

УДК 524.77; 524.7-54; 524.7-52

СКОПЛЕНИЕ ГАЛАКТИК А 2142: ГРАНИЦА ГАЛО, «КРАСНАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ», СВОЙСТВА ГАЛАКТИК ПО ДАННЫМ SDSS

© 2022 Ф. Г. Копылова^{1*}, А. И. Копылов¹¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 05 июля 2021 года; после доработки 15 ноября 2021 года; принята к публикации 16 ноября 2021 года

Мы представляем результаты изучения динамики галактик, свойств галактик ранних типов, свойств галактик с подавленным звездообразованием (QGs) в скоплении А 2142 по архивным данным Sloan Digital Sky Survey Data (SDSS DR10). Нами найдена наблюдаемая граница гало, «splashback»-радиус R_{sp} , по интегральному распределению числа галактик от квадрата расстояния от центра, равная 4.12 Мпк ($M_r < -20^{m3}$) и 4.06 Мпк ($M_r < -21^{m5}$). Мы изучили, как галактики ранних типов распределены в центре и в окрестностях скопления ($R/R_{200} < 3$, $M_r < -20^{m3}$), построили «красную последовательность» в форме $(g-r) = (-0.024 \pm 0.001)M_r + (0.441 \pm 0.005)$. Среди всех галактик скопления галактик с подавленным звездообразованием, QGs, ($-12 \text{ yr}^{-1} < \lg sSFR < 10.75 \text{ yr}^{-1}$) составляют примерно одну треть. Нами найдено, что доля QGs за «splashback»-радиусом R_{sp} такая же, как в поле на тех же z с координатами центра $16^{\text{h}5, 31^{\text{o}}}$ и размером $300'$. У галактик со звездными массами $\lg M_*/M_{\odot} = [10.5; 11.0]$ — это основной диапазон масс QGs — при попадании в скопление наблюдается уменьшение радиусов $R_{90,r}$ примерно на 30% при движении к центру.

Ключевые слова: галактики: скопления: общие сведения — галактики: эволюция — галактики: звездообразование — галактики: скопления: отдельные: А 2142

1. ВВЕДЕНИЕ

Скопления галактик — самые большие гравитационно-связанные системы во Вселенной — являются основными объектами наблюдательной космологии (Vikhlinin et al. 2014), позволяющими изучать иерархический рост структур. Для подобных исследований одной из наилучших целей в локальной Вселенной ($z < 0.1$) является скопление А 2142 с самой большой светимостью в рентгеновском диапазоне и с большим количеством групп галактик в его окрестностях, которых оно притягивает. При наблюдениях скопления в рентгеновском диапазоне (Chandra, XMM-Newton) найдены множественные концентрические холодные фронты поверхностной яркости (Markevitch et al. 2000, Rossetti et al. 2013), которые указывают на плещущуюся активность ядра (Markevitch and Vikhlinin 2007, Tittley and Henriksen 2005) (a core sloshing activity), тянущуюся до 1 Мпс от центра скопления (Rossetti et al. 2013). В радиодиапазоне (наблюдения на LOFAR и VLA) обнаружено двухкомпонентное радиогало (Venturi et al. 2017). Eckert et al. (2014) также нашли признаки аккреции

газа и галактик на скопление: была открыта группа галактик на расстоянии 1.5 Мпс на северо-восток от основной системы.

Центральная область скопления изучена в оптическом диапазоне. В Owers et al. (2011) в распределении галактик около скопления (до 2 Мпс) выделили несколько субскоплений, падающих на него. Einasto et al. (2020) показали, что скопление А 2142 представляет собой результат слияний групп галактик в прошлом и настоящем. Liu et al. (2018) нашли в пределах 3.5 Мпк 19 субскоплений и изучили множественные слияния более мелких подсистем с основным скоплением, повлиявшие на его комплексную динамику. Кроме того, в указанной работе найдены кольца газа возле двух холодных фронтов, открытых в рентгеновской области. Скорости колец превышают среднюю лучевую скорость скопления на $810 \pm 330 \text{ км с}^{-1}$ и $660 \pm 300 \text{ км с}^{-1}$. Эти особенности газа Liu et al. (2018) объясняют в рамках модели плещущейся активности ядра (a core sloshing activity).

Целями данной работы являются определение границы скопления А 2142 и характеристик входящих в него галактик: долей галактик ранних типов на «красной последовательности» и галактик

*E-mail: flera@sao.ru

Таблица 1. Некоторые характеристики A 2142

σ , km c ⁻¹	R_c , Mpc	R_{200} , Mpc	R_{sp} , Mpc	N_z	z_h	M_{200} , 10 ¹⁴ M _⊙	$L_{0.1-2.4\text{keV}}$, 10 ⁴⁴ erg s ⁻¹
963 ± 70	1.52	2.28	4.12	191	0.090135	14.82 ± 3.23	10.58

с подавленным звездообразованием вдоль нормированного радиуса, а также выявление изменений радиуса $R_{90,r}$ галактик вдоль радиуса скопления.

Работа выполнена нами с привлечением данных каталога SDSS (Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 (Abazajian et al. 2009), 10 (Aihara et al. 2011)), и NED (NASA Extragalactic Database). Статья организована следующим образом. В разделе 2 описана процедура измерения динамических характеристик скопления галактик и определения его окрестностей. В Разделе 3.1 представлена построенная последовательность «цвет–величина» галактик ранних типов системы, приведены оценка доли галактик ранних типов вдоль радиуса и их характеристики при фиксированной звездной массе, дано сравнение этой доли со значениями, полученными для объектов поля. В разделе 3.2 рассмотрен удельный темп звездообразования галактик, найдены галактики с подавленным звездообразованием (QGs). Определена доля QGs вдоль радиуса при фиксированной звездной массе галактик, даны их характеристики и приведено сравнение с удельным темпом звездообразования в поле. В разделе 4 перечислены основные результаты. В работе мы использовали следующие космологические параметры: $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, $H_0 = 70$ км с⁻¹ Мпк⁻¹.

2. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Полнота изучаемого нами скопления галактик определяется полнотой спектральных данных каталога SDSS. Strauss et al. (2002) при отборе галактик (The Main galaxy sample) применили следующие условия: $r_{\text{Pet}} < 17^{\text{m}}77$ и $\langle \mu_r \rangle < 24^{\text{m}}5$ угл. сек.⁻², где r_{Pet} — петросьяновская звездная величина галактики в фильтре r , исправленная за поглощение в Галактике, а $\langle \mu_r \rangle$ — петросьяновская средняя поверхностная яркость, соответствующая эффективному радиусу. При выполнении этих условий полнота галактик SDSS составила 99%, а для ярких галактик — 95%.

Обычно при изучении скоплений галактик для повышения спектральной полноты ярких галактик при отсутствии в SDSS измерений их лучевых скоростей мы добавляли данные из базы NED. Если таких измерений не было и в NED, мы отбирали яркие галактики ранних типов «красной последовательности» в качестве вероятных членов скоплений

(от одной до пяти галактик) по диаграммам «цвет–величина» ($(u-r), M_r$; $(g-r), M_r$; $(r-i), M_r$) (Kopylova and Kopylov 2018; 2019).

Определение динамических характеристик системы галактик: лучевой скорости, дисперсии лучевой скорости, массы выполнено для области радиусом R_{200c} . Радиус R_{200c} (далее R_{200}) — это эмпирический радиус, в пределах которого плотность в системе превышает критическую плотность Вселенной в 200 раз и его можно оценить по формуле $R_{200} = \sqrt{3}\sigma/(10H(z))$ Мпк (Carlberg et al. 1997). Тогда, предполагая, что в пределах этого радиуса скопление вириализовано, $M_{200} \sim M_{\text{vir}}$, находим массу $M_{200} = 3G^{-1}R_{200}\sigma_{200}^2$. То есть измеряемая нами масса скопления $M_{200} \propto \sigma^3$. Массу M_{200} , заключенную в области радиусом R_{200} , можно определить непосредственно через критическую плотность, которая зависит от z :

$$M_{200} = \frac{4}{3}\pi R_{200}^3 \times 200\rho_c.$$

В модельных расчетах часто используется радиус R_{200m} — это радиус, в пределах которого плотность в системе превышает среднюю плотность Вселенной в 200 раз.

Основные параметры скопления для области радиусом R_{200} (по данным SDSS DR7) — дисперсия лучевых скоростей галактик, радиусы (R_c , R_{200} , R_{sp}), гелиоцентрическое красное смещение, динамическая масса, рентгеновская светимость — с соответствующими ссылками приведены нами в статье Kopylov and Kopylova (2015) и представлены в колонках таблицы 1. Наши оценки R_{200} и M_{200} для скопления хорошо согласуются с данными из работы (Tchernin et al. 2016), в которой собраны результаты определения этих параметров разными методами, отличными от нашего.

Детальнее охарактеризовать структуру и кинематику A 2142, а также его ближайших окрестностей позволяют представленные на панелях рис. 1: (a) — отклонение лучевых скоростей галактик — членов скопления и галактик, отнесенных к фону — от средней лучевой скорости в зависимости от квадрата радиуса (расстояния от центра скопления); (b) — интегральное распределение числа галактик в зависимости от квадрата радиуса; (c) — расположение галактик в плоскости неба в экваториальных координатах; (d) — гистограмма распределения лучевых скоростей всех галактик в пределах радиуса R_{200} .

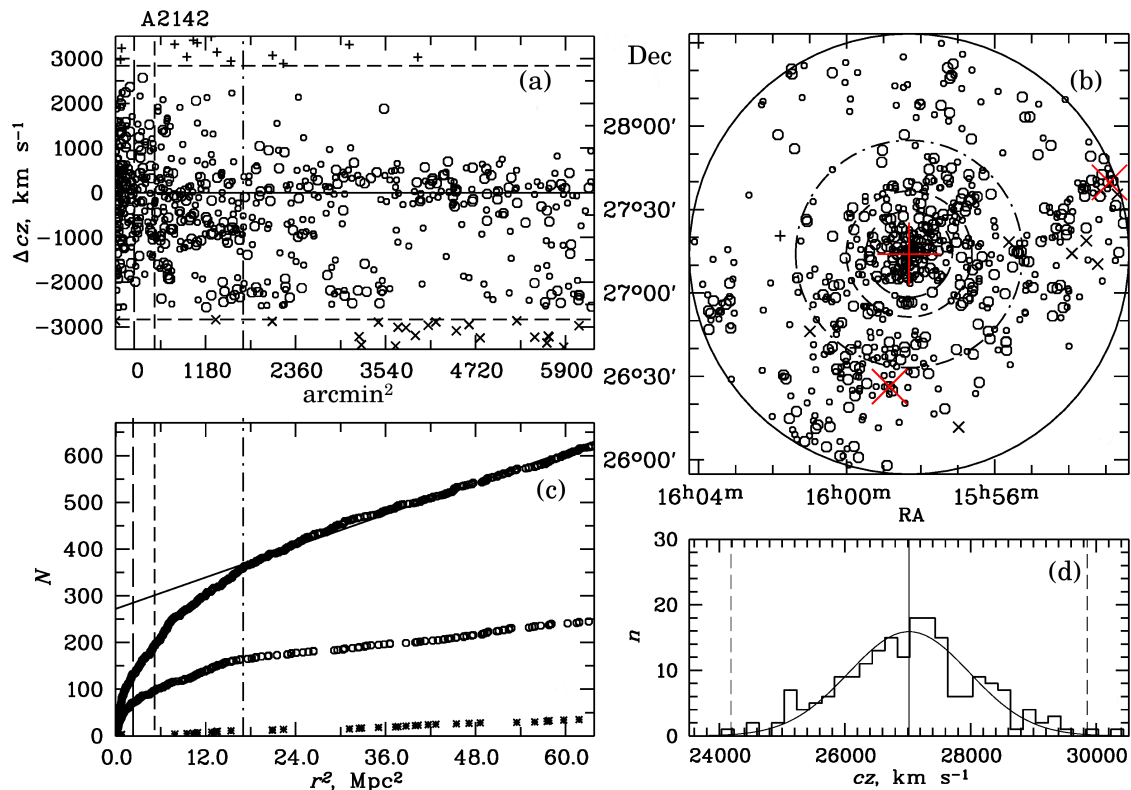


Рис. 1. Распределение галактик в скоплении A2142: (a) — отклонение лучевых скоростей галактик от средней лучевой скорости скопления, определенной по галактикам в пределах радиуса R_{200} . Горизонтальные штриховые линии соответствуют отклонениям $\pm 2.7\sigma$, вертикальными штриховыми линиями отмечены радиусы R_{200} (короткие штрихи), R_c (длинные штрихи), штрихпунктирной линией показан радиус R_{sp} . Кругами большего размера отмечены галактики ярче $M_K^* + 1 = -24^m$, плюсами — галактики заднего фона, крестиками — галактики переднего фона. (b) — интегральное распределение полного числа галактик (верхняя кривая) в зависимости от квадрата расстояния от центра группы. Нижняя кривая соответствует галактикам ранних типов «красной последовательности» ($-0.075 < (g-r) < 0.075$) ярче $M_r < -20^m3$. Круги соответствуют галактикам, обозначенным кругами на панели (a), звездочки — галактикам фона. (c) — распределение на небе в экваториальной системе координат галактик, которые представлены на панели (a) (обозначения те же). Кругами выделены области с радиусами R_c , R_{200} (штриховая линия) и радиусом R_{sp} (штрихпунктирная линия). Область исследования ограничена кругом с радиусом $3.5R_{200}$ (сплошная линия). Большими плюсом и крестами отмечены соответственно центр скопления (ярчайшая галактика BCG1 с $M_r = -23^m82$), и две другие ярчайшие галактики (BCG2 с $M_r = -23^m49$, BCG3 с $M_r = -23^m27$). (d) — распределение по лучевым скоростям всех галактик в пределах радиуса R_{200} (сплошной линией для членов скопления показана гауссиана, соответствующая дисперсии лучевых скоростей скопления). Сплошная вертикальная линия указывает среднюю лучевую скорость скопления, штриховые линии соответствуют отклонениям $\pm 2.7\sigma$.

Отметим (см. рис. 1a), что скопление расположено вдоль луча зрения, за исключением группы галактик с $cz < 2500 \text{ км с}^{-1}$ в нижней части панели. На рис. 1b приведен профиль скопления в проекции (интегральное распределение числа галактик в зависимости от квадрата радиуса от центра). Он показывает, что у скопления сначала наблюдается крутой рост числа галактик, а затем число галактик, расположенных за пределами вириализованной области, растет линейно (прямая линия на рисунке). В нашей статье Копылов and Копылова (2015) был определен ограничивающий гало скопления радиус R_h , который позднее мы отождествили со «splashback»-радиусом. При более детальном рассмотрении оказалось, что для массивных скопле-

ний галактик типа A1656, A2142 надо использовать 3–4 радиуса R_{200} , чтобы найти точку выхода распределения на линейный участок. Поэтому в данной работе мы взяли $3.5R_{200}$, что примерно равно 8 Мпк, и переопределили для скопления A2142 радиус R_{sp} . В скоплении A2142 радиус $R_{sp} = 4.12 \text{ Мпк}$ ($M_r < -20^m3$, $R_{sp}/R_{200c} = 1.81$ или $R_{sp}/R_{200m} = 1.13$). По более ярким галактикам с $M_r < -21^m5$ мы нашли $R_{sp} = 4.06 \text{ Мпк}$. Согласно результатам статьи (см. Копылова and Копылов 2022, рис. 5), для скопления A2142 справедлива следующая зависимость:

$$\lg R_{sp} = (0.24 \pm 0.03) \lg L_X - (7.39 \pm 0.33).$$

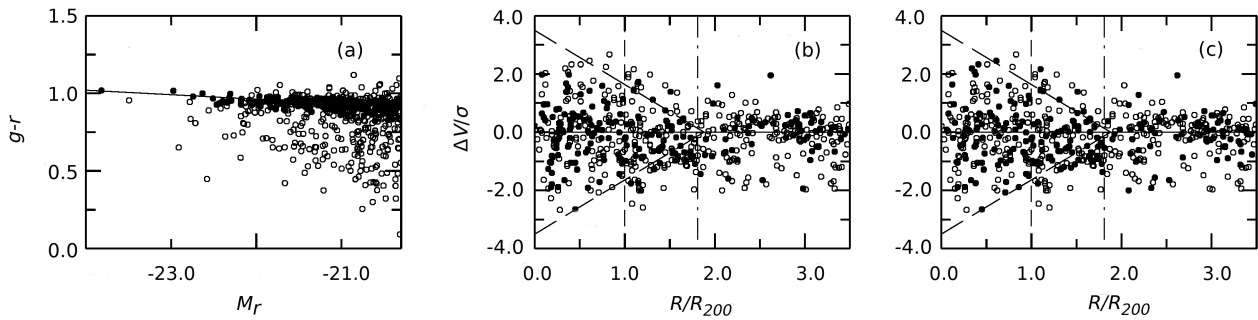


Рис. 2. (a) — зависимость «цвет–абсолютная звездная величина» скопления галактик A2142. Галактики «красной последовательности» (RS) ($-0.075 < (g - r) < 0.075$): показаны заполненными кружками. (b) и (c) — фазовые диаграммы «скорость–радиус», где скорость является отношением разности лучевых скоростей галактик и средней лучевой скорости скопления к дисперсии лучевых скоростей, а R/R_{200} — расстояние галактики от центра скопления, нормированное на радиус R_{200} . Штриховой и штрихпунктирной линиями показаны соответственно радиусы R_{200} и R_{sp} . Заполненные кружки на панели (b) — RS-галактики, как и на панели (a). На панели (c) заполненные кружки соответствуют галактикам с подавленным звездообразованием ($-3 \text{ Gy}^{-1} < \lg sSFR < -1.75 \text{ Gy}^{-1}$). Наклонные штриховые линии — модельные расчеты из Barsanti et al. (2018)) — отделяют вириализованные члены скопления.

На рис. 1 линией с короткими штрихами показан радиус вириализованной области R_{200} , линией с длинными штрихами — радиус центральной области, штрихпунктирная линия соответствует «splashback»-радиусу R_{sp} , за которым крутой рост числа членов скопления сменяется линейным. На рис. 1 ниже также показано распределение ярких галактик ранних типов (на этих z нами оценена для A 2142 предельная M_r , примерно равная 0^m3 , по которой этот радиус уточнен). Наблюдаемый радиус R_{sp} (как правило, $R_{sp} > R_{200}$) является радиусом апоцентра первых орбит галактик, на который вылетают галактики из вириализованной области после первого прохождения через центр скопления. То есть радиус R_{sp} отделяет большинство галактик, которые впервые падают на скопление, от коллапсирующих галактик, которые уже участвуют в установлении вириального равновесия. В работе Haines et al. (2013, рис. 13) приведено расположение галактик всех видов, в том числе вылетевших из скопления, на фазовой диаграмме, полученное в результате моделирования скоплений галактик.

Нами измерены радиусы R_{sp} для выборки из 157 скоплений галактик. Они варьируются в диапазоне от $1.02R_{200}$ до $3.64R_{200}$ в зависимости от динамической массы и рентгеновской светимости (Kopylova and Kopylov 2022) и в среднем равны $1.54R_{200}$.

3. ВЫБОРКИ ГАЛАКТИК И ИХ СВОЙСТВ

3.1. Галактики ранних типов

Известно, что основным населением скоплений галактик на малых красных смещениях ($0 < z < 0.1$) являются галактики ранних типов,

которые располагаются в основном в центральных вириализованных областях и являются самыми яркими членами. Галактики ранних типов подчиняются зависимости между цветом и звездной величиной, «цвет–величина», называемой «красной последовательностью» (RS). В группах и скоплениях галактик RS имеет небольшой разброс, поскольку галактики находятся на одном расстоянии. Нами найдено, что такие галактики в вириализованных областях скоплений галактик (например, в сверхскоплениях галактик Hercules и Leo) составляют порядка 60–70% среди галактик ярче $M_K = -23^m3$ (Kopylova and Kopylov 2013).

Галактики ранних типов в данной работе отобраны по следующим критериям (фильтр r):

- $fracDeV \geq 0.8$, где параметр $fracDeV$ (по каталогу SDSS) характеризует вклад балджа в профиль поверхностной яркости галактики;
- индекс концентрации $c \geq 2.6$, где $c = r_{90}/r_{50}$ (равен отношению радиусов, ограничивающих 90% и 50% потоков Петросьяна).

Кроме того, мы сделали ограничения по цвету ($u - r$), чтобы исключить спиральные галактики: $\Delta(u - r) \geq -0.2$, которое следует из полученной нами зависимости цвета ($u - r$) от абсолютной звездной величины ($u - r = -0.108M_r + 0.63$ с $2\sigma = 0.2$). Можно также сделать ограничения по цвету ($g - r$), чтобы сузить RS: $\Delta|(g - r)| \geq 0.075$. Мы взяли цвета галактик из каталога SDSS, вычисленные по модельным звездным величинам, исправленным за поглощение в Галактике.

Полученная для скопления A 2142 RS показана на рис. 2a на фоне остальных галактик. На рис. 2b приведена фазовая диаграмма скопления галактик

Таблица 2. Скопление A 2142: галактики ранних типов на RS и их свойства вдоль радиуса

Properties	0–0.25 R_{200}	0–1 R_{200}	1–2 R_{200}	2–3 R_{200}	0–1 R_{sp}	1 R_{sp} –3 R_{200}	Field
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
$frac_{E1}$	0.51 ± 0.14	0.50 ± 0.06	0.35 ± 0.05	0.27 ± 0.05	0.44 ± 0.04	0.26 ± 0.05	0.27 ± 0.03
$frac_{E2}$	0.78 ± 0.19	0.61 ± 0.07	0.36 ± 0.05	0.29 ± 0.06	0.51 ± 0.05	0.28 ± 0.05	0.30 ± 0.04
Age, Gyr	9.48 ± 0.20	9.38 ± 0.07	9.32 ± 0.09	9.60 ± 0.16	9.35 ± 0.06	9.60 ± 0.14	9.94 ± 0.11
M_r	–20.76 ± 0.10	–20.79 ± 0.04	–20.82 ± 0.04	–20.78 ± 0.09	–20.81 ± 0.03	–20.78 ± 0.08	–20.71 ± 0.03
$\lg(Z/Z_{\odot})$	–0.26 ± 0.02	–0.24 ± 0.01	–0.28 ± 0.01	–0.31 ± 0.01	–0.26 ± 0.01	–0.31 ± 0.01	–0.25 ± 0.02
$(g - r)$	0.96 ± 0.01	0.94 ± 0.01	0.92 ± 0.01	0.92 ± 0.01	0.93 ± 0.01	0.92 ± 0.01	0.92 ± 0.01
R_e , kpc	2.73 ± 0.40	2.84 ± 0.14	3.03 ± 0.17	2.88 ± 0.25	2.92 ± 0.11	2.84 ± 0.23	2.58 ± 0.12

в проекции, где $\Delta V/\sigma$ — отношение разности лучевых скоростей галактик и средней лучевой скорости скопления к дисперсии лучевых скоростей, R/R_{200} — расстояние галактики от выбранного центра скопления, нормированное к радиусу R_{200} . В качестве центра системы галактик нами взята самая яркая галактика, координаты которой близки к координатам центра рентгеновского излучения. Заполненными кружками показаны галактики RS в пределах радиуса $3.5R/R_{200}$ (рис. 2а), пустыми кружками отмечены остальные галактики. Штриховая модельная линия (Barsanti et al. 2018, Oman et al. 2013) примерно ограничивает вириализованные члены скопления. В качестве членов скопления за пределами радиуса R_{200} нами взяты галактики с $-2 < \Delta V/\sigma < 2$, поэтому падающая группа галактик (рис. 1) с Δcz около -2500 км с^{-1} на фазовой диаграмме не приведена.

Некоторые характеристики галактик ранних типов и оценки их доли $frac_E$ вдоль радиуса скопления приведены в таблице 2. В первой строке представлены результаты для выборки галактик на RS, ограниченной цветом $|\Delta|(g - r)| < 0.075$, как в работах Korylova and Korylov (2018; 2019), выполненных по 40 близким скоплениям галактик с $z < 0.045$. Во второй строке даны результаты без ограничения по $(g - r)$. Всего в скоплении A 2142 ($R/R_{200} < 3$) нами найдено 214 галактик ранних типов на RS. Если ввести ограничения по цвету $(g - r)$, то получим 189 галактик. Можно отметить, что доли галактик ранних типов на RS изменяются вдоль радиуса скопления A 2142 аналогичным образом, как и в среднем у близких скоплений галактик (Korylova and Korylov 2019). Для того, чтобы сравнить полученные результаты по очень богатому скоплению A 2142 с результатами для низкоплотных области вблизи скопления, мы взяли на тех же красных смещениях ($0.0815 < z < 0.0988$) поле размером $300'$ с координатами центра ($16^{\text{h}}5, 31^{\circ}$). При таком же от-

боре галактик ранних типов (и с учетом того же условия $M_r < -20^{\text{m}}3$), как и для скопления, мы получили, что в поле доля галактик ранних типов равна 0.28 ± 0.05 . Это согласуется со значениями, приведенными в таблице 2 для области за пределом $R_{sp} = 1.81R_{200}$ или в пределах $2-3R/R_{200}$. В этой таблице также даны средние характеристики галактик ранних типов для основного диапазона звездных масс $\lg M_*/M_{\odot} = [10.5; 11.0]$. Можно отметить, что возраст галактик (в SDSS DR10 определяется как взвешенный по массе средний возраст звездного населения в Gyr) незначительно уменьшается, средний эффективный радиус растет на 10%, средняя металличность ($Z_{\odot} = 0.019$) звездного населения изменяется незначительно за пределами радиуса скопления R_{200} . Можно также отметить, что галактики ранних типов в центре скопления более красные, эффективный радиус у них меньше, они старше и более богаты металлами, чем галактики в пределах радиуса $1-2R_{200}$. Характеристики галактик за радиусом R_{sp} отличаются от значений, приведенных для поля. Галактики в поле незначительно старше, более богаты металлами и радиус R_e у них меньше. Построенная по 214 галактикам RS описывается выражением

$$(g - r) = -0.023(\pm 0.003)M_r + 0.455(\pm 0.067)$$

с $rms = 0.032$. В пределах ошибок форма и нуль-пункт практически не изменяются с радиусом скопления.

3.2. Галактики с подавленным звездообразованием

Так называемая «главная последовательность» («main sequence») связывает темп звездообразования спиральных галактик со звездной массой. В результате истощения газа в галактиках темп звездообразования падает, и галактика движется к пассивному состоянию, проходя через промежуточное состояние, которое характеризуется подавленным звездообразованием.

В пределах скоплений галактик действуют разные механизмы, приводящие к подавлению звездообразования. В центральных областях это приливные эффекты, в результате воздействия которых галактики лишаются газа, звезд и темной материи (например, Mayer et al. (2006)). Некоторые из галактик теряют вещество, находясь в составе мелких групп галактик, еще до попадания в скопление, то есть они испытывают «предварительную обработку», «pre-processing» (см., например, Haines et al. (2018), Poggianti et al. (1999), Wetzel et al. (2013)).

На рис. 1с можно заметить, что изучаемое нами богатое скопление A 2142 окружено множеством групп галактик, в которых, вероятнее всего, происходит «pre-processing» галактик. Ранее, в работе Korylova and Korylov (2019), для 40 близких скоплений галактик ($0.02 < z < 0.045$) мы получили, что даже в пределах радиуса $2 < R/R_{200} < 3$ (в окрестности рассмотренных скоплений) доля галактик с подавленным звездообразованием на 27% больше, чем в поле.

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 удельного темпа звездообразования, звездная масса галактик и другие параметры галактик, которые получены подгонкой моделей FSPS (Conroy et al. 2009) к SDSS-фотометрии в фильтрах u , g , r , i , z . Нами использованы исправленные за поглощение модельные величины и версия «early-star formation with dust». В распределении галактик по удельному темпу звездообразования $\lg sSFR$ обычно находят минимум, отделяющий галактики с активным звездообразованием (active galaxies), от галактик, у которых оно подавлено (quenched galaxies—QGs) (Wetzel et al. 2012). Вообще, распределение галактик по удельному темпу звездообразования $\lg sSFR$ имеет длинный хвост, тянущийся в область галактик без звездообразования (passive galaxies). В наших работах (Korylova and Korylov 2018; 2019) мы отобрали QGs и «passive»-галактики, исходя из условия $\lg sSFR < -10.75 \text{ yr}^{-1}$. Если исключить из выборки галактики без звездообразования ($\lg sSFR < -12 \text{ yr}^{-1}$, согласно Oemler et al. (2017)), останутся галактики с подавленным звездообразованием, то есть удовлетворяющие условию $-12 \text{ yr}^{-1} < \lg sSFR < -10.75 \text{ yr}^{-1}$.

В исследуемом скоплении A 2142 ($R/R_{200} < 3$) мы нашли 188 галактик с подавленным звездообразованием, из них 147 являются галактиками ранних типов с параметром $fracDeV \geq 0.8$, остальные 41 — галактики позднего типа. Из

188 галактик 120 имеют звездные массы в пределах $\lg M_*/M_\odot = [10.5; 11.0]$, у 61 галактики $\lg M_*/M_\odot = [11.0; 11.5]$, и еще семь не входят в этот диапазон, то есть изучаемые нами галактики относятся к массивным ($\lg M_*/M_\odot > 10.5$).

На рис. 2с заполненными кружками показаны QGs на фоне остальных галактик. В таблице 3 в первой строке даны суммарные доли QGs и пассивных галактик (аналогично статье (Korylova and Korylov 2019)), во второй строке приведены только доли QGs вдоль радиуса скопления A 2142. Можно отметить, что доля QGs (включая пассивные) максимальна в центральной области, несколько меньше в пределах R_{200} и падает примерно на 35% за $R_{sp} = 1.81R_{200}$. За «splashback»-радиусом мы имеем такое же количество QGs, как в поле 0.58 ± 0.10 (285 галактик из 491, $M_r < -20^m$). В то же время доля QGs без пассивных галактик (вторая строка таблицы 3) минимальна в центре, максимальна в пределах радиуса R_{200} и уменьшается за радиусом R_{sp} на 28% по сравнению с вириализованной областью скоплений галактик ($0-1R_{200}$). Нами получено, что и в поле таких галактик примерно то же количество: 0.31 ± 0.09 , 151 галактика из 491 ($M_r < -20^m$). Среди QGs доля галактик поздних типов, выявленных по параметру $fracDeV$, незначительна и составляет 22%. В центре скопления $R < 0.25R/R_{200}$ мы нашли всего три галактики. В таблице 4 приведены некоторые характеристики QGs поздних и ранних типов в скоплении и в поле при фиксированной звездной массе $\lg M_*/M_\odot = [10.5; 11.0]$: возраст звездного населения, металличность, цвет ($g-r$), индекс концентрации c , доля балджа. В последнем столбце таблицы показаны параметры галактик поля (для 52 галактик поздних типов и 48 — ранних). Можно отметить, что галактики поздних типов, попав в скопление (в пределы R_{200}), становятся более красными, более компактными и похожими на галактики ранних типов: растет индекс концентрации c от 2.39 за R_{sp} до 2.56, доля балджа $fracDeV$ значительно увеличивается, с 0.36 до 0.56 (или на 36%). У галактик ранних типов существенных изменений параметров не наблюдается. Если сравнивать эти параметры QGs (для такого же диапазона масс звезд) с аналогичными из более низкоплотной области (поля), то можно сделать следующий вывод. В области скопления ($R < R_{sp}$) QGs поздних типов имеют больший размер балджа, более красный цвет и значительно более низкую металличность по сравнению с галактиками поля.

В работе Korylova and Korylov (2020) мы рассмотрели изменения комбинированного (stacked) радиуса Петросьяна у галактик в 40 близких

Таблица 3. Скопление А 2142: доля галактик с подавленным звездообразованием вдоль радиуса

Fraction	0–0.25 R_{200}	0–1 R_{200}	1–2 R_{200}	2–3 R_{200}	0–1 R_{sp}	1 R_{sp} –3 R_{200}	Field
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
$frac_{q1}$	0.92 ± 0.22	0.85 ± 0.09	0.65 ± 0.08	0.63 ± 0.09	0.78 ± 0.06	0.60 ± 0.08	0.58 ± 0.10
$frac_{q2}$	0.30 ± 0.10	0.42 ± 0.06	0.39 ± 0.06	0.32 ± 0.06	0.42 ± 0.04	0.30 ± 0.05	0.31 ± 0.09

Таблица 4. Скопление А 2142: параметры галактик с подавленным звездообразованием вдоль радиуса ($\lg M_*/M_\odot = [10.5, 11.0]$); для галактик поздних и ранних типов отдельно

Properties	0–0.25 R_{200}	0–1 R_{200}	1–2 R_{200}	2–3 R_{200}	0–1 R_{sp}	1 R_{sp} –3 R_{200}	Field
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
$c(R_{90,r}/R_{50,r})$	2.65 ± 0.01	2.56 ± 0.07	2.53 ± 0.06	2.39 ± 0.07	2.54 ± 0.04	2.39 ± 0.07	2.45 ± 0.03
$fracDeV$	0.78 ± 0.01	0.56 ± 0.08	0.55 ± 0.03	0.36 ± 0.08	0.55 ± 0.04	0.36 ± 0.08	0.41 ± 0.04
$(g-r)$	0.94 ± 0.01	0.89 ± 0.01	0.86 ± 0.01	0.89 ± 0.03	0.88 ± 0.01	0.89 ± 0.03	0.80 ± 0.01
Age, Gyr	8.88 ± 0.28	8.66 ± 0.08	8.81 ± 0.14	8.70 ± 0.12	8.74 ± 0.08	8.70 ± 0.12	8.91 ± 0.06
$\lg(Z/Z_\odot)$	-0.28 ± 0.01	-0.31 ± 0.02	-0.32 ± 0.03	-0.23 ± 0.09	-0.32 ± 0.02	-0.23 ± 0.09	-0.08 ± 0.03
$c(R_{90,r}/R_{50,r})$	2.69 ± 0.03	2.95 ± 0.07	2.86 ± 0.04	2.85 ± 0.06	2.90 ± 0.04	2.86 ± 0.05	2.86 ± 0.02
$fracDeV$	0.90 ± 0.04	0.95 ± 0.01	0.94 ± 0.01	0.97 ± 0.01	0.95 ± 0.01	0.97 ± 0.01	0.96 ± 0.01
$(g-r)$	0.94 ± 0.03	0.91 ± 0.01	0.89 ± 0.01	0.90 ± 0.01	0.90 ± 0.01	0.89 ± 0.01	0.85 ± 0.01
Age, Gyr	8.87 ± 0.16	8.92 ± 0.05	8.85 ± 0.05	8.90 ± 0.06	8.89 ± 0.04	8.89 ± 0.05	9.02 ± 0.05
$\lg(Z/Z_\odot)$	-0.27 ± 0.04	-0.25 ± 0.02	-0.29 ± 0.01	-0.29 ± 0.02	-0.27 ± 0.01	-0.29 ± 0.02	-0.24 ± 0.02

($0.2 < z < 0.45$) скоплениях галактик. Для диапазона масс $\lg M_*/M_\odot = [10.5; 11.0]$ оказалось, что у галактик поздних типов радиус $R_{90,r}$ при движении внутрь скоплений уменьшается примерно на 13%, а у галактик ранних типов — на 11%.

В данной работе мы также изучили изменение среднего радиуса Петросьяна $R_{90,r}$ галактик скопления А 2142 вдоль его радиуса для такого же диапазона звездных масс.

На рис. 3 показано изменение радиуса $R_{90,r}$ галактик с подавленным звездообразованием, членов скопления А 2142, вдоль нормированного радиуса R/R_{200} . Сплошная линия соответствует галактикам поздних типов ($fracDeV < 0.8$), штриховая — галактикам ранних типов ($fracDeV \geq 0.8$). Такими же горизонтальными линиями показаны значения для галактик поля. Можно сделать следующие выводы. В центральной области А 2142 QGs мало, но они есть. Возможно, это результат проекции галактик, не принадлежащих скоплению. У галактик поздних и ранних типов, попадающих в вирialized область скопления ($R < R/R_{200}$), радиусы $R_{90,r}$ постепенно уменьшаются к центру примерно на 30%. Причем можно заметить (рис. 3), что галактики ранних типов имеют максимальный

радиус $R_{90,r}$ вблизи «splashback»-радиуса, для галактик поздних типов этого не наблюдается. Таким образом, в богатом скоплении А 2142 все галактики с подавленным звездообразованием при массе $\lg M_*/M_\odot = [10.5; 11.0]$ показывают значительные уменьшения радиусов.

Поскольку скопление А 2142 очень массивное и на него падает много групп галактик и отдельных галактик даже возле радиуса $3.5R/R_{200}$ (можно видеть на рис. 2), QGs имеют радиусы $R_{90,r}$ несколько меньшие, чем в поле, хотя и в пределах ошибок. Также мы не обнаруживаем эффекта, найденного нами в статье Kopylova and Kopylov (2020) для близких скоплений галактик, когда комбинированные радиусы $R_{90,r}$ галактик поздних типов максимальны вблизи среднего комбинированного «splashback»-радиуса скоплений. Видимо, причина в том, что в А 2142 мы имеем дело только с массивными галактиками ($M_r < -20^m3$), в то время как в работе Kopylova and Kopylov (2020) в близких скоплениях нами изучены в основном более слабые и менее массивные галактики с $M_r > -20^m3$. Их в 1.5 раза больше, чем массивных галактик. То есть найденный нами эффект (хотя на этом не сделан акцент в работе Kopylova and Kopylov (2020)) проявляется в основном у галактик меньшего размера,

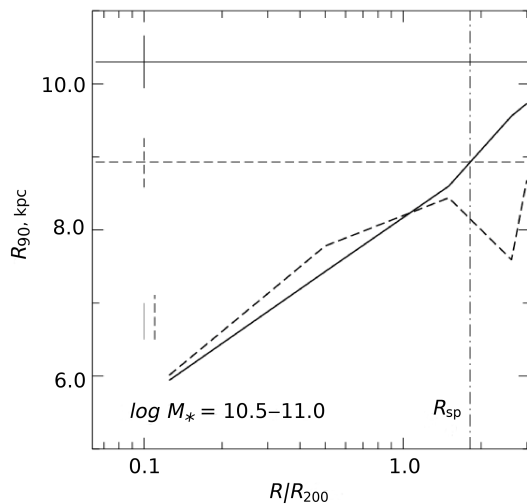


Рис. 3. Средний радиус Петросьяна $R_{90,r}$ в килопарсеках галактик с массами $\lg M_*/M_\odot = [10.5; 11.5]$ в зависимости от нормированного радиуса R/R_{200} . Штриховая ломаная линия соответствует галактикам ранних типов ($fracDeV \geq 0.8$), сплошная — галактикам поздних типов с $fracDeV < 0.8$. Средние значения $R_{90,r}$, полученные по галактикам поля, ранних и поздних типов, отмечены горизонтальными линиями того же вида. Вертикальными отрезками показаны средние ошибки измерений радиусов. Вертикальная линия соответствует радиусу R_{sp} скопления.

поскольку они легче поддаются разрушению в поле действия скоплений галактик. Известно, что вблизи радиуса R_{sp} происходит сгущивание галактик и газа (Adhikari et al. 2014), что влечет за собой ускорение темпов изменения галактик.

Скопления галактик можно рассматривать как лаборатории, где происходят трансформации галактик. В работах Sebrían and Trujillo (2014), Poggianti et al. (2013) показано, что галактики ранних типов в скоплениях меньше размером, чем в поле. Matharu et al. (2019), например, получили, что увеличение размеров пассивных и звездообразующих галактик ($z \sim 1$) в поле по сравнению со скоплениями можно объяснить столкновением и слиянием галактик. Namabata et al. (2019) нашли радиус скопления (r порядка $0.2h^{-1}$ Мпс, где $h = 0.7$), в пределах которого трансформации спиральных галактик наиболее эффективны.

В работе Pranger et al. (2017) показано, как окружающая среда влияет на спиральные галактики. Для выборки из 700 галактик ($z < 0.063$, данные SDSS) получено, что размеры спиральных галактик, по радиусу R_e как параметру, на 15% меньше в скоплениях, чем в поле, а параметр Серсика (*Sersic*) на 15% больше. Кроме того, цвет галактик ($g - r$) краснее в скоплениях.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

По данным каталога SDSS для самого яркого в рентгеновской области в местной Вселенной скопления галактик А 2142 нами рассмотрено как меняется: а) вдоль радиуса (в проекции) доля галактик ранних типов; б) доля галактик с подавленным звездообразованием в пределах ближайшей окрестности (до $3R/R_{200}$) в сравнении с данными для поля. В работе Kopylova and Kopylov (2020) были показаны изменения доли QGs в зависимости от звездной массы галактик. Массивные галактики ранних типов, как правило, располагаются в центре скопления галактик (Kopylova and Kopylov 2020). Составленная нами выборка QGs имеет звездные массы в диапазоне $\lg M_*/M_\odot = [10.5; 11.5]$ (64% из них в диапазоне $\lg M_*/M_\odot = [10.5; 11.0]$), то есть это массивные и яркие галактики. Нами приведены некоторые, полученные в указанной работе, характеристики этих галактик.

Ключевыми результатами этой работы являются следующие:

1. По наблюдаемому профилю скопления — интегральному распределению числа галактик в зависимости от квадрата расстояния от центра — найден «splashback»-радиус R_{sp} , который совпадает с апоцентрами орбит большинства галактик, уже побывавших в центре системы. Радиус R_{sp} скопления А 2142 равен 4.12 Мпс, $R_{sp}/R_{200c} = 1.81$ для критической плотности или $R_{sp}/R_{200m} = 1.13$ для средней плотности Вселенной.
2. Форма зависимости «цвет—величина» («красной последовательности» RS) не меняется в пределах рассмотренных диапазонов радиуса скопления (таблица 2). Мы получили RS в виде $(g - r) = -0.024(-0.023)M_r + 0.441(0.442)$.

Приведены коэффициенты формы и нуля-пункта для области с радиусом R_{sp} и за его пределами (в скобках). Доля галактик ранних типов за пределами R_{sp} равна значению для низкоплотной области, в качестве которой взято поле с координатами ($16^h 5, 31^\circ$) и радиусом $300'$ на тех же z . Галактики ранних типов в центре скопления являются более красными, имеют меньший эффективный радиус R_e , старше и более богаты металлами, чем за пределами вириального радиуса, $1-2R_{200}$ (таблица 2).

3. Доля галактик с подавленным звездообразованием ($-12 \text{ yr}^{-1} < \lg sSFR < -10.75 \text{ yr}^{-1}$) уменьшается на 28% за радиусом R_{sp} по сравнению с радиусом R_{200} и становится такой же, как в поле. Среди QGs только 22% являются галактиками поздних типов. Нами получено, что у таких галактик растут и индекс

концентрации, и доля балджа по направлению к центру скопления, то есть они становятся похожими на галактики ранних типов.

4. Найдено, что характеристики галактик с подавленным звездообразованием со звездной массой $\lg M_*/M_\odot = [10.5; 11.0]$ при попадании в богатое массивное скопление A 2142 сильно изменяются. Радиусы $R_{90,r}$ галактик поздних и ранних типов уменьшаются примерно на 30% в центре скопления по сравнению с радиусами вблизи границы гало скопления.

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>).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182** (2), 543 (2009).
2. S. Adhikari, N. Dalal, and R. T. Chamberlain, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2014** (11), 019 (2014).
3. H. Aihara, C. Allende Prieto, D. An, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **193** (2), 29 (2011).
4. S. Barsanti, M. S. Owers, S. Brough, et al., *Astrophys. J.* **857** (1), 71 (2018).
5. R. G. Carlberg, H. K. C. Yee, and E. Ellingson, *Astrophys. J.* **478** (2), 462 (1997).
6. M. Cebrián and I. Trujillo, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **444** (1), 682 (2014).
7. C. Conroy, J. E. Gunn, and M. White, *Astrophys. J.* **699** (1), 486 (2009).
8. D. Eckert, S. Molendi, M. Owers, et al., *Astron. and Astrophys.* **570**, A119 (2014).
9. M. Einasto, B. Deshev, P. Tenjes, et al., *Astron. and Astrophys.* **641**, A172 (2020).
10. C. P. Haines, A. Finoguenov, G. P. Smith, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **477** (4), 4931 (2018).
11. C. P. Haines, M. J. Pereira, G. P. Smith, et al., *Astrophys. J.* **775** (2), 126 (2013).
12. A. Hamabata, T. Oogi, M. Oguri, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **488** (3), 4117 (2019).
13. A. I. Kopylov and F. G. Kopylova, *Astrophysical Bulletin* **70** (3), 243 (2015).
14. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astronomy Letters* **39** (1), 1 (2013).
15. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **71** (3), 257 (2016).
16. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **73** (3), 267 (2018).
17. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **74** (4), 365 (2019).
18. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **75** (4), 376 (2020).
19. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov *Astrophysical Bulletin*, 2022 (in press).
20. A. Liu, H. Yu, A. Diaferio, et al., *Astrophys. J.* **863** (1), 102 (2018).
21. M. Markevitch, T. J. Ponman, P. E. J. Nulsen, et al., *Astrophys. J.* **541** (2), 542 (2000).
22. M. Markevitch and A. Vikhlinin, *Physics Reports* **443** (1), 1 (2007).
23. J. Matharu, A. Muzzin, G. B. Brammer, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **484** (1), 595 (2019).
24. L. Mayer, C. Mastropietro, J. Wadsley, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **369** (3), 1021 (2006).
25. A. Oemler, Jr., L. E. Abramson, M. D. Gladders, et al., *Astrophys. J.* **844** (1), 45 (2017).
26. K. A. Oman, M. J. Hudson, and P. S. Behroozi, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **431** (3), 2307 (2013).
27. M. S. Owers, P. E. J. Nulsen, and W. J. Couch, *Astrophys. J.* **741** (2), 122 (2011).
28. B. M. Poggianti, R. Calvi, D. Bindoni, et al., *IAU Symp.* **295**, 151 (2013).
29. B. M. Poggianti, I. Smail, A. Dressler, et al., *Astrophys. J.* **518** (2), 576 (1999).
30. F. Pranger, I. Trujillo, L. S. Kelvin, and M. Cebrián, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **467** (2), 2127 (2017).
31. M. Rossetti, D. Eckert, S. De Grandi, et al., *Astron. and Astrophys.* **556**, A44 (2013).
32. M. A. Strauss, D. H. Weinberg, R. H. Lupton, et al., *Astron. J.* **124** (3), 1810 (2002).
33. C. Tchernin, D. Eckert, S. Ettori, et al., *Astron. and Astrophys.* **595**, A42 (2016).
34. E. R. Tittley and M. Henriksen, *Astrophys. J.* **618** (1), 227 (2005).
35. T. Venturi, M. Rossetti, G. Brunetti, et al., *Astron. and Astrophys.* **603**, A125 (2017).
36. A. A. Vikhlinin, A. V. Kravtsov, M. L. Markevich, et al., *Physics—Uspekhi* **57** (4), 317 (2014).
37. A. R. Wetzel, J. L. Tinker, and C. Conroy, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **424** (1), 232 (2012).
38. A. R. Wetzel, J. L. Tinker, C. Conroy, and F. C. van den Bosch, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **432** (1), 336 (2013).

Galaxy Cluster A 2142: Halo Boundary, “Red Sequence”, Properties of Galaxies Based on SDSS**F. G. Kopylova¹ and A. I. Kopylov¹**¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

Here we present results of studying the dynamics of galaxies, properties of early-type galaxies, properties of galaxies with the quenched star formation (QGs) in the A 2142 cluster based on the archival data from the Sloan Digital Sky Survey Data (SDSS DR10). We found the observed halo boundary, the “splashback” radius R_{sp} , which is equal to 4.12 Mpc ($M_r < -20^{\text{m}3}$) and 4.06 Mpc ($M_r < -21^{\text{m}5}$) over the integral distribution of the number of galaxies as a function of the squared distance from the center. We have studied how early-type galaxies are distributed in the center and in the outskirts of the cluster (R/R_{200j3} , $M_r < -20^{\text{m}3}$) and plotted the “red sequence” in the form of $(g - r) = (-0.024 \pm 0.001)M_r + (0.441 \pm 0.005)$. Among all the cluster galaxies, the galaxies with the quenched star formation ($-12 \text{ yr}^{-1} < \log sSFR < 10.75 \text{ yr}^{-1}$) make up about one third. We have found that the fraction of QGs beyond the “splashback” radius R_{sp} is the same as in the field at the same z with coordinates of the center of $16^{\text{h}5, 31^{\circ}}$ and a size of $300'$. For galaxies with the stellar masses $\log M_*/M_{\odot} = [10.5; 11.0]$ (this is the main mass range of QGs), when entering the cluster, there is a decrease in the radii $R_{90,r}$ by about 30% when moving towards the center.

Keywords: *galaxies: clusters: general—galaxies: evolution—galaxies: star formation—galaxies: clusters: individual: A 2142*