27	Sph	0.80	97	[7]
M 101	14 03 12.8	+54 21 02	6.95	TRGB	378	10.79	Scd	0.0	0	[17]
M101-df1	14 03 45.0	+53 56 40	6.37	TRGB	-	6.17	dTr	0.44	53	[7]
PGC2448110	14 04 57.8	+53 41 29	6.95	mem	392	6.91	BCD	0.76	92	
NGC5474	14 05 02.1	+53 39 47	6.82	TRGB	424	9.20	Sm	0.79	96	[15]
NGC5477	14 05 33.1	+54 27 39	6.77	TRGB	451	8.26	Im	0.36	44	[15]
M101-DwA	14 06 50.0	+53 44 29	6.64	TRGB	-	6.97	Sph	0.84	102	
M101-df2	14 08 37.5	+54 19 31	6.87	TRGB	-	6.74	Sph	0.79	96	[7]
NGC5585	14 19 48.3	+56 43 49	7.76	TF	457	9.16	Sd	3.54	429	[17]
DDO194	14 35 24.6	+57 15 24	6.30	TRGB	381	8.13	Sm	5.33	647	[15]
NGC5204	13 29 36.4	+58 25 04	4.59	TRGB	339	8.84	Sm	6.33	-	[17]
UGC8508	13 30 44.4	+54 54 36	2.58	TRGB	181	7.53	dIr	4.73	-	[15]
NGC5238	13 34 42.7	+51 36 50	4.21	TRGB	342	7.99	dIr	5.19	-	[15]
KKH87	14 15 09.4	+57 05 15	9.40	TRGB	473	7.76	dIr	3.44	-	[15]

данных <http://www.sao.ru/lv/lvgdb>; (7) морфологический тип; (8,9) проекционное расстояние спутника в градусах и в кпк; (10) ссылка на источник данных о расстоянии. В нижней части таблицы приведены 4 соседних на небе галактики, которые по своим расстояниям не относятся, однако, к физическим членам группы.

Как следует из этих данных, среднее проекционное расстояние у 14 спутников M101 составляет 204 кпк, что является характерным для вириального радиуса гало галактик типа Млечного Пути и M31. Радиус "сферы нулевой скорости", которая обособливает группу от общего космологического расширения, равен для галактик такой звездной массы ~ 1 Мпк [18]. Следовательно, даже самые далекие карлики: DDO194, NGC 5585, dw1343+58 могут считаться физическими членами группы M101. Лучевые скорости измерены только у 9 наиболее ярких спутников M101. Средняя квадратичная разность лучевых скоростей у них мала и составляет 64 км/с.

Даже самые яркие спутники имеют звездную массу на полтора порядка ниже массы самой галактики M101. Это дает основание рассматривать их как систему пробных тел, движущихся вокруг центральной массивной галактики. В предположении случайной ориентации орбит спутников со средним эксцентриситетом $e=0.7$ средняя орбитальная оценка массы выражается как

$$\langle M_{orb} \rangle = (16/\pi G) \langle \Delta V^2 R_p \rangle,$$

где G - постоянная тяготения, а ΔV - лучевая скорость спутника относительно M101 [19]. Этот кеплеровский подход дает среднее значение массы гало M101, равное $(8.5 \pm 3.0) \cdot 10^{11} M_{\odot}$. При звездной массе M101, равной $5.3 \cdot 10^{10} M_{\odot}$, отношение полной массы гало M101 к массе звездной компоненты $\langle M_{orb} \rangle / M^* = 16 \pm 6$ оказывается в два раза меньше, чем типичная величина ~ 32 для M31, M81 и других близких спиральных галактик с развитыми балджами [19].

4. *Группы галактик дальнего фона.* Обилие карликовых сфероидальных галактик в окрестностях M101, не разрешенных на звезды при наблюдениях на HST, нуждается в объяснении. Распределение галактик в этой области неба по лучевым скоростям обнаруживает значительный избыток числа галактик с лучевыми скоростями ~ 2000 км/с. Каталог групп галактик в ближней вселенной [20] насчитывает ~ 350 групп по всему небу со средними лучевыми скоростями $V_{LG} < 3500$ км/с. Среди них в радиусе $\sim 7^\circ$ вокруг M101 имеется 11 групп. У всех этих групп средние лучевые скорости заключены в интервале [1900-2400] км/с. С большой вероятностью указанные группы образуют диффузную структуру типа космического "блина". Две наиболее населенные группы вокруг галактик NGC 5422 и NGC 5473/85 располагаются

Таблица 3

ПАРАМЕТРЫ ГРУПП ГАЛАКТИК ПОЗАДИ M101

Group	J2000.0	N_V	V_{LG} км/с	σ_V км/с	D Мпк	R_V кпк	$\log M^*$ $L_\odot$	$\log M_V$ $M_\odot$	M_V/M^*
NGC5422	14 ^h 00 ^m 42 ^s .0 +55°09' 52"	12	1935	121	29.8	280	11.17	13.06	78
NGC5485	14 07 11.3 +55 00 06	18	2162	94	27.9	277	11.20	12.72	33

на небе настолько близко к M101, что их сферы нулевой скорости охватывают в проекции галактику M101. Табл.3 приводит для этих групп следующие данные: экваториальные координаты центра, число галактик с измеренными лучевыми скоростями, среднюю лучевую скорость, дисперсию лучевых скоростей, расстояние в Мпк, вириальный радиус, интегральную звездную и вириальную массу. Полученные отношения вириальной массы к звездной массе у этих групп, $M_V/M^* = 78$ и 33 являются типичными для групп такой населенности.

Рис.3 воспроизводит фрагмент снимка центральной области группы NGC 5473/85, полученный F.Neyer на 15-см любительском телескопе с экспозицией 40 часов. На нем отмечены четыре карликовые галактики очень низкой поверхностной яркости, неразрешенные на звезды на снимках HST. Вокруг массивной S0 галактики NGC 5485 видна система слабых периферических потоков, отмеченная стрелками. Будучи членами группы на расстоянии $D=27.9$

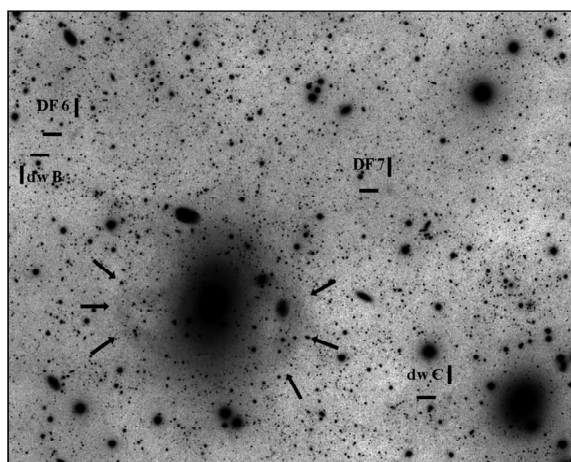


Рис.3. Пара S0 галактик NGC 5473 (справа внизу) и NGC 5485 (вблизи центра) в далекой группе на расстоянии 28 Мпк. Стрелками отмечены 4 карликовые галактики этой группы, а также система звездных потоков на окраине NGC 5485. Размер кадра 39' x 31', север - вверх, восток - слева.

Мпк, карликовые объекты низкой поверхностной яркости имеют светимости и линейные размеры, типичные для dSph галактик в более исследованных близких группах.

В целом, популяция карликовых сфероидальных галактик обладает большим разнообразием светимостей и линейных диаметров [4,8]. Крайними проявлениями этого класса объектов являются ультрадиффузные и ультракомпактные карлики, средняя поверхностная яркость которых различается в сотни раз. Большая дисперсия интегральных параметров dSph галактик делает крайне трудным оценку их расстояния, если они далеки и не разрешаются на отдельные звезды.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-02-00005. В работе использованы данные архива Хаббловского космического телескопа.

Специальная астрофизическая обсерватория РАН,
Россия, e-mail: ikar@sao.ru

DWARF SPHEROIDAL GALAXIES IN THE M101 GROUP AND BEHIND

I.D.KARACHENTSEV, L.N.MAKAROVA

We use images obtained with Hubble Space Telescope to determine distances for a dozen low surface brightness objects, found recently near the bright spiral galaxy M101. Only two the dwarf galaxies: M101-DwA and M101-Dw9 turn out to have distances near 7 Mpc being true satellites of M101, but others are probable members of a background group around S0 galaxies NGC 5485/5473. Based on radial velocities and projected separations of 9 satellites, we estimate the total mass of M101 as $(8.5 \pm 3.0) \cdot 10^{11} M_{\odot}$ yielding the dark halo-mass-to-stellar mass ratio of (16 ± 6) .

Keywords: *galaxies: dwarf galaxies*

ЛИТЕРАТУРА

1. *I.D.Karachentsev, V.E.Karachentseva*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **486**, 3697, 2019.
2. *R.Rekola, H.Jerjen, C.Flynn*, Astron. Astrophys., **437**, 823, 2005.
3. *I.D.Karachentsev, P.Riepe, T.Zilch et al.*, Astrophys. Bull., **70**, 379, 2015.
4. *A.Merritt, P. van Dokkum, R.Abraham*, Astrophys. J. Lett., **787**, L37, 2014.
5. *P.Bennet, D.J.Sand, D.Crnojevich et al.*, Astrophys. J., **850**, 109, 2017.
6. *O.Mueller, R.Scalera, B.Binggeli et al.*, Astron. Astrophys., **602**, A119, 2017.
7. *S.Danieli, P. van Dokkum, A.Merritt et al.*, Astrophys. J., **837**, 136, 2017.
8. *A.Merritt, P. van Dokkum, S.Danieli et al.*, Astrophys. J., **833**, 168, 2016.
9. *S.G.Carlsten, R.L.Beaton, J.P.Greco et al.*, arXiv:1901.07578, 2019.
10. *A.Dolphin*, Publ. Astron. Soc. Pacif., **112**, 1383, 2000.
11. *D.Makarov, L.Makarova, L.Rizzi et al.*, Astron. J., **132**, 2729, 2006.
12. *L.Rizzi, R.B.Tully, D.I.Makarov et al.*, Astrophys. J., **661**, 813, 2007.
13. *E.F.Schlafly, D.P.Finkbeiner*, Astrophys. J., **737**, 103, 2011.
14. *R.B.Tully, J.R.Fisher*, Astron. Astrophys., **54**, 661, 1977.
15. *N.A.Tikhonov, V.S.Lebedev, O.A.Galazutdinova*, Astron. Lett., **41**, 239, 2015.
16. *J.C.Mihos, K.Keating, K.Holley-Bockelmann et al.*, Astrophys. J., **761**, 186, 2012.
17. *R.B.Tully, H.M.Courtois, J.G.Sorce*, Astron. J., **152**, 50, 2016.
18. *O.G.Kashibadze, I.D.Karachentsev*, Astron. Astrophys., **609A**, 11, 2018.
19. *I.D.Karachentsev, Y.N.Kudrya*, Astron. J., **148**, 50, 2014.
20. *D.I.Makarov, I.D.Karachentsev*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **412**, 2498, 2011.