

УДК 524.72-32

ОБЗОР ПЛОСКОСТИ МЕСТНОГО СВЕРХСКОПЛЕНИЯ

© 2018 О. Г. Кашибадзе¹, И. Д. Караченцев^{1*}, В. Е. Караченцева²¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия²Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 03143 Украина

Поступила в редакцию 22 марта 2018 года; принята в печать 23 апреля 2018 года

Мы рассматриваем распределение и поле скоростей галактик, расположенных в полосе размером 100 на 20 градусов с центром в M 87, которая ориентирована вдоль плоскости Местного сверхскопления. Наша выборка насчитывает 2158 галактик с лучевыми скоростями менее 2000 км с^{-1} . Из них 1119 галактик (52%) имеют оценки расстояния и пекулярной скорости. Примерно три четверти галактик ранних типов сконцентрированы в пределах ядра скопления Virgo, а большинство галактик поздних типов в полосе расположены за пределами вириального радиуса. Распределение богатых газом карликовых галактик с $M_{\text{HI}} > M_*$ выглядит нечувствительным к присутствию скопления Virgo. Среди 50 групп, расположенных в экваториальной полосе сверхскопления, шесть групп обладают пекулярными скоростями порядка $500\text{--}1000 \text{ км с}^{-1}$, что сравнимо с вириальными движениями в богатых скоплениях. Наиболее загадочным случаем является семейство примерно 30 галактик вокруг NGC 4278 (облако Coma I),двигающееся к нам со средней пекулярной скоростью -840 км с^{-1} . Это облако (или филамент) находится на расстоянии 16.1 Мпк от нас и примерно 5 Мпк от центра Virgo. Галактики вокруг скопления Virgo демонстрируют падение на его центр с характерной скоростью около 500 км с^{-1} . Предполагая это падение радиальным и сферически симметричным, мы оценили радиус поверхности нулевой скорости как $R_0 = 7.0 \pm 0.3 \text{ Мпк}$, а соответствующую этому значению полную массу скопления Virgo как $(7.4 \pm 0.9) \times 10^{14} M_{\odot}$, что прекрасно согласуется с вириальными оценками его массы. Мы делаем заключение, что окрестности Virgo вне вириального радиуса не содержат значительного количества темной материи.

Ключевые слова: галактики: кинематика и динамика — галактики: расстояние и красное смещение — галактики: группы

1. ВВЕДЕНИЕ

Формирование элементов крупномасштабной структуры Вселенной — космических пустот, стенок и волокон — сопровождается когерентными нехаббловскими движениями галактик с амплитудой в несколько сотен км с^{-1} на масштабах 10–100 Мпк. Такая картина следует из результатов численного моделирования в рамках стандартной космологической модели ΛCDM [1–3]. Фактически и наша Галактика, вкпе с десятками других окрестных галактик, образующих плоскую систему *Местный лист* (или *Местный блин*), движется относительно космического микроволнового излучения со скоростью 630 км с^{-1} [4]. Согласно Талли и др. [5, 6], этот вектор скорости складывается из трех приблизительно взаимно-перпендикулярных компонент: (1) падения Местного листа к центру ближайшего скопления Virgo со скоростью 185 км с^{-1} , (2) удаления от расширяющегося

Местного войда со скоростью 260 км с^{-1} и (3) движения в сторону скоплений Hydra–Centaurus и сверхскопления Шепли [7] с амплитудой около 450 км с^{-1} . Сложный узор разнонаправленных течений не позволяет использовать для оценки расстояний близких галактик линейное соотношение Хаббла: $V_{\text{LG}} = H_0 D$, где D — расстояние близкой галактики, V_{LG} — ее лучевая скорость относительно центра скопления Местной группы и H_0 — параметр Хаббла. Даже модели нехаббловских движений вокруг скопления Virgo, но без учета других компонент [8, 9] оказались слишком упрощенными, чтобы определить расстояния галактики по ее лучевой скорости в пределах Местного сверхскопления (LSC).

Благодаря обзорам больших областей неба в линии нейтрального водорода HI 21 см — HIPASS [10], ALFALFA [11], WSRT-CVn [12] — появилась возможность массового определения расстояний галактик с погрешностью примерно 20–25%, используя соотношение Талли–Фишера [13] между светимостью галактики и

*E-mail: ikar@sao.ru

шириной ее линии HI. В настоящее время оценки расстояний методом Талли–Фишера известны для нескольких тысяч галактик с характерными скоростями около 6000 км с^{-1} [6], что служит основой для изучения космических течений на шкале порядка 100–200 Мпк.

Внутри Местного сверхскопления ($D < 30$ Мпк), ядром которого является скопление Virgo на расстоянии 16.7 Мпк [14], имеется множество спиральных и иррегулярных галактик с измеренной шириной W_{50} линии HI, но без оценок расстояния. Для многих из них мы впервые определили расстояния методом Талли–Фишера, что увеличило плотность поля пекулярных скоростей в Местном сверхскоплении более чем в 2 раза.

В наших предыдущих статьях мы рассматривали движения галактик в нескольких областях вдоль экватора LSC: Coma I [15], Ursa Major [16], Virgo Southern Extension [17], а также в широких полосах Leo–Cancer [18], Bootes [19] и Hercules–Bootes [20], перпендикулярных к экватору LSC. В последних случаях были получены новые свидетельства в пользу расширения Местного войда и падения галактик, соседних с Virgo, к центру этого скопления. Кроме того, кинематическая ситуация вокруг скоплений Virgo, Fornax и вокруг Местного войда рассматривалась нами отдельно [21–23], что позволило оценить полную массу обоих скоплений, а также контраст плотности Местного войда. Карта распределения этих областей в экваториальных координатах показана на рис. , где точками изображены 5180 галактик с лучевыми скоростями $V_{LG} < 2000 \text{ км с}^{-1}$, а лохматая кольцевая полоса отмечает зону сильного поглощения в Млечном Пути.

2. ВЫБОРКА ГАЛАКТИК В ПЛОСКОСТИ МЕСТНОГО СВЕРХСКОПЛЕНИЯ

В качестве основных источников наблюдательных данных о галактиках LSC мы использовали сводки HyperLEDA¹ [24] и NASA Extragalactic Database² (NED), дополняя их самыми свежими оценками расстояний галактик. Отбор объектов проводился нами в полосе $\pm 10^\circ$ по сверхгалактической широте (SGB) и $\pm 50^\circ$ по сверх-

¹<http://leda.univ-lyon1.fr/>

²<http://ned.ipac.caltech.edu/>

³При анализе движений галактик в самой вириальной зоне скопления, мы отодвинули предел по скоростям до 2600 км с^{-1} [25].

галактической долготы (SGL) относительно центра скопления Virgo, который мы отождествляем с радиогалактикой M 87 = NGC 4486 (SGL = $102^\circ 88$, SGB = $-2^\circ 35$). Основанием для такого выбора послужила близость положения M 87 к геометрическому центру рентгеновского излучения скопления. В нашу выборку включались галактики с лучевыми скоростями $V_{LG} < 2000 \text{ км с}^{-1}$. Это условие позволяет охватить существенную долю населения скопления Virgo и примыкающих к нему структур, но избежать большого числа галактик далекого фона³.

Всего по данным HyperLEDA и NED этим условиям удовлетворяет 3995 объектов. Мы осмотрели изображения всех объектов на снимках Digital Sky Survey (DSS), Sloan Digital Sky Survey (SDSS) [26] и Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (PanSTARRS) [27], проверяя и уточняя морфологическую классификацию галактик. В результате мы исключили из этой выборки 1837 ложных объектов, оказавшихся случаями проекции звезды на далекую галактику, отдельными фрагментами одной и той же галактики или сомнительными отождествлениями радиосточника с оптическим объектом. Подчеркнем, что некритическое, формальное использование исходных данных содержало бы в рассматриваемой выборке около 46% «мусора», сильно искажая результаты последующего анализа.

Для 563 галактик из этого списка нами были получены новые оценки расстояния. 386 оценок получены из соотношения Талли и Пирса [28]:

$$M_B = 7.27(2.5 - \lg W_{50}) - 19.99;$$

ширина линии водорода корректировалась за наклон галактики, при этом источником данных об отношении осей послужила HyperLEDA. Для оставшихся 177 карликовых галактик, богатых газом, оценки расстояний были получены из барионной зависимости Талли–Фишера [29]. Как было показано авторами, учет наклона карликовых галактик не приводил к существенному уменьшению дисперсии на диаграмме Талли–Фишера. Поэтому в случае барионной зависимости Талли–Фишера поправки за наклон галактики не вводились.

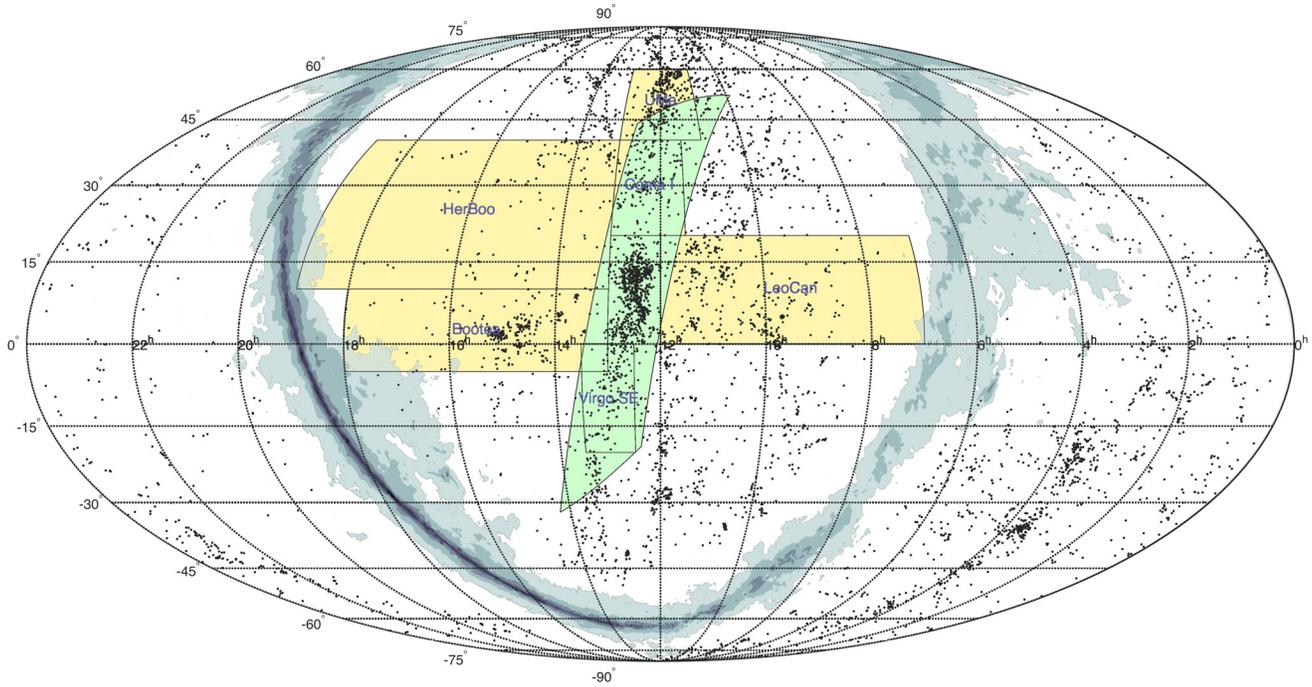


Рис. 1. Распределение 5180 галактик с лучевыми скоростями $V_{LG} < 2000 \text{ км с}^{-1}$ на небе в экваториальных координатах. Область сильного поглощения в Млечном Пути затенена. Рассматриваемая полоса вдоль экватора Местного сверхскопления показана зеленым. Другие участки неба, изученные нами ранее, выделены желтым. (Цветные иллюстрации см. в электронной версии статьи.)

Таблица 1. Галактики LSC-полосы

Name	RA(J2000.0) Dec	SGL SGB deg	V_{LG} , km s ⁻¹	Type	B_T , mag	W_{50} , km s ⁻¹	m_{21} , mag	$m - M$, mag	D , Mpc	Method
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
UGC 05460	100809.2+515040	54.42–10.53	1146	Sd	13.88	93	14.87	31.23	17.80	tf
UGC 05459	100810.1+530501	53.50–09.68	1170	Scd	13.19	274	13.61	31.56	20.50	tf
PGC 2427800	101306.5+525646	54.11–09.23	1545	BCD	17.40	–	–	–	–	–
SDSS J101540.57 +523202.4	101540.6+523202	54.69–09.21	1206	I	18.15	37	18.40	31.27	17.99	TF
UGC 05571	101942.4+520356	55.46–09.06	724	Im	16.45	51	15.34	29.58	8.24	TFb
SDSS J102225.42 +475218.3	102225.5+475218	59.01–11.42	1650	Sm	18.14	–	–	–	–	–
PGC 030715	102701.8+561614	52.90–05.53	914	BCD	16.08	58	16.24	30.18	10.84	TF
UGC 05676	102904.9+544301	54.30–06.29	1499	Sdm	14.81	123	16.05	31.72	22.08	TF
PGC 2381991	103108.9+504709	57.60–08.49	983	Sm	16.58	–	–	–	–	–
NGC 3264	103219.6+560502	53.51–05.08	1010	Sd	12.61	143	14.47	31.40	19.43	tf
UGC 05720	103231.9+542404	54.86–06.09	1510	BCD	13.16	142	15.92	31.50	20.00	TF
UGC 05740	103445.9+504606	57.97–08.05	698	Sm	15.59	138	14.91	32.29	28.73	TFb
PGC 2277751	103512.1+461412	61.68–10.71	530	BCD	17.46	–	–	–	–	–
PGC 2368186	103559.8+501631	58.48–08.19	896	I	17.64	–	–	–	–	–

Таблица 1. (Продолжение)

Name	RA(J2000.0) Dec	SGL SGB deg	V_{LG} , km s ⁻¹	Type	B_T , mag	W_{50} , km s ⁻¹	m_{21} , mag	$m - M$, mag	D , Mpc	Method
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
PGC 2302764	103625.0+474153	60.62–09.67	1590	BCD	18.08	86	17.10	32.76	35.6	TFb
PGC 2425292	103636.3+525101	56.47–06.56	1043	BCD	16.08	124	16.31	32.66	34.1	TF
PGC 2302994	103825.7+474236	60.81–09.39	1611	BCD	16.73	69	16.59	31.78	22.70	TF
NGC 3310	103845.9+533012	56.14–05.91	1055	Sbc	11.28	190	13.29	–	–	–
UGC 05791	103926.9+475650	60.72–09.12	890	Sbc	14.50	157	15.98	32.11	26.40	tf
UGC 05798	103947.1+475557	60.76–09.08	1574	Scd	14.45	184	15.76	32.54	32.30	tf
SDSS J103950.97 +564402.9	103951.3+564401	53.63–03.85	1216	Sm	16.90	–	–	–	–	–
PGC 2336386	104042.4+491224	59.81–08.21	1544	Im	17.10	117	16.20	32.72	34.9	TFb
PGC 031888	104214.2+474600	61.14–08.84	1562	S0	15.29	–	–	–	–	–
PGC 2362930	104251.9+500619	59.28–07.40	1670	BCD	16.94	–	–	–	–	–
SDSS J104407.79 +474242.1	104407.8+474242	61.37–08.61	1570	BCD	17.63	–	–	–	–	–
UGC 05848	104423.1+562517	54.25–03.53	902	Sm	15.14	133	15.41	31.98	24.9	TF
KKH 062	104455.7+541225	56.11–04.76	1070	I	18.2	41	17.11	30.66	13.55	TFb
NGC 3353	104522.4+555737	54.71–03.69	1020	Sb	13.22	90	14.94	31.42	19.30	tf
UGC 05883	104719.3+540216	56.45–04.57	844	Im	15.51	65	15.62	30.45	12.30	TF
UGC 05888	104745.7+560529	54.80–03.34	1319	Im	15.19	104	15.34	31.59	20.78	TF
PGC 2288707	104747.1+465246	62.42–08.58	1521	Sd	17.99	–	–	–	–	–
UGC 05917	104853.8+464315	62.66–08.51	768	Sm	15.17	98	15.75	31.10	16.60	TF
SDSS J105107.83 +512013.3	105107.8+512013	59.01–05.62	862	I	18.24	–	–	–	–	–
UGC 05953	105118.1+443419	64.71–09.34	1819	S0	13.34	–	–	–	–	–
PGC 2457837	105129.6+540205	56.80–04.07	1400	I	16.59	–	–	–	–	–
PGC 2554441	105132.9+570027	54.34–02.39	1950	Scd	16.82	–	–	–	–	–
UGC 05976	105202.8+553604	55.54–03.12	1289	Sdm	15.12	93	15.35	–	–	–
UGC 05996	105257.4+402242	68.47–11.35	1627	Sd	16.44	60	15.16	31.04	16.14	TFb
UGC 05998	105308.4+501705	60.07–05.94	1437	Sm	14.74	173	15.82	32.34	29.44	TF
UGC 06005	105327.7+460111	63.69–08.24	748	Sd	16.80	–	–	–	–	–
UGC 06016	105412.8+541714	56.81–03.60	1583	Im	16.10	139	14.60	32.00	25.11	TFb
NGC 3448	105439.4+541818	56.83–03.53	1443	Sb	12.41	258	12.85	31.33	18.45	TF
UGC 06029	105502.3+494334	60.71–05.99	1418	I	14.19	153	14.78	31.85	23.4	TF
PGC 2389897	105508.2+511119	59.48–05.18	1423	BCD	17.73	–	–	–	–	–
NGC 3458	105601.5+570701	54.58–01.83	1856	S0	13.05	–	–	–	–	–
UGC 06041	105617.5+413603	67.75–10.17	1472	Sd	16.95	95	16.54	32.57	32.7	TFb
UGC 06039	105620.9+564535	54.91–01.99	1932	Scd	16.23	–	–	–	–	–
PGC 032915	105658.7+500826	60.53–05.51	1427	BCD	17.20	63	16.33	31.08	16.44	TFb

Таблица 1. (Продолжение)

Name	RA(J2000.0) Dec	SGL SGB deg	V_{LG} , km s ⁻¹	Type	B_T , mag	W_{50} , km s ⁻¹	m_{21} , mag	$m - M$, mag	D , Mpc	Method
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
PGC 2351264	105849.6+494258	61.05–05.48	880	BCD	16.79	—	—	—	—	—
PGC 033085	105918.9+423523	67.19–09.18	1567	BCD	17.34	—	—	—	—	—
PGC 033137	110000.2+542532	57.15–02.81	1077	Sdm	16.79	39	16.41	30.46	12.34	TFb
SDSS J110006.06 +541620.1	110006.1+541620	57.29–02.88	1509	Im	17.71	—	—	—	—	—
PGC 2301841	110203.2+473847	63.10–06.13	1969	Im	17.50	—	—	—	—	—
UGC 06113	110248.3+520655	59.34–03.68	1010	I	18.2	46	15.86	31.26	17.90	TFb
NGC 3499	110311.0+561318	55.87–01.48	1602	S0	14.20	—	—	—	—	—
AGC 219661	110422.8+360604	73.39–11.62	742	I	18.0	55	17.58	31.69	21.78	TFb
PGC 3096015	110541.7+462449	64.48–06.23	1830	BCD	21.7	—	—	—	—	—
PGC 033544	110544.6+444957	65.85–07.03	811	Im	17.53	—	—	—	—	—
UGC 06161	110649.1+434323	66.92–07.42	767	Sm	15.66	112	14.25	30.97	15.65	TFb
UGC 06182	110803.0+533659	58.46–02.23	1304	BCD	15.24	102	15.11	32.23	27.92	TFb

Итоговый список 2158 галактик представлен в таблице 1, полная машинно-читаемая версия которой доступна в SIMBAD Astronomical Database⁴. В столбцах таблицы содержатся: (1) имя галактики; (2) экваториальные координаты на эпоху J2000.0; (3) сверхгалактические координаты; (4) лучевая скорость (км с⁻¹) относительно центра Местной группы с параметрами апекса, принятыми в NED; (5) морфологический тип по классификации де Вокулера; в дополнение к типам де Вокулера мы также используем следующие обозначения: для компактных объектов — Eс (компактные эллиптические) и BCD (голубые компактные карликовые); для карликовых галактик низкой и очень низкой поверхностной яркости — Ed, Edn (эллиптические), Sph, Sphn (круглые); символ «п» обозначает присутствие звездоподобного ядра; I, Ig (диффузные объекты без областей звездообразования); (6) видимая B -величина из HyperLEDA или NED, здесь видимая величина без сотых долей соответствует нашей визуальной оценке; (7) ширина линии 21 см (км с⁻¹) на уровне половины от максимальной интенсивности; (8) видимая HI-величина $m_{21} = 17.4 - 2.5 \lg F(\text{HI})$, где $F(\text{HI})$ — поток в линии HI (Ян км с⁻¹); (9), (10) модуль расстояния и расстояние галактики (Мпк); (11) метод, которым сделана оценка расстояния. Мы различали методы, основанные на светимости сверхновых (SN) и цефеид (cep),

на светимости вершины ветви красных гигантов (rgb) [30] и метод флуктуаций поверхностной яркости (sbf) [31]. Оценки расстояния этими методами имеют погрешность 5–10%, и мы обозначаем их в дальнейшем как «accurate». Вторичные, или «supplement», оценки расстояния — по соотношению Талли–Фишера (tf или TF), по фундаментальной плоскости (FP) или светимости шаровых скоплений (gc), калиброванные по цефеидам, — имеют типичную погрешность 20–25%. Оценки расстояний методом Талли–Фишера, взятые из NED, мы обозначали как «tf», наши новые оценки по соотношению Талли и Пирса [28] выделены заглавными буквами «TF»; в случае богатых газом карликовых галактик их расстояние по Караченцеву и др. [29] обозначено как «TFb». Всего имеется 1119 галактик с оценками расстояния, что составляет 52% от общей выборки. Сводка расстояний Cosmicflows-3 Distances [6] содержит в этой области всего 450 оценок расстояния.

Распределение галактик полосы по сверхгалактическим координатам представлено на рис. 2, где объекты с измеренными расстояниями и без них показаны соответственно темными и светлыми кружками. Центральный круг радиусом $6^{\circ}2$ очерчивает вириальную зону скопления Virgo (вириальный радиус $R_V = 1.8$ Мпк), а отрезки круга $23^{\circ}6$, или $R_0 = 7.2$ Мпк, отделяют область падения вокруг скопления от общего космологического расширения. Как видим, распределение галактик вне вириальной зоны весьма неоднородное и асим-

⁴<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

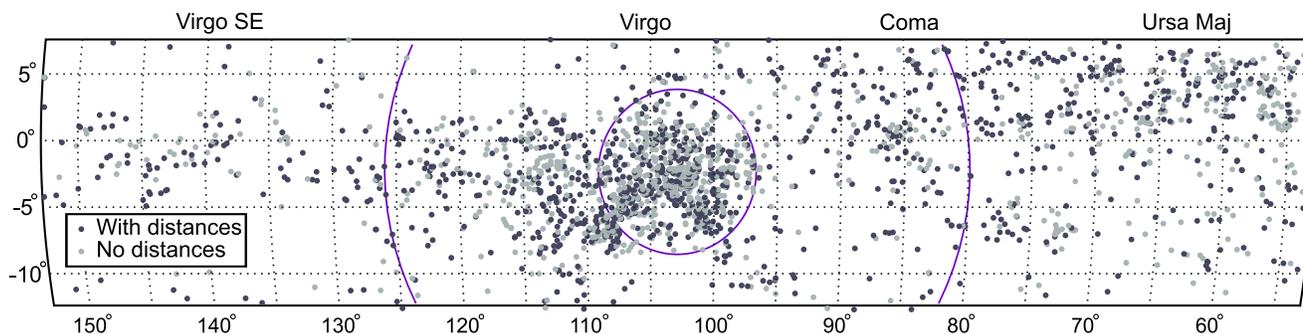


Рис. 2. Распределение 2158 галактик полосы с лучевыми скоростями $V_{LG} < 2000 \text{ км с}^{-1}$ на небе в сверхгалактических координатах. Галактики с оценками расстояния показаны более темными кружками. Центральный круг и отрезки круга обозначают вириальный радиус Virgo (1.8 Мпк) и радиус сферы нулевой скорости (7.2 Мпк).

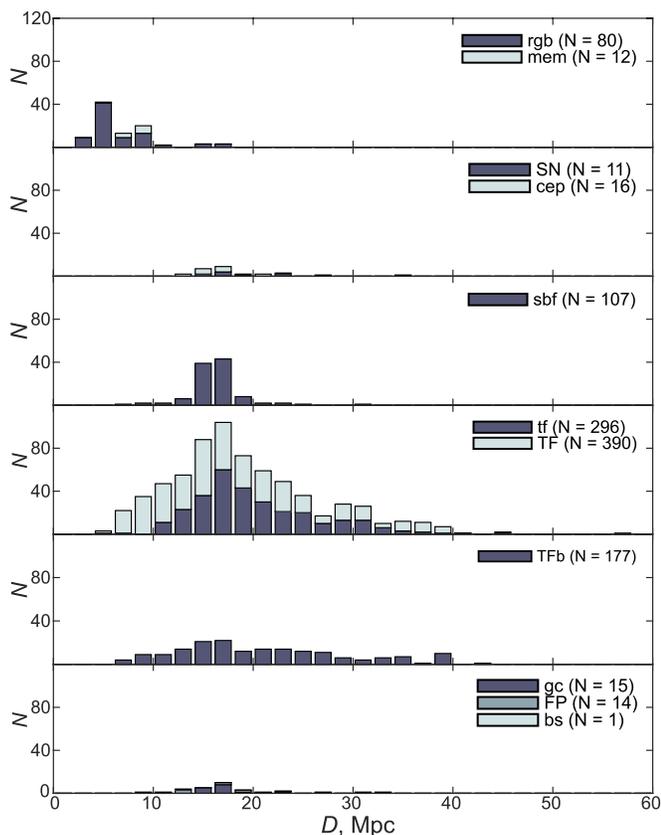


Рис. 3. Распределение галактик полосы по расстояниям, оцененным различными способами.

метричное. При этом относительное число галактик с измеренными расстояниями мало меняется от левого (южного) края полосы к правому (северному). Все три динамические области — вириальное ядро, зона падения и общее поле — имеют в нашей полосе хорошее представительство.

Рисунок 3 показывает распределение галактик LSC-полосы по расстояниям, определенным разными методами. Три верхние панели соответствуют методам высокой точности. К 80 галактикам

с RGB-расстояниями добавлены 12 галактик, у которых расстояния оценены по их очевидному членству (mem) в группах с надежно измеренным расстоянием других, как правило, более ярких членов. Три нижние панели рис. 3 отображают распределение галактик с менее точными расстояниями. Сравнение между собой этих данных показывает большое различие использованных методов по эффективной глубине: галактики с RGB-расстояниями сосредоточены преимущественно в Местном объеме ($D < 11 \text{ Мпк}$), а основная масса галактик с расстояниями, измеренными по соотношению Талли–Фишера, находится позади скопления Virgo. Члены Virgo обуславливают пик распределения $N(D)$ при $D \approx 16 \text{ Мпк}$ почти на всех панелях. Однако богатые газом карликовые галактики с оценками «TFb» такого пика не показывают. Эти особенности необходимо учитывать при анализе картины падения галактик к центру Virgo с передней и дальней стороны скопления.

Общее распределение галактик LSC-полосы по лучевым скоростям, расстояниям и пекулярным скоростям $V_{pec} = V_{LG} - H_0 D$, где $H_0 = 73 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$, представлено на трех панелях рис. 4. Широкий пик в $N(V_{LG})$ при $V_{LG} = 1000 \pm 500 \text{ км с}^{-1}$ сформирован членами скопления Virgo и примыкающими к нему структурами. Относительное число галактик без оценок расстояния слабо растет в сторону больших лучевых скоростей. Как видно из данных средней панели, более 99% галактик имеют расстояния в пределах 40 Мпк. На хвосте распределения ($D = 40\text{--}60 \text{ Мпк}$) могли оказаться галактики, к примеру, UGC 6372, у которых измеренные ширины W_{50} отягощены систематическими ошибками.

Пекулярные скорости галактик полосы распределены в широком диапазоне $[-2300, +1300] \text{ км с}^{-1}$ с максимумом вблизи нуля. Гистограмма $N(V_{pec})$ имеет асимметричный вид со смещением в сторону

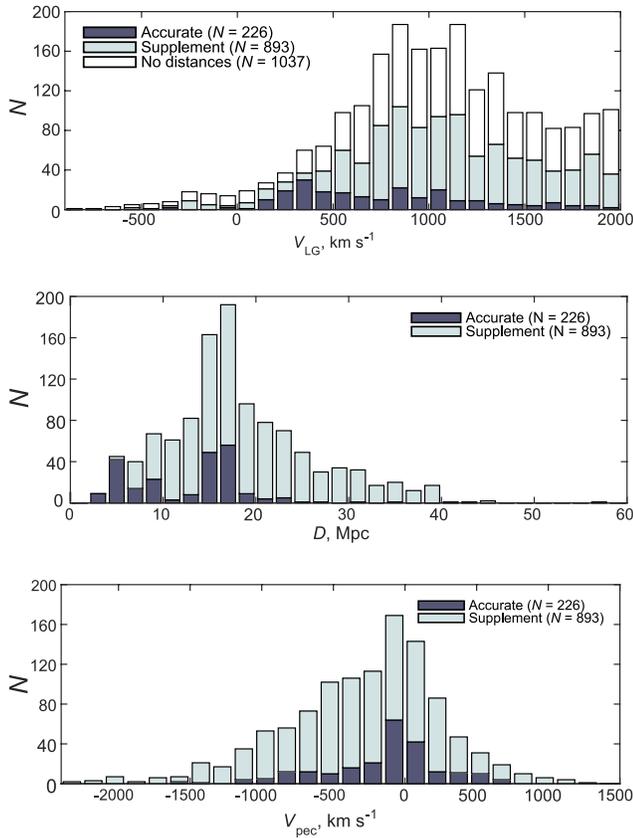


Рис. 4. Распределение числа галактик полосы по лучевым скоростям (вверху), расстояниям (посередине) и пекулярным скоростям (внизу). Галактики с аккуратными оценками расстояния помечены темно-серым.

отрицательных V_{pec} . Причинами наблюдаемой асимметрии могут быть:

- (a) движение Местной группы к центру Virgo со скоростью около 200 km s^{-1} ;
- (b) наличие предела $V_{LG} < 2000 \text{ km s}^{-1}$, который срезает часть галактик на передней границе скопления, падающих к центру скопления, но пропускает галактики, падающие к Virgo с дальней стороны;
- (c) эффект Малмквиста, когда симметричные ошибки модуля расстояния $\Delta(m - M)$ превращаются в асимметричные ошибки самого расстояния ΔD (этот эффект менее значим для галактик с аккуратными оценками расстояния);
- (d) наличие в LSC-полосе ассоциаций галактик с большими пекулярными скоростями: при этом случаи больших положительных пекулярных скоростей отсекаются условием $V_{LG} < 2000 \text{ km s}^{-1}$, а случаи больших отрицательных пекулярных скоростей удовлетворяют указанному ограничению.

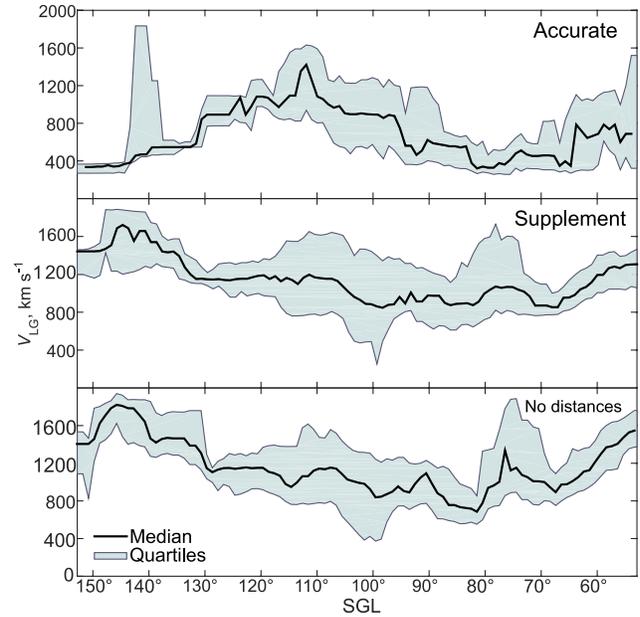


Рис. 5. Бегущая медиана и квантили лучевой скорости вдоль полосы для галактик с измеренными (вверху, посередине) и неизмеренными (внизу) расстояниями.

3. НАБЛЮДАЕМЫЕ ТРЕНДЫ ВДОЛЬ СВЕРХГАЛАКТИЧЕСКОЙ ДОЛГОТЫ

3.1. Кинематические и геометрические тренды

В стандартной космологической модели Λ CDM скопления галактик формируются в виде узлов на пересечении филаментов и стенок, по которым галактики втекают в вириальную зону скопления. При малом угле наклона филамента к лучу зрения поток галактик вдоль филамента должен отражаться на распределении галактик по расстояниям и лучевым скоростям. Талли и др. [6] предположили, что основным каналом, питающим вириальную зону скопления Virgo, является южный филамент Virgo Southern Extension (VirgoSE) на сверхгалактических долготах $SGL > 110^\circ$. Рисунки 5 и 6 показывают распределение скоростей и расстояний галактик вдоль SGL. Учитывая отмеченные выше эффекты избирательности, мы разделили галактики полосы на две подвыборки: с высокоточными и вторичными индикаторами расстояния. Жирная линия на рисунках отражает поведение бегущей медианы с окном усреднения $\Delta SGL = 4^\circ$, а тонкие линии сверху и снизу соответствуют бегущим квантилям.

Как видим, у галактик с высокоточными расстояниями (верхняя панель рис. 5 и 6) характерная скорость и характерное расстояние имеют тенденцию возрастать от левого и правого края полосы к скоплению Virgo. Именно такой эффект можно ожидать, если галактики движутся вдоль

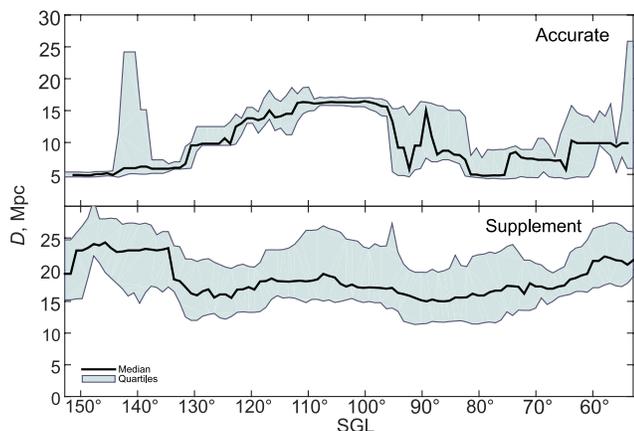


Рис. 6. Бегущая медиана и квантили расстояния галактик полосы вдоль сверхгалактической долготы.

южного и северного волокон, дальний конец которых примыкает к скоплению. Однако отмеченный феномен может быть вызван и эффектом селекции: Феррарезе и др. [32] и Мей и др. [14] предприняли специальные усилия, чтобы измерить расстояния галактик в центре Virgo методами RGB и SBF, а на окраинах нашей полосы методом RGB охвачены только близкие группы (NGC 4244, NGC 4631, NGC 5236). Иначе выглядит дрейф медианы для галактик с TF-оценками расстояния (средняя панель рис. 5). Заметим также, что поведение бегущей медианы скорости V_{LG} для галактик без измеренных расстояний (нижняя панель рис. 5) повторяет в общих чертах ход медианы на средней панели.

Как следует из данных верхней панели рис.6, разброс расстояний, измеренных высокоточными методами в вириальной зоне скопления ($SGL = 97-110^\circ$), удивительно мал и сравним с вириальным радиусом скопления. В среднем по полосе интерквартильная ширина высокоточных оценок расстояния в 2–3 раза меньше аналогичной ширины для оценок низкой точности, что грубо согласуется с отношением погрешностей этих методов (5–10% и 20–25%).

Рисунок 7 показывает поведение бегущей медианы и квантилей для peculiar скоростей галактик вдоль сверхгалактической долготы. На краях полосы $SGL < 80^\circ$ и $SGL > 130^\circ$ галактики с аккуратными оценками расстояний демонстрируют малое смещение и малый разброс peculiar скоростей. Это вызвано тем, что большинство из них входит в состав «холодного» Местного листа, где хаотические нехаббловские движения невелики. В отличие от них, галактики с TF-расстояниями располагаются в основном на дальней стороне объема за пределами Местного листа, имея преимущественно отрицательные peculiar скорости. Обе выборки на верхней и нижней панелях фиксируют

ожидаемое увеличение дисперсии V_{pec} в центре полосы из-за вириальных движений в скоплении.

Среди особенностей, заметных на верхней панели рис. 7, отметим избыток галактик с положительными peculiar скоростями вблизи Virgo на южной стороне ($SGL \simeq 113^\circ$). Он, вероятно, обусловлен падением к скоплению Virgo ассоциации галактик вокруг NGC 4527, расположенной на передней границе скопления. Другая особенность, а именно зона отрицательных V_{pec} , видна на интервале $SGL = 83 - 90^\circ$. Она соответствует аномалии скоростей в Coma I [15], к которой мы вернемся ниже.

Как следует из данных обеих панелей рис. 7, глобальный тренд средней peculiar скорости вдоль полосы невелик, что можно ожидать, если филаментарные структуры вблизи Virgo ориентированы перпендикулярно лучу зрения.

3.2. Морфологический ландшафт

Распределение в полосе галактик разных морфологических типов представлено на рис. 8, где также указана шкала лучевых скоростей. Галактики ранних типов демонстрируют сильную концентрацию к ядру скопления Virgo (верхняя панель рис. 8). Около трех четвертей из них располагаются внутри вириального радиуса скопления, а остальные ассоциируются с группами галактик. Группа на экваторе при $SGL \simeq 86^\circ$ соответствует облаку Coma I вокруг NGC 4278 с большими отрицательными peculiar скоростями.

Распределение галактик поздних типов на средней панели показывает значительно меньшую концентрацию к вириальной зоне Virgo. Этот эффект хорошо известен как сегрегация галактик по типам в зависимости от плотности окружения.

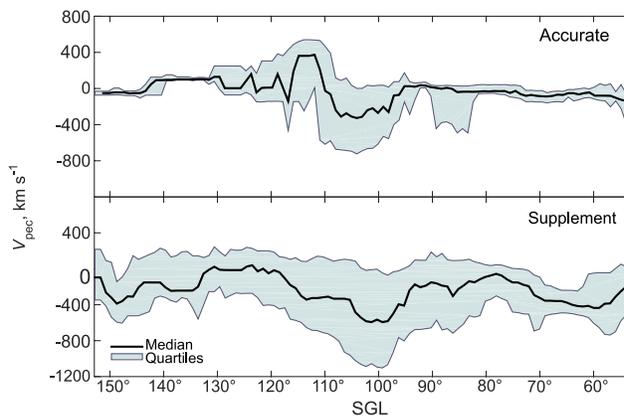


Рис. 7. Бегущая медиана и квантили peculiar скоростей галактик вдоль полосы.

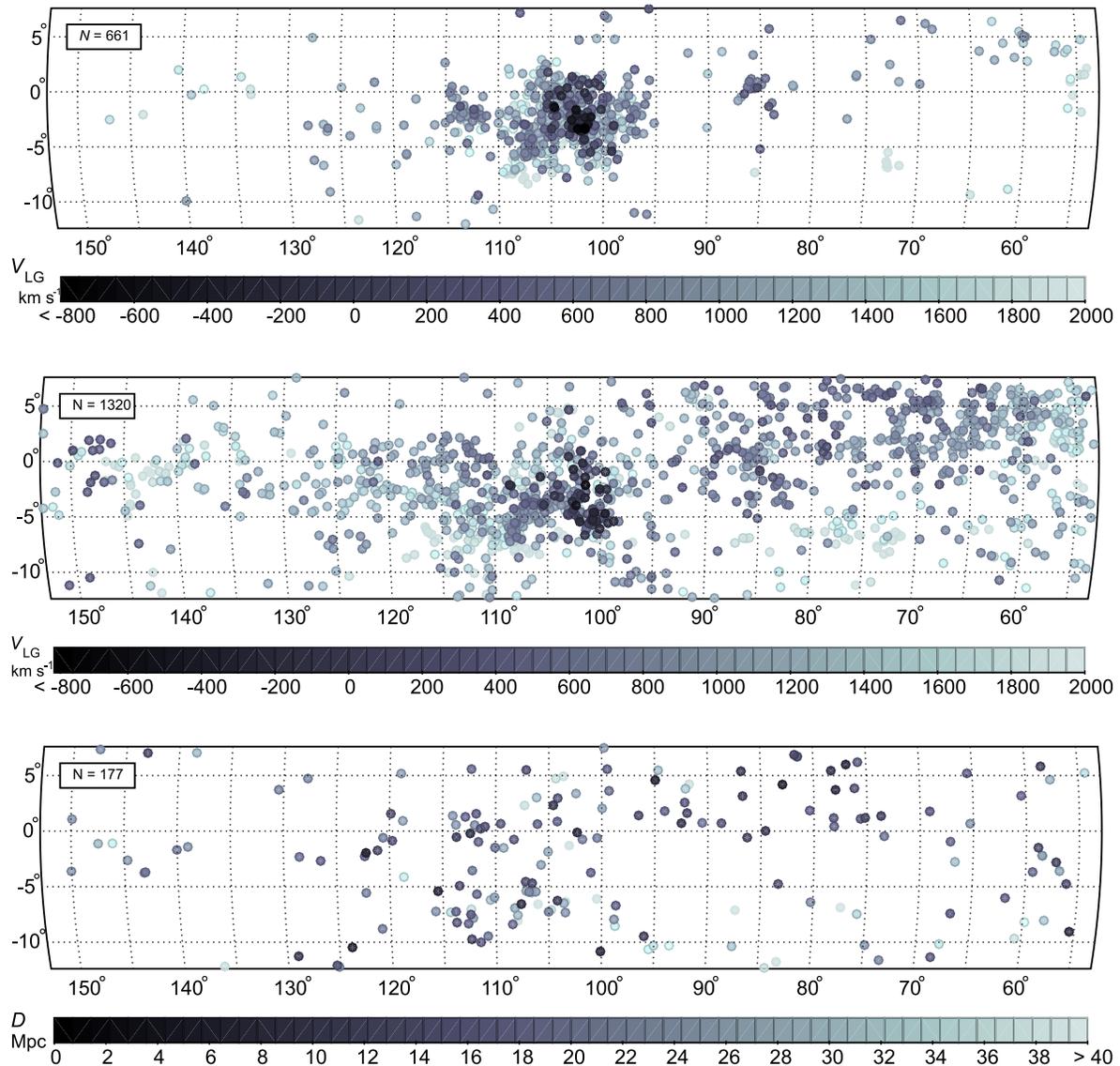


Рис. 8. Распределение вдоль полосы галактик ранних типов (вверху), поздних типов (посередине) и карликовых галактик, богатых газом (внизу). Шкалы лучевых скоростей либо расстояния приведены под каждой панелью.

Хайнес и Джованелли [33] показали, что спиральные галактики фиксированного морфологического типа в центре скопления характеризуются дефицитом содержания нейтрального водорода по сравнению с галактиками того же типа в общем поле. Выметание газа из дисков галактик в плотной вириальной зоне скопления является очевидным механизмом, объясняющим причину HI-дефицита.⁵ Наиболее эффективно процесс выме-

тания газа происходит в иррегулярных карликовых галактиках из-за их мелкой потенциальной ямы. На нижней панели рис. 8 приведено распределение богатых газом карликовых галактик, у которых $m_{21} < B_T$, а расстояния определены по барионному соотношению Талли–Фишера. Шкала расстояний указана под панелью. У этих объектов концентрация к скоплению Virgo едва заметна, что является независимой и выразительной иллюстрацией феномена HI-дефицита. Некоторая неоднородность распределения богатых газом галактик в рассматриваемой полосе вызвана границами, в пределах которых проводились HI-обзоры HIPASS и ALFALFA.

⁵Planck Collaboration [34] сообщили о детектировании сигнала от скопления Virgo, вызванного эффектом Сюняева–Зельдовича. По их оценке масса обобществленного горячего газа в Virgo составляет $(1.5 \pm 0.1) \times 10^{14} M_{\odot}$, что в 17 раз (!) превышает суммарную звездную массу скопления.

3.3. Близкие группы в полосе LSC

Макаров и Караченцев [35] (МК 11) опубликовали список 350 групп, состоящих из галактик с лучевыми скоростями $V_{LG} < 3500 \text{ км с}^{-1}$. В этом списке, охватывающем все небо, содержится 50 групп, координаты которых попадают в LSC полосу, а средняя лучевая скорость группы не превосходит 2000 км с^{-1} . Перечень этих групп представлен в таблице 2. В ее столбцах содержатся: (1) имя ярчайшего члена группы; (2), (3) сверхгалактические координаты центра группы; (4) число галактик с измеренными лучевыми скоростями; (5) средняя лучевая скорость группы (км с^{-1}); (6) среднее расстояние (Мпк); (7) пекулярная скорость центра группы (км с^{-1}).

Следует отметить, что в критерии кластеризации, использованном в МК 11, расстояния галактик определялись по их лучевым скоростям, поскольку прямых оценок расстояния было известно очень мало. По этой причине результаты кластеризации в зоне больших вириальных движений скопления Virgo оказались не вполне надежными. Основной массив галактик в Virgo кластеризовался вокруг гигантской эллиптической галактики NGC 4472, а не NGC 4486. При этом некоторые группы галактик с малыми лучевыми скоростями (NGC 4216, NGC 4342, NGC 4402, NGC 4552) оказались фиктивными структурами.

Рисунок 9 показывает распределение 50 групп из МК 11 в рассматриваемой полосе. Группы обозначены кружками, размер которых пропорционален логарифму числа членов с измеренными лучевыми скоростями, а цвет кружка отражает среднюю лучевую скорость группы по представленной внизу шкале.

Как следует из данных последнего столбца таблицы 2, некоторые группы галактик имеют большие пекулярные скорости $|V_{pec}| > 500 \text{ км с}^{-1}$: -749 км с^{-1} (NGC 3838), -518 км с^{-1} (NGC 3900), -972 км с^{-1} (NGC 4150), $+534 \text{ км с}^{-1}$ (NGC 4527), -542 км с^{-1} (NGC 4636) и -754 км с^{-1} (NGC 4900). Если погрешность определения индивидуального расстояния галактики примерно равна 20%, а группа содержит более четырех членов с оценками расстояния, то ожидаемая погрешность пекулярной скорости группы на типичном расстоянии около 20 Мпк составляет менее 150 км с^{-1} . Следовательно, большие пекулярные скорости у ряда групп в окрестностях Virgo не вызваны ошибками измерения расстояний галактик, а имеют физическую природу.

4. АНОМАЛИЯ СКОРОСТЕЙ В ОБЛАСТИ СОМА I

Наиболее выразительным примером наличия у галактик больших пекулярных скоростей является ассоциация галактик вокруг NGC 4278, называемая облаком Coma I. Рассматривая кандидаты в галактики Местного объема со скоростями $V_{LG} < 600 \text{ км с}^{-1}$, Караченцев и др. [15] обратили внимание, что далекие галактики среди них с $D > 13 \text{ Мпк}$ распределены на небе крайне неравномерно. Появление новых данных из HI-обзора ALFALFA сделало эту картину еще более контрастной.

Распределение галактик с $V_{LG} < 600 \text{ км с}^{-1}$ и $D > 13 \text{ Мпк}$ в нашей полосе представлено на верхней панели рис. 10. Галактики с аккуратными и с менее точными оценками расстояния изображены соответственно кружками и звездочками. Как и следовало ожидать, центр этого рисунка заполняют члены скопления Virgo с большими вириальными скоростями, направленными к наблюдателю. Помимо них на диаграмме имеется только облако галактик вокруг массивной эллиптической галактики NGC 4278 вблизи $SGL = 86^\circ$ и $SGB = 0^\circ$. Вероятность того, что все 23 галактики за пределами ядра Virgo располагаются справа от скопления, не превышает 10^{-6} .

Мы рассмотрели широкие окрестности NGC 4278 и выделили 28 галактик с малыми лучевыми скоростями и большими оценками расстояния как вероятные члены облака Coma I. К ним мы добавили еще десять галактик, которые не имеют пока оценок расстояния, но по своей фактуре могут принадлежать этому облаку. Сводка их представлена в таблице 3. Столбцы ее содержат: (1) имя галактики; (2) экваториальные координаты; (3) цифровой морфологический тип по де Вокулеру; (4) лучевую скорость (км с^{-1}); (5), (6) расстояние галактики (Мпк) и способ его оценки; (7) видимую В-величину; (8) пекулярную скорость (км с^{-1}). Распределение этих галактик на небе показано на нижней панели рис. 10. Галактики с измеренными расстояниями обозначены сплошными кружками, а галактики без расстояний — открытыми кружками. Малый и большой круг обозначают вириальный радиус (270 кпк) и радиус сферы нулевой скорости (1.0 Мпк) вокруг NGC 4278 при ее расстоянии 16.1 Мпк.

Как видим, облако Coma I представляет собой довольно рыхлое образование, где только треть галактик находится внутри вириального радиуса. С другой стороны, наличие в Coma I галактик раннего типа ($T < 0$) свидетельствует о продвинутой стадии эволюции группы. Вероятно, NGC 4278 с ее спутниками входит в состав протяженного филамента или листа, средняя пекулярная скорость

Таблица 2. Галактики в LSC-полосе

Group	SGL, deg	SGB, deg	N_v	$\langle V_{LG} \rangle$, km s ⁻¹	D , Mpc	V_{pec} km s ⁻¹	Group	SGL, deg	SGB, deg	N_v	$\langle V_{LG} \rangle$, km s ⁻¹	D , Mpc	V_{pec} km s ⁻¹
NGC 3458	54.59	-1.83	6	2000	-	-	NGC 4402	101.86	-3.24	4	117	-	-
NGC 3610	54.68	1.57	19	1794	28.3	-272	NGC 4472	107.02	-3.85	355	992	16.5	-212
NGC 3665	72.93	-6.81	11	2038	30.8	-210	NGC 4490	74.79	5.94	8	583	8.9	-67
NGC 3769	65.71	-0.73	6	780	15.1	-322	NGC 4527	112.47	-4.30	18	1592	14.5	534
NGC 3838	56.91	4.25	11	1368	29.0	-749	NGC 4535	107.15	-2.71	23	1747	-	-
NGC 3877	66.64	0.40	21	955	16.4	-242	NGC 4546	118.80	-5.72	4	879	11.9	10
NGC 3900	85.83	-6.90	4	1745	31.0	-518	NGC 4552	103.06	-1.17	12	230	-	-
NGC 3992	61.87	4.30	72	1097	18.5	-253	NGC 4565	90.21	2.76	11	1191	14.0	169
NGC 4062	82.41	-2.13	4	736	14.5	-322	NGC 4594	126.69	-6.68	11	856	9.6	155
NGC 4111	72.11	2.22	20	851	16.8	-375	NGC 4631	84.22	5.74	28	635	7.4	95
NGC 4123	110.43	-10.46	5	1150	16.9	-84	NGC 4636	113.03	-2.20	32	757	17.8	-542
NGC 4151	75.78	1.63	16	1031	14.7	-42	NGC 4643	113.75	-2.27	9	1195	-	-
NGC 4150	84.29	-1.32	4	211	16.2	-972	NGC 4666	116.23	-2.50	16	1427	16.7	208
NGC 4157	65.30	5.29	8	834	17.5	-443	NGC 4697	121.60	-3.11	37	1175	14.9	87
NGC 4189	100.66	-6.01	6	1987	30.0	-203	NGC 4753	117.43	-0.96	23	992	19.7	-446
NGC 4217	68.78	4.98	5	1085	19.1	-309	NGC 4808	112.36	1.36	5	591	-	-
NGC 4216	101.08	-5.60	16	55	-	-	NGC 4856	131.23	-3.02	5	1189	19.4	-227
NGC 4244	77.73	2.41	8	291	4.3	-23	NGC 4866	103.07	4.84	5	1909	30.1	-288
NGC 4258	68.74	5.55	15	551	7.7	-11	NGC 4900	114.42	2.03	8	779	21.0	-754
NGC 4261	108.38	-6.94	87	2060	29.4	-86	NGC 4995	124.98	1.38	4	1569	21.3	14
NGC 4274	85.67	0.34	14	990	16.3	-200	NGC 5054	133.93	0.61	7	1556	-	-
NGC 4303	109.86	-6.72	23	1387	-	-	NGC 5078	144.44	-1.85	26	1849	26.7	-100
NGC 4321	99.03	-3.18	17	1515	-	-	NGC 5084	139.13	-0.13	12	1560	22.4	-75
NGC 4346	69.26	6.19	5	787	16.4	-410	NGC 5170	136.11	3.15	4	1313	-	-
NGC 4342	107.50	-5.57	5	596	-	-	NGC 5236	147.93	0.99	12	321	4.9	-37

которого составляет -840 км с^{-1} , что сравнимо с вириальными скоростями в богатых скоплениях галактик.

Облако Coma I расположено на угловом расстоянии около 18° от центра Virgo, т.е. вблизи радиуса сферы нулевой скорости скопления (23°). Расстояния обеих структур от наблюдателя примерно одинаковы: 16.1 Мпк и 16.7 Мпк. Поэтому ожидаемое радиальное падение Coma I к Virgo соответствует его движению почти перпендикулярно к лучу зрения. В этом случае пекулярная скорость

Coma I относительно наблюдателя была бы незначительной.

Ранее мы предположили [15], что большие пекулярные движения в области Coma I могут быть вызваны наличием там темного аттрактора с массой примерно $2 \times 10^{14} M_\odot$. Другое объяснение этого загадочного феномена предполагает быстрое когерентное движение всего филамента вместе с группой NGC 4278 в сторону наблюдателя. Но причина такой высокой скорости остается неясной. Заметим, однако, что в системе микроволнового

Таблица 3. Галактики в окрестностях NGC 4278 с большими пекулярными скоростями и некоторые другие вероятные члены NGC 4278

Name	RA (2000.0) Dec	T	V_{LG} , km s ⁻¹	D , Mpc	Method	B_T , mag	V_{pec} , km s ⁻¹
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
DDO97	114857.2+235016	10	452	13.7	bs	15.1	-548
UGC 6881	115444.7+200320	10	522	16.4	TF	15.8	-675
PGC 4561602	115504.2+282053	-2	458	-	-	17.8	-
AGC 731823	115522.5+282030	9	512	23.8	TF	16.4	-1225
KDG 82	115539.4+313110	8	558	16.6	TF	14.8	-654
BTS 76	115844.1+273506	10	407	15.	rgb	16.5	-688
KUG1157+31	120016.2+311330	8	582	14.8	TF	15.1	-498
NGC 4080	120451.8+265933	8	517	15.0	TF	13.7	-578
LV1205+28	120534.2+281355	8	462	19.5	TF	16.7	-962
PGC 4560429	120633.5+303716	-2	464	-	-	18.2	-
UGC 7131	120911.8+305424	8	224	16.8	TF	15.7	-1002
NGC 4150	121033.6+302406	-1	210	13.7	sbf	12.5	-790
KK 127	121322.7+295518	9	103	17.3	TF	15.6	-1160
AGC 732009	121348.4+295731	10	196	16.5	TF	17.4	-1008
LV 1217+32	121732.0+323157	9	433	15.	rgb	18.4	-662
UGC 7321	121734.0+223225	7	339	17.2	TF	14.1	-917
AGC 229053	121815.5+253406	10	376	17.9	TF	17.9	-931
KK H 07J1218+30	121831.5+300340	10	600	-	-	17.0	-
BTS 116	121857.3+283311	-3	289	-	-	16.2	-
IC 779	121938.7+295300	-1	187	16.7	sbf	15.2	-1032
PGC 0213976	121943.6+293932	-2	549	-	-	17.3	-
NGC 4278	122006.8+291651	-2	588	16.1	sbf	11.1	-587
NGC 4286	122042.1+292045	2	611	14.7	TF	14.5	-448
PGC 1853813	122116.6+290221	-2	588	-	-	16.5	-
NGC 4308	122156.9+300427	-1	612	-	-	14.1	-
PGC 4323538	122216.7+305324	-1	545	-	-	17.1	-
UGC 07438	122219.5+300341	6	678	22.3	TF	15.8	-950
PGC 040195	122309.7+292059	-2	524	-	-	15.6	-
IC 3247	122314.0+285338	7	546	24.4	TF	15.4	-1235
AGC 749235	122409.9+261352	10	246	-	-	19.8	-
IC 3308	122517.9+264253	8	277	12.8	TF	15.4	-657
AGC 749236	122542.4+264836	10	234	15.1	TFb	16.6	-868
NGC 4414	122627.1+311324	5	719	17.9	cep	11.0	-588
NGC 4448	122815.5+283713	2	659	23.8	tf	12.0	-1078
UGC 7699	123248.0+373718	7	514	14.5	TF	13.3	-544
UGC 7774	123622.5+400019	7	563	22.6	TF	14.6	-1087
FGC1497	124700.6+323905	8	522	23.4	TF	16.8	-1186
UGC 7990	125027.2+282110	10	495	20.4	TF	16.2	-994

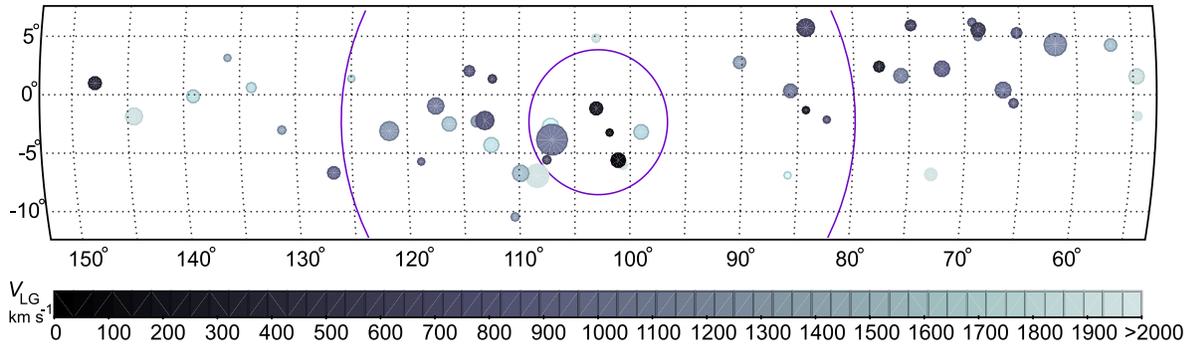


Рис. 9. Группы галактик в рассматриваемой полосе. Размер кружка пропорционален логарифму числа членов группы с измеренными лучевыми скоростями, цвет кружка обозначает среднюю лучевую скорость группы по шкале внизу. Большой и малый круги соответствуют радиусу сферы нулевой скорости и вириальному радиусу скопления Virgo.

космического излучения (СМВ) средняя пекулярная скорость облака Coma I оказывается заметно меньшей (-526 км с^{-1}), чем в системе отсчета Местной группы (-840 км с^{-1}).

5. ПАДЕНИЕ ГАЛАКТИК К ЦЕНТРУ VIRGO

Близкое массивное скопление Virgo производит значительные отклонения в скоростях окружающих галактик относительно невозмущенного хаббловского потока. Динамические модели и наблюдательные проявления этого эффекта, называемого Virgocentric infall, рассматривались Хоффманом и др. [36], Тонри и Дэвисом [37], Хоффманом и Солпитером [38], Талли и Шайя [39], Теерикорпи и др. [40], Экхольмом и др. [41], Тонри и др. [31, 42] и Караченцевым и Насоновой [21]. Используя высокоточные измерения расстояний на космическом телескопе Хаббла для галактик вблизи передней границы Virgo, Караченцев и др. [43] определили радиус сферы нулевой скорости, $R_0 = 7.2 \pm 0.7 \text{ Мпк}$, которая отделяет зону падения от общего космического расширения. Полная масса скопления, заключенная внутри радиуса R_0 , связана с ним соотношением

$$M_T = (\pi^2/8G)R_0^3 H_0^2 / f^2(\Omega_m),$$

где безразмерный параметр

$$f(\Omega_m) = (1 - \Omega_m)^{-1} - \frac{\Omega_m}{2}(1 - \Omega_m)^{-\frac{3}{2}} \cosh^{-1}\left(\frac{2}{\Omega_m} - 1\right)$$

уменьшается от 1 до 2/3 при изменении Ω_m от 0 до 1. В стандартной космологической модели с параметрами $\Omega_m = 0.24$ и $H_0 = 73 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ этому соответствует полная масса скопления $M_T = (8.3 \pm 2.3) \times 10^{14} M_\odot$, которая хорошо согласуется с вириальными оценками массы:

$$6.2 \times 10^{14} M_\odot \quad [44], \quad 7.5 \times 10^{14} M_\odot \quad [39] \quad \text{и} \quad 7.2 \times 10^{14} M_\odot \quad [45].$$

Новые данные о расстояниях галактик, расположенных вдоль экватора Местного сверхскопления, дают нам повод снова вернуться к оценке параметров R_0 и M_T скопления Virgo. Рисунок 11 представляет распределение галактик LSC-полосы в декартовых сверхгалактических координатах в проекции на плоскость Местного Сверхскопления. Верхняя и нижняя панели соответствуют галактикам с аккуратными и менее точными оценками расстояния. Конфигурация галактик внутри радиуса R_0 показана на вставках рисунка справа. Красными и синими символами мы обозначили галактики с пекулярными скоростями $V_{\text{pec}} < -300 \text{ км с}^{-1}$ и $V_{\text{pec}} > +300 \text{ км с}^{-1}$ соответственно. Галактики с малыми (промежуточными) скоростями помечены серым цветом.

В картине сферически симметричного падения окрестных галактик на Virgo галактики с положительными пекулярными скоростями должны располагаться на передней стороне скопления, а с отрицательными пекулярными скоростями — на дальней стороне. Такой эффект действительно виден на рис. 11 для обеих подвыборок. Некоторые галактики на нижней панели отклоняются от указанной закономерности, поскольку типичная ошибка определения их расстояний по Талли–Фишеру составляет 3–4 Мпк, что сравнимо с вириальным диаметром Virgo (3.6 Мпк).

«Серые» галактики на верхней панели с $|V_{\text{pec}}| < 300 \text{ км с}^{-1}$ образуют Местный лист, вытянутый в сторону Ursa Major. Размеры этого «холодного» домена составляют около $5 \times 15 \text{ Мпк}$. На нижней, более населенной панели заметны признаки пустого сектора позади скопления Virgo в направлении VirgoSE. Представленные в таблице 1 данные явно недостаточны, чтобы обнаружить дальнюю границу этой пустоты.

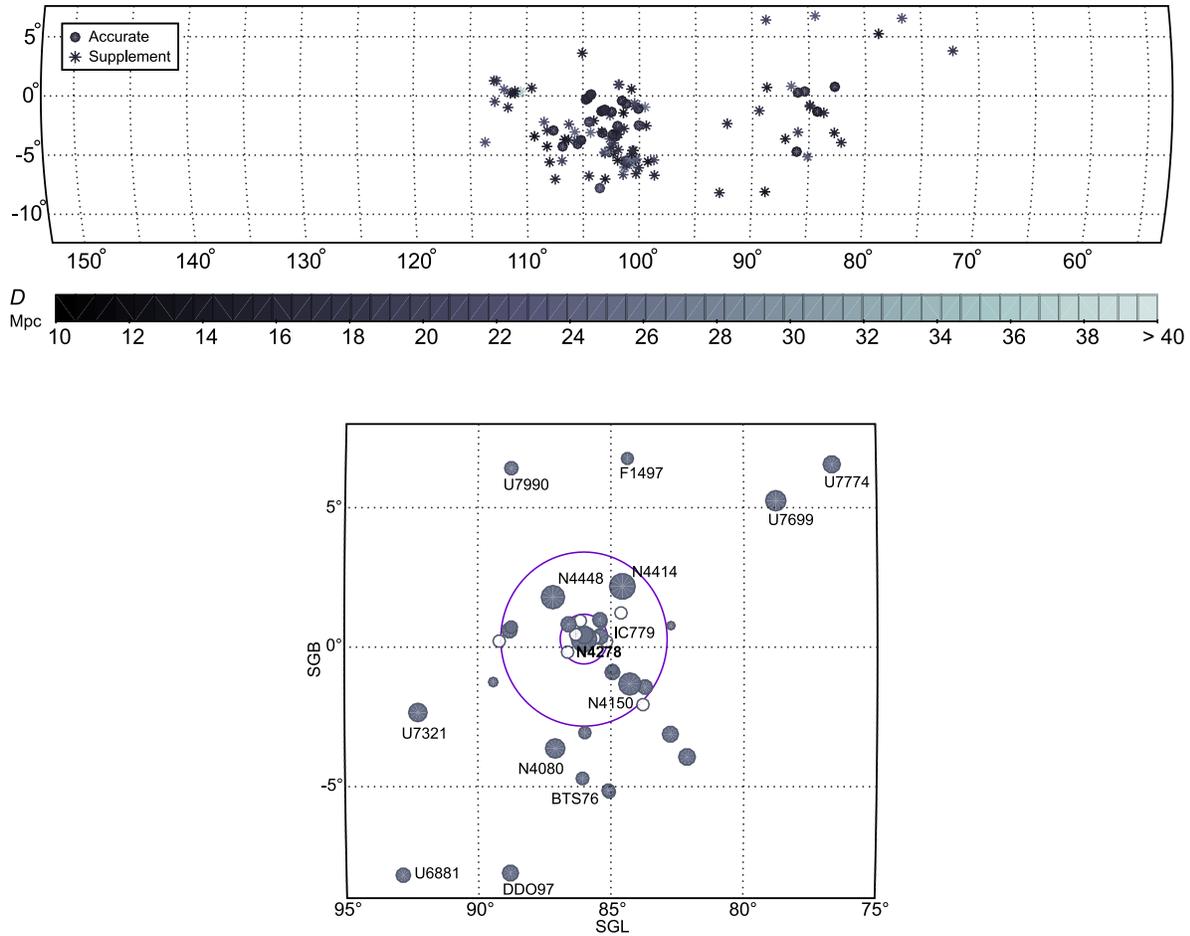


Рис. 10. Распределение галактик полосы с расстояниями $D > 13$ Мпк и лучевыми скоростями $V_{LG} < 600$ км с⁻¹ (верхняя панель). Галактики с аккуратными и менее точными оценками расстояния обозначены соответственно кружками и звездочками. Нижняя панель: распределение галактик облака Coma I вокруг NGC 4278 в сверхгалактических координатах. Размер символа пропорционален логарифму звездной массы галактики. Светлыми кружками помечены галактики без индивидуальных оценок расстояния.

Преобладание на рис. 11 галактик с отрицательными пекулярными скоростями обусловлено как падением Местной группы в сторону скопления с характерной скоростью около 200 км с⁻¹, так и движением массива галактик позади Virgo к центру скопления, т.е. к наблюдателю.

Чтобы определить радиус сферы нулевой скорости R_0 , мы вычисляли расстояние галактики от центра Virgo

$$D_{vc}^2 = D_g^2 + D_c^2 - 2D_g D_c \cos \Theta, \quad (1)$$

где D_g и D_c — расстояния галактики и центра скопления от наблюдателя, а Θ — угловое расстояние галактики от центра Virgo. Скорость галактики относительно центра скопления определялась нами в модели «малого аттрактора»

$$V_{vc} = V_g \cos \lambda - V_c \cos(\lambda + \Theta), \quad (2)$$

где λ — угол между лучом зрения и направлением от центра скопления на галактику:

$\text{tg } \lambda = D_c \sin \Theta / (D_g - D_c \cos \Theta)$, или в модели «большого аттрактора»

$$V_{vc} = [V_c \cos \Theta - V_g] / \cos \lambda. \quad (3)$$

В первом случае предполагается, что пекулярные скорости галактик в окрестности скопления невелики по сравнению со скоростями регулярного хаббловского потока. Во втором случае подразумевается, что у большинства галактик преобладает скорость падения к центру скопления (см. детали в [21]). Различие между двумя моделями становится малым, когда галактика находится строго позади ($\lambda \simeq 0$) или впереди ($\lambda \simeq 180^\circ$) центра скопления.

Для построения зависимости V_{vc} от D_{vc} необходимо фиксировать как расстояние, так и лучевую скорость центра Virgo. Согласно Мей и др. [14], $D_c = 16.7 \pm 0.2$ Мпк.

Определение V_c представляет собой более трудную задачу. Как известно, средняя лучевая ско-

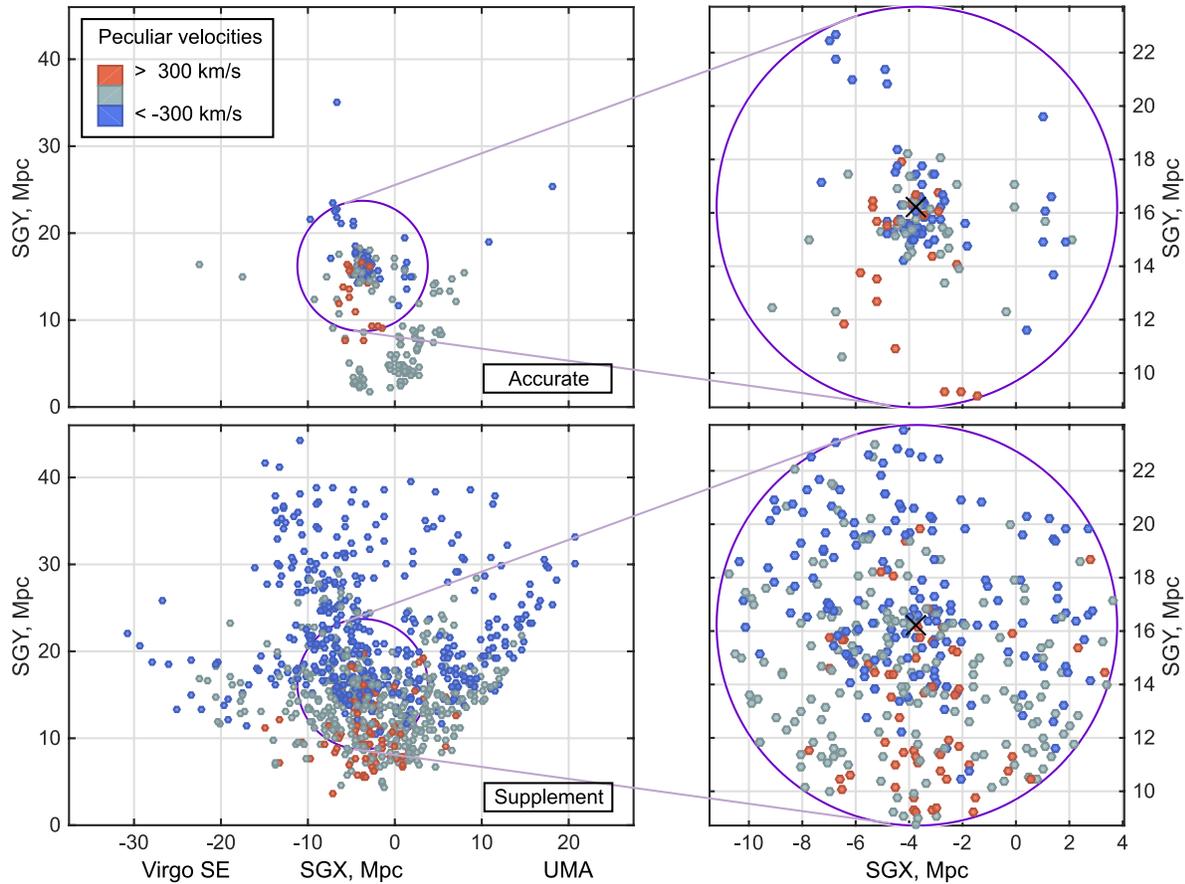


Рис. 11. Распределение галактик с большими и малыми пекулярными скоростями в декартовых сверхгалактических координатах. Круг соответствует радиусу сферы нулевой скорости.

рость и дисперсия лучевых скоростей Virgo зависят от морфологического состава выборки [46]. Поскольку разные методы определения расстояний опираются на выборки разного морфологического состава, а в самом скоплении имеет место эффект морфологической сегрегации, то возникает значительный разброс при разных подходах к оценке V_c . Дополнительные сложности возникают из-за наличия в Virgo известных субструктур: скопления M 87, скопления M 49, на которые проектируются структуры дальнего фона: облако W, облако M, группа NGC 4636 [47, 48].

Небогатая сводка оценок V_c , известных из литературы, представлена в верхней части таблицы 4. Одни значения V_c в ней определены только по центральной части Virgo, другие — для всего тела скопления. Числа галактик в выборках различаются на порядок. Бинггели и др. [46] использовали только данные о лучевых скоростях галактик, тогда как Мей и др. [14] принимали во внимание измеренные ими расстояния галактик. В двух случаях ([5, 31]) пекулярная скорость скопления $V_{c,pec} = V_c - 73D_c$ была получена из модельных соображений.

Мы определили величины V_c , D_c и $V_{c,pec}$, используя лучевые скорости и расстояния галактик, собранные в таблице 1. Для галактик, расположенных внутри вириального радиуса скопления, а также внутри сферы радиуса R_0 , средние значения представлены в нижней части таблицы 4. При этом мы отдельно учитывали члены Virgo с аккуратными и со вторичными оценками расстояний. Различия между приведенными величинами лежат в пределах статистических погрешностей. В наши оценки V_c была внесена поправка $+40 \text{ км с}^{-1}$, которая учитывала ограничение галактик по скоростям: $V_{LG} < 2000 \text{ км с}^{-1}$ при дисперсии лучевых скоростей у членов Virgo 600 км с^{-1} . В качестве оптимальных параметров мы принимаем значения $V_c = 984 \text{ км с}^{-1}$, $D_c = 16.65 \text{ Мпк}$ и $V_{c,pec} = -231 \text{ км с}^{-1}$.

Число галактик с аккуратно измеренными расстояниями позади скопления Virgo невелико. Галактики с TF-оценками расстояния, расположенные позади скопления, имеют линейную погрешность расстояния около 4–8 Мпк, сравнимую с R_0 . Поэтому главным источником данных, харак-

Таблица 4. Средняя лучевая скорость и среднее расстояние скопления Virgo

Sample	Number	$V_c(LG)$, km s^{-1}	D_c , Mpc	$V_{c,\text{pec}}$, km s^{-1}	Reference
All members (V)	385	956 ± 55	[16.5]	-248	[46]
Core members (V)	271	935 ± 35	[16.5]	-270	[46]
All members (D)	79	1034 ± 61	16.5 ± 0.1	-170	[14]
Core members (D)	32	984 ± 105	16.7 ± 0.2	-235	[14]
Infall pattern	189	—	—	-139	[42]
Cosmic flow	—	—	—	-185	[5]
Within R_V , accur	75	950 ± 62	16.45 ± 0.08	-251	present paper
Within R_0 , accur	119	975 ± 46	16.32 ± 0.16	-216	present paper
Within R_0 , suppl	372	996 ± 27	16.44 ± 0.16	-204	present paper
Within R_0 , all	491	985 ± 23	16.38 ± 0.14	-211	present paper
Adopted		984	16.65	-231	

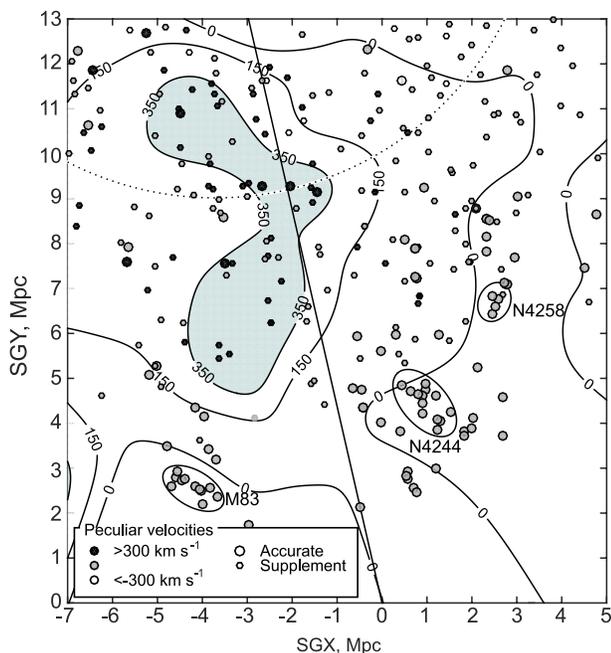


Рис. 12. Поле пекулярных скоростей на передней стороне скопления Virgo.

теризующих картину падения на Virgo, остаются пока галактики с высокоточными расстояниями на передней стороне скопления. Распределение галактик в этой области в декартовых сверхгалактических координатах в проекции на плоскость Местного Сверхскопления представлено на рис. 12. Дуга окружности обозначает радиус сферы нулевой скорости R_0 с центром скопления

на $SGX = -3.7$ Мпк, $SGY = 16.1$ Мпк. Данные об индивидуальных пекулярных скоростях галактик усреднены гауссовым фильтром с параметром $\sigma = 0.75$ Мпк. Значения усредненных пекулярных скоростей показаны линиями с цифрами (в km s^{-1}). Положения трех близких групп: M 83, NGC 4244 и NGC 4258 обозначены эллипсами.

Как видим, зона максимальных положительных значений V_{pec} имеет сложную форму, несколько вытянутую в направлении на центр Местного Сверхскопления. Амплитуда скорости падения достигает приблизительно 500 km s^{-1} . С ростом углового расстояния от центра Virgo амплитуда уменьшается из-за эффекта проекции, теряясь среди неизвестных возможных вариаций поперечной компоненты потока.

Среди галактик, которые имеют аккуратные оценки расстояния, мы отобрали объекты с подходящим ракурсом: $\lambda = [0-45^\circ]$ и $\lambda = [135-180^\circ]$, где λ — угол между лучом зрения и линией, соединяющей галактику с центром скопления. Хаббловская диаграмма для них относительно центра скопления представлена на рис. 13. Верхняя и нижняя панели рисунка соответствуют модели малого и большого аттрактора. Галактики, расположенные впереди и позади скопления, показаны сплошными и пустыми кружками соответственно. Кроме них квадратами мы нанесли на диаграммы центры тех групп, средние расстояния которых определены с хорошей точностью, а углы λ лежат в указанном выше интервале. Центральная зона $D_{\text{vc}} < 3.5$ Мпк, исключенная из анализа пекулярных скоростей, затемнена. Линии прямой и обратной регрессии для

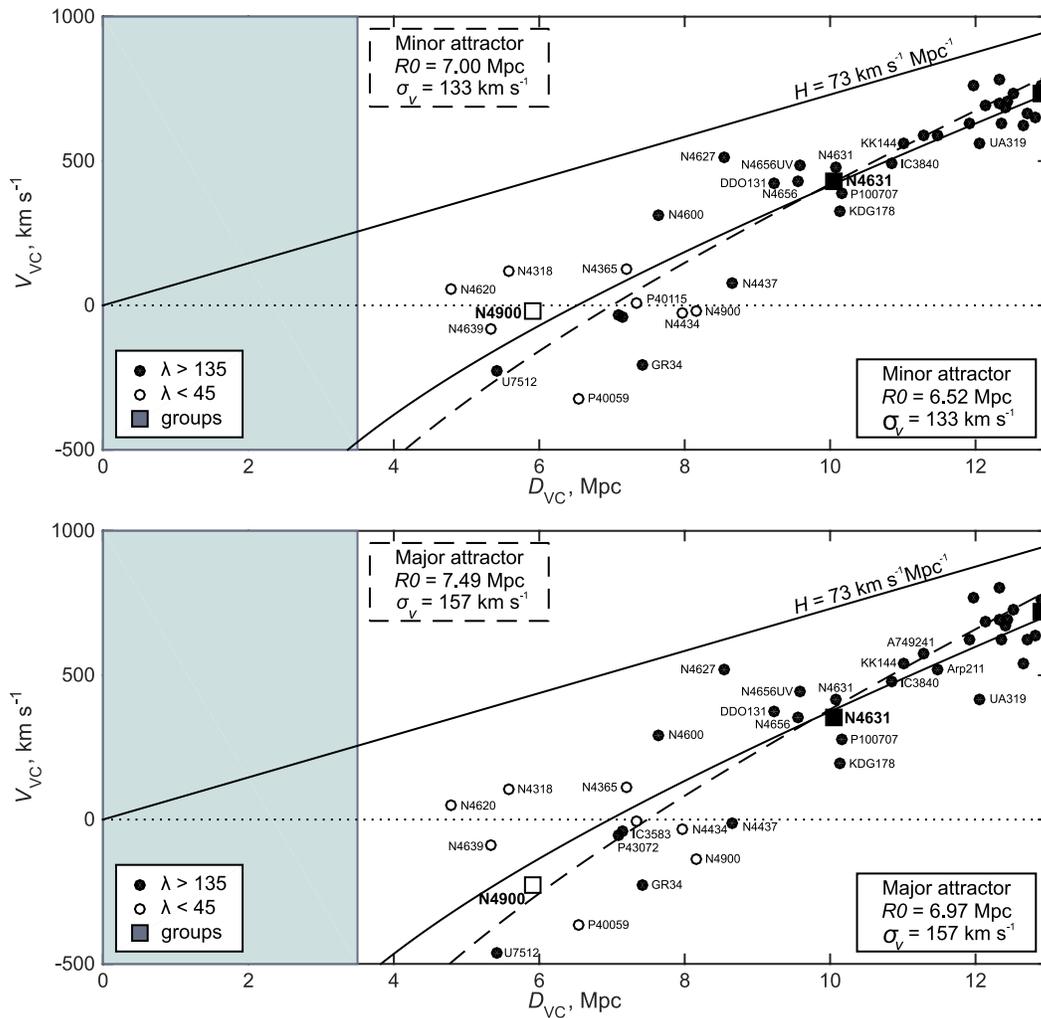


Рис. 13. Хаббловская диаграмма «скорость–расстояние» относительно центра скопления Virgo. Верхняя и нижняя панели соответствуют модели малого и большого аттрактора. Центральная зона, исключенная из анализа пекулярных скоростей, отмечена серым. Отдельные галактики показаны кружками, группы галактик — квадратами. Сплошные и пустые символы соответствуют галактикам впереди и позади скопления Virgo.

возмущенного хаббловского потока пересекают уровень нулевой скорости при 6.52 и 7.00 Мпк (малый аттрактор) и 6.97 и 7.49 Мпк (большой аттрактор).

В качестве средней оценки радиуса сферы нулевой скорости мы принимаем $R_0 = (7.0 \pm 0.3)$ Мпк, чему соответствует полная масса скопления $M_T = (7.4 \pm 0.9) \times 10^{14} M_\odot$. Эта оценка находится в хорошем соответствии с оценками вириальной массы Virgo: $(7.5 \pm 1.5 \times 10^{14} M_\odot)$ [39] и $7.0 \times 10^{14} M_\odot$ [42], приведенным к значению параметра $H_0 = 73 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$. Замечательное согласие оценок массы скопления Virgo, сделанных по внутренним (вириальным) и внешним движениям галактик, свидетельствует о том, что на периферии скопления между $R_v \simeq 2$ Мпк и $R_0 \simeq$

$\simeq 7$ Мпк не содержится значительного количества темной материи.

6. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Мы рассмотрели область неба размером $100^\circ \times 20^\circ$, расположенную вдоль экватора Местного сверхскопления симметрично по отношению к М 87 как центру скопления Virgo. На этой площади, занимающей 5% всего неба, находится 2158 галактик с лучевыми скоростями $V_{LG} < 2000 \text{ км с}^{-1}$, что составляет около 40% их общего числа на небе с такими скоростями. Для 567 галактик мы определили расстояния D по соотношению Талли–Фишера. Вместе с другими оценками расстояния из литературы, суммарная доля галактик полосы с пекулярными скоростями $V_{pec} = V_{LG} - 73D$ достигла 52%. В рассматриваемой полосе хорошо

представлено как вириальное ядро Virgo и зона падения вокруг него, так и обширные области общего поля.

Распределение галактик ранних типов (E, S0) показывает известную сильную концентрацию к ядру скопления. Галактики поздних типов (S, I, BCD) больше представлены за пределами вириального радиуса Virgo. Богатые газом карликовые галактики фактически не проявляют заметной концентрации к скоплению.

Среди 50 групп галактик в нашей полосе 6 групп имеют средние пекулярные скорости 500–1000 км с⁻¹, сравнимые с дисперсией вириальных скоростей у галактик Virgo. Облако из 20–30 галактик вокруг NGC 4278 (Coma I) находится на расстоянии около 16 Мпк от нас и около 5 Мпк от центра Virgo, имея скорость движения к наблюдателю 840 км с⁻¹. Природа такой аномалии скоростей неясна и заслуживает самого пристального изучения.

Галактики, близкие к скоплению Virgo, участвуют в падении на него с характерной амплитудой около 500 км с⁻¹. Используя галактики с высокоточными расстояниями, мы оценили радиус сферы нулевой скорости Virgo как $R_0 = (7.0 \pm 0.3)$ Мпк. Эта величина соответствует полной массе скопления $M_T = (7.4 \pm 0.9) \times 10^{14} M_\odot$ в хорошем согласии с вириальной оценкой массы. Такое согласие означает, что периферийные области скопления Virgo вплоть до расстояния около $4R_V$ не содержат значительного количества темной материи. Аналогичный результат мы получили для Местной группы и других соседних групп [25].

Готовя эту статью, мы ознакомились с работой Шайя и др. [49] по динамике Местного сверхскопления, в которой авторы приводят оценки радиуса R_0 и полной массы скопления Virgo, совпадающие с нашими оценками в пределах статистических ошибок.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность Российскому научному фонду (грант РНФ 14-12-00965-П). В данной работе были использованы базы данных HyperLeda (<http://leda.univ-lyon1.fr>) и NED (<http://ned.ipac.caltech.edu>). Авторы благодарят Д. И. Макарова за ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Klypin, Y. Hoffman, A. V. Kravtsov, and S. Gottlöber, *Astrophys. J.* **596**, 19 (2003).
2. W. E. Schaap, Ph.D. Thesis (University of Groningen, 2007).
3. L. Ceccarelli, A. N. Ruiz, M. Lares, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **461**, 4013 (2016).
4. A. Kogut, C. Lineweaver, G. F. Smoot, et al., *Astrophys. J.* **419**, 1 (1993).
5. R. B. Tully, E. J. Shaya, I. D. Karachentsev, et al., *Astrophys. J.* **676**, 184–205 (2008).
6. R. B. Tully, H. M. Courtois, and J. G. Sorce, *Astron. J.* **152**, 50 (2016).
7. R. Scaramella, *Astrophys. Lett. Commun.* **32**, 137 (1995).
8. R. C. Kraan-Korteweg, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **66**, 255 (1986).
9. K. L. Masters, Ph.D. Thesis (Cornell University, New York, USA, 2005).
10. B. S. Koribalski, L. Staveley-Smith, V. A. Kilborn, et al., *Astron. J.* **128**, 16 (2004).
11. M. P. Haynes, R. Giovanelli, A. M. Martin, et al., *Astron. J.* **142**, 170 (2011).
12. K. Kovač, T. A. Oosterloo, and J. M. van der Hulst, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **400**, 743 (2009).
13. R. B. Tully and J. R. Fisher, *Astron. and Astrophys.* **54**, 661 (1977).
14. S. Mei, J. P. Blakeslee, P. Côté, et al., *Astrophys. J.* **655**, 144 (2007).
15. I. D. Karachentsev, O. G. Nasonova, and H. M. Courtois, *Astrophys. J.* **743**, 123 (2011).
16. I. D. Karachentsev, O. G. Nasonova, and H. M. Courtois, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **429**, 2264 (2013).
17. I. D. Karachentsev and O. G. Nasonova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **429**, 2677 (2013).
18. I. D. Karachentsev, O. G. Nasonova, and V. E. Karachentseva, *Astrophysical Bulletin* **70**, 1 (2015).
19. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, and O. G. Nasonova, *Astrophysics* **57**, 457 (2014).
20. I. D. Karachentsev, O. G. Kashibadze, and V. E. Karachentseva, *Astrophysical Bulletin* **72**, 111 (2017).
21. I. D. Karachentsev and O. G. Nasonova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **405**, 1075 (2010).
22. O. G. Nasonova, J. A. de Freitas Pacheco, and I. D. Karachentsev, *Astron. and Astrophys.* **532**, A104 (2011).
23. O. G. Nasonova and I. D. Karachentsev, *Astrophysics* **54**, 1 (2011).
24. D. Makarov, P. Prugniel, N. Terekhova, et al., *Astron. and Astrophys.* **570**, A13 (2014).
25. O. G. Kashibadze and I. D. Karachentsev, *Astron. and Astrophys.* **609**, A11 (2018).
26. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182**, 543–558 (2009).
27. K. C. Chambers, E. A. Magnier, N. Metcalfe, et al., *arXiv:1612.05560* (2016).
28. R. B. Tully and M. J. Pierce, *Astrophys. J.* **533**, 744 (2000).
29. I. D. Karachentsev, E. I. Kaisina, and O. G. Kashibadze, *Astron. J.* **153**, 6 (2017).
30. M. G. Lee, W. L. Freedman, and B. F. Madore, *Astrophys. J.* **417**, 553 (1993).

31. J. L. Tonry, A. Dressler, J. P. Blakeslee, et al., *Astrophys. J.* **546**, 681 (2001).
32. L. Ferrarese, P. Côté, J.-C. Cuillandre, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **200**, 4 (2012).
33. M. P. Haynes, R. Giovanelli, and G. L. Chincarini, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **22**, 445 (1984).
34. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab), *Astron. and Astrophys.* **596**, A101 (2016).
35. D. Makarov and I. Karachentsev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **412**, 2498 (2011).
36. G. L. Hoffman, D. W. Olson, and E. E. Salpeter, *Astrophys. J.* **242**, 861 (1980).
37. J. L. Tonry and M. Davis, *Astrophys. J.* **246**, 680 (1981).
38. G. L. Hoffman and E. E. Salpeter, *Astrophys. J.* **263**, 485 (1982).
39. R. B. Tully and E. J. Shaya, *Astrophys. J.* **281**, 31 (1984).
40. P. Teerikorpi, L. Bottinelli, L. Gouguenheim, and G. Paturel, *Astron. and Astrophys.* **260**, 17 (1992).
41. T. Ekholm, P. Lanoix, P. Teerikorpi, et al., *Astron. and Astrophys.* **351**, 827 (1999).
42. J. L. Tonry, J. P. Blakeslee, E. A. Ajhar, and A. Dressler, *Astrophys. J.* **530**, 625 (2000).
43. I. D. Karachentsev, R. B. Tully, P.-F. Wu, et al., *Astrophys. J.* **782**, 4 (2014).
44. G. de Vaucouleurs, *Astrophys. J.* **131**, 585 (1960).
45. E. Giraud, *Astrophys. J. Lett.* **524**, L15 (1999).
46. B. Binggeli, C. C. Popescu, and G. A. Tammann, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **98**, 275 (1993).
47. E. Kourkchi and R. B. Tully, *Astrophys. J.* **843**, 16 (2017).
48. S. Kim, S.-C. Rey, H. Jerjen, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **215**, 22 (2014).
49. E. J. Shaya, R. B. Tully, Y. Hoffman, and D. Pomarède, *Astrophys. J.* **850**, 207 (2017).

Surveying the Local Supercluster Plane

O. G. Kashibadze, I. D. Karachentsev, and V. E. Karachentseva

We investigate the distribution and velocity field of galaxies situated in a band of 100 by 20 degrees centered on M87 and oriented along the Local supercluster plane. Our sample amounts 2158 galaxies with radial velocities less than 2000 km s^{-1} . Of them, 1119 galaxies (52%) have distance and peculiar velocity estimates. About 3/4 of early-type galaxies are concentrated within the Virgo cluster core, most of the late-type galaxies in the band locate outside the virial radius. Distribution of gas-rich dwarfs with $M_{\text{HI}} > M_*$ looks to be insensitive to the Virgo cluster presence. Among 50 galaxy groups in the equatorial supercluster band 6 groups have peculiar velocities about $500\text{--}1000 \text{ km s}^{-1}$ comparable with virial motions in rich clusters. The most cryptic case is a flock of nearly 30 galaxies around NGC 4278 (Coma I cloud), moving to us with the mean peculiar velocity of -840 km s^{-1} . This cloud (or filament?) resides at a distance of 16.1 Mpc from us and approximately 5 Mpc away from the Virgo center. Galaxies around Virgo cluster exhibit Virgocentric infall with an amplitude of about 500 km s^{-1} . Assuming the spherically symmetric radial infall, we estimate the radius of the zero-velocity surface to be $R_0 = (7.0 \pm 0.3) \text{ Mpc}$ that yields the total mass of Virgo cluster to be $(7.4 \pm 0.9) \times 10^{14} M_\odot$ in tight agreement with its virial mass estimates. We conclude that the Virgo outskirts does not contain significant amounts of dark mater beyond its virial core.

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