

УДК 524.77

## СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ КАРЛИКОВЫМИ И ГИГАНТСКИМИ ГАЛАКТИКАМИ В СВЕРХСКОПЛЕНИЯХ И В ПОЛЕ НА $0.02 < z < 0.05$

© 2013 Ф. Г. Копылова\*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 17 апреля 2013 года; принята в печать 23 мая 2013 года

Представлены результаты исследования галактик красной последовательности (КП) 47 скоплений галактик ( $0.023 < z < 0.047$ ), расположенных в разном окружении: в сверхскоплениях Hercules, Leo и в поле, по данным каталога SDSS. Количество ярких карликовых галактик в скоплениях галактик на КП в интервале  $-18^m5 < M_r < -16^m5$  растет с рентгеновской светимостью скопления как  $\log N \propto \log L_X^{0.64}$ . Отношение числа карликовых галактик к числу гигантских (ОКГ) не зависит от окружения скопления, массы, богатства. Наблюдается рост этого отношения у скоплений галактик с  $\log L_X > 43.5$  эрг/с или  $\sigma > 520$  км/с. Составное ОКГ скоплений галактик, определенное как по принадлежности к разным структурам, так и по рентгеновской светимости вдоль радиуса  $R_{200}$ , минимально в центральных областях скоплений (около  $0.6 \pm 0.06$ ), максимально в пределах  $0.3-0.9R_{200}$  (около  $0.9 \pm 0.10$ ) и уменьшается примерно до  $0.7 \pm 0.03$  к радиусу  $1.4 R_{200}$ .

Ключевые слова: галактики; скопления

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что высокоплотные области скоплений галактик не оказывают заметного влияния на гигантские галактики в них, а свойства карликовых галактик претерпевают существенные изменения (например, возраст звездного населения [1], компактность [2]). Таким образом, влияние и локального, и глобального окружения в составе скоплений на галактики удобнее всего исследовать на галактиках низкой светимости. Вариации таких свойств карликовых галактик в скоплениях, как их обилие, функция светимости, морфологический состав (доля карликовых галактик ранних и поздних типов) в зависимости от массы, от рентгеновской светимости, от дисперсии лучевой скорости или от расстояния до центра скоплений галактик, могут дать ценную информацию о физических механизмах, которые вызывают эти вариации.

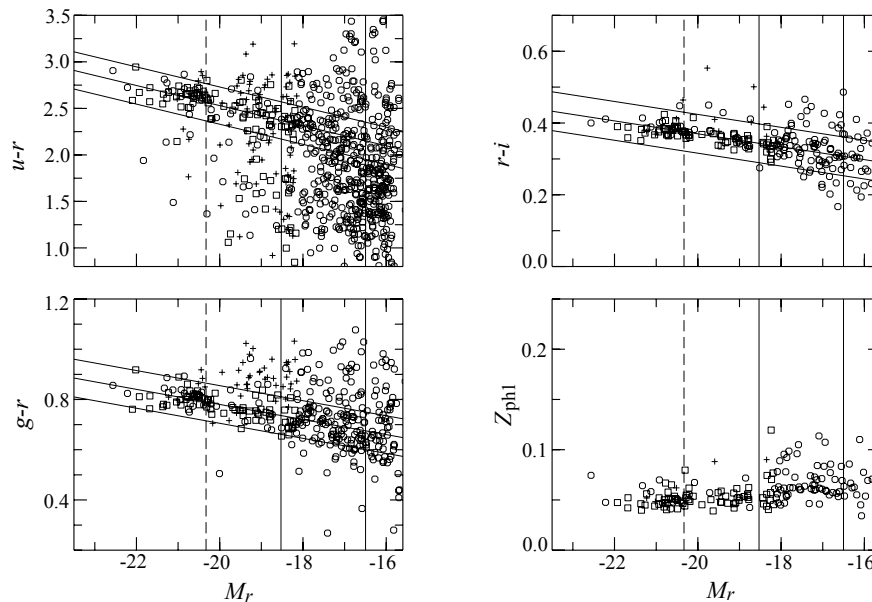
Основной целью данной работы является выделение красной последовательности скоплений галактик и определение числа ярких карликовых галактик на ней в области сверхскоплений Her, Leo и скоплений галактик поля, расположенных вне крупных структур. Кроме того, предполагается исследовать зависимость ОКГ от свойств исследуемых скоплений и от их расположения в области сверхскоплений и в поле. Нами использованы данные каталога SDSS DR7 (Sloan Digital Sky Survey Data Release 7, [11]).

Статья организована следующим образом. Во втором разделе описана методика разделения галактик на карликовые и гигантские (яркие и слабые) на красной последовательности скоплений галактик. В третьем разделе представлено описание выборки скоплений галактик. Четвертый раздел посвящен построению красной последовательности скоплений галактик. В пятом разделе мы исследовали, как отношение числа карликовых галактик к числу гигантских и отношение слабых гигантских галактик к числу ярких зависят от свойств скоплений (массы, богатства, светимости в рентгеновском диапазоне), а также от расположения скопления в разных структурах (сверхскоплениях) и в поле. Мы также изучили, как составное ОКГ изменяется вдоль радиуса скоплений в зависимости от их расположения и в зависимости от светимости в рентгеновской области. В заключении приводятся полученные результаты. В работе мы использовали следующие космологические параметры:  $\Omega_m = 0.3$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.7$ ,  $H_0 = 70$  км с<sup>-1</sup> Мпк<sup>-1</sup>.

### 2. НАБЛЮДАТЕЛЬНОЕ ВЫДЕЛЕНИЕ КАРЛИКОВЫХ ГАЛАКТИК

Главным свойством скоплений галактик (по крайней мере, на малых красных смещениях), позволяющим составлять выборки карликовых галактик раннего и позднего типа, является зависимость цвета галактик от их абсолютной величины (ЗЦВ) [3, 4]. Галактики ранних типов

\*E-mail: flera@sao.ru



**Рис. 1.** Отбор ярких карликовых галактик красной последовательности в скоплении А 2052. На *левой верхней* панели показана диаграмма цвет-абсолютная звездная величина  $(u - r, r)$  галактик, расположенных в пределах радиуса  $R_{200}$ . Пустыми квадратами помечены члены скопления с известными лучевыми скоростями, пустыми кружками — все галактики каталога SDSS без измерений лучевых скоростей. Крестами помечены фоновые галактики с известными лучевыми скоростями. Две сплошные линии соответствуют  $M_r = -16^m.5$  и  $M_r = -18^m.5$ . Штриховой линией показано значение  $M_r = -20^m.3$ . На *левой нижней* панели приведена диаграмма  $g - r, r$ , на которой нет галактик с  $\Delta(u - r) \leq -0.2$ , а на *правой верхней* — диаграмма  $(r - i, r)$ , где нет галактик с  $\Delta(u - r) \leq -0.2$  и  $\Delta|g - r| \geq 0.075$ . На *правой нижней* панели к двум предыдущим условиям добавлено  $\Delta|r - i| \geq 0.054$  и показаны фотометрические лучевые скорости каталога SDSS ( $Z_{\text{phl}}$ ) для отобранных галактик.

образуют на ЗЦВ так называемую красную последовательность (КП), которая прослеживается до самых слабых галактик: например, в работе [4] определено, что в скоплениях Virgo и Coma КП простирается приблизительно на  $8^m$ . Популяция карликовых галактик занимает широкий диапазон звездных величин от  $M_B = -18^m$  до  $M_B = -8^m$  [5] ( $H_0 = 50 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ ), причем выборка от  $M_B = -18^m$  до  $M_B = -16^m$  представляет собой яркие карликовые галактики, хотя на их ярком конце существует область перекрытия с гигантскими. В более ранней работе [6] было показано, что отношение числа карликовых галактик ранних типов (выделенных в результате визуальной классификации) к числу гигантских минимально в бедных группах, максимально в скоплении Virgo, то есть наблюдается рост этого отношения с увеличением богатства скопления.

В фильтре  $r$  Слоановского обзора, с учетом формулы перехода [7]

$$B = g + 0.313 \times (g - r) + 0.227$$

и изменением цвета  $g - r$  с величиной галактики (Рис. 1), мы получили соответствующий интервал для ярких карликовых галактик  $-18^m.5 < M_r < -16^m.5$ . Причем верхняя граница

практически совпадает с нижней границей из работы [8] для разделения членов скопления на яркие галактики КП и слабые. То есть оригинальные интервалы — яркие галактики с  $M_V < -20^m$  и слабые с  $-20^m < M_V < -18^m.2$  — имеют в фильтре  $r$  SDSS примерные значения  $M_r < -20^m.3$ ,  $-20^m.3 < M_r < -18^m.5$ . Таким образом, мы использовали  $M_r = -18^m.5$  для разделения галактик на гигантские галактики ранних типов и яркие карликовые галактики ранних типов, а гигантские галактики ранних типов разделили на яркие и слабые.

Такое же примерно выделение карликовых КП галактик принято в работе [9]. В результате их исследования показано, что отношение числа карликовых галактик к числу гигантских (ОКГ) в пределах радиуса  $R_{200}$  у 57 эйбелловских скоплений галактик не зависит от богатства скопления, но уменьшается вдоль радиуса скопления и минимально в центре. В работе [10] подобная классификация всех карликовых и гигантских галактик сделана для четырех близких скоплений (Virgo, Fornax, Coma, Perseus) в пределах радиуса 1 Мпк. Модельные расчеты доли карликовых галактик КП, выполненные в этой работе, показали (Рис. 6 из [10]), что эта доля уменьшается с ростом радиуса

скопления, но не изменяется с дисперсией лучевых скоростей. Кроме того, модельное ОКГ скоплений галактик выше, чем полученное из наблюдений.

### 3. ОПИСАНИЕ ВЫБОРКИ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

Исследуемая нами выборка скоплений галактик составлена из скоплений, располагающихся в областях сверхскоплений Leo ( $N = 14$ ), Hercules ( $N = 20$ ), 12 скоплений, не принадлежащих крупным структурам, и скопления Coma (A 1656). Красные смещения отобранных скоплений галактик заключены в диапазоне  $0.023 < z < 0.047$ . Основные параметры скоплений галактик, динами-

ческие и фотометрические в инфракрасном диапазоне, определены нами ранее по данным каталогов SDSS (DR7) и 2MASX и приведены в работах [12] (сверхскопление Leo) и [13] (сверхскопление Her и поле). Часть параметров, используемых в этой работе (для области радиусом  $R_{200}$ ) даны в Таблице 1: гелиоцентрическое красное смещение скопления галактик; радиус  $R_{200}$  в мегапарсеках; количество галактик (богатство) до  $M_K = -21^m$ ; масса  $M_{200}$ ; рентгеновская светимость в полосе 0.1–2.4 keV. В скобках к ней приведены ссылки на работы, из которых взяты эти светимости [14–21]. Светимости пересчитаны для найденных нами лучевых скоростей скоплений и используемой нами космологической модели.

Таблица 1. Свойства скоплений галактик

Скопл.	$z_h$	$R_{200}$ , Mpc	$M_{200}$ , $10^{14} M_\odot$	$L_X$ , $10^{44}$ эрг/с	$N(-21^m)$	ОСЯ	$n_l$	ОКГ	$n_d$
Hercules									
A 2052	0.0347	1.52	$4.12 \pm 1.15$	1.29(14)	99	$0.95 \pm 0.22$	36	$0.87 \pm 0.14$	64.2
A 2063	0.0347	1.83	$7.28 \pm 1.80$	1.02(14)	141	$1.41 \pm 0.30$	55	$0.87 \pm 0.12$	81.9
A 2107	0.0413	1.41	$3.33 \pm 0.95$	0.59(14)	114	$1.83 \pm 0.42$	55	$0.55 \pm 0.10$	46.6
A 2147	0.0362	2.08	$10.57 \pm 1.71$	1.58(14)	321	$2.10 \pm 0.34$	122	$0.60 \pm 0.07$	107.4
A 2151	0.0363	1.78	$6.74 \pm 1.27$	0.45(14)	225	$1.14 \pm 0.22$	57	$0.75 \pm 0.11$	80.4
A 2162	0.0321	0.84	$0.71 \pm 0.37$	0.04(15)	26	$1.33 \pm 0.59$	12	$0.45 \pm 0.15$	9.6
A 2197	0.0305	1.34	$2.80 \pm 0.64$	0.12(16)	137	$1.11 \pm 0.26$	39	$0.77 \pm 0.13$	57.1
A 2199	0.0305	1.82	$7.09 \pm 1.25$	2.02(14)	243	$1.33 \pm 0.22$	84	$0.72 \pm 0.09$	105.7
AWM 4	0.0318	0.93	$0.94 \pm 0.46$	0.23(14)	30	$2.40 \pm 1.28$	12	$1.35 \pm 0.34$	23.0
NGC 6098	0.0309	0.82	$0.64 \pm 0.44$	0.06(17)	16	$2.33 \pm 1.22$	7	$1.24 \pm 0.47$	11.2
NGC 6107	0.0311	1.33	$2.78 \pm 0.84$	0.17(17)	86	$2.05 \pm 0.54$	64	$0.43 \pm 0.10$	27.7
NGC 6159	0.0313	0.65	$0.32 \pm 0.22$	0.06(17)	17	$2.33 \pm 1.61$	10	$1.10 \pm 0.48$	11.0
RXC 1511	0.0390	0.91	$0.89 \pm 0.54$	0.09(18)	27	$1.38 \pm 0.64$	19	$0.68 \pm 0.25$	13.0
Поле Her									
A 1983	0.0448	1.12	$1.65 \pm 0.51$	0.26(14)	110	$1.64 \pm 0.42$	66	$0.46 \pm 0.10$	30.3
A 2040	0.0452	1.43	$3.47 \pm 1.04$	0.18(15)	117	$0.95 \pm 0.21$	82	$0.53 \pm 0.14$	43.6
A 2152	0.0443	0.86	$0.75 \pm 0.30$	0.13(14)	66	$1.27 \pm 0.40$	41	$0.68 \pm 0.16$	28.0
AWM 5	0.0350	1.29	$2.51 \pm 1.04$	0.12(14)	71	$1.81 \pm 0.56$	45	$0.93 \pm 0.20$	42.0
MKW 3s	0.0450	1.47	$3.81 \pm 1.26$	1.41(14)	99	$1.32 \pm 0.31$	72	$0.61 \pm 0.12$	43.8
MKW 8	0.0269	1.10	$1.56 \pm 0.46$	0.30(14)	68	$2.18 \pm 0.64$	54	$1.12 \pm 0.21$	60.6
NGC 6338	0.0293	1.35	$2.87 \pm 0.94$	0.25(14)	64	$0.89 \pm 0.39$	34	$0.94 \pm 0.23$	31.8

Таблица 1. (Продолжение)

Скопл.	$z_h$	$R_{200}$ , Мpc	$M_{200}$ , $10^{14} M_{\odot}$	$L_X$ , $10^{44}$ эрг/с	$N(-21^m)$	ОСЯ	$n_l$	ОКГ	$n_d$
Leo									
A 0999	0.0319	0.61	$0.26 \pm 0.16$	0.03(19)	22	$0.86 \pm 0.48$	13	$0.52 \pm 0.21$	6.8
A 1016	0.0322	0.65	$0.32 \pm 0.19$	—	24	$2.80 \pm 1.60$	15	$0.20 \pm 0.13$	3.0
A 1139	0.0393	1.12	$1.64 \pm 0.55$	0.15(20)	69	$1.10 \pm 0.35$	40	$1.12 \pm 0.24$	45.0
A 1142	0.0354	1.28	$2.48 \pm 0.98$	0.14(17)	54	$1.00 \pm 0.38$	28	$0.88 \pm 0.23$	24.8
A 1177	0.0322	0.82	$0.65 \pm 0.35$	0.11(14)	22	$1.43 \pm 0.70$	17	$1.28 \pm 0.40$	21.7
A 1185	0.0329	1.69	$5.70 \pm 1.28$	0.15(14)	157	$1.70 \pm 0.39$	81	$0.65 \pm 0.11$	53.0
A 1228A	0.0350	0.57	$0.22 \pm 0.13$	—	24	$1.40 \pm 0.82$	12	$0.86 \pm 0.36$	10.3
A 1228B	0.0429	0.84	$0.71 \pm 0.40$	0.06(17)	32	$1.88 \pm 0.82$	23	$0.53 \pm 0.18$	12.2
A 1257	0.0346	0.58	$0.24 \pm 0.21$	—	11	$0.67 \pm 0.61$	15	$0.48 \pm 0.38$	2.4
A 1314	0.0324	1.18	$2.06 \pm 0.68$	0.13(14)	72	$1.48 \pm 0.42$	52	$0.80 \pm 0.15$	41.8
RBS 858	0.0396	1.08	$1.51 \pm 0.64$	0.13(21)	49	$2.09 \pm 0.77$	34	$0.88 \pm 0.22$	30.1
RXC 1057	0.0352	0.72	$0.45 \pm 0.30$	0.03(17)	20	$1.40 \pm 0.82$	12	$0.58 \pm 0.28$	7.0
RXC 1205	0.0374	0.78	$0.58 \pm 0.38$	0.20(14)	19	$2.33 \pm 1.61$	10	$1.20 \pm 0.53$	12.0
U 418	0.0323	0.88	$0.82 \pm 0.32$	—	49	$1.30 \pm 0.55$	23	$0.78 \pm 0.24$	18.0
Общее поле									
A 0957	0.0451	1.72	$6.02 \pm 2.07$	0.44(18)	114	$2.32 \pm 0.56$	83	$0.43 \pm 0.09$	35.6
A 1100	0.0465	0.97	$1.10 \pm 0.55$	0.07(14)	45	$0.93 \pm 0.35$	29	$0.70 \pm 0.20$	20.4
NGC 2795	0.0289	1.04	$1.31 \pm 0.56$	0.05(14)	46	$1.25 \pm 0.59$	18	$0.70 \pm 0.25$	12.6
NGC 5098	0.0368	1.08	$1.50 \pm 0.59$	0.13(14)	56	$0.94 \pm 0.32$	35	$0.84 \pm 0.21$	29.5
NGC 5594	0.0374	0.77	$0.54 \pm 0.30$	0.10(14)	31	$1.71 \pm 0.82$	19	$1.05 \pm 0.34$	20.0
UGC 4991	0.0320	1.26	$2.33 \pm 0.92$	0.04(14)	62	$1.10 \pm 0.48$	21	$1.15 \pm 0.32$	24.2
UGC 5088	0.0276	0.60	$0.26 \pm 0.22$	0.02(14)	13	$2.00 \pm 1.73$	6	$0.75 \pm 0.28$	4.5
VV 196	0.0353	1.00	$1.19 \pm 0.60$	0.07(14)	36	$1.00 \pm 0.47$	18	$1.17 \pm 0.37$	21.0
RXC 0748	0.0466	1.09	$1.59 \pm 0.60$	0.15(14)	86	$1.73 \pm 0.46$	60	$0.43 \pm 0.10$	26.0
RXC 1010	0.0459	0.93	$0.96 \pm 0.44$	0.02(14)	54	$1.64 \pm 0.63$	29	$0.79 \pm 0.21$	23.0
RXC 1033	0.0456	1.00	$1.20 \pm 0.52$	0.01(14)	41	$1.86 \pm 0.62$	40	$0.51 \pm 0.14$	20.3
RXC 1722	0.0466	1.27	$2.44 \pm 1.20$	0.06(14)	45	$1.58 \pm 0.58$	38	$0.76 \pm 0.24$	29.0
Coma									
A 1656	0.0233	2.26	$13.52 \pm 1.49$	3.70(14)	393	$1.94 \pm 0.23$	314	$1.02 \pm 0.08$	318.8

#### 4. ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММ ЦВЕТ-ВЕЛИЧИНА ДЛЯ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

При наблюдении условий  $r_{\text{Pet}} < 17^{\text{m}}77$  и  $\mu_r < 24.5 \text{ mag}/\square''$  (петросьяновская звездная величина в фильтре  $r$ , исправленная за поглощение в Галактике, и петросьяновская поверхностная яркость, соответствующая эффективному радиусу), полнота спектральных данных SDSS оценивается в 99% [22], а для ярких галактик — в 95%. Чтобы изучать более слабые члены скоплений галактик, для которых нет спектральной информации, часто используется зависимость цвет-величина, ЗЦВ. Например, в работе [23] получена спектральная информация для галактик с  $r = 17^{\text{m}}77-20^{\text{m}}$ , и показано, что диаграмма цвет-величина ( $g-r, r$ ) хорошо выделяет члены скоплений A 2199 и Virgo. Практически все галактики краснее, чем КП, являются фоновыми галактиками.

Для того, чтобы выделить члены скоплений галактик нужного нам диапазона звездных величин  $-18^{\text{m}}5 < M_r < -16^{\text{m}}5$  только по фотометрическим данным и включить как можно меньше фоновых галактик, мы использовали сначала цвет ( $u-r$ ) для разделения галактик на ранние и поздние типы, согласно [24]. Затем на диаграммах ( $g-r, M_r$ ) и ( $r-i, M_r$ ) уточнили полученные выборки галактик (Рис. 1). На верхней левой панели красную последовательность можно определить как  $u-r = -0.108 M_r + 0.331$  (rms = 0.131), полученную по 950 галактикам ранних типов нашей выборки (средняя линия на рисунке). На нижней левой панели и на верхней правой панели КП имеет следующие формы:  $g-r = -0.030 M_r + 0.169$  (rms = 0.043) и  $r-i = -0.018 M_r + 0.017$  (rms = 0.039). Как рекомендовано на сайте SDSS, мы взяли цвета галактик, вычисленные по модельным звездным величинам, исправленным за поглощение в Галактике.

На Рис. 1, кроме средней линии, характеризующей КП, нанесены линии, ограничивающие ее. Эти линии демонстрируют отклонения от КП примерно в 2 rms. Таким образом, на верхней левой панели (Рис. 1) ( $u-r, M_r$ ) нанесены все галактики каталога SDSS, на нижней левой панели ( $g-r, M_r$ ) показаны галактики, которые отобраны по критерию  $\Delta(u-r) \geq -0.2$ , на верхней правой панели к критерию по  $u-r$  добавлен критерий по  $g-r$ ,  $\Delta|g-r| \leq 0.075$ , на нижней правой панели показаны отобранные галактики с  $\Delta|r-i| \leq 0.054$ . Кроме того, анализ данных работы [23] показал, что практически все члены скопления A 2199, для которых имеется спектральная информация показывают фотометрические  $z$  меньше 0.12, поэтому мы сразу ввели такое ограничение при отборе

галактик. На Рис. 1 две вертикальные сплошные линии выделяют область расположения ярких карликовых галактик, штриховая линия разделяет гигантские галактики на яркие и слабые члены скопления (все границы описаны во втором разделе). Мы перевели наблюдаемые звездные величины (петросьяновская величина) галактик в абсолютные по формуле

$$M_r = r_{\text{Pet}} - 25 - 5 \log(D_l/1 \text{ Mpc}) - A_r - K(z), \quad (1)$$

где  $D_l$  — расстояние до галактики,  $A_r$  — поглощение в Галактике,  $K(z)$  —  $K$ -поправка. Поскольку диапазон изменения красных смещений в нашей выборке небольшой,  $K$ -поправку мы не учитывали при пересчете звездных величин галактик. При определении КП каждого скопления мы ввели  $K$ -поправку, согласно “ $K$ -corrections calculator.<sup>1</sup>” Долю фоновых галактик на КП (процент от общего числа) мы оценили по фоновым галактикам с измеренными лучевыми скоростями (отмечены на рисунке крестиками). В Таблице 1 представлены результаты, полученные в данной работе: отношение числа слабых ( $-20^{\text{m}}3 < M_r < -18^{\text{m}}5$ ) гигантских галактик к числу ярких ( $M_r < -20^{\text{m}}3$ ) гигантских (ОСЯ); число ярких гигантских галактик; отношение числа ярких ( $-18^{\text{m}}5 < M_r < -16^{\text{m}}5$ ) карликовых галактик к числу гигантских ( $M_r < -18^{\text{m}}5$ ) (ОКГ); число карликовых галактик. Выборка карликовых галактик составлена только по фотометрическим данным SDSS. Полнота фотометрического каталога точечных источников в фильтре  $r \sim 22^{\text{m}}2$  оценивается в 95% [11]. Для используемого нами предела  $r = 20^{\text{m}}$  полнота выше, и теряется лишь небольшая часть галактик, расположенных вблизи ярких объектов.

#### 5. РЕЗУЛЬТАТЫ

##### 5.1. Свойства карликовых галактик красной последовательности в зависимости от параметров скоплений галактик

На Рис. 2 показана средняя зависимость найденного числа карликовых галактик КП от светимости скопления в рентгеновском диапазоне. В логарифмической форме она имеет вид  $\log N_{\text{карл}} = 0.64(\pm 0.095) \log L_X - 26.37(\pm 1.35)$  и представляет собой среднее между прямой и обратной регрессиями. Стандартное отклонение в соотношении равно 0.24. Наибольшее отклонение от регрессии показывают невоириализованные скопления галактик A 2197, RXC 1010, RXC 1033. Аналогичные зависимости существуют между числом слабых гигантских галактик и рентгеновской

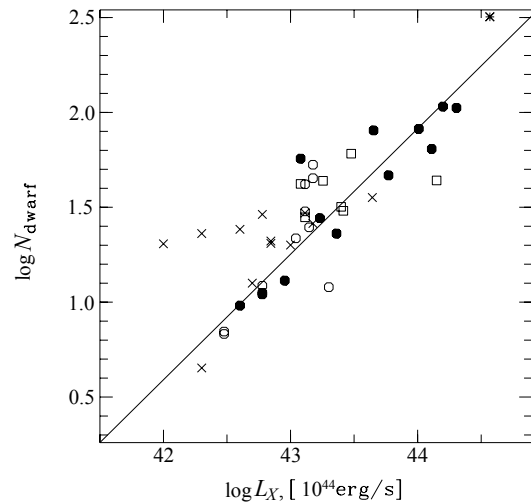
<sup>1</sup><http://kcor.sai.msu.ru>

светимостью, между общим числом галактик в скоплениях (богатством,  $N(-21^m)$ , приведенном в Таблице 1) и рентгеновской светимостью. Богатство исследуемых скоплений галактик определено ранее в работах [12, 13] как число галактик в пределах радиуса  $R_{200}$  до абсолютной величины  $M_K = -21^m$ . Зависимость отношения числа карликовых галактик КП к числу гигантских (ОКГ) от светимости скопления в рентгеновском диапазоне приведена на Рис. 3. Можно отметить, что при светимостях  $\log L_X > 43.5$  эрг/с или при соответствующих этой светимости дисперсиях  $\sigma > 500$  км/с ОКГ растет с рентгеновской светимостью (ОСЯ этого не показывает). При меньших значениях  $L_X$  скопления имеют большое разнообразие ОКГ.

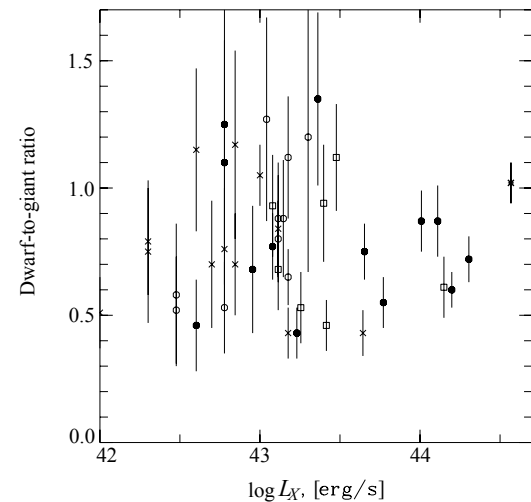
В результате исследования выборки WINGS (72 ближайших скоплений галактик [25]) получено: доля галактик ранних типов растет с рентгеновской светимостью примерно при тех же  $\log L_X > 43.2$  эрг/с, но не изменяется с  $\sigma$ . В более ранних работах [12, 13, 26] мы также показали, что доля галактик ранних типов не изменяется с  $\sigma$  или  $M_{200}$ . Исследование скоплений галактик с  $0.04 < z < 0.08$ , выделенных в SDSS [27], позволило сделать вывод: доля галактик с О II эмиссией (признак звездообразования в галактиках) при  $\sigma \geq 550$  км/с практически постоянна, а в системах с меньшим значением  $\sigma$  изменяется значительно. Видимо, можно отметить, что скопления галактик с  $\log L_X = 43.2-43.5$  эрг/с и дисперсиями лучевых скоростей  $\sigma$  примерно 520–550 км/с являются более однородными объектами с точки зрения их воздействия на галактики, попавшие в них из поля. Несколько скоплений галактик с  $42 < \log L_X < 43.5$  эрг/с показывают ОКГ больше единицы, хотя и с большими ошибками. Из 11 таких скоплений 54% имеют в центральных областях несколько ярчайших галактик близкой светимости (один из признаков слияния групп галактик с основным скоплением).

На Рис. 4 приведена зависимость ОКГ в скоплениях от их богатства, а на Рис. 5 — от массы, определенной нами в [12, 13] по дисперсии лучевых скоростей галактик. Мы не нашли корреляций ОКГ (также ОСЯ) с этими характеристиками скоплений галактик. Кроме того, нами не найдено существенных вариаций ОКГ и ОСЯ скоплений в зависимости от их глобального окружения, то есть от их расположения либо в богатом сверхскоплении Hercules, либо в бедном Leo, либо в поле (Таблица 2).

В аналогичной работе [28] для 97 скоплений галактик найдено, что ОСЯ не зависит от их массы, которая определена либо по температуре рентгеновского излучения, либо по слабому линзированию. В работе [29] для 72 скоплений галактик

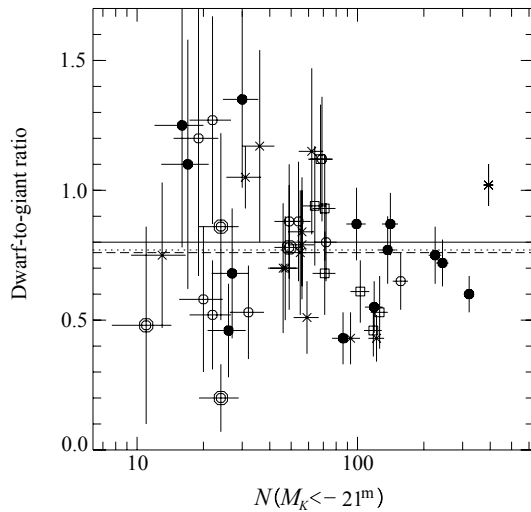


**Рис. 2.** Зависимость числа карликовых галактик КП в пределах радиуса скопления  $R_{200}$  от светимости в рентгеновском диапазоне. Заполненными кружками показаны члены сверхскопления Hercules, пустыми — члены сверхскопления Leo. Пустыми квадратами отмечены скопления галактик поля вокруг системы Her, крестами — скопления поля на тех же  $z$ . Звездой отмечено скопление Coma (A 1656). Линией приведено среднее регрессионное соотношение  $N_{\text{карл}} \propto L_X^{0.64 \pm 0.09}$ .

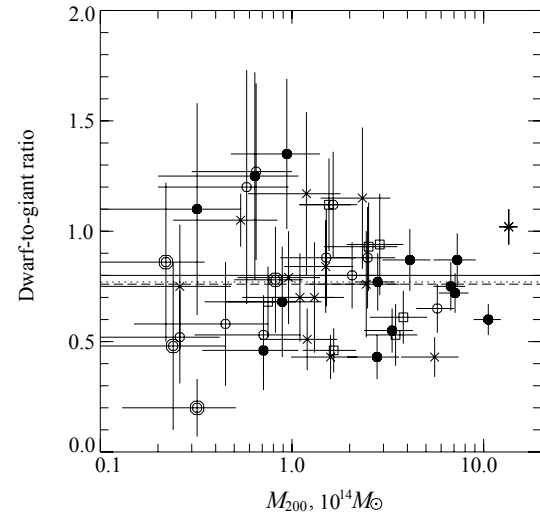


**Рис. 3.** Зависимость ОКГ (отношения числа карликовых галактик КП к числу гигантских галактик) в пределах радиуса скопления  $R_{200}$  от светимости в рентгеновском диапазоне. Обозначения те же, что и на предыдущем рисунке. Приведены статистические ошибки ОКГ.

получено: ОСЯ не коррелирует с параметрами скоплений, но зависит от локальной плотности галактик. В этой же работе подробно исследован морфологический состав галактик на красной последовательности, определенной по  $(B - V, V)$  до



**Рис. 4.** Зависимость ОКГ от общего числа галактик (богатства). Обозначения те же, что и на предыдущем рисунке. Двойными кругами обозначены скопления галактик без измерений рентгеновской светимости. Приведены статистические ошибки. Сплошной линией показано среднее значение ОКГ сверхскопления Her, штриховой — сверхскопления Leo, пунктирной — общего поля.



**Рис. 5.** Зависимость ОКГ от массы. Обозначения те же, что и на Рис. 3.

$M_V \sim -18^m$ , и получено, что доля эллиптических галактик составляет 0.36, доля SO галактик — 0.46, доля ранних спиральных галактик — 0.17 и доля поздних спиральных галактик — 0.02. При продвижении в область карликовых галактик (до  $M_V \sim -16^m$ , Рис. 1 из [29]) доля эллиптических галактик падает, а доля остальных галактик (особенно поздних спиральных галактик) растет.

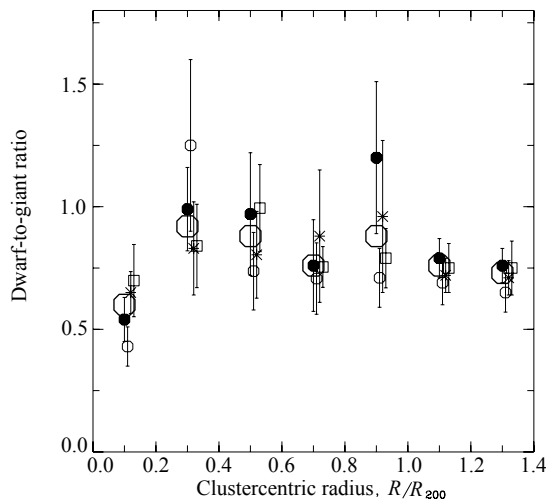
### 5.2. Свойства карликовых галактик красной последовательности в зависимости от радиуса скоплений галактик

Мы исследовали изменение ОКГ вдоль радиуса скопления. Для этого мы отобрали только скопления с центральной концентрацией галактик (как правило, в их центре расположена самая яркая галактика). Затем разбили область исследования в интервале  $0-1.4 R_{200}$  на бины по  $0.2 R_{200}$  и определили составное ОКГ в каждом бине у исследуемых

сверхскоплений и в поле (показаны разными значками на Рис. 6). Большие кружки соответствуют медианному значению ОКГ всех объектов в бине. Следующим шагом мы разделили все скопления галактик в соответствии с их рентгеновской светимостью так, чтобы в каждом бине по радиусу было примерно одинаковое число скоплений. На Рис. 7 бины рентгеновской светимости показаны разными значками. Крестиками показаны скопления галактик, у которых рентгеновское излучение не обнаружено. Большие кружки в каждом бине соответствуют медианному значению ОКГ в бинах по рентгеновской светимости. Таким образом, мы сгруппировали скопления в бины по принадлежности к разным структурам и по рентгеновской светимости. Результаты проведенного исследования следующие: отношение числа ярких карликовых галактик к числу гигантских на КП в обоих случаях минимально в центральных областях скоплений (около  $0.6 \pm 0.06$ ), затем после максимального значения на радиусе  $0.3 R_{200}$  (около  $0.9 \pm 0.10$ ), с небольшими флуктуациями убывает вдоль радиуса, достигая за пределами радиуса  $R_{200}$  значения примерно  $0.7 \pm 0.03$ . Как видно из рисунков, ошибки ОКГ в каждом бине меньше при разбиении по принадлежности, то есть глобальное окружение изучаемых скоплений галактик оказывает меньше влияния на карликовые галактики, чем светимость разогретого газа в скоплениях. Таким образом, в каждом бине вариации ОКГ в скоплениях галактик выше в зависимости от их рентгеновской светимости. Также отметим, что скопления галактик без зарегистрированного рентгеновского излучения имеют самые низкие значения ОКГ (крестики на Рис. 7).

**Таблица 2.** Результаты

Выборка	$N$	ОСЯ	ОКГ
Сверхскопление Leo	14	$1.53 \pm 0.16$	$0.77 \pm 0.08$
Сверхскопление Hercules	13	$1.67 \pm 0.18$	$0.80 \pm 0.08$
Поле Hercules	7	$1.44 \pm 0.18$	$0.75 \pm 0.09$
Поле	12	$1.50 \pm 0.13$	$0.77 \pm 0.07$

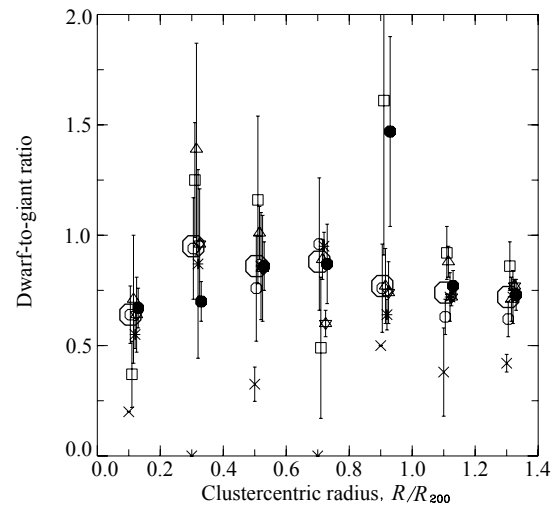


**Рис. 6.** Зависимость ОКГ от расстояния до центра скоплений, разделенных по принадлежности к двум сверхскоплениям и полю. Пустыми маленькими кружками показаны составные ОКГ сверхскопления Leo, заполненными кружками — сверхскопления Hercules. Составные ОКГ поля в области Hercules показаны пустыми квадратами, а составные ОКГ общего поля на этих  $z$  — звездочками. Большие круги соответствуют медианным значениям ОКГ по всем объектам в этой точке. Для наглядности в каждой точке радиуса значки даны с небольшим смещением друг относительно друга.

В работе [9] найдено, что ОКГ на КП, определенное примерно для такого же диапазона звездных величин, как у нас, минимально в центральных областях скоплений галактик и растет вдоль радиуса до  $0.9 R_{200}$ . О дальнейшем поведении ОКГ нет информации. В работе [2] показано, что карликовые галактики ранних типов также в исследуемом нами диапазоне звездных величин (но краснее, чем средняя линия) расположены в центральных частях системы A 901/902 ( $z = 0.165$ ). Пассивно развивающиеся (раннего типа) карликовые галактики, найденные по излучению в линии  $H\alpha$ , согласно [30] убывают до нуля на расстоянии  $2R_{vir}$ .

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В данной работе мы исследовали свойства ярких карликовых галактик КП  $-18^m.5 < M_r < -16^m.5$  и частично слабых гигантских галактик КП  $-20^m.3 < M_r < -18^m.5$  скоплений с красными смещениями  $0.023 < z < 0.047$ , расположенных в областях бедного сверхскопления Leo, богатого сверхскопления Hercules и в поле вне крупных структур. Наши исследования этих сверхскоплений галактик [12, 13] показали, что в области очень богатой системы Hercules соотношение между массой и инфракрасной светимостью отличаются от того, что мы наблюдаем



**Рис. 7.** Зависимость ОКГ от расстояния до центра скоплений, разделенных по принадлежности к шести бинам рентгеновской светимости. Разбиение проведено таким образом, чтобы в каждом бине было примерно одинаковое число скоплений галактик. Заполненными кружками показаны составные ОКГ скоплений галактик с  $\log L_X > 44.0$  эрг/с; шестиконечными звездами — скоплений галактик с  $43.35 < \log L_X \leq 44.0$  эрг/с; звездочками — скоплений галактик с  $43.14 < \log L_X \leq 43.3$  эрг/с; треугольниками — скоплений галактик с  $42.95 < \log L_X \leq 43.14$  эрг/с; квадратами — скоплений галактик с  $42.65 < \log L_X \leq 42.95$  эрг/с; кружками — скоплений галактик с  $41.9 < \log L_X \leq 42.65$  эрг/с; крестиками — скоплений галактик без рентгеновской светимости. Большие круги соответствуют медианным значениям ОКГ по всем объектам в этой точке. Для наглядности в каждой точке радиуса значки даны с небольшим смещением друг относительно друга.

в области бедной системы Leo. Возможно, в области системы Hercules, как мы предположили перед началом этой работы, в скоплениях галактик доля карликовых галактик в выбранном нами диапазоне звездных величин также различна. Для проверки этого предположения мы создали выборку галактик в каждом скоплении из каталога SDSS ( $m_{pet} < 20^m$ ) и построили их красную последовательность, которая позволила нам только фотометрическим способом выделить карликовые галактики ранних типов. Чтобы уменьшить количество фоновых галактик (помечены крестами на Рис. 1) мы отобрали галактики при следующих условиях:  $\Delta(u - r) \geq -0.2$ ,  $\Delta|g - r| \leq 0.075$  и  $\Delta|r - i| \leq 0.054$ .

Нами получены следующие результаты.

1. Количество ярких карликовых галактик  $-18^m.5 < M_r < -16^m.5$  в скоплениях растет с ростом рентгеновской светимости



$\log N \propto \log L^{0.64 \pm 0.09}$  так же, как и другие выборки галактик в них.

2. Отношение числа ярких карликовых галактик к числу гигантских (ОКГ) растет в скоплениях галактик с  $\log L_X > 43.5$  эрг/с ( $\sigma > 520$  км/с). При меньших значениях рентгеновской светимости (дисперсии) скопления галактик показывают большие вариации ОКГ. Отношение числа слабых гигантских галактик к числу ярких гигантских (ОСЯ) не показывает существенных изменений с рентгеновской светимостью скоплений. ОКГ (также ОСЯ) не меняется с массой  $M_{200}$ , богатством и глобальным окружением скоплений галактик (сверхскопления и поле).

3. Составное отношение числа ярких карликовых галактик к числу гигантских минимально в центральных областях скоплений галактик, максимумом в пределах  $0.3-0.7 R_{200}$  при разбиении скоплений на бины по рентгеновской светимости, от  $0.3$  до  $0.9 R_{200}$  при разбиении на бины по расположению. К радиусу  $1.4 R_{200}$  ОКГ в обоих случаях падает до  $0.7$ . Рентгеновская светимость скоплений галактик, как видно из рисунков, в каждом конкретном бине вызывает большие вариации ОКГ.

Исследования близких скоплений галактик совместно с модельными расчетами показали: наблюдаемые яркие карликовые галактики ранних типов (в исследуемом нами диапазоне звездных величин) являются результатом более раннего и непрерывного влияния групп и скоплений, в которых они находятся [31]. Они не являются результатом недавней трансформации под влиянием окружения (скопления), при котором спиральная галактика, залетевшая в скопление, становится эллиптической вследствие взаимодействия с плотной газовой средой скопления и/или повторных столкновений с массивными галактиками в приливном поле скопления.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен Российскому фонду фундаментальных исследований за частичную поддержку этой работы (грант 07-02-01417а), А. И. Копылову за ценные замечания и плодотворное обсуждение. Работа выполнена с использованием баз данных: NASA/IPAC Extragalactic Database (NED, <http://nedwww.ipac.caltech.edu/>), Sloan Digital Sky Survey (SDSS, <http://www.sdss.org/>), “K-corrections calculator” (<http://kcor.sai.msu.ru>).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. J. Smith, J. R. Lucey, J. Price, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **419**, 3167 (2012).
2. F. D. Barazza, C. Wolf, M. E. Gray, et al., *Astronom. and Astrophys.* **508**, 665 (2009).
3. A. Sandage, *Astrophys. J.* **176**, 21 (1972).
4. N. Visvanathan and A. Sandage, *Astrophys. J.* **216**, 214 (1977).
5. H. C. Ferguson and B. Binggeli, *Astronom. Astrophys. Rev.* **6**, 67 (1994).
6. H. C. Ferguson and A. Sandage, *Astronom. J.* **101**, 765 (1991).
7. R. Lupton, SDSS, <http://www.sdss.org/> (2005).
8. G. De Lucia, B. M. Poggianti, A. Aragón-Salamanca, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **374**, 809 (2007).
9. W. A. Barkhouse, H. K. C. Yee, and O. López-Cruz, *Astrophys. J.* **703**, 2024 (2009).
10. S. M. Weinmann, T. Lisker, Q. Guo, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **416**, 1197 (2011).
11. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182**, 543 (2009).
12. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astronomy Letters* **37**, 219 (2011).
13. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astronomy Letters* **39**, 3 (2013).
14. H. Ebeling, A. C. Edge, H. Böhringer, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **301**, 881 (1998).
15. M. J. Ledlow, W. Voges, F. N. Owen, and J. O. Burns, *Astronom. J.* **126**, 2740 (2004).
16. K. Rines, M. J. Geller, A. Diaferio, et al., *Astronom. J.* **124**, 1266 (2002).
17. H. Böhringer, W. Voges, J. P. Huchra, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **129**, 435 (2000).
18. H. Böhringer, P. Schuecker, L. Guzzo, et al., *Astronom. and Astrophys.* **425**, 367 (2004).
19. C. Jones and W. Forman, *Astrophys. J.* **511**, 65 (1999).
20. H. Ebeling, A. C. Edge, S. W. Allen, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **318**, 333 (2000).
21. A. Schwope, G. Hasinger, I. Lehmann, et al., *Astronomische Nachrichten* **321**, 1 (2000).
22. M. A. Strauss, D. H. Weinberg, R. H. Lupton, et al., *Astronom. J.* **124**, 1810 (2002).
23. K. Rines and M. Geller, *Astronom. J.* **135**, 1837 (2008).
24. I. Strateva, Ž. Ivezić, G. R. Knapp, et al., *Astronom. J.* **122**, 1861 (2001).
25. B. M. Poggianti, G. Fasano, D. Bettoni, et al., *Astrophys. J.* **697**, L137 (2009).
26. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **64**, 1 (2009).
27. B. M. Poggianti, A. von der Linden, G. De Lucia, et al., *Astrophys. J.* **642**, 188 (2006).
28. C. Bildfell, H. Hoekstra, A. Babul, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **425**, 204 (2012).
29. T. Valentiniuzzi, B. M. Poggianti, G. Fasano, et al., *Astronom. and Astrophys.* **536**, A34 (2011).
30. C. P. Haines, A. Gargiulo, F. La Barbera, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **381**, 7 (2007).
31. T. Lisker, S. M. Weinmann, J. Janz, and H. T. Meyer, *ArXiv:1303.0928* (2013).

**Dwarf-to-Giant Galaxy Ratio in Superclusters and in the Field at  $0.02 < z < 0.05$** **F. G. Kopylova**

We report the results of the study of red-sequence (RS) galaxies in 47 galaxy clusters ( $0.023 < z < 0.047$ ) located in different environments: in the superclusters Hercules and Leo, and in the field, based on the SDSS catalog data. In the  $-18^m5 < M_r < -16^m5$  interval, the number of bright RS dwarf galaxies in galaxy clusters increases with the X-ray luminosity of the cluster as  $\log N \propto \log L_X^{0.64}$ . The dwarf-to-giant ratio (DGR) does not depend on the surroundings, mass, or richness of the cluster. This ratio is seen to increase for galaxy clusters with  $\log L_X > 43.5$  erg/s or  $\sigma > 520$  km/s. The composite DGR of galaxy clusters, determined both from the membership in different structures and the X-ray luminosity along the radius  $R_{200}$ , is minimum in the central regions of the clusters (about  $0.6 \pm 0.06$ ), reaches a maximum within  $0.3-0.9R_{200}$  (about  $0.9 \pm 0.10$ ), and decreases approximately to  $0.7 \pm 0.03$  upon reaching the radius  $1.4 R_{200}$ .

Keywords: *galaxies: clusters: general*