

УДК 524.77; 524.7-54; 524.7-17; 524-82

РАДИУС ГАЛО (SPLASHBACK-РАДИУС) ГРУПП И СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК НА МАЛЫХ МАСШТАБАХ

© 2022 Ф. Г. Копылова^{1*}, А. И. Копылов¹¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 11 января 2022 года; после доработки 22 мая 2022 года; принята к публикации 23 июня 2022 года

В работе представлены результаты исследования распределения галактик в проекции вдоль радиуса ($R \leq 3R_{200c}$) 157 групп и скоплений галактик локальной Вселенной ($0.01 < z < 0.10$) с дисперсиями лучевых скоростей $200 \text{ км с}^{-1} < \sigma < 1100 \text{ км с}^{-1}$. Мы ввели новую наблюдаемую границу гало скоплений галактик, которую отождествили со splashback-радиусом R_{sp} . Мы также выделили ядро групп/скоплений галактик радиусом R_c . Эти радиусы определяются наблюдаемым интегральным распределением числа галактик в зависимости квадрата углового радиуса от центра группы/скопления, совпадающего (как правило) с ярчайшей галактикой. Для всей выборки мы получили, что граница гало темной материи R_{sp} групп/скоплений галактик пропорциональна радиусу вириализованной области R_{200} . Мы измерили средний радиус $\langle R_{\text{sp}} \rangle = 1.14 \pm 0.02$ Мпк для групп галактик ($\sigma \leq 400 \text{ км с}^{-1}$) и $\langle R_{\text{sp}} \rangle = 2.00 \pm 0.07$ Мпк для скоплений галактик ($\sigma > 400 \text{ км с}^{-1}$). Среднее отношение радиусов $\langle R_{\text{sp}}/R_{200} \rangle = 1.40 \pm 0.02$ или $\langle R_{\text{sp}}/R_{200m} \rangle = 0.88 \pm 0.02$.

Ключевые слова: галактики: скопления: группы: общие сведения — галактики: эволюция — космология: крупномасштабная структура Вселенной

1. ВВЕДЕНИЕ

Скопления галактик — самые большие гравитационно связанные объекты во Вселенной. Они представляют собой сколлапсировавшие структуры, рассматриваемые как гало темной материи. Скопления галактик увеличивают свою массу из-за падения на них галактик и более мелких групп галактик вдоль филаментов, а также в результате непрерывного падения объектов темной материи. Они не имеют четких границ, и часто их границы определяются по контрасту плотности относительно критической или средней плотности Вселенной. Эволюция скоплений галактик рассматривается в рамках модели сферического коллапса в расширяющейся Вселенной (Gott 1973, Gunn and Gott 1972). В этой модели вириализация системы галактик наступает в несколько осцилляций: за максимальным сжатием следует расширение с последующим вторичным сжатием. Особый интерес вызывает область скоплений галактик, где встречаются падающие на него впервые модельные частицы темной материи (галактики) из филаментов, и коллапсирующее сферическое гало. В результате N -body моделирования движения гало темной материи (галактик) в работах Valogh et al.

(2000), Gill et al. (2005), Mamon et al. (2004) получено, что значительная часть таких частиц (до 50%), расположенных за пределами вириализованных областей скоплений галактик (до $2R_{\text{vir}}$ или $2R_{200c}$ ¹), уже побывала внутри ограничиваемой этими пределами области. Это так называемые «backsplash»-галактики, которые в ходе гравитационного коллапса системы прошли один раз перигалактический центр своей орбиты и после достижения апоцентра вернутся в него опять. В статье Haines et al. (2015) приведены результаты Millennium-симуляций для 75 скоплений галактик на $z = 0.0$ и показано, что значительная часть «backsplash»-галактик «отскакивает» до $3r_{\text{proj}}/r_{200}$ на фазовой диаграмме. В работе Pimbblet (2010) по данным каталога SDSS и модельных симуляций для 14 скоплений галактик определена доля «backsplash»-галактик в пределах $1-2 R_{\text{vir}}$.

Радиус скоплений галактик (физическая граница гало), splashback-радиус R_{sp} , был введен

¹Здесь R_{200c} (далее R_{200}) — радиус скопления, в пределах которого плотность превышает критическую плотность Вселенной в 200 раз. В наших работах он определяется дисперсией лучевых скоростей галактик в скоплениях. В модельных расчетах часто используется другой радиус — R_{200m} , представляющий собой радиус скопления, в пределах которого плотность превышает среднюю плотность Вселенной в 200 раз.

*E-mail: flera@sao.ru

Adhikari et al. (2014) как радиус, на котором происходит нагромождение недавно аккрецированных гало темной материи в пределах апоцентров их орбит. Согласно результатам N -body-моделирования (Adhikari et al. 2014, Diemer and Kravtsov 2014), R_{sp} -радиус четко выделяется по резкому спаду на составной профилю плотности гало темной материи. Модельные симуляции More et al. (2015) показали, что локализация R_{sp} зависит от темпа аккреции массы: в скоплении с высоким темпом аккреции $R_{\text{sp}} \sim 0.8-1R_{200\text{m}}$, с медленным — порядка $1.5R_{200\text{m}}$. В работе Fong and Han (2021) определен радиус скоплений галактик, заключающий в себе splashback-орбиты большинства галактик, примерно равный $2-3R_{\text{sp}}$.

Существует ряд работ, в которых проведены поиск и измерение этого радиуса в наблюдаемых скоплениях галактик (в основном, далеких, с $z > 0.1$). Радиусы R_{sp} были измерены разными методами: по поверхностной плотности галактик (Adhikari et al. 2016, Baxter et al. 2017, More et al. 2016), с помощью метода слабого гравитационного линзирования (Chang et al. 2018, Contigiani et al. 2019, Umetsu and Diemer 2017). Busch and White (2017) в симуляциях использовали такой же алгоритм выделения скоплений галактик, как и для реальных наблюдательных данных, и показали, что эффекты проекции фоновых галактик на скопления могут исказить измеряемый радиус R_{sp} . Выборка скоплений галактик, составленная не по оптическим параметрам, а по SZ-сигналу, лучше коррелирующему с массой, позволила также измерить радиусы R_{sp} (Shin et al. 2019, Zürcher and More 2019). Измерение радиуса R_{sp} (размера темного гало) в скоплениях галактик разными методами имеет важное значение для исследования крупномасштабной структуры Вселенной.

В данной работе мы представляем анализ наблюдательных проявлений splashback-особенности в выборке групп и скоплений галактик (по данным каталога SDSS). Ранее мы нашли «край» 29 скоплений галактик, четко выявляемый по интегральному распределению числа всех галактик скопления в зависимости от квадрата расстояния от центра, названный нами радиусом гало, R_h (Korylov and Korylova 2015). Этот радиус, как правило, больше R_{200} и измеряется по профилю в проекции, а именно по точке перехода от крутого роста числа галактик в центре скоплений к его линейному уменьшению. Позднее мы отождествили этот радиус со splashback-радиусом R_{sp} и привели результаты для примерно 100 групп и скоплений галактик (Korylov and Korylova 2015, Korylova and Korylov 2016; 2018; 2019). В работах Korylova and Korylov (2018; 2019) показано, что распределение галактик ранних типов в скоплениях позволяет более точно

оценить искомый радиус. По 40 системам галактик нами определен средний $R_{\text{sp}} = 1.54 \pm 0.06 R_{200}$ или $R_{\text{sp}} = 0.96 \pm 0.06 R_{200\text{m}}$ (если учесть что $4R_{200} \approx 2.5R_{200\text{m}}$), который изменится от 1.10 Мпк у группы NGC 5627 с $\sigma = 314 \text{ км с}^{-1}$ до от 4.17 Мпк у скопления Coma (A 1656) с $\sigma = 921 \text{ км с}^{-1}$.

В данном исследовании мы увеличили нашу выборку до 157 групп и скоплений галактик из областей сверхскоплений галактик Leo, Hercules, Ursa Major, Corona Borealis, Bootes, из области сверхскопления A 1656/A1367, других более мелких сверхскоплений и поля.

Работа выполнена нами с привлечением данных каталогов SDSS (Sloan Digital Sky Survey, DRs 7, 8), 2MASS XSC (2MASX, Two-Micron ALL-Sky Survey Extended Source Catalog) и базы данных NED (NASA Extragalactic Database).

Статья организована следующим образом. В разделе 2 описаны выборка групп/скоплений галактик и процедура определения радиусов R_{sp} и R_c исследуемых объектов. В разделе 3 представлено построение зависимостей найденных радиусов от основных параметров групп и скоплений галактик, которые были определены нами в более ранних работах. В разделе 4 перечислены основные результаты работы. Мы использовали следующие космологические параметры: $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$.

2. ОПИСАНИЕ ДАННЫХ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ РАДИУСОВ

Наша выборка состоит из 157 групп и скоплений галактик из областей сверхскоплений галактик Leo ($N = 12$), Hercules ($N = 27$), Ursa Major ($N = 19$), Corona Borealis ($N = 7$), Bootes ($N = 13$), из других более мелких сверхскоплений и полей ($N = 11$, $N = 20$), групп галактик из области сверхскопления A 1656/A1367 ($N = 48$). Выборка скоплений галактик в сверхскоплениях была составлена для измерения пекулярных скоростей скоплений галактик в них. Кроме того, мы исследовали зависимость между динамической массой в пределах вириализованного радиуса R_{200} и инфракрасной светимостью в фильтре K (данные каталога 2MASX). Все скопления галактик имеют зарегистрированное рентгеновское излучение, кроме 21 группы галактик. Сведения об их рентгеновской светимости взяты из каталогов скоплений, составленных по наблюдениям на ROSAT (более подробная ссылка даны в упоминаемых выше работах). Выборка групп/скоплений галактик охватывает максимальный диапазон дисперсий лучевых скоростей от 200 км с^{-1} до 1100 км с^{-1} и имеет красные смещения $0.01 < z < 0.10$.

Для них нами измерены гелиоцентрические красные смещения, дисперсии лучевых скоростей с космологической поправкой $(1+z)^{-1}$, радиусы R_{200} , K -светимости $L_{K,200}$ ($M_K < -21^m$), динамические массы M_{200} и другие параметры в

пределах радиуса R_{200} (Kopylov and Kopylova 2015, Kopylova and Kopylov 2016; 2017; 2018; 2019). Физические характеристики исследуемых групп и скоплений галактик групп и скоплений галактик приведены в колонках (1)–(7) таблицы 1.

Таблица 1. Динамические параметры групп и скоплений галактик: (1) — имя скопления галактик; (2) — гелиоцентрическое красное смещение; (3) — дисперсия лучевых скоростей с космологической поправкой $(1+z)^{-1}$; (4) — масса гало M_{200} ; (5) $L_{K,200}$ — светимость; (6) L_X — рентгеновская светимость в полосе 0.1–2.4 кэВ по данным рентгеновских каталогов (подробнее см. в тексте). Светимости пересчитаны для найденных нами лучевых скоростей скоплений и используемой нами модели. (7) — радиус R_{200} в Мпк; (8) — R_{sp} в Мпк; (9) — R_c в Мпк; (10) — R_{sp}/R_{200} ; (11) — концентрация галактик Σ_5 ярче $M_K = -23^m$, вычисленная по расстоянию пятой галактики от центра; (12) — разница звездных величин между ярчайшей и четвертой по яркости галактикам $\Delta M_{1,4}$

System	z_h	σ , km s $^{-1}$	M_{200} , $10^{14} M_\odot$	$L_{K,200}$, $10^{12} M_\odot$	$L_{0.1-2.4\text{ keV}}$, $10^{44} \text{ erg s}^{-1}$	R_{200} , Mpc	R_{sp} , Mpc	R_c , Mpc	R_{sp}/R_{200}	Σ_5	$\Delta M_{1,4}$, mag
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
HCG 42	0.012588	228	13.30	11.79	42.28	0.56	0.75	0.30	1.34	2.31	0.54
AWM 3	0.014878	269	13.52	11.68	42.00	0.66	1.04	0.44	1.58	1.55	0.52
NGC 2563	0.015701	369	13.93	12.15	42.23	0.91	1.00	0.39	1.10	1.30	1.23
AWM 7	0.017344	698	14.77	12.62	43.98	1.71	1.97	1.08	1.15	2.28	2.07
NGC 0533	0.018411	404	14.05	12.25	42.87	0.99	1.40	0.57	1.41	3.24	0.32
NGC 0741	0.018416	368	13.93	12.10	42.61	0.90	0.98	0.39	1.09	2.98	0.66
NGC 0080	0.019098	296	13.64	12.29	42.87	0.73	0.79	0.37	1.08	1.31	1.48
MKW 04	0.020208	515	14.37	12.41	43.15	1.26	1.53	0.78	1.21	1.84	1.72
NGC 3022	0.020959	276	13.56	11.97	42.30	0.68	1.14	0.50	1.68	1.50	1.20
A 1367	0.021743	749	14.86	12.89	43.91	1.84	2.74	1.38	1.49	0.89	2.25
NGC 2783	0.022151	346	13.85	12.04	42.00	0.85	1.02	0.59	1.20	3.04	0.60
UGC 07115	0.022199	334	13.81	12.12	42.61	0.82	1.06	0.66	1.29	1.79	0.78
UGC 02005	0.022342	352	13.88	12.05	42.65	0.86	1.12	0.59	1.30	1.43	0.72
IC 5357	0.022436	381	13.98	12.08	42.72	0.93	1.02	0.57	1.10	0.96	1.00
NGC 1016	0.022581	322	13.76	12.28	42.30	0.79	1.10	0.40	1.39	2.01	1.11
NGC 3158	0.022630	375	13.95	12.25	42.46	0.92	1.24	0.32	1.35	2.01	1.67
NGC 0070	0.022645	415	14.09	12.30	42.97	1.02	1.15	0.62	1.13	0.31	2.72
AWM 2	0.022761	293	13.63	11.97	—	0.72	0.78	0.42	1.08	2.18	0.64
NGC 5171	0.023000	371	13.94	12.18	42.98	0.91	1.47	0.58	1.62	0.84	1.63
NGC 2832	0.023044	331	13.79	12.25	43.00	0.81	1.25	0.63	1.54	2.34	1.32
A 1656	0.023250	921	15.13	13.22	44.57	2.26	4.17	2.00	1.84	1.78	2.02
NGC 5129	0.023402	290	13.62	12.11	42.94	0.71	1.36	0.55	1.92	3.01	0.84
MCG-0129015	0.023813	334	13.81	12.02	42.64	0.82	1.56	0.60	1.90	1.72	0.66
NGC 7436B	0.024720	383	13.98	12.24	42.00	0.94	1.08	0.48	1.15	1.84	1.53
NGC 5306	0.024732	305	13.68	12.06	42.69	0.75	1.30	0.58	1.73	3.22	0.78
NGC 5223	0.024834	271	13.53	12.19	42.75	0.66	0.97	0.36	1.47	2.09	1.20
MKW 05	0.024858	288	13.61	11.84	—	0.70	0.88	0.26	1.26	2.12	0.46
NGC 4325	0.025386	271	13.53	11.79	42.71	0.66	0.84	0.41	1.27	2.04	0.40
IC 0186	0.026023	318	13.74	12.10	42.30	0.78	1.16	0.58	1.49	1.97	0.93
NGC 7237	0.026102	376	13.96	12.20	42.75	0.92	1.58	0.60	1.72	1.26	1.45
IC 2476	0.026198	243	13.38	11.88	42.30	0.59	0.96	0.32	1.63	2.12	0.71

Таблица 1. (Продолжение)

System	z_h	σ , km s ⁻¹	M_{200} , 10 ¹⁴ M _☉	$L_{K, 200}$, 10 ¹² M _☉	$L_{0.1-2.4 \text{ keV}}$, 10 ⁴⁴ erg s ⁻¹	R_{200} , Mpc	R_{sp} , Mpc	R_c , Mpc	R_{sp}/R_{200}	Σ_5	$\Delta M_{1,4}$, mag
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
NGC 5627	0.026682	314	13.72	12.14	42.36	0.77	1.10	0.53	1.43	2.49	0.85
MKW 08	0.026906	450	14.19	12.50	43.48	1.10	1.73	0.85	1.57	0.63	2.00
UGC 05088	0.027622	247	13.41	11.72	42.30	0.60	0.90	0.41	1.50	1.79	0.43
MKW 04s	0.027928	423	14.11	12.27	43.04	1.03	1.53	0.78	1.48	2.17	1.28
AWM 1	0.028652	402	14.05	12.37	42.30	0.98	1.15	0.62	1.17	1.14	1.61
NGC 2795	0.028992	431	14.14	12.38	42.70	1.04	1.32	0.62	1.27	1.94	1.00
NGC 6338	0.029342	552	14.46	12.45	43.40	1.35	2.12	0.50	1.57	2.00	1.65
NGC 3119	0.029657	355	13.88	12.19	42.65	0.87	1.20	0.60	1.38	2.50	1.61
NGC 5758	0.029923	291	13.62	12.09	42.82	0.71	1.09	0.50	1.54	1.11	1.49
A 2199	0.030458	746	14.85	13.01	44.31	1.82	3.56	1.42	1.96	0.70	2.36
A 2197	0.030477	547	14.45	12.85	43.08	1.34	1.80	0.92	1.34	1.54	—
NGC 6107	0.031093	546	14.44	12.55	43.23	1.33	1.90	1.03	1.43	0.45	1.32
NGC 6159	0.031320	266	13.51	11.81	42.78	0.65	0.89	0.45	1.37	2.60	0.48
AWM 4	0.031827	380	13.97	12.04	43.36	0.93	1.34	0.57	1.44	3.13	0.61
A 0999	0.031866	248	13.41	12.05	42.48	0.60	1.11	0.53	1.85	2.18	1.18
UGC 04991	0.031958	515	14.37	12.37	42.60	1.26	1.72	0.65	1.36	1.25	1.73
A 2162	0.032147	346	13.85	12.17	42.60	0.84	1.12	0.63	1.33	1.89	1.08
A 1177	0.032159	337	13.81	12.09	43.04	0.82	1.14	0.55	1.39	2.33	0.85
A 1016	0.032178	267	13.51	12.09	—	0.65	1.02	0.35	1.57	1.76	1.11
A 1314	0.032443	494	14.31	12.49	43.11	1.18	1.90	0.55	1.61	0.97	1.46
A 1185	0.032734	676	14.72	12.84	43.18	1.69	2.19	0.84	1.30	1.06	2.28
A 1257	0.034588	242	13.38	11.91	—	0.58	0.99	0.40	1.71	1.08	1.28
A 2063	0.034664	753	14.86	12.79	44.01	1.83	2.61	1.10	1.43	0.90	2.00
A 2052	0.034726	623	14.61	12.70	44.11	1.52	2.12	0.87	1.39	1.28	1.80
AWM 5	0.035043	517	14.37	12.67	43.45	1.24	1.70	0.89	1.37	1.93	1.00
A 1228A	0.035055	216	13.23	12.18	—	0.57	1.00	0.47	1.75	0.73	1.36
RXC J1057.7+3739	0.035208	297	13.65	11.93	42.48	0.72	0.97	0.46	1.35	1.69	1.08
VV 196	0.035289	412	14.08	12.12	42.85	1.00	1.17	0.71	1.17	1.09	2.48
A 2147	0.036179	853	15.02	13.11	44.20	2.08	3.47	1.49	1.67	0.56	1.82
A 2151	0.036378	734	14.83	13.08	43.65	1.79	2.10	0.55	1.17	0.63	1.68
NGC 5098	0.036812	445	14.18	12.46	43.11	1.08	1.73	0.71	1.60	0.92	1.93
RXC J1511.5+0145	0.038990	374	13.95	12.10	42.95	0.91	1.12	0.63	1.23	1.65	0.80
A 1139	0.039327	459	14.21	12.57	43.18	1.12	1.64	0.71	1.46	0.84	1.79
RBS 858	0.039586	445	14.18	12.39	43.11	1.08	1.64	0.84	1.52	1.81	1.04
A 2107	0.041335	581	14.52	12.69	43.77	1.41	2.17	0.63	1.54	1.40	1.61
A 1228B	0.042892	347	13.85	12.25	42.78	0.84	1.28	0.50	1.52	2.70	0.70
A 1983	0.044803	460	14.22	12.70	43.41	1.12	1.34	0.78	1.20	0.62	2.24
MKW 03s	0.044953	608	14.58	12.67	44.15	1.47	1.95	0.76	1.33	0.66	1.74
A 0957	0.045026	689	14.74	12.70	43.61	1.67	1.79	0.99	1.07	2.23	1.93
A 2040	0.045242	589	14.54	12.82	43.26	1.43	2.20	0.84	1.54	0.58	2.62

Таблица 1. (Продолжение)

System	z_h	σ , km s ⁻¹	M_{200} , 10 ¹⁴ M _☉	$L_{K, 200}$, 10 ¹² M _☉	$L_{0.1-2.4 \text{ keV}}$, 10 ⁴⁴ erg s ⁻¹	R_{200} , Mpc	R_{sp} , Mpc	R_c , Mpc	R_{sp}/R_{200}	Σ_5	$\Delta M_{1,4}$, mag
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
RXC J1010.3+5430	0.045877	384	13.98	12.36	42.30	0.93	1.20	0.81	1.29	1.92	0.73
A 1100	0.046463	402	14.04	12.31	42.78	0.97	1.22	0.55	1.26	1.74	1.77
RXC J1722.2+3042	0.046580	524	14.39	12.56	42.70	1.27	1.64	0.67	1.29	1.78	1.40
RXC J0748.2+1833	0.046602	454	14.20	12.60	43.15	1.09	1.28	0.71	1.17	1.73	2.24
SHK 352	0.049521	532	14.41	12.60	43.43	1.29	2.17	0.74	1.68	0.64	2.22
A 0671	0.049802	805	14.95	12.89	43.66	1.95	1.97	0.84	1.01	1.68	2.26
Sh 166	0.050043	323	13.76	12.17	—	0.78	1.38	0.56	1.77	1.22	1.52
Z 2844	0.050489	401	14.04	12.39	43.46	0.97	1.48	0.63	1.52	2.05	1.30
A 0757	0.051319	368	13.92	12.43	43.66	0.89	1.79	0.77	2.01	0.46	1.85
A 1291A	0.051349	391	14.00	12.17	43.34	0.94	1.48	0.55	1.57	1.32	0.86
A 1377	0.051807	632	14.63	12.77	43.45	1.53	2.05	0.63	1.34	0.71	2.27
A 1461	0.053962	317	13.73	11.92	—	0.76	1.13	0.49	1.49	1.22	1.15
RXC J1022.2+3831	0.054163	551	14.45	12.65	43.26	1.33	1.57	0.84	1.18	0.71	1.45
RXC J0844.9+4258	0.054858	320	13.74	12.16	42.90	0.77	1.30	0.63	1.69	2.25	0.86
RXC J1122.2+6713	0.055119	237	13.34	11.79	42.78	0.57	1.07	0.42	1.88	2.42	0.68
A 1318	0.056419	394	14.01	12.48	42.60	0.95	1.26	0.68	1.33	1.19	1.40
RXC J1654.4+2334	0.057075	383	13.98	12.27	43.26	0.92	1.26	0.77	1.37	1.70	1.30
A 1291B	0.057161	396	14.02	12.07	—	0.95	1.05	0.50	1.11	1.34	1.04
A 2169	0.057656	502	14.33	12.46	43.36	1.21	1.45	0.63	1.20	0.44	1.26
A 1991	0.058463	554	14.46	12.81	43.85	1.33	1.49	0.95	1.12	0.99	1.59
RXC J0746.7+3059	0.058482	317	13.73	12.21	43.20	0.76	0.90	0.56	1.18	0.63	2.20
A 1383	0.059583	464	14.23	12.58	43.11	1.12	1.67	0.95	1.49	0.90	1.68
A 1507	0.059967	432	14.13	12.42	42.85	1.02	1.53	0.63	1.50	1.19	1.08
A 0602	0.060551	560	14.47	12.64	43.76	1.35	1.90	0.92	1.41	0.31	1.51
RXC J1224.8+3156	0.060664	454	14.20	12.40	43.18	1.09	1.73	0.95	1.59	0.70	1.52
Анон 4	0.061053	397	14.02	12.39	—	0.96	1.52	0.64	1.58	1.47	1.64
A 1452	0.061649	408	14.06	12.28	—	0.98	1.10	0.59	1.12	1.21	1.28
A 1781	0.062264	362	13.90	12.44	—	0.87	1.56	0.65	1.79	1.35	1.28
A 1795	0.062444	775	14.89	12.95	44.76	1.86	3.06	1.34	1.64	1.39	2.09
A 1275	0.062750	348	13.85	12.29	43.34	0.84	1.20	0.67	1.43	1.58	1.11
A 1003	0.062763	575	14.50	12.49	43.00	1.38	1.66	0.77	1.20	1.32	1.36
RXC J1351.7+4622	0.062915	528	14.40	12.60	43.08	1.29	1.70	0.92	1.32	2.01	0.90
A 1831A	0.062942	480	14.27	12.48	—	1.15	1.43	0.69	1.24	1.12	1.57
A 1825	0.063274	633	14.63	12.56	43.04	1.52	1.38	0.55	0.91	0.95	1.70
A 1668	0.063699	635	14.63	12.72	43.91	1.52	1.82	0.95	1.20	1.42	1.85
A 1436	0.064960	700	14.76	12.83	43.72	1.68	1.82	1.41	1.08	0.37	1.76
A 2149	0.065253	361	13.90	12.46	43.62	0.87	1.28	0.63	1.47	2.23	1.57
A 1775A	0.065591	324	13.76	12.31	—	0.78	1.64	0.45	2.10	1.07	1.56
A 2124	0.065722	736	14.83	12.83	43.84	1.77	2.21	0.92	1.25	1.73	1.84
A 2079	0.065746	618	14.60	12.95	43.57	1.48	2.12	0.95	1.43	0.97	1.26

Таблица 1. (Продолжение)

System	z_h	σ , km s ⁻¹	M_{200} , 10 ¹⁴ M _☉	$L_{K, 200}$, 10 ¹² M _☉	$L_{0.1-2.4 \text{ keV}}$, 10 ⁴⁴ erg s ⁻¹	R_{200} , Mpc	R_{sp} , Mpc	R_c , Mpc	R_{sp}/R_{200}	Σ_5	$\Delta M_{1,4}$, mag
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
RXC J1206.6+2215	0.065786	269	13.52	12.08	43.15	0.65	1.22	0.60	1.88	2.41	1.18
A 2092	0.066564	486	14.29	12.52	43.60	1.17	2.05	0.76	1.75	0.80	2.17
Anon 3	0.067960	380	13.96	12.29	—	0.91	1.26	0.50	1.38	1.25	1.52
A 1035A	0.067997	563	14.48	12.63	42.85	1.35	1.79	0.90	1.33	0.35	1.72
A 1569A	0.068759	484	14.26	12.44	43.30	1.16	1.50	0.60	1.29	0.82	2.82
A 1371	0.068891	552	14.45	12.67	43.53	1.32	2.12	0.90	1.61	0.86	1.91
A 1066	0.068917	768	14.88	12.98	43.82	1.84	3.03	1.26	1.65	0.95	1.63
A 1270	0.068939	524	14.38	12.68	42.78	1.26	1.41	0.95	1.12	0.34	1.92
A 1534	0.069848	322	13.75	12.41	—	0.77	1.40	0.57	1.82	1.96	1.26
Anon 1	0.069884	608	14.58	12.70	43.54	1.47	1.76	1.14	1.20	1.21	1.79
A 1767	0.070326	816	14.96	13.03	44.10	1.95	2.55	1.10	1.31	1.50	2.05
Z 6718	0.071374	550	14.45	12.54	43.80	1.32	2.00	0.87	1.52	1.04	1.81
A 1904	0.071708	771	14.89	13.07	43.67	1.84	2.02	1.12	1.10	1.10	2.21
RXC J1054.2+5450A	0.071886	507	14.34	12.68	43.72	1.21	1.52	0.93	1.26	0.29	2.05
A 1589	0.071955	778	14.90	13.06	44.23	1.86	3.11	1.55	1.67	0.96	1.74
A 2065	0.072211	1104	15.35	13.31	44.40	2.64	3.36	1.67	1.27	0.54	2.82
A 1024	0.073296	578	14.51	12.60	43.40	1.38	1.83	0.59	1.33	1.43	2.58
A 2089	0.073546	531	14.40	12.66	43.15	1.27	1.48	0.91	1.16	1.44	1.30
A 2064	0.073689	633	14.63	12.66	43.86	1.51	1.67	1.00	1.11	1.96	1.79
J1051.8+5523B	0.073762	420	14.09	12.49	—	1.00	1.22	0.71	1.22	1.75	1.53
A 1238	0.074111	541	14.42	12.78	43.41	1.29	2.12	0.90	1.64	1.03	2.66
A 1775B	0.075138	581	14.52	12.78	44.20	1.39	1.78	0.81	1.28	1.95	1.65
A 1203	0.075307	416	14.08	12.64	—	0.99	1.45	0.67	1.46	1.32	1.41
A 1800	0.075321	705	14.77	12.91	44.19	1.68	2.28	1.24	1.36	2.02	1.86
A 1190	0.075334	670	14.70	12.91	43.88	1.60	1.95	0.89	1.22	1.12	1.64
A 1831B	0.075481	952	15.16	12.97	44.18	2.27	2.85	1.64	1.26	1.17	2.19
A 1424	0.075900	632	14.63	12.82	43.71	1.51	1.82	1.12	1.20	1.33	2.02
A 1205	0.076103	787	14.91	12.98	44.02	1.88	2.26	1.34	1.20	1.76	1.74
A 1516	0.076166	660	14.68	12.87	—	1.58	1.82	1.34	1.15	1.53	2.23
A 1173	0.076193	516	14.36	12.61	43.70	1.23	1.97	0.67	1.60	1.21	1.89
J1350.2+2913	0.076439	359	13.89	12.40	—	0.86	1.30	0.41	1.51	0.89	1.83
Z 4905	0.076817	568	14.49	12.67	43.79	1.36	2.00	1.00	1.47	1.73	1.73
Z 5029	0.077360	912	15.10	13.15	44.43	2.18	2.55	1.48	1.17	0.92	2.58
A 1773	0.077425	832	14.98	12.98	43.89	1.98	2.43	1.10	1.23	1.20	2.54
A 2061	0.077746	712	14.78	13.12	44.31	1.70	1.95	0.97	1.15	1.15	1.88
A 2029	0.077812	1046	15.28	13.37	44.89	2.50	4.24	1.53	1.70	2.35	2.21
A 1780	0.077855	474	14.25	12.70	—	1.13	1.82	0.78	1.61	0.90	1.76
A 1035B	0.078276	613	14.59	12.58	43.30	1.46	1.61	0.84	1.10	1.47	2.07
A 1898	0.078525	434	14.13	12.47	43.04	1.04	1.90	0.81	1.83	0.50	—
A 1809	0.079290	729	14.81	12.99	43.91	1.74	2.47	1.10	1.42	1.45	1.65

Таблица 1. (Продолжение)

System	z_h	σ , km s ⁻¹	M_{200} , 10 ¹⁴ M _⊙	$L_{K, 200}$, 10 ¹² M _⊙	$L_{0.1-2.4 \text{ keV}}$, 10 ⁴⁴ erg s ⁻¹	R_{200} , Mpc	R_{sp} , Mpc	R_c , Mpc	R_{sp}/R_{200}	Σ_5	$\Delta M_{1,4}$, mag
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
A 1569B	0.079331	493	14.30	12.46	—	1.18	1.69	0.67	1.43	1.71	1.88
A 2019	0.081176	345	13.83	12.27	43.18	0.82	1.22	0.59	1.49	1.78	1.34
A 1750	0.085934	747	14.84	13.15	44.32	1.78	2.30	1.23	1.29	1.24	2.00
A 2245	0.087950	1037	15.27	13.25	43.67	2.46	2.93	1.10	1.19	1.45	1.99
A 2142	0.090135	963	15.17	13.42	45.02	2.28	4.12	1.52	1.81	0.83	1.83
A 2244	0.098993	1049	15.28	13.18	44.68	2.48	3.19	1.48	1.28	1.85	1.87

В работах Korylov and Korylova (2015), Korylova and Korylov (2018; 2019) мы привели динамические характеристики для области радиусом R_{200} практически для всей выборки групп и скоплений, изучаемых в этой работе. Эмпирический радиус скопления R_{200} предсказывается дисперсией лучевых скоростей галактик при выполнении условия для массы скопления $M(r) \propto r$. Его можно оценить по формуле $R_{200} = \sqrt{3} \sigma / (10H(z))$ Мпк (Carlberg et al. 1997). Тогда, предполагая, что в пределах этого радиуса скопление вириализовано, можно найти массу $M_{200} = 3G^{-1}R_{200}\sigma^2$, где σ — одномерная дисперсия лучевых скоростей галактик, расположенных в пределах радиуса R_{200} , G — гравитационная постоянная. Таким образом, измеряемая нами масса скопления $M_{200} \propto \sigma^3$. Массу M_{200} , заключенную в сферическом гало радиусом R_{200} , можно измерить и непосредственно через критическую плотность ρ_c , которая зависит от z : $M_{200} = \frac{4}{3}\pi R_{200}^3 \times 200\rho_c$. Сначала мы оценили среднюю лучевую скорость скопления $\langle cz \rangle$ и ее дисперсию σ , потом по дисперсии — радиус R_{200} . Затем нашли количество галактик в пределах этого радиуса, снова определили среднюю лучевую скорость скопления $\langle cz \rangle$, ее дисперсию σ , потом по дисперсии — радиус R_{200} и так далее. Двигаясь от центра скопления, итеративным способом мы нашли дисперсию лучевых скоростей галактик и другие параметры скоплений в пределах данного радиуса. Фонowymi считались Галактики со скоростями больше чем 2.7σ (например, Matton et al. (2004)), обычно критерии отбора варьируют от 2.5σ до 3.0σ .

Чтобы найти радиус R_{sp} , нам важно выделить ближайшие окрестности групп/скоплений галактик. С этой целью мы используем комплект рисунков, которые детально характеризуют структуру и кинематику скоплений галактик, а именно:

- (а) отклонение лучевых скоростей галактик — членов скопления, и галактик, отнесенных к фону, от средней лучевой скорости скопления

или группы в зависимости от квадрата радиуса (расстояния от центра скопления);

- (b) расположение галактик в плоскости неба в экваториальных координатах;
 (c) интегральное распределение числа всех галактик в зависимости от квадрата радиуса;
 (d) гистограмма распределения лучевых скоростей всех галактик в пределах радиуса R_{200} .

В качестве примера мы приводим на рис. 1–4 такие комплекты для скоплений галактик A 1318, A 1377, A 1767 и Zw 2844 соответственно.

Нас особо интересует профиль скопления в проекции — интегральное распределение числа галактик в зависимости от квадрата радиуса от центра, представленное на панелях (c) анализируемых рисунков (см. рис. 1–4). Это распределение позволяет наглядно выявить плотное ядро группы/скопления, более разреженную оболочку и внешнюю область, где распределение выходит на линейную зависимость (показана на панелях (c) рис. 1–4 сплошной пурпурной линией) в выбранных координатах, то есть наблюдается однородное в среднем распределение галактик (Korylov and Korylova 2015). На панелях (b) рис. 1–4 показаны штриховой линией радиус вириализованной области R_{200} и штрихпунктирной линией радиус R_{sp} , за пределами которого распределение числа членов скопления меняет вид на линейный. Мы также выделили линией с длинными штрихами центральную часть скопления радиусом R_c , где наблюдается основной крутой рост числа галактик. На панелях (c) (рис. 1–4) приведено распределение галактик ранних типов ярче $M_K = -21^m$, по которому эти радиусы уточнены. Такие галактики располагаются, как правило, в центральных вириализованных областях групп/скоплений галактик. Найденный нами радиус R_{sp} , splashback-радиус (Adhikari et al. 2014, Diemer and Kravtsov 2014), это средний радиус апоцентров орбит галактик, вылетевших из центральной области скоплений галактик. То есть, найденный радиус R_{sp} разделяет основную часть галактик, впервые падающих на

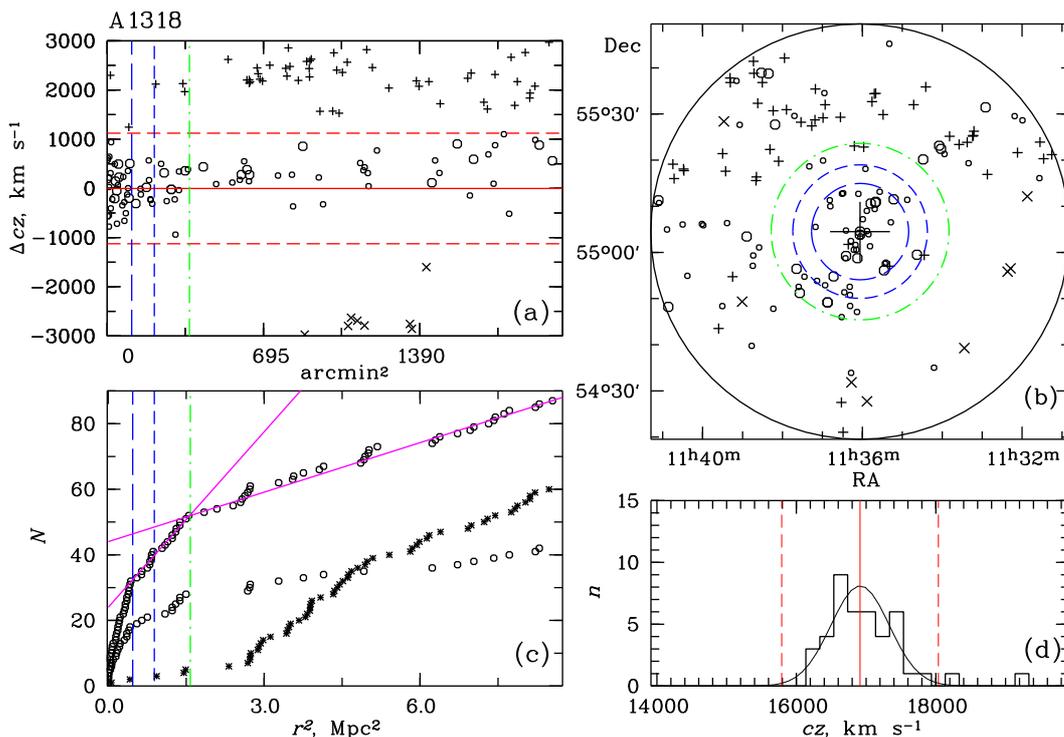


Рис. 1. Распределение галактик в скоплении A 1318. На панели (a) показано отклонение лучевых скоростей галактик от средней лучевой скорости скопления, определенной по галактикам в пределах радиуса R_{200} . Горизонтальные красные штриховые линии соответствуют отклонениям $\pm 2.7\sigma$, вертикальными линиями показаны: короткими штрихами — радиус R_{200} , длинными штрихами — радиус R_c , штрихпунктиром — радиус R_{sp} . Кружками большего размера отмечены галактики ярче $M_K^* + 1 = -24^m$, плюсами — галактики заднего фона, крестиками — галактики переднего фона. На панели (b) показано распределение на небе в экваториальной системе координат галактик, представленных на панели (a) (обозначения те же). Кругами выделены области с радиусами R_{200} (короткие штрихи), R_c (длинные штрихи) и R_{sp} (штрихпунктир). Область исследования ограничена кругом с радиусом, равным $3.5R_{200}$ (сплошная черная линия). Большим крестом отмечен центр скопления. На панели (c) даны интегральные распределения полного числа галактик (верхняя кривая) и галактик ранних типов ярче $M_K^* < -21^m.5$ (нижняя кривая) как функции квадрата расстояния от центра группы. Кружки соответствуют галактикам, обозначенным кружками на панели (a), звездочки — галактикам фона. Сплошные пурпурные линии характеризуют ход распределения галактик в пределах радиуса R_{sp} и за ним. На панели (d) представлено распределение по лучевым скоростям всех галактик в пределах радиуса R_{200} (сплошной линией для членов скопления показана гауссиана, соответствующая дисперсии лучевых скоростей). Сплошная красная вертикальная линия указывает среднюю лучевую скорость скопления, штриховые красные линии соответствуют отклонениям $\pm 2.7\sigma$.

скопление, от галактик, которые уже принадлежат скоплению. Для всей выборки нами измерены $\langle R_{sp} \rangle = 1.67 \pm 0.05$ Мпк с диапазоном изменения 0.75–4.24, $\langle R_c \rangle = 0.78 \pm 0.03$ с диапазоном изменения 0.30–2.00, $\langle R_{sp}/R_{200} \rangle = 1.40 \pm 0.02$ или $\langle R_{sp}/R_{200m} \rangle = 0.88 \pm 0.02$ (при $4R_{200c} \approx 2.5R_{200m}$), $\langle R_{sp}/R_c \rangle = 2.19 \pm 0.04$, $\langle R_{200c}/R_c \rangle = 1.58 \pm 0.02$. Диапазон изменения отношения R_{sp}/R_{200} для нашей выборки находится в интервале 0.91–1.96 и примерно соответствует данным модельных симуляций 1.28–2.4 (More et al. 2015). Измеренные радиусы R_{sp} и R_c и другие физические характеристики исследуемых групп и скоплений галактик представлены в таблице 1.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Зависимости радиуса R_{sp} от L_X , M_{200}

По определению $R_{sp} > R_{200}$, за исключением тех случаев, когда в скоплении в пределах R_{200} может наблюдаться завышенное значение дисперсии лучевых скоростей, которое (как в нашем случае) может повлиять на определяемый радиус R_{200} . Такие скопления галактик (например, A 1825) показывают, как правило, негауссовое распределение лучевых скоростей в пределах R_{200} .

Мы исследовали вариации радиусов R_{sp} и R_c от свойств групп/скоплений галактик. На рис. 5 показана зависимость $\lg R_{sp}$ от рентгеновской светимости $\lg L_X$, и для сравнения приведена аналогичная зависимость для радиуса $\lg R_{200}$. Рентгеновские светимости определены в полосе 0.1–2.4 кэВ и

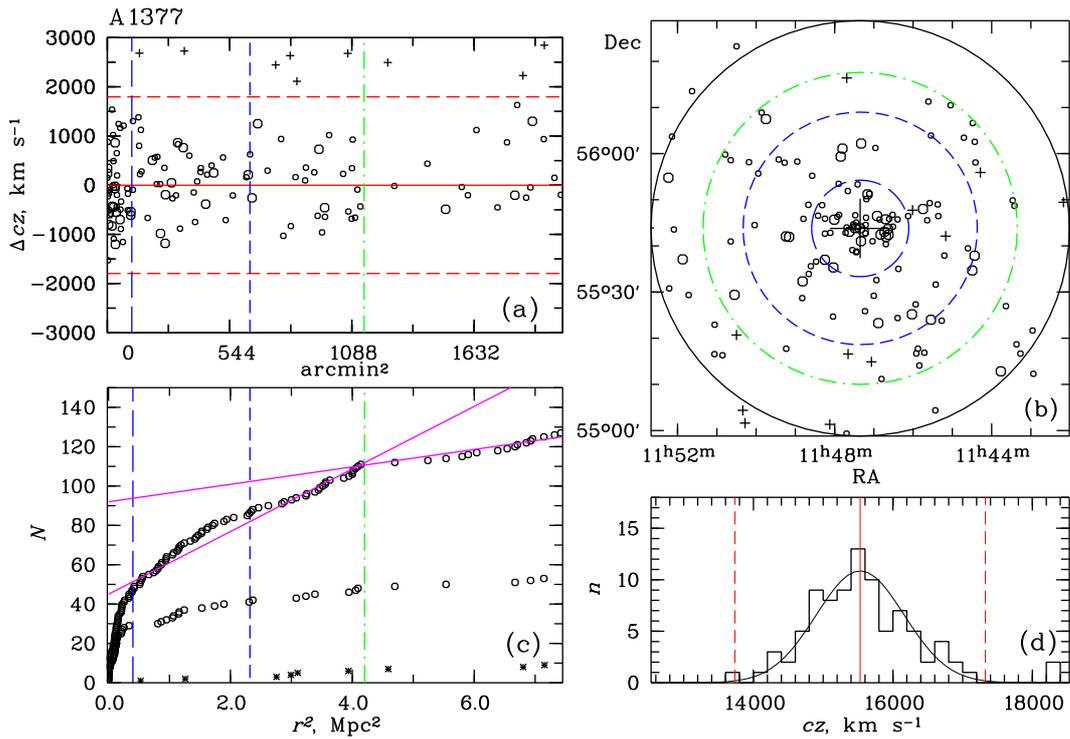


Рис. 2. Распределение галактик в скоплении A 1377. Обозначения те же, что и на рис. 1.

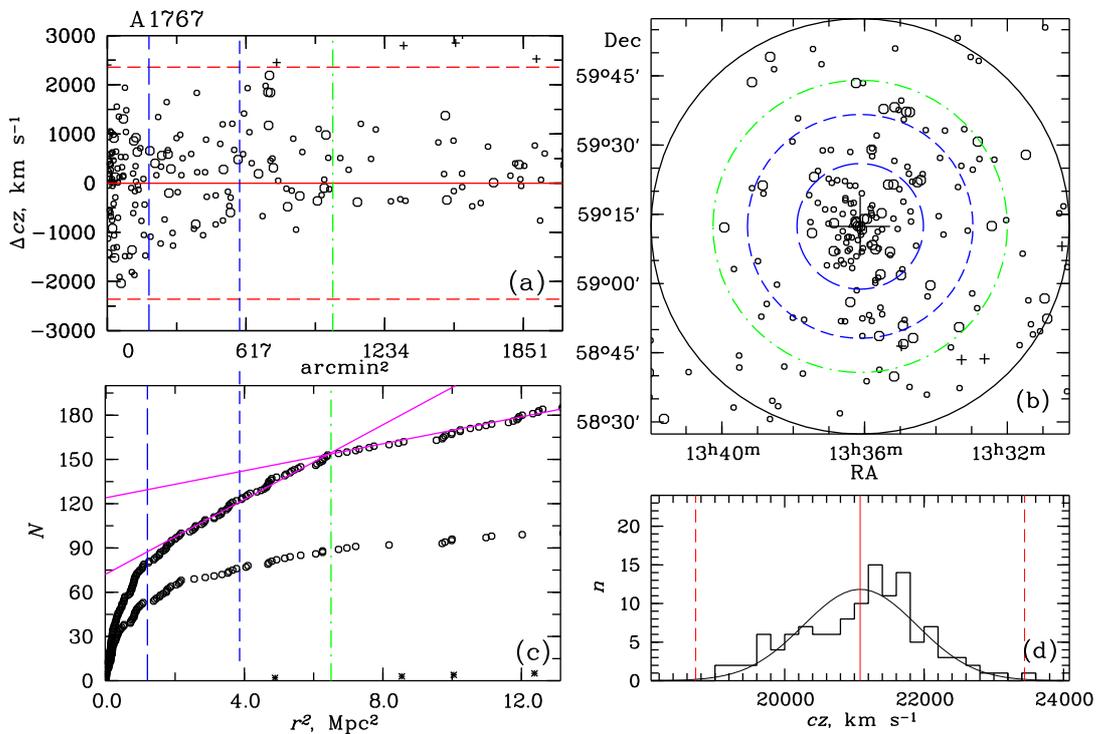


Рис. 3. Распределение галактик в скоплении A 1767. Обозначения те же, что и на рис. 1.

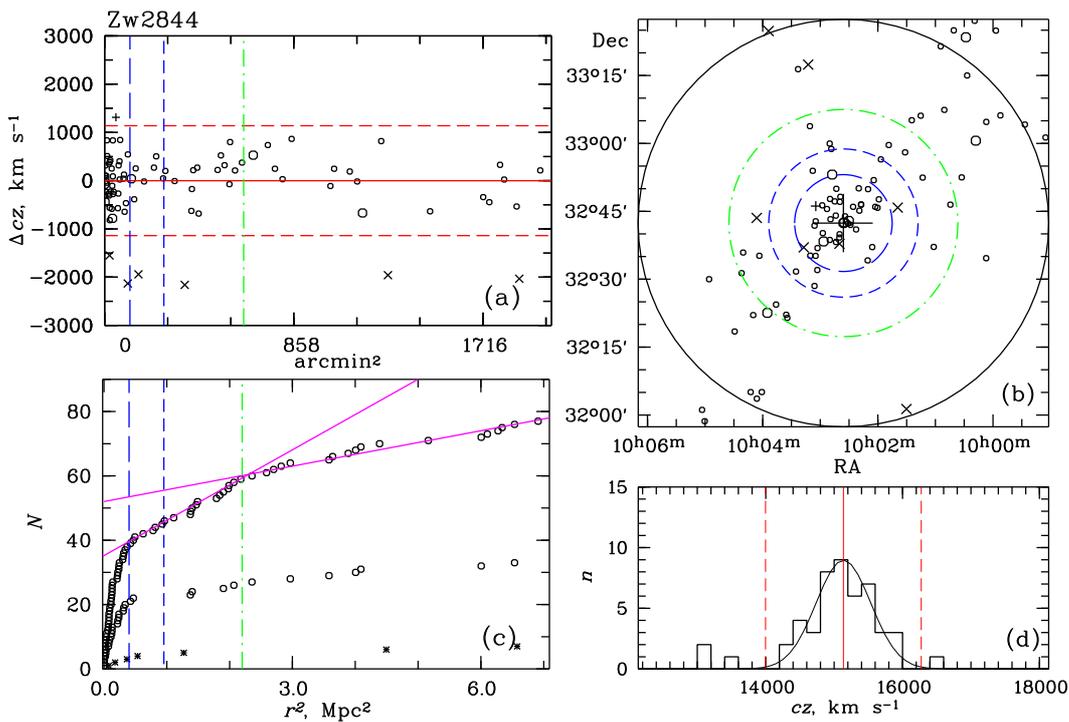


Рис. 4. Распределение галактик в скоплении Zw 2844. Обозначения те же, что и на рис. 1.

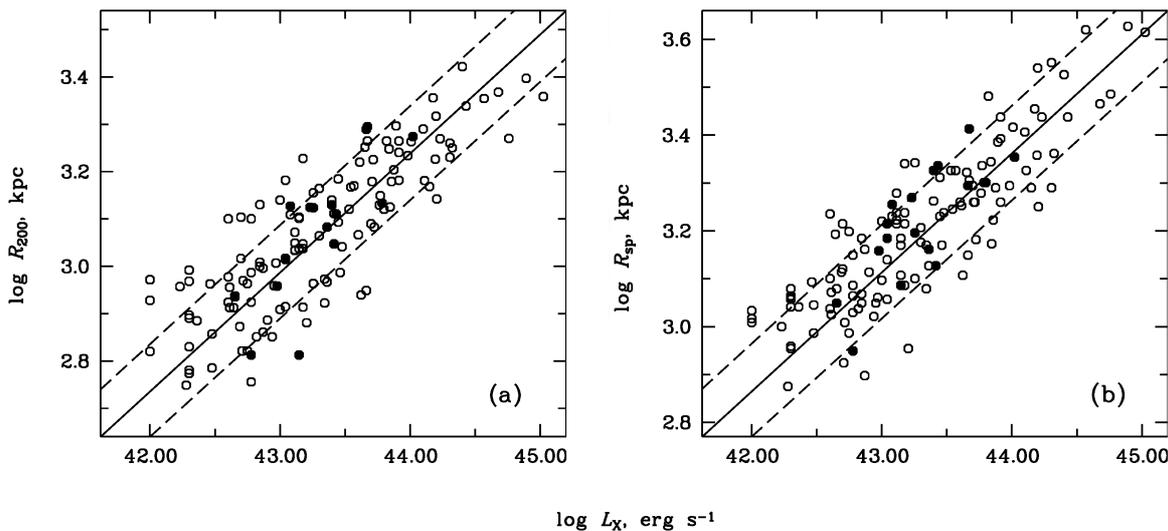


Рис. 5. Зависимость радиуса R_{200} (a) и радиуса R_{sp} (b) от рентгеновской светимости в полосе 0.1–2.4 кэВ. Сплошные линии соответствуют регрессионным соотношениям $R_{sp} \propto L_X^{0.24 \pm 0.03}$ и $R_{200} \propto L_X^{0.25 \pm 0.04}$. Штриховые линии даны 1σ -отклонениям от них. Заполненными кружками показаны группы и скопления галактик с бимодальным распределением лучевых скоростей.

для большинства структур приведены в наших статьях Korylov and Korylova (2015), Korylova and Korylov (2016; 2017). Приведенные соотношения (прямые линии) представляет собой среднее между прямой и обратной регрессиями, когда независи-

мые переменные меняются местами. Штриховыми линиями показаны 1σ -отклонения от нее. Можно отметить, что 1σ -отклонение в зависимости для радиуса R_{sp} несколько меньше, чем для радиуса R_{200} . Заполненными кружками показаны слива-

Таблица 2. Параметры соотношений

Relation	Slope	Normalization	Scatter
$\lg R_{\text{sp}} - \lg L_X$	0.24 ± 0.03	-7.39 ± 0.33	0.092
$\lg R_{200} - \lg L_X$	0.25 ± 0.04	-7.60 ± 0.34	0.097
$\lg R_c - \lg L_X$	0.26 ± 0.04	-8.45 ± 0.37	0.110
$\lg R_{\text{sp}} - \lg(M_{200}/M_\odot)$	0.32 ± 0.02	-1.42 ± 0.13	0.066
$\lg R_c - \lg(M_{200}/M_\odot)$	0.35 ± 0.03	-2.08 ± 0.17	0.086
$\lg R_{\text{sp}} - \lg(L_K/L_\odot)$	0.42 ± 0.03	-2.00 ± 0.17	0.074
$\lg R_{200} - \lg(L_K/L_\odot)$	0.41 ± 0.02	-2.10 ± 0.12	0.052
$\lg R_c - \lg(L_K/L_\odot)$	0.44 ± 0.03	-2.66 ± 0.19	0.088
$\lg R_{\text{sp}} - \lg R_{200}$	1.00 ± 0.04	0.17 ± 0.11	0.064
$\lg R_{\text{sp}} - \lg R_c$	0.95 ± 0.05	0.46 ± 0.14	0.088
$\lg R_{\text{sp}} - \lg \Sigma_5$	0.31 ± 0.06	2.71 ± 0.17	0.158
$\lg R_{\text{sp}} - \Delta M_{1,4}$	-0.08 ± 0.02	3.31 ± 0.03	0.147

ющиеся группы/скопления галактик с бимодальным распределением лучевых скоростей в пределах радиуса R_{200} . Можно отметить, что эти структуры не отличаются от групп/скоплений галактик с гауссовым распределением лучевых скоростей по расположению на общих зависимостях. В нашей выборке присутствуют вторая группа галактик без измерения рентгеновской светимости, как правило, это группы галактик с $\sigma \leq 400 \text{ км с}^{-1}$. В таблице 2 приведены параметры полученных нами зависимостей — наклоны, нуль-пункты и разбросы. Найденный нами по наблюдаемому профилю splashback-радиус групп/скоплений галактик показывает следующие зависимости:

$$R_{\text{sp}} \propto L_X^{0.24 \pm 0.03}, R_{\text{sp}} \propto (M_{200}/M_\odot)^{0.32 \pm 0.02},$$

$$R_{\text{sp}} \propto (L_K/L_\odot)^{0.42 \pm 0.03}.$$

Зависимость от L_K -светимости (характеристика галактик) почти в два раза круче, чем от L_X -светимости (характеристика газа). Зависимости для радиуса центральной части скоплений $\lg R_c$ круче в среднем на 5%, чем для радиуса $\lg R_{\text{sp}}$. Минимальный разброс наблюдается в зависимости $\lg R_{\text{sp}}$ от $\lg(M_{200}/M_\odot)$. Зависимость между $\lg R_{200}$ и $\lg M_{200}/M_\odot$ в таблице 2 не приведена, поскольку это зависимые переменные.

3.2. Зависимости радиуса R_{sp} от Σ_5 и $\Delta M_{1,4}$

Нами измерена концентрация галактик в группах и скоплениях как внутренняя плотность галактик Σ_5 , вычисленная по расстоянию пятой га-

лактики от центра ярче $M_K = -23^m$. Для значительной части групп галактик измеренная концентрация опубликована в работе Korylova and Korylov (2017). В этой работе также приведены измерения разницы абсолютных звездных величин между ярчайшей и четвертой по яркости галактикам групп $\Delta M_{1,4}$ в фильтрах K и r в пределах радиуса $0.5 R_{200}$. При выполнении условия $\Delta M_{1,4} \geq 2.5$ можно найти динамически «старые» группы с массами $M_{200} < 1.43 \times 10^{14} M_\odot$ (Korylova and Korylov 2017). На рис. 6 показаны зависимости радиуса R_{sp} от концентрации галактик (рис. 6a) и от разницы звездных величин $\Delta M_{1,4}$ (рис. 6b). Заполненными кружками показаны группы галактик с $\sigma \leq 400 \text{ км с}^{-1}$. Приведенное соотношение (прямая линия) на рис. 6a представляет собой среднее между прямой и обратной регрессиями, когда независимые переменные меняются местами, $R_{\text{sp}} \propto \Sigma_5^{0.31}$. Штриховыми линиями показаны 1σ отклонения от нее. В статье Korylova and Korylov (2017) мы показали, что концентрация галактик в группах и скоплениях коррелирует с богатством, рентгеновской светимостью, массой и с радиусом R_{sp} . Анализ рис. 6b показывает, что $\lg R_{\text{sp}}$ слабо зависит от $\Delta M_{1,4}$ отдельно для групп и отдельно для скоплений галактик. При совместном рассмотрении мы получаем зависимость $R_{\text{sp}} \propto 10^{-0.081 \Delta M_{1,4}}$, то есть, чем больше $\Delta M_{1,4}$, тем меньше радиус R_{sp} у групп галактик. Как нами было показано в работе Korylova and Korylov (2017), на зависимости $\Delta M_{1,4} - \Sigma_5$ скопления галактик располагаются в области больших концентраций галактик и малых значений $\Delta M_{1,4}$, в области динамически «моло-

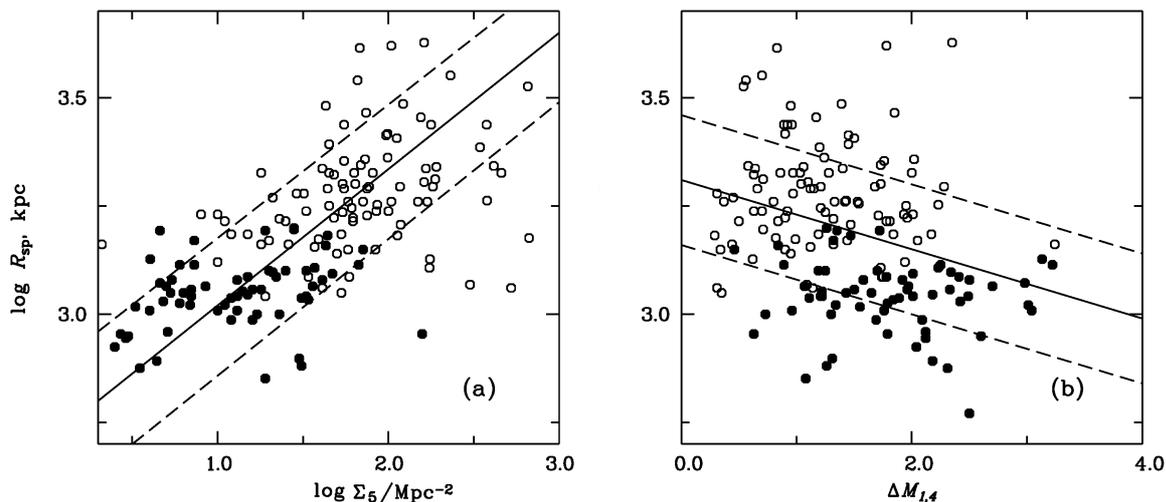


Рис. 6. Зависимость радиуса R_{sp} (a) от концентрации галактик Σ_5 , (b) от разности абсолютных звездных величин $\Delta M_{1,4}$ первой и четвертой по яркости галактикам в пределах $0.5 R_{200}$. Заполненными кружками показаны группы галактик с $\sigma \leq 400 \text{ км с}^{-1}$. Сплошные линии соответствуют регрессионным соотношениям $R_{sp} \propto \Sigma_5^{0.31}$ и $R_{sp} \propto 10^{-0.08 \Delta M_{1,4}}$. Штриховые линии соответствуют 1σ отклонениям от них.

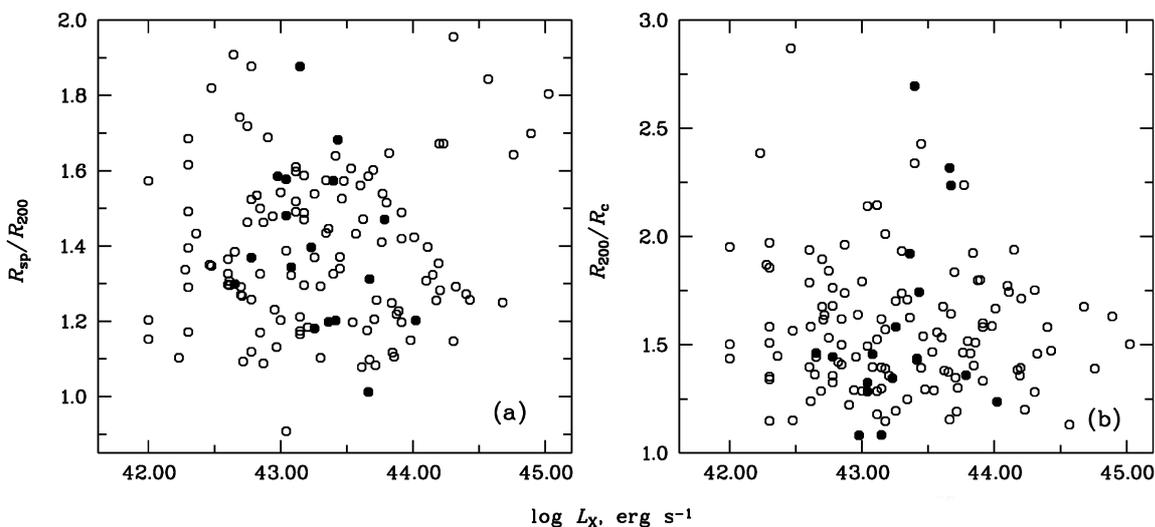


Рис. 7. Зависимость отношений R_{sp}/R_{200} (a) и R_{200}/R_c (b) от рентгеновской светимости в полосе 0.1–2.4 кэВ. Заполненными кружками показаны группы и скопления галактик с бимодальным распределением лучевых скоростей.

дых» структур. Группы галактик располагаются в области малых концентраций галактик и больших значений $\Delta M_{1,4}$ — в области динамически «старых» структур.

3.3. Зависимости отношения R_{sp}/R_{200} от L_X , M_{200}

Мы привели в разделе 1 результаты модельных расчетов More et al. (2015), из которых следует, что радиус R_{sp} зависит от темпа аккреции массы

темной материи на скопление: при высоком темпе этот радиус близок к вириальному радиусу, то есть, в нашем случае к R_{200} . На рис. 7 показаны зависимости отношений радиусов R_{sp}/R_{200} и R_{200}/R_c от рентгеновской светимости групп/скоплений галактик.

Рисунок 7 показывает, что наша выборка систем галактик располагается достаточно компактно на диаграмме, и отношение R_{sp}/R_{200} изменяется примерно от 1 до 2. Для основной массы скоплений с

$\lg L_X \in [42.5; 44.5]$ мы определили границы изменения отношения от 1.15 до 1.6. Группы и скопления галактик с отношением радиусов меньше 1.15 (или $R_{\text{sp}}/R_{200\text{m}} < 0.72$) (см. рис. 7) можно отнести к структурам с высоким темпом аккреции массы (FA), а с отношением радиусов больше 1.6 (или $R_{\text{sp}}/R_{200\text{m}} > 1.00$) — к структурам с медленным темпом аккреции (SA). На рис. 7 видно, что только две группы располагаются ниже $R_{\text{sp}}/R_{200} \sim 1.08$, то есть фактически у нас нижняя граница равна примерно 1.08. В отличие от модельных симуляций More et al. (2015), полученные нами приблизительные границы несколько меньше. В нашей выборке, состоящей из 157 объектов, 19 FA- и 22 SA-группы и скопления галактик. FA-структуры являются как правило скоплениями галактик с негауссовым распределением лучевых скоростей, с признаками слияния с другими группами и галактиками вблизи вириального радиуса, например, A 1270, A 1904, A 1991, NGC 2563. Среди SA-скоплений галактик присутствуют богатые скопления, такие как A 1656, A 1795, A 2142, A 2029, и бедные группы, такие как NGC 7237, IC 2476, MCG-01-29, которые собирают вещество (группы, галактики, газ) с больших расстояний от центра.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Группы/скопления галактик не имеют четких границ, поскольку на них постоянно падают окружающие группы галактик, галактики, газ и частицы темной материи. Поэтому всегда актуален вопрос об определении их границ: наряду с уже существующими методами, когда распределение плотности галактик в их пределах сравнивается с модельными расчетами или к скоплению применяется теорема вириала. В данной работе мы представляем новую наблюдаемую границу групп и скоплений галактик, найденную по галактикам, которую мы отождествили со splashback-радиусом R_{sp} — радиусом равным апоцентрам орбит большинства аккрецирующих галактик. Мы использовали выборку из 157 систем галактик (данные SDSS) локальной Вселенной с красными смещениями $0.01 < z < 0.10$ с массами $2 \times 10^{13} M_{\odot} < M_{200} < 2.5 \times 10^{15} M_{\odot}$. Для этих групп/скоплений галактик по наблюдаемому профилю нами определены радиусы R_{sp} и R_c (радиус центральной области) и найдены зависимости радиусов от других характеристик. Мы построили наблюдаемый профиль (в проекции) каждой группы/скопления галактик — интегральное распределение числа всех галактик и галактик ранних типов в зависимости от квадрата расстояния от центра. На этом профиле наблюдается крутой рост числа галактик, который сменяется линейным.

По точке перехода мы нашли $R_{\text{sp}} > R_{200}$. По самому крутому участку этого профиля мы оценили радиус центральной области структур R_c . Мы исследовали, как R_{sp} - и R_c -радиусы зависят от таких свойств групп/скоплений галактик, как рентгеновская светимость, динамическая масса M_{200} , измеренная по σ , K — светимость ($M_K < -21^{\text{m}}$), концентрация галактик Σ_5 и степень выделенности ярчайшей галактики $\Delta M_{1,4}$.

Получены следующие результаты:

1. Граница темного гало групп/скоплений галактик (радиус R_{sp}), определяемая по галактикам, пропорциональна радиусу вириализованной части R_{200} , оцениваемой по дисперсии лучевых скоростей, и радиусу центральной вириализованной области R_c . Мы получили, что $R_{\text{sp}} \propto R_{200}$ и $R_{\text{sp}} \propto R_c^{0.95 \pm 0.05}$.

2. Все измеренные нами радиусы коррелируют с рентгеновской светимостью и имеют близкие значения коэффициентов наклона. Наименьший разброс из них получен для зависимости splashback-радиуса от рентгеновской светимости: $R_{\text{sp}} \propto L_X^{0.24 \pm 0.03}$ (rms = 0.092). Мы получили также $R_c \propto L_X^{0.26 \pm 0.04}$ (rms = 0.110), $R_{200} \propto L_X^{0.25 \pm 0.03}$ (rms = 0.097). Еще меньший разброс имеют зависимости splashback-радиуса от массы M_{200} и $L_{K,200}$.

3. Отметим, что отношение R_{sp}/R_{200} (рис. 7) для большинства групп/скоплений галактик изменяется в узких пределах 1–2. Но в то же время, согласно моделированию (More et al. 2015) можно выделить объекты с высоким и низким темпом аккреции массы из окружающего пространства. Мы отнесли к FA-структурам 19 групп и скоплений галактик ($R_{\text{sp}}/R_{200} \leq 1.15$), для которых измерили $\langle R_{\text{sp}} \rangle = 1.42 \pm 0.10$. К SA-структурам мы отнесли 22 группы и скопления галактик ($R_{\text{sp}}/R_{200} \geq 1.60$) с $\langle R_{\text{sp}} \rangle = 2.22 \pm 0.23$.

4. Нами найдена слабая зависимость радиуса R_{sp} групп и скоплений галактик от разницы абсолютных звездных величин между ярчайшей и четвертой по яркости галактикам $\Delta M_{1,4}$ в пределах радиуса $0.5 R_{200}$.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использованы базы данных NASA/IPAC Extragalactic Database (NED, <http://nedwww.ipac.caltech.edu>), Sloan Digital Sky Survey (SDSS, <http://www.sdss.org>), Two Micron All Sky Survey (2MASS, <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/releases/allsky/>).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Adhikari, N. Dalal, and R. T. Chamberlain, *J. Cosmology and Astroparticle Physics* **11**, id. 019 (2014).
2. S. Adhikari, N. Dalal, and J. Clampitt, *J. Cosmology and Astroparticle Physics* **07**, id. 022 (2016).
3. M. L. Balogh, J. F. Navarro, and S. L. Morris, *Astrophys. J.* **540**, 113 (2000).
4. E. Baxter, C. Chang, B. Jain, et al., *Astrophys. J.* **841**, article id. 841 (2017).
5. P. Busch and S. D. M. White, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **470**, 4767 (2017).
6. R. G. Carlberg, H. K. C. Yee, E. Ellingson, et al., *Astrophys. J.* **485**, L13 (1997).
7. C. Chang, E. Baxter, B. Jain, et al., *Astrophys. J.* **864**, article id. 83 (2018).
8. O. Contigiani, H. Hoekstra, and Y. M. Bahé, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **485**, 408 (2019).
9. B. Diemer and A. V. Kravtsov, *Astrophys. J.* **789**, article id. 1 (2014).
10. M. Fong and J. Han, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **503**, 4250 (2021).
11. S. P. D. Gill, A. Knebe, and B. K. Gibson, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **356**, 1327 (2005).
12. R. J. III Gott, *Astrophys. J.* **186**, 481 (1973).
13. J. E. Gunn and R. J. III Gott *Astrophys. J.* **176**, 1 (1972).
14. C. P. Haines, M. J. Pereira, G. P. Smith, et al., *Astrophys. J.* **806**, article id. 101 (2015).
15. A. I. Kopylov and F. G. Kopylova, *Astrophysical Bulletin* **70**, 243 (2015).
16. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **71**, 257 (2016).
17. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **72**, 363 (2017).
18. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **73**, 267 (2018).
19. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **74**, 365 (2019).
20. G. A. Mamon, T. Sanchis, E. Salvador-Sole, and J. M. Solanes, *Astron. and Astrophys.* **414**, 445 (2004).
21. S. More, B. Diemer, and A. V. Kravtsov, *Astrophys. J.* **810**, article id. 36 (2015).
22. S. More, H. Miyatake, M. Takada, et al., *Astrophys. J.* **825**, article id. 39 (2016).
23. K. A. Pimblet, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **411**, 2637 (2010).
24. T. Shin, S. Adhikari, E. J. Baxter, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **487**, 2900 (2019).
25. K. Umetsu and B. Diemer, *Astrophys. J.* **836**, article id. 231 (2017).
26. D. Zürcher and S. More, *Astrophys. J.* **874**, article id. 184 (2019).

Halo Radius (Splashback Radius) of Groups and Clusters of Galaxies on Small Scales

F. G. Kopylova¹ and A. I. Kopylov¹

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

We report the results of a study of the distribution of galaxies in the projection along the radius ($R \leq 3R_{200c}$) for 157 groups and clusters of galaxies in the local Universe ($0.01 < z < 0.10$) with line-of-sight velocity dispersions $200 \text{ km s}^{-1} < \sigma < 1100 \text{ km s}^{-1}$. We introduce a new observed boundary for the halos of clusters of galaxies, which we identify with the splashback radius R_{sp} . We also identified the core of groups/clusters of galaxies with the radius R_c . These radii are determined by the observed integrated distribution of the number of galaxies as a function of squared angular radius from the center of the group/cluster, which (usually) coincides with the brightest galaxy. We found for the entire sample that the boundary of dark matter R_{sp} for groups/clusters of galaxies is proportional to the radius R_{200c} of the virialized region. We measured the mean radius $\langle R_{\text{sp}} \rangle = 1.14 \pm 0.02 \text{ Mpc}$ for groups of galaxies ($\sigma \leq 400 \text{ km s}^{-1}$) and $\langle R_{\text{sp}} \rangle = 2.00 \pm 0.07 \text{ Mpc}$ for clusters of galaxies ($\sigma > 400 \text{ km s}^{-1}$). The mean ratio of radii is $\langle R_{\text{sp}}/R_{200c} \rangle = 1.40 \pm 0.02$, or $\langle R_{\text{sp}}/R_{200m} \rangle = 0.88 \pm 0.02$.

Keywords: *galaxies: clusters: groups: general—galaxies: evolution—cosmology: large-scale structure of Universe*