

УДК 524.77–13

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ПЛОСКОСТЬ И ДРУГИЕ МАСШТАБНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУПП И СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

© 2016 Ф. Г. Копылова*, А. И. Копылов

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 14 января 2016 года; принята в печать 13 июня 2016 года

В работе исследованы соотношения между основными характеристиками групп и скоплений галактик по архивным данным каталогов SDSS и 2MASX. Нами разработан и применен новый метод определения размера систем галактик и их эффективного радиуса, в пределах которого содержится половина галактик, а не половина светимости, так как светимость ярчайшей галактики в группах может составлять свыше 50% общей светимости группы. Полученные характеристики ($\lg L_K$, $\lg R_e$ и $\lg \sigma_{200}$) 94 систем галактик ($0.0038 < z < 0.09$) определяют фундаментальную плоскость (ФП), которая с разбросом 0.15 подобна по форме ФП скоплений галактик, полученных Schaeffer et al. (1993) и D’Onofrio et al. (2013) другими методами и в других полосах. Показано, что ФП в ближней инфракрасной области для 94 систем галактик имеют вид: $L_K \propto R_e^{0.70 \pm 0.13} \sigma^{1.34 \pm 0.13}$, а ФП в рентгеновской области — $L_X \propto R_e^{1.15 \pm 0.39} \sigma^{2.56 \pm 0.40}$. Форма инфракрасной ФП групп и скоплений согласуются с ФП галактик ранних типов, определенной таким же способом. Форма инфракрасной ФП систем галактик отклоняется от той формы, которая следует из вириальных предсказаний, и добавление в качестве четвертого независимого параметра отношения массы к светимости влияет на это отклонение незначительно, но уменьшает разброс ФП выборки богатых скоплений галактик на 12%.

Ключевые слова: *галактики:группы:общее — галактики:скопления:общее — галактики:фундаментальные параметры — галактики:статистика*

1. ВВЕДЕНИЕ

Динамические и фотометрические характеристики галактик ранних типов (центральная дисперсия лучевых скоростей σ в проекции, эффективный радиус R_e и средняя поверхностная яркость $\langle I_e \rangle$) образуют так называемую фундаментальную плоскость (ФП) [1–7]. ФП галактик имеет существенно низкое рассеяние по сравнению с ранее полученными соотношением Фабер–Джексона [8] между светимостью галактики L и дисперсией лучевых скоростей σ для звезд в центре и соотношением Корменди [9] между поверхностной яркостью галактики L и эффективным радиусом R_e . ФП галактик ранних типов обычно записывается относительно зависящего от расстояния до объекта эффективного радиуса R_e :

$$\lg R_e = a \lg \sigma + b \lg \langle I_e \rangle + c.$$

Коэффициенты a и b характеризуют форму ФП, а c — нуль-пункт. Коэффициент a обычно изменяется в пределах 1.1–1.56, b — 0.75–0.90 для разных

фильтров и разных методов получения регрессионных соотношений [10].

Поскольку $\lg R_e$ и $\lg \langle I_e \rangle$ определяются светимостью галактик — $\langle I_e \rangle = L/(2\pi R_e^2)$, то $\lg L$, $\lg \sigma$ и $\lg R_e$ также образуют ФП — $L \propto R_e^\alpha \sigma^\beta$. Вид и форма ФП зависят от того, каким способом определяются эти параметры и каким способом вычисляется регрессия между ними. В работе [11] продемонстрировано, что фундаментальные плоскости всех вириализованных объектов (шаровых скоплений, галактик, скоплений галактик) имеют близкие формы. Если исследуемые галактики представляют собой вириализованные и гомологичные системы, имеющие одинаковые соотношения между массой и светимостью, то $a = 2$ и $b = -1$ [7] или $\alpha = 1$ и $\beta = 2$ [12]. Однако наблюдаемые коэффициенты ФП отличаются от этих значений практически во всех фильтрах. Существует их отклонение («tilt»), которое возникает, возможно, как следствие структурной неоднородности и свойств звездных населений галактик (в том числе и различий соотношения M/L в зависимости от диапазона длин волн) [10],

*E-mail: flera@sao.ru

либо различий в доле темной материи в пределах эффективного радиуса у галактик [13].

Впервые ФП скоплений галактик была построена по фотометрическим наблюдательным характеристикам для выборки шестнадцати богатых скоплений галактик ($z < 0.2$) [14]. В этой работе были использованы светимости L в фильтре V и эффективные радиусы R_e систем галактик, содержащие половину светимости, определенные по профилю Вокулера. В результате вычисления регрессионной зависимости L от других параметров получен следующий вид ФП: $L \propto R_e^{0.89 \pm 0.15} \sigma^{1.28 \pm 0.11}$. В работе [12] изучаемые параметры 20 скоплений галактик (выборка ENACS) определены для разных профилей: профилей Кинга, Хаббла, NFW и Вокулера. Для наилучшим образом подошедшего к наблюдаемым данным профилю Кинга авторы [12] получили ФП $L \propto R_e^{1.19 \pm 0.14} \sigma^{0.91 \pm 0.16}$.

Для выборки скоплений галактик WINGS [11] построены профили поверхностной яркости в фильтре V . В центральной области в них вписан профиль Вокулера, а во внешние области — экспоненциальный диск. Полученная ФП имеет следующий вид (см. рис. 5 в [11]):

$$\lg R_e = 1.08(\pm 0.16) \lg \sigma - 0.96(\pm 0.13) \lg \langle I_e \rangle + 2.60(\pm 0.47).$$

ФП скоплений галактик также можно построить не только по наблюдательным данным, полученным в оптической области, но и по излучению газа в рентгеновской области. В работе [15] найдено, что ФП рентгеновских скоплений галактик определяют следующие параметры: $\lg \rho_0$ — центральная плотность газа, $\lg R$ — радиус ядра, T — температура газа.

Другое представление ФП дано в работе [16], авторы которой, используя оптическую светимость, радиус, где излучается ее половина, и светимость в рентгеновской области для 78 скоплений галактик, построили ФП в виде

$$\lg L_{\text{opt}}/L_{\odot} = \lg(R_o^{0.84} L_x^{0.21}).$$

Целью данной работы является построение ФП и других зависимостей между характеристиками 94 групп и скоплений галактик, которые имеют красные смещения в диапазоне $0.012 < z < 0.09$ (и Virgo). Определяемые нами характеристики L_K , σ , L_X , эффективные радиусы, полученные по светимости, по числу галактик и соотношения между ними (ФП) позволят прояснить структурные свойства, степень отклонения от релаксированного состояния (эволюционный статус), оценить имеющиеся пекулярные скорости и другие свойства систем галактик. В рассматриваемой выборке 50 групп

галактик с $\sigma < 400 \text{ км с}^{-1}$ и 44 скопления галактик с большей дисперсией лучевых скоростей. Среди них 45 систем галактик представляют собой выборку из работы [17] с измеренной рентгеновской светимостью, объекты которой были отобраны и наблюдались однородным способом в ходе выполнения обзоров лучевых скоростей CfA2 и SSRS2. Мы переименовали группы по названию ярчайшей галактики или по соответствующему имени из каталога Эйбелла. Богатые скопления галактик в основном расположены в областях сверхскоплений галактик Leo, Hercules, Corona Borealis и Bootes. Также мы включили в выборку богатые рентгеновские скопления A 2029 и A 2142, чтобы охватить большой диапазон масс и рентгеновских светимостей.

Размеры систем галактик, количество галактик, светимость и радиус (эффективный), в пределах которого излучается половина светимости или наблюдается половина галактик, определены по интегральному распределению числа галактик (по профилю систем галактик) в зависимости от квадрата радиуса от центра. Работа выполнена нами с привлечением данных каталога SDSS¹ (Sloan Digital Sky Survey Data Release 7, 8) [18], данных каталога 2MASS² XSC (Two-Micron All-Sky Survey Extended Source Catalog) [19] и NED³ (NASA Extragalactic Database). Статья организована следующим образом. Во втором разделе описана процедура измерения эффективного радиуса R_e , светимости L_K и количества галактик N на этом радиусе. В третьем разделе получены и описаны зависимости между характеристиками систем галактик: соотношение Корменди, соотношение Фабер–Джексона, фундаментальная плоскость и другие. В заключении перечислены основные результаты. В работе мы использовали следующие космологические параметры: $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_{\Lambda} = 0.7$, $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ГАЛАКТИК

2.1. Наблюдаемые характеристики систем галактик

В таблице 1 приведены координаты выбранных нами центров систем галактик, которые, как правило, совпадают с ярчайшей галактикой системы, и светимости в рентгеновской области со ссылкой на источник. Если ярчайшая галактика располагается в стороне от основной массы галактик или таких

¹<http://www.sdss.org>.

²<http://www.ipac.caltech.edu/2mass/releases/allsky/>.

³<http://nedwww.ipac.caltech.edu>.

Таблица 1. Рентгеновская светимость групп и скоплений галактик

Cluster	RA _{J2000.0} , deg	Dec _{J2000.0} , deg	$L_{0.1-2.4 \text{ keV}}$, $10^{44} \text{ эрг с}^{-1}$	Cluster	RA _{J2000.0} , deg	Dec _{J2000.0} , deg	$L_{0.1-2.4 \text{ keV}}$, $10^{44} \text{ эрг с}^{-1}$
Virgo	12.51373	12.39114	0.58 [20]	NGC 6338	17.25638	57.41119	0.25 [25]
HCG 042	10.00397	-19.63695	0.01 [21]	NGC 3119	10.11441	14.37357	0.04 [22]
HCG 062	12.88495	-9.20383	0.16 [21]	NGC 5758	14.78391	13.66837	0.07 [23]
AWM 3	14.47121	25.84877	-	A 2199	16.47729	39.55123	1.89 [20]
NGC 2563	8.34325	21.06780	0.05 [21]	NGC 6107	16.29459	35.00422	0.17 [25]
AWM 7	2.90760	41.57959	-	AWM 4	16.08407	23.93269	0.22 [20]
MKW 01s	9.33394	1.03829	-	A 1177	11.16235	21.75894	0.11 [20]
NGC 0533	1.42538	1.75911	0.07 [22]	NGC 3847*	11.75626	33.34110	-
NGC 0741	1.93918	5.62894	0.04 [23]	A 1185*	11.17818	28.70554	0.15 [25]
NGC 0080	0.35301	22.35712	0.07 [22]	A 2063	15.38481	8.60922	1.04 [20]
MKW 12	14.04684	9.34138	-	A 2052	15.27902	7.02163	1.29 [20]
MKW 04	12.07418	1.89597	-	AWM 5	16.96614	27.85442	-
MKW 01	10.00840	-2.9690	-	A 1228A	11.36181	34.36278	-
MKW 10*	11.70171	10.29136	0.02 [24]	A 2147	16.03806	15.97746	1.45 [20]
NGC 3022	9.82757	-5.16658	-	A 2151*	16.08570	17.71912	0.45 [20]
NGC 2783	9.22763	29.99296	-	NGC 5098	13.33742	33.14341	0.13 [20]
UGC 07115	12.13488	25.23710	0.04 [22]	A 1139	10.96972	1.60458	0.15 [20]
UGC 02005	2.53271	1.24652	0.04 [22]	A 1228B	11.38235	34.11149	0.06 [25]
IC 5357	23.78972	-2.30067	0.03 [22]	A 1983	14.88203	16.70286	0.24 [20]
NGC 2965	9.72199	36.24782	-	MKW 03s	15.36440	7.70882	1.37 [20]
NGC 1016	2.63877	2.11925	-	A 0671	8.47546	30.43113	0.46 [20]
NGC 3158	10.23070	38.76490	0.03 [22]	A 0757	9.21882	47.70839	0.46 [20]
NGC 0070	0.30625	30.06667	0.09 [23]	RXC J1022	10.36951	38.51782	0.18 [20]
UGC 07132	12.15273	1.56951	-	A 1991	14.90875	18.64232	0.70 [20]
AWM 2	12.26044	23.98194	-	A 0602	7.89072	29.35944	0.58 [20]
NGC 5171	13.48932	11.73511	0.10 [23]	A 1781*	13.74597	2.74565	-
NGC 2832	9.32968	33.74974	0.10 [23]	A 1795	13.81458	26.59293	5.75 [20]
A 1656	13.00226	27.97694	3.70 [20]	A 1275	11.50088	36.63722	0.22 [25]
NGC 5129	13.40278	13.97654	0.09 [23]	A 1825	13.96757	20.61902	0.11 [25]
NGC 1132	2.88107	-1.27476	0.10 [22]	A 1828E*	13.97076	18.34617	-
SS2b 164	11.37884	-7.67625	0.04 [22]	A 1828W	13.93856	18.29288	-
NGC 7436B	22.96598	26.14994	-	A 2124	15.74973	36.10946	0.69 [20]
NGC 5306	12.81983	-7.22440	0.05 [22]	A 2079	15.46253	28.92873	0.37 [26]
NGC 5223	13.57367	34.69043	0.06 [23]	A 2092	15.55427	31.14515	0.40 [26]
MKW 05	14.01033	-2.85782	-	A 2065	15.37477	27.70763	2.52 [20]
NGC 7385	22.83183	11.60857	0.06 [22]	A 0744	9.12236	16.65189	0.39 [20]
NGC 4325	12.38519	10.62124	0.15 [21]	A 2067	15.38561	30.87750	0.44 [20]
IC 0186	2.93118	9.311830	0.02 [22]	A 2089	15.54717	28.03951	-
NGC 7237	22.24611	13.84167	0.06 [23]	A 1238	11.38176	1.11441	0.26 [25]
IC 2476	9.46467	29.98575	-	A 1775B	13.69698	26.37347	1.60 [27]
NGC 5627	14.47619	11.37824	0.02 [22]	A 1800	13.82321	28.10731	1.56 [20]
MKW 08	14.67857	3.46542	0.31 [20]	RXC J1350	13.83765	29.22148	-
UGC 05088	9.55714	34.04809	0.02 [25]	A 2061	15.35572	30.67094	2.02 [20]
MKW 04s	12.11083	28.17447	-	A 2029	15.18225	5.74478	7.80 [20]
NRGb 004	8.63520	25.27261	0.18 [23]	A 1898*	14.34415	25.25784	0.11 [26]
AWM 1	9.28526	20.06970	-	A 2019	15.05800	27.15445	0.15 [26]
NGC 2795	9.26776	17.62837	0.05 [25]	A 2142	15.97222	27.23341	10.58 [20]

галактик несколько, в качестве центра нами взят центроид галактик (помечены звездочкой). Результаты определения физических характеристик части систем (63 галактик) для областей радиусом R_{200} и R_e описаны и приведены в работах [28, 29]. R_{200} представляет собой радиус, в пределах которого плотность массы систем превышает критическую плотность Вселенной в 200 раз [30]; R_e обычно определяется как радиус, в пределах которого содержится половина светимости систем галактик. Также в указанных работах даны дисперсии лучевых скоростей σ_{200} , динамические массы M_{200} и $M_{1/2}$, светимости в фильтре K_s (далее K , $L_{K,200}$ и $L_{K,1/2}$). Характеристики оставшейся трети систем галактик определены в настоящей работе тем же способом, что и в [28, 29]. Причем массы M_{200} и $M_{1/2}$ определялись по дисперсии лучевых скоростей галактик σ_{200} как $M \propto \sigma^3$ и $M \propto \sigma^2$ соответственно методами, описанными в этих работах, в предположении, что системы находятся в вириальном равновесии и имеют изотропные лучевые скорости.

Чтобы детальнее охарактеризовать наблюдаемую структуру и кинематику групп и скоплений галактик, рассматриваемых в данной статье, а также их ближайших окрестностей, на рис. 1 и рис. 2 на примере скоплений A 1800 и A 2124 представлены:

- 1) разброс лучевых скоростей членов скопления и галактик, отклоняющихся более чем на 2.7σ и отнесенных к фону, в зависимости от квадрата расстояния от центра скопления (верхняя левая панель рисунка);
- 2) интегральное распределение числа галактик в зависимости от квадрата радиуса для наглядного выявления плотного ядра скопления, более разреженного гало и внешней области, где распределение выходит на линейную зависимость в выбранных координатах, т. е. наблюдается однородное в среднем распределение галактик окружения (нижняя левая панель);
- 3) расположение галактик в картинной плоскости в экваториальных координатах (верхняя правая панель);
- 4) гистограмма распределения лучевых скоростей всех галактик в пределах радиуса R_{200} (для нее сплошной линией показана функция Гаусса, соответствующая дисперсии лучевых скоростей скоплений из таблицы 1) (нижняя правая панель).

Галактики ранних типов отобраны по характеризующим их параметрам SDSS в фильтре r : $\text{fracDeV} \geq 0.8$, где fracDeV показывает вклад балджа в профиль поверхностной яркости галактики;

$r_{90}/r_{50} \geq 2.6$, где $c = r_{90}/r_{50}$ — индекс концентрации, равный отношению радиусов, ограничивающих 90% и 50% потока Петросьяна. Кроме того, мы сделали ограничения по цвету ($u - r$): $\Delta(u - r) > -0.2$. На рис. 1 и рис. 2 галактики ранних типов помечены кружками с точкой внутри.

2.2. Определение размера и эффективного радиуса систем галактик

По излому на профиле скопления, представляющему распределение числа галактик по квадрату радиуса от выбранного центра и приведенному на рис. 1 и рис. 2 внизу слева, можно довольно точно определить размеры системы, ее вириализованную часть радиусом R_h (штрихпунктирная линия), ядро скопления радиусом R_c (длинная штриховая линия). На рисунках также показана область радиусом R_{200} (короткая штриховая линия). В центральной части группы или скопления количество галактик круто растет (эта область ограничена радиусом R_c), прямой линией показана область постоянного роста плотности. Эту область мы называли гало скопления, в ней находятся галактики и мелкие группы, попавшие в него недавно. Как правило, она имеет радиус R_h , превышающий R_{200} и близкий к радиусу $R_{100} \approx 1.3R_{200}$ [31], в пределах которого системы также считаются вириализованными. Другой прямой линией показана область постоянного роста плотности за пределами вириализованной части систем. Подобный способ определения размера систем галактик разработан впервые нами и применен к выборке скоплений галактик с известными измерениями масс по излучению газа в рентгеновской области [29]. В данной работе мы дополнительно уточнили радиусы R_h для богатых скоплений галактик A 1656 и A 1795, поскольку в работе [29] они были недооценены.

Как показано на левых нижних панелях рис. 1 и рис. 2, в пределах радиуса R_h заключено N_1 галактик без учета фона, а с учетом фона — N_{1c} галактик, которые мы нашли графически по наклону в распределении галактик за пределами вириализованной области скоплений. Несмотря на то что мы уже выделили члены групп галактик по лучевым скоростям, согласно [32] среди них могут находиться фоновые галактики, так называемые «interlopers.» N_1 и N_{1c} связаны уравнением $N_{1c} = N_1 - \pi R_h^2 \Sigma^N$, где плотность галактик (в области R_h) равна $\Sigma^N = (N_1 - N_{1c})/(\pi R_h^2)$. Для полученных N_{1c} галактик мы измерили светимость $L_{1c} = L_1/N_1 N_{1c}$, нашли радиус скопления $R_e(L_{1c}/2)$ (далее $R_e(L/2)$), в пределах которого мы имеем половину светимости системы, а по $N_{1c}/2$ — $R_e(N_{1c}/2)$ (далее $R_e(N/2)$), радиус, в пределах которого заключена половина от полного количества галактик в системе.

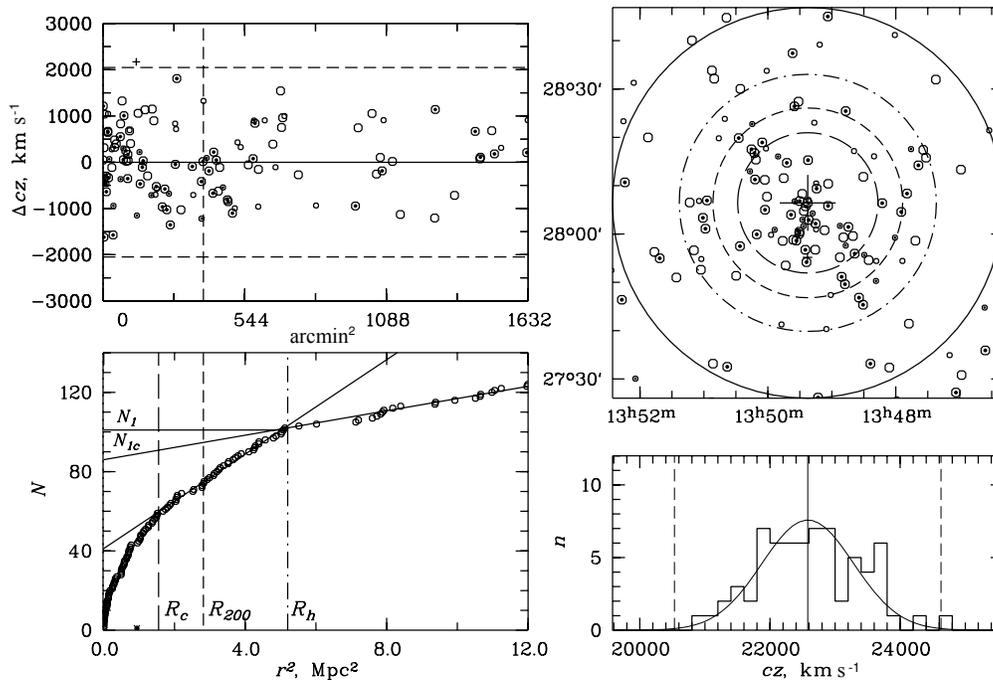


Рис. 1. Распределение галактик в скоплении А 1800. Слева сверху: отклонение лучевых скоростей галактик от средней лучевой скорости скопления, определенной по галактикам в пределах радиуса R_{200} . Горизонтальные штриховые линии соответствуют отклонениям $\pm 2.7\sigma$, вертикальной штриховой линией отмечен радиус R_{200} . Кружками большего размера отмечены галактики ярче $M_K^* + 1 = -23^m.29$, кружками с точкой внутри — галактики ранних типов, плюсом — галактика заднего фона. По оси абсцисс приведено расстояние от центра скопления в угловых минутах в квадрате. Слева внизу: интегральное распределение числа галактик в зависимости по квадрату расстояния от центра скопления в мегапарсеках. Вертикальными линиями, кроме радиуса R_{200} , показаны радиус R_h — штрихпунктирной линией, радиус R_c — длинной штриховой линией. Кружки соответствуют галактикам, обозначенным кружками на левом верхнем рисунке, звездочки — галактикам фона. Справа сверху: распределение на небе в экваториальной системе координат галактик, которые представлены на верхнем левом рисунке (обозначения те же). Кругами выделены области радиусами R_{200} , R_h , R_c . Область исследования ограничена кругом радиусом $40'$. Большим крестом отмечен центр скопления. Справа внизу: распределение по лучевым скоростям всех галактик в пределах радиуса R_{200} (сплошной линией для членов скопления показана гауссиана, соответствующая σ скопления). Сплошная вертикальная линия указывает среднюю лучевую скорость скопления, штриховые линии соответствуют отклонениям $\pm 2.7\sigma$.

Для построения классической ФП по наблюдениям в оптической области необходимо найти светимость системы, определить эффективный радиус, в пределах которого содержится половина светимости. Как было упомянуто ранее, в работах [28, 29] мы определили инфракрасную светимость (ИК) скоплений галактик в фильтре K . Для этого мы использовали результаты фотометрии галактик, представленные в окончательной версии каталога 2MASS для протяженных объектов — XSC [19]. Фотометрический предел этого каталога мы увеличили до $K = 14^m.7-15^m.0$ с учетом зависимости $(r - K)$ -цвета галактики от приведенного в SDSS цвета $(u - r)$. Поскольку в нашей выборке есть далекие скопления галактик, полную светимость для систем с $z > 0.035$ мы нашли как

сумму светимости всех наблюдаемых галактик, и к ней прибавили добавку (до $M_K = -21^m$), полученную по составной функции светимости скоплений галактик методом, описанным в работе [33].

2.3. Соотношение между K -светимостью и числом галактик в системах галактик

В результате изучения девяти богатых скоплений галактик найдено, что между числом галактик в пределах радиуса R_{200} и их ИК-светимостью существует практически линейная зависимость, в основном благодаря тому, что функция светимости скоплений галактик в области ярких галактик мало изменяется от скопления к скоплению [34]. На рис. 3 мы привели эту зависимость для всей нашей

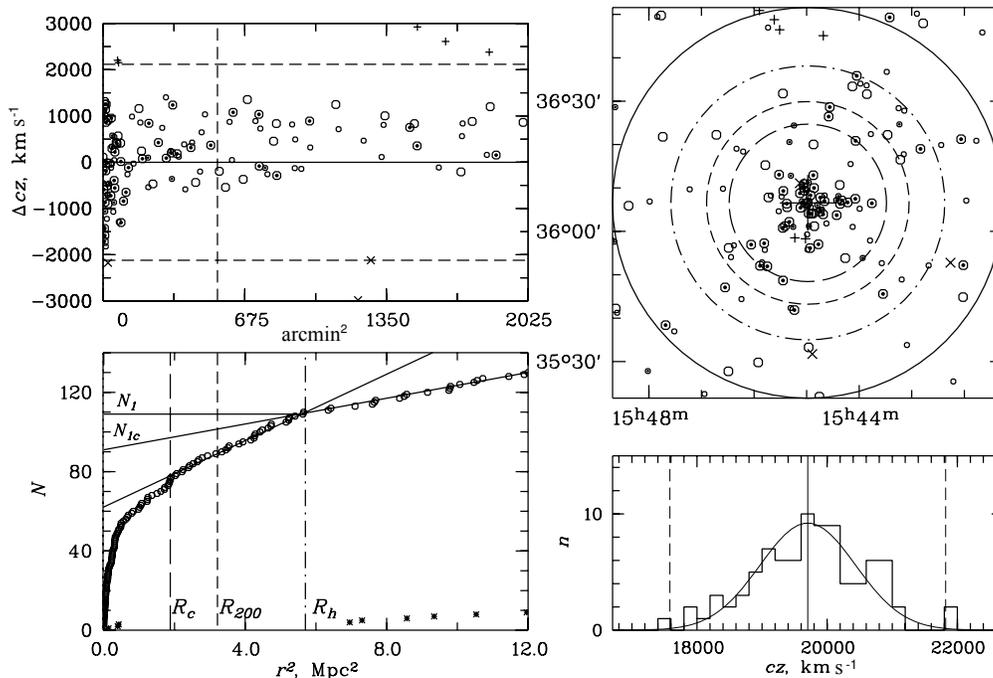


Рис. 2. Распределение галактик в скоплении А 2124. На левой верхней панели крестиками показаны галактики переднего фона. Структура и обозначения такие же, как на рис. 1.

выборки групп и скоплений галактик ($N = 191$), чтобы показать, что эффективный радиус для групп (в особенности) и скоплений галактик можно определять как радиус, в пределах которого содержится половина галактик систем. Полученные таким образом R_e больше в среднем на 17%.

В центре групп и скоплений галактик, как правило, расположена очень яркая галактика (ярчайшая галактика системы), светимость которой может составлять свыше 50% светимости всей системы. Для таких четырнадцати групп галактик нашей выборки, как, например, АWM 04 и А 1177 (системы типа «fossil» — «остаточной группы»), с очень яркой галактикой в центре, $R_e(L/2)$ мы определяли по светимости, полученной с вычетом светимости ярчайшей галактики из полной светимости, а $R_e(N/2)$ — обычным способом по всем галактикам. С учетом вышесказанного в данной работе мы нашли эффективные радиусы систем галактик двумя способами как радиусы, в пределах которых содержится половина светимости $L/2$ и половина числа галактик $N/2$, но второй способ более предпочтителен для групп и скоплений галактик при построении общей фундаментальной плоскости. Первый способ необходим для поиска значительно проэволюционировавших (ре-

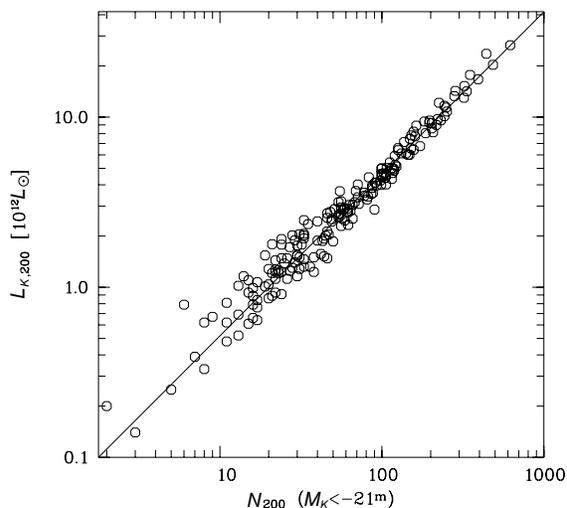


Рис. 3. Светимость групп и скоплений галактик в фильтре K ($M_K < -21^m$) в зависимости от количества галактик в пределах радиуса R_{200} . Сплошной линией показана линейная зависимость $L_{K,200} \propto N_{200}$.

ликтовых) групп, в которых ярчайшая галактика приобрела гигантскую светимость, поглощая более мелкие галактики.

В таблице 2 представлены результаты наших

измерений физических характеристик исследуемых в данной работе групп и скоплений галактик (отсортированных по красному смещению) для области радиусом R_{200} , а также эффективные радиусы R_e , полученные по половине светимости $L/2$ и по половине числа галактик $N/2$. В колонках

таблицы представлены: (1) — имя системы (группы галактик из [17] названы по ярчайшей галактике), (2) — гелиоцентрическое красное смещение, (3) — радиус R_{200} в Мпк, (4) — радиус R_c в Мпк, (5) — радиус R_h в Мпк, (6) — дисперсия лучевых скоростей с космологической поправкой $(1+z)^{-1}$

Таблица 2. Физические характеристики групп и скоплений галактик.

Cluster	z_h	R_{200} , Мпк	R_c , Мпк	R_h , Мпк	σ_{200} , km s ⁻¹	M_{200} , 10 ¹⁴ M _⊙	$L_{K,200}$, 10 ¹² L _⊙	$L_{K,1}$, 10 ¹² L _⊙	$R_{e,L}$, Мпк	$L_{K,2}$, 10 ¹² L _⊙	$R_{e,N}$, Мпк
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
HCG 042*	0.01259	0.56	0.30	0.75	228	0.20 ± 0.15	0.62	0.34	0.28	0.56	0.26
HCG 062	0.01434	1.00	0.39	1.03	407	1.16 ± 0.56	2.05	0.56	0.49	0.39	0.34
AWM 3*	0.01488	0.66	0.44	1.04	269	0.33 ± 0.18	0.48	0.22	0.16	0.45	0.42
NGC 2563	0.01570	0.91	0.28	1.00	369	0.86 ± 0.39	1.40	0.66	0.27	0.73	0.34
AWM 7	0.01734	1.71	1.07	1.96	698	5.84 ± 1.51	4.13	1.75	0.40	1.88	0.52
MKW 01s*	0.01756	0.44	0.35	0.68	179	0.10 ± 0.10	0.25	0.11	0.15	0.22	0.32
NGC 0533	0.01841	0.99	0.59	1.45	404	1.13 ± 0.74	1.79	0.80	0.32	1.24	0.39
NGC 0741*	0.01842	0.90	0.62	0.98	368	0.86 ± 0.41	1.27	0.59	0.27	1.03	0.34
NGC 0080	0.01910	0.73	0.37	0.79	296	0.44 ± 0.23	1.94	0.96	0.23	1.21	0.28
MKW 12	0.01976	0.47	0.42	1.10	192	0.12 ± 0.07	0.99	0.62	0.26	0.90	0.42
MKW 04	0.02021	1.26	0.83	1.51	515	2.34 ± 0.74	2.56	1.24	0.27	1.90	0.48
MKW 01	0.02079	0.79	0.42	0.69	323	0.58 ± 0.44	0.75	0.34	0.13	0.48	0.15
MKW 10*	0.02083	0.36	0.15	0.60	147	0.05 ± 0.05	0.79	0.42	0.10	0.76	0.12
NGC 3022	0.02096	0.68	0.73	1.14	276	0.36 ± 0.28	0.93	0.61	0.35	0.69	0.46
NGC 2783	0.02215	0.85	0.90	1.33	346	0.71 ± 0.38	1.10	0.50	0.39	0.67	0.43
UGC 07115	0.02220	0.82	0.66	1.06	334	0.64 ± 0.26	1.32	0.84	0.57	0.73	0.52
UGC 02005	0.02234	0.86	0.73	1.12	352	0.75 ± 0.34	1.12	0.58	0.55	0.73	0.66
IC 5357	0.02244	0.93	0.57	1.02	381	0.95 ± 0.62	1.21	0.58	0.38	0.56	0.36
NGC 2965	0.02247	0.42	0.41	1.18	173	0.09 ± 0.10	0.39	0.23	0.16	0.30	0.32
NGC 1016*	0.02258	0.79	0.36	1.10	322	0.57 ± 0.38	1.92	0.78	0.35	1.16	0.26
NGC 3158	0.02263	0.92	0.26	1.08	375	0.90 ± 0.44	1.78	0.87	0.16	1.37	0.26
NGC 0070	0.02264	1.02	0.62	1.15	415	1.22 ± 0.65	2.01	0.95	0.12	1.16	0.36
UGC 07132*	0.02272	0.38	0.44	0.71	156	0.06 ± 0.06	0.20	0.14	0.64	0.18	0.37
AWM 2	0.02276	0.72	0.42	0.77	293	0.43 ± 0.24	0.93	0.42	0.15	0.49	0.31
NGC 5171	0.02300	0.91	0.84	1.44	371	0.88 ± 0.37	1.50	1.03	0.64	0.94	0.52
NGC 2832	0.02304	0.81	0.69	1.23	331	0.62 ± 0.24	1.76	0.86	0.24	1.18	0.46
NGC 5129	0.02340	0.71	0.77	1.36	290	0.42 ± 0.22	1.28	0.65	0.24	0.94	0.43
NGC 1132*	0.02351	0.51	0.53	1.05	210	0.16 ± 0.13	0.62	0.37	0.50	0.56	0.28
SS2b 164	0.02381	0.82	0.60	1.56	334	0.64 ± 0.43	1.04	0.84	0.58	0.93	0.60
NGC 7436B*	0.02472	0.94	0.42	1.09	383	0.96 ± 0.54	1.72	0.75	0.26	1.16	0.40
NGC 5306*	0.02473	0.75	0.56	1.63	305	0.48 ± 0.42	1.16	0.71	0.52	0.43	0.52
NGC 5223	0.02483	0.66	0.57	0.97	271	0.34 ± 0.19	1.54	0.59	0.20	1.02	0.50
MKW 05*	0.02486	0.70	0.63	0.88	288	0.41 ± 0.27	0.69	0.37	0.11	0.61	0.39
NGC 7385	0.02511	1.14	0.55	0.85	466	2.24 ± 1.40	2.40	1.08	0.17	1.64	0.34

Таблица 2. (Продолжение)

Cluster	z_h	R_{200} , Мпс	R_c , Мпс	R_h , Мпс	σ_{200} , km s ⁻¹	M_{200} , 10 ¹⁴ M _⊙	$L_{K,200}$, 10 ¹² L _⊙	$L_{K,1}$, 10 ¹² L _⊙	$R_{e,L}$, Мпс	$L_{K,2}$, 10 ¹² L _⊙	$R_{e,N}$, Мпс
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
NGC 4325	0.02539	0.66	0.41	0.84	271	0.34 ± 0.26	0.61	0.34	0.17	0.44	0.32
IC 0186	0.02602	0.78	0.69	1.16	318	0.55 ± 0.48	1.26	0.72	0.44	0.89	0.50
NGC 7237	0.02610	0.92	0.78	1.47	376	0.91 ± 0.38	1.57	0.95	0.44	1.06	0.50
IC 2476	0.02620	0.59	0.59	0.96	243	0.24 ± 0.16	0.76	0.40	0.18	0.53	0.39
NGC 5627	0.02668	0.77	0.53	1.10	314	0.53 ± 0.28	1.38	0.74	0.46	0.69	0.44
MKW 04s	0.02793	1.03	0.82	1.49	423	1.29 ± 0.51	1.88	0.97	0.29	1.46	0.55
NRGb 004	0.02809	0.88	0.78	1.13	362	0.81 ± 0.44	1.30	0.65	0.51	0.63	0.48
AWM 1	0.02865	0.98	0.64	1.05	402	1.11 ± 0.48	2.35	0.99	0.35	1.31	0.40
NGC 2795	0.02899	1.04	0.71	1.32	431	1.37 ± 0.55	2.39	1.20	0.25	1.42	0.38
NGC 3119	0.02966	0.87	0.91	1.83	355	0.76 ± 0.38	1.54	1.17	0.56	1.26	0.62
NGC 5758	0.02992	0.71	0.66	1.09	291	0.42 ± 0.20	1.23	0.68	0.20	0.79	0.40
NGC 6107	0.03109	1.33	0.99	1.86	546	2.78 ± 0.82	3.58	1.90	0.50	2.23	0.65
NGC 3847	0.03246	0.91	0.86	1.66	372	0.88 ± 0.34	2.58	1.39	0.66	1.65	0.77
A 1185	0.03273	1.69	1.38	2.01	676	5.27 ± 1.20	6.85	3.00	0.55	3.38	0.66
A 1228A	0.03506	0.57	0.47	1.06	216	0.17 ± 0.11	1.52	1.02	0.34	1.41	0.47
A 1228B	0.04289	0.84	0.66	1.11	347	0.71 ± 0.40	1.78	0.88	0.12	1.05	0.20
A 0671	0.04980	1.95	1.82	2.41	805	8.83 ± 2.47	7.72	3.82	0.44	4.56	0.61
A 0757	0.05132	0.89	0.77	1.79	368	0.84 ± 0.42	2.70	1.54	0.50	1.63	0.56
A 0602	0.06055	1.35	1.32	1.86	560	2.96 ± 1.16	4.33	2.44	0.72	2.56	0.74
A 1781	0.06226	0.87	0.87	1.56	362	0.80 ± 0.48	2.77	2.09	0.84	2.01	0.83
A 1825	0.06327	1.52	0.71	1.38	633	4.26 ± 2.02	3.60	1.77	0.25	2.14	0.40
A 1828E*	0.06358	0.80	0.32	0.82	335	0.63 ± 0.52	0.89	0.37	0.25	0.65	0.28
A 1828W	0.06395	0.50	0.36	0.92	207	0.15 ± 0.13	1.39	0.95	0.17	1.15	0.29
A 2124	0.06572	1.77	1.37	2.39	736	6.70 ± 2.18	6.75	3.93	0.50	4.38	0.60
A 2079	0.06575	1.48	1.35	2.12	618	3.96 ± 1.29	8.92	4.97	0.60	6.12	0.91
A 2067	0.07294	0.68	0.49	1.11	286	0.39 ± 0.31	0.91	0.73	0.36	0.78	0.46
A 2089	0.07355	1.27	0.91	1.48	531	2.50 ± 1.05	4.53	2.39	0.59	2.78	0.63
RXC J1350	0.07644	0.86	0.41	1.30	359	0.77 ± 0.48	2.53	1.62	0.39	1.63	0.46
A 2061	0.07775	1.70	1.37	1.95	712	6.03 ± 1.65	13.29	6.60	0.51	7.82	0.65
A 1898	0.07852	1.04	0.81	1.90	434	1.36 ± 0.89	2.95	2.05	0.61	2.42	0.64
A 2019	0.08118	0.82	0.59	1.22	345	0.68 ± 0.50	1.87	1.54	0.52	1.40	0.45

в пределах R_{200} σ_{200} (далее просто σ), (7) — масса M_{200} , (8) — ИК-светимость $L_{K,200}$ ($M_K < -21^m$) в пределах R_{200} , (9) — ИК-светимость $L_{K,1}=L_{1c}/2$ ($M_K < -21^m$) и в колонке (10) — эффективный радиус $R_{e,L}=R_e(L/2)$ в Мпк, содержащий эту светимость, (11) — ИК-светимость $L_{K,2}$, которую излучают $N_{1c}/2$ галактик и в (12) — эффективный радиус $R_{e,N}=R_e(N/2)$ в Мпк, содержащий эту светимость. Ошибки измерения масс соответ-

ствуют ошибкам измерения σ и определены как ошибки функции $y = \sigma^3$, $S_y = 3\sigma^2/\sqrt{N} S_\sigma$ для M_{200} . Звездочками помечены группы галактик, у которых $R_e(L/2)$ определен с вычетом светимости ярчайшей галактики. Аналогичные данные для 29 систем галактик, опубликованные в [29], в таблице 2 не приведены.

3. ПОСТРОЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ И ДРУГИХ МАСШТАБНЫХ СООТНОШЕНИЙ ДЛЯ ГРУПП И СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

3.1. Зависимости между $L_K - R_e$, $L_K - \sigma$ и инфракрасная фундаментальная плоскость

На рис. 4 показана зависимость $L_K - R_e$ (при $L_K/2\pi R_e^2$ практически получаем соотношение Корменди) для исследуемых систем галактик, где эффективный радиус R_e найден двумя способами как радиус, на котором содержится $N/2$ светимости или $L/2$ галактик. На левой панели рис. 4 приведенная зависимость (для случая $N/2$) имеет вид $L_K \propto R_e^{1.62 \pm 0.15}$ и соответствует результатам, приведенным, например, в [35] и в [14]. Для случая $L/2$ мы также получили регрессионное соотношение, и оно и все другие соотношения для этого случая приведены в таблице 3. В этой таблице в первой колонке дано число систем галактик, участвующих в регрессии, во второй приведена переменная, относительно которой выполнена регрессия, в колонках (3) и (4) — результаты, полученные для R_e , найденного по $N/2$ и по $L/2$. На рисунках «остаточные» группы показаны заполненными кружками, регрессионные соотношения определены без них. Три самые бедные группы с $\sigma < 200$ км с⁻¹ отклоняются сильнее всего. Соотношение Фабер—Джексона для нашей выборки также согласуется в пределах ошибок с данными [35] и [14] и имеет вид:

$$L_K(N/2) \propto \lg \sigma^{1.79 \pm 0.11}.$$

Для того чтобы можно было сравнить полученные результаты по построению ФП скоплений с результатами других авторов (например, [14]) мы взяли $\lg L_K$, $\lg R_e$, $\lg \sigma$ и нашли регрессионное соотношение относительно $\lg L_K$. В нашем исследовании $\lg L_K$ — светимость систем галактик в фильтре K (для одинакового предела $M_K = -21^m$) в L_\odot , $\lg R_e$ — эффективный радиус системы в кпк, в пределах которого содержится или половина галактик от общего числа ($N/2$), найденного по описанному ранее профилю, или половина светимости ($L/2$). В отличие от ФП галактик ранних типов, где рассматривается центральная дисперсия лучевых скоростей звезд, для скоплений и групп галактик лучше брать дисперсию лучевых скоростей галактик в пределах вирialized области (в нашем случае мы взяли σ_{200} в пределах R_{200}) как наиболее точную, поскольку точность зависит от числа используемых галактик. На рис. 5 показана ФП нашей выборки из 94 групп

и скоплений галактик в виде:

$$\begin{aligned} \lg L_K(N/2) = & 0.70(\pm 0.13) \lg R_e(N/2) \\ & + 1.34(\pm 0.13) \lg \sigma + 7.08(\pm 0.15) \end{aligned}$$

и, учитывая $\langle I_e \rangle = L_K/(2\pi R_e^2)$,

$$\begin{aligned} \lg R_e(N/2) = & 1.03(\pm 0.10) \lg \sigma \\ & - 0.77(\pm 0.10) \lg \langle I_e \rangle + 4.83(\pm 0.11). \end{aligned}$$

Построенная нами ФП в пределах ошибок согласуется с результатами [11, 12, 14], в которых применены другие методы определения эффективного радиуса систем галактик: либо R_e определен вписыванием профиля Вокулера в профиль поверхностной яркости (светимости), либо использованы другие профили (например, Хаббла, Кинга).

3.2. Рентгеновская фундаментальная плоскость

Для другой барионной компоненты систем галактик — газа, мы получили следующую ФП, заменив светимость в фильтре K на светимость газа в рентгеновском диапазоне:

$$\begin{aligned} \lg L_X = & 1.15(\pm 0.39) \lg R_e(N/2) \\ & + 2.56(\pm 0.40) \lg \sigma + 33.34(\pm 0.36), \end{aligned}$$

где L_X — рентгеновская светимость. Полученная фундаментальная плоскость имеет в 2.5 раза больший разброс, чем ФП звездного населения систем галактик, и приведена на рис. 6. Надо отметить, что, если коэффициенты при $\lg R_e$ обеих ФП согласуются друг с другом в пределах ошибок, то коэффициент при $\lg \sigma$ у рентгеновской ФП значительно больше и близок к вириальным предсказаниям.

Мы также построили ФП, аналогичную полученной в [16], между оптической светимостью, эффективным радиусом, найденным по этой светимости, и светимостью в рентгеновском диапазоне

$$\begin{aligned} \lg L_K = & 0.81(\pm 0.21) \lg R_e(N/2) \\ & + 0.30(\pm 0.05) \lg L_X - 2.77(\pm 0.19), \end{aligned}$$

которая в пределах ошибок согласуется с результатами авторов для 78 скоплений галактик.

3.3. Сравнение инфракрасной ФП систем галактик с ФП галактик ранних типов

На рис. 7 мы приводим ФП групп и скоплений галактик вместе с ФП галактик ранних типов. Для этого мы L_K -светимости систем галактик с учетом цвета ($r - K$) ~ 3 перевели в светимости в

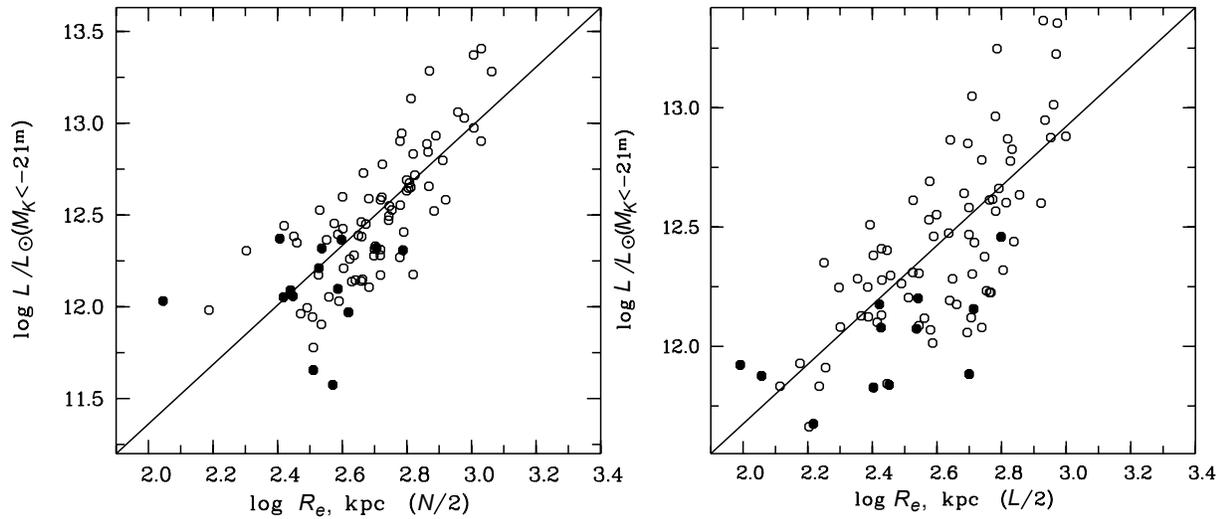


Рис. 4. Зависимость L_K-R_e групп и скоплений галактик для двух вариантов определения R_e : по половине числа галактик (слева), по половине светимости (справа). Заполненными кружками показаны группы, радиус $R_e(L/2)$ которых оценен с вычетом светимости ярчайшей галактики. Регрессионные соотношения имеют вид $L_K \propto R_e^{1.62 \pm 0.15} (N/2)$ и $L_K \propto R_e^{1.24 \pm 0.13} (L/2)$.

Таблица 3. Масштабные соотношения между характеристиками групп и скоплений галактик.

N	Direction	$N/2$	$L/2$
80	L_K	$R_e^{1.62 \pm 0.15}$	$R_e^{1.24 \pm 0.13}$
80	L_K	$\sigma^{1.79 \pm 0.11}$	$\sigma^{1.88 \pm 0.11}$
80	L_K	$R_e^{0.70 \pm 0.13} \sigma^{1.34 \pm 0.13}$	$R_e^{0.55 \pm 0.09} \sigma^{1.48 \pm 0.11}$
24	L_K	$R_e^{0.76 \pm 0.18} \sigma^{1.60 \pm 0.16}$	$R_e^{0.82 \pm 0.11} \sigma^{1.66 \pm 0.12}$
24	L_K	$R_e^{0.74 \pm 0.15} \sigma^{1.69 \pm 0.14} (M_X/L_K)^{0.28 \pm 0.10}$	$R_e^{0.80 \pm 0.10} \sigma^{1.72 \pm 0.11} (M_X/L_K)^{0.18 \pm 0.10}$
63	L_K	$R_e^{0.81 \pm 0.21} L_X^{0.30 \pm 0.05}$	$R_e^{0.57 \pm 0.13} L_X^{0.36 \pm 0.04}$
63	L_X	$R_e^{1.15 \pm 0.39} \sigma^{2.56 \pm 0.40}$	$R_e^{0.46 \pm 0.28} \sigma^{3.06 \pm 0.36}$

r -фильтре (SDSS) — L_r . Мы взяли округленное значение цвета ($r_{\text{pet}} - K$), вычисленное для нашей выборки: средний цвет систем изменяется в интервале 2.5–3.0. Галактики ранних типов были выделены из каталога SDSS (DR8) ранее при определении пекулярных скоростей в сверхскоплениях. Описание критериев отбора и результаты, полученные для сверхскоплений Hercules и Leo, опубликованы в [36]. ФП 2111 галактик ранних типов определена, как и для скоплений галактик, регрессией относительно L_r . Можно отметить, что формы ФП и галактик, и систем галактик хорошо согласуются друг с другом, а нуль-пункты отличаются сильнее, чем было получено в [11]. Авторами указанной работы делается предположение, что полученное ими различие коэффициентов и нуль-пункта, скорее всего, вызваны либо раз-

ным количеством темной материи в пределах R_e скоплений галактик, либо неучтенной светимостью их внутренней среды. Мы нашли для изучаемых систем галактик, что увеличение светимости галактик, например, на 50% не увеличивает существенно их нуль-пункт. Нуль-пункт ФП групп и скоплений галактик возрастает, если учесть отношение массы к светимости в качестве четвертого параметра, как это показано ниже.

3.4. ФП систем галактик с учетом отношения их массы к светимости

Согласно [37], для вириализованных систем должно выполняться $L = S R_d L / M R \sigma^2$, где параметр S относится к внутренней структуре объекта, R_d демонстрирует степень вириализованности системы. Наблюдаемое отклонение

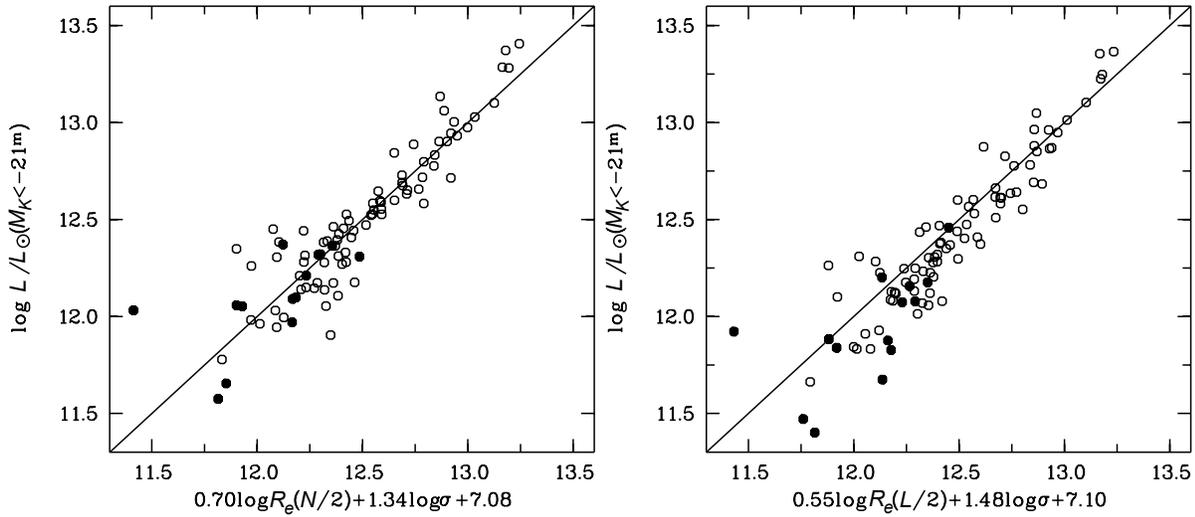


Рис. 5. Фундаментальная плоскость групп и скоплений галактик в ИК-области. Заполненными кружками показаны группы, радиус $R_e(L/2)$ которых оценен с вычетом светимости ярчайшей галактики. Регрессионные соотношения имеют вид $L_K \propto R_e^{0.70 \pm 0.13} (N/2) \sigma^{1.34 \pm 0.13}$ и $L_K \propto R_e^{0.55 \pm 0.09} (L/2) \sigma^{1.48 \pm 0.11}$.

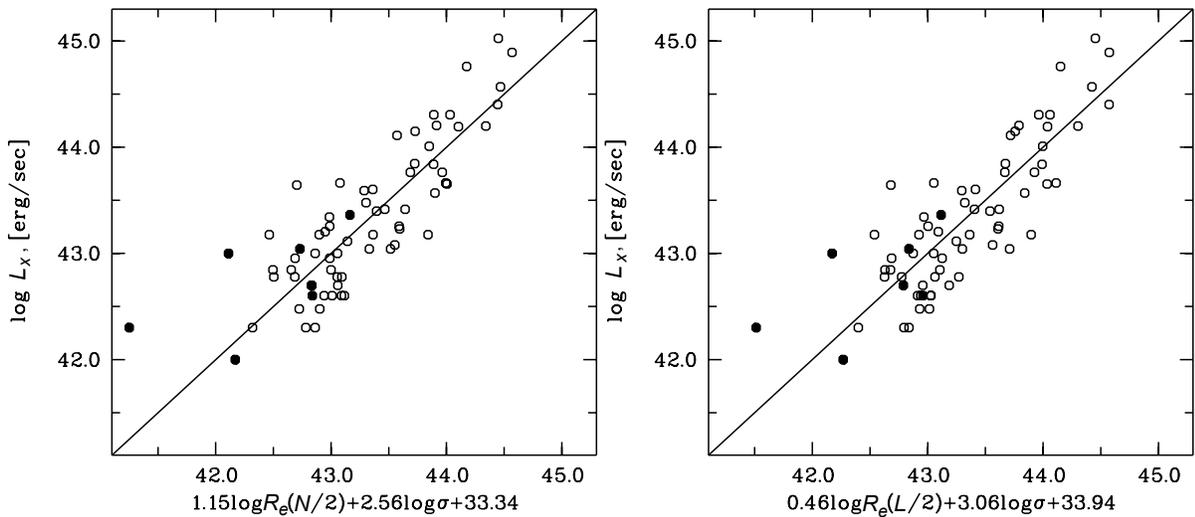


Рис. 6. Фундаментальная плоскость групп и скоплений галактик в рентгеновской области. Заполненными кружками показаны группы, радиус $R_e(L/2)$ которых оценен с вычетом светимости ярчайшей галактики. Регрессионные соотношения имеют вид $L_X \propto R_e^{1.15 \pm 0.39} (N/2) \sigma^{2.56 \pm 0.40}$ и $L_X \propto R_e^{0.46 \pm 0.28} (L/2) \sigma^{3.06 \pm 0.36}$.

коэффициентов при R и σ от вириальных предсказаний ($\alpha = 1$, $\beta = 2$ в формуле $L \propto R_e^\alpha \sigma^\beta$) интерпретируется как изменение параметров S , R_d , M/L от скопления к скоплению. Например, в [33] мы показали, что соотношение масса–светимость ($M_{200}/L_{K,200}$) растет с массой (или светимостью) скоплений галактик. Массу систем галактик M_{200} мы определяем по дисперсии лучевых скоростей, поэтому не можем полученное соотношение масса–светимость использовать в ФП как четвертый параметр. Для ряда систем

галактик нами найдены в литературе независимые массы $M_{X,200}$, определенные по излучению газа в рентгеновской области. Они приведены в [29], где даны также соответствующие этим массам и измеренные нами L_K -светимости. Для 24 групп и скоплений галактик (шесть систем с заниженной на наш взгляд гидростатической массой [29] в регрессии не участвовали), мы построили регрессию

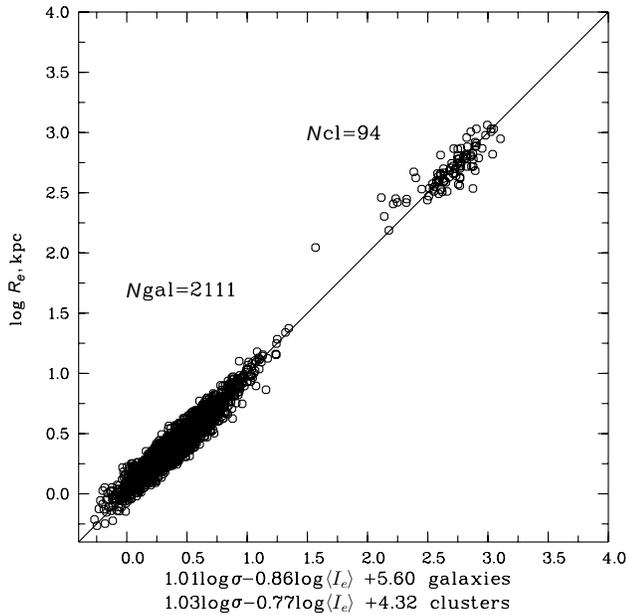


Рис. 7. Фундаментальная плоскость галактик и групп и скоплений галактик относительно длинной оси $\lg R_e$. Радиус R_e систем галактик определен как радиус, содержащий половину галактик.

с соотношением масса—светимость:

$$\begin{aligned} \lg L_K(N/2) = & 0.74(\pm 0.15) \lg R_e(N/2) \\ & + 1.69(\pm 0.14) \lg \sigma \\ & - 0.30(\pm 0.10) \lg M_{X, 200}/L_{K, 200} \\ & + 6.83(\pm 0.07) \end{aligned}$$

и без этого соотношения:

$$\begin{aligned} \lg L_K(N/2) = & 0.76(\pm 0.18) \lg R_e(N/2) \\ & + 1.60(\pm 0.16) \lg \sigma + 6.19(\pm 0.08). \end{aligned}$$

На рис. 8 приведены полученные зависимости. Можно заключить, что введение четвертого параметра — отношения массы к K -светимости в ФП — уменьшает разброс на 12% и увеличивает нуль-пункт. Видимо, в ФП групп и скоплений галактик за оставшийся разброс ответственны, в основном, степень их отклонения от вириализованного состояния (параметр R_d) и связанная с ней структура системы (параметр S), а также peculiar скорости. Форма ФП приближается к вириальным предсказаниям, если светимость в ней заменить на массу систем галактик [39]. Мы не можем использовать наши измерения масс, поскольку они коррелируют с σ .

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Масштабные зависимости между характеристиками L_K , R_e , σ , L_X и другими групп и скоплений галактик могут значительно улучшить понимание структуры объектов, процессов их формирования и эволюции. Например, в [38] показано, что по мере роста скоплений галактик, либо в результате поглощения ими отдельных галактик, либо в результате их слияния с другими группами, изменяется их эффективный радиус R_e . Наша выборка, состоящая из 94 систем галактик, имеет красные смещения $0.0038 < z < 0.090$, из них 50 групп галактик имеют дисперсии лучевых скоростей $\sigma < 400 \text{ км с}^{-1}$, остальные 44 системы являются скоплениями галактик.

В данной работе мы применили простой наблюдательный способ определения размера скоплений и групп галактик (радиус R_h) и оценки эффективного радиуса R_e по наблюдаемому интегральному распределению числа галактик от квадрата расстояния от центра (рис. 1 и рис. 2). Нами определены два вида радиусов R_e : радиус, в пределах которого содержится половина галактик системы ($N/2$), и радиус, в пределах которого содержится половина K -светимости системы ($L/2$). В результате нами найдено, что доля светимости ярчайшей галактики, особенно в группах, может составлять 50% и выше полной светимости группы в пределах эффективного радиуса R_e . Поэтому определение R_e по $L/2$ дает заниженное значение радиуса у таких групп, а для четырнадцати систем мы вообще таким способом не смогли определить его (полученный радиус R_e оказался внутри ярчайшей галактики), и вынуждены были оценивать R_e , предварительно вычтя светимость ярчайшей галактики. Для того чтобы исследовать все системы галактик одинаковым образом, их эффективный радиус определен нами как радиус, содержащий половину галактик, расположенных в вириализованной области. В работе показано, что полученные таким образом соотношения между характеристиками систем галактик согласуются с результатами других авторов, использующих другие методы [11, 14].

В настоящей работе получены следующие результаты для 94 групп и скоплений галактик:

1. Построена фундаментальная плоскость по излучению звездного населения систем галактик в фильтре K :

$$L_K = R_e^{0.70 \pm 0.13} \sigma^{1.34 \pm 0.13}$$

или

$$\lg R_e = 1.03(\pm 0.10) \lg \sigma - 0.77(\pm 0.10) + 4.83(\pm 0.11).$$

2. Построены фундаментальные плоскости по излучению газа в рентгеновской области:

$$L_X = R_e^{1.15 \pm 0.39} \sigma^{2.56 \pm 0.40}$$

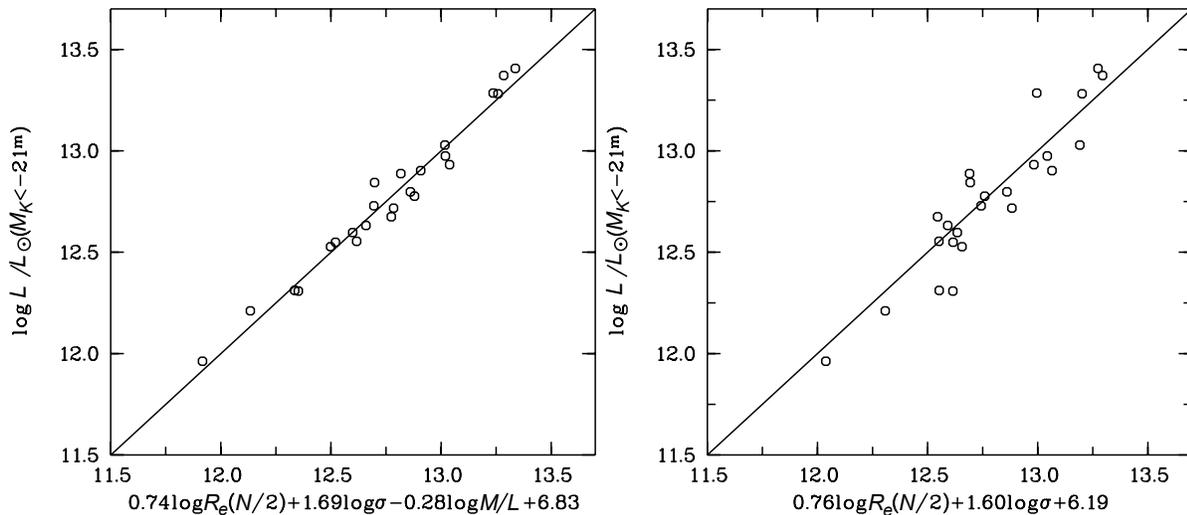


Рис. 8. Фундаментальная плоскость 24 скоплений галактик с измеренными массами $M_{X,200}$ по излучению газа. В качестве четвертого параметра в ФП взято соотношение $M_{X,200}/L_{K,200}$.

и
$$L_K = R_e^{0.81 \pm 0.21} L_X^{0.30 \pm 0.05}.$$

3. Найдено, что ФП галактик и систем галактик имеют близкие формы, но разные нуль-пункты, являющиеся результатом того, что отношение массы к светимости растет со светимостью (массой) систем галактик.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Djorgovski and M. Davis, *Astrophys. J.* **313**, 59 (1987).
2. A. Dressler, D. Lynden-Bell, D. Burstein, et al., *Astrophys. J.* **313**, 42 (1987).
3. I. Jørgensen, M. Franx, and P. Kjaergaard, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **280**, 167 (1996).
4. M. A. Pahre, S. G. Djorgovski, and R. R. de Carvalho, *Astron. J.* **116**, 1591 (1998).
5. M. Bernardi, R. K. Sheth, J. Annis, et al., *Astron. J.* **125**, 1863 (2003).
6. A. S. Bolton, T. Treu, L. V. E. Koopmans, et al., *Astrophys. J.* **684**, 248 (2008).
7. R. K. Sheth and M. Bernardi, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **422**, 1825 (2012).
8. S. M. Faber and R. E. Jackson, *Astrophys. J.* **204**, 668 (1976).
9. J. Kormendy, *Astrophys. J.* **218**, 333, (1977).
10. C. Magoulas, C. M. Springob, M. Colless, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **427**, 245 (2012).
11. M. D’Onofrio, D. Bettoni, D. Bindoni, et al., *Astronomische Nachrichten* **334**, 373 (2013).
12. C. Adami, A. Mazure, A. Biviano, et al., *Astron. and Astrophys.* **331**, 493 (1998).
13. G.J. Graves and S.M. Faber, *Astrophys. J.* **717**, 803 (2010).
14. R. Schaeffer, S. Maurogordato, A. Cappi, and F. Bernardeau, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **263**, L21 (1993).
15. Y. Fujita and F. Takahara, *Astrophys. J.* **519**, L51 (1999).
16. C. Fritsch and T. Buchert, *Astron. and Astrophys.* **344**, 749 (1999).
17. M. Ramella, W. Boschini, M. Geller, et al., *Astron. J.* **128**, 2022 (2004).
18. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Aqueros, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182**, 543 (2009).
19. T. H. Jarrett, T. Chester, R. Cutri, et al., *Astrophys. J.* **119**, 2498 (2000).
20. H. Ebeling, A. C. Edge, Böhringer, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **301**, 881 (1998).
21. A. I. Zabludoff and J. S. Mulchaey, *Astrophys. J.* **496**, 39 (1998).
22. A. Mahdavi and M. J. Geller, *Astrophys. J.* **607**, 202 (2004).
23. A. Mahdavi, M. J. Geller, H. Böhringer, et al., *Astrophys. J.* **518**, 69 (1999).
24. D. M. Koranyi and M. J. Geller, *Astron. J.* **123**, 100 (2002).
25. H. Böhringer, W. Voges, J. P. Huchra, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **129**, 435 (2000).
26. M. J. Ledlow, W. Voges, F. N. Owen, and J. O. Burns, *Astron. J.* **126**, 2740 (2003).

27. T. H. Reiprich and H. Böhringer, *Astrophys. J.* **567**, 716 (2002).
28. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **70**, 123 (2015).
29. A. I. Kopylov and F. G. Kopylova, *Astrophysical Bulletin* **70**, 243 (2015).
30. R. G. Carlberg, H. K. C. Yee, E. Ellingson, et al., *Astrophys. J.* **485**, L13 (1997).
31. V. R. Eke, S. Cole, and C. S. Frenk, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **282**, 263 (1996).
32. A. Biviano, *ArXiv:astro-ph/0607040*, (2006).
33. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **64**, 1 (2009).
34. K. Rines, M. J. Geller, A. Diaferio, et al., *Astron. J.* **128**, 1078 (2004).
35. B. Lanzoni, L. Ciotti, A. Cappi, et al., *Astrophys. J.* **600**, 640 (2004).
36. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astronomy Letters* **40**, 659 (2014).
37. J. Kormendy and S. Doigovski, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **27**, 735 (1989).
38. P. A. Araya-Melo, R. van de Weygaert, and B. J. T. Jones, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **400**, 1317 (2009).
39. N. Scott, L. M. R. Fogarty, M. S. Owers, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **451**, 2723 (2015).

The Fundamental Plane and Other Scaling Relations for the Properties of Galaxy Groups and Clusters

F. G. Kopylova and A. I. Kopylov

In this paper we investigate the relations between the main characteristics of groups and clusters of galaxies using the archival data of the SDSS and 2MASX catalogs. We have developed and implemented a new method of determining the size of galaxy systems and their effective radius which contains half of the galaxies and not half the luminosity, since the luminosity of the brightest galaxy in a group can account for over 50% of the total luminosity of the group. The derived parameters ($\lg L_K$, $\lg R_e$, and $\lg \sigma_{200}$) for 94 systems of galaxies ($0.0038 < z < 0.09$) determine the Fundamental Plane (FP), which, with a scatter of 0.15, is similar in form to the FP of galaxy clusters obtained by Schaeffer et al. (1993) and D'Onofrio et al. (2013) with other methods and for different bands. We show that the FP in the near-infrared region for 94 galaxy systems has the form of $L_K \propto R_e^{0.70 \pm 0.13} \sigma^{1.34 \pm 0.13}$, whereas in x-rays it has the form of $L_X \propto R_e^{1.15 \pm 0.39} \sigma^{2.56 \pm 0.40}$. The form of the infrared FP for groups and clusters is consistent with the FP for early-type galaxies determined in the same way. The form of the infrared FP for galaxy systems deviates from the shape that one would expect from virial predictions. Adding the mass-to-luminosity ratio as a fourth independent parameter has little effect on this deviation, but decreases the scatter of the FP for a sample of rich galaxy clusters by 12%.

Keywords: *galaxies:groups:general — galaxies:clusters:general — galaxies:fundamental parameters — galaxies:statistics*