

УДК 524.7-52/54, 524.77

ГАЛАКТИКИ С ПОДАВЛЕННЫМ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕМ В СКОПЛЕНИЯХ ГАЛАКТИК И ИХ ОКРЕСТНОСТЯХ

© 2020 Ф. Г. Копылова^{1*}, А. И. Копылов¹¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 27 марта 2020 года; после доработки 17 июля 2020 года; принята к публикации 17 июля 2020 года

В работе исследованы свойства галактик с подавленным звездообразованием (QGs) в пределах «splashback»-радиуса R_{sp} скоплений галактик и за его пределами по данным каталога SDSS. Мы использовали выборку из 40 групп и скоплений галактик и выборку галактик поля на $0.02 < z < 0.045$. Радиусы R_{sp} найдены нами по наблюдаемому интегральному распределению числа галактик в зависимости от квадрата расстояния от центра систем галактик. Мы показываем, что в скоплениях галактик 72% из найденных нами QGs находится в пределах R_{sp} . Около 40% из этих галактик являются галактиками поздних типов с $\text{fracDeV} < 0.8$. Примерно 80% галактик с подавленным звездообразованием имеют звездные массы в интервале $\lg M_*/M_\odot = [10; 11]$. Нами найдено, что QGs поздних типов и в меньшей степени ранних типов имеют максимальные угловые радиусы $R_{90,r}$ и $R_{50,r}$ вблизи «splashback»-радиуса групп и скоплений галактик. Полученные нами результаты подтверждают предположение о том, что в филаментах, направленных к скоплениям, QGs вблизи их границы более массивны, чем на периферии.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Скопления галактик — самые большие гравитационно связанные объекты — увеличивают свою массу, поглощая вдоль филаментов темную материю и светящееся вещество (группы галактик и галактики) из окружающего пространства (см., например, работу Colberg et al. 1999). В них наблюдается широкий диапазон пространственных плотностей галактик: высокоплотные области в центре и низкоплотные, почти поле, на периферии. Исследуя галактики в разном окружении, можно выяснить его роль в подавлении (уменьшении) звездообразования (SF) в галактиках (Balogh et al. 2004, Blanton and Moustakas 2009, Peng et al. 2010). При этом можно изучать действующие в скоплениях физические механизмы, приводящие к уменьшению SF и ответственные за трансформацию самих галактик (см., например, статью Boselli and Gavazzi 2006). Во внутренней среде скоплений галактик действуют различные механизмы, которые ведут к уменьшению количества газа в галактиках и в конечном итоге к уменьшению образования звезд. Это 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. Согласно наблюдательным данным и результатам моделирования, основным механизмом, приводящим к уменьшению газа, является его обдирание в результате лобового давления внутренней среды скоплений галактик (см., например, исследование Lotz et al. 2019). Наблюдательные данные (SDSS) показывают, что обдирание газа спиральных галактик при попадании в скопление происходит медленно (van der Wel et al. 2010, von der Linden et al. 2010). В течение 2–4 млрд. лет (Wetzel et al. 2014) после попадания галактики в скопление темп SF практически не меняется, затем происходит его быстрое затухание. Найдено, что подавление SF происходит эффективно у галактик со звездными массами $M_* = 10^9 - 10^{11.5} M_\odot$, то есть практически у всех галактик в скоплениях с массами более $10^{13} M_\odot$ (Oman and Hudson 2016) (данные SDSS + моделирование). Также считается, что SF должно уменьшаться до нуля при первом же прохождении галактики через центр скопления. По результатам наблюдений получено, что темп SF в звездообразующих галактиках непрерывно уменьшается от периферии к центру скоплений галактик (см., например, работы Pascagnella et al. 2016, von

*E-mail: flera@sao.ru

der Linden et al. 2010), и в скоплениях галактик он ниже, чем в поле (см., например, статьи Gavazzi et al. (2006), Haines et al. (2013)). Исследование темпа SF в окрестностях скоплений показало, что галактики с подавленным звездообразованием наблюдаются и за пределами вириальных радиусов скоплений. По данным SDSS и модельным расчетам найдено, что около массивных систем до 40% галактик являются вылетевшими из них галактиками с подавленным SF, и их орбиты могут доходить примерно до $2.5 R_{200m}$ (Wetzel et al. 2012), где R_{200m} — радиус сферы, в пределах которого плотность в системе превышает среднюю плотность Вселенной в 200 раз. Установлено также, что часть галактик могла лишиться газа в маломассивных группах, в составе которых они падают в скопление галактик (см., например, работу Balogh et al. 2000).

Среди галактик с подавленным SF в скоплениях галактик встречается значительное число спиральных галактик (van der Wel et al. 2010) (данные SDSS). В работе Hamabata et al. (2019) (данные SDSS и модельные расчеты) найден радиус скопления галактик $r \sim 0.6h^{-1}$ Мпк, ограничивающий область, внутри которой наблюдаются спиральные галактики, «красные» по цвету из-за подавления в них SF. Также в скоплениях галактик в локальной Вселенной (выборка галактик WINGS) встречаются переходные типы — от звездообразующих галактик к галактикам без SF (Pascagnella et al. 2016). Они встречаются в пределах $0.6 R_{200}$ и редки в поле. При рассмотрении скоплений как лабораторий, где происходят трансформации галактик, Cebrían and Trujillo (2014), Poggianti et al. (2013) показали, что галактики ранних типов в скоплениях имеют меньшие размеры, чем галактики поля.

Чтобы определить, как меняются вдоль нормированного радиуса (до $3R/R_{200}$) систем свойства галактик с подавленным звездообразованием, в данном исследовании мы использовали выборку из 40 скоплений галактик (Korylova and Korylov 2018; 2019). Она составлена из скоплений галактик с зарегистрированным рентгеновским излучением, располагающихся в областях сверхскоплений галактик Leo и Hercules. Кроме того, в выборку включены близкие системы: скопления A1367, A1656 и восемь групп галактик из работы Korylova and Korylov (2015). При выборе систем локальной Вселенной ($0.02 < z < 0.045$) мы стремились охватить максимальный диапазон дисперсий лучевых скоростей — от 300 км с^{-1} до 950 км с^{-1} . Для исследования отобраны галактики ярче $M_K = -21^m5$, что соответствует примерно $M_r = -18^m3$.

Работа выполнена нами с привлечением данных каталогов SDSS (Sloan Digital Sky Survey Data Release 10) (Ahn et al. 2014) и 2MASS XSC

(2MASX, Two-Micron ALL-Sky Survey Extended Source Catalog (Jarrett et al. 2000)), а также базы данных NED (NASA Extragalactic Database).

Статья организована следующим образом. Во втором разделе дано описание выборки галактик с подавленным SF, показаны окрестности скоплений галактик в единицах радиуса R_{200} . В третьем разделе рассмотрены характеристики QGs: распределения галактик по абсолютной звездной величине, по параметру, характеризующему вклад профиля Вокулера в профиль поверхностной яркости, по параметру, равному отношению длин осей галактик. Исследовано изменение радиусов, ограничивающих 90% и 50% потоков Петросьяна в полосе фильтра r ($R_{90,r}$, $R_{50,r}$), галактик ранних и поздних типов вдоль нормированного радиуса скоплений до $3R/R_{200}$. 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. ВЫБОРКА ГАЛАКТИК С ПОДАВЛЕННЫМ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕМ

Удельный темп звездообразования $sSFR$ в галактике определяется через интегральный темп звездообразования, поделенный на ее звездную массу $sSFR = SFR/M_*$. В распределении галактик по удельному темпу звездообразования $\lg sSFR$ обычно находят минимум, отделяющий галактики, активно образующие звезды (active galaxies), от галактик, у которых звездообразование подавлено (quenched galaxies, QGs), и галактик, у которых оно отсутствует (passive). Воспользовавшись данными об удельном темпе звездообразования и звездной массе галактик из каталога SDSS DR10, в наших работах (Korylova and Korylov 2018; 2019) мы отобрали QG-галактики и passive-галактики, руководствуясь условием $\lg sSFR < -10.75$ [год $^{-1}$]. Распределение галактик по удельному темпу звездообразования ($\lg sSFR$) имеет длинный хвост, тянущийся в область галактик без звездообразования. В данной работе галактики без звездообразования ($\lg sSFR < -12$ [год $^{-1}$] (Oemler et al. 2017)) мы в выборку не включили и рассматриваем только QGs, то есть галактики с $-12 < \lg sSFR < -10.75$ [год $^{-1}$].

Группы и скопления галактик нашей выборки имеют дисперсии лучевых скоростей σ в интервале $300\text{--}950 \text{ км с}^{-1}$, что соответствует массам $M_{200} = (0.7 - 12.4) \times 10^{14} M_\odot$. Весь интервал мы разбили на бины по σ , подвыборки в которых с числом объектов N показаны на рис. 2—рис. 4 линиями разного вида и цвета:

- 800–950 км с⁻¹, или $(10.5 - 14.7) \times 10^{14} M_{\odot}$, $N=2$;
 600–800 км с⁻¹, или $(4 - 9) \times 10^{14} M_{\odot}$, $N = 6$;
 500–600 км с⁻¹, или $(2 - 4) \times 10^{14} M_{\odot}$, $N = 7$;
 400–500 км с⁻¹, или $(1 - 2) \times 10^{14} M_{\odot}$, $N = 11$;
 300–400 км с⁻¹, или $(0.5 - 1) \times 10^{14} M_{\odot}$, $N = 14$.

При отсутствии в DR10 данных об удельном темпе звездообразования для объектов выборки (в основном для галактик ранних типов, расположенных в пределах радиуса R_{200}) мы оценили $sSFR$ по цветам $u-r$ и $g-r$ галактик, их абсолютным звездным величинам и по параметру $fracDeV$ на основе имеющихся измерений других галактик.

Для сравнения результатов нашего исследования мы также выбрали практически свободные от скоплений галактик два поля между сверхскоплениями Hercules и Leo. Первое имеет координаты центра ($14^{\text{h}}5$, 35°), радиус 300 угловых минут, диапазон красных смещений $0.030 < z < 0.045$ ($N = 219$), у второго поля при тех же красных смещениях и радиусе координаты центра ($13^{\text{h}}5$, 5°) ($N = 147$) (Korylova and Korylov 2018). Мы рассматриваем оба поля в сумме для улучшения статистики измерений.

Для всех объектов выборки мы построили и проанализировали фазовые диаграммы. Одна из них — для скопления галактик A 2040 — приведена на рис. 1 в качестве примера. На этой диаграмме указаны радиус R_{200}^1 , найденный нами по дисперсии лучевых скоростей галактик, и радиус R_{sp} , который мы определили по наблюдаемому профилю скопления (интегральному распределению числа галактик в зависимости от квадрата расстояния от центра скопления (Korylova and Korylov 2018; 2019)). Радиус R_{sp} (ранее радиус R_h , подробно описанный нами в работе Korylova and Korylov (2016)), отождествлен со «splashback»-радиусом и представляет собой границу скопления, где находятся апоцентры орбит галактик, вылетевших после первого посещения центра, то есть галактик, уже гравитационно связанных со скоплением. По оценкам Wetzel et al. (2012), вылетевшие галактики могут составлять до 40% всех галактик, находящихся в области между R_{sp} и R_{200} . Зелеными линиями модели Barsanti et al. (2018) на рис. 1 ограничена (примерно) вириализованная часть скопления галактик. Галактики за пределами этих линий предположительно впервые падают на скопление. Для остальных скоплений галактик результаты измерения радиуса R_{sp} приведены в работах Korylova and Korylov (2018; 2019). Там же

¹Радиус, в пределах которого плотность в системе превышает критическую плотность Вселенной в 200 раз.

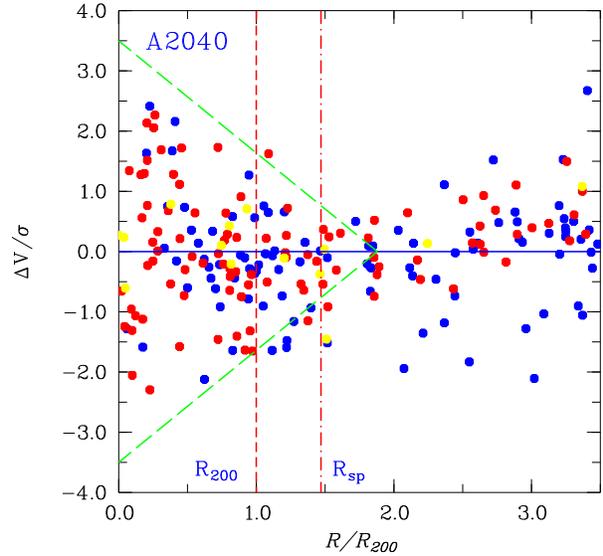


Рис. 1. Фазовая диаграмма: скорость в зависимости от радиуса. Скорость представляет собой отношение разности лучевых скоростей галактик и средней лучевой скорости скопления к дисперсии лучевых скоростей. Радиус R/R_{200} — расстояние галактики от центра скопления, нормированное на радиус R_{200} . Красными кружками показаны галактики с подавленным звездообразованием ($-12.0 < \lg sSFR < -10.75$ [год⁻¹]), желтыми обозначены галактики без звездообразования ($\lg sSFR < -12$ [год⁻¹]). Зелеными модельными линиями (Barsanti et al. 2018) ограничена область скопления с вириализованными членами.

нами показано на рисунках, что доля галактик с подавленным звездообразованием QGs уменьшается с увеличением радиуса скоплений галактик и к $3R/R_{200}$ приближается к значениям для поля.

3. СВОЙСТВА ГАЛАКТИК С ПОДАВЛЕННЫМ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕМ

3.1. Распределения QGs по абсолютной звездной величине, по вкладу профиля Вокулера в профиль поверхностной яркости и по соотношению длин осей

В 40 скоплениях галактик и их окрестностях нами найдено 2368 галактик с подавленным звездообразованием ($R/R_{200} < 3R/R_{200}$, $M_r < -18^{\text{m}}3$). Из них 72% находится во внутренних частях скоплений, в пределах нормированного радиуса R_{sp} . QGs поздних типов, классифицированные по параметру $fracDeV \leq 0.8$, составляют порядка 40%, остальные представляют собой галактики типов E, SO, Sa и SBa. Среди отобранных 2368 QGs 80% являются галактиками со звездными массами в интервале $\lg M_*/M_{\odot} = [10; 11]$, со средним значением $\lg M_*/M_{\odot} = 10.48 \pm 0.01$. Это соответствует

данным модельных расчетов, выполненных Contini et al. (2020).

На рис. 2a и 2b показаны распределения QGs по абсолютным звездным величинам в пределах нормированного радиуса R_{sp} и за его пределами. Ошибки в распределении небольшие (менее 0.1, кроме крайних точек), оцениваются как \sqrt{dN} , где dN — число галактик в интервале dM_r . Можно отметить, что в скоплениях галактик ($R < R_{sp}$) исследуемые галактики ярче (распределение имеет хвост в сторону ярких галактик), чем в поле (черная линия) во всех бинах, кроме бина, соответствующего группам галактик с $\sigma = 300\text{--}400 \text{ км с}^{-1}$. За пределами R_{sp} диапазон изменения абсолютных величин у групп галактик с самой низкой в выборке дисперсией лучевых скоростей (голубой цвет) меньше, чем у галактик в скоплениях и в поле. Выборка QGs в пределах R_{sp} имеет среднее значение абсолютной величины $\langle M_r \rangle = -20^m09 \pm 0.02$; за пределами R_{sp} и в поле QGs ярче: соответственно $\langle M_r \rangle = -20^m27 \pm 0.03$ и $\langle M_r \rangle = -20^m35 \pm 0.09$.

На рис. 3a и 3b показаны распределения галактик по параметру $fracDeV$, характеризующему вклад профиля Вокулера в профиль поверхностной яркости. Отметим, что нет какого-то выделенного диапазона дисперсий лучевых скоростей σ . Во всех бинах имеются спиральные галактики с $fracDeV < 0.4$ как в пределах R_{sp} и за его пределами, так и в поле. Количество QGs ранних типов с $fracDeV \geq 0.8$ в пределах R_{sp} и за его пределами на 25% и 38% больше, чем число спиральных галактик. В поле количество галактик указанных типов примерно одинаково.

На рис. 4a и 4b приведены распределения отношения длин осей b/a наблюдаемого профиля поверхностной яркости QGs в пределах радиуса R_{sp} и за его пределами. Можно отметить, что QGs имеют разнообразные отношения осей — от 0.25 до 1.00. В среднем отношение b/a равно для всех исследуемых областей 0.6 ± 0.01 , и число галактик со значениями b/a больше или меньше этого порога примерно одинаково в поле и в окрестностях скоплений галактик. Но в самих скоплениях галактик, в пределах R_{sp} , галактик с $b/a > 0.6$ больше на 14%. Кроме того, на рисунках можно заметить, что в распределении галактик поля особо выделяются спиральные галактики с $b/a < 0.4$.

По всем параметрам можно сделать общий вывод, что в окрестности самых маломассивных групп галактик меньше всего галактик с подавленным SF, даже по сравнению с полем (на рис. 2b, 3b и 4b голубые линии расположены ниже остальных).

3.2. Изменение размеров QGs вдоль радиуса скоплений галактик

Сравнение радиусов Петросяна можно использовать как независимый от расстояния до галактик метод изучения изменений их размеров. В каталоге SDSS приведены R_{50} и R_{90} , угловые радиусы Петросяна во всех фильтрах, содержащие 50% и 90% потоков Петросяна. Поток Петросяна в каком-либо фильтре измеряется как поток в пределах $2R_p$, где R_p — угловой радиус, в пределах которого отношение локальной поверхностной яркости на радиусе r к средней поверхностной яркости в пределах r равно 0.2. Мы использовали измерения в фильтре r . Согласно Raichoor and Andreon (2014), темп подавления звездообразования в скоплениях с массой $\lg M_{200}/M_\odot > 14$ (как в нашей выборке) не зависит от массы, богатства, обилия железа в скоплении. В работе Kopylova and Kopylov (2019) (рис. 7) нами показано, что изменение долей галактик с подавленным SF при фиксированной звездной массе одинаково во всех диапазонах масс, кроме бина с $\lg M_*/M_\odot = [11; 11.5]$ для скоплений галактик с $\sigma = 300\text{--}400 \text{ км с}^{-1}$. У таких систем за пределами вириального радиуса практически нет массивных галактик с подавленным SF. Поэтому, чтобы исследовать распределение размеров галактик вдоль нормированного на R_{200} радиуса, мы сложили все системы галактик.

Мы разделили QGs на две подвыборки: галактики ранних типов с $fracDeV \geq 0.8$ и галактики поздних типов с $fracDeV < 0.8$. На панелях рис. 5 показаны изменения среднего радиуса Петросяна $R_{90,r}$ вдоль нормированного радиуса скоплений галактик для каждой из подвыборок. Для сравнения приведены аналогичные значения радиуса Петросяна для галактик поля, а также средний радиус всех галактик выборки $\langle R_{sp} \rangle = (1.54 \pm 0.06) R_{200}$ (сплошная вертикальная линия) и диапазоны его изменения $R_{sp} = [1.9; 1.2]$ (Kopylova and Kopylov 2018; 2019).

Из 58% галактик ранних типов выборки 83% составляют галактики со звездными массами в интервале $\lg M_* = [10; 11]$, а среди галактик поздних типов — 74%. На рис. 5c и 5d показаны изменения угловых радиусов $R_{90,r}$ для этих галактик. Радиусы галактик поздних типов в интервале звездных масс $\lg M_* = [10; 10.5]$ и $\lg M_* = [10.5; 11.0]$ больше примерно на 20% и 13% вблизи радиуса R_{sp} по сравнению с центральными областями. Для радиусов галактик ранних типов в тех же диапазонах звездных масс изменение составляет около 11%. Нами получено, что подобное увеличение угловых радиусов галактик вблизи R_{sp} наблюдается и для $R_{50,r}$, но в меньшей степени: на 13% и 11% соответственно. За пределами R_{sp} скоплений галактик

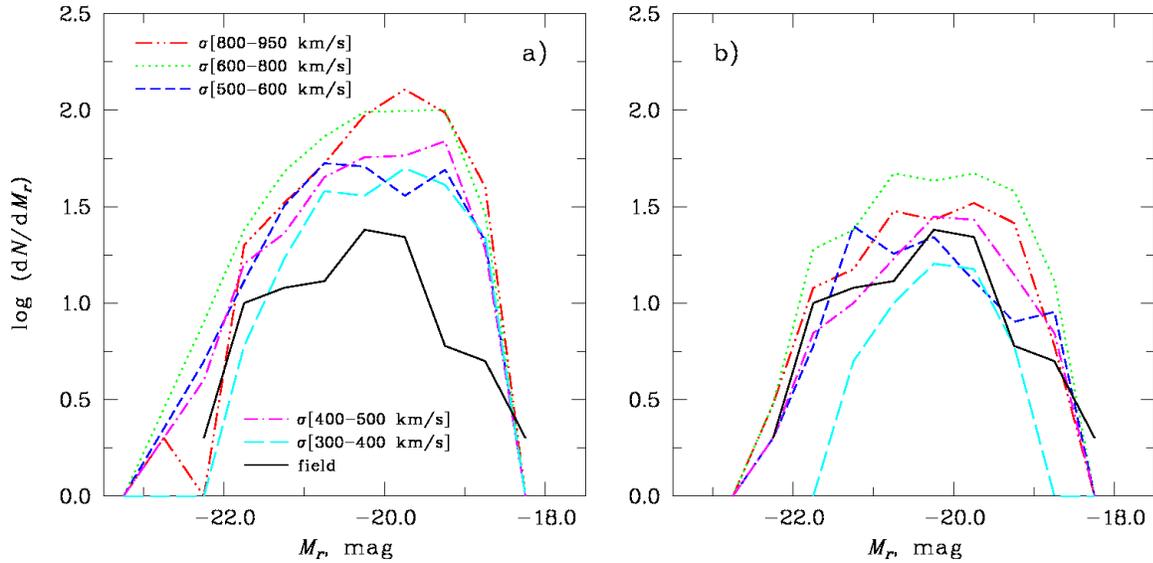


Рис. 2. Распределения QGs по абсолютной величине M_r ($M_r < -18^m 3$): (a) в пределах нормированного радиуса R_{sp} и (b) в области за ним ($R_{sp}/R_{200} < R/R_{200} < 3R/R_{200}$). Группы и скопления галактик разделены на бины по дисперсии лучевых скоростей σ и показаны разными кривыми. Сплошной черной линией показано распределение галактик в поле.

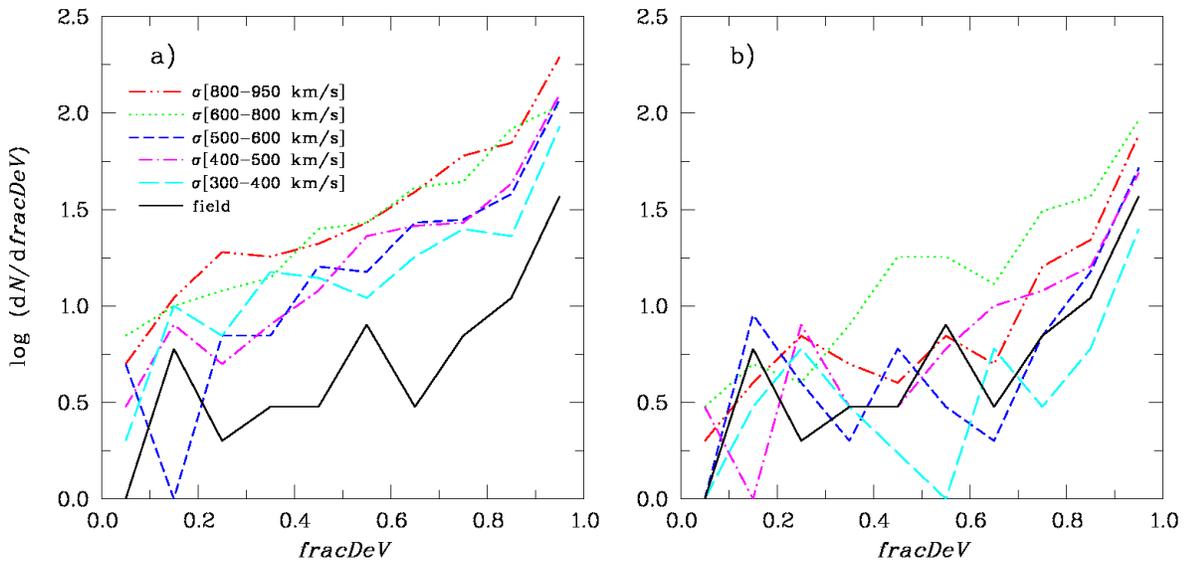


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но по параметру $fracDeV$ (SDSS), характеризующему вклад профиля Вокулера в профиль поверхностной яркости галактик.

угловые радиусы $R_{90,r}$ галактик уменьшаются до значений, близких к значениям поля. В области между R_{200} и R_{sp} наблюдаются разные галактики (рис. 1). Часть из них вылетела из скопления, а другая, движущаяся в противоположном направлении, только что подошла к нему. Поскольку размеры галактик в этой «пограничной» области больше, чем в центральных областях скоплений, можно предположить, что здесь в основном находятся галактики, не вылетевшие из системы, а падающие на нее.

Маломассивные галактики поздних типов в интервале масс $\lg M_* = [9.5; 10.0]$ (на рис. 5b даны синим цветом) практически не показывают изменений радиуса, а галактики ранних типов (красный цвет), наоборот, вырастают в размере примерно на 30% к центру скоплений галактик по сравнению с периферией. Размеры этих галактик больше, чем в поле, хотя данные для поля определяются неточно — в выборке мало галактик. Самые массивные галактики в интервале масс $\lg M_* = [11.0; 11.5]$ (рис. 5d) также не показывают суще-

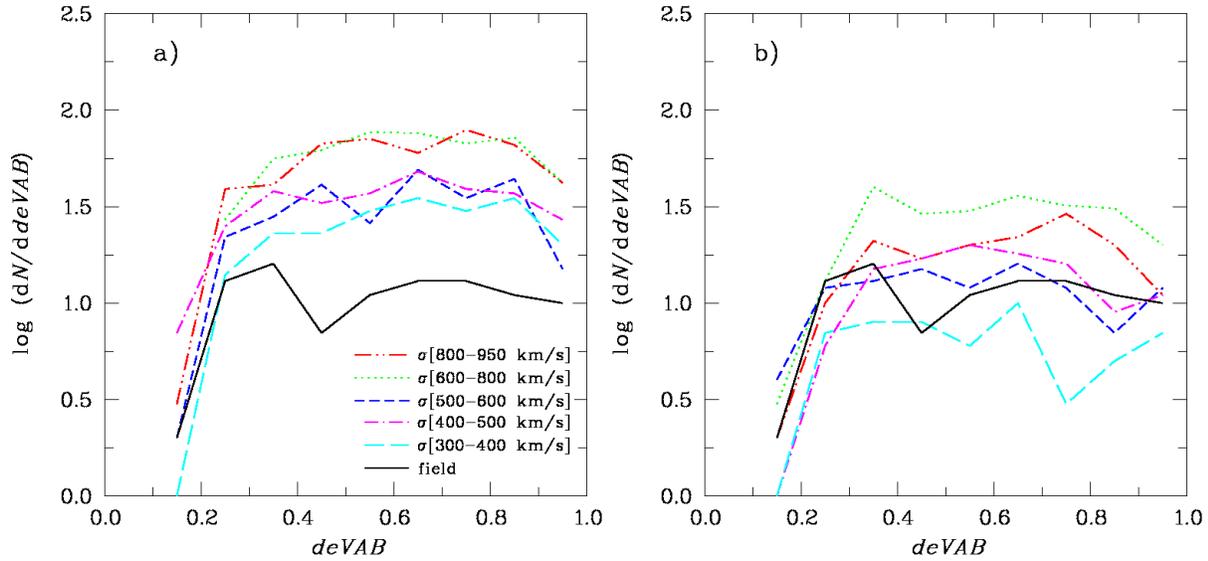


Рис. 4. То же, что и на рис. 2, но по параметру $DeVAB$, характеризующему отношение длин осей галактик.

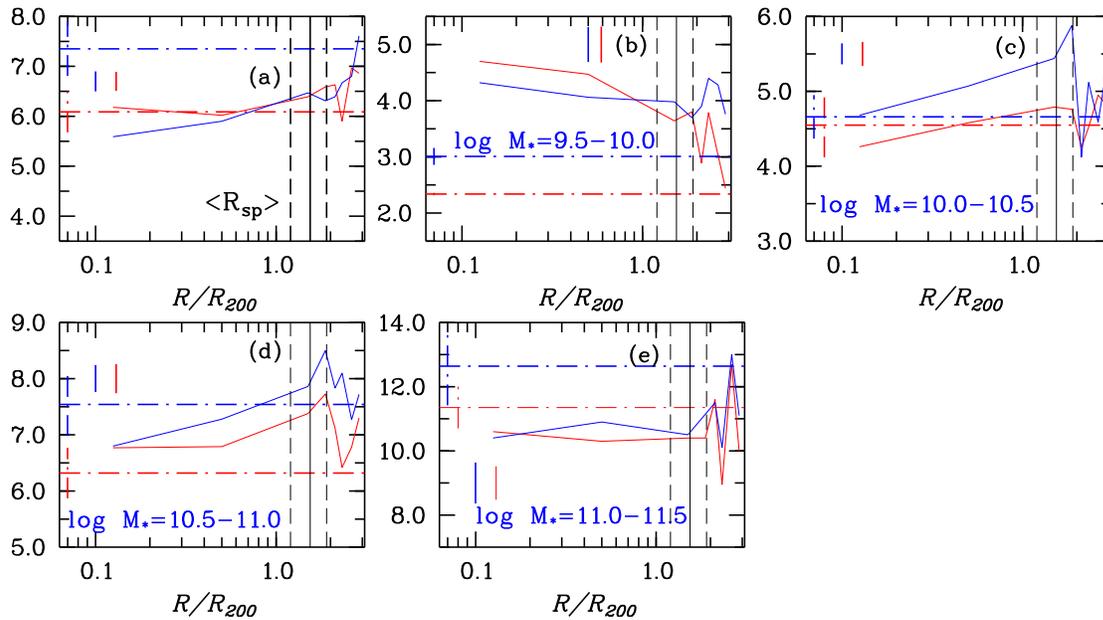


Рис. 5. Радиус Петросьяна R_{90} в килопарсеках в фильтре r в зависимости от нормированного радиуса R/R_{200} для всех галактик (a) и с разбиением на бины по звездной массе (b)–(e). Галактики скопления сложены в соответствии с нормированным радиусом. Красными сплошными линиями показаны QGs-галактики ранних типов, определенные по параметру $fracDeV \geq 0.8$, синими сплошными — галактики поздних типов с $fracDeV < 0.8$. Короткие красные и синие линии соответствуют средним ошибкам измерений радиусов. Сплошная и штриховые вертикальные линии демонстрируют средний R_{sp} и диапазон его изменения. Штрихпунктирными линиями показаны средние значения R_{90} для поля с барями ошибок.

ственных изменений размеров, хотя они все-таки меньше, чем галактики поля, особенно галактики поздних типов. На общем рис. 5а, где представлены все галактики без фиксирования звездной массы, показаны изменения радиуса $R_{90,r}$ галактик поздних типов — радиусы галактик увеличиваются на

25% к $3R/R_{200}$ и становятся такими, как в поле. При этом галактики ранних типов во внутренних частях скопления практически не отличаются от галактик поля, но к $3R/R_{200}$ наблюдается увеличение их размера на 12%.

Согласно, например, Rhee et al. (2020), ма-

ломассивные спиральные галактики на $z = 0.8$ с $\lg M_*/M_\odot = [9; 10]$ более устойчивы к обдиранию газа во внутренней среде скоплений галактик. Возможно, эти галактики имеют больше газа, сконцентрированного в центре. Благодаря этому звездообразование в них подавляется не полностью и продолжается еще длительное время после попадания в скопление, и это приводит к росту массы и размера.

Что касается массивных галактик, то в них газа мало и они теряют его быстрее, еще до попадания в скопление (Rhee et al. 2020) в пределах филаментов. Другие исследования выборки из 700 галактик ($z < 0.063$, данные SDSS) показывают, что размеры спиральных галактик в скоплениях на 15% меньше, чем в поле. В работе Poggianti et al. (2013) найдено, что и у галактик ранних типов в скоплениях размеры меньше, по сравнению с галактиками поля.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Подавление звездообразования в скоплениях галактик и их окрестностях является следствием потери газа в гало галактики, в диске и в ее внутренних областях. Это приводит к тому, что у галактики не хватает «топлива» для того, чтобы образовывать звезды. При этом важную роль играют как процессы, воздействующие на галактику внутри скоплений галактик, так и те процессы, которые воздействуют в группах меньших масс и в филаментах, подходящих к скоплению. Исследованию свойств галактик в филаментах посвящено несколько работ. Используя обзор GAMA, Alpaslan et al. (2016) обнаружили, что изолированные спиральные галактики имеют более высокие звездные массы и более низкие значения темпа SF в центральных областях филаментов, чем на их периферии. Данные обзора SDSS позволили Chen et al. (2017) также сделать вывод о том, что при одной и той же локальной плотности галактики вблизи филаментов более массивные, чем вне их. Изучение подавления SF в окрестностях четырнадцати скоплений галактик обзора WINGS показало, что этот процесс наиболее эффективен в направлении филаментов (Salerno et al. 2020). В работе Santiago-Bautista et al. (2020) также показано, что в филаментах галактики более массивные и темп SF в них ниже, чем в окружающем поле. Делается вывод, что, вероятно, галактики здесь испытывают слияние с другими галактиками (merging), то есть филаменты оказывают существенное влияние на эволюцию галактик. Согласно нашим исследованиям, QGs позднего типа, имеющие максимальный угловой радиус $R_{90,r}$ вблизи R_{sp} , видимо, уже потеряли газ в составе маломассивных групп при подлете к скоплению вдоль филаментов.

Темп звездообразования уменьшается с увеличением локальной плотности галактик; в скоплениях галактик это соответствует уменьшению расстояния от центра (Balogh et al. 2004). Существует несколько моделей подавления SF в галактиках скоплений. Модель быстрого подавления («rapid quenching model») — SF подавляется в течении короткого времени (менее 1 млрд. лет) после того, как галактика попала в скопление (см., например, статью Balogh et al. (2000)). В работах Taranu et al. (2014), von der Linden et al. (2010) рассмотрена модель медленного подавления SF. Наилучшим образом подавление SF в галактиках описывает модель «delayed-then-rapid», в которой в галактике при попадании в скопление несколько млрд. лет SF не меняется, а потом быстро подавляется (Foltz et al. 2018, Fossati et al. 2017, Wetzel et al. 2013).

Мы отобрали галактики с подавленным звездообразованием ($-12.0 < \lg sSFR < -10.75$ [год⁻¹]) в выборке из 40 скоплений галактики ($0.02 < z < 0.045$), расположенных, в основном, в сверхскоплениях Leo, Hercules и Coma. Чтобы изучить, как меняются свойства QGs вдоль радиуса, мы нашли наблюдаемый «splashback»-радиус скоплений галактик. Он показывает границу, где расположены как вылетевшие после первого прохода системы галактики, так и впервые приблизившиеся к ней в составе филаментов. Основная часть QGs-выборки (около 80%) находится в пределах радиуса R_{sp} с абсолютными величинами $\langle M_r \rangle = -20.09 \pm 0.02$. Если QGs разделить на бины по звездной массе, то 80% галактик имеют звездные массы в интервале $\lg M_*/M_\odot = [10; 11]$ со средним значением $\lg M_*/M_\odot = 10.48 \pm 0.01$. Выборка QGs имеет также следующие средние параметры по данным SDSS: $\langle fracDeV \rangle = 0.76 \pm 0.01$ и $\langle DeVAB \rangle = 0.61 \pm 0.01$. Среди галактик с подавленным SF порядка 40% составляют галактики поздних типов в пределах R_{sp} . Среди галактик поздних типов с отношением осей $b/a < 0.6$ 63% находятся в пределах R_{sp} , а 72% — за его пределами.

Радиусы галактик поздних типов в интервале звездных масс $\lg M_* = [10; 10.5]$ и $\lg M_* = [10.5; 11.0]$ больше примерно на 20% и 13% вблизи радиуса R_{sp} , чем в центральных областях. Радиусы галактик ранних типов для тех же диапазонов звездных масс изменились примерно на 11%. За «splashback»-радиусом R_{sp} скоплений галактик угловые радиусы $R_{90,r}$ галактик уменьшаются до значений, близких к значениям поля. Основные результаты нашей работы можно сформулировать следующим образом: размеры основной массы QGs-галактик

поздних типов (в меньшей степени галактик ранних типов) и угловые радиусы Петросяна $R_{90,r}$, $R_{50,r}$ максимальны вблизи границы скоплений галактик, определенной «splashback»-радиусом R_{sp} .

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>), Two Micron All Sky Survey (2MASS, <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/releases/allsky/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. P. Ahn, R. Alexandroff, C. Allende Prieto, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **211** (2), 17 (2014).
2. M. Alpaslan, M. Grootes, P. M. Marcum, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **457** (3), 2287 (2016).
3. M. L. Balogh, I. K. Baldry, R. Nichol, et al., *Astrophys. J.* **615**, L101 (2004).
4. M. L. Balogh, J. F. Navarro, and S. L. Morris, *Astrophys. J.* **540**, 113 (2000).
5. S. Barsanti, M. S. Owers, S. Brough, et al., *Astrophys. J.* **857** (1), 71 (2018).
6. M. R. Blanton and J. Moustakas, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **47** (1), 159 (2009).
7. A. Boselli and G. Gavazzi, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **118**, 517 (2006).
8. M. Cebrián and I. Trujillo, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **444** (1), 682 (2014).
9. Y.-C. Chen, S. Ho, R. Mandelbaum, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **466** (2), 1880 (2017).
10. J. M. Colberg, S. D. M. White, A. Jenkins, and F. R. Pearce, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **308** (3), 593 (1999).
11. E. Contini, Q. Gu, X. Ge, et al., *Astrophys. J.* **889** (2), 156 (2020).
12. R. Foltz, G. Wilson, A. Muzzin, et al., *Astrophys. J.* **866** (2), 136 (2018).
13. M. Fossati, D. J. Wilman, J. T. Mendel, et al., *Astrophys. J.* **835** (2), 153 (2017).
14. G. Gavazzi, A. Boselli, L. Cortese, et al., *Astron. and Astrophys.* **446** (3), 839 (2006).
15. C. P. Haines, M. J. Pereira, G. P. Smith, et al., *Astrophys. J.* **775** (2), 126 (2013).
16. A. Hamabata, T. Oogi, M. Oguri, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **488** (3), 4117 (2019).
17. T. H. Jarrett, T. Chester, R. Cutri, et al., *Astron. J.* **119**, 2498 (2000).
18. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **70** (2), 123 (2015).
19. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **71** (3), 257 (2016).
20. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **73** (3), 267 (2018).
21. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **74** (4), 365 (2019).
22. M. Lotz, R.-S. Remus, K. Dolag, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **488** (4), 5370 (2019).
23. A. Oemler, Jr., L. E. Abramson, M. D. Gladders, et al., *Astrophys. J.* **844** (1), 45 (2017).
24. K. A. Oman and M. J. Hudson, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **463**, 3083 (2016).
25. A. Paccagnella, B. Vulcani, B. M. Poggianti, et al., *Astrophys. J.* **816**, L25 (2016).
26. Y.-j. Peng, S. J. Lilly, K. Kovač, et al., *Astrophys. J.* **721** (1), 193 (2010).
27. B. M. Poggianti, R. Calvi, D. Bindoni, et al., *IAU Symp.* **295**, pp. 151–154 (2013).
28. A. Raichoor and S. Andreon, *Astron. and Astrophys.* **570**, A123 (2014).
29. J. Rhee, R. Smith, H. Choi, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **247** (2), 45 (2020).
30. J. M. Salerno, H. J. Martínez, H. Muriel, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **493** (4), 4950 (2020).
31. I. Santiago-Bautista, C. A. Caretta, H. Bravo-Alfaro, et al., *Astron. and Astrophys.* **637**, A31 (2020).
32. D. S. Taranu, M. J. Hudson, M. L. Balogh, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **440** (3), 1934 (2014).
33. A. van der Wel, E. F. Bell, B. P. Holden, et al., *Astrophys. J.* **714** (2), 1779 (2010).
34. A. von der Linden, V. Wild, G. Kauffmann, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **404** (3), 1231 (2010).
35. A. R. Wetzel, J. L. Tinker, and C. Conroy, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **424**, 232 (2012).
36. A. R. Wetzel, J. L. Tinker, C. Conroy, and F. C. van den Bosch, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **432** (1), 336 (2013).
37. A. R. Wetzel, J. L. Tinker, C. Conroy, and F. C. van den Bosch, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **439**, 2687 (2014).

Quenched Galaxies in Clusters of Galaxies and their Outskirts**F. G. Kopylova¹ and A. I. Kopylov¹**¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

Based on the SDSS catalog data the properties of galaxies with quenched star formation (QGs) within the \tilde{r}_c -radius of galaxy clusters R_{sp} and beyond it have been studied. We used a sample of 40 groups and galaxy clusters and a sample of field galaxies at $0.02 < z < 0.045$. The radii R_{sp} were defined from the observed integral distribution of the number of galaxies as a function of the squared distance from the center of the galaxy systems. We show that in galaxy clusters 72% of the QGs we have found are within R_{sp} . About 40% of these galaxies are late-type ones with $frac{DeV} < 0.8$. Approximately 80% of galaxies with quenched star formation have stellar masses in the range of $\lg M_*/M_\odot = [10; 11]$. We found that QGs of late types and of early types in a less degree have maximum angular radii $R_{90,r}$ and $R_{50,r}$ near the \tilde{r}_c -radius of groups and clusters of galaxies. Our results confirm the assumption that in the filaments directed toward clusters the quenched galaxies are more massive near to the boundaries than at the outskirts.

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