

УДК 524.74-52/54

## ОКРЕСТНОСТИ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК А 1139, А 1314, А 1656, А 2040, А 2052, А 2107: ТЕМП ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

© 2018 Ф. Г. Копылова\*, А. И. Копылов

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 19 декабря 2017 года; принята в печать 6 июня 2018 года

Мы исследуем изменение доли галактик с подавленным звездообразованием ( $M_K < -21^m5$ ) и доли галактик ранних типов ( $frac_E$ ) «красной последовательности» вдоль радиуса в проекции шести скоплений галактик: скопления Coma (А 1656), А 1139, А 1314 из области сверхскопления Leo ( $z \approx 0.037$ ) и А 2040, А 2052, А 2107 из области сверхскопления Hercules ( $z \approx 0.036$ ). Исходя из данных каталога SDSS (DR10),  $frac_E$  максимальна в центральных областях скоплений галактик и равна в среднем  $0.62 \pm 0.03$ , а в интервале  $2-3R/R_{200c}$  и за пределами найденного нами по наблюдаемому профилю радиуса  $R_{sp} \approx 0.95 \pm 0.04 R_{200m}$   $frac_E$  минимальна и равна  $0.25 \pm 0.02$ . Это значение совпадает с оценкой  $frac_E = 0.24 \pm 0.01$ , полученной нами для поля, расположенного между сверхскоплениями Hercules и Leo на тех же  $z$ . Мы показываем, что доля галактик с подавленным звездообразованием непрерывно уменьшается (особенно значительно в интервале звездных масс галактик  $\lg M_* [M_\odot] = 9.5-10$ ) с ростом радиуса скоплений от  $0.87 \pm 0.02$  в центральных областях до  $0.43 \pm 0.03$  в интервале  $2-3 R/R_{200c}$  и за пределами  $R_{sp}$ , но остается больше, чем по полю, в среднем на 26%. Мы обнаружили, что галактики с активным звездообразованием имеют средние расстояния от центра  $1.5-2.5 R/R_{200c}$  и дисперсии лучевых скоростей больше, чем галактики с подавленным звездообразованием.

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

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Скопления галактик — динамические объекты, которые растут, аккрецируя галактики и группы галактик из окружающего пространства вдоль филаментов. В результате непрерывного роста в них сосредоточены вириализованная компонента, состоящая в основном из старых галактик ранних типов, и популяции галактик, которые недавно аккрецировали извне. В плотной внутренней среде скоплений галактики приобретают свойства, отличающиеся от свойств галактик поля — в них подавляется звездообразование. В этой среде действуют различные физические механизмы, приводящие к уменьшению газа в галактиках и в конечном итоге к уменьшению образования звезд: приливные взаимодействия между галактиками или между галактиками и потенциальной ямой скопления; столкновения галактик на высоких скоростях; обдирание газа в результате лобового давления межгалактической среды; тепловое испарение (подробнее см. обзор [1]). Причем уменьшение темпа образования звезд в богатых скоплениях наблюдается в галактиках всех типов в отличие от галактик поля [2].

Ограничение темпа образования звезд наблюдается также вдоль радиуса скоплений по направлению к центру (для выборки скоплений галактик с  $0.19 < z < 0.55$  [3], скоплений галактик, ярких в рентгеновской области с  $0.15 < z < 0.30$  [4], каталога групп галактик из SDSS DR7 [5]). По наблюдениям 30 массивных скоплений галактик ( $0.15 < z < 0.30$ ) найдено [4], что доля галактик со звездообразованием ниже, чем в поле, даже на расстоянии  $3R_{200}$  от центра. В работе делается вывод, что для объяснения этого явления можно предположить, что галактики со звездообразованием должны в течении примерно 0.5–2 Gyr проходить через вириализованную область скопления, прежде чем вылететь за ее пределы.

Модельные расчеты ( $N$ -тел) [3] градиента звездообразования вдоль радиуса скоплений галактик показали, что значительная доля галактик, находящихся за пределами вириального радиуса скоплений (до  $2R_{vir}$ ), побывала в их центральных областях. Также в результате модельных расчетов ( $N$ -тел) свойств галактик на периферии скоплений [6] было обнаружено, что таких («splashback») галактик около 50% между  $1-2 R_{vir}$ . Они имеют в два раза меньшие скорости, чем галактики,

\*E-mail: flera@sao.ru

впервые попадающие в вириализованную область скоплений. При прохождении через вириализованную часть скопления «splashback»-галактики теряют около 40% своей массы. Правда, согласно модельным расчетам излучающей в рентгеновской области внутренней среды скоплений галактик [7], показано, что спиральные галактики теряют газ еще до вхождения в вириализованную область и это, естественно, ведет к уменьшению звездообразования в них.

В работе [8] при изучении скорости звездообразования в близких скоплениях ( $0.04 < z < 0.07$ ) найдена популяция галактик (редко встречающихся в поле), занимающих промежуточное положение между галактиками со звездообразованием и спокойными галактиками без звездообразования.

Для лучшего понимания роли ближайшего окружения галактики в ее эволюции обычно рассматривают положение галактики на фазовой диаграмме. Фазовая диаграмма в проекции скоплений галактик отражает зависимость расстояния галактики от выбранного центра в проекции от ее как правило нормированной лучевой скорости. Диаграмма позволяет изучить, например, градиент звездообразования в скоплениях в связи с расположением галактик на ней, а также в связи с принадлежностью галактик к «старому» населению скопления галактик или к галактикам, только что упавшим на нее, или к галактикам, уже вылетевшим из вириализованной области («splashback»-галактикам) (см., например, [9–14]).

Целью данной работы является определение динамических характеристик близких скоплений галактик A 1139 и A 1314 (из области сверхскопления Leo), A 2052, A 2107 и A 2040 (из сверхскопления Hercules), A 1656 и их периферии, описываемой разными радиусами, а также проведение исследования в них удельного темпа звездообразования (specific star formation rate —  $sSFR$ ) и доли галактик, не показывающих звездообразования, вдоль нормированного радиуса и в зависимости от звездной массы.

Работа выполнена нами с использованием данных каталога SDSS (Sloan Digital Sky Survey Data Release 10 [15]), данных каталога 2MASS XSC (Two-Micron ALL-Sky Survey Extended Source Catalog [16]) и NED (NASA Extragalactic Database).

Статья организована следующим образом. Во втором разделе описана процедура измерения динамических характеристик скоплений галактик и определения периферии. В третьем разделе построена последовательность цвет–величина галактик ранних типов систем галактик и определена доля галактик ранних типов. В четвертом разделе

приведены распределения удельного темпа звездообразования скоплений при фиксировании звездной массы галактик и без него. Показан градиент темпа звездообразования вдоль нормированного радиуса систем при фиксировании звездной массы галактик и без него и приведено сравнение с темпом звездообразования в поле. 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. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

Полнота изучаемых нами систем галактик определяется полнотой спектральных данных каталога SDSS. При соблюдении условий  $r_{\text{Pet}} < 17^{\text{m}}77$  и  $\langle \mu_r \rangle < 24^{\text{m}}5/\square''$  (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% [17], а для ярких галактик — 95%.

Чтобы повысить спектральную полноту ярких галактик, мы добавили из базы данных NED отсутствующие в SDSS измерения лучевых скоростей ярких галактик (от 1 до 10 для разных систем галактик). Если таких измерений не было в NED, мы отобрали яркие галактики ранних типов «красной последовательности» (КП) [18] в качестве вероятных членов скоплений (от 1 до 5 галактик) по диаграммам цвет–величина ( $u - r, r; g - r, r; r - i, r$ ) [19].

Измерение динамических характеристик систем галактик: лучевой скорости, дисперсии лучевой скорости, массы — выполнено для области радиусом  $R_{200c}$ . Радиус  $R_{200c}$  — это радиус сферы, в пределах которой плотность в системе превышает критическую плотность Вселенной в 200 раз, и его можно оценить по формуле  $R_{200c} = \sqrt{3}\sigma/10H(z)$  Мпк [20]. Радиус  $R_{200m}$  (часто используется в модельных расчетах) — радиус сферы, в пределах которой плотность в системе превышает среднюю плотность Вселенной в 200 раз. Тогда, предполагая, что в пределах этого радиуса скопление вириализовано  $M_{200} \sim M_{\text{vir}}$ , находим массу  $M_{200} = 3G^{-1}R_{200c}^2\sigma_{200}^2$ . То есть измеряемая нами масса скопления  $M_{200} \propto \sigma^3$ . Массу  $M_{200}$ , заключенную в сферическом гало радиусом  $R_{200c}$ , можно измерить непосредственно через критическую плотность, которая зависит от  $z$ :  $M_{200} = \frac{4}{3}\pi R_{200c}^3 200\rho_c$ . В принятой нами космологической модели система должна быть вириализованной и для большего радиуса  $R_{100c} \approx 1.3R_{200c}$  [21].

Соотношения между массой систем галактик  $M_{200}$ , определенной по дисперсии лучевых скоростей, и  $K$ -светимостью, а также соотношения масса—светимость и другие параметры (по данным SDSS DR7) для исследуемых скоплений галактик представлены нами в работах [22–24].

Чтобы детальнее охарактеризовать структуру и кинематику A 2040 (в качестве примера), а также его ближайших окрестностей, на рис. 1 представлены: 1) отклонение лучевых скоростей галактик—членов скопления и галактик, отнесенных к фону, от средней лучевой скорости в зависимости от квадрата радиуса (расстояния от центра скопления) (верхний левый рисунок); 2) интегральное распределение числа галактик в зависимости от квадрата радиуса (нижний левый рисунок); 3) расположение галактик в плоскости неба в экваториальных координатах (верхний правый рисунок); 4) гистограмма распределения лучевых скоростей всех галактик в пределах радиуса  $R_{200c}$  (нижний правый рисунок).

На нижнем левом рисунке приведен профиль скопления в проекции (интегральное распределение числа галактик в зависимости от квадрата радиуса от центра), который показывает, что скопление имеет сначала крутой рост числа галактик, затем наблюдается линейный рост числа галактик (прямая линия на рисунке), расположенных за пределами вириализованной области [24]. На рисунке показаны штриховой линией радиус вириализованной области  $R_{200c}$  и штрихпунктирной линией радиус, ранее нами обозначенный как  $R_h$ , за которым крутой рост членов скопления заканчивается и начинается линейный рост. На этом рисунке ниже также показано распределение галактик ранних типов ярче  $M_K = -21^m$ , по которым этот радиус уточнен. Предполагалось [24], что это радиус оболочки (гало) вокруг вириализованной области. Но термин гало обычно используется для обозначения темного гало скопления, поэтому мы изменили обозначение  $R_h$ , принятое нами в [24]. Кроме того, при более детальном рассмотрении оказалось, что для массивных скоплений галактик типа A 1656, A 1795 надо брать 3–4  $R_{200c}$ , чтобы найти точку выхода распределения на линейный участок (радиус  $R_h$ ), то есть вдвое больше, чем было представлено в работе [24]. Для массивных скоплений галактик мы переопределили радиус  $R_h$ . Поскольку  $R_{vir} > R_{200c}$ , то можно было бы предположить, что найденный нами радиус  $R_h$  — это радиус вириализованной области скопления  $R_{vir}$ . Мы обнаружили, что для исследуемых скоплений галактик  $R_h$  изменяется от  $1.4R_{200c}$  до  $1.84R_{200c}$ ; он равен в среднем  $1.55R_{200c}$ . Радиус  $R_h$  больше  $R_{100c}$  ( $R_{100c} \approx 1.3R_{200c}$ ) в среднем на 14%, то есть найденный нами наблюдаемый радиус  $R_h$  — это вероятнее всего «splashback»-радиус  $R_{sp}$  системы галактик (радиус апоцентра орбит галактик), на

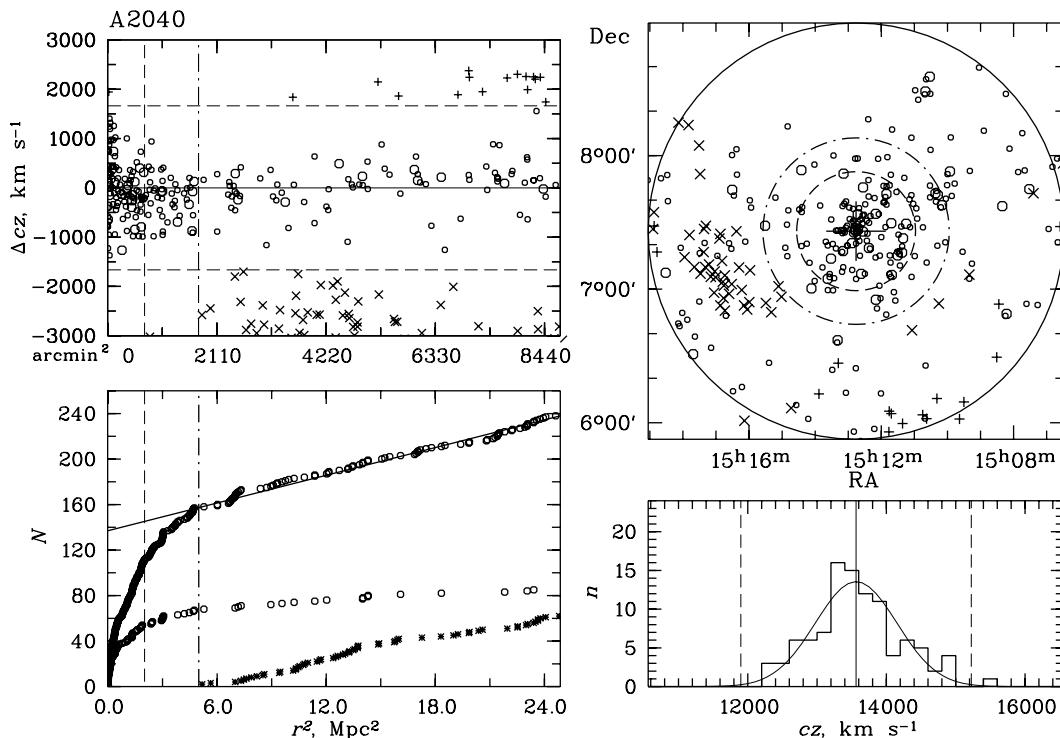
который вылетают галактики из вириализованной области после первого прохождения через центр скопления. То есть радиус  $R_{sp}$  отделяет галактики, которые впервые падают на скопление, от коллапсирующих галактик, которые уже участвуют в установлении вириального равновесия.

Согласно модельным расчетам ( $N$ -тел) [25], подобный максимальный радиус, на который «отскакивают» галактики, заключен в интервале  $1–2.5R_{vir}$ . Модельные расчеты для темного гало показали, что для быстро аккрецирующих гало радиус скопления, после которого происходит резкое увеличение крутизны поверхностной плотности гало, равен  $R_{sp} = 0.8–1.0R_{200m}$  [26]. У медленно аккрецирующих гало  $R_{sp} \sim 1.5R_{200m}$ . Радиус  $R_{sp}$ , найденный для гало, возможно, соответствует  $R_{sp}$  для галактик. Результаты наблюдений групп и скоплений галактик дали следующие значения радиусов:  $R_{sp} \approx 1.33R_{200c}$  [27]; увеличение крутизны профиля поверхностной плотности галактик в скоплениях (данные SDSS DR8) начинается с радиуса  $R_{sp} = 1.43$  Мпк [28]; для скоплений галактик (выборка DES Y1)  $R_{sp} = 1.66 \pm 0.08$  Мпк [29]. Полученный нами радиус  $R_{sp}$  по интегральному распределению числа галактик в зависимости от квадрата расстояния до центра скопления равен в среднем для шести исследуемых систем  $1.55 \pm 0.06 R_{200c}$ , что составляет  $0.95 \pm 0.04 R_{200m}$  (если учесть  $4R_{200c} \approx 2.5R_{200m}$ ). Это значение больше, чем получено в работе [27], но согласуется с результатами модельных расчетов (см., например, [26]).

Результаты измерений характеристик исследуемых в данной работе скоплений галактик для области радиусом  $R_{200}$  представлены в столбцах таблицы 1: (1) имя скопления галактик; (2) дисперсия лучевых скоростей с космологической поправкой  $(1+z)^{-1}$ ; (3) радиус  $R_{200c}$  в Мпк; (4) и (5) — радиус  $R_{200m}$  в Мпк и  $R_{sp}$  в Мпк; (6) количество галактик, которые участвуют в определении красного смещения и дисперсии лучевых скоростей; (7) измеренное красное смещение; (8) масса  $M_{200c}$ , измеренная по  $\rho_c$  с ошибкой, соответствующей ошибке измерения  $\sigma$ .

### 3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ЦВЕТ–ВЕЛИЧИНА («КРАСНАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ») СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК В ФАЗОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Основным населением скоплений галактик на малых красных смещениях  $0 < z < 0.1$  являются галактики ранних типов (см., например, [30]), которые располагаются в основном в центральных вириализованных областях и являются самыми яркими членами систем. Главным свойством галактик ранних типов является зависимость цвета

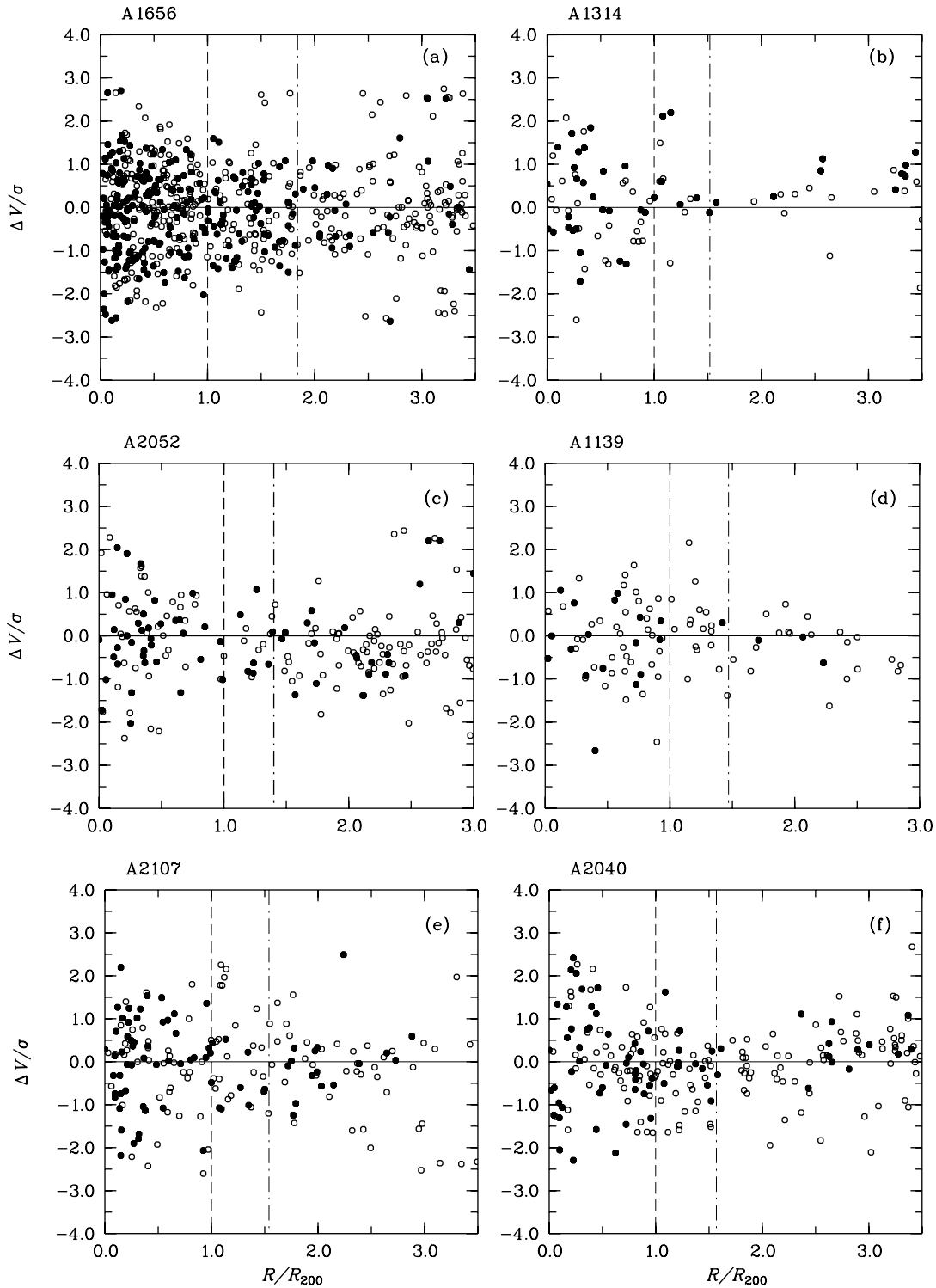


**Рис. 1.** Распределение галактик в скоплении A2040. На левой верхней панели показано отклонение лучевых скоростей галактик от средней лучевой скорости скопления, определенной по галактикам в пределах радиуса  $R_{200c}$ . Горизонтальные штриховые линии соответствуют отклонениям  $\pm 2.7\sigma$ , вертикальной штриховой линией отмечен радиус  $R_{200c}$ . Кружками большего размера отмечены галактики ярче  $M_K^* + 1 = -24^m$ , плюсами — галактики заднего фона, крестиками — галактики переднего фона. На левой нижней панели дано интегральное распределение полного числа галактик (верхняя кривая) в зависимости от квадрата расстояния от центра группы. Нижняя кривая соответствует галактикам ранних типов ярче  $M_K < -21^m.5$ . Кружки соответствуют галактикам, обозначенным кружками на левом верхнем рисунке, звездочки — галактикам фона. Штрихпунктирной линией показан «splashback»-радиус  $R_{sp}$ . На правой верхней панели показано распределение на небе в экваториальной системе координат галактик, которые представлены на верхнем левом рисунке (обозначения те же). Кругами выделены области с радиусом  $R_{200c}$  (штрихи) и радиусом  $R_{sp}$  (штрихпунктир). Область исследования ограничена кругом с радиусом, равным  $3.5R_{200c}$  (сплошная линия). Большим крестом отмечен центр скопления. На правой нижней панели представлено распределение по лучевым скоростям всех галактик в пределах радиуса  $R_{200c}$  (сплошной линией для членов скопления показана гауссиана, соответствующая дисперсии скоростей группы). Сплошная вертикальная линия указывает среднюю лучевую скорость группы, штриховые линии соответствуют отклонениям  $\pm 2.7\sigma$ .

галактик от величины (чем ярче галактика, тем она краснее), которая позволяет говорить о так называемой «красной последовательности» (КП) скопления галактик с небольшим разбросом — универсальной [31] последовательности по форме и по дисперсии протяженностью по крайней мере  $8^m$  (см., например, [18]). Свойства КП определяют и основные области ее применения: отождествление скопления галактик и определение их расстояний [32]. Галактики ранних типов в вириализованных областях скопления составляют среди галактик ярче  $M_K = 23^m.3$  примерно 60–70% (см., например, [19]). В нашей работе мы использовали

галактики КП для того, чтобы лучше изучить периферию исследуемых скопления ( $R < 3R_{200c}$ ).

На рис. 2 показаны фазовые диаграммы скопления галактик в проекции, где  $\Delta V/\sigma$  — отношение разности лучевых скоростей галактик и средней лучевой скорости скопления к дисперсии лучевых скоростей,  $R/R_{200c}$  — расстояние галактики от выбранного центра скопления, нормированное к радиусу  $R_{200c}$ . В качестве центра системы галактик нами взяты координаты самой яркой галактики (кроме скопления A1656 — в нем мы взяли центроид галактик в пределах радиуса  $R_{200c}$ , который оказался близок к центру излучения в рентгеновской области). На рисунках вертикальными линиями показаны радиусы  $R_{200c}$  и  $R_{sp}$ . Отбор членов



**Рис. 2.** Фазовая диаграмма — скорость в зависимости от радиуса скоплений галактик A 1656, A 1314, A 2052, A 1139, A 2107, A 2040. Скорость — 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  $R_{200c}$ . Заполненными кружками показаны галактики ранних типов КП. Штриховой линией показан радиус  $R_{200c}$ , штрихпунктирной — радиус  $R_{sp}$ . Галактики отобраны в пределах  $2.7\sigma$ .

Таблица 1. Динамические характеристики скоплений галактик

Cluster	$\sigma$ , $\text{km s}^{-1}$	$R_{200c}$ , Мпс	$R_{200m}$ , Мпс	$R_{sp}$ , Мпс	$N_z$	$z_h$	$M_{200c}$ , $10^{14} M_{\odot}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
A 1656	$921 \pm 34$	2.255	3.62	4.17	717	0.023250	$13.33 \pm 1.48$
A 1314	$492 \pm 53$	1.182	1.89	1.82	85	0.032443	$1.94 \pm 0.72$
A 2052	$623 \pm 58$	1.517	2.43	2.12	116	0.034726	$4.10 \pm 1.15$
A 1139	$459 \pm 51$	1.115	1.79	1.64	80	0.039327	$1.64 \pm 0.55$
A 2107	$581 \pm 55$	1.411	2.26	2.17	113	0.041335	$3.32 \pm 0.95$
A 2040	$589 \pm 59$	1.427	2.29	2.23	100	0.045242	$3.45 \pm 1.04$

скоплений галактик в пределах  $2.7\sigma$  показан для скопления A 2040 в качестве примера на рис. 1, а на этих диаграммах приведены только отобранные галактики.

Галактики ранних типов выбраны по следующим критериям (SDSS, фильтр  $r$ ):  $fracDeV \geq 0.8$ , где  $fracDeV$  — название параметра галактики в каталоге, он характеризует вклад балджа в профиль поверхностной яркости галактики;  $r_{90}/r_{50} \geq 2.6$ , где индекс концентрации  $c = r_{90}/r_{50}$  есть отношение радиусов, ограничивающих 90% и 50% потоков Петросяна. Кроме того, мы сделали ограничение по цвету  $\Delta(u - r) > -0.2$ , которое следует из полученной нами зависимости цвета  $u - r$  от петросяновской звездной величины для скоплений, например, системы Нег:  $u - r = -0.078 r_{Pet} + 3.81$  с  $2\sigma = -0.2$ . КП скоплений галактик, составленные из выбранных галактик ранних типов, удовлетворяющие условию  $-0.075 < g - r < 0.075$ , приведены на рис. 3. На этом рисунке и на фазовых диаграммах эти галактики показаны заполненными кружками.

Можно отметить, что основная масса галактик КП расположена в центральных областях скоплений, в пределах найденного нами радиуса  $R_{sp}$ . Но в тоже время часть галактик находится и на расстоянии  $3R_{200c}$ . Мы определили, что доля галактик ранних типов КП падает в два раза с  $0.51 \pm 0.02$  в пределах  $R < 1R/R_{200c}$  до  $0.25 \pm 0.02$  в пределах  $2R/R_{200c} < R < 3R/R_{200c}$ . За пределами радиуса  $R_{sp}$  (равного в среднем  $1.55 \pm 0.06R_{200c}$ )  $fracE$  составляет в среднем также  $0.25 \pm 0.03$ . Результаты исследования доли галактик ранних типов вдоль нормированного радиуса представлены в таблице 2.

Для того чтобы сравнить результаты, полученные для скоплений галактик — высокоплотных областей — с результатами для низкоплотных областей, мы выбрали две области, свободные от

скоплений галактик (практически поля), и по данным SDSS DR10 нашли долю галактик ранних типов в ней. Выбранные нами поля находятся между сверхскоплениями Hercules и Leo: первое поле имеет координаты центра  $14^h5$ ,  $35^\circ$ , радиус 300 дугowych минут, диапазон красных смещений  $0.030 < z < 0.045$ , у второго поля при те же красных смещениях и радиусе координаты центра  $13^h5$ ,  $5^\circ$ . Галактики ранних типов отобраны по таким же критериям:  $fracDeV \geq 0.8$ ,  $r_{90}/r_{50} \geq 2.6$ ,  $(g - r) > 0.65$ . Измерение  $K_s$ -светимостей описано в работах [22, 23]. Всего в первом поле 219 галактик с  $M_K < -21^m5$ , из них 49 — галактики ранних типов, то есть доля галактик ранних типов равна  $0.22 \pm 0.04$ . Во втором поле найдено 147 галактик, из них 40 — галактики ранних типов, и их доля равна  $0.27 \pm 0.05$ . В среднем по двум полям доля галактик ранних типов равна  $0.24 \pm 0.01$ . Как сказано выше, аналогичные средние доли, равные  $0.25 \pm 0.02$  и  $0.25 \pm 0.03$ , наблюдаются в скоплениях галактик в ближайшей окрестности  $2 < R/R_{200c} < 3$  и  $R > R_{sp}$  (таблица 2). В пределах радиуса  $1 < R/R_{200c} < 2$  средняя доля галактик ранних типов выше, чем в поле —  $0.36 \pm 0.05$ . Таким образом, мы показали, что в пределах определенного из наблюдений радиуса  $R < R_{sp}$  заключена основная часть галактик ранних типов скопления: часть из них уже вириализована, а часть (согласно, например, модельным расчетам [14]) вылетела из вириализованной области и, достигнув найденного нами апоцентра орбит  $R_{sp}$ , вновь в нее вернется.

#### 4. УДЕЛЬНЫЙ ТЕМП ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В СКОПЛЕНИЯХ ГАЛАКТИК

Первые работы по определению темпа звездообразования в галактиках выполнены в публи-

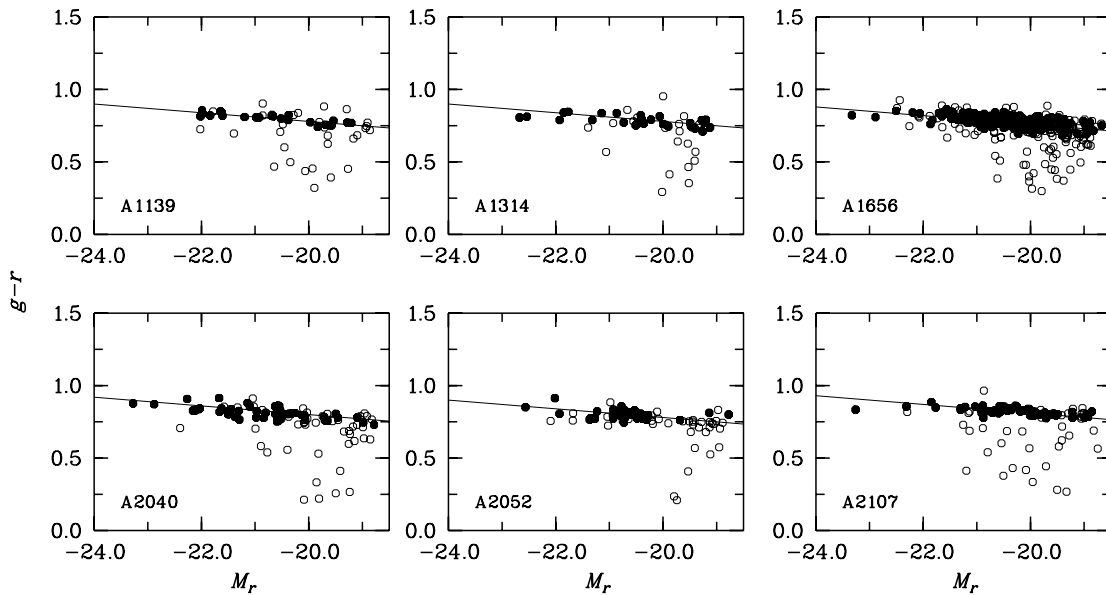


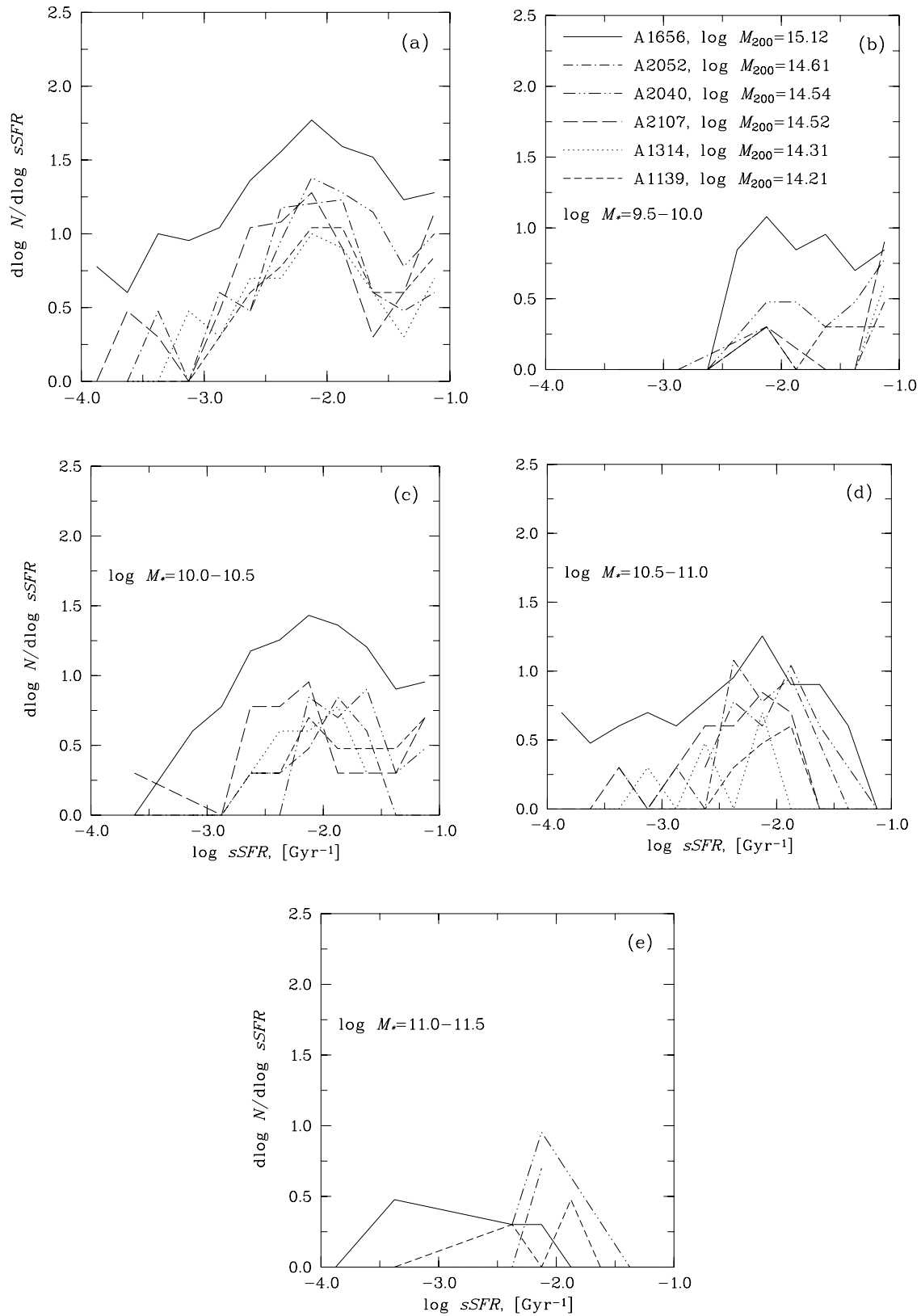
Рис. 3. Диаграммы цвет—абсолютная звездная величина ( $g-r$ ,  $M_r$ ). КП скопления галактик показана заполненными кружками.

кациях [33, 34]. Удельный темп звездообразования ( $sSFR$ ) в галактике определяется через интегральный темп звездообразования, поделенный на ее звездную массу,  $sSFR = SFR/M_*$ . В каталоге SDSS (DR10) приведены результаты определения звездных масс галактик и удельного темпа звездообразования, которые получены подгонкой моделей FSPS [35] к SDSS-фотометрии в фильтрах  $u, g, r, i, z$ . Используются исправленные за поглощение модельные величины и версия «early-star formation with dust.»

Исследуемые нами скопления галактик имеют диапазон масс  $\lg M_{200c}[M_\odot] = 14.21-15.12$ . На рис. 4 для них приведены распределения  $sSFR$  для всех галактик (рис. 4а) и отдельно для диапазона масс звезд (в  $M_\odot$ ) в галактиках:  $\lg M_* = 9.5-10.0$ ,  $10.0-10.5$ ,  $10.5-11.0$ ,  $11.0-11.5$ . Распределение имеет длинный хвост с левой стороны. Распределение каждого скопления показано индивидуальной линией. В распределении обычно находят минимум, отделяющий галактики с активным звездообразованием, от галактик, у которых звездообразование подавлено (quenched galaxies). Четкая бимодальность распределения и минимум, соответствующий  $\lg sSFR[\text{yr}^{-1}] = -11$ , найдены, например, в работе [5], где  $sSFR$  определяли по эмиссии в линии  $\text{H}\alpha$  и по скачку на  $4000 \text{ \AA}$ . На рис. 1 работы можно отметить, что для диапазона масс гало  $\lg M_{\text{halo}}[M_\odot] = 14.3-15.0$  (как в исследуемых нами скоплениях галактик) минимум в распределении определен нечетко, хотя пик ярко выражен. В нашем случае на рис. 4а видно, что минимуму у трех

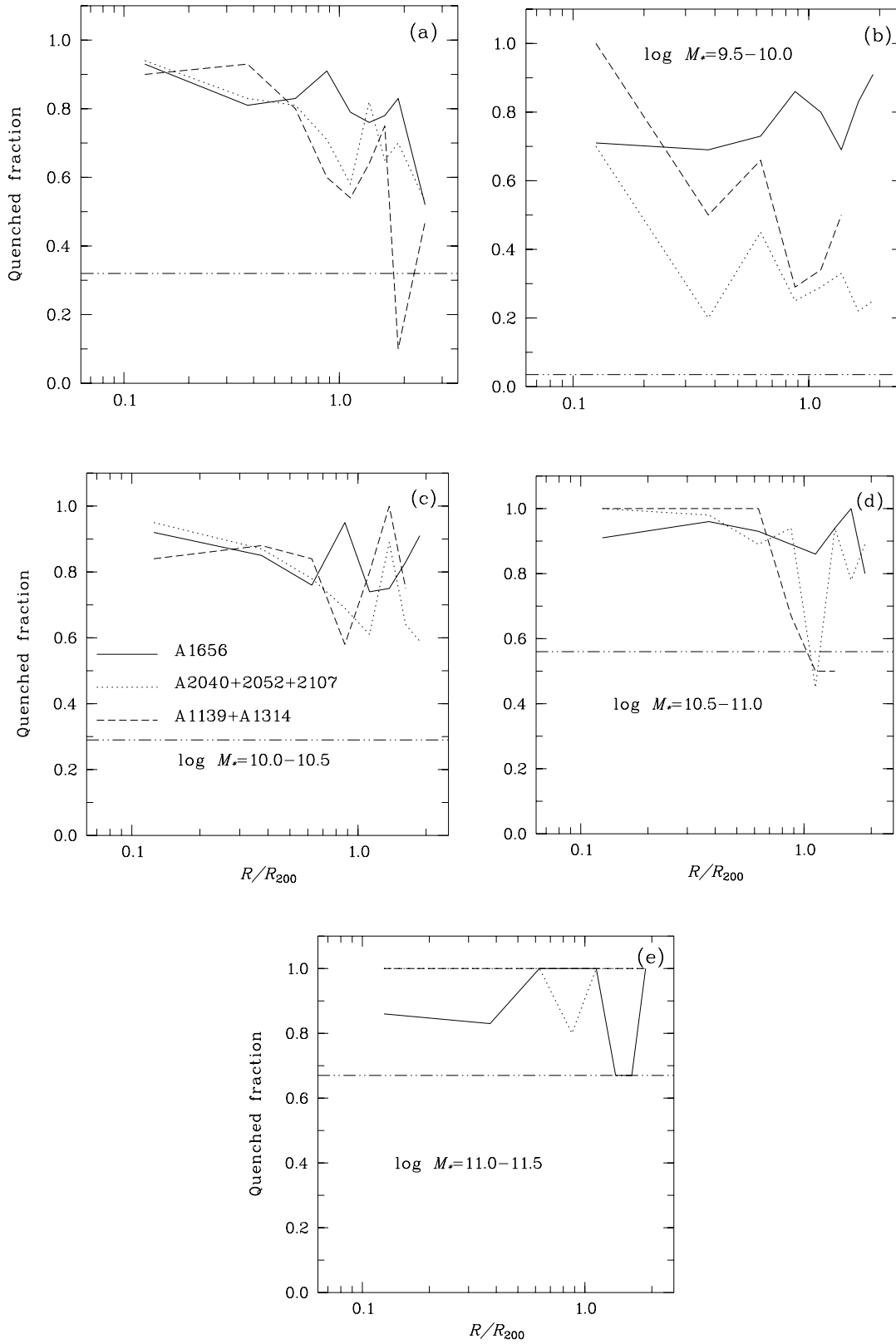
исследуемых скоплениях галактик (A 1314, A 1656, A 2107) соответствует  $\lg sSFR[\text{Gyr}^{-1}] \approx -1.5$ , или  $\lg sSFR[\text{yr}^{-1}] \approx -10.5$ , а у остальных трех систем минимум достигается на меньших значениях, поэтому мы взяли общий минимум для всех систем, равный  $\lg sSFR[\text{Gyr}^{-1}] = -1.75$ . А значение  $\lg sSFR[\text{Gyr}^{-1}] \sim -2.2$  соответствует максимуму. Wetzel et al. в работе [5] определили, что для систем галактик из SDSS DR7 доля галактик с подавленным звездообразованием растет со звездной массой галактик. Зависимость распределения  $sSFR$  от звездной массы галактик  $\lg M_*$  показана нами на рис. 4б–4е. Можно отметить, что у галактик со звездными массами  $\lg M_* = 11.0-11.5$  (рис. 4д) звездообразование подавлено, так же, как и в диапазоне  $\lg M_* = 10.5-11.0$ . В диапазоне масс  $\lg M_* = 9.5-10.0$  только в скоплениях A 1656 и A 1139 доля галактик с подавленным звездообразованием превышает долю «активных», в остальных скоплениях доля «активных» галактик значительна.

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, [4]). На рис. 5 показаны доли quenched-галактик в зависимости от радиуса скопления в проекции, нормированного на радиус  $R_{200c}$ . Скопления галактик сгруппированы в бины в соответствии с массой  $M_{200c}$ : A 2040, A 2052 и A 2107, A 1139 и A 1314, а скопление A 1656, как самое богатое, рассмотрено индивидуально. На



**Рис. 4.** Распределение галактик по удельному темпу звездообразования ( $sSFR$ ): (a) для всех скопления галактик; (b), (c), (d) и (e) — при разбиении галактик на бины по звездной массе. Массы  $M_{200c}$  и  $M_*$  представлены в  $M_{\odot}$ .

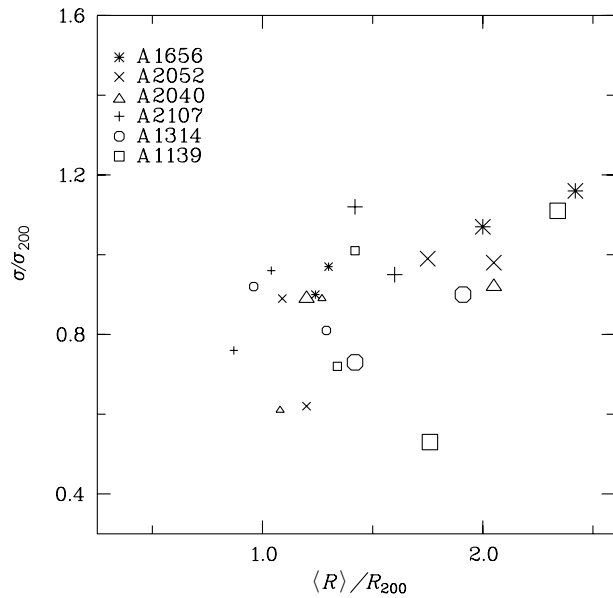




**Рис. 5.** Доля галактик с подавленным звездообразованием ( $\lg sSFR[\text{Gyr}^{-1}] < -1.75$ ) в зависимости от расстояния до центра скопления в проекции. Скопления сгруппированы по массам. На панели (a) показана доля для всех скоплений, на панелях (b), (c), (d) и (e) — с разбиением галактик этих скоплений на бины по звездной массе. На каждом рисунке штрихпунктирной линией приведена доля для галактик поля. Массы  $M_{200}$  и  $M_*$  представлены в  $M_\odot$ .

рис. 5а приведена суммарная доля галактик с подавленным звездообразованием в рассмотренных скоплениях для всех звездных масс, а на рис. 5б–5е эта доля галактик для каждого диапазона звездных масс показана отдельно. Суммарная доля галактик с подавленным звездообразованием изменяется от среднего значения  $0.87 \pm 0.02$  в пределах  $0-0.25 R/R_{200c}$  до  $0.43 \pm 0.03$  в пределах  $2-3 R/R_{200c}$ . Таким образом, доля галактик с подавленным звездообразованием уменьшается к  $3R/R_{200c}$  на 51%. Самые значительные изменения доли quenched-галактик видны на рис. 5б у маломассивных галактик со звездной массой  $\lg M_*[M_\odot] = 9.5-10.0$ , кроме скопления А 1656, системы с массой  $M_{200c}[M_\odot] > 10^{15}$ . Практически у всех галактик со звездными массами  $\lg M_*[M_\odot] = 10.5-11.5$  (рис. 5д и особенно рис. 5е) звездообразование подавлено. В последний бин попадает мало галактик, поэтому кривые плохо прорисованы. Надо отметить, что для части галактик в центральных областях (4% в А 1656 и 2% — в остальных), имеющих в SDSS DR10 спектральную информацию, измерений темпа звездообразования нет. Нами найдена средняя (по двум полям) доля галактик с подавленным звездообразованием, для которых выполняется условие  $\lg sSFR[\text{Gyr}^{-1}] < -1.75$ . Она равна  $0.32 \pm 0.07$ , что на 63% меньше, чем в центральных областях скоплений галактик и на 55% меньше, чем в пределах радиуса  $R_{sp}$  или на 26% меньше, чем в пределах  $2-3 R/R_{200c}$ .

В работе [4] для 30 скоплений галактик с  $0.15 < z < 0.30$  показано, что доля галактик со звездообразованием даже в пределах радиуса  $3R_{200c}$  ниже, чем в поле, то есть доля галактик с подавленным звездообразованием выше. В публикации [36] по данным SDSS R7 установлено, что за пределами вириального радиуса систем галактик (до  $2.5R_{vir}$ ) наблюдается избыток галактик с подавленным звездообразованием. Таким образом, в скоплениях галактик даже за пределами вириализованных областей доля quenched-галактик остается выше, чем в поле. Среди спиральных галактик, которые не классифицируются как галактики ранних типов, также присутствует доля галактик с подавленным звездообразованием. Нами определена эта доля среди спиральных галактик по параметрам  $du - r < -0.2$ ,  $deVfr < 0.8$  и  $r_{90}/r_{50} < 2.6$ . Как ожидалось, в центральных областях скоплений галактик ( $0-0.25 R/R_{200c}$ ) спиральных quenched-галактик нет, их доля максимальна за вириализованной областью, в пределах  $1-2 R/R_{200c}$ , и составляет в среднем  $0.11 \pm 0.02$  (кроме скоплений А 1139 и А 1314). В пределах  $2-3 R/R_{200c}$  спиральные quenched-галактики со средней долей  $0.14 \pm 0.06$



**Рис. 6.** Вариации пространственного распределения и кинематики галактик в скоплениях в зависимости от их удельного темпа звездообразования ( $\lg sSFR$ ) с разделением на четыре бина. Бины  $\lg sSFR[\text{Gyr}^{-1}] = -1.75 \dots -1.35$ ,  $-1.35 \dots -1.05$ , и, соответственно, «активные» галактики, образующие звезды, выделены большими значками, маленькими обозначены бины  $\lg sSFR[\text{Gyr}^{-1}] = -1.75 \dots -4.00$ ,  $-4.00$ —оставшиеся (галактики с подавленным звездообразованием).

остаются только в скоплениях А 1656, А 2107 и А 2052. В плотном окружении в скоплениях галактик встречаются спиральные галактики с подавленным звездообразованием, и их доля выше, чем в поле [37]. На рис. 5 штрихпунктирными линиями показаны доли quenched-галактик в поле для каждого диапазона звездных масс. Можно отметить, что только среди самых массивных (рис. 5е) доля таких галактик в поле практически близка к значению для скоплений, особенно в массивной системе А 1656. В менее массивных системах в этом диапазоне галактик мало.

Галактики с активным звездообразованием и с подавленным звездообразованием имеют разные дисперсии лучевых скоростей — у «активных» галактик она выше на 10–35% [4]. Чтобы это показать, мы приводим зависимость пространственного распределения галактик совместно с кинематическими характеристиками от удельного темпа звездообразования, разделенного на четыре бина (рис. 6). На рисунке размеры значков соответствуют этим бинам: большие значки соответствуют «активным» галактикам, имеющим диапазоны  $\lg sSFR[\text{Gyr}^{-1}] = -1.75 \dots -1.35$ ,  $-1.35 \dots -1.05$ ; маленькие значки — галактикам с подавленным звездообразованием с диапазонами  $\lg sSFR[\text{Gyr}^{-1}] = -1.75 \dots -4.00$ ,  $-4.00$ —все

**Таблица 2.** Изменение доли галактик ранних типов и галактик с подавленным звездообразованием вдоль радиуса

Cluster	Fraction	0–0.25 $R/R_{200c}$	0–1 $R/R_{200c}$	1–2 $R/R_{200c}$	2–3 $R/R_{200c}$	0–1 $R_{sp}$	1 $R_{sp}$ –3 $R/R_{200c}$
A 1656	$frac_E$	0.73 ± 0.11	0.54 ± 0.05	0.50 ± 0.07	0.25 ± 0.06	0.50 ± 0.04	0.22 ± 0.03
	$frac_q$	0.79 ± 0.12	0.75 ± 0.06	0.68 ± 0.09	0.42 ± 0.09	0.74 ± 0.05	0.42 ± 0.08
A 1314	$frac_E$	0.57 ± 0.25	0.51 ± 0.12	0.50 ± 0.23	0.33 ± 0.22	0.51 ± 0.11	0.36 ± 0.16
	$frac_q$	0.93 ± 0.36	0.77 ± 0.16	0.57 ± 0.25	0.33 ± 0.22	0.74 ± 0.14	0.36 ± 0.21
A 2052	$frac_E$	0.50 ± 0.18	0.52 ± 0.10	0.36 ± 0.11	0.26 ± 0.06	0.49 ± 0.09	0.23 ± 0.05
	$frac_q$	0.91 ± 0.28	0.84 ± 0.14	0.45 ± 0.12	0.42 ± 0.09	0.80 ± 0.13	0.41 ± 0.08
A 1139	$frac_E$	0.62 ± 0.35	0.44 ± 0.10	0.15 ± 0.08	0.15 ± 0.12	0.36 ± 0.08	0.20 ± 0.07
	$frac_q$	0.86 ± 0.34	0.64 ± 0.12	0.27 ± 0.12	0.45 ± 0.15	0.64 ± 0.12	0.37 ± 0.10
A 2107	$frac_E$	0.69 ± 0.19	0.57 ± 0.06	0.38 ± 0.09	0.28 ± 0.10	0.50 ± 0.08	0.31 ± 0.08
	$frac_q$	0.91 ± 0.23	0.78 ± 0.12	0.56 ± 0.13	0.55 ± 0.17	0.73 ± 0.10	0.55 ± 0.15
A 2040	$frac_E$	0.64 ± 0.20	0.49 ± 0.09	0.27 ± 0.08	0.22 ± 0.08	0.43 ± 0.07	0.20 ± 0.05
	$frac_q$	0.84 ± 0.25	0.67 ± 0.11	0.51 ± 0.12	0.40 ± 0.12	0.61 ± 0.09	0.45 ± 0.11

оставшиеся галактики. В каждом бине определено среднее расстояние членов популяции, нормированное на радиус скопления  $R_{200c}$ ,  $\langle R \rangle / R_{200c}$ , и их дисперсия лучевых скоростей, нормированная на дисперсию лучевых скоростей скопления в пределах  $R_{200c}$ . Большими значками обозначены «активные» галактики со звездообразованием, маленькими — галактики с подавленным звездообразованием. Все скопления галактик показывают общую тенденцию — галактики со звездообразованием (особенно с  $\lg sSFR > -1.35$ ) как популяция расположены далеко от центра скопления и имеют более высокую дисперсию лучевых скоростей, чем галактики с подавленным звездообразованием. Располагаясь за пределами вириального радиуса  $R_{200c}$ , эти галактики, скорее всего, представляют собой популяцию падающих на скопление будущих членов.

В таблице 2 представлены результаты измерений доли quenched-галактик вдоль нормированного радиуса скопления и доли галактик ранних типов на КП. В колонке (1) таблицы дано имя системы, в остальных — диапазоны изменения радиуса ( $R/R_{200c}$  и  $R_{sp}$ ). В первой строке указана доля галактик ранних типов на КП,  $frac_E$ , во второй — доля галактик с подавленным звездообразованием  $frac_q$ .

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В поле (вне скопления и групп галактик) морфология галактик и образование в них звезд не

зависят друг от друга — низкий темп звездообразования связан с галактиками ранних типов, в то время как высокий темп показывают галактики поздних типов, спиральные галактики. В скоплениях галактики попадают в особые условия, на них оказывают воздействие в большей степени горячий вириализованный газ внутри скопления и в меньшей степени другие галактики. Кроме того, предполагается, что галактики, попадающие в скопления вместе с группами, уже подверглись воздействию газа групп (см., например, [4]). Модельные расчеты показывают, что в скоплениях галактик существует радиальный градиент звездообразования, который отражает свойства галактик в зависимости от расстояния до центра скопления и времени их аккреции в скопление (см., например, [3]). Фазовые диаграммы, связывающие дисперсию лучевых скоростей в проекции и расстояния от центра скопления галактик в проекции, наиболее подходят для изучения этого явления (см., например, [4, 9–11, 14]).

По данным каталога SDSS для шести скоплениях галактик, A 1656, A 1139, A 1314, A 2040, A 2052, A 2107, мы рассмотрели градиенты удельного темпа звездообразования вдоль радиуса, определили долю галактик с подавленным звездообразованием в пределах вириализованных областей и в пределах ближайшей периферии (до  $3R/R_{200c}$ ) в сравнении с данными для галактик поля.

Получены следующие результаты:

1. Для исследуемых систем галактик ( $\lg M_{200c} [M_{\odot}] = 14.21–15.12$ ) удельный темп

звздообразования имеет пик на  $\lg sSFR[\text{Gyr}^{-1}] \approx -2.2$ , а за минимум в распределении взято значение  $\lg sSFR[\text{Gyr}^{-1}] \approx -1.75$ , условно разделяющее галактики на «активные» со звездообразованием и на галактики с подавленным звездообразованием.

2. В скоплениях галактик существует радиальный градиент  $sSFR$ . При этом доля галактик с подавленным звездообразованием максимальна в центральных областях и составляет  $0.87 \pm 0.02$  в пределах  $2-3 R/R_{200c}$ , а за пределами  $R_{sp}$  —  $0.43 \pm 0.03$ . Это значение, полученное для периферии скоплений галактик, больше, чем в поле, на 26%. Значительные вариации доли галактик с подавленным звездообразованием вдоль радиуса наблюдаются в системах со звездными массами  $\lg M_*[M_\odot] = 9.5-10.0$  (исключением является скопление A 1656, система с  $M_{200c}[M_\odot] > 10^{15}$ ). Галактики со звездообразованием в скоплениях в среднем имеют более высокую дисперсию лучевых скоростей и расположены далеко от центра.

3. КП 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  $R_{sp}$  (в пределах  $2-3 R/R_{200c}$ ) 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>).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Boselli and G. Gavazzi, Publ. Astron. Soc. Pacific **118**, 517 (2006).
2. M. L. Balogh, S. L. Morris, H. K. C. Yee, et al., Astrophys. J. **527**, 54 (1999).
3. M. L. Balogh, J. F. Navarro, and S. L. Morris, Astrophys. J. **540**, 113 (2000).
4. C. P. Haines, M. J. Pereira, G. P. Smith, et al., Astrophys. J. **775**, 126 (2013).
5. A. R. Wetzel, J. L. Tinker, and C. Conroy, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **424**, 232 (2012).
6. S. P. D. Gill, A. Knebe, and B. K. Gibson, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **356**, 1327 (2005).
7. E. Zinger, A. Dekel, A. V. Kravtsov, and D. Nagai, ArXiv e-prints (2016).
8. A. Paccagnella, B. Vulcani, B. M. Poggianti, et al., Astrophys. J. **816**, L25 (2016).
9. S. Mahajan, G. A. Mamon, and S. Raychaudhury, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **418**, 2816 (2011).
10. J. D. Hernández-Fernández, C. P. Haines, A. Diaferio, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **438**, 2186 (2014).
11. A. Muzzin, R. F. J. van der Burg, S. L. McGee, et al., Astrophys. J. **796**, 65 (2014).
12. K. A. Oman, M. J. Hudson, and P. S. Behroozi, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **431**, 2307 (2013).
13. K. A. Oman and M. J. Hudson, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **463**, 3083 (2016).
14. J. Rhee, R. Smith, H. Choi, et al., Astrophys. J. **843**, 128 (2017).
15. S. Alam, F. D. Albareti, C. Allende Prieto, et al., Astrophys. J. Suppl. **219**, 12 (2015).
16. T. H. Jarrett, T. Chester, R. Cutri, et al., Astron. J. **119**, 2498 (2000).
17. M. A. Strauss, D. H. Weinberg, R. H. Lupton, et al., Astron. J. **124**, 1810 (2002).
18. A. Sandage, Astrophys. J. **176**, 21 (1972).
19. F. G. Kopylova, Astrophysical Bulletin **68**, 253 (2013).
20. R. G. Carlberg, H. K. C. Yee, and E. Ellingson, Astrophys. J. **478**, 462 (1997).
21. V. R. Eke, S. Cole, and C. S. Frenk, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **282** (1996).
22. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, Astronomy Letters **37**, 219 (2011).
23. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, Astronomy Letters **39**, 1 (2013).
24. A. I. Kopylov and F. G. Kopylova, Astrophysical Bulletin **70**, 243 (2015).
25. G. A. Mamon, T. Sanchis, E. Salvador-Solé, and J. M. Solanes, Astron. and Astrophys. **414**, 445 (2004).
26. S. More, B. Diemer, and A. V. Kravtsov, Astrophys. J. **810**, 36 (2015).
27. R. B. Tully, Astron. J. **149**, 54 (2015).
28. S. More, H. Miyatake, M. Takada, et al., Astrophys. J. **825**, 39 (2016).
29. C. Chang, E. Baxter, B. Jain, et al., ArXiv e-prints (2017).
30. A. Dressler, Annual Rev. Astron. Astrophys. **22**, 185 (1984).
31. O. López-Cruz, W. A. Barkhouse, and H. K. C. Yee, Astrophys. J. **614**, 679 (2004).
32. N. Visvanathan and A. Sandage, Astrophys. J. **216**, 214 (1977).
33. B. M. Tinsley, Astrophys. J. **151**, 547 (1968).
34. R. B. Larson, B. M. Tinsley, and C. N. Caldwell, Astrophys. J. **237**, 692 (1980).
35. C. Conroy, J. E. Gunn, and M. White, Astrophys. J. **699**, 486 (2009).
36. A. R. Wetzel, J. L. Tinker, C. Conroy, and F. C. van den Bosch, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **439**, 2687 (2014).
37. S. P. Bamford, R. C. Nichol, I. K. Baldry, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **393**, 1324 (2009).

**Outskirts of Galaxy Clusters A 1139, A 1314, A 1656, A 2040, A 2052, A 2107: Star-Formation Rate****F. G. Kopylova and A. I. Kopylov**

We investigate the variation of the fraction of galaxies with suppressed star formation ( $M_K < -21^m5$ ) and early-type galaxies ( $frac_E$ ) of the red sequence along the projected radius in six galaxy clusters: Coma (A 1656), A 1139, and A 1314 in the Leo supercluster region ( $z \approx 0.037$ ) and A 2040, A 2052, A 2107 in the Hercules supercluster region ( $z \approx 0.036$ ). According to SDSS (DR10) data,  $frac_E$  is the highest in the central regions of galaxy clusters and it is, on the average, equal to  $0.62 \pm 0.03$ , whereas in the  $2-3 R/R_{200c}$  interval and beyond the  $R_{sp} \approx 0.95 \pm 0.04 R_{200m}$  radius that we inferred from the observed profile  $frac_E$  is minimal and equal to  $0.25 \pm 0.02$ . This value coincides with the estimate  $frac_E = 0.24 \pm 0.01$  that we inferred for field galaxies located between the Hercules and Leo superclusters at the same redshifts. We show that the fraction of galaxies with suppressed star formation decreases continuously with cluster radius from  $0.87 \pm 0.02$  in central regions down to  $0.43 \pm 0.03$  in the  $2-3 R/R_{200c}$  interval and beyond  $R_{sp}$ , but remains, on the average, higher than 26% than the corresponding fraction for field objects. This decrease is especially conspicuous in the galaxy mass interval  $\lg M_* [M_\odot] = 9.5-10$ . We found that galaxies with ongoing star formation have average clustercentric distances  $1.5-2.5 R/R_{200c}$  and that their radial-velocity dispersions are higher than those of galaxies with suppressed star formation.

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