

ЭВОЛЮЦИЯ ГРУПП ГАЛАКТИК

© 2017 Ф. Г. Копылова*, А. И. Копылов

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 19 декабря 2016 года; принята в печать 29 марта 2017 года

В работе изучены вариации свойств групп галактик с динамическими массами $10^{13} M_{\odot} < M_{200} < 10^{14} M_{\odot}$, представляющих собой две выборки: одна имеет красные смещения $z < 0.027$ и расположена в области скопления Coma, другая, с $z > 0.027$, в областях сверхскоплений галактик Hercules, Leo, Bootes, Ursa Major и Corona Borealis. Используя архивные данные каталогов SDSS и 2MASX, мы определили концентрацию галактик в системах, измеряя ее как внутреннюю плотность группы в пределах расстояния до пятой ближайшей к центру галактики ярче $M_K = -23^m$. Также нами измерены разность звездных величин первой и четвертой по яркости галактик $\Delta M_{1,4}$ в пределах половины выбранного радиуса R_{200} , доля галактик ранних типов и отношение числа ярких карликовых галактик ($M_r = [-18^m, -16^m]$) к гигантским ($M_r < -18^m$) (ОКГ) в пределах радиуса R_{200} . Основная цель исследования — найти среди этих характеристик те, которые отражают эволюцию групп галактик. Нами определено, что отношение числа ярких карликовых галактик к гигантским галактикам ранних типов на красной последовательности зависит только от рентгеновской светимости: ОКГ растет с увеличением светимости. Доля галактик ранних типов в рассматриваемых системах в среднем равна 0.65 ± 0.01 , при этом у галактик с $\sigma_{200} < 300$ км с⁻¹ наблюдаются ее значительные вариации. По светимости ярчайшей галактики, по разности звездных величин ярчайшей и четвертой по яркости галактик групп и по модельным расчетам этих параметров нами выделены четыре кандидата в реликтовые группы: AWM 4, NGC 0533, NGC 0741 и NGC 6098 (с двойной ярчайшей). В построенной нами составной функции светимости (ФС) систем галактик с $z < 0.027$ в диапазоне $M_K = [-26^m, -21^m]$ рост числа слабых галактик (параметр α функции Шехтера меньше 1) не наблюдается, в то время как ранее для ФС сверхскоплений галактик Hercules и Leo мы получили $\alpha > 1$.

Ключевые слова: галактики: кинематика и динамика — галактики: расстояния и красные смещения — галактики: группы: общее

1. ВВЕДЕНИЕ

Около половины галактик во Вселенной находится в небольших группах (см., например, [1–3]). Согласно теории иерархического сгущивания, скопления галактик — это молодые системы, растущие за счет поглощения групп или скоплений галактик. Среди небольших групп галактик некоторые образовались первыми, то есть среди них присутствуют как молодые, так и старые системы. Согласно модельным расчетам (например, [4]), доля ранее образовавшихся («fossil» — реликтовых) групп составляет 3–4% в любой популяции систем галактик, даже в скоплениях. Предполагается, что эти группы являются окончательным продуктом слияния галактик, основная масса которых накоплена в более ранние эпохи на больших z . Модельные расчеты [5] показывают, что найти эти реликтовые с эволюционной точки зрения группы галактик можно по разнице звездных величин первой и

второй по яркости галактик системы, $\Delta M_{1,2} \geq 2$ в фильтре R и в пределах радиуса группы $0.5 R_{200}^1$ или первой и четвертой галактик, $\Delta M_{1,4} \geq 2.5$ (в пределах того же радиуса). Последний критерий наиболее эффективен при поиске групп с массой $M_{200} \leq 10^{14} M_{\odot}$. Кроме этих параметров, реликтовые группы также характеризуются рентгеновской светимостью $L_{X,\text{bol}} \geq 0.47 \times 10^{42}$ эрг с⁻¹ [6]. По полуаналитическим модельным расчетам следующие четыре характеристики групп галактик: полная светимость группы (как показатель ее массы), светимость ярчайшей галактики, координаты центра, определенного по светимости галактик и $\Delta M_{1,2}$, позволяют с определенной вероятностью судить о динамическом возрасте системы галактик точнее, чем одна характеристика $\Delta M_{1,2}$ [7].

Модельные расчеты [8] с использованием ло-

¹Радиус R_{200} ограничивает размеры области, в пределах которой плотность в системе превышает критическую плотность Вселенной в 200 раз.

*E-mail: flera@sao.ru

гарифма разницы масс группы (темного гало) и самой массивной галактики группы как индикатора возраста гало позволяют делать выводы о возрасте группы и концентрации темного гало, а также найти среди реликтовых групп более молодые системы. В [9] по данным SDSS-DR6 и полуаналитическим моделям найдено, что наиболее чувствительны к возрасту группы степень ее изолированности, определяемая как расстояние до ближайшей группы в величинах вириального радиуса, и концентрация галактик, вычисленная по расстоянию от центра группы до пятой из галактик ярче $M_r = -20^m5$. Динамический статус группы трудно определить: члены группы могут быть гравитационно не связанными. Изучение окружающих областей групп, анизотропии распределения галактик должны помочь с ответом на этот вопрос [10].

Данные наблюдений в рамках программы по изучению происхождения реликтовых групп подтверждают такую точку зрения: самые старые и вириализованные реликтовые группы можно найти только среди маломассивных групп [11]. Для этих групп определено, что чем больше разница звездных величин первой и второй по яркости галактик, тем слабее характеристическая величина M^*_{FC} и тем меньше параметр α [12]. В указанной работе делается вывод об отличии популяций галактик в реликтовых и нереликтовых системах, что отражается в функции светимости галактик.

Целью данной работы является изучение свойств близких групп галактик из [13], у которых σ_{200} (дисперсия лучевых скоростей в пределах радиуса R_{200} , далее просто σ) не превышает 420 км с^{-1} , а также имеющих красные смещения $z < 0.027$ и более далеких групп галактик, расположенных преимущественно в областях сверхскоплений галактик Leo, Hercules, Ursa Major, Corona Borealis и Bootes. Предполагается, что определяемые нами такие характеристики систем, как концентрация галактик, разность звездных величин первой и четвертой по яркости галактик, доля галактик ранних типов, величина отношения числа ярких карликовых галактик к числу гигантских (ОКГ, или DGR — Dwarf-to-Giant Ratio), должны помочь прояснить эволюционный статус систем галактик и найти среди них древние реликтовые системы. В выборке 36 групп галактик с $\sigma < 420 \text{ км с}^{-1}$ и $z < 0.027$ и 48 групп галактик с $z > 0.027$ и $\sigma < 420 \text{ км с}^{-1}$.

Часто группы определяют как ассоциации галактик, такие же, как скопления, но с меньшей массой $M < 10^{14} M_{\odot}$ и, соответственно, меньшей дисперсией лучевых скоростей $\sigma < 400 \text{ км с}^{-1}$ (например, [14]). Мы определили, что физические параметры групп и скоплений галактик, имеющих массы $M_{200} > 10^{13} M_{\odot}$, лежат на общей фундаментальной плоскости [15], то есть можно отметить,

что такая выборка представлена однородными вириализованными в пределах радиуса R_{200} объектами. Однородность систем галактик подобных масс отмечена в [16], где показано, что в таких группах не происходит существенной трансформации галактик, которая если ранее и имела место, то в менее массивных системах. Кроме того, наша выборка включает 97 богатых скоплений галактик, расположенных в сверхскоплениях и вне сверхскоплений и имеющих зарегистрированное излучение в рентгеновской области. Результаты исследования части из них опубликованы в [15].

Настоящая работа выполнена нами с привлечением данных каталога SDSS (Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 [17] и частично R8), данных каталога 2MASS XSC (Two-Micron ALL-Sky Survey Extended Source Catalog [18]) и NED (NASA Extragalactic Database). Статья организована следующим образом. Во втором разделе описаны процедуры определения K_s -светимости (далее просто K) систем галактик, а также доли галактик ранних типов, ОКГ, концентрации галактик, разности звездных величин первой и четвертой по яркости галактик. В третьем разделе описано получение составной функции светимости групп галактик в интервале звездных величин $M_K = [-26^m, -20^m5]$. 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. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ГАЛАКТИК

В данной работе для определения характеристик рассматриваемых систем в оптическом диапазоне, например, разности звездных величин первой и четвертой по яркости галактик, важно было повысить полноту выборки галактик в системах. Полнота изучаемых нами систем галактик определяется полнотой спектральных данных каталога SDSS. При соблюдении условий $r_{\text{pet}} < 17^m77$ и $\langle \mu_r \rangle < 24^m5 \square''$ (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% [19], а для ярких галактик — 95%.

Для повышения спектральной полноты (для ярких галактик) мы добавили из базы данных NED отсутствующие в SDSS измерения лучевых скоростей (от 1 до 10 для разных систем галактик). Если в NED таких измерений не было, в качестве вероятных членов скоплений были выбраны яркие

галактики ранних типов красной последовательности [20] (от 1 до 5 галактик) по диаграммам цвет–величина $(u - r, r)$, $(g - r, r)$ и $(r - i, r)$ из работы [21]. Для групп галактик NGC 3022, NGC 3091, NGC 4759, NGC 5306, IC 0186 и SS2b 164 в каталоге SDSS данные отсутствовали, поэтому мы использовали только сведения из NED и 2MASX.

Полную K -светимость скоплений галактик мы вычисляли по данным фотометрии, представленным в окончательной версии каталога 2MASX для протяженных объектов [18]. Он имеет высокую полноту для галактик ярче 13^m5 в фильтре K . Для более слабых галактик 2MASX, имеющих спектральные измерения в каталоге SDSS, мы использовали метод, суть которого состоит в определении цвета $r - K$ для галактики на основе измерений ее петросьяновских параметров в фильтре r и цвета $u - r$. Этот способ применен нами и описан при рассмотрении сверхскоплений Ursa Major [22]. Учитывая, что $(r - K)$ -цвет галактик ранних типов, которых в пределах R_{200} большинство, в среднем равен $2^m6 - 2^m8$, предел нашей выборки галактик с индивидуальными оценками величин в полосе K примерно равен 15^m .

Определение динамических характеристик систем галактик — лучевой скорости, дисперсии лучевой скорости, радиуса R_{200} и других параметров групп с $z < 0.027$ — описано в [23]. Аналогичные параметры для более далеких групп в сверхскоплении Ursa Major приведены в [22], в сверхскоплении Leo — [24], а в сверхскоплении Hercules — в [25]. Параметры систем галактик остальных сверхскоплений галактик Corona Borealis и Bootes опубликованы в [15].

2.1. Доля галактик ранних типов в пределах радиуса R_{200}

Галактики ранних типов мы отбирали (в фильтре r) по следующим критериям: $fracDeV \geq 0.8$, где параметр $fracDeV$, согласно каталогу SDSS, характеризует вклад балджа в профиль поверхностной яркости галактики; $r_{90}/r_{50} \geq 2.6$, где индекс концентрации $c = r_{90}/r_{50}$ равен отношению радиусов, ограничивающих 90% и 50% потоков Петросьяна. Кроме того, были сделано ограничение по цвету $u - r$: $\Delta(u - r) > -0.2$, что следует из полученной нами зависимости цвета $u - r$ от петросьяновской звездной величины для скоплений, например, системы Her: $u - r = -0.078 r_{pet} + 3.81$ с $2\sigma = -0.2$. В нашей выборке присутствуют системы с красными смещениями в интервале от 0.012 до 0.09. Ориентируясь на самую далекую систему, мы взяли в качестве предельной звездной величины $M_K = -23^m3$. Она соответствует звездной величине $K \sim 14^m5$ для самого далекого скопления A2142.

2.2. ОКГ на красной последовательности групп галактик в пределах радиуса R_{200}

Яркие карликовые галактики ранних типов занимают на красной последовательности [20] интервал звездных величин $M_r = [-18^m5, -16^m5]$. Галактики ярче $M_r = -18^m5$ мы отнесли к гигантским галактикам ранних типов. Спектральный предел каталога SDSS ($r_{pet} < 17^m77$) позволяет найти эти галактики только для очень близких групп с $z < 0.015$. Для остальных систем мы воспользовались фотометрическими данными до $r_{pet} = 20^m$ и фотометрическими красными смещениями, чтобы построить красную последовательность и отобрать яркие карликовые галактики поочередно на трех диаграммах цвет–величина: $(u - r, M_r)$, $(g - r, M_r)$, $(r - i, M_r)$ [21]. Чтобы уменьшить влияние фоновых галактик, мы ограничились пределом $r_{pet} \sim 20^m$. Это позволило нам определить ОКГ для групп галактик с $z < 0.05$. А учет фоновых галактик, попадающих на красную последовательность группы в области ярких карликовых галактик, мы сделали по фоновым галактикам с измеренными лучевыми скоростями.

Доля горячего газа групп галактик, дисперсия лучевых скоростей галактик, богатство или полная светимость — основные параметры, характеризующие массу систем галактик. Количество галактик (богатство [26] в первом приближении) нами определено как число галактик до $M_K = -21^m$ в пределах радиуса R_{200} . У систем с $z > 0.035$ (с $M_K < -21^m$) количество галактик оценено по функции светимости [22]. Мы исследовали зависимости этих характеристик от ОКГ и доли галактик ранних типов. Для рентгеновской светимости они приведены на рис. 1а и рис. 1б соответственно. Выборка групп с $\sigma < 420$ км с⁻¹ и $z < 0.027$ представлена заполненными кружками, выборка остальных групп — пустыми кружками, точками показаны скопления галактик с $\sigma > 420$ км с⁻¹. Можно отметить, что и для маломассивных систем галактик с $L_X \sim 0.15 \times 10^{44}$ эрг с⁻¹, и для более массивных существует слабая зависимость ОКГ от рентгеновской светимости системы: в более массивных системах больше ярких карликовых галактик. Для групп галактик NGC 0741 и NGC 7385 с самой большой величиной ОКГ в Слоановском обзоре не было спектральной информации, что не позволило учесть фон.

В среднем доля галактик ранних типов в скоплениях равна 0.65 ± 0.01 и практически не меняется с рентгеновской светимостью, богатством или дисперсией лучевых скоростей. В изучаемых группах галактик (заполненные и пустые кружки на рис. 1) также наблюдается слабая зависимость величины этой характеристики от рентгеновской светимости: шесть групп имеют самую низкую, меньше 0.4,

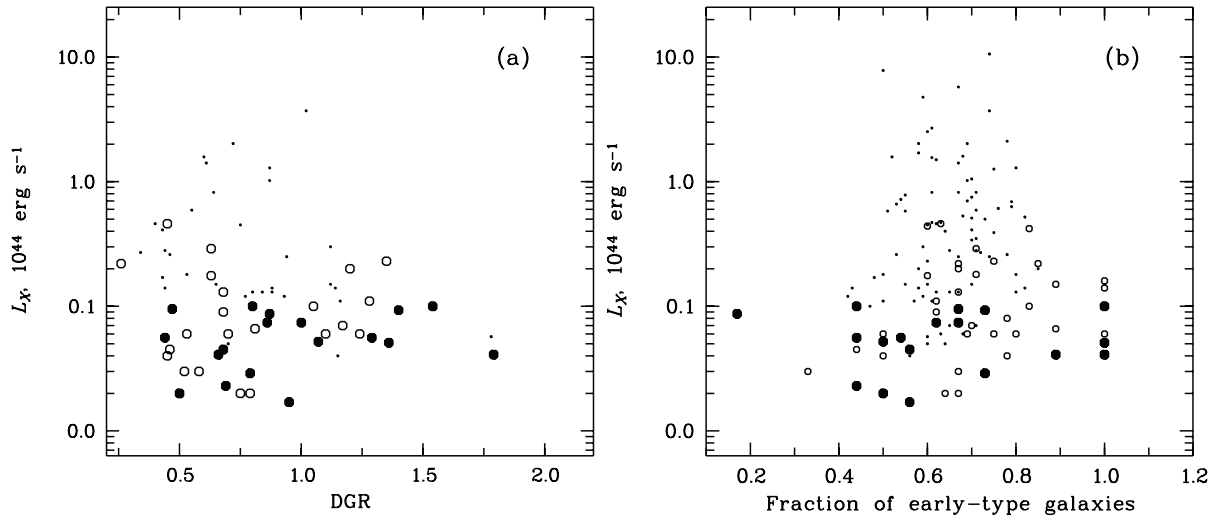


Рис. 1. Зависимость рентгеновской светимости (а) от численного отношения ярких карликовых галактик ($M_r = [-18^m5, -16^m5]$) к гигантским ($M_r < -18^m5$), (б) от доли галактик ранних типов ($M_K < -23^m3$). Системы галактик с $z < 0.027$ и $\sigma < 420 \text{ км с}^{-1}$ показаны заполненными кружками, с $z > 0.027$ и $\sigma < 420 \text{ км с}^{-1}$ — пустыми кружками, точками — богатые системы галактик с $\sigma > 420 \text{ км с}^{-1}$.

долю галактик ранних типов, но лишь у двух из них, RXCJ 1057 и NGC 5129, зарегистрировано рентгеновское излучение. В то же время девять групп из всей выборки (при $M_K < -23^m3$) состоят только из галактик ранних типов, а сведений о рентгеновском излучении нет для трех. Наибольшие вариации доли галактик ранних типов наблюдаются у групп $0\sigma < 300 \text{ км с}^{-1}$.

2.3. Разница звездных величин ярчайших галактик, концентрация галактик

Разница звездных величин ярчайшей и второй по яркости галактик группы $\Delta M_{1,2}$ определена нами в фильтрах K и r в пределах радиуса $0.5 R_{200}$ (такой радиус использован в [5]). Также нами оценена разница величин первой и четвертой по яркости галактик $\Delta M_{1,4}$. Согласно [5], критерий $\Delta M_{1,4} \geq 2.5$ позволяет в первом приближении найти реликтовые группы среди систем с массами $M_{200} < 1.43 \times 10^{14} M_\odot$. Концентрация галактик определялась как внутренняя плотность галактик Σ_5 , вычисленная в границах расстояния пятой галактики ярче $M_K = -23^m3$ от центра системы. В качестве него принималась самая яркая галактика системы, которая располагается, как правило, вблизи центра области рентгеновского излучения. Для NGC 3847, являющейся двойной группой, и NGC 5594, ярчайшая галактика которой находится не в центре области рентгеновского излучения, мы взяли центроид галактик; у таких систем концентрации не определены. У бедных групп галактик UGC 07132, MKW 1s и NGC 1132 не оказалось

пяти галактик ярче -23^m3 , поэтому для них концентрации также не определены. Согласно [9], подобная концентрация галактик чувствительна к возрасту звездного населения систем галактик, оцененному в этой работе из полуаналитических моделей — чем больше концентрация галактик, тем больше возраст звездного населения галактик, составляющих систему.

Зависимость количества галактик в системах от концентрации и от разницы звездных величин первой и четвертой по яркости галактик в фильтре K приведена на рис. 2а и 2б соответственно. Отметим, что количество галактик (богатство) систем коррелирует с концентрацией: большая концентрация галактик в центральных областях систем галактик соответствует большему богатству. Кроме этого, мы определили, что количество галактик в системах коррелирует также с дисперсией лучевых скоростей и рентгеновской светимостью, а, значит, и с массой систем. Можно сделать вывод, что из изучаемых в данной работе характеристик групп галактик концентрация галактик наиболее чувствительна к их массе. Зависимость между богатством системы и разностью звездных величин $\Delta M_{1,4}$ (рис. 2б) позволяет выделить двенадцать кандидатов в реликтовые группы с $\Delta M_{1,4} > 2.5$ (прямая линия).

На рис. 3а показана зависимость между концентрацией галактик и разностью звездных величин $\Delta M_{1,4}$: чем меньше $\Delta M_{1,4}$, тем больше концентрация галактик и богаче, массивнее система. На этот факт указывают также авторы в работе [27], рассматривая разности звездных величин $\Delta M_{1,2}$.

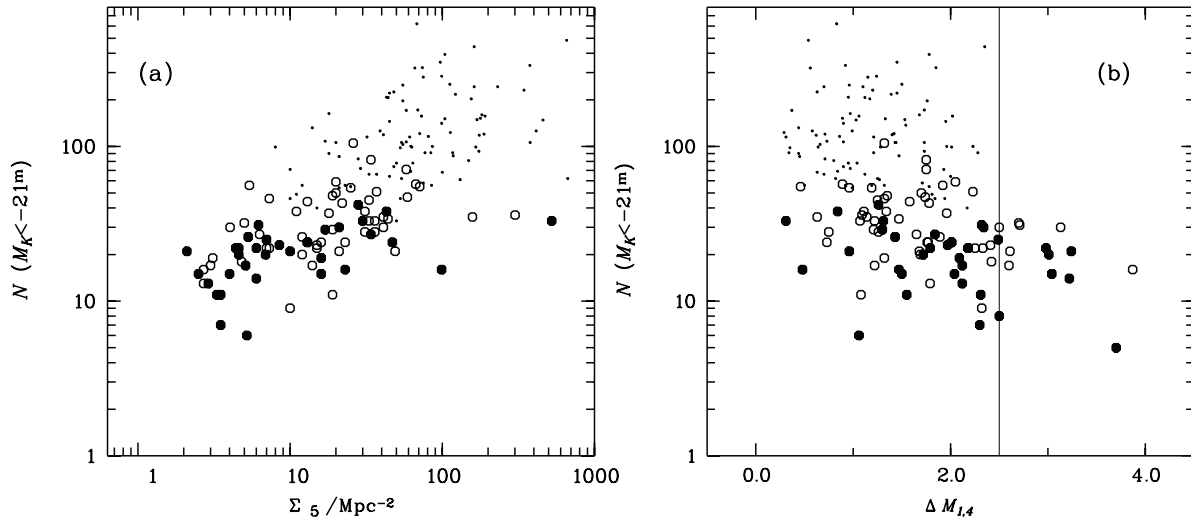


Рис. 2. Зависимость количества галактик ($M_K < -21^m$) (а) от концентрации галактик (внутренней плотности), (б) от разности звездных величин первой и четвертой по яркости галактик. Обозначения те же, что и на предыдущем рисунке. Прямая линия соответствует $\Delta M_{1,4}=2.5$.

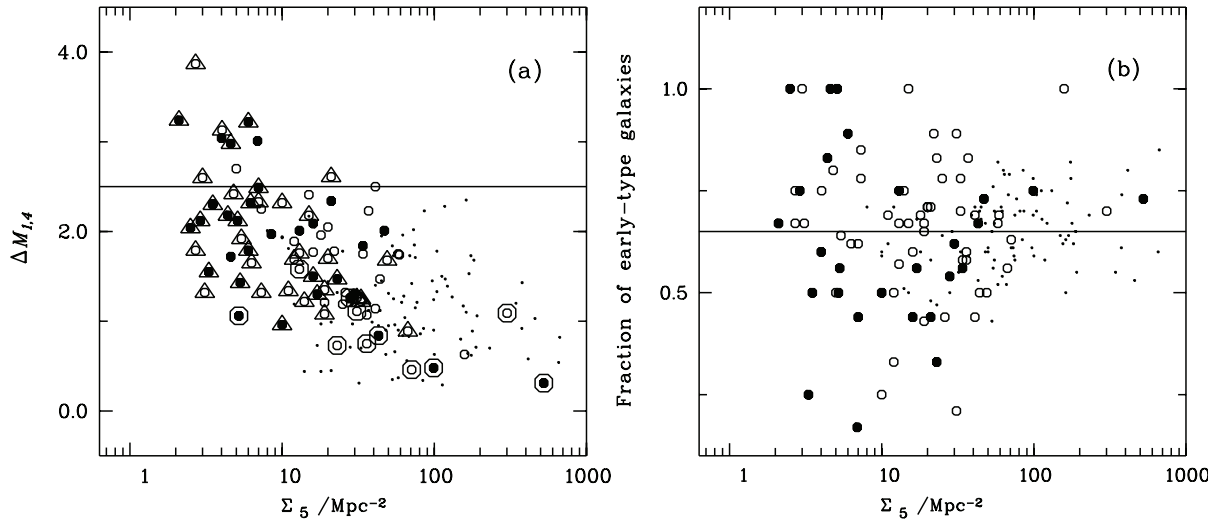


Рис. 3. Зависимость разности звездных величин $\Delta M_{1,4}$ (а) и доли галактик ранних типов (б) от концентрации галактик. Обозначения те же, что и на предыдущем рисунке. Большими треугольниками показаны динамически «старые» с вероятностью выше 50% системы галактик, большими кругами — динамически «молодые» с вероятностью выше 50% системы галактик. Прямая линия на панели (а) соответствует $\Delta M_{1,4}=2.5$, на панели (б) — средней доле галактик ранних типов 0.65 ± 0.01 .

Таким образом, полученная нами зависимость является трехпараметрической и связывает богатство (массу), концентрацию и разность звездных величин первой и четвертой по яркости галактик систем галактик. На диаграмме $\Delta M_{1,4}-\Sigma_5$ в левом верхнем углу находятся реликтовые бедные системы галактик, а нижнем правом — богатые скопления галактик («молодые» системы).

Группы относятся к «старым», если они накопили 50% массы гало на $z = 1$, и к «молодым» — если меньше 30%. Для того чтобы определить количественно показатели датировки возраста си-

стем галактик, мы воспользовались модельными расчетами [7]. В этой работе по двум параметрам, определяемым из данных в оптическом диапазоне (светимость ярчайшей галактики группы в фильтре r и $\Delta M_{1,4}$ или $\Delta M_{1,2}$), рассчитаны области расположения на соответствующих диаграммах «старых» и «молодых» групп с массой $M_{200} > 10^{13} M_{\odot}$ и вероятностные оценки датировки возраста. На рис. За сдвоенными кругами (большой с маленьким внутри) показаны группы галактик, которые «молоды» с вероятностью больше 40%, а большими треугольниками — группы, которые можно отнести

к «старым» с такой же вероятностью. У групп галактик без больших значков возраст надежно не определяется.

Мы нашли семь систем галактик, которые являются «старыми» системами с вероятностью 50% и выше. У одной из них ярчайшая галактика имеет пекулярную скорость больше 100 км с^{-1} относительно средней лучевой скорости системы, то есть система динамически активна. Из оставшихся шести для двух нет оценок потока рентгеновского излучения. Кандидатами в классические реликтовые группы являются три системы галактик: NGC 0741, NGC 0533, AWM 4, и группа NGC 6098, в центре которой расположена двойная ярчайшая галактика.

Выше мы пришли к выводу, что доля галактик ранних типов в исследуемых системах слабо меняется с рентгеновской светимостью (см. рис. 1). Распределение доли как функции концентрации галактик показано на рис. 3b. Можно заметить ее незначительную зависимость от концентрации для богатых систем галактик с $\sigma > 420 \text{ км с}^{-1}$, а для изучаемых групп такая зависимость не обнаруживается. Средняя доля по всем системам равна 0.65 ± 0.01 (показано сплошной линией). У систем галактик с $\sigma < 200 \text{ км с}^{-1}$ вариации доли галактик ранних типов значительны: от 0.17 до 1.00.

Таблица 1. Физические характеристики групп галактик

Group	R_{200} , Mpc	z_h	σ , км с^{-1}	N_{-21}	DGR	f_E	Σ_5	$\Delta M_{1,4}$, mag	$L_{0.1-2.4 \text{ keV}}$, $10^{44} \text{ erg с}^{-1}$	M_r^{BCG} , mag	Probability, %	
											«old»	«young»
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
MKW 10	0.360	0.020833	147	6	1.00	0.50	5.2	1.1 (0.7)	0.02	-22.09	11	39
UGC 07132	0.382	0.022715	156	2	1.00	1.00	—	5.0 (4.6)	—	-22.13	74	0
NGC 2965	0.424	0.022468	173	7	0.25	0.50	3.5	2.3 (2.0)	—	-21.74	39	10
MKW 01s	0.439	0.017565	179	5	0.50	1.00	—	3.7 (3.2)	0.01	-22.14	74	0
MKW 12	0.471	0.019761	192	16	0.44	0.33	23.0	1.5 (1.5)	—	-21.87	39	10
NGC 1132	0.514	0.023507	210	8	0.86	1.00	—	2.5 (3.8)	0.10	-22.92	52	5
HCG 042	0.561	0.012588	228	11	—	—	3.5	2.3	0.01	-22.83	23	28
IC 2476	0.594	0.026198	243	17	1.27	1.00	5.1	2.1 (1.6)	—	-22.15	39	10
AWM 3	0.661	0.014878	269	11	1.12	0.25	3.3	1.6 (1.4)	—	-21.71	39	10
NGC 4325	0.663	0.025386	271	15	1.44	1.00	2.5	2.0 (2.3)	0.15	-22.25	39	10
NGC 5223	0.663	0.024834	271	19	1.33	0.44	16.0	2.1 (2.0)	0.06	-22.59	23	28
NGC 3022	0.676	0.020959	276	15	—	—	16.0	1.5	—	-22.27	39	10
MKW 05	0.705	0.024858	288	13	1.00	0.75	2.9	2.1 (1.7)	—	-22.46	39	10
NGC 5129	0.710	0.023402	290	20	0.90	0.17	6.9	3.0 (2.4)	0.09	-22.73	23	28
AWM 2	0.718	0.022761	293	22	0.60	0.83	4.4	2.2 (1.6)	—	-22.12	39	10
NGC 0080	0.726	0.019098	296	33	0.95	0.62	30.0	1.3 (1.7)	0.07	-23.09	23	28
NGC 5306	0.746	0.024732	305	14	—	—	6.0	3.2	0.05	-23.41	52	5
NGC 5627	0.768	0.026682	314	25	0.69	0.44	7.0	2.5 (1.8)	0.02	-22.16	39	10
IC 0186	0.778	0.026023	318	23	—	—	8.5	2.0	0.02	-22.78	23	28
NGC 1016	0.789	0.022581	322	24	1.21	0.75	13.0	2.0 (1.7)	—	-23.23	23	28
MKW 01	0.792	0.020791	323	16	1.18	0.75	99.0	0.5 (0.4)	—	-21.65	11	39
NGC 2832	0.810	0.023044	331	30	1.56	0.44	21.0	2.3 (1.9)	0.10	-22.87	23	28
SS2b 164	0.818	0.023813	334	20	—	—	4.6	1.7	0.04	-22.66	23	28
UGC 07115	0.818	0.022199	334	22	0.71	0.89	6.0	1.8 (1.6)	0.04	-21.76	39	10

Таблица 1. (Продолжение)

Group	R_{200} , Mpc	z_h	σ , km s ⁻¹	N_{-21}	DGR	f_E	Σ_5	$\Delta M_{1,4}$, mag	$L_{0.1-2.4 \text{ keV}}$, 10 ⁴⁴ erg s ⁻¹	M_r^{BCG} , mag	Probability, %	
											«old»	«young»
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
NGC 2783	0.848	0.022151	346	15	1.00	0.60	4.0	3.0(1.8)	—	-22.56	23	28
UGC 02005	0.862	0.022342	352	26	0.79	0.56	5.3	1.4(1.0)	0.04	-21.80	39	10
NGC 0741*	0.903	0.018416	368	22	1.87	1.00	4.6	3.0(3.0)	0.04	-23.35	52	5
NGC 2563	0.907	0.015701	369	29	0.95	0.56	17.0	1.3(1.4)	0.05	-21.96	39	10
NGC 5171	0.908	0.023000	371	38	0.54	0.67	43.0	0.8(0.8)	0.10	-21.82	11	39
NGC 3158	0.918	0.022630	375	24	0.88	0.73	47.0	2.0(1.5)	0.03	-22.77	23	28
NGC 7237	0.919	0.026102	376	42	0.48	0.54	28.0	1.3(0.9)	0.06	-22.08	11	39
IC 5357	0.933	0.022444	381	21	1.07	0.50	10.0	1.0(1.2)	0.03	-22.28	39	10
NGC 7436B	0.937	0.024720	383	27	0.38	0.56	34.0	1.8(1.4)	—	-23.01	23	28
NGC 0533*	0.991	0.018411	404	21	1.15	0.67	2.1	3.2(2.6)	0.07	-22.82	52	5
HCG 062	1.001	0.014345	407	31	—	—	6.2	2.3	0.16	-22.37	39	10
NGC 0070	1.016	0.022645	415	33	1.40	0.73	524.0	0.3(0.8)	0.09	-22.25	11	39
$z > 0.027$												
A 1279	0.450	0.054322	185	9	—	0.25	10.0	2.3(2.7)	—	-21.61	52	5
A 1828W	0.500	0.063953	207	21	—	0.71	21.0	2.6(2.9)	—	-23.34	52	5
A 1228A	0.570	0.035055	216	24	0.86	0.83	23.0	0.7(0.8)	—	-22.22	11	39
RXC J1122	0.570	0.055119	237	18	—	0.80	4.8	2.4(2.3)	0.06	-22.02	39	10
A 1257	0.580	0.034588	242	11	0.48	0.43	19.0	1.1(1.1)	—	-21.67	39	10
UGC 05088	0.604	0.027622	247	13	0.75	0.67	2.7	1.8(1.4)	0.02	-21.80	39	10
A 0999	0.610	0.031866	248	22	0.52	0.67	15.0	2.2(1.9)	0.03	-22.31	39	10
Anon 2	0.610	0.070542	253	28	—	0.21	31.0	1.3(1.0)	—	-22.26	39	10
NGC 6159	0.650	0.031320	266	17	1.10	1.00	3.0	2.6(2.2)	0.06	-22.31	39	10
A 1016	0.650	0.032178	267	24	0.20	0.57	13.0	1.8(1.8)	—	-22.17	39	10
RXC J1206	0.650	0.065786	269	23	—	1.00	15.0	2.4(2.4)	0.14	-22.89	23	28
A 2067	0.680	0.072938	286	24	—	0.60	16.0	1.8(1.8)	0.44	-22.58	23	28
NGC 5758	0.710	0.029923	291	38	0.83	0.89	31.0	1.1(1.0)	0.07	-21.91	11	39
RXC J1057	0.720	0.035208	297	20	0.58	0.33	12.0	1.7(1.7)	0.03	-22.20	39	10
NGC 5594**	0.770	0.037372	316	31	1.05	0.83	—	2.7(2.2)	0.10	-22.45	39	10
A 1461	0.760	0.053962	317	17	—	0.75	14.0	1.2(1.0)	—	-22.38	39	10
RXC J0844	0.770	0.054858	320	22	—	0.78	7.3	2.2(2.2)	0.08	-22.87	23	28
A 1534	0.770	0.069848	322	37	—	0.69	18.0	2.0(1.9)	—	-23.06	23	28
Sh 166	0.780	0.050043	323	33	—	0.70	33.0	1.2(1.1)	—	-22.32	39	10
A 1775A	0.780	0.065591	324	33	—	0.58	36.0	1.1(1.1)	—	-22.57	23	28
RXC J1205	0.780	0.037400	325	19	1.20	0.67	3.1	1.3(1.0)	0.20	-21.30	27	10
NGC 6098*	0.820	0.030936	335	16	1.24	0.75	2.7	3.9(3.9)	0.06	-22.52	52	5

Таблица 1. (Продолжение)

Group	R_{200} , Mpc	z_h	σ , km s ⁻¹	N_{-21}	DGR	f_E	Σ_5	$\Delta M_{1,4}$, mag	$L_{0.1-2.4 \text{ keV}}$, 10 ⁴⁴ erg s ⁻¹	M_r^{BCG} , mag	Probability, %	
											«old»	«young»
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
A 1828E	0.800	0.063583	335	21	—	0.50	49.0	1.67 (1.6)	—	-22.33	39	10
A 1177	0.822	0.032159	337	22	1.28	0.62	7.0	2.3 (1.9)	0.11	-22.43	39	10
A 2019	0.820	0.081176	345	43	—	0.89	22.0	1.8 (1.8)	0.15	-22.75	23	28
A 2162	0.840	0.032147	346	26	0.45	0.50	12.0	1.9 (1.8)	0.04	-22.82	23	28
A 1228B	0.840	0.042892	347	32	0.53	0.50	5.0	2.7 (2.3)	0.06	-22.84	23	28
A 1275	0.836	0.062750	348	44	—	0.67	13.0	1.6 (0.8)	0.22	-22.08	11	39
A 2152	0.860	0.044316	354	71	0.68	0.67	58.0	1.8 (1.5)	0.13	-22.53	23	28
NGC 3119	0.867	0.029657	355	30	0.47	0.44	41.0	2.5 (2.4)	0.04	-23.10	23	28
J1350	0.860	0.076439	359	57	—	0.56	67.0	0.9 (1.1)	—	-22.43	39	10
A 2149	0.870	0.065253	361	51	—	0.83	37.0	2.2 (2.3)	0.42	-23.02	23	28
A 1781	0.870	0.062264	362	48	—	0.65	19.0	1.4 (1.2)	—	-22.48	39	10
NRGb 004	0.884	0.028090	362	28	0.76	0.60	36.0	0.8 (0.8)	0.18	-21.70	11	39
A 0757	0.889	0.051319	368	55	—	0.63	71.0	0.5 (0.4)	0.46	-22.16	11	39
NGC 3847**	0.907	0.032458	372	54	0.39	0.62	—	—	—	—	—	—
RXC J1511	0.910	0.038990	374	27	0.68	0.62	6.3	1.6 (1.5)	0.09	-22.20	39	10
Anon 3	0.910	0.067960	380	45	—	0.78	33.0	1.2 (1.4)	—	-22.49	39	10
AWM 4*	0.927	0.031827	380	30	1.35	0.75	4.0	3.1 (2.5)	0.23	-23.01	52	5
RXC J1654	0.920	0.057075	383	50	—	0.71	20.0	1.7 (1.5)	0.18	-22.24	39	10
RXC J1010	0.930	0.045877	384	56	0.79	0.64	5.4	1.9 (2.1)	0.02	-22.31	39	10
A 1291A	0.940	0.051349	391	46	—	0.85	7.3	1.3 (1.6)	0.22	-22.00	39	10
A 1318	0.950	0.056419	394	54	—	0.78	25.0	1.2 (1.2)	0.04	-22.81	23	28
A 1291B	0.950	0.057161	396	38	—	0.69	11.0	1.3 (1.3)	—	-22.17	39	10
Апоп 4	0.960	0.061053	397	34	—	0.50	44.0	1.5 (1.4)	—	-22.99	23	28
AWM 1	0.982	0.028652	402	35	0.60	0.69	41.0	1.1 (1.1)	—	-22.68	23	28
A 1452	0.980	0.061649	408	29	—	0.67	19.0	1.2 (1.2)	—	-22.78	23	28
J1053B	1.000	0.073762	420	82	—	0.58	34.0	1.8 (1.6)	—	-23.00	23	28

* Кандидат в реликтовые группы.

** В качестве центра взят центронд галактик.

В таблице 1 представлены результаты наших измерений физических характеристик исследуемых в данной работе групп галактик (в порядке увеличения дисперсии лучевых скоростей). В колонке (1) дано имя системы (группы галактик из [13] названы по ярчайшей галактике), в колонке (2) — радиус R_{200} в Мпк, гелиоцентрическое красное смещение приведено в колонке (3), в колонке (4) дана σ_{200} — дисперсия лучевых скоростей с космологической

поправкой $(1+z)^{-1}$ в пределах R_{200} , в колонке (5) — число галактик ярче $M_K = -21^m$ в области того же радиуса, в колонке (6) дано численное отношение ярких карликовых галактик красной последовательности ($M_r = [-18^m5, -16^m5]$) к гигантским галактикам ($M_r < -18^m5$) в пределах радиуса R_{200} , в колонке (7) — доля ранних галактик среди галактик ярче $M_K = -23^m3$ в пределах того же радиуса, в колонке (8) — концентрация

галактик, измеренная как плотность галактик (Σ_5), вычисленная в области, ограниченной расстоянием пятой галактики ярче $M_K = -23^m.3$ от центра системы, в колонке (9) — разность звездных величин первой и четвертой по яркости галактики в пределах $0.5 R_{200}$ фильтре K (в скобках в фильтре r), в колонке (10) даны рентгеновские светимости в полосе 0.1–2.4 кэВ (соответствующие ссылки см. в работах [15, 22, 24, 25]), абсолютная звездная величина ярчайшей галактики (BCG) в фильтре r , вычисленная из r_{pet} (SDSS) дана в колонке (11), в колонке (12) приведена вероятность (в процентах), с которой группу можно отнести к «старым», в колонке (13) — вероятность, что группа является «молодой».

3. СОСТАВНАЯ ФУНКЦИЯ СВЕТИМОСТИ

Дифференциальная функция светимости (ФС) $\Phi(M)dM$ определяет число галактик, имеющих звездные величины в интервале $[M, M + dM]$. ФС характеризует эволюцию галактик: если этот процесс везде происходит одинаково, то ФС не должны сильно различаться как между группами галактик, так и между группами галактик и полем. Для аппроксимации ФС часто используется функция, введенная Шехтером [28]:

$$\Phi(M) = 0.4 \ln 10 \Phi^* [10^{0.4(M_K^* - M)}]^{(1+\alpha)} \times \exp[-10^{0.4(M_K^* - M)}],$$

где параметр α определяет наклон ФС на слабых величинах, M^* — характеристическая величина, отражающая «излом» ФС, а Φ^* — нормировочная константа. При ее построении для каждой группы были сделаны подсчеты галактик с интервалом $0^m.5$. Комбинируя индивидуальные функции светимости скоплений галактик [29], мы получили составную ФС для исследуемых групп галактик с $z < 0.027$, поскольку для более далеких групп галактик предел в ФС будет слабее. Эту составную ФС мы аппроксимировали в интервале $[-26^m.0, -20^m.5]$, минимизируя χ^2 , функцией Шехтера с параметрами $M_K^* = -24^m.85 \pm 0.15$, $\alpha = -0.97 \pm 0.05$ ($\chi^2/\text{d.o.f.} = 21.8/9$). Ошибки определены как \sqrt{dN} , где dN — число галактик в интервале dM . Полученные нами ранее параметры функции Шехтера в интервале $[-26^m.0, -21^m.5]$ для сверхскопления Leo ($z \sim 0.038$) приведены в [24], для сверхскопления Hercules ($z \sim 0.036$) — в [25].

На рис. 4 приведены построенная нами дифференциальная составная ФС групп галактик ($z < 0.027$) и ФС богатого сверхскопления Hercules, нормированная к ФС групп галактик. Параметры функции Шехтера для рассматриваемой выборки

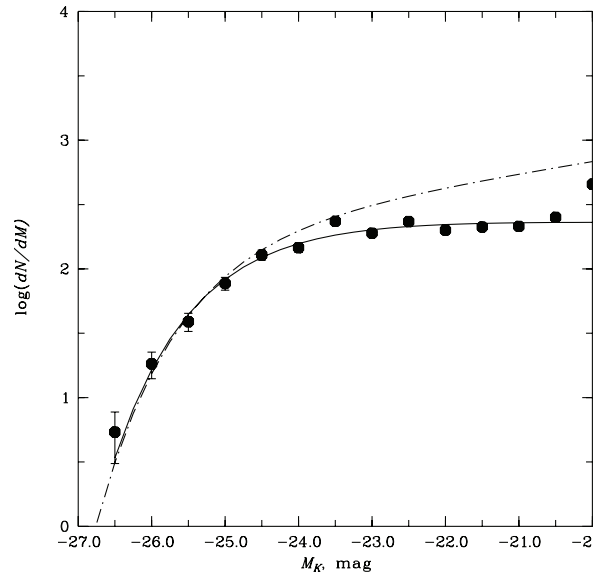


Рис. 4. Составная функция светимости групп галактик ($z < 0.027$) в интервале $[-26^m.0, -20^m.5]$ в полосе K (сплошная линия). Составная функция светимости сверхскопления Hercules показана прерывистой линией.

и опубликованные ранее для упомянутых выше скоплений галактик приведены в таблице 2. Анализ рис. 4 и данных таблицы 2 показывает, что по сравнению со скоплением Coma и со сверхскоплениями в исследуемых группах в выбранном интервале звездных величин наблюдается меньше галактик, так же, как и в поле (параметр $\alpha < -1$). Рост числа слабых галактик начинается с $M_K = -20^m$.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Определение динамического состояния и эволюции систем галактик — важный шаг в понимании теории образования галактик и их систем путем иерархического сгущивания. Согласно моделированию эволюции темной материи, галактики, например, в компактных группах должны слиться в одну большую галактику за один миллиард лет (например, [30]). Большая разница в звездных величинах первой и четвертой по яркости галактик может служить индикатором динамического возраста группы. В данной работе мы исследовали различные характеристики в близких системах галактик $z < 0.027$, системах галактик, расположенных в областях сверхскоплений галактик и имеющих дисперсии лучевых скоростей $\sigma < 420 \text{ км с}^{-1}$. Основной целью было изучение вариаций таких параметров как доля галактик ранних типов, ОКГ, концентрация галактик в центральных областях, разность звездных величин первой и четвертой по яркости галактик в зависимости от параметров, характеризующих массу систем галактик (рентгеновская светимость или богатство) для поиска их

Таблица 2. Параметры функции светимости

Sample	N	M^* , mag	α	Approximation interval	Ref
Groups ($z < 0.027$)	36	-24.85 ± 0.15	-0.97 ± 0.05	-26^m0 to -20^m5	this work
Groups ($z < 0.027$)	36	-24.75 ± 0.17	-0.92 ± 0.07	-26^m0 to -21^m5	this work
Coma	1	-24.34 ± 0.34	-1.17 ± 0.13	-26^m0 to -20^m5	this work
Hercules	13	-24.99 ± 0.27	-1.23 ± 0.08	-26^m0 to -21^m5	[24]
Leo	14	-24.90 ± 0.30	-1.14 ± 0.11	-26^m0 to -21^m5	[25]
Field	10	-24.21 ± 0.32	-0.87 ± 0.21	-26^m0 to -21^m5	[25]

эволюционных изменений. Нами не обнаружены различия в свойствах исследуемых выборок групп галактик, расположенных в разных областях. Кроме того, нами получены следующие результаты для изучаемых нами систем галактик:

1. Средняя доля ярких, $M_K < -23^m3$, галактик ранних типов в пределах R_{200} практически не меняется с богатством, массой или рентгеновской светимостью и равна 0.65 ± 0.01 . В то же время у бедных групп галактик с $\sigma < 300$ км с⁻¹ наблюдаются наибольшие вариации этого параметра.

2. Отношение числа ярких карликовых галактик ($M_r = [-18^m5, -16^m5]$) к числу гигантских ($M_r < -18^m5$), также в пределах радиуса R_{200} , зависит от рентгеновской светимости, но не зависит от богатства или дисперсии лучевых скоростей. Среди групп галактик наблюдается шесть бедных систем галактик с самым низким ОКГ.

3. Внутренняя плотность галактик (концентрация) Σ_5 , вычисленная в пределах расстояния пятой по яркости галактики ярче -23^m3 от центра рассматриваемой системы, коррелирует с дисперсией лучевых скоростей галактик, богатством и с рентгеновской светимостью, то есть чувствительна к массе систем галактик.

4. Зависимость $\Delta M_{1,4} - \Sigma_5$ ($M_K < -23^m3$) позволяет найти на соответствующей диаграмме область расположения динамически «молодых» и «старых» систем галактик. Вероятностные оценки датировки их возраста делаются по модельным расчетам, учитывающим светимость ярчайшей галактики и $\Delta M_{1,4}$ [7]. По этим критериям мы выделили семь кандидатов в реликтовые группы с массой $0.05 \times 10^{13} M_\odot \leq M_{200} \leq 1.2 \times 10^{14} M_\odot$: A 1279, A 1828W, NGC 0533, NGC 0741, NGC 5306, NGC 6098, AWM 4. Если учесть, что для двух групп нет сведений о рентгеновской светимости, а у одной группы ярчайшая галактика имеет пекулярную лучевую скорость относительно

средней лучевой скорости системы, только четыре кандидата — NGC 0533, NGC 0741, AWM 4 и NGC 6098 — являются надежными.

5. Составная функция светимости систем галактик с $z < 0.027$ аппроксимирована функцией Шехтера в интервале $M_K = [-26^m0, -20^m5]$. Нами получены ее параметры: $M_K^* = -24^m85 \pm 0.15$, $\alpha = -0.97 \pm 0.05$, которые позволяют сделать вывод, что в заданном интервале M_K в группах галактик содержится меньше галактик ($\alpha < 1$) (как в поле), чем в богатом скоплении Coma или в областях сверхскоплений галактик.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была выполнена с использованием баз данных NASA/IPAC Extragalactic Database (NED, <http://nedwww.ipac.caltech.edu>), Sloan Digital Sky Survey (SDSS, <http://www.sdss.org>) и Two Micron AllSky Survey (2MASS, <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/releases/allsky/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. P. Huchra and M. J. Geller, *Astrophys. J.* **257**, 423 (1982).
2. R. Nolthenius and S. D. M. White, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **225**, 505 (1987).
3. M. Ramella, M. J. Geller, and J. P. Huchra, *Astrophys. J.* **344**, 57 (1989).
4. A. Dariush, H. G. Khosroshahi, T. J. Ponman, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **382**, 433 (2007).
5. A. A. Dariush, S. Raychaudhury, T. J. Ponman, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **405**, 1873 (2010).
6. L. R. Jones, T. J. Ponman, A. Horton, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **343**, 627 (2003).
7. M. Raouf, H. G. Khosroshahi, T. J. Ponman, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **442**, 1578 (2014).
8. A. J. Deason, C. Conroy, A. R. Wetzel, and J. L. Tinker, *Astrophys. J.* **777**, 154 (2013).

9. T. Zapata, J. Perez, N. Padilla, and P. Tissera, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **394**, 2229 (2009).
10. A. L. B. Ribeiro, M. Trevisan, P. A. A. Lopes, and A. C. Schilling, *Astron. and Astrophys.* **505**, 521 (2009).
11. S. Zarattini, M. Girardi, J. A. L. Aguerri, et al., *Astron. and Astrophys.* **586**, A63 (2016).
12. S. Zarattini, J. A. L. Aguerri, R. Sánchez-Janssen, et al., *Astron. and Astrophys.* **581**, A16 (2015).
13. M. Ramella, W. Boschin, M. J. Geller, et al., *Astron. J.* **128**, 2022 (2004).
14. B. M. Poggianti, V. Desai, R. Finn, et al., *Astrophys. J.* **684**, pp. 888–904 (2008).
15. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **71**, 257 (2016).
16. M. L. Balogh and S. L. McGee, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **402**, L59 (2010).
17. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182**, pp. 543–558 (2009).
18. T. H. Jarrett, T. Chester, R. Cutri, et al., *Astron. J.* **119**, 2498 (2000).
19. M. A. Strauss, D. H. Weinberg, R. H. Lupton, et al., *Astron. J.* **124**, 1810 (2002).
20. N. Visvanathan and A. Sandage, *Astrophys. J.* **216**, 214 (1977).
21. F. G. Kopylova, *Astrophysical Bulletin* **68**, 253 (2013).
22. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **64**, 1 (2009).
23. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **70**, 123 (2015).
24. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astronomy Letters* **37**, 219 (2011).
25. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astronomy Letters* **39**, 1 (2013).
26. G. O. Abell, *Astrophys. J. Suppl.* **3**, 211 (1958).
27. A. P. Hearin, A. R. Zentner, J. A. Newman, and A. A. Berlind, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **430**, 1238 (2013).
28. P. Schechter, *Astrophys. J.* **203**, 297 (1976).
29. M. Colless, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **237**, 799 (1989).
30. J. E. Barnes, *Nature* **338**, 123 (1989).

Evolution of Galaxy Groups

F. G. Kopylova and A. I. Kopylov

We study the variations of the properties of groups of galaxies with dynamical masses of $10^{13} M_{\odot} < M_{200} < 10^{14} M_{\odot}$, represented by two samples: one has redshifts of $z < 0.027$ and is located in the vicinity of the Coma cluster, the other has $z > 0.027$, and is located in the regions of the following superclusters of galaxies: Hercules, Leo, Bootes, Ursa Major, and Corona Borealis. Using the archived data of the SDSS and 2MASX catalogs, we determined the concentration of galaxies in the systems by measuring it as the inner density of the group within the distance of the fifth closest galaxy from the center brighter than $M_K = -23^m3$. We also measured the magnitude gap between the first and the fourth brightest galaxies ΔM_{14} located within one half of the selected radius R_{200} , the fraction of early-type galaxies, and the ratio of bright dwarf galaxies ($M_r = [-18^m5, -16^m5]$) to giant galaxies ($M_r < -18^m5$) (DGR) within the radius R_{200} . The main aim of the investigation is to find among these characteristics the ones that reflect the evolution of groups of galaxies. We determined that the ratio of bright dwarf galaxies to early-type giant galaxies on the red sequence depends only on the x-ray luminosity: the DGR increases with luminosity. The fraction of early-type galaxies in the considered systems is equal, on average, to 0.65 ± 0.01 , and varies significantly for galaxies with $\sigma_{200} < 300 \text{ km s}^{-1}$. Based on the luminosity of the brightest galaxy, the magnitude gap between the first and the fourth brightest galaxies in the groups, and on model computations of these parameters, we selected four fossil group candidates: AWM 4, NGC 0533, NGC 0741, and NGC 6098 (where the brightest galaxy is a double). We observe no increase in the number of faint galaxies (the α parameter of the Schechter function is less than 1) in our composite luminosity function (LF) for galaxy systems with $z < 0.027$ in the $M_K = [-26^m, -21^m5]$ range, whereas earlier we obtained $\alpha > 1$ for the LF of the Hercules and Leo superclusters of galaxies.

Keywords: *galaxies: evolution — galaxies: groups: general*