

УДК 524.74-32

## БЛИЗКИЕ ГРУППЫ ГАЛАКТИК В СОЗВЕЗДИЯХ HERCULES–BOOTES

© 2017 И. Д. Караченцев<sup>1\*</sup>, О. Г. Кашибадзе<sup>1</sup>, В. Е. Караченцева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 03143 Украина

Поступила в редакцию 2 марта 2017 года; принята в печать 17 марта 2017 года

Мы рассматриваем выборку 412 галактик с лучевыми скоростями  $V_{LG} < 2500 \text{ км с}^{-1}$ , расположенных в области неба  $RA = 13^{\text{h}}00\text{m}–19^{\text{h}}00\text{m}$ ,  $Dec = +10^{\circ} \dots +40^{\circ}$  между Местным войдом и сверхгалактической плоскостью. Индивидуальные оценки расстояний получены для 181 галактики из 412. Пекулярные скорости галактик как функция сверхгалактической широты SGB показывают признаки падения на центр скопления Virgo при  $SGB < 10^{\circ}$  и движение от Местного войда при  $SGB > 60^{\circ}$ . Половина галактик Hercules–Bootes входит в 17 групп (из которых наиболее населенная — это группа вокруг NGC 5353) и 29 пар. Типичная группа характеризуется дисперсией скоростей  $67 \text{ км с}^{-1}$ , гармоническим радиусом 182 кпк, звездной массой  $4.3 \times 10^{10} M_{\odot}$  и отношением вириальной массы к звездной, равным 32. Двойные галактики имеют разность лучевых скоростей  $37 \text{ км с}^{-1}$ , проекционное расстояние 96 кпк, среднюю интегральную звездную массу  $2.6 \times 10^9 M_{\odot}$  и среднее отношение вириальной массы к звездной около 8. Отношение темной материи к звездной массе в рассмотренной области неба достигает 37, т.е. почти такого же значения, что и в Местном объеме.

Ключевые слова: галактики: кинематика и динамика — галактики: расстояния и красные смещения — галактики: группы

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Массовые измерения лучевых скоростей галактик в недавних оптических и радиообзорах неба SDSS [1], HIPASS [2–4], ALFALFA [5, 6] привели к значительному обогащению наших представлений о крупномасштабной структуре и движениях галактик в близкой вселенной. Основываясь на данных о примерно  $10^4$  галактик с лучевыми скоростями относительно центроида Местной группы  $V_{LG} < 3500 \text{ км с}^{-1}$ , Караченцев и Макаров [7–9] составили каталоги систем галактик разной кратности по всему небу общим числом около тысячи объектов. Для кластеризации галактик был применен новый алгоритм, который учитывал индивидуальные массы (светимости) галактик. С использованием взаимных расстояний, лучевых скоростей и светимостей галактик в  $K$ -полосе были определены вириальные и звездные массы систем галактик в объеме радиусом 48 Мпк, который охватывает все Местное сверхскопление и его ближайшие окрестности.

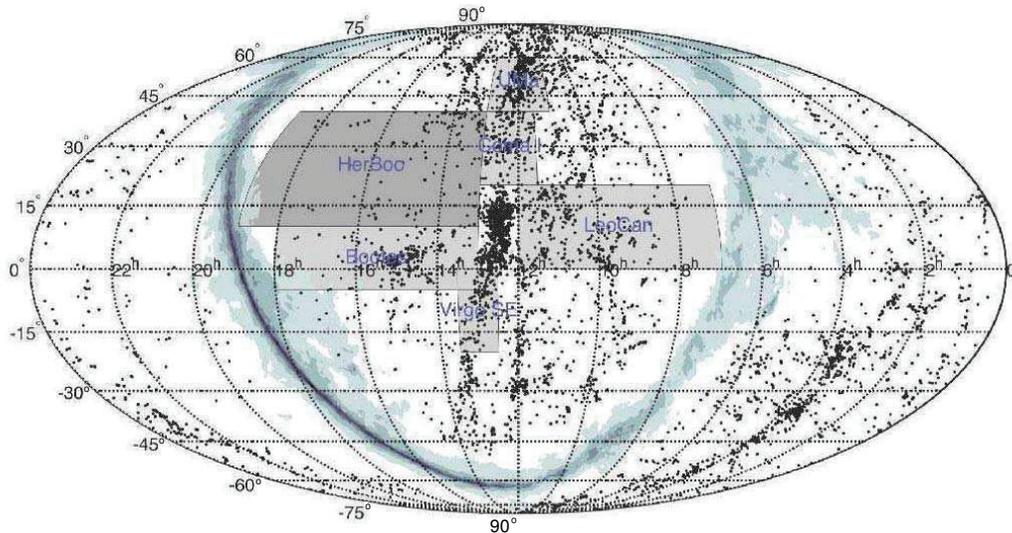
Одним из важных результатов этих исследований стала оценка средней плотности материи, заключенной в системах галактик  $\Omega_m^{\text{vir}} = 0.08 \pm 0.02$ ,

которая оказалась в 3–4 раза меньше средней глобальной плотности материи  $\Omega_m = 0.26 \pm 0.02$  [10]. Для объяснения этого несоответствия выдвигались различные предположения, перечисленные в [11]:

- группы и скопления окружены протяженными темными гало, и основная их темная масса локализована за пределами вириального радиуса системы;
- рассматриваемый объем Местной вселенной не является репрезентативным, будучи расположенным в гигантском космическом войде;
- большая часть темной материи во Вселенной заключена не в группах и скоплениях, а распределена между ними в диффузных крупномасштабных структурах (волоках, сгустках).

Однако ни одно из этих предположений не получило пока убедительных наблюдательных подтверждений. Очевидно, что необходимо дальнейшее накопление данных о лучевых скоростях и расстояниях галактик, а также проверка того, насколько эффективно работал критерий объединения галактик в группы. Следуя этой идее, мы провели анализ наблюдательных данных о галактиках в пяти площадках с достаточно представительным числом объектов. Три из них расположены вдоль плоскости Местного сверхскопления к северу [12, 13] и

\*E-mail: [ikar@sao.ru](mailto:ikar@sao.ru)



**Рис. 1.** Распределение на небе галактик Местного сверхскопления в экваториальных координатах. Область Hercules–Bootes и пять других ранее изученных нами областей выделены темным цветом. Кольцеобразная клочковатая полоса обозначает зону сильного поглощения.

югу [14] от скопления Virgo. Две другие — область Bootes [15] и область Leo–Cancer [16] — охватывают зоны на высоких сверхгалактических широтах. Расположение исследованных площадок неба показано на карте рис. 1 в экваториальных координатах. Точками отмечены положения 5725 галактик с лучевыми скоростями  $V_{LG} < 3000 \text{ км с}^{-1}$ , клочковатая кольцеобразная полоса обозначает зону сильного поглощения в Млечном Пути. В дополнение к пяти прежним зонам (отмечены светло-серым тоном) мы рассматриваем здесь новую область, ограниченную координатами по RA от  $13^{\text{h}}0$  до  $19^{\text{h}}0$  и по Dec от  $+10^\circ$  до  $+40^\circ$ . Поскольку относительное число галактик с оценками расстояния круто падает с ростом лучевой скорости галактик, мы ограничились рассмотрением только объектов со скоростями  $V_{LG} < 2500 \text{ км с}^{-1}$ , что соответствует несколько большему объему, чем для зон, исследованных ранее.

## 2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Рассматриваемая область частично перекрывается с зонами обзоров неба SDSS, HIPASS и ALFALFA. В качестве основного источника данных о галактиках мы использовали NASA Extragalactic Database (NED)<sup>1</sup> с дополнениями из HyperLEDA [17]. Каждый объект с оценкой лучевой скорости  $V_b$  осматривался визуально, при этом было отбраковано большое количество ложных «галактик» с лучевыми скоростями в окрестности нуля. Для многих галактик нами были

уточнены морфологические типы и интегральные  $B$ -величины. При отсутствии фотометрических данных видимые величины ряда галактик, как правило, карликовых, были оценены при сравнении их с изображениями других объектов, имеющих сходную структуру и надежную фотометрию.

Всего в данной области неба находится 412 галактик с лучевыми скоростями  $V_{LG} \leq 2500 \text{ км с}^{-1}$ . Список их представлен в таблице 1, полная версия которой доступна в электронном виде в базе данных Vizier<sup>2</sup>. В столбцах таблицы содержатся: (1) имя галактики или ее номер в известных каталогах; (2) экваториальные координаты на эпоху (2000.0); (3) лучевая скорость (в  $\text{км с}^{-1}$ ) относительно центра Местной группы с параметрами апекса, принятыми в NED; (4) морфологический тип галактики по классификации de Vaucouleurs; (5) интегральная видимая величина галактики в  $B$ -полосе; (6) ширина радиолинии 21 см (в  $\text{км с}^{-1}$ ), измеренная на уровне 50% от максимальной интенсивности; (7) модуль расстояния с учетом поправки за поглощение в Галактике [18] и внутреннее поглощение [19]; (8) метод, которым определен модуль расстояния; (9) имя ярчайшей галактики в группе/паре, к которой принадлежит данная галактика согласно [8, 9] или [7].

Рассматриваемая область неба содержит всего одну галактику с высокоточным измерением расстояния по цефеидам («сер»). Для четырех галактик ранних типов расстояния определены по

<sup>1</sup><http://ned.ipac.caltech.edu>

<sup>2</sup><http://cdsarc.u-strasbg.fr//viz-bin/qcat?J/other/>

Таблица 1. Галактики в области Hercules–Bootes

Name	RA (2000.0) Dec	$V_{LG}$	$T$	$B_T$	$W_{50}$	$(m - M)$	Method	Group
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
UGC 8085	125817.3+143325	1971	Scd	14.5	204	32.37	tf	N 4866
NGC 4866	125927.1+141016	1911	Sb	12.14	514	32.21	tf	N 4866
NGC 4880	130010.6+122900	1293	S0a	13.12				
AGC 233925	130015.7+292859	2482	dIr	18.08	90			
AGC 239030	130018.9+293305	970	dIr	18.7	40	31.57	bTF	
AGC 233574	130022.1+125525	1838	dIr	17.6	70	32.74	TF	N 4866
UGC 08114	130025.0+134013	1909	Sm	15.85	130	32.91	TF	N 4866
PGC 1876816	130242.8+294458	2520	dIm	18.30				
AGC 732482	130336.8+243132	816	Sm	16.2	97	32.15	TF	
AGC 233930 *	130402.7+281833	674	dIm	17.17	98			
KK 181	130433.8+264627	1916	dIr	16.88	86	32.74	TF	
KUG 1302+329	130439.4+324054	2372	BCD	16.6				
SDSS J130440	130440.0+184439	766	BCD	17.73				
IC 4171	130518.8+360610	1026	Sdm	15.9	89	31.73	TF	
UGC 08181	130524.6+325400	900	Sdm	15.59	84	31.30	TF	
IC 4178	130541.5+360103	1215	dIm	16.53	64	31.48	TF	
N 4961	130547.6+274400	2525	Scd	13.7	216	33.00	tf	N 4961
IC 4182	130549.6+373618	357	Sm	12.00	35	28.36	cep	N 4736
BTS 165	130549.8+274240	2516	dIr	17.0				N4961
AGC 230077	130623.3+102600	841	dIm	15.66	46	30.79	TF	
KK 183	130642.5+180008	1496	dIr	17.90	75	31.98	bTF	
AGC 230084	130656.0+144826	915	dIm	16.39	49	30.40	TF	
PGC 2134801	130717.2+384321	2423	dIm	17.1				
AGC 239031	130812.3+290517	822	dIr	18.3	23	29.96	TF	
AGC 742775 *	130828.4+200202	1430	dIr	18.2	146			
PGC 1958740	130936.9+314034	1449	BCD	17.8				
AGC 742788 *	131000.8+185530	2365	BCD	18.1	157			
UGC 08246	131004.9+341051	825	SBC	14.82	116	30.90	tf	U 8246
2MFGC 10495	131024.2+213434	2547	Sc	16.28				
[MU 2012] J13	131029.2+341413	873	dIm	17.4				U 8246
NGC 5002	131038.2+363804	1125	Sm	14.69	90	30.42	tf	N 5005
PGC 2089756	131051.1+365623	1061	dIr	17.8				
NGC 5005	131056.3+370333	983	Sb	10.54	490	31.54	tf	N 5005
UGC 08261	131101.0+353008	881	Sm	16.36	94	31.70	bTF	N 5005
SDSS J131115	131115.8+365912	992	dIr	18.43				
PGC 2097739	131126.8+371843	998	dIm	17.48				

флуктуациям поверхностной яркости («*sbf*» [20]), и для девяти очень близких галактик расстояния измерены по светимости вершины ветви красных гигантов («*rgb*»). У остальных галактик нашей вы-

борки модули расстояния определены по соотношению Талли–Фишера [21] с калибровкой по [22]:

$$M_B = -7.27(\lg W_{50}^c - 2.5) - 19.99,$$

где  $M_B$  — абсолютная величина в  $B$ -полосе, а ширина HI-линии (в  $\text{км с}^{-1}$ ) исправлена за наклон галактики. Эти оценки обозначены в таблице 1 как «TF». Для галактик поздних типов (dIrr, dIm, Sm), у которых HI-величина  $m_{21} = -2.5 \lg F(\text{HI}) + 17.4$  ярче видимой величины,  $m_{21} < B$ , мы вводили «барионную поправку», заменяя в модуле расстояния  $B$ -величину на  $m_{21}$ . Эти случаи обозначены нами как «bTF». Галактики со средним значением модуля расстояния из NED отмечены в колонке (8) прописными буквами «tf». Всего в рассматриваемой области имеется 167 галактик с оценками расстояния по Талли–Фишеру, среди них наши новые оценки составляют около 70%.

Из HI-обзора ALFALFA [5, 6] у некоторых галактик ширина радиолинии  $W_{50}$  не соответствует структурному типу галактики  $T$  и ее видимой величине  $B_T$ . Причиной этого несоответствия может быть путаница при оптическом отождествлении радиоисточника или же низкое отношение сигнал/шум в линии HI. Такие галактики отмечены в таблице 1 звездочкой.

Распределение 412 галактик по лучевым скоростям и 181 галактики по расстояниям представлено на рис. 2а и 2б соответственно. Несколько галактик со скоростями более  $2500 \text{ км с}^{-1}$  относятся к членам групп NGC 5353 и NGC 6181, средняя скорость которых лежит на рубеже выбранного диапазона  $V_{LG}$ . На рис. 2а заметен локальный избыток галактик со скоростями около  $1000 \text{ км с}^{-1}$ , что, очевидно, вызвано наличием в рассматриваемой области галактик, ассоциирующихся с отрогами скопления Virgo. Часть этих галактик, по-видимому, обуславливает пик, который заметен на распределении  $N(D)$  при расстоянии  $D \simeq 18 \text{ Мпк}$  (рис. 2б).

Рисунок 2с воспроизводит распределение 181 галактики области Hercules–Bootes по величине пекулярной скорости  $V_{pec} = V_{LG} - H_0 \times D$  при значении параметра Хаббла  $H_0 = 73 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ . Гистограмма имеет вполне симметричный вид со средним значением  $V_{pec} = -179 \text{ км с}^{-1}$  и дисперсией  $425 \text{ км с}^{-1}$ . При среднем расстоянии галактик выборки около 26 Мпк и типичной ошибке определения расстояния примерно 20% ожидаемая погрешность пекулярной скорости составляет  $380 \text{ км с}^{-1}$ . Превышение наблюдаемой дисперсии скоростей над ожидаемой может указывать на существование крупномасштабных движений галактик в области Hercules–Bootes. Заметим, что в рассматриваемом нами объеме количество галактик с оценками пекулярных скоростей примерно в два раза выше, чем содержится в сводках «Cosmicflows-2» и «Cosmicflows-3» [23, 24].

Общее распределение 412 галактик Hercules–Bootes в экваториальных координатах представлено на рис. 3. Галактики с оценками расстояния и без них отмечены соответственно темными и светлыми кружками. Наиболее населенные группы обозначены именами их ярчайших членов. Эта диаграмма демонстрирует скучивание галактик в системы различной кратности, а также глобальное увеличение плотности числа галактик от левого края к правому с приближением к экватору Местного сверхскопления.

### 3. ГРУППЫ И ПАРЫ ГАЛАКТИК

При объединении галактик в системы разной кратности мы руководствовались критерием, предложенным в работе [9]. Согласно ему каждая виртуальная пара  $ij$  должна удовлетворять условию отрицательной полной энергии

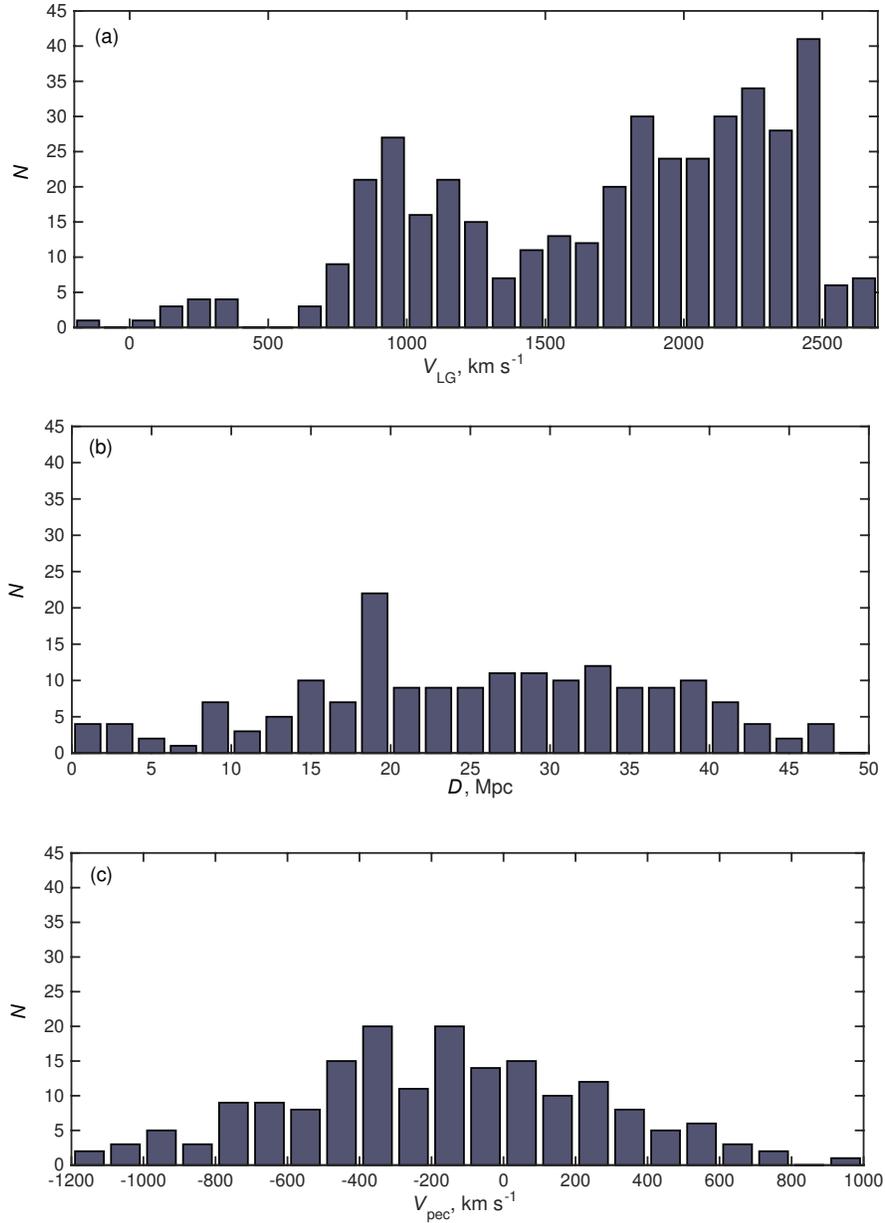
$$V_{ij}^2 R_{ij} / (2GM_{ij}) < 1,$$

где  $G$  — постоянная тяготения, и условию нахождения ее компонентов внутри «сферы нулевой скорости», которая обособляет эту пару относительно глобального Хаббловского расширения

$$\pi H_0^2 R_{ij}^3 / (8GM_{ij}) < 1,$$

где  $H_0$  — параметр Хаббла. Здесь  $V_{ij}$  и  $R_{ij}$  означают разности лучевых скоростей и проекции взаимных расстояний компонентов виртуальной пары,  $M_{ij}$  — их суммарную массу, выражаемую через  $K$ -светимость:  $M/L_K = \kappa M_\odot / L_\odot$ . Для оценки полной массы галактики принималось значение безразмерного параметра  $\kappa = 6$ , при котором наилучшим образом воспроизводятся структура и виртуальная масса хорошо изученных близких групп. Алгоритм кластеризации подразумевает последовательный пересмотр всех галактик исходной выборки и последующее объединение в группу всех пар, имеющих общие члены.

Таким образом, в рассматриваемой области неба были выделены 17 групп галактик с населением из трех и более членов. Основные данные о них представлены в столбцах таблицы 2: (1) — имя ярчайшего члена группы; (2) — экваториальные координаты центра группы; (3) — число членов с измеренными лучевыми скоростями; (4) — средняя лучевая скорость группы ( $\text{км с}^{-1}$ ); (5) — среднеквадратичная скорость галактик относительно средней ( $\text{км с}^{-1}$ ); (6) — средний гармонический радиус группы (кпк); (7) — логарифм суммарной звездной массы группы (в единицах  $M_\odot$ ), определенной по светимости ее членов в  $K$ -полосе при



**Рис. 2.** Распределение числа галактик в области Hercules–Bootes (а) по лучевым скоростям относительно центра Местной группы, (б) по расстояниям и (с) по пекулярным скоростям.

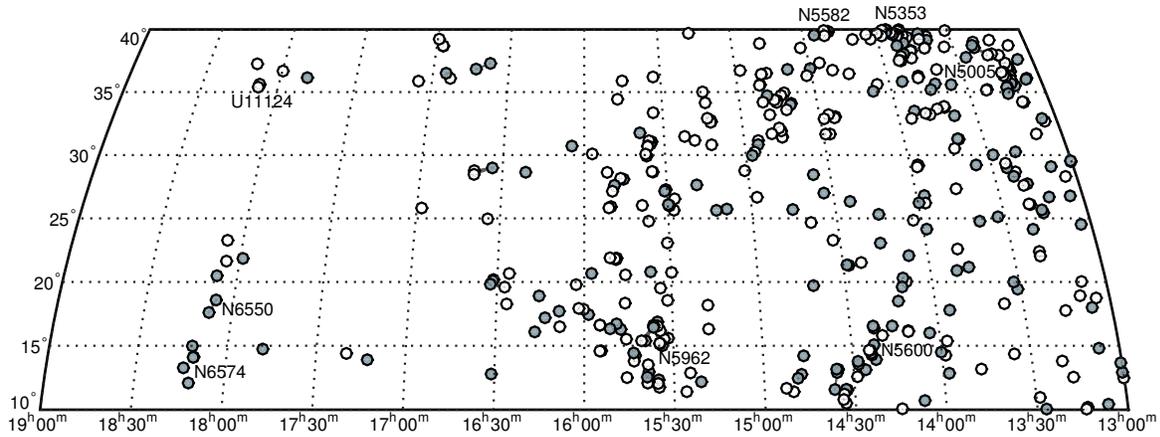
$M^*/L_K = M_\odot/L_\odot$ ; (8) — логарифм проекционной (вириальной) массы в единицах  $M_\odot$ :

$$M_p = (32/\pi G)(N - 3/2)^{-1} \sum_{i=1}^N \Delta V_i^2 R_i,$$

где  $\Delta V_i$  и  $R_i$  — радиальная скорость и проекционное расстояние  $i$ -й галактики относительно центра системы; (9) — число членов с измеренными расстояниями; (10) — средний модуль расстояния группы; (11) — дисперсия модулей членов группы; (12) — линейное расстояние в Мпк при

среднем модуле  $\langle m - M \rangle$ ; (13) — пекулярная скорость центра группы  $V_{\text{pec}} = \langle V_{\text{LG}} \rangle - 73(D)$ ,  $\text{km s}^{-1}$ . Последняя строка таблицы соответствует средним значениям параметров.

Как следует из этих данных, характерный радиус группы (182 кпк) и характерная дисперсия лучевых скоростей ( $67 \text{ km s}^{-1}$ ) оказываются типичными для Местной группы и других близких групп в Местном объеме [25]. Характерная звездная масса группы в таблице  $2 M^* \simeq 4 \times 10^{10} M_\odot$  и отношение вириальной массы к звездной массе  $M_p/M^* \simeq 32$



**Рис. 3.** Распределение галактик в области Hercules–Bootes в экваториальных координатах. Галактики с оценками расстояния изображены темными кружками, остальные галактики со скоростями  $V_{LG} < 2500 \text{ км с}^{-1}$  показаны светлыми кружками. Ярчайшие члены некоторых групп отмечены их именами.

**Таблица 2.** Свойства групп галактик в области Hercules–Bootes

Group	J2000.0	$N_V$	$\langle V_{LG} \rangle$	$\sigma_V$	$R_h$	$\lg M^*$	$\lg M_p$	$N_D$	$\langle m - M \rangle$	$\sigma(m - M)$	$D$	$V_{pec}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
NGC 4736	125053.1+410714	13	352	50	338	10.64	12.33	13	28.28	0.14	4.5	24
NGC 4866	125927.1+141016	5	1909	58	156	11.21	12.68	4	32.56	0.28	32.5	-464
NGC 5005	131056.2+370333	13	1010	114	224	11.48	12.97	9	31.24	0.41	17.7	-282
NGC 5117	132256.4+281859	4	2414	27	424	9.97	11.95	2	32.80	0.09	36.3	-236
NGC 5353	135539.9+402742	62	2593	195	455	12.07	13.69	16	32.73	0.39	35.2	16
NGC 5375	135656.0+290952	3	2311	47	66	10.62	11.68	1	32.94	—	38.7	-514
NGC 5582	142043.1+394137	6	1685	106	93	10.60	12.44	2	31.82	0.54	23.1	-1
NGC 5600	142349.5+143819	6	2295	81	275	10.69	12.38	3	32.05	0.91	25.7	419
UGC 9389	143533.2+125429	4	1822	45	204	9.68	12.08	4	32.54	0.19	32.2	-529
PGC 55227	152929.2+260024	3	2119	14	17	9.21	10.05	2	32.34	0.17	29.4	-27
NGC 5961	153516.2+305152	5	1891	63	86	10.14	12.20	1	32.51	—	31.8	-430
NGC 5962	153631.7+163628	8	1996	97	60	11.23	13.01	6	32.60	0.35	33.1	-420
NGC 5970	153830.0+121110	4	1949	92	141	10.81	12.54	3	32.45	0.28	30.9	-307
U 10043	154841.3+215210	5	2214	67	65	10.37	11.88	1	33.03	—	40.4	-735
NGC 6181	163221.0+194936	4	2568	53	196	11.06	12.14	3	32.65	0.19	33.9	93
U 10445	163347.4+285904	3	1118	23	230	9.92	11.60	1	31.57	—	20.6	-386
NGC 6574	181151.2+145854	3	2456	15	70	11.08	10.71	2	32.36	0.43	29.6	295
Average		9	1924	67	182	10.63	12.14	4	32.15	0.34	29.2	-205

также являются типичными для хорошо исследованных близких групп.

Если алгоритм кластеризации галактик выбран правильно, то дисперсия модулей расстояния членов групп должна определяться ошибками измерения расстояний. В нашем случае расстояния большинства галактик измерены методом Талли–

Фишера, погрешность которого составляет приблизительно 20%, или  $0^m4$ . Средняя дисперсия модулей для членов 17 групп составляет  $0^m34$ , т.е. находится в согласии с ожидаемой величиной.

Среди 17 групп, перечисленных в таблице 2, группа галактик вокруг NGC 5353 выделяется высокими значениями звездной массы и вириальной

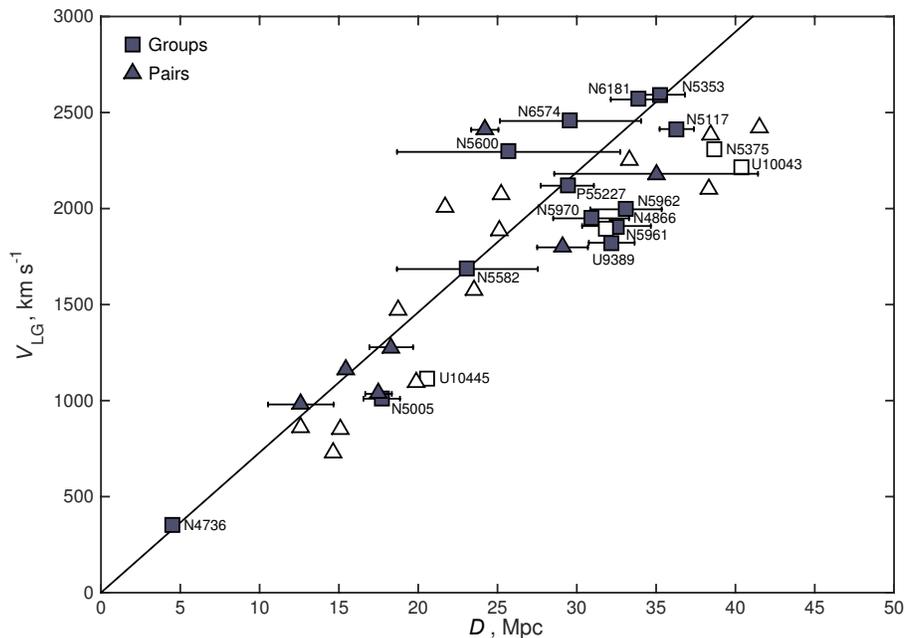
Таблица 3. Пары галактик в области Hercules-Bootes

Name	$\langle V_{LG} \rangle$	$\Delta V$	$D$	$R_p$	$\lg M^*$	$\lg M_{orb}$	$\Delta(m - M)$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
U 8246	849	48	15.1	27	8.48	10.86	—
U 8318	2417	18	41.5	56	9.71	10.22	—
A 732599	1902	24	26.1	55	8.13	10.57	—
U 8507	980	29	12.6	132	9.25	11.11	0.87
P 169748	728	13	14.6	77	7.87	10.18	—
U 8667	1417	26	19.4	13	8.63	10.02	—
N 5303	1473	22	18.7	15	9.81	9.93	—
IC 4341	2386	39	38.4	103	10.06	11.26	—
N 5611	2076	80	25.2	54	10.23	11.61	—
U 9274	1162	12	15.4	42	8.82	9.85	0.10
IC 1014	1278	2	18.3	73	9.37	8.53	0.43
U 9320	864	8	12.6	133	7.08	9.99	—
U 9356	2181	56	35.0	61	9.76	11.35	0.96
N 5727	1578	4	23.5	55	9.20	9.01	—
U 9504	1592	11	21.8	8	8.98	9.05	—
U 9519	1711	18	23.4	101	10.00	10.58	—
N 5762	1798	7	29.1	218	9.92	10.10	0.32
P 2080256	1978	1	27.1	10	8.70	7.07	—
U 9562	1334	112	18.3	21	9.19	11.49	—
N 5798	1881	24	25.1	152	9.98	11.01	—
A 733735	2100	42	38.3	106	8.90	11.34	—
N 5958	2119	12	29.0	43	10.17	9.86	—
N 5956	1905	70	26.1	143	10.59	11.91	—
N 6012	2012	175	21.7	48	10.50	12.24	—
U 10086	2378	166	32.6	9	10.18	11.44	—
N 6207	1035	4	17.5	360	10.16	9.83	0.28
N 6255	1100	23	19.9	194	9.60	11.08	—
U 10625	2256	1	33.3	16	9.03	7.27	—
N 6550	2410	15	24.2	454	10.85	11.08	0.21
Average	1686	37	24.3	96	9.42	10.34	0.45

массы. Структура и морфологический состав этой группы были исследованы в [26]. По лучевым скоростям пятнадцати наиболее ярких членов группы авторы определили вириальную массу этой системы как  $2.1 \times 10^{13} M_{\odot}$ . Наша оценка полной массы группы NGC 5353 по 62 галактикам с измеренными скоростями дает в два раза большее значение. При этом отношение  $M_p/M^* = 47$  для нее также выглядит типичным для богатых групп, подобных близкой группе Leo I. Рассматривая филаментарные структуры галактик в широких окрестностях

скопления Virgo, Ким и др. [27] предположили, что группа NGC 5353 соединена с Virgo длинным (около  $25^\circ$ ) тонким филаментом. Однако наши данные о скоростях и расстояниях галактик в этой области не подтверждают такое предположение.

Помимо 17 групп рассматриваемая область содержит 29 пар галактик, сводка которых представлена в таблице 3. Обозначения столбцов в ней аналогичны предыдущей таблице. Типичная пара имеет разность лучевых скоростей компонентов  $\langle \Delta V_{12} \rangle = 37 \text{ км с}^{-1}$ , проекционное расстояние



**Рис. 4.** Хаббловская диаграмма «скорость–расстояние» для центров групп (квадраты) и пар галактик (треугольники). Системы с оценками расстояния для двух и более членов выделены сплошными символами с обозначением ошибок среднего.

между компонентами  $\langle R_{12} \rangle = 96$  кпк и звездную массу  $\langle \lg M^*/M_\odot \rangle = 9.42$ . Значение проекционной (орбитальной) массы пары

$$M_p = (16/\pi G)(\Delta V_{12})^2 R_{12}$$

в среднем в восемь раз больше суммарной звездной массы:  $\langle \lg(M_p/M^*) \rangle = 0.92$ . Средняя разность модулей расстояния компонентов пар  $0^m45$  свидетельствует о незначительной доле фиктивных, оптических пар среди них.

На рис. 4 представлена хаббловская диаграмма «скорость–расстояние» для центров групп и пар галактик в области Hercules–Bootes. Группы с индивидуальными оценками расстояния для двух и более членов обозначены сплошными квадратами, а группы с  $N_D = 1$  показаны пустыми квадратами. Пары галактик с  $N_D = 2$  и  $N_D = 1$  изображены соответственно сплошными и пустыми треугольниками. Прямая линия соответствует параметру Хаббла  $73 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ . Из этих данных следует, что увеличение числа членов группы с оценками расстояния по Талли–Фишеру способствует уменьшению дисперсии пекулярных скоростей центров групп. Мы ожидаем, что группы галактик, выделенные критерием [9] с  $N_D > 4$ , имеют типичную погрешность определения среднего расстояния около 10%, т.е. их средние скорости и средние оценки расстояния по методу Талли–Фишера могут быть успешно использованы для трассирования поля пекулярных скоростей наряду

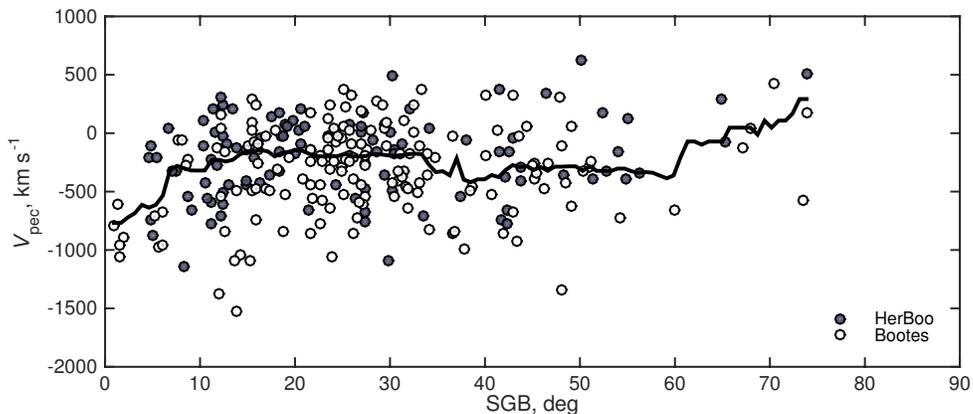
с другими высокоточными методами («сер», «SN», «rgb»).

#### 4. ПЕКУЛЯРНЫЕ ДВИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ HERCULES–BOOTES

Рассматривая наблюдательные данные о лучевых скоростях и расстояниях галактик в Местном сверхскоплении и его окрестностях, Талли и др. [28] выделили два главных фактора, формирующие местное поле пекулярных скоростей: падение галактик к центру скопления Virgo с характерной скоростью около  $180 \text{ км с}^{-1}$  и удаление галактик от центра расширяющегося Местного войда с типичной скоростью примерно  $260 \text{ км с}^{-1}$ . Очевидно, что оба эти эффекта должны влиять на поле пекулярных скоростей в области Hercules–Bootes, простирающейся между Местным войдом и скоплением Virgo.

Поскольку предполагаемый центр Местного войда располагается вблизи северного сверхгалактического полюса на широте  $\text{SGB} \simeq +77^\circ$  [29], а центр Virgo находится почти на экваторе Местного сверхскопления ( $\text{SGB} \simeq -2^\circ$ ), то приблизительная ортогональность этих направлений облегчает анализ поля пекулярных скоростей между ними.

Для всех галактик в зоне  $\text{RA} = [13^h0, 19^h0]$ ,  $\text{Dec} = [+10^\circ, +40^\circ]$  с оценками  $D$  и  $V_{\text{pec}}$  мы определили сверхгалактические координаты SGL и SGB. Для полноты картины к этой выборке



**Рис. 5.** Пекулярная скорость галактик Hercules—Bootes (темные кружки) и Bootes strip (светлые кружки) в зависимости от сверхгалактической широты. Ломаная линия соответствует бегущей медиане с окном  $2.5^\circ$ .

была прибавлена 161 галактика из Bootes strip:  $RA = [13^h0, 18^h0]$ ,  $Dec = [-5^\circ, +10^\circ]$ , с лучевыми скоростями  $V_{LG} < 2000 \text{ км с}^{-1}$ . Поведение медианного значения пекулярной скорости галактик вдоль сверхгалактической широты показано на рис. 5. Сплошная ломаная линия соответствует скользящей медиане с окном усреднения  $2.5^\circ$ . Чтобы сделать объединенную выборку более однородной, мы исключили из нее галактику Hercules—Bootes с  $V_{LG} > 2000 \text{ км с}^{-1}$ . Галактики областей Hercules—Bootes и Bootes strip изображены на рисунке соответственно темными и светлыми кружками.

Как следует из этих данных, на средних сверхгалактических широтах  $SGB = [+10^\circ, +60^\circ]$  значения медианной пекулярной скорости галактик варьируются в узком диапазоне от  $-200$  до  $-400 \text{ км с}^{-1}$ . На низких сверхгалактических широтах,  $SGB < 10^\circ$ , медианное значение  $V_{pec}$  опускается до минимальной величины — около  $-700 \text{ км с}^{-1}$ . Большинство галактик в зоне  $SGB < 10^\circ$  имеют расстояния  $D > 16 \text{ Мпк}$ , т.е. они находятся позади скопления Virgo. Падая в направлении скопления Virgo — массивного местного аттрактора, эти галактики приобретают значительную отрицательную пекулярную скорость по лучу зрения. Наблюдаемая амплитуда потока к Virgo оказывается сравнимой с вириальной дисперсией скоростей скопления  $\sigma_V \simeq 650 \text{ км с}^{-1}$ .

На другой стороне диаграммы при  $SGB > 60^\circ$  статистика данных о пекулярных скоростях невелика. Тем не менее видна тенденция роста медианной скорости галактик в область положительных значений. Интерпретация этого эффекта зависит от модельных предположений о структуре и кинематике Местного войда. Если центр его расположен на расстоянии  $D_c \simeq 10 \text{ Мпк}$  [30] при  $SGB_c = +77^\circ$ , то галактики с типичным расстоянием  $D \simeq 26 \text{ Мпк}$  вокруг расширяющегося войда

будут иметь положительную компоненту пекулярной скорости по лучу зрения. Однако реальная конфигурация Местного войда по данным [31] выглядит более сложной. По мнению авторов указанной работы, Местный войд представляет собой цепочку пустых объемов, которая, изгибаясь подобно подкове, охватывает как Местный объем, так и скопление Virgo.

Недавно Риши и др. [32] измерили с высокой точностью *rgb*-расстояния до двух близких карликовых галактик, расположенных недалеко от направления к центру Местного войда: KK246 ( $D = 6.95 \text{ Мпк}$ ,  $SGB = +40^\circ$ ), а также ALFAZOA 1952+1428 ( $D = 8.39 \text{ Мпк}$ ,  $SGB = +76^\circ$ ). Галактики имеют среднюю пекулярную скорость  $-90 \pm 24 \text{ км с}^{-1}$ . С учетом скорости удаления самого Млечного Пути от центра Местного войда около  $230 \text{ км с}^{-1}$  это соответствует скорости удаления данных галактик от центра войда примерно  $320 \text{ км с}^{-1}$ . Таким образом, четыре различных набора наблюдательных данных ([28, 30, 32], настоящая статья) о пекулярных скоростях галактик в окрестностях ближайшего войда показывают, что стенки войда движутся наружу от его центра с характерной скоростью несколько сотен километров в секунду.

## 5. ДИСКУССИЯ

Как неоднократно отмечалось (см. [9, 11]), суммарная вириальная масса групп и скоплений в Местной вселенной диаметром около  $100 \text{ Мпк}$  составляет всего  $8\text{--}10\%$  от критической плотности, что примерно в три раза меньше глобальной плотности темной материи  $\Omega_m = 0.26 \pm 0.02$ . Значительное расширение наблюдательной базы за счет недавних оптических и HI-обзоров неба это противоречие не устранило. В этой связи полезно

**Таблица 4.** Сравнительные свойства трех изученных участков неба

Parameter	Leo–Cancer	Bootes strip	Hercules–Bootes
Sky area, sq.deg	1477	1121	2447
$V_{LG}^{\max}$ , km s <sup>-1</sup>	2000	2000	2500
Volume, Mpc <sup>3</sup>	3084	2337	9975
$N_V$	543	361	412
$N_D$	290	161	181
Number density, Mpc <sup>-3</sup>	0.176	0.154	0.042
$N(\text{groups+pairs})$	23+20	13+11	17+29
Fraction of isolated	0.51	0.44	0.50
$\sum M_{\text{syst}}^*$ , $10^{12} M_{\odot}$	3.50	2.63	2.62
$\rho_{\text{syst}}^*/\langle\rho^*\rangle$	2.47	2.45	0.57
$\sum M_p$ , $10^{13} M_{\odot}$	9.10	8.80	9.58
$\sum M_p/\sum M^*$	26	33	37

рассмотреть, как выглядит проблема потерянной темной материи по данным для различных областей Местного сверхскопления.

В таблице 4 представлены основные характеристики трех изученных нами участков неба: Leo–Cancer, Bootes strip и Hercules–Bootes, расположенных вне плоскости Местного сверхскопления, которая отягощена эффектами проекции. Первые три строки таблицы содержат площадь каждой области в квадратных градусах, максимальную величину скорости рассматриваемых галактик и объем каждой области в Мпк<sup>3</sup> при  $H_0 = 73 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ . Две следующие строки (4 и 5) содержат число галактик в этих зонах с измеренными лучевыми скоростями ( $N_V$ ) и расстояниями ( $N_D$ ). Как показано в строке 6, плотности числа галактик с измеренными скоростями примерно одинаковы в областях Leo–Cancer и Bootes, а в зоне Hercules–Bootes эта плотность оказывается существенно ниже других. Количество групп и пар галактик (строка 7) заметно меняется от зоны к зоне, причем наименее плотная область Hercules–Bootes содержит повышенное количество парных систем, состоящих из галактик низкой светимости. Относительное число одиночных (некластеризованных) галактик (строка 8) составляет около половины в каждой области, при этом в населении поля преобладают карликовые галактики. В строке 9 показана суммарная звездная масса галактик, входящих в системы разной кратности. Строка 10 содержит значение звездной плотности, выраженной в отношении к средней космической плотности  $\langle\rho^*\rangle = \langle j_K \rangle = 4.3 \times 10^8 M_{\odot} \text{ Мпк}^{-3}$  согласно [33] при  $M^*/L_K = M_{\odot}/L_{\odot}$  [34]. Как видим, область Leo–Cancer и Bootes имеют среднюю звездную плотность в 2.5 раза выше глобальной, а область

Hercules–Bootes находится ниже уровня средней космической плотности. В двух последних строках представлены суммарная вириальная (проекционная) масса всех групп и пар, а также ее отношение к сумме звездных масс этих систем. Заметим, что отношение  $\sum M_p/\sum M^*$  меняется в небольшом диапазоне от 26 до 37, несмотря на значительные различия средней звездной плотности от одной области к другой.

При глобальной средней плотности звездной материи  $\langle\rho^*\rangle = 4.3 \times 10^8 M_{\odot} \text{ Мпк}^{-3}$ , которая известна в настоящее время с погрешностью около 30%, безразмерное отношение критической плотности материи к звездной составляет  $\rho_c/\langle\rho^*\rangle = 350 \pm 100$  [35]. Наблюдаемые значения  $\sum M_p/\sum M^*$  в трех рассматриваемых областях оказываются на порядок ниже критического отношения.

Заметим, что мы не принимали во внимание одиночные некластеризованные галактики, которые составляют около половины общего числа галактик в каждой области. Однако дополнительный анализ показывает, что их вклад в общую звездную массу не превышает 20%, поскольку большинство галактик поля имеет низкую светимость. Кроме того, одиночные галактики с их темными гало приносят вклад как в знаменатель, так и в числитель отношения  $M_{DM}/M^*$ . Поэтому учет одиночных галактик не может существенно повлиять на величины, представленные в последней строке таблицы 4. Важно подчеркнуть, что значение  $M_{DM}/M^* \simeq 30$  является типичным для темных гало Млечного Пути, M 31, M 81 и других ярчайших галактик Местного объема [25]. Таким образом, наблюдаемый недостаток вириальной массы в близких системах

галактик все еще остается актуальной проблемой для космологии Местной вселенной.

### БЛАГОДАРНОСТИ

В данной работе были использованы базы данных NASA Extragalactic Database (NED) и HyperLEDA, а также данные обзоров неба HIPASS, ALFALFA и SDSS. ИДК и ОГК благодарят Российский научный фонд за поддержку грантом 14-12-00965.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182**, 543 (2009).
2. B. S. Koribalski, L. Staveley-Smith, V. A. Kilborn, et al., *Astron. J.* **128**, 16 (2004).
3. O. I. Wong, E. V. Ryan-Weber, D. A. Garcia-Appadoo, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **371**, 1855 (2006).
4. L. Staveley-Smith, R. C. Kraan-Korteweg, A. C. Schröder, et al., *Astron. J.* **151**, 52 (2016).
5. R. Giovanelli, M. P. Haynes, B. R. Kent, et al., *Astron. J.* **130**, 2598 (2005).
6. M. P. Haynes, R. Giovanelli, A. M. Martin, et al., *Astron. J.* **142**, 170 (2011).
7. I. D. Karachentsev and D. I. Makarov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 299 (2008).
8. D. I. Makarov and I. D. Karachentsev, *Astrophysical Bulletin* **64**, 24 (2009).
9. D. Makarov and I. Karachentsev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **412**, 2498 (2011).
10. N. A. Bahcall and A. Kulier, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **439**, 2505 (2014).
11. I. D. Karachentsev, *Astrophysical Bulletin* **67**, 123 (2012).
12. I. D. Karachentsev, O. G. Nasonova, and H. M. Courtois, *Astrophys. J.* **743**, 123 (2011).
13. I. D. Karachentsev, O. G. Nasonova, and H. M. Courtois, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **429**, 2264 (2013).
14. I. D. Karachentsev and O. G. Nasonova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **429**, 2677 (2013).
15. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, and O. G. Nasonova, *Astrophysics* **57**, 457 (2014).
16. I. D. Karachentsev, O. G. Nasonova, and V. E. Karachentseva, *Astrophysical Bulletin* **70**, 1 (2015).
17. D. Makarov, P. Prugniel, N. Terekhova, et al., *Astron. and Astrophys.* **570**, A13 (2014).
18. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, *Astrophys. J.* **737**, 103 (2011).
19. M. A. W. Verheijen and R. Sancisi, *Astron. and Astrophys.* **370**, 765 (2001).
20. J. L. Tonry, A. Dressler, J. P. Blakeslee, et al., *Astrophys. J.* **546**, 681 (2001).
21. R. B. Tully and J. R. Fisher, *Astron. and Astrophys.* **54**, 661 (1977).
22. R. B. Tully, L. Rizzi, E. J. Shaya, et al., *Astron. J.* **138**, 323 (2009).
23. R. B. Tully, H. M. Courtois, A. E. Dolphin, et al., *Astron. J.* **146**, 86 (2013).
24. R. B. Tully, H. M. Courtois, and J. G. Sorce, *Astron. J.* **152**, 50 (2016).
25. I. D. Karachentsev and Y. N. Kudrya, *Astron. J.* **148**, 50 (2014).
26. R. B. Tully and N. Trentham, *Astron. J.* **135**, 1488 (2008).
27. S. Kim, S.-C. Rey, M. Bureau, et al., *Astrophys. J.* **833**, 207 (2016).
28. R. B. Tully, E. J. Shaya, I. D. Karachentsev, et al., *Astrophys. J.* **676**, 184 (2008).
29. A. V. Tikhonov and I. D. Karachentsev, *Astrophys. J.* **653**, 969 (2006).
30. O. G. Nasonova and I. D. Karachentsev, *Astrophysics* **54**, 1 (2011).
31. A. A. Elyiv, I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, et al., *Astrophysical Bulletin* **68**, 1 (2013).
32. L. Rizzi, R. B. Tully, E. J. Shaya, et al., *Astrophys. J.* **835**, 78 (2017).
33. D. H. Jones, B. A. Peterson, M. Colless, and W. Saunders, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **369**, 25 (2006).
34. E. F. Bell, D. H. McIntosh, N. Katz, and M. D. Weinberg, *Astrophys. J. Suppl.* **149**, 289 (2003).
35. M. Fukugita and P. J. E. Peebles, *Astrophys. J.* **616**, 643 (2004).

**Nearby Groups of Galaxies in the Hercules–Bootes Constellations****I.D. Karachentsev, O. G. Kashibadze, and V.E. Karachentseva**

We consider a sample of 412 galaxies with radial velocities  $V_{LG} < 2500 \text{ km s}^{-1}$  situated in the sky region of  $RA = 13^{\text{h}}0-19^{\text{h}}0$ ,  $Dec = +10^\circ \dots +40^\circ$  between the Local Void and the Supergalactic plane. One hundred and eighty-one of them have individual distance estimates. Peculiar velocities of the galaxies as a function of Supergalactic latitude  $SGB$  show signs of Virgocentric infall at  $SGB < 10^\circ$  and motion from the Local Void at  $SGB > 60^\circ$ . A half of the Hercules–Bootes galaxies belong to 17 groups and 29 pairs, with the richest group around NGC 5353. A typical group is characterized by the velocity dispersion of  $67 \text{ km s}^{-1}$ , the harmonic radius of 182 kpc, the stellar mass of  $4.3 \times 10^{10} M_\odot$  and the virial-to-stellar mass ratio of 32. The binary galaxies have the mean radial velocity difference of  $37 \text{ km s}^{-1}$ , the projected separation of 96 kpc, the mean integral stellar mass of  $2.6 \times 10^9 M_\odot$  and the mean virial-to-stellar mass ratio of about 8. The total dark-matter-to-stellar mass ratio in the considered sky region amounts to 37 being almost the same as that in the Local Volume.

Keywords: *galaxies: kinematics and dynamics—galaxies: distances and redshifts—galaxies: groups*