АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ, 2013, том 68, № 2, с. 131–145

УДК 524.74-323.3

РАССТОЯНИЯ ДО КАРЛИКОВЫХ ГАЛАКТИК ОБЛАКА ГОНЧИХ ПСОВ I

© 2013 Д. И. Макаров*, Л. Н. Макарова**, Р. И. Уклеин***

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 29 января 2013 года; принята в печать 14 марта 2013 года

Определена пространственная структура рассеянной концентрации галактик в созвездии Гончих Псов. Мы уточнили расстояния для 30 галактик этой области, используя глубокие изображения из архива наблюдений, произведенных на космическом телескопе Хаббла с инструментами WFPC2 и ACS. Нами проведена высокоточная звездная фотометрия разрешенных звезд в этих галактиках и определены фотометрические расстояния по вершине ветви красных гигантов с использованием улучшенной методики и современных калибровок. Высокая точность полученных результатов позволяет нам выделить зону хаотических движений вокруг центра системы. Группа галактик вокруг M 94 характеризуется медианными скоростью $V_{\rm LG} = 287$ км/с, расстоянием $D = 4.28$ Мпк, дисперсией внутренних скоростей $\sigma = 51$ км/с и полной светимостью $L_B = 1.61 \times 10^{10}\ L_\odot$. Проекционная масса системы равна $M_p = 2.56 \times 10^{12}\ M_\odot$, что соответствует отношению масса–светимость $(M/L)_p = 159\ (M/L)_\odot$. Полученная нами оценка отношения масса–светимость существенно превышает типичное отношение $M/L_B \sim 30$ для близких групп галактик. По сравнению с хорошо известными близкими группами, такими как Местная Группа, M 81 и Центавр A, облако галактик CVn I содержит в 4–5 раз меньше светящегося вещества, а M 94 как минимум на $1^{\rm m}$ слабее любой другой центральной галактики этих групп. Тем не менее, концентрация галактик в Гончих Псах может иметь сопоставимую полную массу.

Ключевые слова: *галактики: расстояния и красные смещения—галактики: карликовые—космология: тёмная материя*

1. ВВЕДЕНИЕ

Распределение близких галактик Местного Объема по небу показывает значительную концентрацию объектов в малой области неба в созвездии Гончих Псов (Рис. 1). Эта особенность отмечалась еще в работах [1, 2]. В данном комплексе обнаруживаются в основном карликовые галактики поздних морфологических типов. В области неба $\alpha = (11\overset{\rm h}{.}5, 14\overset{\rm h}{.}0)$, $\delta = (+20°, +60°)$ выделяется два пика в распределении галактик по лучевым скоростям (Рис. 2). Первый пик в районе $V_{\rm LG} = 300$ км/с соответствует облаку CVn I, в то время как концентрация CVn II имеет среднюю скорость в районе 560 км/с. От других ближайших групп галактик, таких как Местная группа, M 81 или группы в Центавре, облако Гончих Псов I отличается отсутствием ярко выраженного гравитационного центра и выглядит рассеянным. Концентрация галактик в созвездии Гончих Псов I неоднократно привлекала к себе внимание исследователей. В серии работ [3–6] структура комплекса изучалась по фотометрии ярчайших голубых звезд этих галактик. Использование космического телескопа Хаббла (HST) позволило существенно улучшить точность определения расстояний и исследовать кинематику CVn I облака галактик [7]. Недавно в области близких групп галактик в Гончих Псах был проведен слепой обзор неба в нейтральном водороде [8] с целью изучения функции H I-масс карликовых галактик. Только один объект из этого обзора не имеет оптического отождествления. Кроме того, в работе [9] исследовалось текущее звездообразование галактик в Гончих Псах по данным Hα обзора. Авторами не было обнаружено значимой корреляции между темпом звездообразования в галактиках и их окружением.

Быстрый прогресс в глубоких наблюдениях галактик в Гончих Псах, выполненных на HST/ACS и HST/WFPC2, а также существенное улучшение метода определения расстояний по вершине ветви красных гигантов (TRGB) позволяют нам уточнить структуру этой необычной концентрации галактик. В данной работе мы уточнили расстояния для 30 галактик облака CVn I, с использованием

*E-mail: dim@sao.ru
**E-mail: lidia@sao.ru
***E-mail: uklein.r@gmail.com

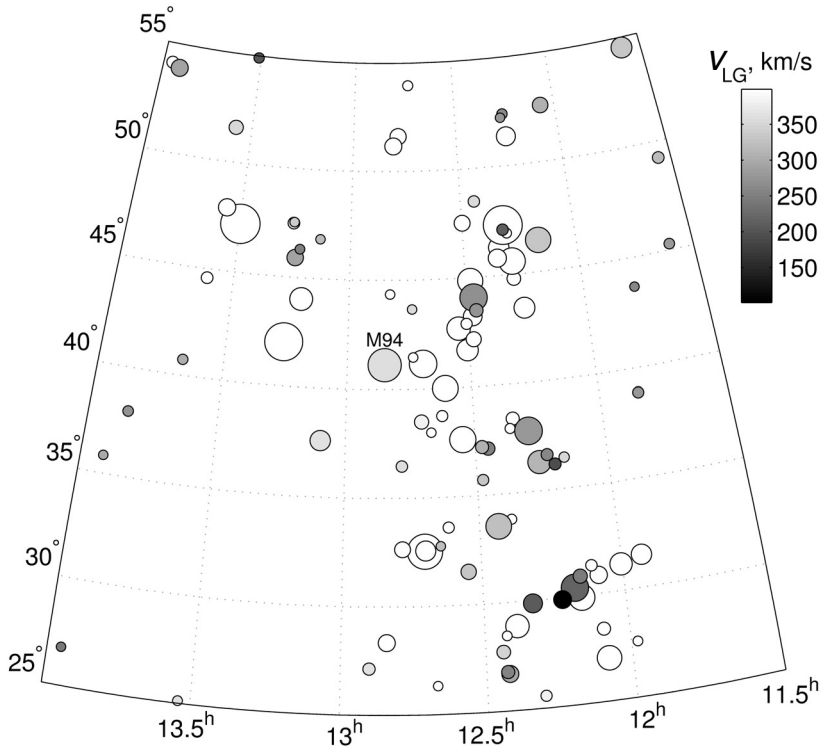

Рис. 1. Распределение галактик в Гончих Псах на небесной сфере. Размер кружков обратно пропорционален абсолютной звездной величине объектов. Оттенками серого показана лучевая скорость галактик облака CVn I с $V_{\rm LG} < 400$ км/с, белые кружки соответствуют галактикам дальнего фона.

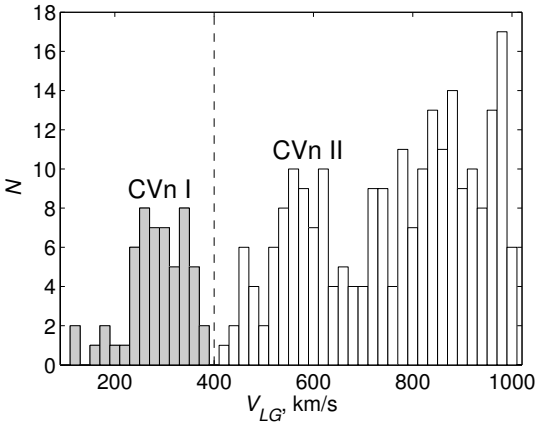

Рис. 2. Распределение галактик по лучевым скоростям в направлении созвездия Гончих Псов I.

оптимизированного метода определения TRGB [10] и новых калибровок нуль-пункта [11].

2. ЗВЕЗДНАЯ ФОТОМЕТРИЯ ГАЛАКТИК ОБЛАКА ГОНЧИХ ПСОВ I

Выборка галактик из комплекса Гончих Псов I представлена в Таблице 1. Прямые изображения галактик, полученные с ACS/HST и WFPC2/HST, были взяты из архива Хаббловского телескопа. Изображения всех галактик были получены в фильтрах F606W и F814W, за исключением NGC 4214, которая наблюдалась в F555W и F814W. Стандартная первичная обработка изображений проводится “на лету.” Таким образом, пользователь получает изображения, из которых вычтены темновые кадры, проведено исправление за плоское поле и учтено наличие “плохих” столбцов и отдельных “горячих”/“холодных” пикселей. Изображения исследуемых галактик приведены на Рис. 3.

Фотометрия разрешенных звезд в галактиках проводилась с помощью специальных программных пакетов HSTphot [27] и DOLPHOT [28], предназначенных для обработки густых звездных полей изображений, полученных с WFPC2/HST и ACS/HST. Процедуры фотометрической обработки включали маскирование “плохих” столбцов и пикселей, удаление следов космических частиц с изображений и одновременную PSF-фотометрию детектированных звезд в двух фильтрах, используя рекомендованные параметры [27, 28]. Только звезды, фотометрия которых удовлетворяет ряду критериев качества, были использованы для даль-

Таблица 1. Параметры HST-наблюдений для 30 галактик облака Гончих Псов I

Name	RA (J2000) Dec	Camera	Proposal	Filters	T_{exp}, s
UGC 6541	113328.9+491418	WFPC2	8601	F814W/F606W	600/600
NGC 3738	113548.6+543122	ACS/WFC	12546	F814W/F606W	450/450
NGC 3741	113606.0+451708	WFPC2	8601	F814W/F606W	600/600
UGC 6817	115052.9+385251	WFPC2	8601	F814W/F606W	600/600
NGC 4068	120401.9+523519	ACS/WFC	9771	F814W/F606W	900/1200
NGC 4163	121209.2+361010	ACS/WFC	9771	F814W/F606W	900/1200
UGCA 276	121458.1+361306	WFPC2	8601	F814W/F606W	600/600
NGC 4214	121539.2+361939	WFPC2	6569	F814W/F555W	1300/1300
UGC 7298	121630.1+521340	WFPC2	8601	F814W/F606W	600/600
NGC 4244	121729.5+374826	ACS/WFC	10523	F814W/F606W	735/735
UGC 7559	122705.0+370836	WFPC2	8601	F814W/F606W	600/600
UGC 7577	122741.7+432939	WFPC2	8601	F814W/F606W	600/600
NGC 4449	122811.0+440535	WFPC2	5971	F814W/F606W	1400/1400
UGC 7605	122838.7+354304	WFPC2	8601	F814W/F606W	600/600
IC 3687	124215.1+383010	WFPC2	8601	F814W/F606W	600/600
KK 166	124913.1+353646	WFPC2	8601	F814W/F606W	600/600
M 94	125053.0+410712	ACS/WFC	10523	F814W/F606W	730/730
IC 4182	130549.6+373618	WFPC2	8584	F814W/F606W	2600/2600
UGC 8215	130803.6+464941	ACS/WFC	9771	F814W/F606W	900/1200
UGC 8308	131322.7+461913	WFPC2	8601	F814W/F606W	600/600
UGC 8320	131428.2+455511	WFPC2	8601	F814W/F606W	600/600
UGC 8331	131529.8+472959	ACS/WFC	10905	F814W/F606W	1148/938
NGC 5204	132936.5+582510	WFPC2	8601	F814W/F606W	600/600
UGC 8508	133044.4+545441	WFPC2	8601	F814W/F606W	600/600
UGC 8638	133919.6+244631	ACS/WFC	9771	F814W/F606W	900/1200
UGC 8651	133953.8+404421	ACS/WFC	10210	F814W/F606W	1209/1016
UGC 8760	135051.2+380116	ACS/WFC	10210	F814W/F606W	1189/998
UGC 8833	135448.5+355016	ACS/WFC	10210	F814W/F606W	1189/998
KK 230	140710.4+350340	ACS/WFC	9771	F814W/F606W	900/1200
UGC 9128	141556.5+230320	ACS/WFC	10210	F814W/F606W	1174/985

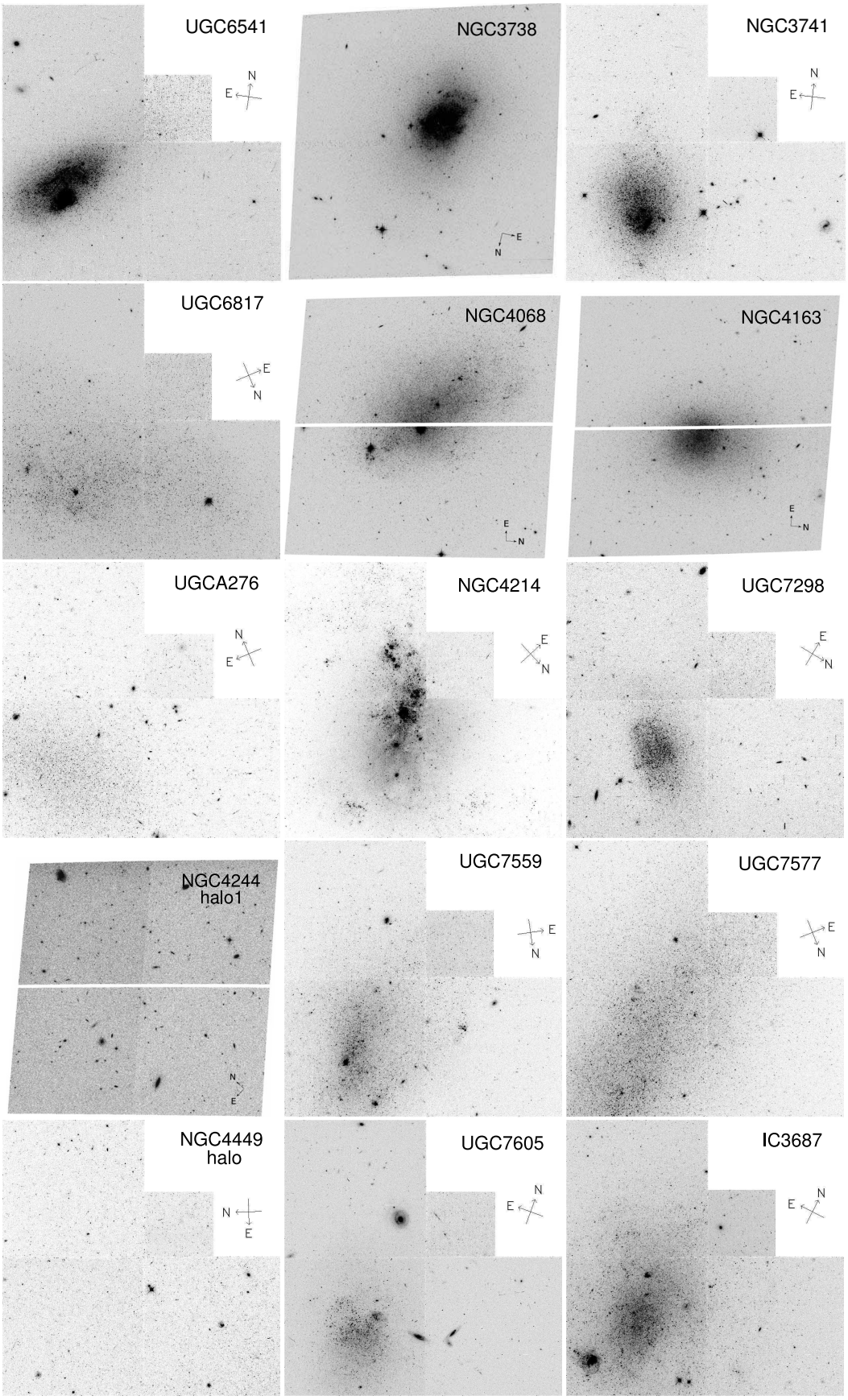

Рис. 3. Изображения исследованных галактик облака Гончих Псов I, полученные на HST с WFPC2 или ACS.

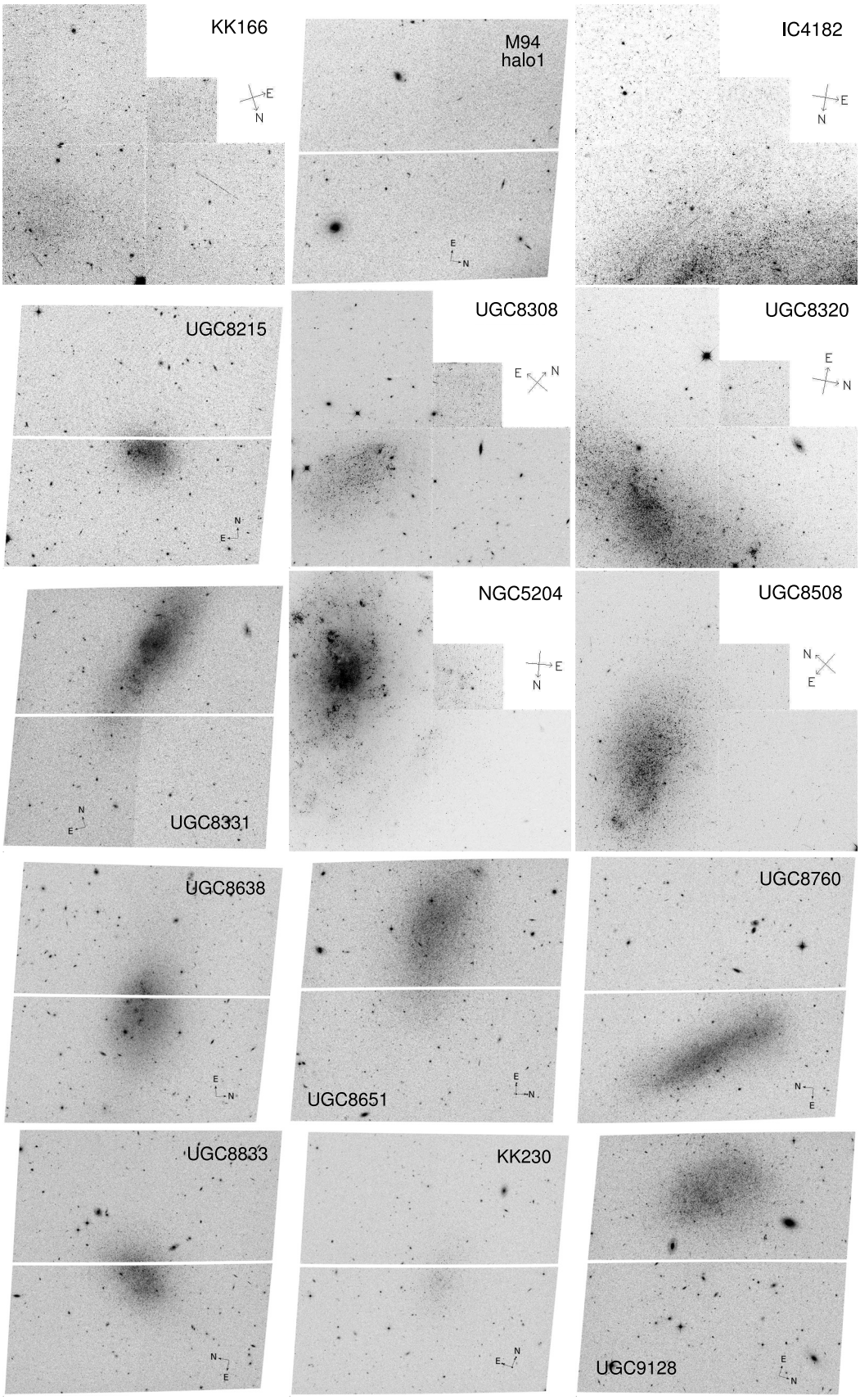

Рис. 3. Продолжение.

Таблица 2. Расстояния до галактик в облаке CVn I

Name	B_t,* mag	V_h,** км/с	$E(B-V)$, mag	TRGB,*** mag	Color,**** mag	$(m-M)_0$, mag	D, Mpc	$V_{\rm LG}$, км/с	A_B^i, mag	M_B, mag	Ref
UGC 6541	14.44	249 ± 2	0.019	$24.15^{+0.10}_{-0.10}$	$0.977^{+0.034}_{-0.010}$	$28.15^{+0.12}_{-0.12}$	$4.26^{+0.23}_{-0.23}$	303	0.00	−13.79	[b], [A]
NGC 3738	11.87	225 ± 8	0.010	$24.71^{+0.06}_{-0.06}$	$1.188^{+0.004}_{-0.004}$	$28.76^{+0.08}_{-0.08}$	$5.65^{+0.22}_{-0.22}$	306	0.02	−16.95	[b], [D]
NGC 3741	14.40	229 ± 2	0.025	$23.48^{+0.07}_{-0.07}$	$0.937^{+0.023}_{-0.021}$	$27.48^{+0.09}_{-0.09}$	$3.13^{+0.14}_{-0.13}$	263	0.00	−13.18	[b], [A]
UGC 6817	13.70	251 ± 2	0.026	$23.14^{+0.05}_{-0.06}$	$0.942^{+0.010}_{-0.024}$	$27.13^{+0.08}_{-0.08}$	$2.66^{+0.10}_{-0.10}$	257	0.00	−13.54	[a], [A]
NGC 4068	13.19	201 ± 2	0.022	$24.14^{+0.02}_{-0.02}$	$1.056^{+0.005}_{-0.007}$	$28.20^{+0.06}_{-0.06}$	$4.36^{+0.12}_{-0.12}$	281	0.00	−15.10	[a], [C]
NGC 4163	13.63	162 ± 5	0.020	$23.31^{+0.02}_{-0.02}$	$1.144^{+0.004}_{-0.005}$	$27.35^{+0.06}_{-0.06}$	$2.96^{+0.08}_{-0.08}$	163	0.00	−13.81	[a], [H]
UGC A276	15.86	285 ± 5	0.020	$23.35^{+0.07}_{-0.08}$	$1.033^{+0.030}_{-0.057}$	$27.34^{+0.10}_{-0.09}$	$2.93^{+0.13}_{-0.12}$	288	0.00	−11.56	[g], [E]
NGC 4214	10.24	291 ± 5	0.022	$23.31^{+0.06}_{-0.06}$	$1.652^{+0.014}_{-0.045}$	$27.26^{+0.05}_{-0.04}$	$2.84^{+0.06}_{-0.06}$	295	0.01	−17.13	[c], [F]
UGC 7298	15.95	174 ± 2	0.023	$24.17^{+0.29}_{-0.23}$	$0.992^{+0.043}_{-0.138}$	$28.16^{+0.23}_{-0.30}$	$4.28^{+0.46}_{-0.59}$	256	0.00	−12.31	[a], [A]
NGC 4244	10.88	248 ± 17	0.021	$24.16^{+0.09}_{-0.10}$	$1.206^{+0.051}_{-0.074}$	$28.19^{+0.12}_{-0.11}$	$4.34^{+0.24}_{-0.21}$	260	0.68	−18.08	[c], [B]
UGC 7559	14.12	217 ± 17	0.014	$24.31^{+0.05}_{-0.05}$	$0.956^{+0.019}_{-0.018}$	$28.32^{+0.08}_{-0.08}$	$4.61^{+0.16}_{-0.16}$	230	0.00	−14.26	[d], [B]
UGC 7577	12.95	206 ± 2	0.020	$23.08^{+0.03}_{-0.03}$	$1.049^{+0.007}_{-0.008}$	$27.06^{+0.06}_{-0.06}$	$2.58^{+0.08}_{-0.08}$	251	0.00	−14.20	[a], [A]
NGC 4449	10.06	202 ± 33	0.019	$24.15^{+0.06}_{-0.06}$	$1.170^{+0.026}_{-0.055}$	$28.11^{+0.09}_{-0.09}$	$4.19^{+0.17}_{-0.17}$	250	0.07	−18.21	[a], [B]
UGC 7605	14.76	310 ± 2	0.014	$24.30^{+0.08}_{-0.08}$	$0.899^{+0.026}_{-0.032}$	$28.32^{+0.10}_{-0.10}$	$4.61^{+0.22}_{-0.21}$	317	0.00	−13.62	[d], [A]
IC 3687	13.79	350 ± 33	0.020	$24.08^{+0.06}_{-0.05}$	$0.956^{+0.014}_{-0.012}$	$28.08^{+0.08}_{-0.08}$	$4.12^{+0.15}_{-0.15}$	377	0.00	−14.37	[a], [B]
KK 166	17.62		0.015	$24.12^{+0.26}_{-0.30}$	$1.144^{+0.104}_{-0.055}$	$28.10^{+0.31}_{-0.26}$	$4.17^{+0.60}_{-0.50}$		0.00	−10.54	[f]
M 94	8.74	308 ± 8	0.018	$24.29^{+0.04}_{-0.03}$	$2.106^{+0.033}_{-0.045}$	$28.14^{+0.07}_{-0.08}$	$4.25^{+0.15}_{-0.16}$	352	0.14	−19.62	[f], [C]
IC 4182	12.02	321 ± 2	0.014	$24.21^{+0.04}_{-0.04}$	$1.431^{+0.015}_{-0.012}$	$28.15^{+0.07}_{-0.07}$	$4.26^{+0.14}_{-0.14}$	357	0.00	−16.19	[a], [G]
UGC 8215	16.03	224 ± 2	0.011	$24.17^{+0.05}_{-0.06}$	$1.093^{+0.012}_{-0.042}$	$28.24^{+0.08}_{-0.08}$	$4.44^{+0.16}_{-0.16}$	303	0.00	−12.25	[h], [A]
UGC 8308	15.45	150 ± 2	0.010	$24.07^{+0.21}_{-0.24}$	$0.969^{+0.022}_{-0.116}$	$28.08^{+0.25}_{-0.22}$	$4.14^{+0.47}_{-0.42}$	230	0.00	−12.68	[a], [A]
UGC 8320	12.97	191 ± 8	0.015	$24.11^{+0.07}_{-0.07}$	$0.914^{+0.031}_{-0.037}$	$28.12^{+0.09}_{-0.09}$	$4.20^{+0.17}_{-0.17}$	270	0.00	−15.21	[a], [D]
UGC 8331	14.46	262 ± 5	0.009	$24.14^{+0.03}_{-0.03}$	$1.072^{+0.008}_{-0.009}$	$28.22^{+0.06}_{-0.06}$	$4.40^{+0.13}_{-0.13}$	348	0.00	−13.80	[a], [H]
NGC 5204	11.73	201 ± 2	0.013	$24.31^{+0.18}_{-0.18}$	$1.117^{+0.024}_{-0.024}$	$28.30^{+0.19}_{-0.19}$	$4.57^{+0.40}_{-0.40}$	339	0.11	−16.73	[c], [C]
UGC 8508	14.12	57 ± 2	0.015	$23.12^{+0.05}_{-0.05}$	$0.923^{+0.016}_{-0.026}$	$27.13^{+0.08}_{-0.08}$	$2.67^{+0.09}_{-0.09}$	181	0.00	−13.07	[a], [A]
UGC 8638	14.44	276 ± 2	0.013	$24.11^{+0.03}_{-0.03}$	$1.122^{+0.005}_{-0.005}$	$28.17^{+0.06}_{-0.06}$	$4.31^{+0.13}_{-0.13}$	275	0.00	−13.79	[d], [A]
UGC 8651	14.22	214 ± 2	0.006	$23.36^{+0.03}_{-0.03}$	$1.004^{+0.014}_{-0.012}$	$27.45^{+0.07}_{-0.07}$	$3.10^{+0.10}_{-0.09}$	284	0.00	−13.26	[e], [A]
UGC 8760	14.47	188 ± 2	0.016	$23.51^{+0.04}_{-0.04}$	$1.037^{+0.024}_{-0.029}$	$27.58^{+0.07}_{-0.07}$	$3.28^{+0.10}_{-0.11}$	254	0.00	−13.18	[e], [A]
UGC 8833	15.30	221 ± 2	0.012	$23.48^{+0.05}_{-0.05}$	$1.077^{+0.011}_{-0.011}$	$27.55^{+0.08}_{-0.07}$	$3.24^{+0.11}_{-0.11}$	280	0.00	−12.30	[e], [A]
KK 230	17.50	63 ± 2	0.014	$22.46^{+0.26}_{-0.14}$	$0.979^{+0.022}_{-0.025}$	$26.55^{+0.15}_{-0.27}$	$2.04^{+0.14}_{-0.25}$	127	0.00	−9.11	[i], [A]
UGC 9128	14.38	160 ± 2	0.023	$22.71^{+0.04}_{-0.04}$	$0.922^{+0.067}_{-0.100}$	$26.79^{+0.07}_{-0.07}$	$2.28^{+0.08}_{-0.07}$	180	0.00	−12.51	[d], [A]

Notes: * Ссылки на фотометрию: [a] Makarova, 1999 [12]; [b] Taylor et al.,2005 [13]; [c] Vaucouleurs et al., 1991 [14]; [d] Makarova et al., 1998 [5]; [e] Makarova et al., 2009 [15]; [f] Karachentsev et al., 2004 [16]; [g] Jerjen et al., 2001 [17]; [h] Bremnes et al., 1999 [18]; [i] Karachentsev et al., 2013 (in press).

** Ссылки на измерения лучевых скоростей: [A] Begum et al., 2008 [19]; [B] Kovač et al., 2009 [20]; [C] Springob et al., 2005 [21]; [D] Stil and Israel, 2002 [22]; [E] Huchtmeier and Richter, 1986 [23]; [F] Huchtmeier and Seiradakis, 1985 [24]; [G] Tifft and Cocke, 1988 [25]; [H] Simpson and Gottesman, 2000 [26].

*** Положение TRGB, измеренное в фильтре $F814W_{\rm TRGB}$.

**** Практически для всех случаев имеется ввиду величина $(F814W-F606W)_{\rm TRGB}$, за исключением галактики NGC4214, для которой использовался цвет $(F814W-F555W)_{\rm TRGB}$.

нейших измерений и анализа. А именно, отбирались звезды с соотношением сигнал–шум $S/N \geq 5$ в обоих фильтрах, $\chi^2 \leq 2.5$ и $|\mathrm{sharp}| \leq 0.3$.

В процессе фотометрии мы уделяли особое внимание определению фотометрических ошибок. Поскольку в густых звездных полях на качество измерений сильно влияет наличие близких соседей, мы провели тесты с использованием искусственных звезд. Для каждой галактики мы создали большую библиотеку искусственных звезд, чье распределение по цветам и звездным величинам соответствует реальному. К этим искусственным звездам на изображениях галактик были применены в точности те же процедуры фотометрии, что и к реальным. Этот процесс, требующий большого времени счета на компьютере, является, по общему мнению, наилучшей возможностью оценить реальные фотометрические ошибки с учетом неполноты фотометрии, очень близких соседей и сливающихся звездных изображений.

3. ДИАГРАММЫ "ЦВЕТ–ЗВЕЗДНАЯ ВЕЛИЧИНА"

Диаграммы "цвет–звездная величина" (CMD) звезд в исследованных галактиках приведены на Рис. 4. Иррегулярные карликовые галактики составляют подавляющее большинство объектов нашей выборки. На всех диаграммах хорошо заметна верхняя часть Главной последовательности — голубые звезды, средний показатель цвета которых находится около нуля. Правую верхнюю часть CMD занимают красные сверхгиганты и звезды асимптотической ветви гигантов (AGB), обе эти ветви населены по-разному для разных галактик. Самая многочисленная популяция на каждой диаграмме — это звезды RGB. Нами были выбраны из Хаббловского архива лишь те экспозиции, которые достаточно глубоки, чтобы надежно прописать RGB в галактике и, следовательно, оценить расстояние методом TRGB с хорошей точностью.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЙ

Для того, чтобы достоверно определить структуру облака галактик в созвездии Гончих Псов, необходимо знание точных фотометрических расстояний до этих галактик, оцененных единообразно. Оценки расстояний до многих галактик облака проводились и раньше, в том числе используя вершину ветви красных гигантов, как один из наиболее точных индикаторов расстояния. Однако, единообразная оценка таких расстояний проводится впервые. Более того, существенным фактором уточнения расстояний является улучшение самого метода, проведенное авторами. Для определения значений TRGB мы использовали нашу программу `TRGBTOOL`, основанную на алгоритме максимального правдоподобия для функции светимости звезд в галактике и аккуратном учете фотометрических ошибок, определенных из тестов с искусственными звездами [10]. Калибровка метода TRGB также была нами в значительной мере улучшена [11]. В этой работе были оценены зависимость абсолютной величины TRGB от показателя цвета и новые нуль-пункты в фотометрической системе фильтров ACS и WFPC2. Положение обрыва функции светимости и соответствующая 1σ ошибка показаны на CMD исследованных галактик горизонтальными линиями (Рис. 4).

Новые фотометрические расстояния до галактик облака Гончих Псов I собраны в Таблице 2. В ней приведены: (1) имя галактики в известных каталогах; (2) полная видимая звездная величина B_t в B-фильтре; (3) гелиоцентрическая скорость V_h; (4) избыток цвета в направлении на галактику $E(B-V)$, согласно [29]; (5) положение TRGB, определенное нами с помощью программы `TRGBTOOL`; (6) средний цвет $(\mathrm{F814W}-\mathrm{F606W})_{\mathrm{TRGB}}$ звезд в области TRGB (для галактики NGC 4214 вместо фильтра F606W использовался фильтр F555W); (7) $(m-M)_0$ — измеренный модуль расстояния галактики в mag; (8) D — соответствующее фотометрическое расстояние в Мпк; (9) радиальная скорость относительно центроида Местной группы V_{LG}, согласно [30]; (10) A_B^i — внутреннее поглощение в галактике в B-фильтре, согласно [31]; (11) M_B — абсолютная звездная величина галактики в B-фильтре; (12) ссылки на литературу по фотометрии и лучевым скоростям галактик. Полная видимая звездная величина галактики, TRGB и средний цвет RGB звезд в области обрыва не исправлялись за галактическое поглощение. Заметим, что проведенные измерения являются частью значительно более обширной программы единообразного измерения расстояний до близких, в основном карликовых, галактик методом TRGB с помощью программы `TRGBTOOL` [32].[1]

4.1. Расстояние до M 94

M 94 — гигантская спиральная галактика, которая расположена в пределах облака Гончих Псов I и могла бы претендовать на роль гравитирующего центра. Таким образом, очень важно оценить точное фотометрическое расстояние до этого объекта. Впервые M 94 была разрешена на отдельные звезды в ходе наших SNAPshot наблюдений на HST/WFPC2 (Prop. 8601). Модуль расстояния, оцененный по вершине ветви красных гигантов

[1] `http://edd.ifa.hawaii.edu/`

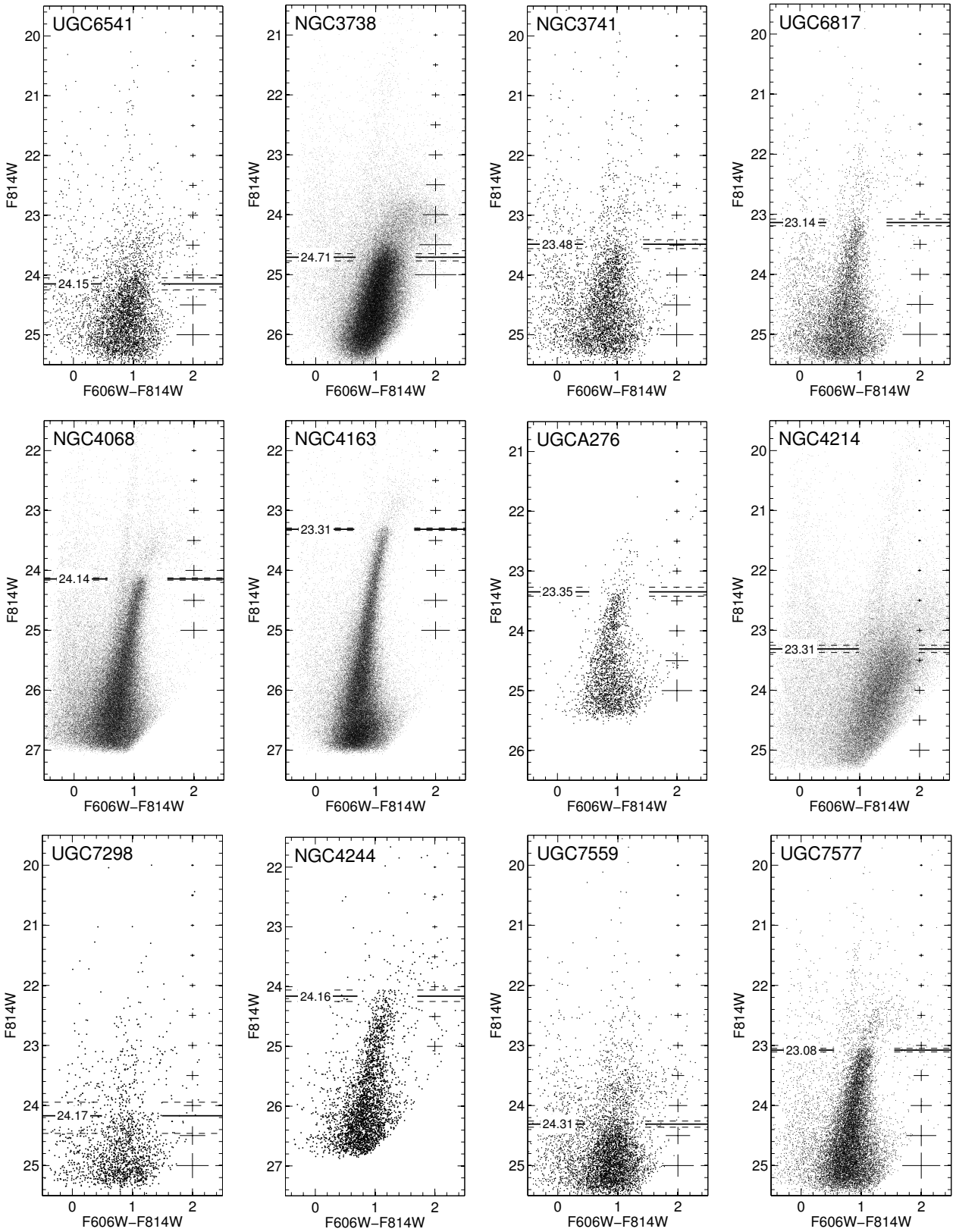

Рис. 4. Диаграммы "цвет—звездная величина" для звезд галактик облака Гончих Псов I. Кресты указывают характерные ошибки звездной фотометрии. Положение TRGB указано прямой линией, соответствующие ошибки измерения — прерывистыми.

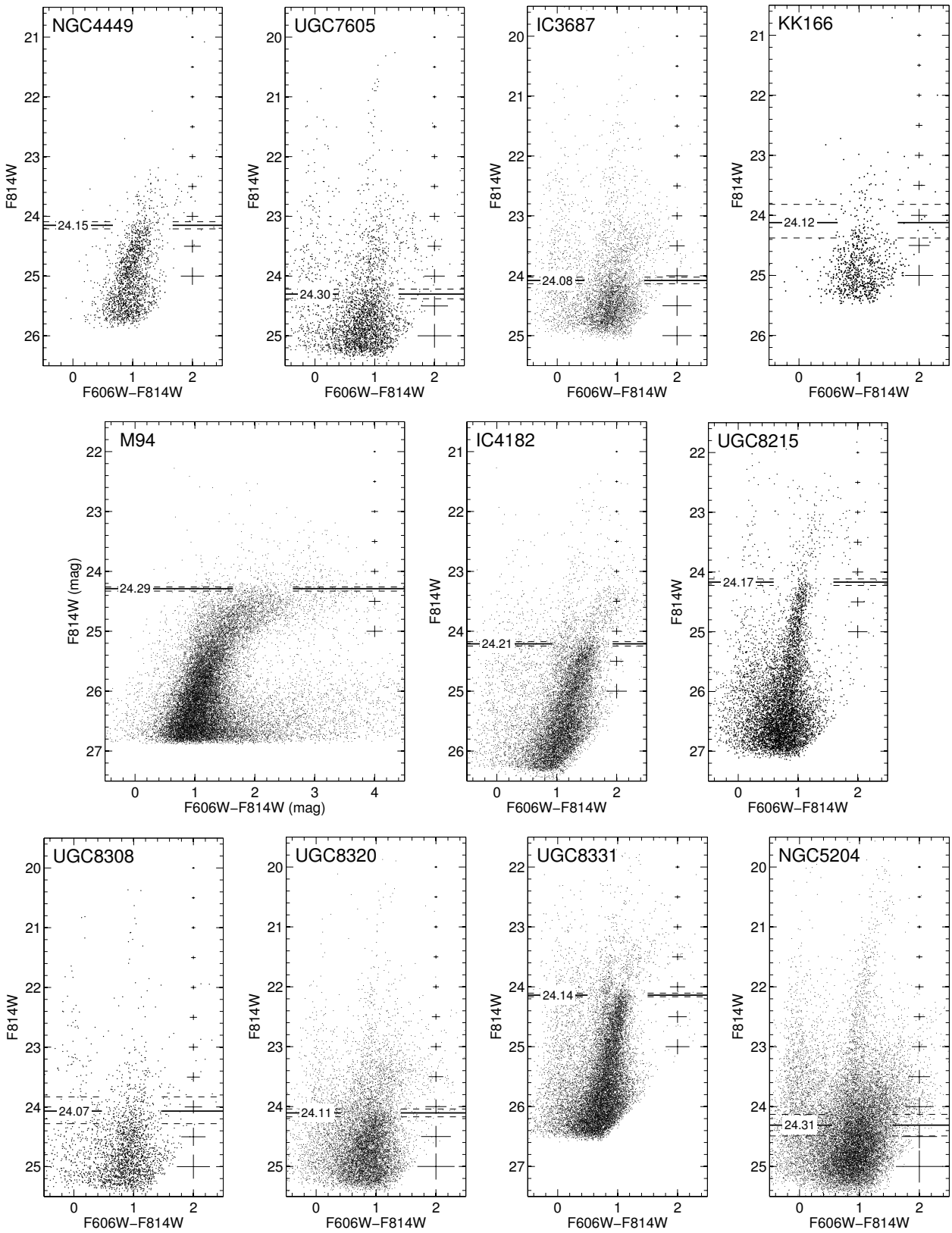

Рис. 4. Продолжение.

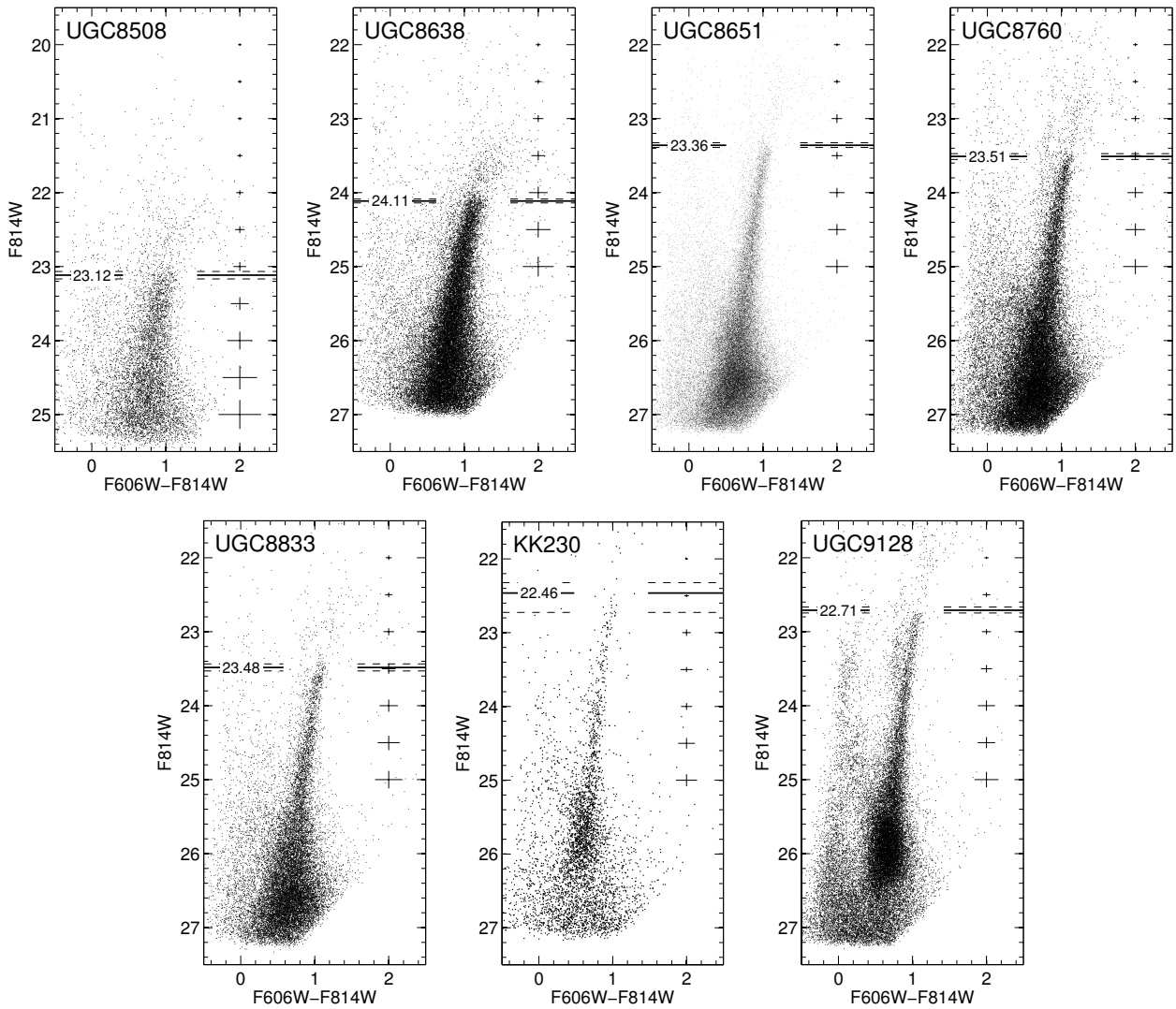

Рис. 4. Продолжение.

по результатам фотометрии этих изображений, равен $28\overset{m}{.}34 \pm 0\overset{m}{.}29$ [7]. Однако, экспозиции с WFPC2 (600 с в фильтре F606W и 600 с в фильтре F814W) дают достаточно густое звездное поле, причем вершина ветви красных гигантов расположена всего на 1^m выше фотометрического предела. Оценка фотометрического расстояния в гигантских галактиках встречает ряд технических сложностей ввиду наличия внутреннего поглощения и высокой поверхностной яркости. Мы уточнили расстояние до M 94, используя более глубокие экспозиции, полученные с HST/ACS (Prop. 10523). В рамках этого проекта были выполнены наблюдения трех полей M 94, расположенных далеко от центра галактики, так что влияние упомянутых выше сложностей сводится к минимуму.

Функция светимости RGB-звезд в галактике M 94 оказывается существенно более сложной, чем в обычных карликовых галактиках. Вблизи обрыва она выходит на протяженное “плато.” Вероятно, это связано со сложной историей звездообразования и обогащения металлами в этой галактике. Такое поведение функции светимости отличается от простого степенного закона, которым обычно описывается ветвь красных гигантов, что делает невозможным использование техники максимального правдоподобия для определения TRGB в галактике M 94. Поэтому мы использовали классическую технику выделения границ, описанную в работе [33] и те же современные калибровки метода TRGB [11], что и для остальных галактик.

Наши измерения дают модуль расстояния $28\overset{m}{.}14 \pm 0\overset{m}{.}08$ и расстояние до гигантской спирали M 94 $D = 4.25 \pm 0.15$ Мрс. Это значение имеет лучшую точность и хорошо согласуется как с более ранней оценкой, так и с оценками, выполненными [34] по тем же изображениям. В последней

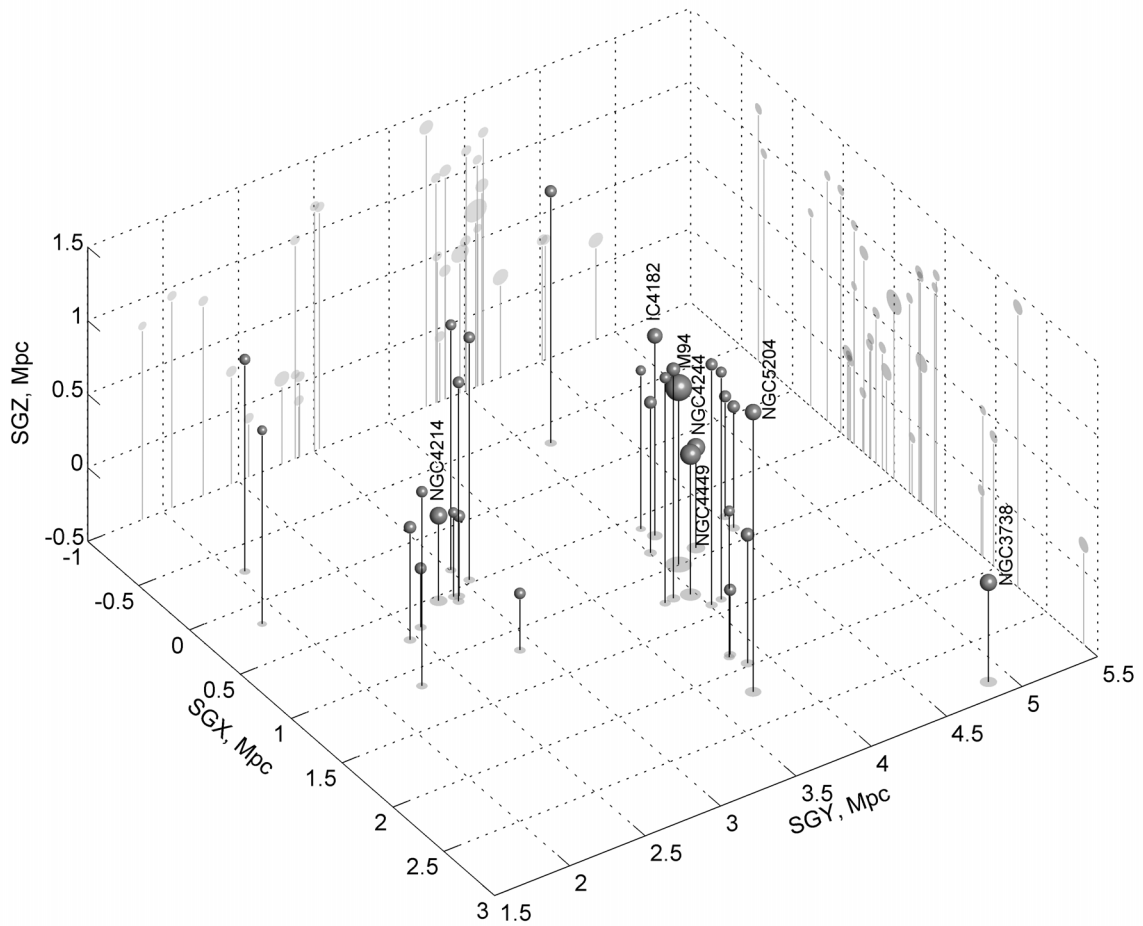

Рис. 5. Трехмерная структура облака Гончих Псов I. Размер шариков обратно пропорционален абсолютной звездной величине галактик. Для наиболее ярких галактик с $M_B < -16^{\rm m}$ указаны их названия.

работе приводится модуль расстояния, равный $28\overset{\rm m}{.}17 \pm 0\overset{\rm m}{.}13$.

4.2. Расстояние до NGC 5204

В центре галактики NGC 5204 идет активное звездообразование. Густое звездное поле, большое количество молодых звезд и близость TRGB к фотометрическому пределу (около $1^{\rm m}$) делают задачу определения расстояния до галактики чрезвычайно сложной. Чтобы избавиться от "засорения" диаграммы большим количеством молодых звезд, а также избежать излишнего влияния тесных звездных полей на результаты фотометрии, для анализа функции светимости RGB мы отбирали только звезды, находящиеся вдали от областей звездообразования. Данный подход позволил повысить контраст ветви красных гигантов и определить положение ее обрыва. Как и в случае M 94, мы использовали метод выделения границ. Модуль расстояния до галактики NGC 5204 получился равным $(m-M)_0 = 28\overset{\rm m}{.}30 \pm 0\overset{\rm m}{.}19$, что находится в отличном согласии с оценкой $(m-M)_0 = 28\overset{\rm m}{.}34 \pm 0\overset{\rm m}{.}27$, полученной в работе [7] по тем же данным.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

На Рис. 5 в сверхгалактических координатах показано пространственное распределение галактик, полученное по нашим измерениям расстояний. Размер шариков пропорционален логарифму светимости галактик. Выделяется концентрация галактик вокруг M 94 — ярчайшего члена CVn I.

Сравнение наших оценок расстояний с измерениями других авторов [7, 35–38], показывает очень хорошее согласие при, как правило, лучшей точности (Рис. 6). Повышение точности измерений связано как с более глубокими наблюдениями тех же самых галактик, проведенными в более позднее

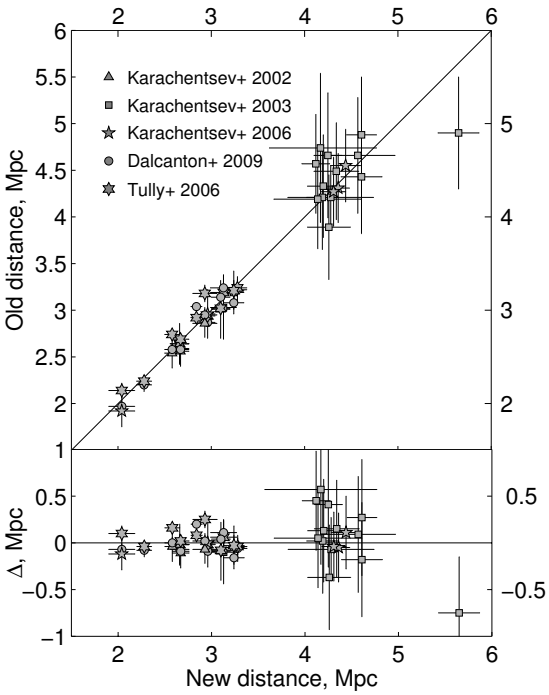

Рис. 6. Сравнение расстояний, полученных в данной работе, с более ранними измерениями. Использованы данные из работ [7, 35–38].

время, так и с применением более совершенной методики оценки расстояний.

Хаббловская диаграмма разбегания галактик в направлении Гончих Псов показана на Рис. 7. Отметим, что в предыдущем исследовании структуры этого облака галактик данная область выглядит существенно более "размытой" (Рис. 6 из работы [7]), что не позволяло сделать вывод о вириализованном состоянии этой группы галактик. Более высокая точность наблюдений позволяет нам выделить зону хаотических движений вокруг центра системы. Группа галактик вокруг M 94 характеризуется медианной скоростью $V_{\rm LG} = 287$ км/с, медианным расстоянием $D = 4.28$ Мпк, дисперсией лучевых скоростей $\sigma = 51$ км/с, скорректированной за ошибки измерений, средним проекционным расстоянием галактик от центра системы $\langle R \rangle = 455$ кпк и полной светимостью $L_B = 1.61 \times 10^{10}\ L_\odot$. Масса системы, оцененная по теореме вириала, равна $M_{\rm vir} = 1.93 \times 10^{12}\ M_\odot$, что соответствует отношению масса–светимость $(M/L)_{\rm vir} = 120\ (M/L)_\odot$. Проекционная [39] оценка массы данной системы равна $M_p = 2.56 \times 10^{12}\ M_\odot$ и, соответствующее отношение масса–светимость $(M/L)_p = 159\ (M/L)_\odot$. Отметим, однако, что время пересечения облака галактик CVn I $T_{\rm cr} = R_h/\sigma = 6.5$ Gyr составляет примерно половину возраста Вселенной $T = 13.7$ Gyr. Поэтому вопрос о близости системы к стационарному состоянию требует дополнительного рассмотрения, а использовать теорему вириала для оценки массы системы стоит с определенной осторожностью.

Как было отмечено в работе [7], практически все галактики, расположенные ближе центральной концентрации CVn I, имеют положительные пекулярные скорости и формируют характерную "волну", вызванную натеканием вещества на массивные группы галактик (см., к примеру, [40]). К сожалению, современные данные о расстояниях галактик, расположенных за исследуемым облаком CVn I, не позволяют однозначно утверждать о существовании аналогичного натекания с противоположной стороны группы, хотя определенные намеки на это и заметны. Среди наших данных только галактика NGC 3738 имеет достаточно глубокую CMD, чтобы измерить расстояние в 5.65 Мпк. По всей видимости, эта галактика "падает" на облако Гончих Псов I с противоположной стороны и обладает большой отрицательной пекулярной скоростью $V_{\rm pec} = -95$ км/с. Если предположить, что наблюдаемое распределение галактик на хаббловской диаграмме на расстоянии менее 3.5 Мпк вызвано гравитационным влиянием группы галактик вокруг M 94, мы можем оценить радиус сферы нулевой скорости $R_0 = 1.04 \pm 0.15$ Мпк как среднее между прямой и обратной регрессиями скорости и расстояния галактик. Это соответствует массе $M_{R_0} = 2.38 \times 10^{12}\ M_\odot$ (формула 6 из работы [40]). Данная величина находится в хорошем согласии с проекционной оценкой массы. Анализ пекулярных скоростей галактик поля является независимым от теоремы вириала методом измерения массы систем. Более точная оценка массы облака CVn I должна включать моделирование распределения галактик по пекулярным скоростям и распределению в пространстве.

Полученная нами оценка отношения масса–светимость, $(M/L)_p = 159\ (M/L)_\odot$, для облака галактик CVn I существенно превышает типичное отношение $M/L_B \sim 30$ для близких групп галактик, таких как Местная Группа ($M/L_B = 15$–20) и группа M 81 ($M/L_B = 19$–32) [41]. Отметим, что по сравнению с хорошо известными близкими группами, такими как Местная Группа ($L_B = 10.1 \times 10^{10} L_\odot$), M 81 ($L_B = 6.1 \times 10^{10}\ L_\odot$) и Центавр A ($L_B = 5.5 \times 10^{10}\ L_\odot$), облако галактик CVn I ($L_B = 1.61 \times 10^{10}\ L_\odot$) содержит в 4–5 раз меньше светящегося вещества, а M 94 как минимум на $1^{\rm m}$ слабее любой другой центральной галактики этих групп [41]. Тем не менее, концентрация галактик в Гончих Псах может иметь сопоставимую полную массу.

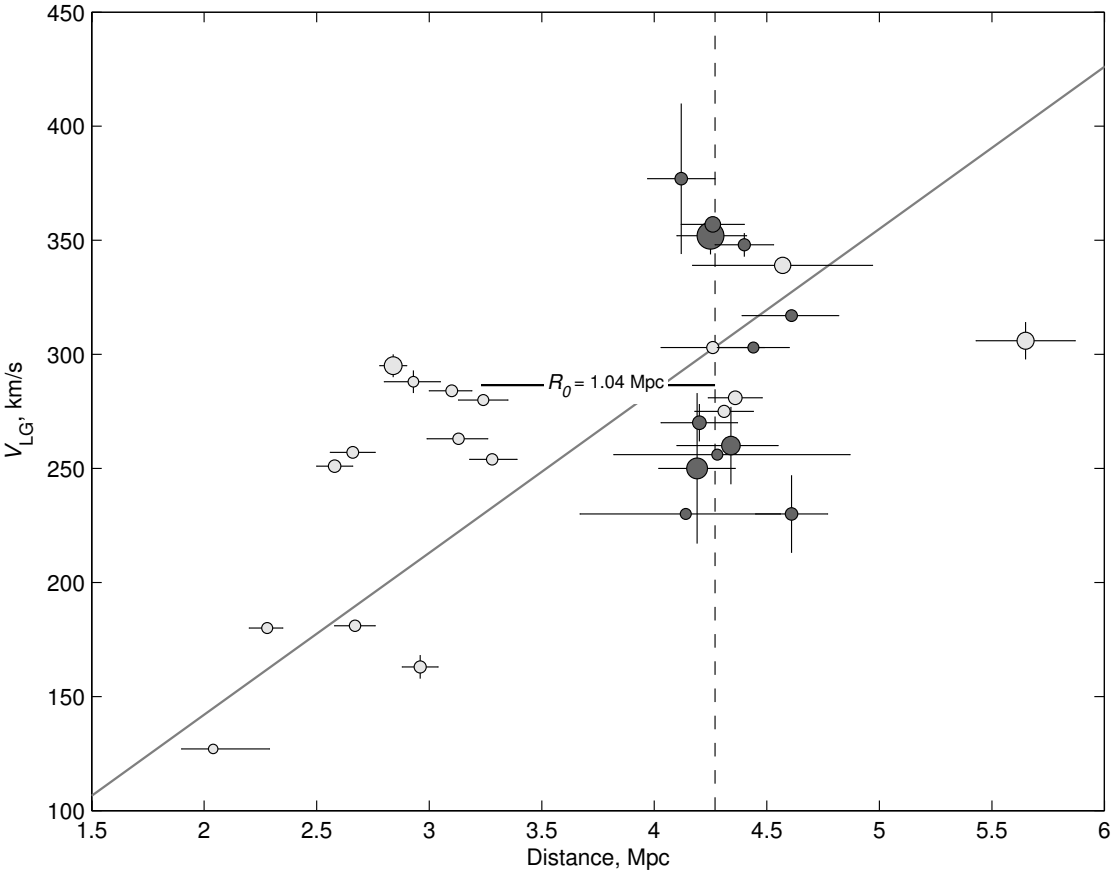

Рис. 7. Диаграмма скорость—расстояние для галактик в области Гончих Псов I. Линейный закон Хаббла с $H_0 = 71$ км/(с×Мпк) обозначен сплошной линией. Галактики внутри 1 Мпк от центра системы выделены темно-серым цветом. Медианное среднее расстояний центральной концентрации показано штриховой линией.

В каталоге групп галактик в Местном Сверхскоплении [42] было показано, что средняя плотность гравитирующей материи на шкале 80 Мпк примерно в 2.5 раза меньше стандартного космологического значения $\Omega_m = 0.27$. Одним из вероятных объяснений этой поразительной разницы между глобальной и локальной оценкой плотности Вселенной может быть наличие значительной части темной материи вне вириализованных областей, связанных со светящейся материей. Такие "темные агрегаты" могут быть довольно многочисленны. К примеру, в работе [37] были выделены ассоциации близких карликовых галактик по высокоточным фотометрическим расстояниям, полученным на космическом телескопе Хаббла. Более того, в этой работе было отмечено, что на шкале до 3 Мпк, за исключением галактики KKR 25, все известные галактики объединены либо в группы, либо в ассоциации. Подобные разреженные структуры могут иметь отношение масса—светимость в диапазоне от 100 до 1000 $(M/L)_\odot$. В работе [43] было показано, что группы, состоящие исключительно из карликовых галактик, могут быть многочисленны, и они имеют более высокое отношение масса—светимость, чем типичные группы галактик в Местном Сверхскоплении. Возможно, что облако галактик в Гончих Псах представляет собой одну из подобных концентраций темного вещества, в котором отношение темной материи к светящейся существенно превышает аналогичную пропорцию в типичных группах галактик.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят проф. И. Д. Караченцева за конструктивную дискуссию. Работа была поддержана грантами РФФИ 11-02-00639, и грантом Министерства образования и науки Российской Федерации 8523. Данное исследование также поддерживалось программой Отделения физических наук РАН ОФН-17 "Активные процессы в галактических и внегалактических объектах." В работе использовалась база данных HyperLEDA (`http://leda.univ-lyon1.fr`).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. D. Karachentsev, Astrophysics **2**, 39 (1966).
2. G. de Vaucouleurs, *Nearby Groups of Galaxies* (the University of Chicago Press, 1975), p. 557.
3. L. N. Makarova, I. D. Karachentsev, and T. B. Georgiev, Astron. Lett. **23**, 378 (1997).
4. N. A. Tikhonov and I. D. Karachentsev, Astronom. and Astrophys. Suppl. **128**, 325 (1998).
5. L. Makarova, I. Karachentsev, L. O. Takalo, et al., Astronom. and Astrophys. Suppl. **128**, 459 (1998).
6. I. D. Karachentsev and I. O. Drozdovsky, Astronom. and Astrophys. Suppl. **131**, 1 (1998).
7. I. D. Karachentsev, M. E. Sharina, A. E. Dolphin, et al., Astronom. and Astrophys. **398**, 467 (2003).
8. K. Kovač, T. A. Oosterloo, and J. M. van der Hulst, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **400**, 743 (2009).
9. S. S. Kaisin and I. D. Karachentsev, Astronom. and Astrophys. **479**, 603 (2008).
10. D. Makarov, L. Makarova, L. Rizzi, et al., Astronom. J. **132**, 2729 (2006).
11. L. Rizzi, R. B. Tully, D. Makarov, et al., Astrophys. J. **661**, 815 (2007).
12. L. Makarova, Astronom. and Astrophys. Suppl. **139**, 491 (1999).
13. V. A. Taylor, R. A. Jansen, R. A. Windhorst, et al., Astrophys. J. **630**, 784 (2005).
14. G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, H. G. Corwin, et al., VizieR Online Data Catalog **7155**, 0 (1995).
15. L. Makarova, I. Karachentsev, L. Rizzi, et al., Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **397**, 1672 (2009).
16. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, W. K. Huchtmeier, and D. I. Makarov, Astronom. J. **127**, 2031 (2004).
17. H. Jerjen, R. Rekola, L. Takalo, et al., Astronom. and Astrophys. **380**, 90 (2001).
18. T. Bremnes, B. Binggeli, and P. Prugniel, Astronom. and Astrophys. Suppl. **137**, 337 (1999).
19. A. Begum, J. N. Chengalur, I. D. Karachentsev, et al., Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **386**, 1667 (2008).
20. K. Kovač, T. A. Oosterloo, and J. M. van der Hulst, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **400**, 743 (2009).
21. C. M. Springob, M. P. Haynes, R. Giovanelli, and B. R. Kent, Astrophys. J. Suppl. **160**, 149 (2005).
22. J. M. Stil and F. P. Israel, Astronom. and Astrophys. **389**, 29 (2002).
23. W. K. Huchtmeier and O. G. Richter, Astronom. and Astrophys. Suppl. **63**, 323 (1986).
24. W. K. Huchtmeier and J. H. Seiradakis, Astronom. and Astrophys. **143**, 216 (1985).
25. W. G. Tifft and W. J. Cocke, Astrophys. J. Suppl. **67**, 1 (1988).
26. C. E. Simpson and S. T. Gottesman, Astronom. J. **120**, 2975 (2000).
27. A. E. Dolphin, Publ. Astronom. Soc. Pacific **112**, 1383 (2000).
28. A. E. Dolphin, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **332**, 91 (2002).
29. D. J. Schlegel, D. P. Finkbeiner, and M. Davis, Astrophys. J. **500**, 525 (1998).
30. I. D. Karachentsev and D. A. Makarov, Astronom. J. **111**, 794 (1996).
31. I. D. Karachentsev, D. I. Makarov, and E. I. Kaisina, Astronom. J. **145**, article id. 101 (2013).
32. B. A. Jacobs, L. Rizzi, R. B. Tully, et al., Astronom. J. **138**, 332 (2009).
33. S. Sakai, B. F. Madore, and W. L. Freedman, Astrophys. J. **461**, 713 (1996).
34. D. J. Radburn-Smith, R. S. de Jong, A. C. Seth, et al., Astrophys. J. Suppl. **195**, 18 (2011).
35. I. D. Karachentsev, M. E. Sharina, D. I. Makarov, et al., Astronom. and Astrophys. **389**, 812 (2002).
36. I. D. Karachentsev, A. Dolphin, R. B. Tully, et al., Astronom. J. **131**, 1361 (2006).
37. R. B. Tully, L. Rizzi, A. E. Dolphin, et al., Astronom. J. **132**, 729 (2006).
38. J. J. Dalcanton, B. F. Williams, A. C. Seth, et al., Astrophys. J. Suppl. **183**, 67 (2009).
39. J. Heisler, S. Tremaine, and J. N. Bahcall, Astrophys. J. **298**, 8 (1985).
40. I. D. Karachentsev, O. G. Kashibadze, D. I. Makarov, and R. B. Tully, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **393**, 1265 (2009).
41. I. D. Karachentsev, Astronom. J. **129**, 178 (2005).
42. D. Makarov and I. Karachentsev, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **412**, 2498 (2011).
43. D. I. Makarov and R. I. Uklein, Astrophysical Bulletin **67**, 135 (2012).

Distances to Dwarf Galaxies of the Canes Venatici I Cloud

D. I. Makarov, L. N. Makarova, R. I. Uklein

We determined the spatial structure of the scattered concentration of galaxies in the Canes Venatici constellation. We redefined the distances for 30 galaxies of this region using the deep images from the Hubble Space Telescope archive with the WFPC2 and ACS cameras. We carried out a high-precision stellar photometry of the resolved stars in these galaxies, and determined the photometric distances by the tip of the red giant branch (TRGB) using an advanced technique and modern calibrations. High accuracy of the results allows us to distinguish the zone of chaotic motions around the center of the system. A group of galaxies around M 94 is characterized by the median velocity $V_{\rm LG} = 287$ km/s, distance $D = 4.28$ Mpc, internal velocity dispersion $\sigma = 51$ km/s and total luminosity $L_B = 1.61 \times 10^{10}\ L_\odot$. The projection mass of the system amounts to $M_p = 2.56 \times 10^{12}\ M_\odot$, which corresponds to the mass–luminosity ratio of $(M/L)_p = 159\ (M/L)_\odot$. The estimate of the mass–luminosity ratio is significantly higher than the typical ratio $M/L_B \sim 30$ for the nearby groups of galaxies. The CVn I cloud of galaxies contains 4–5 times less luminous matter compared with the well-known nearby groups, like the Local Group, M 81 and Centaurus A. The central galaxy M 94 is at least $1^{\rm m}$ fainter than any other central galaxy of these groups. However, the concentration of galaxies in the Canes Venatici may have a comparable total mass.

Keywords: *galaxies: distances and redshifts—galaxies: dwarf—cosmology: dark matter*