

УДК 524.77-52/54

СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК И ИХ ОКРЕСТНОСТИ: «КРАСНАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ», ТЕМП ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ, ЗВЕЗДНАЯ МАССА

© 2019 Ф. Г. Копылова^{1*}, А. И. Копылов¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 3 октября 2018 года; после доработки 28 февраля 2018 года;
принята к публикации 28 февраля 2018 года

Исследованы ближайшие окрестности ($R < 3R_{200c}$) 40 групп и скоплений галактик локальной Вселенной ($0.02 < z < 0.045$ и $300 \text{ км с}^{-1} < \sigma < 950 \text{ км с}^{-1}$). По данным каталога SDSS DR10 определена звездная масса скоплений галактик, соответствующая K_s -светимости (ранее найденной нами по данным каталога 2MASX): $\lg(M_*/M_\odot) \propto (L_K/L_\odot)^{1.010 \pm 0.004}$ ($M_K < -21^m.5$, $R < R_{200c}$). Также мы нашли зависимость звездной массы скоплений галактик от массы гало: $\lg(M_*/M_\odot) \propto (M_{200c}/M_\odot)^{0.77 \pm 0.01}$. Получено, что доля галактик с подавленным звездообразованием ($M_K < -21^m.5$) максимальна в центральных областях скоплений галактик и равна в среднем 0.81 ± 0.02 , а за пределами найденного нами по наблюдаемому профилю радиуса в проекции R_{sp} ($2 < R/R_{200c} < 3$) уменьшается до 0.44 ± 0.02 , но остается выше, чем в поле, на 27%. При этом доля галактик ранних типов «красной последовательности» уменьшается от 0.54 ± 0.02 в центре до 0.24 ± 0.01 за пределами R_{sp} , сравниваясь с ее величиной в поле.

Ключевые слова: галактики: скопления — галактики: звездообразование — галактики: эволюция

1. ВВЕДЕНИЕ

Из наблюдений установлено, что высокоплотные центральные вириализованные области групп и скоплений галактик населяют массивные красные галактики ранних типов без звездообразования (см., например, [1–3]). Также установлено, что свойства галактик в скоплении связаны не только с положением галактик в нем, но и со временем их попадания в систему (см., например, [4–6]). В работах [7–9] приведены модельные орбиты галактик, оказавшихся в области воздействия гравитационного потенциала скоплений галактик. Изменение свойств галактик в группах и скоплениях с ростом расстояния от центра исследовано во многих работах. Их основным результатом является обнаружение уменьшения темпа звездообразования в галактиках в направлении к центру скопления (например, [10–13]). Было показано, что через определенное время во всех галактиках системы звездообразование затухает [8]. Если и встречаются галактики со звездообразованием, то они либо недавно попали в скопление, либо его членами не являются, а просто проецируются.

В работе [11] найдено, что уменьшение доли галактик со звездообразованием наблюдается до $5R_{200}$. Для объяснения этого эффекта были проведены модельные расчеты (N -тел) изменения темпа звездообразования вдоль радиуса скоплений галактик. Они показали, что значительная доля галактик, находящихся за пределами вириального радиуса скоплений, побывала в их центральных областях — до 50% в пределах $1-2 R_{vir}$ [11, 14].

В плотной внутренней среде скоплений действуют физические механизмы, которые ведут к уменьшению количества газа в галактиках и в конечном итоге к снижению темпа звездообразования. Предполагается, что ключевым механизмом, приводящим к выметанию газа и уменьшению эффективности процесса звездообразования, является воздействие активных ядер галактик в скоплениях [15]. За несколько гигапет галактики могут потерять газообразную оболочку даже в окрестности скоплений галактик [16]. Или, если плотность в среде скопления достаточно высока, холодный газовый диск может быть ободран в результате лобового давления [17, 18].

Другая гипотеза объясняет подавление звездообразования в окрестностях скоплений галактик

*E-mail: flera@sao.ru

тем, что галактики в падающих на скопление группах уже прошли предварительную трансформацию, лишившись газа в результате описанного выше процесса (см., например, [12, 13, 19, 20]).

Для того чтобы выяснить, как меняются вдоль нормированного радиуса систем (до $3R/R_{200}$) доля галактик ранних типов «красной последовательности» и удельный темп звездообразования, мы использовали в нашем исследовании выборку из 40 групп и скоплений галактик с зарегистрированным рентгеновским излучением, в которую включили системы галактик из области сверхскоплений Leo, Hercules, а также несколько близких систем: скопления A 1367, A 1656 и восемь групп галактик, рассмотренных ранее в работе [21]. Выборка сформирована так, чтобы был охвачен максимальный диапазон дисперсий лучевых скоростей систем галактик от 300 км с^{-1} до 950 км с^{-1} в локальной Вселенной ($0.02 < z < 0.045$). Результаты для шести богатых систем галактик из исследуемой выборки мы уже опубликовали [22].

Работа выполнена нами с привлечением данных каталога SDSS¹ [23] (Sloan Digital Sky Survey) Data Release 10, данных каталога 2MASS (2MASX, Two-Micron ALL-Sky Survey Extended Source Catalog² [24]) и NED³ (NASA Extragalactic Database).

Статья организована следующим образом. В разделе 2 описана процедура выделения окрестности скоплений и групп галактик (в единицах радиуса R_{200c} и R_{sp}). В разделе 3 представлена построенная последовательность цвет-величина галактик ранних типов в системах галактик и определена доля галактик ранних типов на ней. В разделе 4 описаны наши измерения полной звездной массы систем галактик в пределах радиуса R_{200c} и сделано сравнение полученной звездной массы с динамической массой, определенной ранее. В разделе 5 приведены распределения удельного темпа звездообразования скоплений при фиксировании звездной массы галактик и без него. Показаны вариации доли галактик с подавленным звездообразованием (quenched galaxies, QG) вдоль нормированного радиуса систем при фиксировании звездной массы галактик и без него, и для сравнения приведена оценка доли галактик с подавленным звездообразованием в поле. В Заключение перечислены основные результаты. В работе мы использовали следующие космологические параметры: $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$.

¹<http://www.sdss.org>

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

³<http://nedwww.ipac.caltech.edu>

2. БЛИЖАЙШИЕ ОКРЕСТНОСТИ ГРУПП И СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

Определение динамических характеристик исследуемых систем галактик: лучевой скорости, дисперсии лучевой скорости, массы скопления (гало) — выполнено для области радиусом R_{200c} (в проекции). Радиус R_{200c} — это радиус сферы, в пределах которого плотность в системе превышает критическую плотность Вселенной в 200 раз. Он определяется дисперсией лучевых скоростей галактик в системе [22]. В модельных расчетах часто используется другой радиус R_{200m} — радиус сферы, в пределах которого плотность в системе превышает среднюю плотность Вселенной в 200 раз.

Отношения между полученными массами M_{200c} и K_s -светимостью (2MASX), а также соотношения масса-светимость и динамические параметры (по данным SDSS DR7, DR8) для исследуемых групп и скоплений галактик представлены нами ранее [25–27].

В нашем исследовании важно выделить ближайшие окрестности систем галактик: кроме радиуса R_{200c} , определить «splashback»-радиус R_{sp} ($R_{sp} > R_{200c}$). Мы анализируем распределения, которые детально характеризуют структуру и кинематику каждой системы, представляя в виде рисунков:

- 1) отклонение лучевых скоростей галактик — членов скопления и галактик, отнесенных к фону, от средней лучевой скорости скопления или группы в зависимости от квадрата радиуса (расстояния до центра скопления);
- 2) интегральное распределение числа всех галактик в зависимости от квадрата радиуса;
- 3) расположение галактик в плоскости неба в экваториальных координатах;
- 4) гистограмму распределения лучевых скоростей всех галактик в пределах радиуса R_{200c} . На рис. 1a–1d мы приводим в качестве примера такие рисунки для MKW 04.

Рассмотрим рис. 1b, где представлен профиль скопления в проекции. С ростом расстояния от центра скопления наблюдается сначала резкое возрастание числа галактик, а затем, за пределами вириализованной области [27], его линейный рост (показан на рисунке прямой линией). Радиус вириализованной области R_{200c} и радиус R_{sp} показаны штриховой и штрихпунктирной линиями. Отметим, что R_{sp} соответствует расстоянию от центра, на котором крутой рост числа членов скопления сменяется линейным. На этом рисунке ниже также показано распределение галактик ранних типов ярче $M_K = -21^m$, по которому этот радиус уточнен. Такие галактики располагаются,

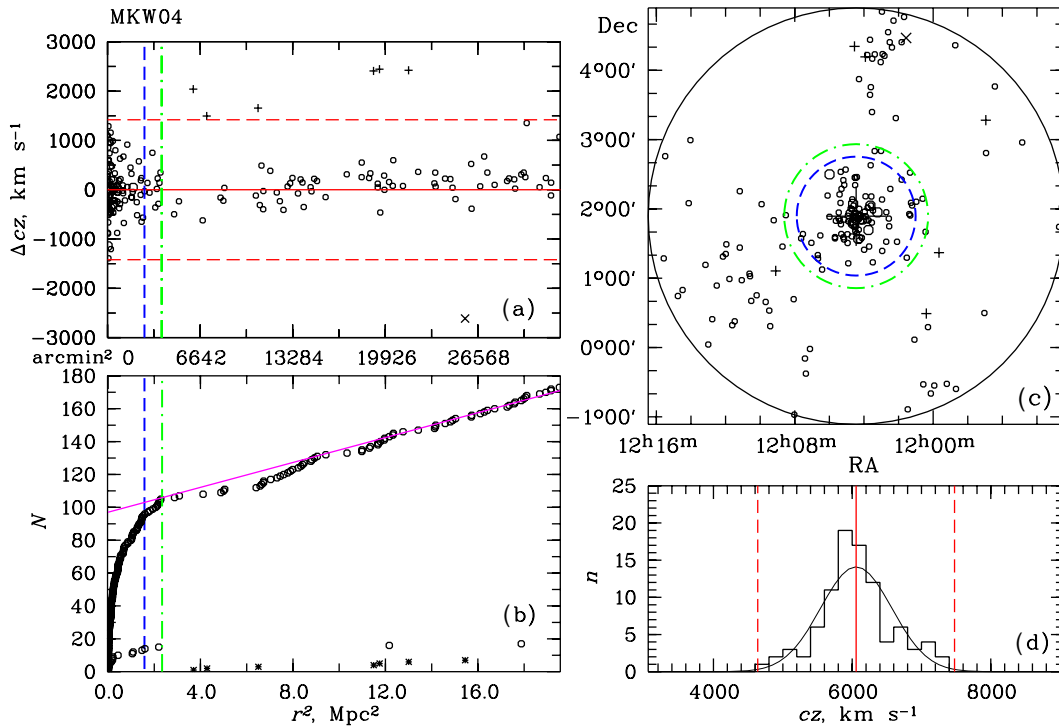


Рис. 1. Распределение галактик в скоплении MKW04. (a) отклонение лучевых скоростей галактик от средней лучевой скорости скопления, определенной по галактикам в пределах радиуса R_{200c} . Горизонтальные штриховые линии соответствуют отклонениям $\pm 2.7\sigma$, вертикальной штриховой линией отмечен радиус R_{200c} , а штрихпунктирной — радиус R_{sp} . Кружками большего размера отмечены галактики ярче $M_K^* = -24^m$, прямыми крестами — галактики заднего фона, косыми крестами — галактики переднего фона. (b) интегральное распределение полного числа галактик (верхняя кривая) в зависимости от квадрата расстояния до центра группы. Нижние точки соответствуют галактикам ранних типов ярче $M_K < -21^m$. Кружки соответствуют галактикам, обозначенным кружками на панели (a), звездочки — галактикам фона. Штрихпунктирной линией показан радиус R_{sp} . (c) распределение на небе в экваториальной системе координат галактик, которые представлены на панели (a) (обозначения те же). Кругами выделены области с радиусом R_{200c} (штрихи) и радиусом R_{sp} (штрихпунктир). Область исследования ограничена кругом с радиусом, равным $3.5 R_{200c}$ (сплошная линия). Большим крестом отмечен центр скопления. (d) распределение по лучевым скоростям всех галактик в пределах радиуса R_{200c} (сплошной линией для членов скопления показана гауссиана, соответствующая дисперсии скоростей группы). Сплошной вертикальной линией указана средняя лучевая скорость группы, штриховые линии соответствуют отклонениям $\pm 2.7\sigma$.

как правило, в центральных вириализованных областях систем галактик. Радиус R_{sp} соответствует, как мы полагаем, апоцентру орбит галактик, залетевших в вириализованную область скопления и потом вылетевших, с тем чтобы опять вернуться. То есть он разделяет галактики, которые впервые падают на скопление, и галактики, которые уже принадлежат скоплению.

Согласно модельным расчетам (N -тел) [28], максимальное расстояние, на которое галактики удаляются от скоплений, не превышает $1-2.5 R_{vir}$. В результате модельных расчетов профиля темного гало скоплений [30] показано, что для быстро аккрецирующих гало радиус скоплений галактик, на котором происходит резкое увеличение крутизны распределения поверхностной плотности гало, заключен в интервале $0.8-1.0 R_{200m}$, для медленно аккрецирующих — $R_{sp} \sim 1.5 R_{200m}$.

По наблюдениям близких групп локальной Вселенной Талли [31] получил радиус $R_{sp} \approx 1.33 R_{200c}$, назвав его «the second turnaround radius». У далеких скоплений галактик по данным каталога SDSS радиусы R_{sp} найдены по профилю поверхностной плотности галактик и по профилю массы, определенной по слабому гравитационному линзированию [32, 33]. Полученный нами радиус R_{sp} по интегральному распределению числа галактик в зависимости от квадрата расстояния от центра скопления равен в среднем для 40 исследуемых систем $(1.54 \pm 0.06) R_{200c}$, что составляет $0.96 \pm 0.04 R_{200m}$ (если учесть, что $4R_{200c} \approx 2.5R_{200m}$). Это значение больше, чем оценка [31], но согласуется с результатами, полученными из модельных расчетов, например, [30].

Физические характеристики исследуемых в данной работе групп и скоплений галактик для области радиусом R_{200c} представлены в колонках

Таблица 1. Физические характеристики скоплений галактик

Скопление	σ , км с ⁻¹	R_{200c} , Мпк	R_{200m} , Мпк	R_{sp} , Мпк	N_z	z_h	M_{200c} , $10^{14} M_{\odot}$	$L_{K,200c}$, $10^{12} M_{\odot}$	$M_{*,200c}$, $10^{12} M_{\odot}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
A 2147	853 ± 46	2.076	3.32	3.64	344	0.036179	10.57 ± 1.71	12.68 ± 0.6	11.34
A 2063	753 ± 62	1.833	2.93	2.68	146	0.034664	7.28 ± 1.80	5.97 ± 0.4	5.78
A 1367	749 ± 47	1.835	2.94	2.78	249	0.021743	7.21 ± 1.46	7.62 ± 0.2	7.25
A 2199	746 ± 44	1.820	2.91	3.61	288	0.030458	7.09 ± 1.25	9.88 ± 0.3	8.84
A 1185	676 ± 52	1.692	2.70	2.97	177	0.032883	5.70 ± 1.28	6.68 ± 0.2	6.16
MKW 03s	608 ± 67	1.474	2.36	1.95	82	0.044953	3.81 ± 1.26	4.56 ± 0.4	4.60
NGC 6338	552 ± 61	1.348	2.16	2.12	83	0.029342	2.87 ± 0.94	2.75 ± 0.1	2.52
NGC 6107	546 ± 55	1.332	2.13	1.90	99	0.031093	2.78 ± 0.84	3.45 ± 0.1	3.62
RXJ 1722	524 ± 86	1.269	2.03	1.64	37	0.046580	2.44 ± 1.20	3.58 ± 0.6	3.92
MKW 04	515 ± 54	1.263	2.02	1.53	91	0.020208	2.34 ± 0.74	2.50 ± 0.1	2.57
UGC 04991	515 ± 68	1.256	2.01	1.72	58	0.031958	2.33 ± 0.92	2.26 ± 0.2	2.06
A 1983	460 ± 47	1.115	1.78	1.67	97	0.044803	1.65 ± 0.51	4.86 ± 0.6	4.50
MKW 08	450 ± 44	1.100	1.76	1.73	103	0.026906	1.56 ± 0.46	3.08 ± 0.1	3.10
NGC 5098	445 ± 58	1.083	1.73	1.73	58	0.036812	1.50 ± 0.59	2.81 ± 0.1	3.21
RBS 858	445 ± 63	1.081	1.73	1.64	50	0.039586	1.51 ± 0.64	2.37 ± 0.2	2.29
NGC 2795	425 ± 61	1.039	1.66	1.33	49	0.028887	1.31 ± 0.56	2.08 ± 0.02	1.80
MKW 04s	423 ± 56	1.033	1.65	1.53	56	0.027928	1.29 ± 0.51	1.83 ± 0.1	1.78
VV 196	412 ± 69	1.003	1.60	1.16	36	0.035289	1.19 ± 0.60	1.29 ± 0.05	1.16
RXJ 1033	411 ± 65	0.996	1.59	1.48	40	0.045170	1.18 ± 0.56	2.23 ± 0.2	2.21
AWM 1	402 ± 58	0.982	1.57	1.15	48	0.028652	1.11 ± 0.48	2.29 ± 0.1	1.92
AWM 4	380 ± 62	0.927	1.48	1.34	37	0.031827	0.94 ± 0.46	1.49 ± 0.1	1.40
NGC 7237	376 ± 52	0.919	1.47	1.47	52	0.026102	0.91 ± 0.38	1.53 ± 0.1	1.52
NGC 3158	375 ± 61	0.918	1.47	1.24	38	0.022630	0.90 ± 0.44	1.74 ± 0.1	1.70
RXC J1511	374 ± 76	0.909	1.45	1.22	24	0.038990	0.89 ± 0.54	1.22 ± 0.1	0.98
NGC 5171	371 ± 52	0.908	1.47	1.47	51	0.023000	0.88 ± 0.37	1.46 ± 0.1	1.23
NGC 3119	355 ± 59	0.867	1.39	1.20	36	0.029657	0.76 ± 0.38	1.50 ± 0.1	1.71
A 1228B	347 ± 66	0.842	1.35	1.28	28	0.042892	0.71 ± 0.40	1.74 ± 0.1	1.48
A 2162	346 ± 61	0.844	1.35	1.12	32	0.032147	0.71 ± 0.37	1.44 ± 0.1	1.58
NGC 2783	346 ± 58	0.848	1.36	1.02	35	0.022151	0.71 ± 0.38	1.07 ± 0.1	1.04
A 1177	337 ± 66	0.822	1.32	1.14	26	0.032159	0.65 ± 0.35	1.20 ± 0.1	1.14
NGC 6098	335 ± 77	0.817	1.31	1.14	19	0.030936	0.64 ± 0.44	0.87 ± 0.1	0.95
UGC 07115	334 ± 46	0.818	1.31	1.06	53	0.022199	0.64 ± 0.26	1.29 ± 0.1	1.18
NGC 2832	331 ± 43	0.810	1.30	1.20	60	0.023044	0.62 ± 0.24	1.59 ± 0.1	1.03
NGC 5627	314 ± 55	0.768	1.23	1.10	33	0.026682	0.53 ± 0.28	1.34 ± 0.1	1.18

таблицы 1: (1) имя скопления галактик; (2) дисперсия лучевых скоростей с космологической поправкой $(1+z)^{-1}$; (3)–(5) радиусы R_{200c} , R_{200m} и R_{sp} в Мпк; (6) количество галактик, для которых определены красное смещение и дисперсия лучевых скоростей; (7) измеренное красное смещение; (8) найденная по σ масса гало M_{200c} с ошибкой, которая соответствует ошибке измерения σ ; (9) $L_{K,200c}$ — светимость с ошибкой, определенной так же; (10) масса звезд $M_{*,200c}$ примерно с такой же ошибкой, как ошибка светимости. Подробнее об определении массы звезд см. в разделе 4.

2.1. Комментарии к некоторым скоплениям галактик

В паре скоплений галактик А 2199 + А 2197 А 2199 является более богатой системой с более высокой светимостью в рентгеновской области [26]. Оба скопления расположены рядом в проекции на небесную сферу и имеют практически одинаковые лучевые скорости. А 2197 отстоит примерно на 79 минут дуги по δ от А 2199 и по нашим измерениям находится в пределах радиуса R_{sp} скопления А 2199, то есть имеет общие с А 2199 окрестности. Поэтому в нашей работе скопление А 2197 не рассмотрено индивидуально.

В паре скоплений галактик А 2147 + А 2151 А 2147 также является более богатой системой с более высокой светимостью в рентгеновской области [26]. И эти скопления находятся рядом в проекции на небесную сферу и имеют практически одинаковые лучевые скорости. Но скопление А 2151 располагается дальше, примерно в 105 дуговых минутах по δ от А 2147. Хотя по нашим измерениям А 2151 не входит в R_{sp} скопления А 2147, мы его также отдельно не рассматривали, поскольку оба скопления имеют общие окрестности.

3. «КРАСНАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ» ГРУПП И СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

Галактики ранних типов являются самыми яркими и, соответственно, самыми массивными членами скоплений галактик и расположены в основном в центральных вириализованных областях (см., например, [34]). Так, в сверхскоплении Hercules по нашим оценкам они составляют примерно 60–70% среди галактик ярче $M_K = -23^m3$ [21]. Тот факт, что галактики ранних типов являются самыми яркими объектами в скоплениях, подтверждается и приведенными в работе функциями светимости галактик раннего и позднего типов.

Одним из фундаментальных соотношений для галактик ранних типов является зависимость цвета от величины, которая в группах и скоплениях

галактик имеет небольшой разброс и образует так называемую «красную последовательность» (КП). КП связана с физическими характеристиками систем: ее форма характеризует соотношение масса–металличность, а разброс — вариации возраста галактик (см., например, [35]). КП галактик ранних типов часто используется в поисковых работах. С ее помощью обычно находят скопления галактик в ближней (например, [36–38]) и в дальней Вселенной (например, [39–43]). В данной работе мы использовали галактики ранних типов КП ярче $M_K = -21^m5$, чтобы детальнее изучить окрестности исследуемых скоплений галактик ($R < 3R_{200c}$).

При выборе галактик мы руководствовались следующими критериями: $fracDeV \geq 0.8$, где $fracDeV$ — параметр галактики, который представляет собой вклад балджа в полную светимость галактики, по данным каталога SDSS в фильтре r ; $c = r_{90}/r_{50} \geq 2.6$, где c — индекс концентрации, равный отношению радиусов, которые ограничивают 90% и 50% потоков Петросьяна. Кроме того, мы ввели ограничение по цвету $u - r$: $\Delta(u - r) > -0.2$, которое следует из полученной нами зависимости цвета $u - r$ от петросьяновской звездной величины для скоплений галактик, например, сверхскопления Hercules: $u - r = -0.078r_{Pet} + 3.81 \pm 2\sigma = -0.2$.

Для исследуемых систем мы строили серии рисунков, подобные приведенными на рис. 2 для скоплений галактик МКW 04 и МКW 04s. На рис. 2a и 2d представлены диаграммы цвет–величина с «красной последовательностью». Галактики ранних типов на КП, удовлетворяющие условию $-0.075 < g - r < 0.075$, показаны заполненными кружками. На рис. 2b–2f показаны фазовые диаграммы скоплений галактик МКW 04 и МКW 04s в проекции, где $\Delta V/\sigma$ — отношение разности лучевой скорости галактик и средней лучевой скорости скопления к дисперсии лучевых скоростей скопления, R/R_{200c} — расстояние галактики от выбранного центра скопления, нормированное к радиусу R_{200c} .

Фазовая диаграмма в проекции показывает зависимость между расстоянием галактики от выбранного центра и ее, как правило, нормированной лучевой скоростью. По расположению галактик на диаграмме можно изучать, например, вариации звездообразования в скоплениях, а также делать заключения о принадлежности галактик к «старому» населению скопления галактик или к галактикам, только что упавшим на него, или к уже вылетевшим из вириализованной области («splashback»-галактикам) (например, [4–9]). Анализируя положение галактики на фазовой диаграмме, удобно изучать историю ее аккреции в группу или скопление.

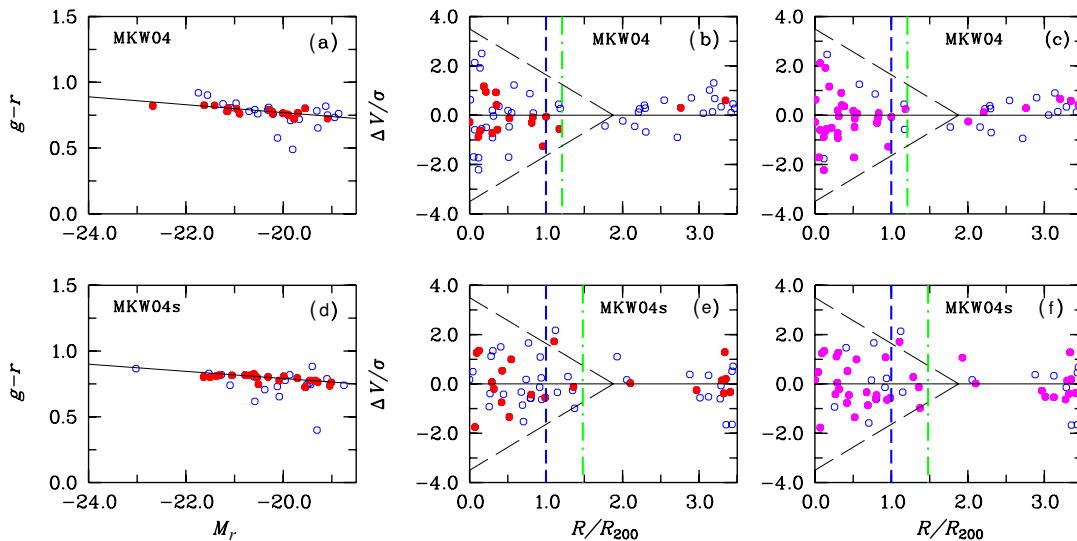


Рис. 2. (a) и (d): зависимость цвет—абсолютная величина ($M_K < -21^m5$) скоплений галактик MKW 04 и MKW 04s соответственно. Заполненными кружками показаны галактики ранних типов «красной последовательности». (b) и (e): фазовая диаграмма: скорость скоплений галактик MKW 04 и MKW 04s в зависимости от радиуса. Скорость определена как отношение разности лучевых скоростей галактик и средней лучевой скорости скопления к дисперсии лучевых скоростей. Радиус R/R_{200c} — расстояние галактики от центра, нормированное на радиус R_{200c} . КП-галактики ранних типов показаны заполненными кружками. Штриховая и штрихпунктирная линии соответствуют радиусам R_{200c} и R_{sp} . Галактики отобраны в пределах $\pm 2.7\sigma$ [44]. (c) и (f): те же фазовые диаграммы, но заполненными кружками показаны галактики с подавленным звездообразованием ($\lg sSFR[\text{Gyr}^{-1}] < -1.75$).

В качестве центра системы галактик мы брали координаты самой яркой галактики, которая, как правило, располагается недалеко от центра излучения в рентгеновской области. Если ярких галактик несколько или яркая галактика смещена от сгущения галактик, то в качестве центра скопления обычно берут либо центр излучения в рентгеновской области, либо центроид галактик. На рис. 2 приведены только галактики ярче $M_K = -21^m5$. На панелях (b)–(f) мы отделили штриховыми наклонными линиями преимущественно вириализованные галактики от впервые падающих на скопление (модельные расчеты взяты из работы [45]).

Отметим, что основная масса галактик ранних типов КП расположена в центральных областях скоплений галактик, в пределах найденного нами радиуса R_{sp} . В то же время небольшая часть галактик может находиться и на расстоянии $3R_{200c}$, в соответствии с модельными расчетами, например, [12]. Нами найдено, что доля галактик ранних типов КП падает в среднем по всем системам в два раза: от 0.54 ± 0.02 в центральных областях до 0.24 ± 0.02 в пределах $2R/R_{200c} < R < 3R/R_{200c}$. За пределами радиусов R_{sp} доля галактик ранних типов $frac_E$ составляет в среднем также 0.24 ± 0.01 . Результаты определения $frac_E$ вдоль нормированного радиуса исследуемой системы представлены в таблице 2. В столбце (1) дано имя системы, в остальных — диапазоны изменения радиуса (R/R_{200c} и R_{sp}).

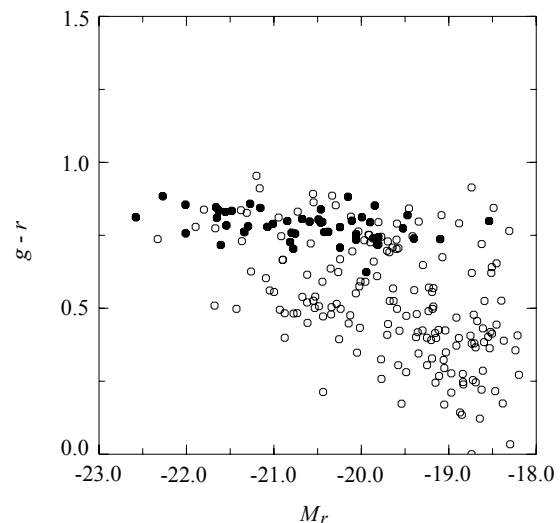


Рис. 3. Зависимость цвет—абсолютная величина галактик поля области с центром $14^h5, 35^o$ и радиусом $300'$ ($M_K < -21^m5$, $0.030 < z < 0.045$). Галактики ранних типов показаны заполненными кружками.

В работе [22] мы рассмотрели две области между сверхскоплениями Hercules и Leo, свободные от скоплений галактик (практически поля), и получили, что в среднем по двум полям доля галактик ранних типов ярче $M_K = -21^m5$ равна 0.24 ± 0.01 . В отличие от галактик скоплений, галактики ранних типов из этих областей (галактики поля) не

Таблица 2. Изменение доли галактик ранних типов вдоль радиуса

Скопление	$(0-0.25)R/R_{200c}$	$(0-1)R/R_{200c}$	$(1-2)R/R_{200c}$	$(2-3)R/R_{200c}$	$(0-1)R_{sp}$	$1R_{sp}-3R/R_{200c}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
A 2147	0.45 ± 0.11	0.37 ± 0.04	0.28 ± 0.04	0.31 ± 0.04	0.34 ± 0.03	0.30 ± 0.03
A 2063	0.62 ± 0.14	0.50 ± 0.08	0.23 ± 0.07	0.28 ± 0.06	0.46 ± 0.07	0.26 ± 0.05
A 1367	0.58 ± 0.14	0.47 ± 0.07	0.32 ± 0.08	0.15 ± 0.06	0.44 ± 0.06	0.21 ± 0.06
A 2199	0.69 ± 0.15	0.46 ± 0.06	0.33 ± 0.06	0.18 ± 0.04	0.40 ± 0.04	0.18 ± 0.04
A 1185	0.49 ± 0.14	0.30 ± 0.05	0.33 ± 0.07	0.23 ± 0.07	0.32 ± 0.05	0.25 ± 0.06
MKW 03s	0.62 ± 0.22	0.49 ± 0.09	0.32 ± 0.11	0.21 ± 0.10	0.47 ± 0.08	0.22 ± 0.08
NGC 6338	0.47 ± 0.20	0.29 ± 0.09	0.26 ± 0.12	0.25 ± 0.09	0.30 ± 0.08	0.23 ± 0.08
NGC 6107	0.47 ± 0.19	0.43 ± 0.09	0.45 ± 0.14	0.14 ± 0.06	0.44 ± 0.09	0.21 ± 0.07
RXC J1722	0.50 ± 0.23	0.44 ± 0.12	0.24 ± 0.13	0.27 ± 0.15	0.42 ± 0.10	0.25 ± 0.11
MKW 04	0.33 ± 0.15	0.41 ± 0.12	0.25 ± 0.28	0.09 ± 0.09	0.40 ± 0.11	0.08 ± 0.09
UGC 04991	0.39 ± 0.17	0.35 ± 0.10	0.38 ± 0.18	0.22 ± 0.12	0.39 ± 0.10	0.21 ± 0.09
A 1983	0.54 ± 0.19	0.52 ± 0.09	0.26 ± 0.08	0.24 ± 0.12	0.45 ± 0.07	0.22 ± 0.08
MKW 08	0.54 ± 0.28	0.49 ± 0.12	0.26 ± 0.10	0.29 ± 0.11	0.43 ± 0.09	0.28 ± 0.09
NGC 5098	0.54 ± 0.25	0.46 ± 0.12	0.19 ± 0.08	0.39 ± 0.14	0.35 ± 0.08	0.37 ± 0.12
RBS 858	0.62 ± 0.28	0.46 ± 0.12	0.50 ± 0.22	0.12 ± 0.13	0.48 ± 0.12	0.29 ± 0.16
NGC 2795	0.46 ± 0.24	0.34 ± 0.13	0.21 ± 0.14	0.40 ± 0.17	0.40 ± 0.12	0.28 ± 0.11
MKW 04s	0.60 ± 0.44	0.37 ± 0.13	0.25 ± 0.36	0.50 ± 0.43	0.35 ± 0.11	0.40 ± 0.33
VV 196	0.75 ± 0.33	0.48 ± 0.17	0.06 ± 0.06	0.36 ± 0.19	0.41 ± 0.14	0.23 ± 0.10
RXC J1033	0.67 ± 0.30	0.38 ± 0.11	0.26 ± 0.11	0.13 ± 0.10	0.34 ± 0.08	0.20 ± 0.11
AWM 1	0.33 ± 0.27	0.39 ± 0.14	0.33 ± 0.17	0.42 ± 0.22	0.40 ± 0.14	0.36 ± 0.14
AWM 4	0.70 ± 0.34	0.43 ± 0.08	0.10 ± 0.10	0.14 ± 0.06	0.39 ± 0.07	0.05 ± 0.05
NGC 7237	0.46 ± 0.24	0.39 ± 0.12	0.36 ± 0.19	0.25 ± 0.28	0.39 ± 0.10	0.20 ± 0.22
NGC 3158	0.50 ± 0.25	0.48 ± 0.10	0.14 ± 0.15	—	0.46 ± 0.09	—
RXC J1511	0.57 ± 0.21	0.58 ± 0.12	0.27 ± 0.18	0.36 ± 0.21	0.54 ± 0.10	0.33 ± 0.16
NGC 5171	0.31 ± 0.09	0.40 ± 0.07	0.33 ± 0.17	0.22 ± 0.17	0.39 ± 0.06	0.20 ± 0.15
NGC 3119	0.67 ± 0.35	0.28 ± 0.06	0.11 ± 0.08	—	0.24 ± 0.04	0.07 ± 0.07
A 1228B	0.50 ± 0.25	0.35 ± 0.14	0.28 ± 0.14	0.50 ± 0.27	0.33 ± 0.11	0.40 ± 0.19
A 2162	0.43 ± 0.30	0.43 ± 0.17	0.36 ± 0.19	0.38 ± 0.25	0.45 ± 0.15	0.29 ± 0.16
NGC 2783	0.29 ± 0.12	0.27 ± 0.07	0.40 ± 0.33	0.60 ± 0.44	0.29 ± 0.07	0.50 ± 0.31
A 1177	0.71 ± 0.27	0.55 ± 0.12	0.50 ± 0.27	0.50 ± 0.43	0.52 ± 0.10	0.57 ± 0.36
NGC 6098	0.67 ± 0.61	0.30 ± 0.20	0.20 ± 0.22	—	0.21 ± 0.14	0.50 ± 0.61
UGC 07115	0.40 ± 0.33	0.57 ± 0.18	0.29 ± 0.23	—	0.54 ± 0.16	—
NGC 2832	0.50 ± 0.35	0.39 ± 0.08	0.47 ± 0.19	0.60 ± 0.31	0.42 ± 0.07	0.56 ± 0.23
NGC 5627	0.29 ± 0.23	0.21 ± 0.12	0.40 ± 0.24	0.17 ± 0.18	0.27 ± 0.11	0.22 ± 0.17
Total $N = 40$	0.54 ± 0.04	0.44 ± 0.02	0.31 ± 0.01	0.24 ± 0.02	0.42 ± 0.02	0.24 ± 0.01

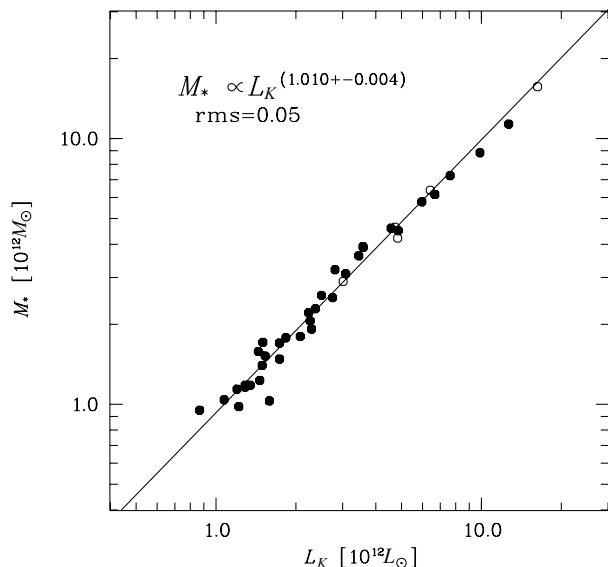


Рис. 4. Зависимость звездной массы скоплений галактик от K_s -светимости в пределах R_{200c} . Линия соответствует регрессионному соотношению $M_*/M_\odot \propto (L_K/L_\odot)^{0.996 \pm 0.004}$. Пустыми кружками показаны скопления галактик из работы [22].

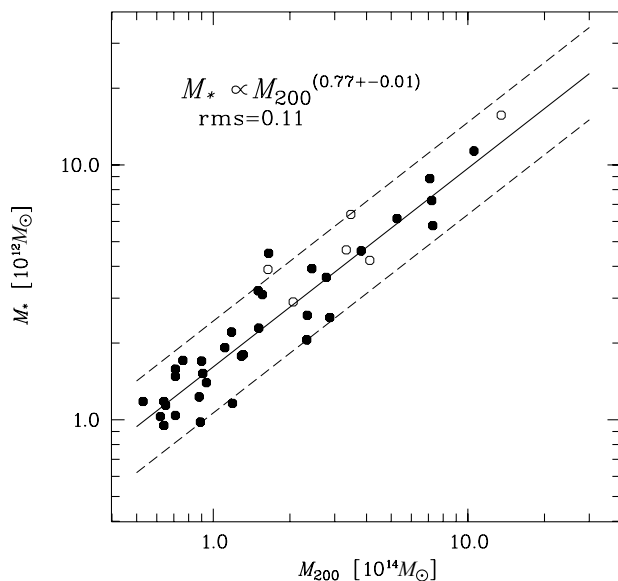


Рис. 5. Зависимость звездной массы скоплений галактик от массы гало в пределах R_{200c} . Сплошная линия соответствует регрессионному соотношению $M_*/M_\odot \propto (M_{200c}/M_\odot)^{0.78 \pm 0.01}$, а штриховые — отклонениям от нее на уровне 2σ . Пустыми кружками показаны скопления галактик из работы [22].

располагаются на КП компактно, хотя и для них наблюдается зависимость цвет—величина (рис. 3).

Как нами получено выше, для скоплений галактик в ближайшей окрестности $2 < R/R_{200c} < 3$ и $R > R_{sp}$ средние доли равны 0.24 ± 0.02 и

0.24 ± 0.01 (таблица 2), то есть не отличаются от $\langle frac_E \rangle$ для галактик поля. В пределах радиуса $1 < R/R_{200c} < 2$ средняя доля галактик ранних типов выше, чем в поле, и равна 0.31 ± 0.01 . Таким образом, в пределах определенного из наблюдений радиуса R_{sp} заключена основная часть галактик ранних типов скопления: некоторые из них уже вириализованы, а другие (согласно, например, модельным расчетам [9]) вылетели из вириализованной области и, достигнув найденного нами апоцентра орбит R_{sp} , вновь в нее вернутся.

4. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ЗВЕЗДНОЙ МАССОЙ И ПОЛНОЙ МАССОЙ ГРУПП И СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

Чтобы определить полную звездную массу систем галактик в пределах радиуса R_{200c} (в проекции) при условии $M_K < -21^m$ мы воспользовались результатами данных о звездных массах галактик из архива SDSS DR10, которые получены подгонкой моделей FSPS [46] к SDSS-фотометрии (исправленной за поглощение) в фильтрах u, g, r, i, z . В этом релизе представлены новые результаты фотометрии больших галактик (ярчайших галактик систем), светимость которых была недооценена ранее из-за превышения фона [47]. Надо отметить, что не для всех галактик, включенных нами в выборку, в SDSS DR10 есть спектральные данные (в том числе и звездные массы). Например, в системах A 2162, AWM 4, A 1139 для ярчайшей галактики, светимость которой может составлять до 40% общей светимости, они отсутствуют. Только у семи систем (18% от общего числа) имеются данные по всем галактикам, у остальных систем галактик нет измерений звездных масс (от 3% до 19%), а в системах RXJ 1722 и NGC 5627 — около 30%. При отсутствии измерений звездных масс мы примерно оценили их по цветам $u-r$ и $g-r$, звездным величинам и параметру $fracDeV$.

В более ранних работах [21, 25, 27] мы по данным каталога 2MASX определили K_s -светимости исследуемых скоплений галактик в пределах R_{200c} ($M_K < -21^m$). По этим светимостям наилучшим образом отслеживается масса звездного населения галактик, которую можно непосредственно получить, если учесть соотношение масса—светимость для спиральных и эллиптических галактик. Мы сравнили полученные K_s -светимости со звездными массами, приведенными в каталоге SDSS DR10 и получили для нашей выборки из 40 скоплений и групп галактик следующую зависимость:

$$\lg M_{*,200c} = (1.010 \pm 0.004) \times \lg L_{K,200c} - (0.144 \pm 0.050)$$

со стандартным отклонением 0.05 (рис. 4). Массы и светимости во всех выражениях даны в M_{\odot} и L_{\odot} . Таким образом, оценки звездных масс галактик (в конечном итоге и скоплений галактик), представленные в каталоге SDSS DR10, хорошо согласуются с их светимостями в ближней инфракрасной области. На рис. 5 приведена зависимость звездной массы систем галактик от их динамической массы, определенной нами по дисперсии лучевых скоростей. Зависимость имеет вид

$$\lg M_{*,200c} = (0.77 \pm 0.01) \times (\lg M_{200c} - 14.5) + (12.595 \pm 0.12)$$

со стандартным отклонением 0.11 и близка по форме к зависимости, полученной нами ранее для 182 систем галактик: $L_{K,200c} \propto M_{200c}^{0.768 \pm 0.002}$ [21], а также к результатам для 93 систем галактик: $L_{K,200c} \propto M_{200c}^{0.72 \pm 0.04}$ [48], и для 55 групп и 6 скоплений галактик: $L_{K,200c} \propto M_{200c}^{0.64 \pm 0.06}$ [49].

5. УДЕЛЬНЫЙ ТЕМП ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В ГРУППАХ И СКОПЛЕНИЯХ ГАЛАКТИК

Удельный темп звездообразования ($sSFR$) в галактике определяется через интегральный темп звездообразования, деленный на ее звездную массу: $sSFR = SFR/M_*$. В каталоге SDSS DR10 приведены результаты определения удельного темпа звездообразования и звездная масса галактик. При наблюдении условий $r_{\text{Pet}} < 17^m 77$ и $\langle \mu_r \rangle < 24^m 5/\square''$ (петросьяновская звездная величина галактики в фильтре r , исправленная за поглощение в Галактике, и петросьяновская средняя поверхностная яркость, соответствующая эффективному радиусу) полнота данных SDSS оценивается в 99% [50], а для ярких галактик — 95%. Недостающие яркие галактики (в основном ранних типов без звездообразования) в пределах радиуса R_{200c} взяты из базы данных NED, а также получены по диаграммам цвет–величина ($u - r, r, g - r, r, r - i, r$) [25].

Исследуемые нами группы и скопления галактик имеют дисперсии лучевых скоростей σ от 300 до 950 км с⁻¹. Мы разделили этот диапазон на следующие интервалы: 850–950, 600–800, 500–600, 400–500 и 300–400 км с⁻¹ и построили распределения $\lg sSFR$ для всех галактик выборки (рис. 6а) и с разбиением на подвыборки по звездной массе: [9.5; 10.0], [10.0; 10.5], [10.5; 11.0], [11.0; 11.5] $\lg M_*/[M_{\odot}]$ (рис. 6б–6е). Линии разного типа на рис. 6 соответствуют распределениям для галактик из различных интервалов дисперсии лучевых скоростей.

В распределении $\lg sSFR$ обычно находят минимум, отделяющий галактики с активным звездообразованием от галактик, в которых образование звезд подавлено (quenched galaxies, QG). Четкая бимодальность распределения и минимум, соответствующий $\lg sSFR[\text{yr}^{-1}] = -11$, найдены, например, в работе [13] (по данным SDSS DR7). Однако ошибки и смещения при измерении SFR в галактиках могут создавать видимость бимодальности [51], и чтобы получить одномодальное распределение, нужно исключить галактики с нулевым темпом звездообразования.

В нашем случае минимуму для исследуемых скоплений соответствует $\lg sSFR[\text{Gyr}^{-1}] \sim -1.5$, или $\lg sSFR[\text{yr}^{-1}] \sim -10.5$ (рис. 6а). Мы взяли общий предел для всех систем, равный $\lg sSFR[\text{Gyr}^{-1}] = -1.75$, как и ранее в работе [22]. На рис. 6б–6е видно, что распределение $\lg sSFR$ имеет длинный хвост (слева) для систем со звездной массой в интервале $\lg M_* = [10.5; 11.5]$ (область QG), кроме диапазонов $\lg M_* = [10.0; 10.5]$ и особенно $\lg M_* = [9.5; 10.0]$. Распределения похожи для всех групп и скоплений галактик по всем диапазонам звездных масс, кроме самых маломассивных групп с дисперсией лучевых скоростей 300–400 км с⁻¹, в которых рост числа галактик с активным звездообразованием не наблюдается для диапазона $\lg M_* = [10.0; 10.5]$ (рис. 6с). Распределение имеет широкий пик $\lg sSFR = [-2.3; -1.8]$ для всех диапазонов масс, кроме $\lg M_* = [11.0; 11.5]$, где пик острый с максимумом при $\lg sSFR \approx -2.2$, исключая подвыборку маломассивных групп.

В скоплениях галактик плотность падает с ростом расстояния от выбранного центра, а расположение галактики на определенном радиусе связано со временем ее попадания в скопление (см., например, [12]). На рис. 7 показана доля галактик с подавленным звездообразованием QG в зависимости от радиуса скопления в проекции, нормированного радиусом R_{200c} . На рис. 7а приведена суммарная доля QG для всех галактик без деления по звездной массе, а на рис. 7б–7е — доля QG для каждого диапазона звездных масс отдельно. Разными линиями показаны изменения доли QG, соответствующие бину по дисперсии лучевой скорости. Суммарная доля QG изменяется от среднего значения 0.81 ± 0.02 при расстоянии $(0 - 0.25)R/R_{200c}$ до 0.43 ± 0.02 на $(2 - 3)R/R_{200c}$ (или 0.44 ± 0.02 за пределами радиуса R_{sp}). Таким образом, доля QG уменьшается к $3R/R_{200c}$ почти на 50%. Нами найдена средняя (по двум полям) доля галактик с подавленным звездообразованием, для которых выполняется условие $\lg sSFR[\text{Gyr}^{-1}] < -1.75$. Она

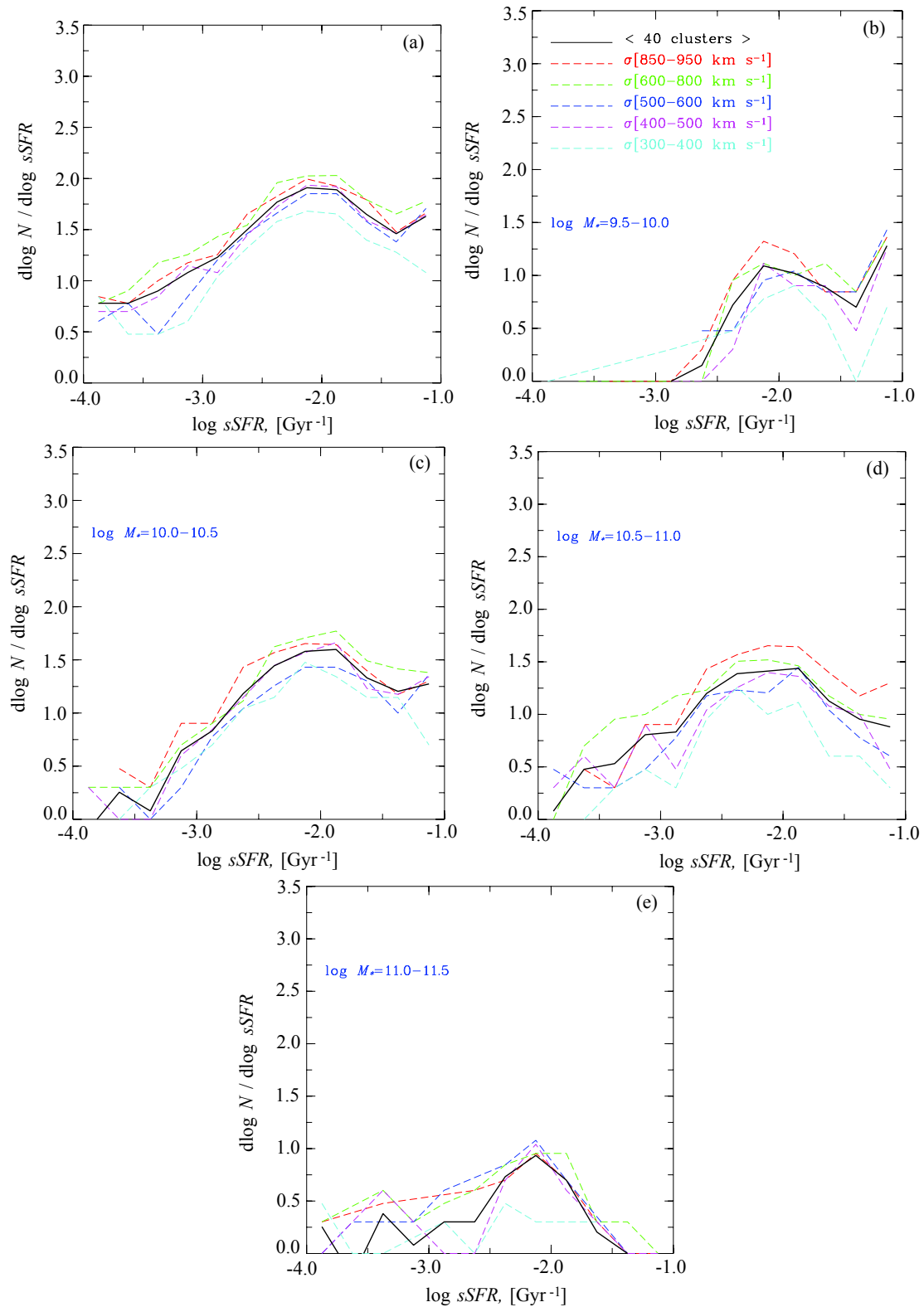


Рис. 6. Распределение галактик по удельному темпу звездообразования ($\lg sSFR$) по всей выборке (a) и с разбиением на бины по звездной массе (b)–(e). Сплошная линия соответствует среднему значению, найденному по всем галактикам. Линиями других типов показаны распределения для групп и скоплений галактик с дисперсией лучевых скоростей σ в диапазонах 850–950, 600–800, 500–600, 400–500 и 300–400 км с⁻¹.

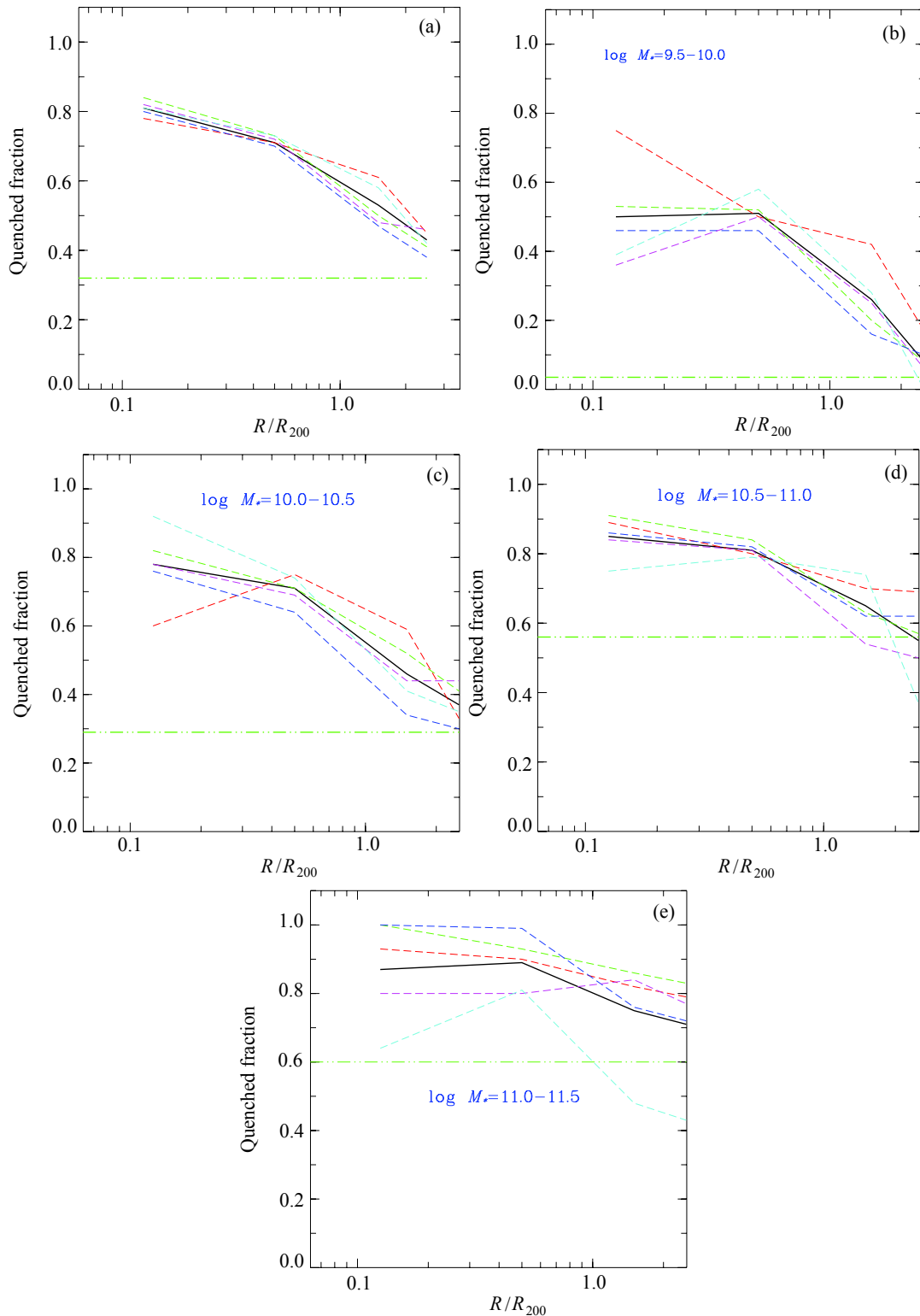


Рис. 7. Доля галактик с подавленным звездообразованием ($frac_q$) ($\lg sSFR[\text{Gyr}^{-1}] < -1.75$) в зависимости от расстояния до центра скопления в проекции. Скопления сгруппированы так же, как на предыдущих рисунках. Сплошная линия соответствует среднему значению, найденному по всем системам галактик. На панели (a) показана $frac_q$, найденная по всем галактикам, на панелях (b)–(e) — по галактикам, разбитым на бины по звездной массе. На каждой панели штрихпунктирной линией приведена $frac_q$ в поле.

Таблица 3. Изменение доли галактик с подавленным звездообразованием вдоль радиуса

Скопление	$(0-0.25)R/R_{200c}$	$(0-1)R/R_{200c}$	$(1-2)R/R_{200c}$	$(2-3)R/R_{200c}$	$(0-1)R_{sp}$	$1R_{sp}-3R/R_{200c}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
A 2147	0.79 ± 0.36	0.68 ± 0.07	0.54 ± 0.06	0.48 ± 0.05	0.64 ± 0.05	0.49 ± 0.04
A 2063	0.86 ± 0.18	0.71 ± 0.10	0.40 ± 0.10	0.55 ± 0.10	0.66 ± 0.09	0.50 ± 0.08
A 1367	0.74 ± 0.17	0.68 ± 0.09	0.58 ± 0.08	0.39 ± 0.10	0.65 ± 0.08	0.46 ± 0.09
A 2199	0.88 ± 0.20	0.72 ± 0.08	0.60 ± 0.08	0.43 ± 0.07	0.66 ± 0.06	0.43 ± 0.07
A 1185	0.68 ± 0.18	0.56 ± 0.08	0.50 ± 0.09	0.44 ± 0.10	0.55 ± 0.07	0.43 ± 0.08
MKW 03s	1.00 ± 0.30	0.81 ± 0.12	0.56 ± 0.15	0.38 ± 0.15	0.78 ± 0.11	0.40 ± 0.12
NGC 6338	0.84 ± 0.29	0.65 ± 0.14	0.52 ± 0.18	0.60 ± 0.16	0.61 ± 0.12	0.60 ± 0.15
NGC 6107	0.80 ± 0.27	0.83 ± 0.15	0.61 ± 0.18	0.34 ± 0.11	0.75 ± 0.12	0.40 ± 0.10
RXC J1722	0.86 ± 0.33	0.63 ± 0.15	0.41 ± 0.18	0.33 ± 0.17	0.62 ± 0.14	0.33 ± 0.14
MKW 04	0.87 ± 0.33	0.85 ± 0.20	0.25 ± 0.28	0.27 ± 0.18	0.81 ± 0.20	0.25 ± 0.16
UGC 04991	0.50 ± 0.22	0.56 ± 0.14	0.45 ± 0.24	0.20 ± 0.13	0.59 ± 0.14	0.22 ± 0.11
A 1983	0.80 ± 0.24	0.78 ± 0.13	0.49 ± 0.12	0.43 ± 0.17	0.71 ± 0.10	0.42 ± 0.12
MKW 08	0.92 ± 0.38	0.89 ± 0.13	0.54 ± 0.13	0.55 ± 0.16	0.78 ± 0.13	0.56 ± 0.14
NGC 5098	0.73 ± 0.29	0.72 ± 0.16	0.32 ± 0.11	0.50 ± 0.16	0.60 ± 0.12	0.42 ± 0.12
RBS 858	1.00 ± 0.39	0.79 ± 0.18	0.87 ± 0.33	0.25 ± 0.20	0.79 ± 0.16	0.57 ± 0.25
NGC 2795	0.54 ± 0.28	0.52 ± 0.16	0.50 ± 0.23	0.57 ± 0.21	0.53 ± 0.15	0.53 ± 0.16
MKW 04s	1.00 ± 0.63	0.73 ± 0.20	0.62 ± 0.36	0.50 ± 0.43	0.70 ± 0.18	0.60 ± 0.44
VV 196	0.83 ± 0.36	0.56 ± 0.19	0.12 ± 0.09	0.57 ± 0.25	0.52 ± 0.16	0.35 ± 0.13
RXC J1033	0.83 ± 0.38	0.71 ± 0.17	0.67 ± 0.20	0.33 ± 0.17	0.70 ± 0.14	0.40 ± 0.17
AWM 1	0.75 ± 0.40	0.73 ± 0.20	0.33 ± 0.17	0.67 ± 0.30	0.72 ± 0.20	0.48 ± 0.17
AWM 4	1.00 ± 0.53	0.83 ± 0.24	0.44 ± 0.25	0.33 ± 0.22	0.82 ± 0.23	0.28 ± 0.16
NGC 7237	1.00 ± 0.45	0.81 ± 0.20	0.71 ± 0.30	0.50 ± 0.43	0.80 ± 0.17	0.40 ± 0.33
NGC 3158	0.77 ± 0.32	0.68 ± 0.23	0.62 ± 0.36	—	0.69 ± 0.21	0.60 ± 0.44
RXC J1511	0.86 ± 0.48	0.75 ± 0.23	0.46 ± 0.24	0.46 ± 0.24	0.71 ± 0.21	0.44 ± 0.19
NGC 5171	0.54 ± 0.25	0.61 ± 0.17	0.56 ± 0.23	0.30 ± 0.20	0.61 ± 0.14	0.27 ± 0.18
NGC 3119	0.78 ± 0.39	0.73 ± 0.22	0.26 ± 0.13	0.20 ± 0.22	0.62 ± 0.18	0.25 ± 0.14
A 1228B	0.93 ± 0.36	0.80 ± 0.24	0.56 ± 0.22	0.50 ± 0.27	0.74 ± 0.18	0.47 ± 0.21
A 2162	0.88 ± 0.45	0.77 ± 0.25	0.71 ± 0.30	0.50 ± 0.31	0.83 ± 0.23	0.43 ± 0.21
NGC 2783	0.50 ± 0.31	0.56 ± 0.23	0.60 ± 0.44	1.00 ± 0.63	0.56 ± 0.22	0.88 ± 0.45
A 1177	0.75 ± 0.40	0.86 ± 0.28	0.80 ± 0.38	0.50 ± 0.43	0.86 ± 0.24	0.57 ± 0.36
NGC 6098	1.00 ± 0.82	0.50 ± 0.27	0.20 ± 0.22	—	0.36 ± 0.19	0.50 ± 0.61
UGC 07115	0.67 ± 0.43	0.77 ± 0.21	0.71 ± 0.42	0.50 ± 0.31	0.75 ± 0.19	0.50 ± 0.27
NGC 2832	0.88 ± 0.45	0.88 ± 0.26	0.85 ± 0.28	0.90 ± 0.41	0.85 ± 0.21	0.94 ± 0.34
NGC 5627	0.86 ± 0.48	0.74 ± 0.26	0.60 ± 0.31	0.17 ± 0.18	0.77 ± 0.24	0.20 ± 0.15
Total sample ($N = 40$)	0.81 ± 0.02	0.71 ± 0.02	0.53 ± 0.02	0.43 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.44 ± 0.02

равна 0.32 ± 0.07 , что на 60% меньше, чем в центральных областях скоплений галактик, и на 53% меньше, чем в пределах радиуса R_{sp} , или на 26% меньше, чем в пределах $(2-3)R/R_{200c}$. На рис. 7 можно заметить, что все бины по σ (фактически по массам) показывают одинаковое поведение вдоль радиуса при фиксированной M_* , кроме бина с $\sigma = (300-400) \text{ км с}^{-1}$ (рис. 7e). Для звездных масс $\lg M_* = [10.5; 11.0]$ (рис. 7d) в окрестности систем галактик доли QG близки к значениям поля. Для остальных звездных масс (рис. 7b, 7c и 7e) в среднем доля QG выше, чем в поле.

В работе [12] для 30 скоплений галактик с $0.15 < z < 0.30$ показано, что доля галактик с активным звездообразованием даже в пределах радиуса $3R_{200c}$ ниже, чем в поле, то есть доля QG выше. Согласно Wetzel et al. [52], за пределами вириального радиуса систем галактик (до $2.5R_{\text{vir}}$) по данным SDSS DR7 наблюдается избыток галактик с подавленным звездообразованием. Таким образом, в скоплениях галактик даже за пределами вириализованных областей доля QG остается выше, чем в поле.

В таблице 3 представлены результаты измерений доли QG вдоль нормированного радиуса скоплений. В первой колонке таблицы дано имя системы, в остальных — диапазоны изменения радиуса (R/R_{200c} и R_{sp}).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Наблюдательные данные указывают на то, что галактики в группах и скоплениях отличаются от галактик поля. Существующая корреляция между морфологией галактик и плотностью окружающей ее области переходит в скоплениях галактик в соотношение морфология—радиус, поскольку плотность уменьшается с ростом радиуса. В данной работе нами исследованы центральные области и ближайшие окрестности систем галактик (до $3R_{200c}$ в проекции). Для исследуемой выборки скоплений галактик нами определены: удельный темп звездообразования, доля галактик с подавленным звездообразованием, доля галактик ранних типов на «красной последовательности» в сравнении с данными для поля. Мы также нашли для каждой системы галактик звездную массу в пределах радиуса R_{200c} и сравнили ее с массой гало, измеренной по дисперсии лучевых скоростей. Характеристики 34 систем галактик изученной нами выборки приведены в данной работе, а результаты по шести системам опубликованы ранее [22].

Нами получены следующие результаты по всем 40 системам:

1. Для исследуемых систем галактик ($\lg M_{200c}/M_{\odot} = [13.7; 15.00]$) звездная масса галактик в пределах радиуса R_{200c} , определенная по данным SDSS DR10, соответствует ИК-светимости, измеренной по данным 2MASX: $M_{*,200c}/M_{\odot} \propto (L_{K,200c}/L_{\odot})^{1.010}$. Зависимость между звездной массой и динамической массой (гало) системы имеет вид

$$\begin{aligned} \lg M_{*,200c}/M_{\odot} &= (0.77 \pm 0.01) \\ &\times (\lg M_{200c}/M_{\odot} - 14.5) \\ &+ 12.60 \pm 0.10. \end{aligned}$$

2. В скоплениях галактик существует радиальный градиент $sSFR$. При этом доля QG ($\lg sSFR[\text{Гур}^{-1}] < -1.75$) максимальна в центральных областях и составляет в среднем по всем группам и скоплениям 0.81 ± 0.02 , за пределами R_{sp} (в пределах $(2-3)R/R_{200c}$) — 0.44 ± 0.03 . Это значение, полученное для окрестности скоплений галактик больше, чем в поле примерно на 27%. Самые большие вариации доли галактик с подавленным звездообразованием с изменением радиуса наблюдаются в системах галактик со звездными массами $\lg M_*/M_{\odot} = 9.5-10.0$.

3. «Красная последовательность» галактик ранних типов с небольшим разбросом — основная характеристика скоплений галактик, поскольку их вириализованные области состоят на 60–70% из ярких галактик ранних типов. Мы показываем, что $frac_E$ за пределами R_{sp} (до $(2-3)R/R_{200c}$) становится такой же, как в поле.

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>) и 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. A. Dressler, *Astrophys. J.* **236**, 351 (1980).
2. M. L. Balogh, I. K. Baldry, R. Nichol, et al., *Astrophys. J.* **615**, L101 (2004).
3. G. Kauffmann, C. D. M. White, T.M. Heckman, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **353**, 713 (2004).

4. S. Mahajan, G. A. Mamon, and S. Raychaudhury, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **418**, 2816 (2011).
5. J. D. Hernández-Fernández, J. D. Haines, A. Diaferio, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **438**, 2186 (2014).
6. A. Muzzin, R. F. J. van den Burg, S. L. McGee, et al., *Astrophys. J.* **796**, 65 (2014).
7. K. A. Oman, M. J. Hudson, and P. S. Behroozi, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **431**, 2307 (2013).
8. K. A. Oman and M. J. Hudson, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **463**, 3083 (2016).
9. J. Rhee, R. Smith, H. Choi, et al., arXiv:1704.04243 (2017).
10. M. L. Balogh, S. L. Morris, H. K. C. Yee, et al., *Astrophys. J.* **527**, 54 (1999).
11. M. L. Balogh, J. F. Navarro, and S. L. Morris, *Astrophys. J.* **540**, 113 (2000).
12. C. P. Haines, M. J. Pereira, G. P. Smith, et al., *Astrophys. J.* **775**, 126 (2015).
13. A. R. Wetzel, J. L. Tinker, and C. Conroy, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **424**, 232 (2012).
14. S. P. D. Gill, A. Knebe, and B. K. Gibson, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **356**, 1327 (2005).
15. B. R. McNamara and P. E. J. Nulsen, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **45**, 117 (2007).
16. K. Bekki, W. J. Couch, and Y. Shioya, *Astrophys. J.* **577**, 651 (2002).
17. J. E. Gunn and J. R. I. Gott, *Astrophys. J.* **176**, 1 (1972).
18. V. Quilis, B. Moore, and R. Bower, *Science* **288**, 1617 (2000).
19. A. I. Zabludoff and J. S. Mulchaey, *Astrophys. J.* **496**, 39 (1998).
20. D. Olave-Rojas, P. Cerulo, R. Demarco, et al., arXiv:1806.08435 (2018).
21. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **70**, 123 (2015).
22. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **73**, 267 (2018).
23. C. P. Ahn, R. Alexandroff, C. Allende Prieto, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **211**, 17 (2014).
24. T. H. Jarrett, T. Chester, R. Cutri, et al., *Astrophys. J.* **119**, 455 (1997).
25. F. G. Kopylova, *Astrophysical Bulletin* **68**, 253 (2013).
26. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astronomy Letters* **39**, 3 (2013).
27. A. I. Kopylov and F. G. Kopylova, *Astrophysical Bulletin* **70**, 243 (2015).
28. G. A. Mamon, T. Sanchis, E. Salvador-Sole, and M.J. Solanes, *Astron. and Astrophys.* **414**, 445 (2004).
29. V. R. Eke, S. Cole, and C. S. Frenk, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **282**, 263 (1996).
30. S. More, B. Diemer, and A. V. Kravtsov, *Astrophys. J.* **810**, 36 (2015).
31. B. Tully, *Astron. J.* **149**, 54 (2015).
32. S. More, H. Miyatake, M. Takada, et al., *Astrophys. J.* **825**, 39 (2016).
33. C. Chang, E. Baxter, B. Jain, et al., *Astrophys. J.* **864**, 83 (2018).
34. A. Raichoor and S. Andreon *Astron. and Astrophys.* **570**, A123 (2014).
35. M. D. Gladders, O. Lopez-Cruz, H. K. C. Yee, and T. Kodama, *Astrophys. J.* **501**, 571 (1998).
36. B. Garilli, D. Bottini, D. Maccagni, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **105**, 191 (1996).
37. M. Scodeggio, *Astron. J.* **121**, 2413 (2001).
38. O. López-Cruz, W. A. Barkhouse, and H. K. C. Yee, *Astrophys. J.* **614**, 679 (2004).
39. A. Aragon-Salamanca, R. S. Ellis, and R. M. Sharples, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **248**, 128 (1991).
40. S. A. Stanford, P. R. M. Eisenhardt, and M. Dickinson, *Astrophys. J.* **492**, 461 (1998).
41. P. G. van Dokkum, M. Franx, D. Fabricant, et al., *Astrophys. J.* **541**, 95 (2000).
42. J. P. Blakeslee, *Astrophys. J.* **596L**, 143 (2003).
43. S. Andreon and M. Huertas-Company, *Astron. and Astrophys.* **526**, A11 (2011).
44. G. A. Mamon, A. Biviano, and G. Murante, *Astron. and Astrophys.* **520**, A30 (2010).
45. S. Barsanti, M. S. Owers, S. Brough, et al., arXiv:1803.05076 (2018).
46. C. Conroy, J. E. Gunn, and M. White, *Astrophys. J.* **699**, 486 (2009).
47. M. Bernardi, A. Meert, R. K. Sheth, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **436**, 697 (2013).
48. Y.-T. Lin, J. J. Mohr, and S. A. Stanford, *Astrophys. J.* **610**, 745 (2004).
49. M. Ramella, W. Boschin, M. Geller, et al., *Astron. J.* **128**, 2022 (2004).
50. M. A. Strauss, D. H. Weinberg, R. H. Lupton, et al., *Astron. J.* **124**, 1810 (2002).
51. R. Feldmann, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **470**, L59 (2017).
52. A. R. Wetzel, J. L. Tinker, C. Conroy, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **439**, 2687 (2014).

Galaxy Clusters and Their Outskirts: the “Red Sequence”, Star Formation Rate, Stellar Mass

F. G. Kopylova and A. I. Kopylov

We study the nearest outskirts ($R < 3R_{200c}$) of 40 groups and clusters of galaxies of the local Universe ($0.02 < z < 0.045$ and $300 \text{ km s}^{-1} < \sigma < 950 \text{ km s}^{-1}$). Using the SDSSDR10 catalog data, we determined the stellar mass of galaxy clusters corresponding to K_s -luminosity (which we determined earlier based on the 2MASX catalog data) ($M_*/M_\odot \propto (L_K/L_\odot)^{1.010 \pm 0.004}$ ($M_K < -21^m5$, $R < R_{200c}$)). We also found the dependence of the galaxy cluster stellar mass on halo mass: ($M_*/M_\odot \propto (M_{200c}/M_\odot)^{0.77 \pm 0.01}$). Our results show that the fraction of galaxies with quenched star formation ($M_K < -21^m5$) is maximal in the central regions of the galaxy clusters and equals, on the average, 0.81 ± 0.02 ; it decreases to 0.44 ± 0.02 outside of the projected radius R_{sp} ($2 < R/R_{200c} < 3$), which we found from the observed profile, but still remains higher than that in the field by 27%. The fraction of early-type “red sequence” galaxies decreases from 0.54 ± 0.02 in the center to 0.24 ± 0.01 beyond R_{sp} , reaching its field value.

Keywords: *galaxies: clusters—galaxies: star formation—galaxies: evolution*